

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Частина 1

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів
спеціальності 131 «Прикладна механіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1 [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньо-професійної програми «Технології машинобудування» та освітньо-наукової програми «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Ю.В.Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Електронні текстові дані (1 файл: 10,2 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 27.02.2020 р.)
за поданням Вченої ради Механіко-машинобудівного інституту (протокол № 7 від 24.02.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1

Укладачі ***Петраков Юрій Володимирович***, д-р техн. наук, проф.
Сохань Сергій Васильович, д-р. техн. наук, доц.
Фролов Володимир Костянтинович, канд. техн. наук, доц.
Кореньков Володимир Миколайович, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
редактор ***Петраков Юрій Володимирович***, д-р техн. наук, проф.

Рецензент: ***Клименко С. А.***, д-р техн. наук, проф.

У навчальному посібнику розглянуто сучасні технологічні процеси механічної обробки деталей складної форми на сучасних верстатах з ЧПК. Розглядається методи лезової і алмазно-абразивної обробки, оброблюваність сучасних важкооброблюваних матеріалів, підходи до оцінки шорсткості оброблених деталей. Велика увага приділяється процесам оброблення деталей авіаційної промисловості, зокрема, лопаток газотурбінних двигунів. Надано технології та інструментальне забезпечення виготовлення деталей в металургійній промисловості. Звертається увага на квазістаціонарність процесів різання при виготовленні деталей складної форми, виявляються фактори, що впливають на зношування інструментів, вивчається структура матеріалів з позицій полегшення їх механічної обробки.

Посібник допоможе студентові у підготовці до занять, самостійному виконанні контрольних завдань, оволодінні методикою проектування технологічних процесів механічної обробки деталей складної форми в рамках навчальної дисципліни «Процеси і технології формоутворення» в інженерних та технічних закладах вищої освіти.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
<i>Розділ 1. ОБРОБЛЮВАНІСТЬ АВІАКОСМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.</i>	
ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ.....	8
1.1. Сучасні авіакосмічні сплави і композиційних матеріали міжнародних виробників.....	9
1.2. Оброблюваність різанням сучасних авіакосмічних сплавів і композиційних матеріалів міжнародних виробників.....	13
1.3. Класифікація за оброблюваністю різанням авіакосмічних сталей і сплавів, виготовлених за національними стандартами.....	21
1.4. Інструментальні матеріали.....	28
1.5. Особливості обробки різанням авіакосмічних сталей і сплавів...	51
<i>Розділ 2. СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ СТРУКТУРИ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ.....</i>	
	54
<i>Розділ 3. ТИПОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ.....</i>	
	76
3.1. Концепція наскрізної цифрової підтримки життєвого циклу лопаток турбіни.....	80
3.2. Технології виготовлення виливків лопаток турбіни.....	85
3.3. Варіанти технологій і способи шліфування лопаток турбіни.....	94
3.4. Типова технологія виготовлення лопатки турбіни.....	121
3.5. Типова технологія виготовлення лопатки компресора.....	140
3.6. Групові технології й автоматизоване виробництво лопаток.....	164
<i>Розділ 4. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ (досвід ВАТ "Мотор-Січ").....</i>	
	176
4.1. Технології застосування алмазного вигладжування.....	178
4.2. Ультразвукове зміцнення деталей ГТД сталевими кульками.....	187
4.3. Пневмодробоструминне зміцнення деталей ГТД.....	189
4.4. Віброобробка лопаток компресора.....	190
4.5. Гідродробоструминне зміцнення деталей ГТД.....	192
4.6. Магнітно-абразивне полірування деталей ГТД.....	196
4.7. Пневмоімпульсна обробка тонкостінних валів ГТД.....	197
4.8. Зміцнення валів ГТД пневмороторним методом.....	199
4.9. Абразивне полірування дисків ГТД на сизалевих кругах.....	200
4.10. Обробка деталей ГТД у псевдоожигеному шарі абразиву (турбоабразивна обробка).....	202

Розділ 5. ТЕХНОЛОГІЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З КЕРАМІЧНИХ, ПОЛІМЕРНИХ І МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	206
5.1. Класифікація технічної кераміки, галузі застосування.....	206
5.2. Оброблюваність деталей з технічної кераміки.....	209
5.3. Особливості розрахунку міжопераційних припусків при оброб- ці виробів з керамічних матеріалів.....	219
5.4. Технологія, обладнання і методи алмазно-абразивної обробки керамічних деталей типу «куля».....	225
5.5. Актуальність використання ПКМ і МПКМ, їх класифікація, особливості механічної обробки.....	237
5.6. Технології механічної обробки деталей з ПКМ і МПКМ.....	256
5.7. Технології алмазної обробки деталей з ПКМ і МПКМ.....	273
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	285

ВСТУП

Технології формоутворення деталей складної форми, які представлені в рамках дисципліни "Технологія обробки спеціальних деталей", слід розглядати як спеціальну частину загальної дисципліни "Технології машинобудування". Вивчення цього курсу базується на знаннях з таких дисциплін, як "Теорія різання", "Інструментальне забезпечення технологічних процесів", "Технологічне оснащення", "Технологічні процеси для верстатів з ЧПК", "Основи автоматизації машинобудування" та інші.

Набуті знання використовуються студентами під час виконання курсових і дипломних проєктів, надалі – у виробничій діяльності. Під час вивчення дисципліни студенти мають засвоїти терміни, визначення та поняття, які становлять основу професійної мови магістра-механіка за спеціальністю "Прикладна механіка".

Для машинобудування характерним є безперервне підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів деталей машин – їхньої міцності, твердості, ударної в'язкості, стійкості до високих температур й ерозійних середовищ. Збільшення робочих параметрів технічних систем, виникнення нових галузей науки і техніки неминує вести до зростання використання спеціальних матеріалів. Широке застосування в галузях машинобудування таких матеріалів, як жароміцні, високоміцні й корозійностійкі сталі й сплави, керамічні і композиційні матеріали значно підвищує надійність і довговічність деталей машин, але, як правило, ускладнює процеси їх виготовлення. Поява нових видів матеріалів, важкооброблюваних звичайними методами різання, приводить до виникнення нових методів обробки.

Наразі створено велику кількість способів обробки деталей. За видом використовуваної енергії вони діляться на механічні, електричні, теплові й хімічні. Однак процес механічної обробки, тобто процес видалення матеріалу більш твердим різальним інструментом, який рухається по напрямній траєкторії з точністю, необхідною для виробу, залишається найбільш економічним і точним методом обробки, що забезпечує високі експлуатаційні властивості робочої поверхні виробу.

Розвиток технологій механічної обробки матеріалів – ключове завдання базових галузей промисловості, при цьому створення нових і вдосконалення відомих конструкцій різальних інструментів, застосування нових інструментальних матеріалів (швидкорізальні сталі підвищеної зносостійкості, дрібнозернисті тверді сплави, безвольфрамові тверді сплави, надтверді матеріали – НТМ

тощо), а також використання науково обґрунтованих режимів різання є вирішальними факторами в підвищенні періоду стійкості різального інструмента й продуктивності праці під час обробки деталей з різних, в тому числі важкооброблюваних матеріалів. Інтенсивно ведуться пошуки нових резервів, що підвищують ефективність обробки, глибше пізнається процес різання, повніше виявляються фактори, що впливають на зношування інструментів, вивчається структура матеріалів з позицій полегшення їх механічної обробки. Тому застосування інструментів із твердих сплавів і НТМ розглядається як пріоритетний напрямок збільшення продуктивності та надійності обробки і багато в чому визначає економічність виробничих процесів.

Основними тенденціями розвитку процесів механічної обробки є:

- ✓ високошвидкісна – HSM (швидкість різання в 2-3 рази вище, ніж при звичайній обробці) і високопродуктивна – НЕМ (крім підвищеної швидкості різання характеризується також високими значеннями подач) обробка;
- ✓ обробка без охолодження або з мінімальним застосуванням ЗМОТС (наприклад, подача ЗМОТС у розпиленому виді, застосування стислого повітря, твердих змащень);
- ✓ застосування інструментів з функціональними захисними покриттями (покриття на інструментах, оснащених ріжучою частиною з НТМ; покриття на інструментах, оснащених керамікою й твердими сплавами) і модифікованим поверхневим шаром;
- ✓ компенсація динамічних навантажень при обробці різанням (нестабільні механічні властивості матеріалу оброблюваної деталі, змінний припуск на обробку, конструкційні особливості оброблюваних деталей);
- ✓ виключення дискретних методів обробки й поєднання операцій, наприклад, різання й поверхневого пластичного деформування за рахунок кінематики процесу, геометричних параметрів і особливостей конструкції інструмента;
- ✓ багатокоординатна обробка складнопрофільних виробів одним інструментом, обробка інструментом зі змінною різальною вершиною, обробка робочої частини різального інструмента методом обкату;
- ✓ обробка "сирих" сталей, в'язких спеціальних сплавів, наприклад, з аустенітною структурою, литих високоманганових (з підвищеним вмістом Mn) сталей інструментами, оснащеними НТМ;
- ✓ підвищення точності обробки й зниження шорсткості обробленої поверхні за рахунок високої зносостійкості й міцності матеріалу інструмента й керування динамічними явищами, що протікають у зоні обробки.

Тому предметом дисципліни "Технологія обробки спеціальних деталей" є сучасні технології виготовлення механічною обробкою спеціальних деталей,

що мають функціональні поверхні складного профілю (лопаток газотурбінних двигунів, фасонних поверхонь валків, рівчаків калібрів станів холодної прокатки труб, деталей кулько-гвинтових передач, виготовлення деталей типу "куля" з конструкційної кераміки) та з важкооброблюваних матеріалів, в тому числі керамічних, полімерних і металополімерних композиційних матеріалів, із застосуванням методів високошвидкісної й високопродуктивної обробки.

Відтак мета викладання дисципліни полягає у тому, щоб, по-перше, ознайомити студентів із колом проблем, які виникають у зв'язку з необхідністю виготовлення спеціальних деталей, що мають функціональні поверхні складного профілю і з важкооброблюваних матеріалів, а також показати сучасний рівень розвитку технологій їх механічної обробки, і, по-друге, допомогти студентам сформуванню системи компетенцій для розробки технологічних процесів виготовлення деталей складної форми, виготовлених з важкооброблюваних матеріалів, з потрібною точністю та якістю за умови забезпечення максимальної продуктивності, або з мінімальними матеріальними затратами.

Розділ 1. ОБРОБЛЮВАНІСТЬ АВІАКОСМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Нові матеріали, які застосовують у авіакосмічній галузі (ракето- і літакобудування, космічна техніка), виробів електронної техніки, енерго- та хімічного машинобудування, приладобудування, ядерної енергетики й останнім часом в загальному машинобудуванні, як правило, мають особливі фізико-механічні властивості. Зокрема, вони є термостійкими, жаростійкими і жароміцними, зносостійкими, корозійностійкими, стійкими до дії хімікатів. Згаданим вимогам відповідають також різноманітні види технічної кераміки, які все ширше заміщують метали у багатьох галузях промисловості. Під технічною керамікою розуміється клас твердих полікристалічних матеріалів, які отримані спіканням тонкодисперсних порошків і застосовуються у промислових цілях. Разом з тим, застосування нових конструкційних матеріалів потребує створення і освоєння технологій їхньої механічної обробки.

Консультаційною радою з дослідження авіації в Європі (ACARE) у рамках Довгострокових стратегічних цілей програми "Flightpath 2050" затверджені завдання розвитку на період після 2020 року. До 2050 року мають бути досягнені наступні цілі з авіап перевезень:

- зниження до 75% рівня CO₂ на пасажиро-кілометр;
- зниження до 90% рівня NO₂ на пасажиро-кілометр;
- зниження до 65% рівня шуму.

Рішення поставлених завдань потребують поліпшень у всіх трьох областях забезпечення повітряних перевезень: розробки конструкції літального апарату, двигуна, а також управління і операцій повітряного руху (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – області покращення для досягнення стратегічних завдань: авіаконструкції, авіадвигуни, управління повітряним рухом й операціями

Це означає:

- полегшення конструкцій корпусів літальних апаратів і двигунів за рахунок, зокрема застосування мінералополімерних, металополімерних композитів композитів;
- вдосконалення аеродинамічних характеристик;
- більш високий ступінь двоконтурності двигунів (тобто відношення кількості повітря, яке обходить камери згоряння газової турбіни літака до того, що пропускається через них);
- технології обмеженого горіння в камері згоряння двигуна;
- прогресивні матеріали для турбіни авіадвигуна (диски і лопатки).

Сучасні рішення з високоефективного різання авіакосмічних сплавів і композиційних матеріалів, які використовуються сьогодні в авіадвигунобудуванні і авіаконструкціях, пов'язують з прогресом в області розробки різального інструмента, дослідженням зношування інструмента та стану поверхні таких оброблюваних матеріалів, як сплави на основі нікелю, титан і композити. Нові підходи до технологій різання фокусують увагу на ролі гібридних (комбінованих) процесів обробки і стратегіях охолодження для досягнення високої якості обробки – таких як економне охолодження (Minimum Quantity Lubrication – MQL), охолодження під високим тиском, криогенне охолодження. Прогнозуються промислові перспективи їх забезпечення в контексті обробки спеціальних компонентів, які знадобляться в майбутньому.

1.1. Сучасні авіакосмічні сплави і композиційні матеріали міжнародних виробників

Необхідність в удосконаленому аеродинамічному виконанні вимагає поліпшення якості та зниження відхилень у якості виробництва від деталі до деталі. 3D- поліпшена аеродинаміка роторів в зборі з лопатками, лопаток і крильчаток веде до більш складнопрофільної геометрії форми, яку доводиться обробляти. Для сучасних високотемпературних сплавів вимагаються економічно ефективні рішення і методи механічної обробки, які задовольняють високій якості. Тому одним із викликів сучасності є прогноз характеристик оброблюваності прогресивних авіакосмічних сплавів і композиційних матеріалів для корпусів літальних апаратів та авіадвигунів, критична оцінка оброблюваності, зношування інструмента та стану поверхні.

Одною з основних вимог, що впливають на вибір матеріалів і способів виготовлення сучасних авіаконструкцій, є економія пального. Це головна рушійна сила в конструюванні сучасних цивільних літаків. Тому в боротьбі за паливозберігаючі літаки інженери вирішують проблеми ваги і аеродинаміки. На по-

долання цих викликів були спрямовані наукові дослідження і розробки останніх десятиліть в області прогресивних легких металевих сплавів і композиційних матеріалів, а також в області конструювання прогресивних профілів крила і закінцівок крила.

Найбільш широко для масового виробництва деталей авіаконструкцій використовують сплави алюмінію завдяки їх доступності (вміст алюмінію – найбільший у земній корі), легкості, міцності й оброблюваності. Два найбільш використовуваних сучасних високоміцних сплави алюмінію для авіаконструкцій – це, по-перше, сплави 7010 і 7050 системи Al–Zn–Mg–Cu, які мають високу міцність, корозійну тріщиностійкість під навантаженням і в'язкість, тому придатні для важких умов роботи завдяки більш низькій чутливості до термореструктурування і збереженню міцності в більш товстих секціях; і, по-друге, сплави 2024 (сплав Д16) системи Al–Cu–Fe–Mg–Mn–Si, які мають високу міцність і чудовий опір втомленості.

Нещодавно розроблені сплави – це нове покоління алюмолітєвих (Al–Li) сплавів, наприклад, Alcoa 2099 й Constellium AIRWARE™ 2050 – мають низьку густину, чудову корозійну стійкість поряд з хорошим опором втомленості й пошкоджуваності. Ці новітні сплави починають використовуватися в останніх авіаційних програмах, наприклад, Аеробус А320 NEO і А330 NEO. Фірма Airbus Group розробила також сплав Scalmalloy®, який відноситься до алюмомагнійскандієвих (AlMgSc) сплавів другого покоління, і має високі міцність від втоми, корозійну стійкість і чудову зварюваність.

Сплави титану мають середню густину, гарне співвідношення міцності до ваги, чудовий опір окисленню при проміжних температурах, низький коефіцієнт теплового розширення, високу ударну в'язкість і хорошу зварюваність. Сьогодні, все більш і більш просунуті титанові сплави використовуються в Аеробусі А350XWB і Boeing B787 завдяки високій сумісності матеріалів з вуглеволоконними композитами, яка характеризується, наприклад, відсутністю гальванічної корозії на стику матеріалів і низьким тепловим розширенням (наполовину меншим, ніж у алюмінієвих сплавах), через що знижуються термообумовлені навантаження. Традиційно найбільш широко використовувані сплави – це альфа (α), бета (β), альфа-бета (α/β) Ti-6Al-4V (тобто ВТ-6). Бета загартований ВТ-6 обраний в якості стійкого до пошкоджень для роботи в зубчастій рейці, арматурі заднього крила, основних рам центроплану, і т.д. Лист титанового сплаву Ti-3Al-2,5V, який має хорошу пластичність, використовується в якості протиаварійних рам. В контексті застосування для авіахвосту сплав Ti-10V-2Fe-3Al використовувався для заміни високоміцної низьколегованої сталі 4340М на літаку Boeing 777, а наступне покоління високоміцного β -сплаву титана, Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti-5553) використовується в Boeing 787.

За останні 20 років поширилося розуміння доцільності використання прогресивних легких композиційних матеріалів, таких як вуглепластики (пластмаса, зміцнена вуглецевим волокном – CFRP) в якості компонентів для авіаконструкцій. Питома вага композитів в найостанніх авіаційних програмах, таких як Bombardier CS300, Boeing B787, і Аеробус А350 ХВВ, становить відповідно 46, 50 і 52% (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Питома вага авіакосмічних матеріалів в сучасних авіаційних програмах

	Airbus A350 XWB	Boeing B787	Bombardier CS300
Композити	52	50	46
Алюміній	20	20	24
Титан	14	15	8
Сталь	7	10	1
Інше	7	5	21

На рис. 1.2 показана схема основних конструкцій літака Аеробус А350 ХВВ, в якому використовуються матеріали CFRP.

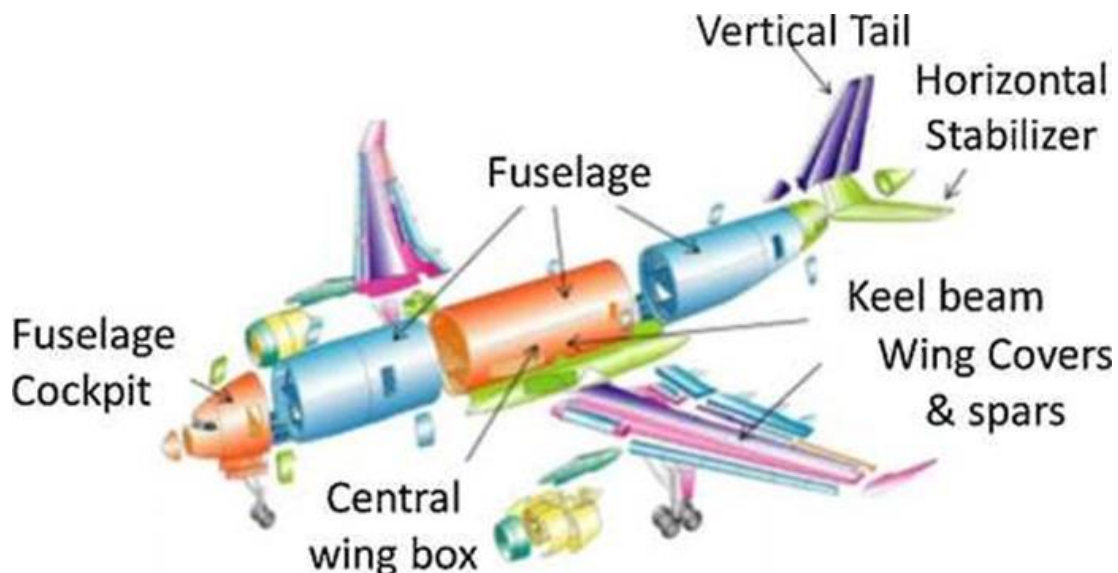


Рисунок 1.2 – Первинні структури Airbus A350 XWB, виготовлені з препрегу M21E, зміцненого вуглецевим волокном ІМА

Останні містять високоміцне вуглеволокно, закріплене в матриці епоксидної смоли, яка створює "гібридний" матеріал з поліпшеною структурою. Композити введені в конструкцію літака для поліпшення характеристик (зниження ваги й підвищення міцності), скорочення часу і вартості обслуговування, зни-

ження витрат виробництва, надійності і зменшення часу виконання замовлення. Використання панелей, поздовжніх балок і рам з CFRP в фюзеляжі забезпечує зменшення експлуатаційних витрат і глобального впливу на навколишнє середовище. У той же час, використання штанг, оболонок і панелей з CFRP як поза, так і в рамі центроплана створює аеропружну обшивку як пасивну адаптивну структуру на додаток до зниження ваги (операційні витрати і вплив на навколишнє середовище) й виключенню втоми і корозії як у композитів (витрати на обслуговування).

Проектування авіадвигунів сьогоденних і майбутніх літаків (рис. 1.3) ведеться безперервно з прицілом на завдання, поставлені Консультативною радою по Дослідженню Авіації в Європі (ACARE). Для покращення роботи двигуна літака, зокрема збільшення ступеня двоконтурності, підвищення ККД, аеродинамічних характеристик, компактності, зменшення ваги двигуна, необхідно по-перше, застосування полегшених матеріалів по літаку в цілому і по двигунах, по-друге, розробка двигунів більш ефективної конструкції. Збільшення питомої тяги вимагає більш високих температур згоряння і більш високих навантажень на компоненти. Тому розвиток і використання нових покращених матеріалів є головним для прогресивних конструкцій авіадвигунів.

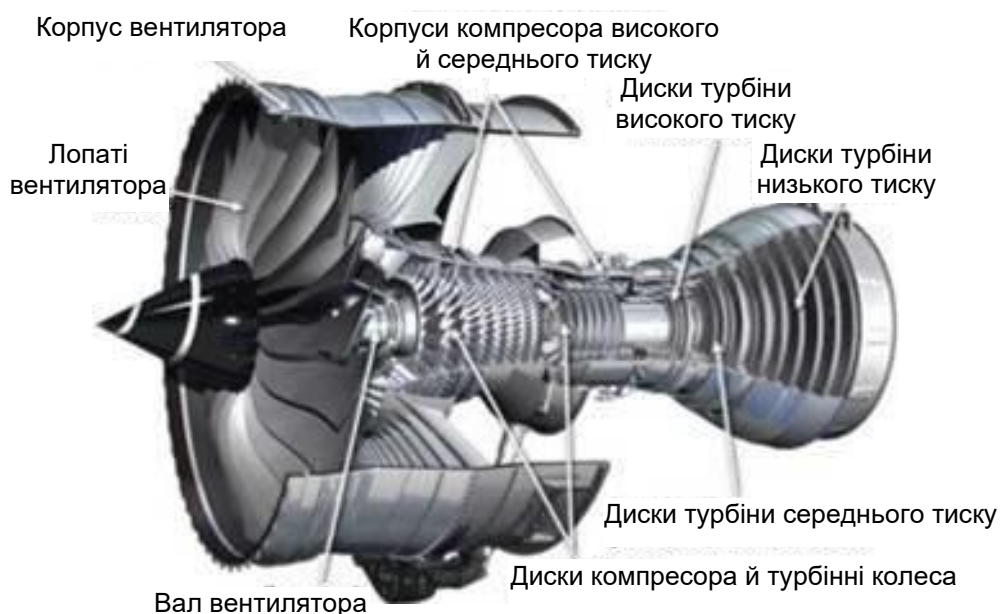


Рисунок 1.3 – Турбовентиляторний двигун Rolls-Royce XWB

Для збільшення паливної економічності двигуна і зниження токсичності відпрацьованих газів сучасні металеві авіакосмічні матеріали і матеріали авіадвигунів повинні протистояти підвищеним навантаженням, впливу більш високих температур, більш високих ступенів стиснення і більш високій температурі газу. Такі відомі суперсплави, як Inconel-718 (жароміцний високоякісний сплав,

який був створений конкретно для експлуатації при температурних режимах, що досягають 980 С), не задовольняють цьому критерію в гарячому секторі сучасних авіадвигунів при температурах за 565-650°C.

Нові дискові сплави для газотурбінних двигунів, наприклад, Udimet 720, IN100 і RR1000 з робочими температурами до 700°C, які одержують методом порошкової металургії з наступною деформацією, мають високі характеристики міцності, тріщиностійкості і опору повзучості, проте значно вартісні через збільшений вміст дорогого нікелю, кобальту і молібдену і труднощів з їх виготовленням. Такі сплави, як Allvac®, 718Plus® на основі никелю-хрому-заліза, які містять значну кількість ніобію і молібдену з одночасно зниженим вмістом алюмінію і титану, намагаються відповідати цим викликам. Інші важливі для авіадвигуна матеріали – це зазвичай арамідне волокно (поліпарафенілен-терефталамід), алюміній, високолегована сталь (CMV), Ti-6Al-4V (α -, β -відпалений), Ti-6246.

1.2. Оброблюваність різанням сучасних авіакосмічних сплавів і композиційних матеріалів міжнародних виробників

У контексті вимог високої якості деталей авіаційно-космічної галузі видається, що показники оброблюваності різних матеріалів заготовок, які засновані на умовних характеристиках (наприклад, зношування інструмента, споживання енергії, шорсткість поверхні), можуть бути не повністю всеосяжними, оскільки вони не в змозі охопити деякі ключові аспекти якості поверхні деталі. Тому, коли справа доходить до механічної обробки авіаційно-космічних деталей, яка зазвичай стосується виконання вимог безпеки/втоми, є необхідним розглянути оброблюваність в набагато більш ширших межах, ніж випробування механічною обробкою, які, головним чином, спрямовані на визначення показників якості інструмента/швидкості видалення припуску. Для композиційних матеріалів робляться спроби ввести нові показники оброблюваності. Також досить цікаво те, що виробники авіаційно-космічної продукції замінюють різальний інструмент перш ніж досягнуто загальноприйнятих порогів зношування інструмента, визначених стандартами ISO (ISO 3685 для точіння і ISO 8688 для фрезерування), щоб усунути ризики нанесення пошкоджень поверхні через передчасне погіршення різального пругу.

Більше того, стосовно взаємодії деталі і інструмента в механічній обробці існують тісні зворотні зв'язки (для ряду постійних параметрів різання) між наступними аспектами:

- вплив термомеханічних властивостей матеріалів деталі і леза;

- вплив рівнів і градієнтів областей теплових/механічних збурень як в деталі, так і в різальному інструменті;
- вплив на механізми зношування/деградації леза;
- вплив цілісності/морфології поверхні деталі і пов'язані з ними металургійні/механічні зміни у відповідь (зворотньо) на механізми взаємодії деталі і інструмента.

Як розвиток результатів деградації інструмента ці відносини отримують часовий вимір в зміні величини і градієнтів областей теплових/механічних збурень і отже, різних рівнях якості поверхні деталі. Таким чином, поняття оцінки оброблюваності має розглядатися стосовно до аерокосмічних деталей в набагато ширшому сенсі, тому що для них стан поверхні (поверхнева цілісність) має ключове значення для їх функціональності.

За останні роки були розроблені марки інструментальних матеріалів/покриттів і геометрія пругів різального інструмента для обробки аерокосмічних матеріалів. Геометрія різального інструмента є одним з головних чинників високоефективного різання авіакосмічних матеріалів. Геометрія має бути адаптована індивідуально в залежності від матеріалу оброблюваної деталі і процесу різання. У багатьох випадках використання гострого інструмента спостерігається мікростружка. Тому для різання авіакосмічних сплавів часто застосовується інструмент із спеціальним заточуванням різального пругу, щоб збільшити механічну стабільність і отже, надійність процесу і стійкість інструмента. В цілому, крім розміру радіуса різального пругу, вкрай важливими для робочих характеристик заточеного інструмента є метод заточування різального пругу, розмір фактора форми k і відхилення радіуса заокруглення уздовж різального пругу.

Для лезової обробки матеріалів для авіаційних двигунів, зокрема матеріалів на основі Ni, застосовують:

- швидкорізальні сталі HSS (High-Speed Steel), наприклад, високолегована ASP30 (USA) твердістю HRC 66-67 – близька за складом до типу M41, аналог за ГОСТом: Р6М3К5Ф2 – з їх поліпшеною ударною в'язкістю, але більш низькою зносостійкістю; використовуються для інструмента зі складною геометрією, що працює при низьких швидкостях різання ($v_c < 5$ м/хв) для формування профілів з жорстким допуском, наприклад, для протягування ластівчиного хвоста (рис. 1.4) і ялинкового профілю в роторах (лопатки компресорів, турбін);

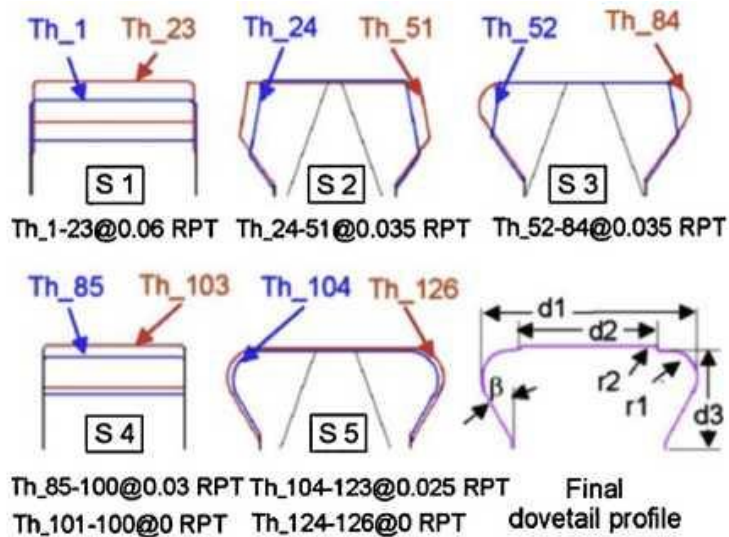


Рисунок 1.4 – Приклад поперечного перерізу п'яти сегментів протяжного інструмента для утворення профілю типу "ластівчин хвіст" (Th_ #: № зубу; RPT: підйом на зуб)

– тверді сплави (карбід вольфраму) з різними покриттями (наприклад, PVD-TiAlN, CVD-TiCN/Al₂O₃/TiN), що працюють при помірних швидкостях різання (10 м/хв. < v_c < 100 м/хв. – більш низькі для свердління і більш високі для точіння і фрезерування) і позитивна геометрія різальних пругів; використовуються як в цільних різцях, так і вставках в надзвичайно широких межах типорозмірів для чорнової і остаточної обробки;

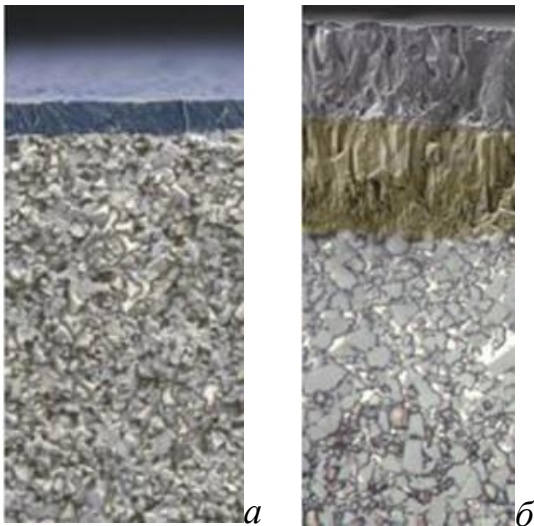


Рисунок 1.5 – PVD- (а) і CVD- покриття (б)

Як відомо, **PVD-покриття** (Physical Vapour Deposition – рис. 1.5, а) формується при відносно невисоких температурах (400-600 °C). Процес включає в себе випаровування металу, що реагує, наприклад, з азотом. В результаті на поверхні різального інструмента утворюється тверде нітридне покриття. Покриття PVD збільшують зносостійкість сплаву за рахунок своєї твердості. Їх компенсаційний вплив також збільшує міцність пругів і стійкість до утворення тріщин. Сучасні покриття PVD є комбінацією нижче описаних основних ша

рів. У шаруватих покриттях є безліч тонких шарів – товщиною наномікронного (~10 нм) порядку. Це робить покриття ще твердішим. **PVD-TiN** – нітрид титану, з якого відбулося перше покриття PVD. Він має універсальні властивості і золотистий колір. **PVD-Ti(C,N)** – карбонітрид титану, твердіший ні-

триду і збільшує стійкість до зношування по задній поверхні. **PVD-(Ti,Al)N** – нітрид титану-алюмінію, має високу твердість у поєднанні зі стійкістю до окислення, що покращує загальну зносостійкість. **PVD-оксид** – використовується через свою хімічну інертність і підвищену стійкість до лункоутворення.

CVD-покриття (Chemical Vapor Deposition – рис. 1.5, б) утворюються хімічним осадженням з парової фази в результаті хімічних реакцій при температурі 700-1050 С. Покриття CVD мають високу зносостійкість і чудову адгезію до твердосплавної основи. Перший твердий сплав з покриттям CVD мав одношарове покриття з карбіду титану (TiC). Пізніше з'явилися покриття з оксиду алюмінію (Al₂O₃) і нітриду титану (TiN). Ще пізніше були розроблені сучасні покриття з карбонітриду титану – **MT-Ti(C,N)** і **MT-TiCN**, так звані **MT-CVD**, – для поліпшення властивостей сплаву за рахунок властивості зберігати цілісність граничного шару твердого сплаву.

– керамічні інструментальні матеріали (наприклад, Al₂O₃, зазвичай армований ниткоподібними кристалами, такими як SiC), які працюють на високих швидкостях різання ($v_c > 200$ м/хв.) і зазвичай з негативною геометрією пругу; через високі температури в контактній зоні оброблюваної деталі і інструмента використовується, головним чином, для безперервного чорнового точіння, щоб при остаточній обробці виключити будь-які можливі металургійні зміни (фазово-структурні перетворення), які могли б бути викликані під час цього процесу;

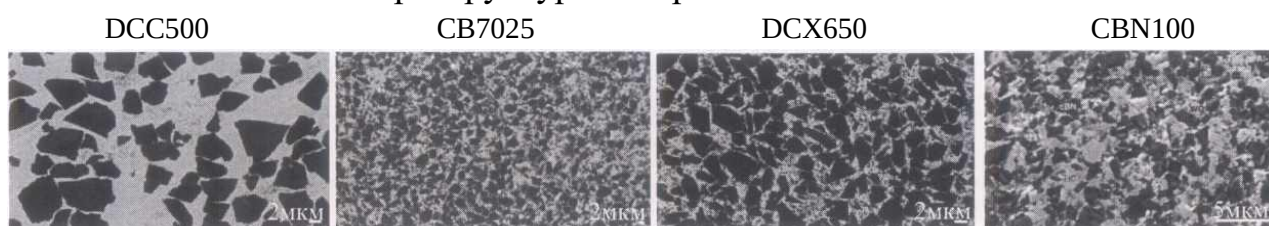
– полікристалічний кубічний нітрид бору (PCBN) з високою твердістю; використовується для остаточної обробки на високих швидкостях різання ($200 \text{ м/хв.} < v_c < 500 \text{ м/хв.}$).

Як відомо, матеріали на основі CBN (рис. 1.6-1.7) поділяються на дві групи: **BL** (вміст КНБ – 50-65 %, застосування – чистове високошвидкісне точіння) і **BH** (вміст КНБ – 70-90 %, застосування – чорнове, напівчорнове точіння).

Порівняння характеристик CBN-пластин світових виробників

Марка, виробник	DCC500 Element Six	CB7025 Sandvik	DCX650 Element Six	CBN100 SECO
Вміст CBN, об. %	50	60	65	50
Розмір зерен, мкм	1,5	1&3	3	2
Зв'язуюча фаза	TiC	керамічна	TiN	TiC

Мікроструктура поверхні CBN-пластин



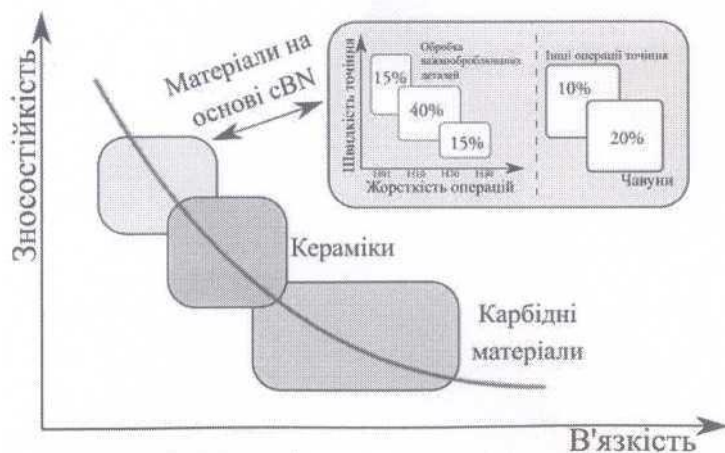


Рисунок 1.6 – Експлуатаційні характеристики різних типів інструментальних матеріалів

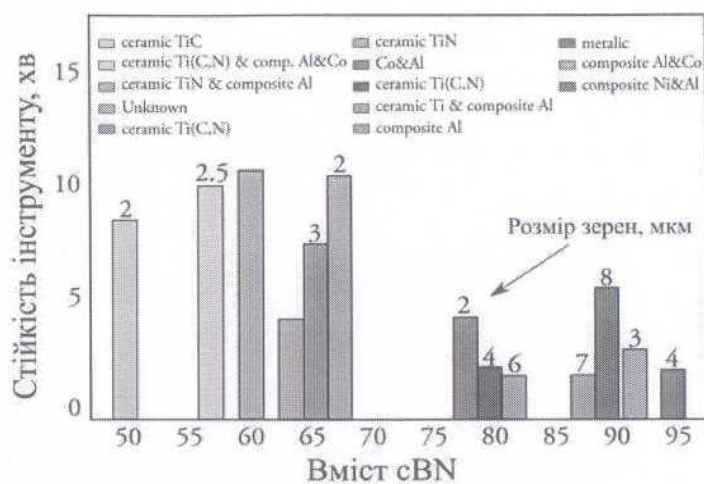


Рисунок 1.7 – Порівняння стійкості інструмента з різним вмістом CBN в умовах механічної обробки сплаву Inconel 718

У якості особливостей лезової обробки матеріалів на основі Ti для авіадвигунів слід наголосити на тому, що за винятком протягання, де все ще використовуються інструменти з швидкорізальної сталі, для механічної обробки сплавів на основі Ti зазвичай застосовують інструмент з чистого, без покриття твердого сплаву (WC) (ISO grade K), з вибором розміру зерна/вмісту зв'язки в залежності від умов різання (чорнова обробка, чистова) і процесу (точіння, фрезування, свердління). Тонке зерно (~ 0,8-1,5 мм) WC з вмістом зв'язки 3-6 масових % Co (K01-K20) зазвичай вибирається для напів- і чистової обробки, в той час як ультратонка зернистість (розмір зерна <0,7 мм) з ~ 10 масових % зв'язки Co (K30-K40) рекомендується для чорнкової і обробки з ударами. І навпаки, низьку ефективність при різанні титанових сплавів показали сплавлені або зі змішаними карбідами типи твердого сплаву (ISO grade P).

PCBN-пластини (рис. 1.8, а) призначені для обробки різних чавунів, загартованих сталей, високотвердих наплавлених покриттів, термооброблених високоміцних зносостійких матеріалів і твердих сплавів. PCBN-пластини (вміст КНБ – 90-96 %) відрізняються від CBN-пластин (вміст КНБ – 50-65 %) відсутністю зв'язки. Змінні пластини різних типів

зі вставками з полікристалічного алмаза PCD (рис. 1.7, б) призначені для чистової і фінішної обробки кольорових металів.

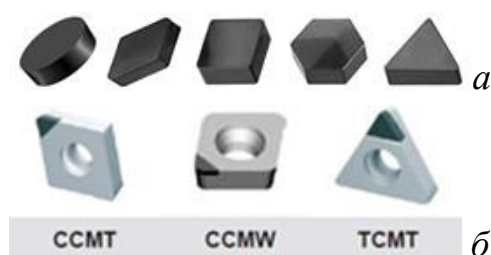


Рисунок 1.8 – PCBN- (а) і PCD-пластини (б) для різального інструмента

Твердосплавні й керамічні покриття в цілому не забезпечують помітної переваги перед продуктами з WC без покриття при точінні через високу хімічну активність титану. Однак, для точіння титанових сплавів виробники різального інструмента рекомендують твердий сплав з PVD-покриттям з TiAlN, які були розроблені для обробки на підвищених швидкостях різання і температурах.

Ситуація з фрезеруванням титанових сплавів є дещо менш визначеною. Хоч і було виконано безліч досліджень з використанням інструментів з покриттям, порівняльні випробування показали в основному перевагу інструмента без покриття перед плакованим. Однак деякі джерела повідомляють про збільшення на ~50 % стійкості інструмента при високошвидкісному фрезеруванні Ti-6Al-4V (тобто BT-6) сферичною кінцевою фрезою з багат шаровим покриттям TiAlN, хоча і невідомо, з якої причини. Проте, інші повідомляють про збільшення до ~20 % максимальної температури під час свердління BT-6 з мінімальною кількістю мастила (MQL) при використанні інструментів без покриття в порівнянні зі зносостійким покриттям (TiAlN, CrCN і TiCN).

Відносно режимів різання повідомляють про широкий діапазон швидкостей різання до 120 і 200 м/хв. відповідно при точінні і фрезеруванні титанових сплавів. Рекомендації від виробника інструмента для звичайного точіння твердим сплавом складають по швидкості для чорнової обробки 30-40 м/хв. при подачі 0,3-0,4 мм/об. і 50-120 м/хв. при подачі відповідно 0,15-0,25 і 0,1-0,2 мм/об. для напів- і чистової обробки. І навпаки, допустимі режими різання для точіння гамма- титан-алюмінієвих (γ -TiAl) інтерметаллідних сплавів значно нижчі для забезпечення прийнятної стійкості інструмента – при швидкості різання, як правило, < 30 м/хв., швидкості подачі 0,05-0,10 мм/об. і глибині різання 0,3-0,7 мм для рівномірної чистової обробки.

Для фрезерування з твердосплавними вставками запропоновані швидкості різання в діапазоні 40-60 м/хв. і подачі 0,10-0,25 мм/зуб. Круглі вставки краще використовувати там, де тільки це можливо, в той час як при менших кутах врізання в заготовку (< 60°) рекомендується використання інструментів зі вставками квадратної форми. Позитивна і загострена геометрія краще для уникнення формування наросту на різальному пружі (BUE – built-up edge) зі вставкою, загалом забезпечує чудову стійкість інструмента, особливо для чистового точіння. Збільшення радіусу різального пружа або введення короткої (~ 0,06 мм) негативної фаски сприяє підвищенню стійкості інструмента при фрезеруванні сплаву BT-6 кінцевою фрезою і сферичною кінцевою фрезою відповідно.

Такі тугоплавкі матеріали, як глиноземна кераміка (Al_2O_3), й SiALON (α/β -сіалонова кераміка – оксинітрид алюмінію-кремнію – новітні матеріали із заданим набором фізико-механічних характеристик, розроблені для застосування в якості технічної кераміки і належать до класу нітридів кремнію), неприда-

тні для механічної обробки Ti- сплавів через їх відносно низьку тріщиностійкість і високу хімічну спорідненість. Нещодавно полікристалічний кубічний нітрид бору (polycrystalline cubic boron nitride – PCBN) і полікристалічний алмаз (polycrystalline diamond – PCD) стали кваліфікувати як альтернативу твердо-сплавному WC- інструменту.

Використання PCD- інструмента дозволяє істотно збільшити в порівнянні з твердим сплавом (від 2-х до 4-х разів) як стійкість, так і продуктивність інструмента (швидкість різання 200-250 м/хв.) при точінні або фрезуванні Ti-сплавів. Дійсно, сплав Ti-6246 можна точити на ~70 % швидше, використовуючи PCD (швидкість різання 200 м/хв.) у порівнянні з твердим сплавом при стійкості інструмента ~80 хв. У всіх випадках критично важливим являється застосування мастильно-охолоджувальної рідини (переважно під високим тиском). У той час як інструменти CBN показали кращу стійкість, ніж інструмент з твердого сплаву при обробці на проміжних швидкостях різання (75-120 м/хв.), їх робота значно погіршилася під час механічної обробки на більш високих режимах (> 150 м/хв). Навпаки, PCBN без зв'язки значно виграє у звичайного CBN, так само як і у PCD, (швидкість різання > 350 м/хв.) при високошвидкісному точінні і фрезеруванні (400 м/хв.) сплаву Ti-6Al-4V (BT-6).

Механічна обробка матеріалів для корпусу літака, зокрема, композитів, армованих полімерним волокном (Fibre-Reinforced Plastics – FRP), з їх абразивністю, неоднорідністю і анізотропними властивостями, потребує різального інструмента достатньої міцності, в'язкості, твердості і стійкості до термічного удару, щоб витримувати коливання механічних/теплових навантажень, особливо під час переривчастої і високошвидкісної обробки.

При цьому використовуються інструментальні матеріали двох категорій:

- тверді матеріали (15-30 ГПа) – цементовані карбіди (WC), карбіди з покриттям і кераміка;
- надтверді матеріали (50-85 ГПа) – кубічний нітрид бору (CBN), CVD-алмаз і полікристалічний алмаз (PCD).

Хоча інструменти з карбіду мають вищу міцність на розрив та тріщиностійкість, алмазні інструменти мають вищу твердість та теплопровідність. Це пояснює використання перших для чорнових операцій, а других для остаточної обробки. Незважаючи на те, що керамічні інструменти мають високу термічну стабільність, під час механічної обробки FRP- композитів вони, як правило, мають тенденцію до відмови через сколювання. Останнім часом був досягнутий певний прогрес у поліпшенні ефективності цих інструментів за допомогою зміцнення волокнами.

Твердосплавні інструменти з покриттям CVD- алмазом та PCD- інструменти підходять для точіння й фрезерування завдяки їх твердості, міцності та теплопровідності. Випадкова орієнтація кристалів алмазу запобігає поширенню

тріщин і тим самим покращує міцність інструмента. Типова робоча швидкість різання для цього інструментального матеріалу становить 200-2000 м/хв. Твердосплавні кінцеві фрези з впаяними наконечниками PCD (780-900 м/хв.), які мали протилежні напрямки різальних пругів, показали зменшення відшарування і поліпшення продуктивності інструмента.

Свердління вуглепластиків (Carbon Fibre Reinforced Polymer – CFRP) з використанням твердосплавних інструментів з алмазним покриттям показало десятикратне поліпшення терміну служби інструмента з триразовим підвищенням швидкості (170 м/хв. проти 56 м/хв.) порівняно з неплакованими інструментами. Подібні результати були отримані для пластику, армованого скловолокном (Glass Fibre Reinforced Polymer – GFRP); обмежувальні чинники цих інструментів, наприклад, велика шорсткість поверхні алмазної плівки та різального пругу, компенсуються нещодавню розробкою твердосплавних інструментів із нанокристалічними алмазними покриттями, зносостійкість яких є порівняною з інструментами PCD. Крім того, багат шарові алмазні покриття з різними розмірами зерен довели, що збільшують термін служби інструмента приблизно в 14 разів у порівнянні з неплакованими інструментами при точінні AlSi20, який є настільки ж важкооброблюваним, як і CFRP. Під час фрезерування найбільш абразивновмістних композитів, таких як вуглепластики і склопластики з високим вмістом скла або волокна, алмазний інструмент з CVD-покриттям перевершує по стійкості інструмент PCD на 200-300 %. Інші типи алмазних інструментів, які використовуються для обробки CFRP, включають алмазний інструмент на гальванічній зв'язці та «вінінговий» (венозний) алмазний інструмент, в якому «вена» з алмазу наповнює інженерний проріз у твердосплавній державці. Кромка має бути оптимізованою для отримання гарної обробки поверхні без ослаблення; відносно невеликий кут сприятиме абразивному зношуванню та контрольованому розкришуванню шару CVD-алмазу.

Геометрія та форма інструмента відіграють важливу роль у контролі процесу формування стружки при обробці FRP-композитів: розшарування, згинання, розрізання та розрив волокон. Позитивний передній кут зменшує тангенціальну силу різання, тоді як задній кут знижує осьову силу. Через контроль цих складових сили нижче порогових рівнів може бути усунено розшарування на вході та виході відповідно.

Трубчасті інструменти для свердління отворів працюють зі значно меншою осьовою силою та крутним моментом, а також забезпечують кращу якість отвору в порівнянні зі спіральними свердлами. Модифікація геометрії різального пругу за допомогою заокруглення та зняття фаски значно підвищує стійкість твердосплавного інструмента та якість остаточної обробки деталі.

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягає актуальність сучасних рішень з високоефективного різання авіакосмічних сплавів і композиційних матеріалів? Які існують нові підходи до технологій різання авіакосмічних сплавів і композиційних матеріалів?
2. Які виклики сучасного стану розвитку технологій різання авіакосмічних сплавів і композиційних матеріалів доводиться вирішувати? На які три групи поділяються сучасні авіакосмічні матеріали за оброблюваністю лезовим інструментом?
3. Які нещодавно розроблені сплави алюмінію, титану (перерахувати за складом основних хімічних елементів) використовуються в останніх авіаційних програмах? Матеріали є важливими для виготовлення авіадвигуна?
4. В чому полягає особливість поняття оцінки оброблюваності авіакосмічних матеріалів? Які зворотні зв'язки мають місце при взаємодії деталі і інструмента в механічній обробці авіакосмічних матеріалів?
5. Які інструментальні матеріали застосовують для лезової обробки матеріалів для авіаційних двигунів, зокрема матеріалів на основі Ni? В чому полягає основна відмінність PVD і CVD покриттів, яку функцію вони виконують?
6. В чому полягає особливість лезової обробки матеріалів на основі Ti для авіадвигунів? Яка основна відмінність PCBN, CBN і PCD пластин? В яких випадках лезової обробки вони використовуються?
7. Як ранжуються між собою матеріали на основі CBN, кераміка й карбідні матеріали за зносостійкістю, в'язкістю (стійкістю до крихкого руйнування)?
8. Які інструментальні матеріали застосовують для лезової обробки матеріалів корпусу літака, зокрема полімерних композитів?

1.3. Класифікація за оброблюваністю різанням авіакосмічних сталей і сплавів, виготовлених за національними стандартами

В основу нижченаведеної класифікації авіакосмічних матеріалів покладений їх хімічний склад, оскільки від нього в основному залежить оброблюваність жароміцних сталей і сплавів (рис. 1.9, табл. 1.2).

Теплостійкі сталі мають здатність протистояти деформації й руйнуванню при механічному навантаженні в області температур нижче 550°C, коли не виникає небезпеки інтенсивного утворення окалини.

Корозійностійкі (нержавіючі) сталі є стійкими проти електрохімічної корозії (атмосферної, ґрунтової, лужної, кислотної, сольової, морської тощо).

Жаростійкі (окалиностійкі) сталі й сплави є стійкими проти хімічного руйнування поверхні в газових середовищах при температурах вище 550°C, працюють у ненавантаженому або слабонавантаженому стані.

Жароміцні сталі й сплави мають здатність працювати в навантаженому стані при високих температурах (вище 700°C) протягом певного часу, мають при цьому достатню окалиностійкість.

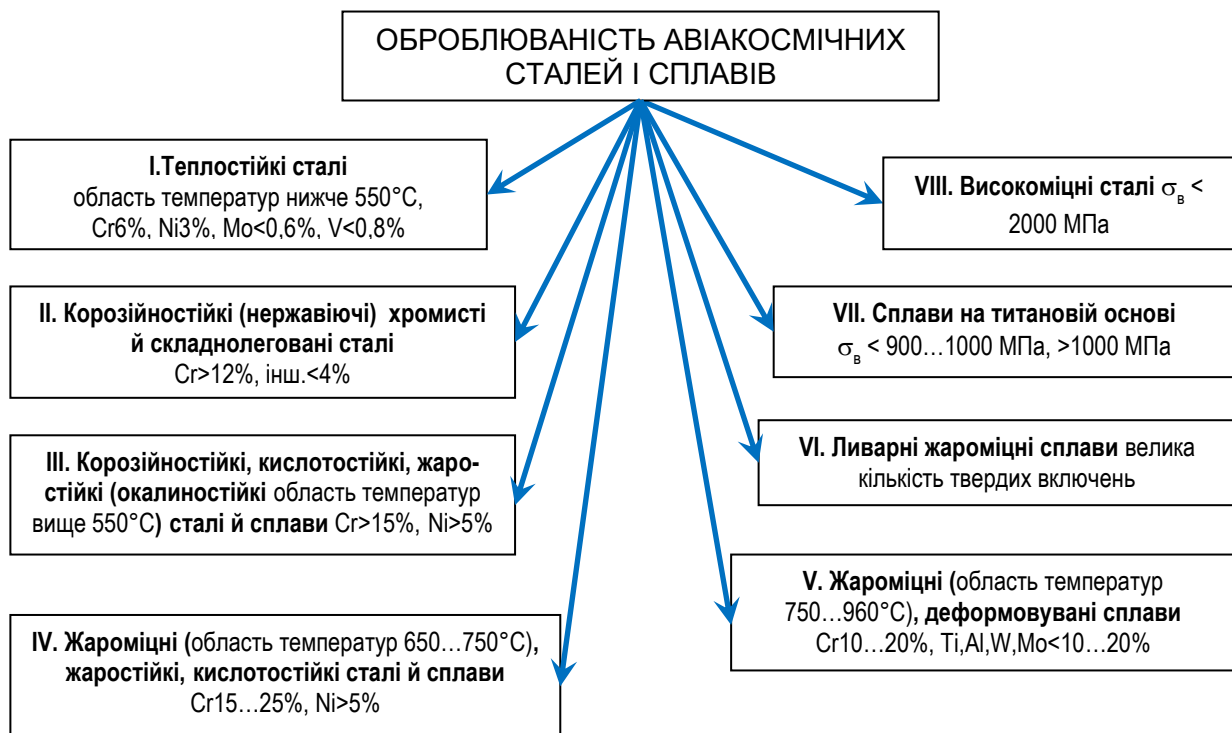


Рисунок 1.9 – Класифікація авіакосмічних сталей і сплавів за оброблюваністю різанням

Корозійностійкі, жароміцні й високоміцні матеріали містять залізо, нікель, титан, молібден, вольфрам і інші елементи. Спеціальні сталі мають достатню міцність при температурі до 700°C; сплави на основі нікелю – до 1100°C; сплави на основі молібдену й ніобію мають достатню міцність при температурі до 1500°C; сплави на основі вольфраму – до 2000°C. Для роботи в умовах термічних ударів або впливу теплових потоків застосовуються комбіновані матеріали, що складаються з пористого вольфраму, просоченого легкоплавким металом – міддю або сріблом; останній, плавлячись і випаровуючись, охолоджує виріб.

Широке застосування знаходять матеріали з високою питомою міцністю – до них, в основному, відносяться титанові сплави й високоміцні сталі.

Високоміцними вважаються сталі з межею міцності $\sigma_b > 1600$ МПа (60 кгс/мм²).

Титанові сплави мають також високу корозійну стійкість у більшості агресивних середовищ.

З підвищенням фізико-механічних властивостей сталей і сплавів є певна тенденція до зниження швидкостей різання; під час механічної обробки ряду жароміцних сплавів застосовують швидкості різання в 10...20 разів менші, ніж

під час обробки сталі 45. Швидкості різання, що застосовують під час обробки високоміцних сталей, обернено пропорційні квадрату їхньої межі міцності.

За пропонованою класифікацією всі розглянуті сталі й сплави розділені на вісім груп, у кожену з яких об'єднані сталі й сплави приблизно однакового хімічного складу, однакових механічних властивостей і близької оброблюваності різанням (оброблюваність матеріалу характеризується швидкістю різання, що відповідає певній стійкості інструмента при роботі з певним перетином зрізуваного шару з оптимальною конструкцією інструмента для обробки даної сталі або сплаву). Для кожної групи матеріалів наведені коефіцієнти по швидкості різання й зразкові швидкості різання, що застосовують під час обробки інструментом із твердого сплаву й швидкорізальної сталі.

Сталі, віднесені до I групи, (див. табл. 1.2) характеризуються вмістом хрому до 6 %, нікелю до 3 %, молібдену до 0,6 %, ванадію до 0,8 %. Вони є теплостійкими матеріалами, застосовуються для виготовлення впускних і випускних клапанів двигунів, лопаток і дисків турбін, а також деталей котельних установок, що працюють при температурах до 500...600°C. Оброблюваність сталей I групи цілком задовільна, майже не відрізняється від оброблюваності вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей відповідної міцності.

Таблиця 1.2 – Класифікація важкооброблюваних сталей і сплавів за їх оброблюваністю різанням

Номер групи	Марка	Термічна обробка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	Орієнтовна швидкість різання			
				під час обробки інструментом, м/хв		у порівнянні зі сталлю	
				з твердого сплаву	зі швидкорізальн. сталі	45	12Х18Н9Т
1	2	3	4	5	6	7	8
Теплостійкі хромисті, хромонікелеві й хромомолібденові сталі перлітного й мартенситного класів							
I	30ХН3МА	Відпал	600	200...250	60...70	0,9	1,8
	30Х2НВФА	Загартування й відпускання	900	150...180	30...40	0,6	1,2
	20Х3МВФ						
Корозійно-стійкі хромисті й складнолеговані сталі феритного, мартенситно-феритного й мартенситного класів							
II	12Х13(1Х13)	Загартування й відпускання	600	170...220	35...50	0,7	1,4
	25Х13Н2	Відпал	700...1000	200...250	45...60	0,9	1,8
	20Х13(2Х13)	Загартування	700	180...210	30...45	0,65	1,3
	30Х13(3Х13)	й відпускання	850	140...180	28...42	0,6	1,2
	40Х13(4Х13)	Нормалізація й відпускання	950	120...150	25...35	0,5	1,0

Корозійно-стійкі, кислотостійкі, жаростійкі хромоникелеві сталі аустенітного й перехідного аустенітно-мартенситного класів

III	12X18H10T (X18H10T)	Загартування	550	120...150	25...35	0,5	1,0
	20X23H18						
	12X21H5T		700	100...130	20...30	0,42	0,85

Жароміцні, жаростійкі, кислотостійкі хромоникелеві, хромонікелеманганові складнолеговані сталі аустенітного класу

IV	45X14H14B2M	Загартування й старіння	700	100...120	20...28	0,40	0,80
	08X15H24B4TP	Старіння		70...90	15...25	0,30	0,60
	07X21Г7АН5	Загартування	1000	80...100			
	12X25H16Г7AP	Загартування й старіння	800				

Сталі II групи характеризуються високим змістом хрому (більше 12 %) і невеликим змістом (до 4 %) інших легуючих елементів. Вони застосовуються в основному для виготовлення арматур, турбінних лопаток і дисків, що працюють при температурах до 500...550°C (12X13, 15X12ВМФ, ЭИ961 й ін.), хірургічного інструмента, шарикопідшипників (30X13, 40X13) і інших деталей з високою корозійною стійкістю. У цю ж групу об'єднані високо-хромисті сталі, які після загартування й відповідного відпускання мають межу міцності більше 1600 МПа. Оброблюваність цих сталей у зазначеному стані відповідає оброблюваності високоміцних сталей VIII групи. Однак оскільки під час обробки різанням деталей з цих сталей основний припуск зрізується у відпаленому стані деталі, коли їх оброблюваність аналогічна оброблюваності високохромистих сталей з межею міцності $\sigma_B = 850...1000$ МПа, вони віднесені до II групи. Для цих груп сталей із збільшенням міцності сталі з 600-700 МПа до 900-950 МПа її оброблюваність зменшується на 30-40%.

Механічна обробка деталей зі сталей II групи виконується як після відпалу (12X13, 20X13, 14X17H2, 15X12ВМФ і ін.), так і після термічної обробки до межі міцності $\sigma_B = 1000...1500$ МПа (30X13, 40X13). У відпаленому стані деталі із цих сталей мають задовільну оброблюваність: швидкість різання приблизно в 1,5...2 рази нижче швидкостей різання, які застосовуються під час обробки деталей зі сталі 45. З підвищенням характеристик міцності сталей у результаті їхньої термічної обробки оброблюваність високохромистих сталей різко знижується. Деталі зі сталей цієї групи, термічно оброблені до межі міцності $\sigma_B > 1200$ МПа, по можливості повинні оброблятися інструментом із твердих сплавів.

Під час обробки різанням деталей зі сталей II групи у відпаленому стані одержати поверхні високого класу шорсткості важко, особливо при нарізанні

різьби, протяганні, циліндричному фрезеруванні й інших операціях, коли оброблена поверхня формується лезами інструментів значної довжини.

Сталі, віднесені до III групи, містять велика кількість хрому (більше 15 %), нікелю (більше 5 %) і в невеликій кількості інші легуючі елементи (титан, кремній й ін.). До цієї групи віднесені також сталі аустенітно-феритного й аустенітно-мартенситного класів. Сталі аустенітно-феритного класу за технологічними характеристиками близькі до аустенітних, а за міцністю – до мартенситних сталей. Після відпалу оброблюваність цих сталей близька до оброблюваності сталі 12X18H10T, а після загартування й відпускання – до сталей II групи відповідної міцності.

Сталі III групи одержали широке поширення як кислотостійкі, тобто такі, що не іржавіють, і жароміцні матеріали. Вони застосовуються майже у всіх галузях промисловості для виготовлення деталей запірної апаратури, лопаток компресорних машин, парових труб і інших деталей, що працюють в умовах високих температур – до 800 °С. Швидкості різання, що застосовуються під час обробки деталей зі сталей III групи, приблизно в 2 рази нижче швидкостей різання, що застосовуються під час обробки деталей зі сталі 45.

До IV групи відносяться жароміцні, жаростійкі й кислотостійкі сталі аустенітного класу, що містять у великій кількості хром (12...25 %), нікель (більше 5 %) і в трохи меншій кількості марганець, молібден, титан, вольфрам, ванадій і інші легуючі елементи. У низці деталей вміст нікелю знижений за рахунок збільшення вмісту більш дешевого й менш дефіцитного марганцю. Зі сталей цієї групи виготовляють диски й лопатки газових турбін, деталі газопровідних систем і кріпильні деталі, що працюють при температурах до 650... 750 °С, а при помірних напруженнях – до 800...900 °С. Оброблюваність різанням деталей зі сталей IV групи в 3...4 рази нижче оброблюваності деталей зі сталі 45. Тобто подальше збільшення міцності сталі до 1000 МПа зменшує її оброблюваність загалом на 70%.

До V групи відносяться жароміцні деформовувані сплави на нікелевій і залізо-нікелевій основах, леговані більшою кількістю хрому (10...20 %) і трохи меншою кількістю титану, алюмінію, вольфраму, молібдену й інших елементів. Вони застосовуються для виготовлення деталей машин, що працюють при більших навантаженнях і високих температурах – від 750 до 900...960 °С (дисків, робочих і напрямних лопаток і інших деталей газових турбін). Оброблюваність різанням деталей зі сплавів V групи в 6...12 разів нижче оброблюваності деталей зі сталі 45. Тобто подальше збільшення міцності сталі до 1250 МПа разом з іншим зменшує її оброблюваність загалом на 90%.

Ливарні жароміцні сплави VI групи широко застосовуються для виготовлення соплових лопаток, суцільнолитих роторів і інших деталей газових турбін. Вони більш леговані й внаслідок цього більш жароміцні, ніж деформовувані

жароміцні сплави. Через неоднорідну литу структуру механічні властивості їх значно розрізняються. За оброблюваністю різанням вони відрізняються від сплавів V групи. Різна оброблюваність ливарних і деформовуваних жароміцних сплавів пояснюється тим, що ливарні сплави менш в'язкі, сили різання під час їхньої обробки значно нижче, ніж під час обробки деформовуваних сплавів.

Таблиця 1.2 (продовження)

Класифікація важкооброблюваних сталей і сплавів за їх оброблюваністю різанням

Номер групи	Марка	Термічна обробка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	Орієнтовна швидкість різання			
				під час обробки інструментом, м/хв		у порівнянні зі сталлю	
				з твердого сплаву	зі швидкорізаєльн. сталі	45	12Х18Н9Т
1	2	3	4	5	6	7	8
Жароміцні деформовувані сплави на залізонікелевій й нікелевій основі							
V	36НХТЮ	Загартування й старіння	1200	40...50	8...12	0,16	0,32
	ХН60ВТ	Загартування	800				
	ХН77ТЮ	Загартування й старіння	1000				
	ХН77ТЮР		950	22...28	0,12	0,24	
	ХН35ВТЮ						
	ХН56ПМТЮ	Загартування	900	20...25	6...10	0,10	0,20
	ХН67ВМТЮ	Загартування й старіння	1000				
	ХН75ВМЮ		1250	18...20	5...10	0,08	0,15
	ХН72МВКЮ						
	ХН60МВТЮ		1150				
Окалиностійкі й жароміцні ливарні сплави на нікелевій основі							
VI	ХН62МВКЮЛ	Загартування й старіння	750	18...20	—	0,05	0,10
	ХН65ВМТЮЛ		750	18...20	—	0,05	0,10
	ХН67ВМТЮЛ		750	18...20	—	0,05	0,10
Сплави на титановій основі							
VII	ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ1-2	Відпал	450...700	100...150	30...40	0,6	1,2
	ОТ4-0		700...900	70...100	25...35	0,4	0,8
	ОТ4-1		600...750				
	ВТ5		700...950				
	ВТ5-1		700...950				
	ВТ6, ВТ6с		900...1000	60...80	20...30	0,32	0,65
	ВТ14		1000	50...75	20...28	0,3	0,6
	ВТ14	Загартування й старіння	1150...1300	45...60	15...20	0,24	0,48
	Високоміцні сталі						
VIII	28ХЗСНМВФА-ВД	Загартування й відпускання	1600	45...65	5...10	0,22	0,44
	30ХЗГСНМФА-ВД						
	38ХН3МФА	Загартування й відпускання	1700	40...50	4...5	0,18	0,36
	43ХН2МВФА		2100	20...30	—	0,12	0,24

Ливарні жароміцні сплави мають велику кількість включень, які сильно зношують інструменти зі швидкорізальної сталі. Майже на всіх операціях механічної обробки деталей з ливарних жароміцних сплавів варто застосовувати інструмент, оснащений твердим сплавом, у той час як під час обробки деталей з деформовуваних сплавів інструмент із твердого сплаву застосовують в основному при безперервному різанні.

У багатьох випадках переривчастого різання (торцеве й кінцеве фрезерування) під час обробки деталей з деформовуваних жароміцних сплавів застосовувати інструмент зі швидкорізальної сталі більш доцільно, ніж із твердого сплаву. Однією з причин швидкого зношування інструмента із твердого сплаву при переривчастому різанні деталей з деформовуваних жароміцних сплавів є змінні навантаження (удари), що призводять до викришування твердого сплаву. Під час обробки деталей з ливарних сплавів це явище позначається в значно меншій мері. Швидкості різання під час обробки деталей з ливарних жароміцних сплавів в 12...20 разів нижче, ніж під час обробки деталей зі сталі 45. Тобто оброблюваність цих сталей міцністю до 750 МПа менша оброблюваності деталей зі сталі 45 загалом на 95%.

Сплави на титановій основі VII групи широко застосовують у ряді конструкцій, вони витісняють алюмінієві сплави й нержавіючі сталі. На сьогодні застосовується велика гама титанових сплавів (більше 30 марок) із широким діапазоном оброблюваності різанням, що залежить від меж міцності сплаву. Деталі з титанових сплавів з межею міцності $\sigma_b < 900... 1000$ МПа при відсутності окалини й кірки легко обробляються інструментом зі швидкорізальної сталі й твердого сплаву. Обробка деталей з титанових сплавів з межею міцності $\sigma_b > 1000$ МПа інструментом зі швидкорізальної сталі пов'язана з деякими труднощами. При роботі з окалиною варто застосовувати тільки тврдосплавний інструмент.

Точіння, фрезерування й свердління деталей з титанових сплавів не викликає утруднень. Однак внаслідок великої пружності титанових сплавів нарізування різьби мітчиками, розгортання й протягування (особливо шліцевих отворів) деталей із цих сплавів обтяжене через защемлення інструмента по задніх і допоміжних поверхнях. У зв'язку із цим задні й допоміжні кути інструмента для обробки деталей з титанових сплавів варто виконувати на $3...5^\circ$ більше, ніж у інструмента для обробки деталей із конструкційних сталей. Виконавчі розміри мірного інструмента повинні виконуватися на верхніх межах допусків.

Титанові сплави активно взаємодіють із газами при підвищених температурах, починаючи з 600°C . Найбільш активним елементом при газонасиченні є кисень. Твердість шару, насиченого газами, значно зростає. Мікротвердість насичених шарів перевищує мікротвердість внутрішніх шарів металу в 3...5 разів.

Мікротвердість з'єднань титану з киснем досягає 13 000 МПа, титану з азотом і титану з вуглецем 20 000 МПа при мікротвердості внутрішніх шарів металу 310...350 МПа. Товщина окалини залежить від температури й тривалості її впливу. Тому на оброблюваність деталей з титанових сплавів по кірці впливає спосіб виготовлення заготовки. Товщина дефектного шару у виливках може досягти декількох міліметрів, у кованих заготовок – 1 мм, у прокату – 0,5 мм. Тому оброблюваність кованих прутків нижче, ніж катаних. Швидкості різання, що застосовують під час обробки деталей з титанових сплавів, залежно від їхньої межі міцності в 1,5...4 рази нижче швидкостей різання, що застосовують під час обробки деталей зі сталі 45. Тобто оброблюваність цих сплавів міцністю до 900-1300 МПа менша оброблюваності деталей зі сталі 45 загалом на 70%. Під час обробки деталі по кірці швидкості різання знижуються відповідно в 2 рази.

До VIII групи відносяться високоміцні сталі. У стані відпалу їхня оброблюваність ідентична оброблюваності звичайних конструкційних сталей. Після загартування й відпускання, залежно від межі міцності, їхня оброблюваність знижується в 5...8 разів. У зв'язку із цим технологічний процес обробки деталей з високоміцних сталей повинен будуватися таким чином, щоб під загартування й відпускання залишався мінімальний припуск, необхідний для усунення можливих деформацій. Деталі з високоміцних сталей слід обробляти твердосплавним інструментом. Інструментом зі швидкорізальної сталі можна обробляти деталі з високоміцних сталей з межею міцності $\sigma_b < 2000$ МПа, застосовуючи при цьому низькі швидкості різання.

Оброблюваність високоміцних сталей, що є дисперсійно-твердіючими, у відпаленому стані в 3...4 рази, а після загартування й старіння в 10...12 разів нижче оброблюваності сталі 45. Тобто оброблюваність цих сплавів міцністю до 1700-2100 МПа менша оброблюваності деталей зі сталі 45 загалом на 80-90%.

1.4. Інструментальні матеріали

Інструментальними є матеріали, основне призначення яких – оснащення робочої частини інструментів.

До них відносяться:

- інструментальні сталі помірної твердості (HV <12 ГПа) – вуглецеві, легировані й швидкорізальні;
- тверді матеріали середньої твердості (HV 15-30 ГПа) – тверді сплави, тверді сплави з покриттям, мінералокераміка;
- надтверді матеріали (HV 50-85 ГПа) – кубічний нітрид бору (PCBN і CBN), а також CVD-алмаз і полікристалічний алмаз (PCD).

Окремо стоїть комбінований інструмент: твердосплавні інструменти з покриттям CVD-алмазом та PCD-інструменти для точіння й фрезерування, а також алмазний інструмент на порошкових, гальванічній зв'язках та «вінінговий» (венонний) інструмент з АТП.

Основні характеристики інструментальних матеріалів наведені в табл. 1.3. Як видно з наведених характеристик, підвищення твердості інструментальних матеріалів разом з підвищенням модуля пружності одночасно зменшує їх міцність на вигин, ударну в'язкість (чутливість до переривчастого різання).

Загальна характеристика інструментальних сталей.

За хімічним складом, ступенем легування інструментальні сталі розділяються на інструментальні вуглецеві, інструментальні леговані й швидкорізальні сталі. Фізико-механічні властивості цих сталей при нормальній температурі досить близькі, розрізняються вони теплостійкістю й прожарюваністю при загартовуванні. Знеміцнення мартенситу при нагріванні під час різання загартованих вуглецевих сталей відбувається при температурі 200 С. У легованих і швидкорізальних сталях знеміцнення мартенситу стримується наявністю легувальних елементів, які повинні мати більшу, ніж залізо, спорідненість із вуглецем, утворювати більш теплостійкі карбіди й легко розчинятися в α -залізі.

В інструментальних легованих сталях масовий вміст цих елементів недостатній для того, щоб зв'язати весь вуглець у карбіди, тому теплостійкість сталей цієї групи лише на 50... 100°C перевищує теплостійкість інструментальних вуглецевих сталей. У швидкорізальних сталях прагнуть зв'язати весь вуглець у карбіди легуючих елементів, виключивши при цьому можливість утворення карбідів заліза. За рахунок цього знеміцнення швидкорізальних сталей відбувається за більш високих температур.

Інструментальні вуглецеві й леговані сталі.

Основні фізико-механічні властивості інструментальних вуглецевих і легованих сталей наведені в табл. 1.4, технологічні властивості найбільш поширених марок вуглецевих і легованих інструментальних сталей – в табл. 1.5.

Інструментальні вуглецеві сталі позначаються буквою У, наступна цифра вказує середній вміст вуглецю в сталі, помножений на 10. Так, у сталі марки У10 масовий зміст вуглецю становить 0,95...1,04 %. Буква А в кінці відповідає високоякісним сталям зі зниженим вмістом домішок. Підвищення долі карбідної фази вуглецевих інструментальних сталей суттєво збільшує їх твердість в незагартованому стані і одночасно теплостійкість (червоностійкість).

Інструментальні леговані сталі позначаються цифрою, що характеризує масовий вміст вуглецю в десятих частках відсотка (якщо цифра відсутня, вміст вуглецю 0,95...1,04 %, за якою ідуть букви, що відповідають легуючим елемен-

там (Г – марганець, Х – хром, З – кремній, В – вольфрам, Ф – ванадій), і цифри, що позначають вміст елемента у відсотках. Інструментальні леговані сталі глибокої прожарюваності марок 9ХС, ХВСТ, Х, ХВГ відрізняються малими деформаціями при термічній обробці.

Оброблюваність вуглецевих інструментальних сталей по відношенню до сталі У9, У10 підвищується разом із зменшенням карбідної фази і навпаки. Оброблюваність легованих інструментальних сталей 11Х, 11ХФ знаходиться на базовому рівні.

Таблиця 1.3 – Характеристика інструментальних матеріалів

Матеріал	Щільність ρ , г/см ³	Твердість HRA	Мікротвердість HV, МПа	Межа міцності при вигині σ_b , МПа	Межа міцності при стисканні МПа	Ударна в'язкість $\alpha \cdot 10^5$, Дж/м ²	Теплостійкість (червоність) °С	Теплопровідність Вт/(м·К)	Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	Модуль пружності Е, Па
Швидкорізальна сталь	7,9...8,75	До 80	—	До 4000	До 4000	До 5,8	До 700	16,75...25,12	9,0...12,0	210 000
Тверді сплави	11,1...14,8	87...92	17000...24000	До 1800	До 5900	0,25...0,6	800...1000	16,75...87,92	3,0...7,5	500 000
Мінерало-кераміка:										
оксидна	3,6...4,0	До 94	30000	До 950	До 3000	0,05...0,12	2000	4,2...21,0	6,3...9,0	400 000
змішана (кермети)	4,4...4,7	До 95,3	19000	До 980	До 5600	До 0,2	1400	25,12...83,70	7,2...7,5	350 000
Кубічний нитрид бору	3,45	—	60000...80000	До 1000	До 6500	—	1500	—	—	720 000
Алмази штучні	3,48...3,56	—	100000	До 300	До 2000	—	1800	138,2...146,5	0,9...1,9	900 000

**Таблиця 1.4 – Основні фізико-механічні властивості
найбільш поширених марок вуглецевих і легованих інструментальних сталей**

Марка сталі	Фізико-механічні властивості							Доля карбідної фази, %	Теплостійкість (червонистість), °C	Область застосування
	ρ , г/см ³	HB	після відпалу		після загартування й відпалу					
			HB	σ_B , МПа	σ_B , МПа	ударна в'язкість $\alpha \cdot 10^5$, Дж/м ²	HRC			
У7, У7А	7,83	285	187	630	2000...2100	0,2	62...64	10,0...12,0	200...220	Зубила, стамески, кувалди, пили, викрутки, керни
У8, У8А	7,83	302	187	750	1950	—	62...64	11,0...13,0	200...220	Ножиці, пили, ролики накатні, пробійники, матриці, дереворізальні ручні інструменти
У10, У10А	7,81	321	197	650	2380	0,2	63...65	14,0...16,0	200...250	Дрібнорозмірний різальний інструмент, зубила
У11, У11А	7,81	341	207	650	2900	—	63...65	15,5...17,0	200...250	Теж саме, що й для сталі У10
У12, У12А	7,81	341	207	645	1720	0,2	63...66	17,0...18,5	200...250	Різальний інструмент
У13, У13А	7,81	341	217	—	2300	—	63...66	18,5...20,0	200...250	Напилки, шабери, зубила, різці
ІІХ, ІІХФ	7,82	341	217	—	2700	1,6	63...66	15,5...17,0	200...250	Мітчики й інший різальний інструмент діаметром 30 мм, що загартовується з охолодженням в гарячих середовищах
Х	7,83	388	229	730	2300	0,5	63...66	14,5...16,5	240...250	Зубила, калібри й кільця, токарні, довбальні й стругальні різці
9ХС	7,83	415	241	700	2200	0,25	63...66	12,5...14,0	200...220	Різальний інструмент, клейма
ХВСГ	7,83	388	255	—	3200	—	62...64	14,0...15,5	200...220	Круглі плашки, розвертки та інш.

Таблиця 1.4 (продовження) – Основні фізико-механічні властивості найбільш поширених марок вуглецевих і легированих інструментальних сталей

Марка сталі	Фізико-механічні властивості							Доля карбідної фази, %	Тепло- стійкість (черво- ностей- кість), °C	Область застосування
	ρ, г/см ³	HB	після відпалу		після загартування й відпалу					
			HB	σ _в , МПа	σ _в , МПа	ударна в'язкість α · 10 ⁵ , Дж/м ²	HRC			
9XC	7,83	415	241	700	2200	0,25	63...66	12,5...14,0	200...220	Різальний інстру- мент, клейма
XBCГ	7,83	388	255	—	3200	—	62...64	14,0...15,5	200...220	Круглі плашки, розвертки та інш.
XBG	7,83	5140	255	—	3400	—	63...66	14,0...16,0	400...500	Різьбові калібри, видовжені інстру- менти, холодно- висадочні матри- ці й пуансони
X6BF	—	5780	229	725	3150	—	59...61	12,0...14,0	490...510	Різьбонакатний інструмент (роли- ки й плашки), ручні ножовочні полотна, дереворізальний інструмент
X12Ф1	—	5780	255	—	3040	2,95	63...65	15,0...17,0	490...510	Холодні штампи, накатні плашки, матриці й пуансо- ни вирубних і про- січних штампів
X12M		5780	255	—	—	—	63...65	—	—	

Таблиця 1.5 – Технологічні властивості найбільш поширених марок вуглецевих і легированих інструментальних сталей

Марка сталі	Технологічні властивості				Температура загартування, °С, охолоджувальне середовище	Темпера- тура від- пускання, °С	Твердість HRC після загартува- ння й відпу- скання не менш
	оброблюваність		шліфує- мість	зварюваність			
	$K_{обр}$	K_{UTC}					
1	2	3	4	5	6	7	
У7, У7А	1,2	1,2	Добра	Задовільна	800...820, вода, масло	150...160 200...220	62...64 58...60
У8, У8А	1,1	1,2	Добра	Задовільна	700...800, вода, масло	150...160 200...220	62...64 58...60
У9, У9А, У10, У10А	1,0	1,1	Добра	Незадовільна	760...780, вода, масло	150...160 200...220	63...64 59...60
У11, У11А	0,9	0,9	Добра	Незадовільна		150...160 200...220	63...64 59...60
У12, У12А	0,8	0,9	Добра	Незадовільна		150...160 200...220	63...64 59...60
У13, У13А	0,7	0,9	Добра	Незадовільна		150...160 200...220	63...64 59...60

Таблиця 1.5 (продовження) – Технологічні властивості найбільш поширених марок вуглецевих і легованих інструментальних сталей

Марка сталі	Технологічні властивості				Температура загартування, °С, охолоджувальне середовище	Температура відпускання, °С	Твердість HRC після загартування й відпускання не
	оброблюваність		шліфує-мість	зварюваність			
	$K_{обр}$	K_{UTC}					
11X, 11XФ	1,0	1,1	Задовільна	Незадовільна	840...860, масло	150...170 130...150	63...64
X	0,5	0,9	Задовільна	Незадовільна	—	170...210	59...60
9XC	0,5	0,9	Задовільна	Незадовільна	—	180...250	59...63
XBG, XBCГ	0,5	0,8	Задовільна	Незадовільна	830...860, масло	150...200 200...300 140...160	63...64 59...63 61...63
X6BФ	0,5	0,9	Задовільна	Незадовільна	980...1000, масло	150...170 280...300	63...64 57...59
X12Ф1	0,3	0,8	Задовільна	Незадовільна	1030...1050, масло	180...200 400...420	61...63 58...59
X12M	0,5	0,8	Задовільна	Незадовільна	1000...1050, масло	190...210 320...350	61...63 58...59

Основні марки швидкорізальних сталей наведені в табл. 1.6, а їх фізико-механічні й технологічні властивості – в табл. 1.7 і 1.8. Швидкорізальні сталі позначаються буквами, що відповідають карбідоутворюючим і легуючим елементам (Р – вольфрам, М – молібден, Ф – ванадій, А – азот, К – кобальт, Т – титан, Ц – цирконій). За буквою йде цифра, що позначає середній масовий вміст елемента у відсотках (вміст хрому в маркуванні швидкорізальних сталей не вказується, тому що він становить близько 4 % у всіх сталях). Масовий вміст азоту вказується в сотих частках відсотка. Цифра, що стоїть на початку позначення сталі, вказує вміст вуглецю в десятих частках відсотка (наприклад, сталь марки 11РЗАМЗФ2 містить біля 1 % С, 3 % W, 3 % Мо и 2 % V).

Різальні властивості швидкорізальних сталей визначаються об'ємом основних карбідоутворюючих елементів – вольфраму, молібдену, ванадію й легуючих елементів – кобальту, азоту. Ванадій у зв'язку з малим масовим вмістом звичайно не враховується, і різальні властивості сталей визначаються, як правило, вольфрамовим еквівалентом, рівним $(W + 2Mo)$ %. У преїскурантах на швидкорізальні сталі виділяють три групи сталей: сталі 1-ї групи з вольфрамо-

вим еквівалентом до 16 % без кобальту, сталі 2-ї групи – до 18 % і вмістом кобальту близько 5 %, сталі 3-ї групи – до 20 % і вмістом кобальту 5...10 %. Відповідно розрізняються й різальні властивості цих груп сталей.

Таблиця 1.6 – Основні марки швидкорізальних сталей та їх найближчі імпортові аналоги

Позначення марки сталі по ДСТУ чи стандарту				Область застосування
ГОСТ 19265-73 (в ред. 1991 г.)	Германия	США	ISO	
P18	X74WV19	T1	1,3353	Для всіх видів різального інструмента для обробки вуглецевих, легованих, конструкційних сталей
P6M5	S 6-5-2	T11302	1,3343	Те ж саме, що і для сталі P18 (переважно для виготовлення різьбонарізного інструмента, а також інструмента, що працює з ударними навантаженнями)
11P3AM3Ф2	S 3-3-2 (HS 3-3-2)	—	—	Для інструмента простої форми для обробки вуглецевих і мало легованих сталей міцністю не більше 800 МПа
P6M5Ф3	S 6-5-3	M3	—	Для чистових і напівчистових інструментів (фасонні різці, розвертки, протяжки, фрези) для обробки не легованих і легованих конструкційних сталей
P12Ф3	S 12-1-4	—	1,3318	Для чистових інструментів для обробки в'язкої аустенічної сталі й матеріалів, що мають абразивні властивості

Позначення марки сталі по ДСТУ чи стандарту				Область застосування
ГОСТ 19265-73 (в ред. 1991 г.)	Германия	США	ISO	
P18K5Ф2	—	T4	—	Для чорнових і напівчистових інструментів для обробки високоміцних корозійно-стійких і жароміцних сталей і сплавів
P9K5	—	—	—	Для різних інструментів для обробки корозійно-стійких сталей і жароміцних сплавів, а також сталей підвищеної твердості
P6M5K5	S 6-5-2-5	—	1,3243	Для чорнових і напівчистових інструментів для обробки покращених легованих, а також корозійно-стійких сталей
P9M4K8	—	—	—	Для різних інструментів для обробки високоміцних корозійно-стійких сталей і жароміцних сталей і сплавів, а також покращених легованих сталей

Таблиці 1.7-1.8 – Основні фізико-механічні і технологічні властивості швидкорізальних сталей

Марка сталі	ρ , г/см ³	Твердість		Міцність після загартування		Температура, °С		Теплостійкість (червоність), °С
		після відпалу (HB)	після загартування (HRC)	σ_B , МПа	$\alpha \cdot 10^5$, Дж/м ²	загартування	відпускання	
P18	8,75	255	63	2900...3100	3,0	1270	560	620
P9	8,3	255	63	3350	2,0	1230	560	620
P6M5, P6AM5	8,15	255	64	3300...3400	4,8	1220	550	620
11P3AM3Ф2	7,9	255	63	2900...3100	—	1200	550	620
P6M5Ф3	8,15	269	65	3300...3400	4,8	1220	550	630
P12Ф3	8,39	269	64	3000...3100	2,7	1250	560	630
P18M5Ф2	8,75	285	64	2600...3100	2,0	1280	570	640
P9K5	8,25	269	64	2500	0,7	1230	570	630
P6M5K5	8,15	269	65	3000	2,75	1230	550	630
P9M4K8	8,3	285	65	2500	2,6	1230	550	630
P2AM9K5	7,8	285	65	—	—	1200	540	630

Марка сталі	Схильність до перегрівання	Схильність до знеуглецювання
11P3AM3Ф2	Так	Підвищена
P6M5	»	»
P6M5K5	»	»
P9K5	»	»
P9K10	»	»
P9M4K8	»	»
P12	Менша ніж у P6M5	Задовільна
P12Ф3	»	»
P12Ф2K8M3	Так	»
P18	Ні	»

Крім стандартних, застосовуються й спеціальні швидкорізальні сталі, що містять, наприклад, карбонітриди титану. Однак висока твердість заготовок цих сталей, складність механічної обробки не сприяють їхньому широкому поширенню. Під час обробки важкооброблюваних матеріалів знаходять застосування

порошкові швидкорізальні сталі Р6М5-П і Р6М5К5-П. Високі різальні властивості цих сталей визначаються особливою дрібнозернистою структурою, що сприяє підвищенню міцності, зменшенню радіуса округлення різального пругу, поліпшеній оброблюваності різанням і особливо шліфуванням.

Для виготовлення різного роду інструмента застосовується швидкорізальна сталь:

- з вмістом значної кількості легуючих елементів – інструменти з цієї сталі застосовуються, в основному, для обробки деталей з важкооброблюваних сталей і сплавів;

- малолегована вольфрамом – інструменти з цієї сталі застосовуються для обробки деталей з вуглецевих і низьколегованих сталей, чавуну й алюмінієвих сплавів; ці сталі в ряді випадків доцільно також застосовувати під час обробки деталей з деяких груп важкооброблюваних сталей і сплавів.

Металокерамічні тверді сплави є основним інструментальним матеріалом, що забезпечує високопродуктивну обробку матеріалів різанням. Загальна кількість різального інструмента з твердого сплаву не перевищує 25%, але через високу швидкість різання (в 2,5...3 рази вище в порівнянні з швидкорізальним інструментом) вони видаляють до 65% всієї стружки (із усього обсягу стружки, що видаляють інструментами зі всіх інструментальних матеріалів). Стандартні тверді сплави містять суміш зерен карбідів, нітридів, карбонітридів важкотопких металів (карбідів вольфраму, титану і танталу) у зв'язуючому матеріалі (кобальт) і поділяються на три групи:

- 1 – однокарбідні ($WC + Co$) – вольфрамові, група ВК;
- 2 – двокарбідні ($WC + TiC + Co$) – вольфрамотитанові, група ТК;
- 3 – трикарбідні ($WC + TiC + TaC + Co$) – вольфрамотитанотанталові, група ТТК.

Позначення твердих сплавів включає букви, що характеризують карбідоутворюючі елементи (В – вольфрам, Т – титан, друга буква Т – тантал) і зв'язку (К – кобальт). Цифра після букви К позначає масову частку зв'язки в процентах. Масова частка карбідоутворюючих елементів в однокарбідних сплавах, що містять тільки карбід вольфраму, визначається різницею між 100% і масовою часткою зв'язки. Наприклад, сплав ВК4 містить 4% кобальту і 96% WC. У двокарбідних ($WC + TiC$) сплавах цифра після букви карбідоутворюючого елемента позначає масову частку карбіду цього елемента (TiC), а масова частка карбіду другого елемента (WC) визначається різницею між 100% і масовими частками зв'язки і карбіду першого елемента (наприклад, сплав Т5К10 містить 5 % TiC , 10% Co і 85% WC). У трикарбідних ($WC + TiC + TaC$) сплавах цифра після букв ТТ означає масову частку карбідів титану і танталу. Масова частка карбіду вольфраму визначається різницею між 100% і масовими частками зв'язки і кар-

бідів TiC і TaC. Наприклад, сплав TT7K12 містить 12% Co, 7% карбідів титану і танталу (TiC + TaC) і решту 81% WC.

Склад і основні властивості твердих сплавів групи ВК на основі тільки карбіду вольфраму (WC) наведено в табл. 1.9. Марки сплавів цієї групи розрізняються за вмістом в них кобальту, розмірами зерен карбіду вольфраму (WC) і технологією виготовлення. Для оснащення різального інструмента застосовуються сплави з вмістом кобальту від 3% до 10% вагових. При збільшенні в сплавах вмісту кобальту в розглянутому діапазоні межа міцності при поперечному вигині і експлуатаційна міцність при різанні зростають, в той час як твердість і зносостійкість зменшуються.

Таблиця 1.9 – Склад і основні фізико-механічні властивості вольфрамокобальтових сплавів

Марка сплаву	Склад, %			$\sigma_{\text{виг}}$, МПа	Густина ρ , г/см ³	Твердість HRA, не менше
	WC	Інші сполуки	Co			
BK3	97	–	3	1176	15,0-15,3	89,5
BK3-M	97	–	3	1176	15,0-15,3	91,0
BK6	94	–	6	1519	14,6-15,0	88,5
BK6-M	94	–	6	1421	14,8-15,1	90,0
BK6-OM	92	TaC	6	1274	14,7-15,0	90,5
BK8	92	–	8	1666	14,4-14,8	87,5
BK10-XOM	88	Cr ₂ C ₃	10	1600	14,3-14,6	89,0

Так, сплав BK3 з мінімальним вмістом кобальту, як найбільш зносостійкий, але найменш міцний, рекомендують для чистової обробки з максимально допустимою швидкістю різання, а сплави BK8 і BK10-XOM – для чорнової обробки зі зниженою швидкістю різання і збільшеним перетином зрізу в умовах ударних навантажень. Сплав BK10-XOM призначений для чорнової і напівчорнової обробки деяких марок корозійностійких сталей, титанових і нікелевих сплавів, особливо сплавів вольфраму і молібдену. Завдяки особливо дрібнозернистій, щільній структурі сплавів можна заточувати і доводити інструменти з найменшими радіусами заокруглення різальних прутів, що, у свою чергу, забезпечує отримання меншої висоти мікронерівностей обробленої поверхні і розмірної точності.

За однакового вмісту кобальту фізико-механічні та різальні властивості в значній мірі визначаються зернистістю фази карбіду, головним чином, середнім розміром зерен карбіду вольфраму. Розроблені технологічні прийоми дозволяють отримати тверді сплави, в яких середній розмір зерен карбіду може зміню-

ватися від часток мікрометра до 10-15 мкм. Зі збільшенням розміру зерен карбидовольфрамової фази твердість, модуль пружності, опірність абразивному зношуванню та стійкість при різанні чавуну зменшуються, а межа міцності при вигині зростає. Цю закономірність широко використовують для створення сплавів різного призначення з необхідними властивостями.

Склад і основні властивості твердих сплавів групи ТК на основі карбідів вольфраму (WC) і титану (TiC) наведено в табл. 1.10. Титановольфрамові сплави випускають головним чином для оснащення інструментів для обробки різанням сталей, що дають зливну стружку. У порівнянні зі сплавами ВК вони мають більшу стійкість проти окислення, твердість і теплостійкість (теплостійкість сплавів ТК $\sim 900^{\circ}\text{C}$, сплавів ВК $\sim 800^{\circ}\text{C}$), в той же час меншу теплопровідність і електропровідність, а також менший модуль пружності.

Таблиця 1.10 – Склад і основні фізико-механічні властивості титановольфрамокобальтових сплавів

Марка сплаву	Склад, %			$\sigma_{\text{виг}}, \text{МПа}$	Густина ρ , г/см ³	Твердість HRA, не менше
	WC	TiC	Co			
T30K4	66	30	4	980	9,5-9,8	92,0
T15K6	79	15	6	1176	11,1-11,6	90,0
T14K8	78	14	8	1274	11,2-11,6	89,5
T5K10	85	6	9	1421	12,4-13,1	88,5

Підвищена здатність титановольфрамових сплавів чинити опір адгезійно-втомному зношуванню пояснюється тим, що температурний поріг їх захоплення зі сталлю істотно вище, ніж у сплавів WC-Co. Титановольфрамові сплави дозволяють застосовувати більш високі швидкості різання для обробки сталі і істотно підвищити стійкість інструмента. Так само, як і у сплавів ВК, межа міцності при вигині і стиску, а також ударна в'язкість у сплавів ТК збільшується зі зростанням вмісту кобальту. Зі збільшенням вмісту вуглецю в межах трифазової області міцність при вигині зростає, а твердість і зносостійкість знижуються. Наявність структурно вільного вуглецю призводить одночасно до зниження міцності, твердості і зносостійкості при різанні.

У сплавів з однаковим змістом кобальту і однаковим розміром карбідних фаз межа міцності при вигині і стиску, ударна в'язкість, пластична деформація і модуль пружності зменшується при збільшенні вмісту карбиду титану.

Згідно з наведеними закономірностями змінюються і різальні властивості сплавів: збільшення вмісту кобальту призводить до зниження зносостійкості сплавів при різанні, а з ростом вмісту карбиду титану (при постійному об'ємно-

му вмісті кобальту) підвищується зносостійкість, але одночасно знижується експлуатаційна міцність. Тому такі марки сплавів, як Т30К4 і Т15К6, що мають максимальний запас пластичної міцності, застосовуються в умовах чистової і напівчистової обробки сталі з високою швидкістю різання, малими або помірними навантаженнями на інструмент. Сплави Т5К10, Т5К12 з найбільшим вмістом кобальту і запасом крихкої міцності призначені для роботи у важких умовах ударних навантажень зі зниженою швидкістю різання.

Склад і основні властивості твердих сплавів групи ТТК наведено в табл. 1.11. Промислові титанотанталовольфрамові тверді сплави складаються з трьох основних фаз: твердого розчину $(\text{Ti}, \text{W}, \text{Ta})\text{C}$, карбіду вольфраму і твердого розчину на основі кобальту. Введення в сплави карбіду танталу покращує їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості, що відображується в збільшенні міцності при вигині і твердості при кімнатній і підвищеній температурах, збільшенні роботи деформації при підвищених температурах. Карбід танталу в сплавах знижує повзучість, істотно підвищує межу втоми трифазних сплавів при циклічному навантаженні, а також підвищує термостійкість і стійкість проти окислення на повітрі. Вміст карбіду танталу в сплавах групи ТТК стандартних марок коливається від 2 до 12%.

Таблиця 1.11 – Склад і основні фізико-механічні властивості титанотанталовольфрамокобальтових сплавів

Марка сплаву	Склад, %				$\sigma_{\text{виг}}, \text{МПа}$	Густина ρ , г/см ³	Твердість HRA, не менше
	WC	TiC	TaC	Co			
ТТ7К12	81	4	3	12	1666	13,0-13,8	87,0
ТТ8К6	84	8	2	6	1323	12,8-13,3	90,5
ТТ10К8-Б	82	3	7	8	1617	13,5-13,8	89,0
ТТ20К9	67	9,4	14,1	9,5	1470	12,0-13,0	91,0

Дослідження різальних властивостей сплавів ТТК показало, що збільшення в сплаві вмісту карбіду танталу підвищує його зносостійкість при різанні, особливо за рахунок меншої схильності до лункоутворення і руйнування під дією термоциклічних і втомних навантажень.

З урахуванням зазначених властивостей, сплави ТТК рекомендують для обробки різанням важкооброблюваних матеріалів при значному термомеханічному навантаженні інструмента, а також операцій переривчастого різання, особливо фрезерування, що відрізняються змінним перетином зрізу і циклічними термомеханічними навантаженнями на різальну частину інструмента.

Найбільшу крихку міцність серед сплавів групи ТТК має сплав ТТ7К12, який рекомендують для обробки сталей в особливо несприятливих умовах (переривчасте точіння, стругання, чорнове фрезерування). Застосування інструмента зі сплаву ТТ7К12 замість швидкорізального інструмента дозволяє підвищити швидкість різання в 1,5-2,0 рази. Для операцій фрезерування рекомендується сплав марки ТТ20К9 (для обробки сталей).

Для чистового і напівчистового точіння, розточування і фрезерування сірого і ковкого чавуну, кольорових металів, безперервного точіння високоміцних, корозійностійких сталей, в тому числі і термооброблених, а також титанових сплавів, призначений сплав ТТ8К6.

Чорнове, напівчорнове точіння і фрезерування високолегованих, нержавіючих і жароміцних сталей і деяких сплавів успішно здійснюється інструментом зі сплаву марки ТТ10К8-Б.

До групи сплавів, які містять тантал, слід віднести і так звані сплави МС фірми “Sandvik Coromant” (Швеція). Склад і основні властивості твердих сплавів групи МС наведено в табл. 1.12.

Таблиця 1.12 – Склад і основні фізико-механічні властивості титанотанталовольфрамокобальтових сплавів групи МС

Марка сплаву	Сплав-аналог (ГОСТ3882-74)	Властивості			
		$\sigma_{\text{виг}}, \text{МПа}$	Густина ρ , г/см ³	Твердість, HV_{30}	Коерцитивна сила, КА/м
МС111	T15K6	1150	10,22-10,38	1525-1675	8,7-11,9
МС121	T14K8	1200	11,60-11,79	1475-1625	7,2-9,5
МС131	T5K10	1400	11,35-11,51	1430-1570	8,0-10,4
МС137	T14K8, ТТ20К9	1400	11,68-11,85	1485-1635	13,5-15,2
МС146	ТТ7К12	1800	13,04-14,60	1320-1460	10,2-15,2
МС211	BK6-M	1500	14,70-14,86	1590-1680	15,9-23,6
МС221	ТТ10К8Б	1400	13,81-13,97	1530-1630	10,3-13,3
МС241	BK8	2000	14,15-14,25	1175-1295	9,4-11,2
МС301	BK3-M	1150	14,95-15,11	1760-1940	20,6-23,6
МС306	BK6-OM	1250	14,74-14,94	1665-1835	19,8-23,2
МС312	BK6-M	1300	12,79-12,95	1700-1940	15,9-23,2
МС318	BK6, T8K7	1500	12,80-12,96	1575-1725	15,2-20,6
МС321	BK6	1350	14,64-14,86	1450-1600	13,4-15,2
МС313	BK6-M	1300	14,74-14,94	1505-1655	13,4-17,3

Сплави марок MC101, MC111, MC121, MC131 і MC146 призначені для обробки сталі і сталюого литва в різних умовах, сплави MC211, MC221 і MC241 – для різання важкооброблюваних матеріалів, а сплави марок MC301, MC306, MC312, MC313 і MC321 – для обробки чавуну і кольорових металів. Сплави марки MC137 і MC318 призначені для фрезерування сталі і чавуну.

Дослідження різальних властивостей сплавів MC показали їх високу надійність в порівнянні зі стандартними сплавами, що пов'язано з підвищеною стабільністю їх фізико-механічних характеристик. Тому більш висока вартість (на 40-60%) сплавів MC у порівнянні зі стандартними сплавами цілком виправдана високою стабільністю різальних властивостей і експлуатаційною надійністю інструмента, оснащеного пластинами MC.

Області застосування твердих сплавів. Рекомендації міжнародної організації стандартів (ISO) передбачають використання сплавів з урахуванням рівня основних властивостей кожної марки (ГОСТ 3882-74) в залежності від умов обробки (режим: h, S, V, характер операції, оброблюваний матеріал, тип стружки, яка формується тощо). Відповідно до цих рекомендацій тверді сплави класифікують за трьома основними групами різання: група Р – для обробки матеріалів, що дають зливну стружку, група К – стружку надламу й група М – для обробки різних матеріалів (універсальні тверді сплави). Кожна група різання розділяється на групи й підгрупи застосування в залежності від умов обробки (табл. 1.13).

Чим більше індекс підгрупи застосування, тим нижче зносостійкість твердого сплаву і допустима швидкість різання, але вище міцність (ударна в'язкість), допустима подача і глибина різання. Таким чином, малі індекси відповідають чистовим операціями, коли від твердих сплавів потрібна висока зносостійкість і мала міцність, а великі індекси відповідають чорновим операціями, тобто коли твердий сплав повинен мати високу міцність. У зв'язку з цим кожна марка має свою переважну область застосування, в якій вона забезпечує максимальні працездатність інструмента і продуктивність процесу обробки.

Межі підгрупи застосування визначаються орієнтовно і неоднозначно. Тому ряд марок твердих сплавів можуть добре працювати у двох-трьох підгрупах застосування (наприклад, сплав T15K6 – P10, P15, P20) або навіть в різних групах застосування (наприклад, сплав BK8 – K30, K40, M30).

Основні тенденції вдосконалення твердих сплавів. Удосконалення вольфрамкобальтових твердих сплавів (WC-Co) пов'язане з розробкою сплавів особливодрібнозернистої (<1 мкм) і ультрадрібнозернистої (< 0,1-0,5 мкм) структури; створенням сплавів зі зв'язками підвищеної міцності і теплостійкості; застосуванням нових технологій виробництва сплавів на основі використання субдрібнозернистого вихідного зерна, суміщення процесів синтезу і гарячого статичного пресування; введенням додаткової операції доушільнення структури сплавів на спеціальних установках гарячого ізостатичного пресування (ГІП).

Таблиця 1.13 – Класифікація сучасних твердих сплавів згідно стандарту ISO 513

Основні групи різання		Групи застосування			Марка твердого сплаву за ГОСТ 3882-74
Позначення	Колір маркування	Позначення	Оброблюваний матеріал й тип стружки	Вид обробки й умови застосування	
P	Синій	P01	Сталь, сталіне литво, під час обробки яких формується зливна стружка	Чистове точіння, розточування, розгортання, високоточне різання без вібрацій	T30K4 MC101 TN20
		P10		Точіння, точіння по копіру, нарізання різьби, фрезерування, розсвердлювання, розточування	T15K6 MC111 KHT16 ЦТУ
		P20	Сталь, сталіне литво, ковкий чавун, кольорові метали, під час обробки яких формується зливна стружка	Точіння, фрезерування	T14K8 MC121 KHT16 ЦТУ KTN30
		P25	Сталь нелегована, низько- й середньолегована	Фрезерування у т.ч. глибоких пазів, обробка при пред'явленні вимог к підвищеному опору сплаву тепловим і механічним навантаженням	TT20K9 MC137 TB4
		P30		Чорнове точіння, фрезерування й стругання	T5K10 MC131 TB4
		P40 P50	Сталь, сталіне лито з включеннями піску й раковинами	Для робіт у несприятливих й особливо несприятливих умовах*	TT7K12 MC146
M	Жовтий	M05 M10	Сталь, сталіне литво, високолеговані аустенітні, жароміцні важкооброблювані сталі і сплави, сірий, ковкий і легований чавуни	Точіння, розгортання	BK6-OM BK6-M TT8K6 BK6-OM
		M20	Сталіне литво, аустенітні, марганцевисті, жароміцні, важкооброблювані сталі і сплави	Точіння, фрезерування	BK6-BC TT10K8-Б MC221
		M30	Сплави, сірий і ковкий чавуни, де формується як зливна, так і стружка надламу	Точіння, фрезерування, стругання. Умови різання несприятливі*	BK10-OM BK10-XOM BPK15 BK8

**Таблиця 1.13 (продовження) – Класифікація сучасних твердих сплавів
згідно стандарту ISO 513**

Основні групи різання		Групи застосування			Марка твердого сплаву за ГОСТ 3882-74
Позначення	Колір маркування	Позначення	Оброблюваний матеріал й тип стружки	Вид обробки й умови застосування	
М	Жовтий	M40	Низьковуглецева сталь з низькою міцністю, автоматна сталь й інші матеріали, де формується як зливна, так і стружка надламу	Точіння, фасонне то- чіння, відрізка, перева- жно на верстатах- автоматах	ТТ7К12 МС146
К	Червоний	K01	Сірий чавун високої твердості, алюмінієві сплави з великим вмі- стом кремнію. Загар- тована сталь, абразив- ні пластмаси, керамі- ка, де формується стружка надламу	Чистове точіння, розто- чування, фрезерування й шабрування	ВК3 ВК3-М МС301
		K05	Леговані й вибілені чавуни, загартовані сталі, нержавіючі ви- сокоміцні й жароміцні сталі й сплави, де формується стружка надламу	Чистове й напівчистове точіння, розточування, розгортання, нарізання різьби	ВК6-ОМ ТТ8К6 МС306
		K10	Сірий і ковкий чавуни переважно підвищеної твердості, загартована сталь, алюмінієві й мідні сплави, пластма- си, скло, кераміка, де формується стружка надламу	Точіння, розточування, фрезерування, сверд- ління	Т8К6 ВК6-М ВК6-ОМ МС312 МС313
		K20	Сірий чавун, кольоро- ві метали, сильно аб- разивна пресована деревина, пластмаси	Точіння, розточування, фрезерування, сверд- ління	ВК6 МС321 ЦТУ
		K30	Сірий чавун низької твердості й міцності, сталь низької міцності, деревина, кольорові метали, пластмаси	Точіння, розточування, фрезерування, сверд- ління. Робота в неспри- ятливих умовах*	ВК8 ВК10-ХОМ МС321
		K40	Кольорові метали, деревина, пластмаси, де формується струж- ка надламу	Точіння, фрезерування, стругання	

Використання твердих сплавів ультра- і особливодрібнозернистої структури дозволяє отримати радіус округлення різальних пругів інструмента в ме-

жах 5-10 мкм, що відповідає радіусу округлення інструмента з вуглецевої і швидкорізальної сталей. Крім того, такі сплави мають більш високу однорідність зерен за об'ємом, відтак є найбільш придатними для виготовлення мало-розмірного цільного твердосплавного інструмента (свердла, кінцеві фрези, різьбонарізний інструмент тощо).

Наразі світові виробники різального інструмента рекомендують використовувати інструмент з ультра- і особливодрібнозернистих сплавів для обробки високоміцних чавунів, загартованих сталей, сплавів на основі нікелю, титану і молібдену, висококремнієвих алюмінієвих сплавів, скло, вугле-, боропластиков. Зокрема, пластини зі сплаву ТНМ, що мають середній розмір зерна близько 0,6 мкм, фірма Krupp Widia (Германія) рекомендує для обробки високотвердих сталей (HRC 55), а також для обробки висококремнієвого алюмінієвого сплаву.

Фірма Sandvik Coromant (Швеція) рекомендує пластини зі сплаву H10F (M20-M30) для фрезерування жароміцних сплавів, а фірма Kennametal-Hertel (США-ФРН) рекомендує дрібнозернистий сплав K313 для різання важкооброблюваних матеріалів, що застосовуються в аерокосмічній промисловості. Слід наголосити, що сплав K313 має унікальну міцність при вигині (σ_v 3,2 ГПа), що досягається використанням технології додаткового гарячого ізостатичного пресування (ГПП). Сплав K313, крім того, має високу опірність термопластичному деформуванню при підвищених температурах.

Надійність твердосплавного інструмента, особливо в автоматизованому виробництві, залежить не тільки від середніх значень міцності, але і від стабільності його міцності. Тому розроблюють технології, спрямовані на підвищення однорідності властивостей сплавів. Прикладом такої тенденції може служити створення особливодрібнозернистого сплаву А-1, розробленого фірмою Sumitomo (Японія). Цей сплав має не тільки строго фіксований розмір зерна (0,5-0,8 мкм), але й високу однорідність розподілу зв'язки за об'ємом матеріалу. Пластини зі сплаву А-1 фірма рекомендує для чорнового точіння і фрезерування завдяки високій опірності крихкому руйнуванню різальних пругів і високою міцністю утримання карбідного зерна в сплаві, що зумовлює високу зносостійкість сплаву в умовах переривчастого різання. Зокрема, при чистовій обробці високолегованої сталі 16MnCr5E з твердістю HRC_e 62 застосування торцевих фрез, оснащених сплавом А-1, дозволило збільшити швидкість фрезерування до 120 м/хв.

Для виробництва цільнотвердосплавних свердел і кінцевих фрез діаметром 0,1-0,8 мм для обробки отворів в друкованих фольгованих платах фірма Sumitomo (Японія) розробила кілька марок дрібно- і особливодрібнозернистих сплавів, які мають високі показники міцності при вигині і крученні і однорідність розміру зерна. Зокрема, твердий сплав AF-1 з розміром зерен 0,5-0,15 мкм

і вмістом кобальту 12% за об'ємом, що має твердість HRA 93 і міцність при вигині σ_b 5,0 ГПа, був використаний для виготовлення свердел діаметром 0,1 мм. Необхідно відзначити, що при виробництві свердел такого діаметру найменші дефекти сплаву і, зокрема, нерівномірність розміру зерна WC за об'ємом призводить до неминучої поломки свердла при експлуатації. Під час обробки отворів діаметром 0,1-0,3 мм в фольгованих пластинах свердла зі сплаву AF-1 мали стійкість, яка істотно перевищує стійкість свердел з швидкорізальної сталі. Аналогічні цільнотвердосплавні свердла фірми Kennametal-Hertel дозволили до 3-х разів підвищити подачу при свердлінні в суцільному матеріалі в порівнянні з подачею для швидкорізальних свердел при одночасному збільшенні швидкості різання до 80-120 м/хв.

Велику увагу приділяють вдосконаленню зв'язки твердого сплаву, яка є слабкою технологічною ланкою сплаву. Зокрема, як було показано вище, на властивості зв'язки сильно впливає вміст вуглецю і цей вплив посилюється в міру зростання вмісту в сплаві кобальту.

Легування зв'язуючої фази ренієм (Re) підвищує її міцність, опірність високотемпературної повзучості і, крім того, запобігає формуванню крихкої β -фази. Слід зазначити, що поява рідкої фази твердого розчину Co-Re відбувається при температурі вище на 100-300 °C, ніж у твердого розчину Co-W-C, при цьому твердість сплаву з (Co-Re)-зв'язкою на 200-300 одиниць HV вище. Це є головною причиною підвищення стійкості інструмента, оснащеного сплавом з (Co-Re)-зв'язкою, яка в 3-5 рази перевищує стійкість інструмента, оснащеного твердим сплавом зі стандартною кобальтовою зв'язкою.

Поліпшення властивостей твердого сплаву відзначено при його легуванні рутенієм (Ru). Зокрема, введення 0,4% (по масі) рутенію в сплав (94% WC – 6% Co) збільшує його міцність при вигині на 16% при збереженні твердості. Це пов'язано з тим, що рутеній стримує зростання карбідних зерен і покращує їх змочуваність, що, в свою чергу, призводить до зростання міцності адгезійного зв'язку між WC і Co. Сплави з (Co-Ru)-зв'язкою добре опираються механічним ударам і термічній втомі.

Широке застосування сплавів з (Co-Re)- і (Co-Ru)- зв'язками стримується недостатністю Re і Ru. Тому останнім часом розроблені сплави з новими типами економнолегованих зв'язок, в яких кобальт частково або повністю замінений нікелем, молібденом і залізом. Зокрема, все більше застосування знаходять сплави зі зв'язками Fe-Co, Fe-Ni, Co-Ni, Fe-Co-Ni, Fe-Mo тощо.

Помітний вплив на властивості особливо- і дрібнозернистих твердих сплавів надає вміст кобальту. Зокрема, зростання вмісту кобальту в сплаві дозволяє збільшити межу міцності при вигині і ударну в'язкість, теплопровідність, знизити коефіцієнт термічного розширення, твердість, модуль пружності і пи-

томий електричний опір. Зниження вмісту кобальту (наприклад, до 3,69% за об'ємом) помітно знижує оптимальне значення температури спікання (з 1400°C до 1275°C), що, в свою чергу, дозволяє знизити тенденцію зростання зерна при спіканні і збільшити зносостійкість сплаву. Оптимальне поєднання властивостей дрібнозернистих сплавів забезпечується при вмісті кобальту в межах 6% за об'ємом. Такі сплави використовують для виробництва цільнотвердосплавних інструментів: свердел, зенкерів, кінцевих фрез, мітчиків тощо.

Фірма Krupp-Widia (ФРН) пропонує споживачам кілька нових марок титанотанталовольфрамкових твердих сплавів для фрезерування. Висока ефективність сплаву ТТМ-S забезпечується поєднанням високої твердості (HV1500) і міцності при згині 2,1 ГПа, тому пластини з твердого сплаву рекомендують для чорнового і чистового фрезерування сталей, сталевих литва, легованого чавуну, високолегованих жароміцних сталей (P10-P30, M20-M30) на швидкостях різання до 140 м/хв., подачах до 0,34 мм/зуб; глибинах різання 4-10 мм.

Японська фірма Mitsubishi розробила широку гамму титанотанталовольфрамкових сплавів різного призначення. Зокрема, сплав UTi20T рекомендується для оснащення інструмента, який може бути використаний при точінні і фрезеруванні сталей, чавунів, важкооброблюваних матеріалів (P25, K20, M20). Інструмент, оснащений пластинами зі сплаву STi10T, рекомендується для чистого і копіювального точіння, нарізання різьби та канавок, а пластини зі сплаву HTi05T – для тонкого точіння і розточування сталевих заготовок. Більш міцні пластини HTi10T рекомендують для точіння заготовок з важкооброблюваних матеріалів.

Відзначається тенденція заміни карбіду танталу TaC більш ефективними карбідами гафнію HfC, ніобію NbC, хрому CrC, ванадію VC. Зокрема, сплави, леговані карбідами гафнію, мають помітну перевагу по зносостійкості при точінні, але поступаються при фрезеруванні сплавів, легованих TaC. Це пов'язано зі зростанням схильності до великої зміни лінійних розмірів і зниженням теплопровідності для сплавів, легованих HfC і NbC в порівнянні з відповідними характеристиками сплавів, легованих TaC. Наприклад, стійкість різців, оснащених пластинами S20C (P20), що містять 63% WC, 17% TiC і 9% NbC, близька до стійкості різців, оснащених пластинами S20S, що містять 14% TaC і NbC і на 20% вище стійкості інструмента, оснащеного пластинами S20, що не містять карбіди гафнію, ніобію і танталу.

Найбільш радикально удосконалюються безвольфрамові тверді сплави (БВТС). Якщо в Західній Європі і США використовують 2-5% БВТС, то в Японії до 30-35%. У світовій практиці в даний час виробляють БВТС головним чином на основі TiC, TiC-TiN з різними варіантами зв'язок (табл. 1.14).

**Таблиця 1.14 – Склади безвольфрамових твердих сплавів,
які застосовують у світовій практиці**

На основі TiC	На основі TiC – TiN
TiCN – (W,Ti)C – Co	TiC – TiN – WC – Co
Ti(C,N) – Ni	TiC – TiN – Ni – Mo – W
Ti(C,N) – Ni – Mo	TiC – TiN – Ni – MoC
(Ti,Mo)CN – Ni – Mo	TiC – TiN – WC – MoC – Co
(Ti,Ta)CN – Ni – Fe – Mo	TiN – WC – Co
(Ti,W)CN – TaC – WC – Co	–
TiCN – (W,Ti)C – Co	–

Для підвищення пластичності і опірності руйнуванню при термоциклічних навантаженнях БВТС додатково легують карбідами Mo, V, Ta, Nb, Zr, Hf, Al, Cr, а також W. Розглядається також можливість виробництва БВТС на основі боридів перехідних металів IV-VI груп Періодичної системи і, зокрема, TiB і TiB₂.

Ефективність БВТС при різанні в значній мірі визначається складом і властивостями зв'язки. При виробництві БВТС в якості зв'язки найчастіше використовують нікель з добавками молібдену або кобальту, а для її зміцнення до складу зв'язки вводять Fe, Cr, Al, W, Ti, Si тощо. Наприклад, при легуванні БВТС алюмінієм відбувається утворення субмікроскопічної фази Ni (Ti, Al), що виконує роль своєрідного фазового зміцнювача. В результаті відбувається зміцнення зв'язки, зростає твердість сплаву без зниження його міцності. У світовій практиці використовують БВТС з вмістом зв'язки в межах 5-25% (по вазі).

Фірма Sumitomo розробила серію БВТС, які успішно замінили вольфрамовмісні тверді сплави для операцій чистового і напівчистового точіння сталей (P01-P20). Зокрема, сплав T12A (HV 1580 МПа, міцність на вигин 1,65 ГПа) застосовується для напівчистового точіння і фрезерування конструкційних сталей на феритній основі з швидкістю 150-200 м/хв. відповідно, а також для точіння і фрезерування нержавіючих сталей на швидкостях різання 60-250 м/хв. і 60-120 м/хв. Найбільш вдалим в цій серії є сплав T25A (HV = 1520 МПа; міцність на вигин 1.85 ГПа) призначений для напівчистового точіння конструкційних сталей (50-200 м/хв.) і фрезерування (120-180 м/хв., Sz = 0,25 мм/зуб).

Ще один напрямок вдосконалення БВТС пов'язано з введенням в їх склад невеликої кількості WC і TaC з метою підвищення теплопровідності, зниження коефіцієнта термічного розширення, що помітно підвищує опірність БВТС руйнуванню в умовах термоциклювання і значно підвищує зносостійкість спла-

ву для важких операцій і, зокрема, для чорнового фрезерування. Наприклад, фірма Toshiba Tungalloy (Японія) розробила гаму БВТС (302, 308, 350, NS500) на основі TiC-TiN, легованих WC і TaC. Ці сплави рекомендовані фірмою для оснащення інструмента, призначеного для напівчистового точіння сталей і чавунів, а також загартованих сталей і чавунів підвищеної міцності, нержавіючих аустенітних сталей (P10-P20, K05-K20, M05-M10). Завдяки високій опірності руйнуванню при термоциклічних навантаженнях торцеві фрези, оснащені пластинами NS540, можуть бути використані для фрезерування стали твердістю HB160 з $V = 170$ м/хв.; $S_z = 0,2$ мм/зуб; $h = 2-3$ мм, при цьому допускається застосування ЗМОТС.

Фірма Adamas Carbide (США) рекомендує пластини з БВТС марок ADAMAX300 і ADAMAX400 для чистового, напівчистового і чорнового точіння сталей (HRCe 42-45) і чавунів на швидкостях різання до 220 м/хв., хвилинної подачі до 813 мм/хв. і глибиною різання до 15 мм.

Фірма Teledyne First Stering (США) рекомендує розроблені БВТС на основі TiCN і (Ti, Mo) CN з нікельмолібденовою зв'язкою (марка SD-3) для точіння, розточування, підрізування, нарізування різьби в сталях і чавунах, жароміцних сталях, що свідчить про широкі межі застосування сплаву SD-3. Зокрема, інструмент зі сплаву SD-3 досить ефективний при різанні з $V = 300-400$ м/хв. заготовок зі сталі твердістю до 50 HRCe.

Слід зазначити, що БВТС, з їх більш вищою, ніж у вольфрамівмісних твердих сплавів, теплостійкістю, меншою схильністю до адгезії з оброблюваним матеріалом, цілком відповідають сучасній тенденції обробки заготовок за одну установку з мінімальним припуском, високих вимогах до точності і шорсткості оброблених поверхонь і використанні високих швидкостей різання. Таким чином, інструмент, оснащений пластинами з БВТС, стає особливо ефективним при обробці великих поверхонь з високими вимогами по точності, правильності геометричної форми, шорсткості оброблених поверхонь. Зокрема, при тонкому фрезеруванні напрямних довжиною до 600 мм і шириною до 40 мм зі сталі 58СМо фрезою, оснащеною пластинами з БВТС марки Т60 з $V = 125$ м/хв., $S_z = 0,15$ мм/зуб; $h = 0,3$ мм (критерієм відмови служив параметр шорсткості $R_a = 0,4$ мкм), число оброблених деталей за період стійкості фрези склало 12 штук при шорсткості по всій обробленій поверхні $R_a = 0,35$ мкм. При використанні торцевих фрез, оснащених вольфрамівмісним твердим сплавом, шорсткість обробленої поверхні при аналогічних умовах обробки склала $R_a = 2,1$ мкм.

У ряді випадків інструмент, оснащений пластинами з БВТС, перевершує інструмент з твердих сплавів зі зносостійкими покриттями і кераміки. Зокрема, інструмент, оснащений пластинами з БВТС марки SN80 фірми «Feldmuhle»

(ФРН), перевершує керамічний інструмент при різанні на швидкостях 350-500 м/хв. в умовах підвищених вимог до міцності різальних пругів і якості обробленої поверхні.

Синтетичні алмази для виготовлення шліфувального інструмента на гальванічній зв'язці. Такий інструмент використовують для обробки полімерних, металополімерних композитів, наприклад, пластику, армованого скловолокном GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer).

Для ефективного здійснення процесів різання полімерних, металополімерних композитів велике значення має збереження гостроти різальних пругів в умовах інтенсивного абразивного зношування, тому для обробки таких матеріалів можуть бути застосовані лише надтверді матеріали (НТМ) – мікротвердість натуральних алмазів 98,1 ГПа, синтетичних алмазів марки АС6 – 89 ГПа і КНБ марки ельбор-Р або гексаніт 84 ГПа. Однак зерна КНБ не мають гостроти різальних пругів, достатньої для ефективного шліфування полімерних, металополімерних композитів.

Як відомо, при будь-якому виді алмазно-абразивної обробки зі збільшенням зернистості вільного або зв'язаного абразиву зростає інтенсивність видалення матеріалу, зменшується питома витрата алмазів, збільшуються шорсткість і дефектність обробленої поверхні.

Марки алмазних порошків і мікропорошків, область їх застосування представлені в табл. 1.15, форма і класифікація алмазного порошку – в табл. 1.16, відповідність зернистості алмазних порошків по ДСТУ 3292-95 закордонним стандартам і їх застосування за видами обробки – в табл. 1.17.

Для алмазного шліфувального інструмента зі збільшенням розміру зерна відповідно зростає величина частини останнього, що виступає зі зв'язки, і, завдяки цьому, відбувається більш інтенсивне руйнування оброблюваного матеріалу, що виявляється в підвищенні продуктивності обробки та збільшенні дефектності і рельєфного шару шліфованої поверхні.

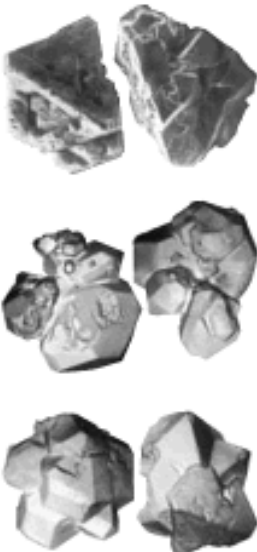
Як буде показано в подальшому, для алмазно-абразивної обробки полімерних, металополімерних композитів застосовують одношаровий шліфувальний інструмент на гальванічній зв'язці зі шліфпорошками синтетичних алмазів марок АС15, АС20, АС32 в залежності від виду операції наступних зернистостей: 630/500-200/160 – для розрізання, 500/400-200/160 – для шліфування, свердління, зенкерування.

Таблиця 1.15 – Марки алмазних порошків, область їх застосування

Марка алмазного порошку	Характеристика	Область рекомендованого застосування
Шліфпорошки		
АС4 (АСР)	з синтетичних алмазів, зерна яких представлені агрегатами і зростками	виготовлення інструментів на органічній зв'язці, що застосовуються при обробці твердих сплавів, заточування трердосплавного інструмента
АС6 (АСВ)	з синтетичних алмазів, зерна яких представлені окремими кристалами з розвинутою поверхнею, агрегатами і зростками	Виготовлення інструмента на металевих і органічних зв'язках, що працюють при підвищених навантаженнях, що застосовуються при обробці твердих сплавів, за-точування твердосплавного інструмента
АС15 (АСК)	те ж саме, зерна яких представлені агрегатами і зростками (не більше 60%), а також подовженими кристалами з коефіцієнтом форми зерен не більше 1,6	Виготовлення інструмента на металевих і органічних зв'язках, що працюють у важких умовах при обробці твердого сплаву, кераміки, скла, кварцу та інших важкооброблюваних матеріалів
АС20	те ж саме, зерна яких представлені агрегатами і зростками (не більше 40%), а також подовженими кристалами з коефіцієнтом форми зерен не більше 1,5	виготовлення інструмента на металевих і органічних зв'язках, що працюють у важких умовах при обробці твердого сплаву, кераміки, скла, кварцу та інших важкооброблюваних матеріалів
АС32 (АСС)	зерна представлені в основному добре ограновані цільними кристалами (не менше 12%), уламками кристалів, зростками, агрегатами (не більше 15%) з коефіцієнтом форми зерна не більше 1,2	виготовлення інструмента на металевих зв'язках, що застосовується для шліфування каменю, різання легких гірських порід, обробки скла, рубіни, хонінгування деталей машин
Мікропорошки		
АСМ	з синтетичних алмазів нормальної абразивної здатності	виготовлення паст і суспензій. Для доведення і полірування деталей машин і приладів з твердих сплавів, чавуну, кераміки, скла, напівпровідникових матеріалів
АСН	з синтетичних алмазів підвищеної абразивної здатності	виготовлення інструмента на металевих і органічних зв'язках, паст, суспензій. Для доведення і полірування твердих і надтвердих важкооброблюваних матеріалів, корунду, кераміки, алмазів, дорогоцінного та напівдорогоцінного каміння, скла, деталей машин і приладів з твердих сплавів, чавуну
Субмікропорошки		
АСМ5	з синтетичних алмазів зернистістю: 1/0,5 мкм 0,5/0 мкм 0,3/0 мкм	виготовлення паст, суспензій, а також застосування у вільному стані для фінішної поліровки твердих матеріалів, корунду, кераміки, алмазів, дорогоцінного каміння та напівпровідникових матеріалів

Примітка: в дужках вказані старі позначення алмазних порошків.

Таблиця 1.16 – Форма і класифікація алмазного порошка

Форма алмазного зерна		Класифікація синтетичних алмазних порошків по типам зв'язки		
		Тип зв'язки	Марки алмазного порошку	Діапазон
	AC 4	Органічна	Шліфпорошки: AC4; AC5C; AC6 Мікропорошки: ACH	від 200/160 до 50/40 від 60/40 до 5/3
	AC 6	Металева	Шліфпорошки: AC6; AC15; AC20; AC32; AC50; AC65 Мікропорошки: ACH	від 400/315 до 50/40 від 60/40 до 5/3
	AC 15	Гальванічна	Шліфпорошки: AC15-H; AC20-H; AC32-H; AC50-H; AC65-H Мікропорошки: ACH-H	від 630/500 до 50/40 від 60/40 до 10/7

**Таблиця 1.17 – Відповідність зернистості алмазних порошків за ДСТУ 3292-95
закордонним стандартам**

Вид обробки	Стандарт України ДСТУ 3292-95, мкм	Міжнародний стандарт ISO 565, мкм	Стандарт США ANSI B 74-16, меш	Позначення по міжнародному стандарту FEPA
Чорнове шліфу- вання	400/315	425/355	40/45	D 426
	315/250	300/250	50/60	D 301
	250/200	250/212	60/70	D 251
	200/160	121/180	70/80	D 213
	160/125	180/150	80/100	D 181
Чистове шліфування	125/100	105/125	100/120	D 151
	100/80	125/106	120/140	D 126
		106/90	140/170	D 107
Тонке шліфування	80/63	90/75	170/200	D 91
		75/63	200/230	D 76
	63/50	63/53	230/270	D 64
	50/40	53/45	270/325	D 54
		45/38	325/400	D 46
Тонке шліфування, полірування	60/40		500	M 63
	40/28		550	M 40
	28/20		650	M 25
	20/14		1100	M 16
	14/10		1500	M 16
	10/7		1700	M 10
	7/5		3000	M 6.3
	5/3		4000	M 4.0

1.5. Особливості обробки різанням авіакосмічних сталей і сплавів

Основною причиною низької оброблюваності спеціальних сталей і сплавів є виникнення більших сил і високих температур у зоні різання. Під час обробки жароміцних сталей і сплавів сили різання в 1,5...2,5 рази більші, ніж при обробці сталі 45. При точінні деталей з високоміцних сталей сили різання в 2...3 рази більше, ніж при точінні деталей зі сталі 45.

Великі сили при різанні деталей з важкооброблюваних сталей і сплавів призводять до великої кількості теплоти, що виділяється на одиницю об'єму зрізуваного металу. Крім того, більшість важкооброблюваних сталей і сплавів мають низьку теплопровідність, що призводить до виникнення високих температур у зоні різання.

Під час обробки деталей з титанових сплавів усадка стружки досить мала й за певних умов відбувається не усадка, а подовження стружки. Це явище названо "негативною" усадкою стружки. Причиною малої усадки стружки при різанні титанових сплавів є їхня низька пластичність. Мала усадка спричиняє малу площу контакту стружки з передньою поверхнею інструмента й більшу швидкість переміщення стружки по передній поверхні, що викликає високі контактні тиски й температуру.

Великі сили, що виникають при різанні важкооброблюваних матеріалів, викликають необхідність забезпечення великої жорсткості технологічної системи. Високі контактні температури є основною причиною низької стійкості інструмента й необхідності використання малих швидкостей різання під час обробки важкооброблюваних матеріалів.

Для інтенсифікації процесів механічної обробки необхідно: 1) застосовувати продвинуті інструментальні матеріали; 2) віднайти нові мастильно-охолодні технологічні засоби (ЗМОТС) і способи їхнього підведення; 3) впроваджувати пристрої для завивання й дроблення стружки і використовувати коливання в процесі різання; 4) застосовувати нагрівання при різанні. В окремих випадках замість механічної обробки доцільно використати електрофізичні й електрохімічні способи обробки.

Розроблено декілька водних емульсій і рідин на масляній основі з присадками хлору, сірки й інших елементів. При різанні деталей з важкооброблюваних сталей і сплавів ефективно застосовувати вуглекислоту й інші речовини з низькою температурою випару.

Інструменти зі швидкорізальної сталі після шліфування й заточування обробляються перегрітою парою, внаслідок чого поверхня інструмента покривається тонкою плівкою закису й окису заліза, що приводить до деякого підвищення його стійкості.

При застосуванні технології покриття, що забезпечує міцне з'єднання дисульфиду молібдену з металом інструмента, стійкість останнього підвищується.

У процесі різання використовують вібрації низької й високої (ультразвукової) частот. Різання з вібраціями низької частоти знайшло широке застосування під час свердління отворів у деталях з жароміцних і титанових сплавів. Розроблений також метод нарізування різьб мітчиками діаметром 2...6 мм із вібраціями низької частоти в деталях із пластичних корозійностійких сталей. Вібрації ультразвукової частоти застосовують при нарізуванні різьб мітчиками діаметром більше 10 мм у деталях з ливарних жароміцних сплавів VI групи й високоміцних сталей з межею міцності $\sigma_b \cong 1600$ МПа VIII групи.

Нагрівання доцільно застосовувати на ряді операцій під час обробки різанням деталей з вольфрамових і магнітних сплавів, а також високоманганових сталей. У деяких випадках нагрівання застосовують під час обдирання титанових злитків на металургійних заводах, що дозволяє працювати з великими подачами на недостатньо жорсткому обладнанні.

Під час точіння деталей з жароміцних сплавів сили різання починають знижуватися при нагріванні вище 600 °С, однак при цьому стійкість різців із пластинами з твердого сплаву також знижується. Стійкість різців з мінералокерамічними пластинами при точінні з нагріванням деталей з жароміцних сплавів збільшується, досягаючи максимальних значень при температурі нагрівання 900 °С. Однак мінералокераміка не є оптимальним матеріалом для обробки різанням деталей з жароміцних сплавів, і процес цей застосовувати недоцільно.

Під час механічної обробки деталей з високоміцних сталей можна застосовувати тільки контактний спосіб нагрівання, тому що при інших способах нагрівання знижується міцність сталей. При точінні деталей з високоміцних сталей з нагріванням контактним способом сили різання знижуються приблизно на 15 %, а стійкість збільшується в 1,5...2 рази. Недоліком нагрівання під час різання деталей з високоміцних сталей є ускладнення технологічного процесу.

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягає різниця в призначенні між теплостійкими, жаростійкими й жароміцними сталями? Які сталі вважаються високоміцними?
2. На скільки груп поділяються важкооброблювані сталі і сплави за оброблюваністю і за якими критеріями?
3. Які сталі віднесені до першої групи за оброблюваністю, де використовуються, у скільки разів знижується швидкість різання у порівнянні зі сталлю 45?
4. Які сталі віднесені до другої групи за оброблюваністю, де використовуються, у скільки разів знижується швидкість різання у порівнянні зі сталлю 45?
5. Які сталі віднесені до третьої групи за оброблюваністю, де використовуються, у скільки разів знижується швидкість різання у порівнянні зі сталлю 45?

6. Які сталі віднесені до четвертої групи за оброблюваністю, де використовуються, у скільки разів знижується швидкість різання у порівнянні зі сталлю 45?
7. Які сплави віднесені до п'ятої групи за оброблюваністю, де використовуються, у скільки разів знижується швидкість різання у порівнянні зі сталлю 45?
8. Які сплави віднесені до шостої групи за оброблюваністю, де використовуються, у скільки разів знижується швидкість різання у порівнянні зі сталлю 45?
9. Які сплави віднесені до сьомої групи за оброблюваністю, де використовуються, у скільки разів знижується швидкість різання у порівнянні зі сталлю 45?
10. Які сплави віднесені до восьмої групи за оброблюваністю, де використовуються, у скільки разів знижується швидкість різання у порівнянні зі сталлю 45?
11. На скільки груп поділяються інструментальні матеріали (дати коротку характеристику кожній групі)?
12. За рахунок чого можна суттєво збільшити твердість в незагартованому стані і одночасно теплостійкість (червоність) вуглецевих інструментальних сталей?
13. В чому полягає головна позитивна відмінність легованих інструментальних сталей від вуглецевих за поведінкою при термічній обробці?
14. Коротка характеристика оброблюваності вуглецевих інструментальних сталей. Коротка характеристика оброблюваності легованих інструментальних сталей.
15. За рахунок чого поліпшуються різальні властивості швидкорізальних сталей у порівнянні з легованими інструментальними?
16. На скільки груп поділяються швидкорізальні сталі за вмістом вольфрамового еквіваленту? Назвати його вміст для кожної групи.
17. В чому полягає перевага порошкових швидкорізальних сталей над непорошковими?
18. В чому полягає основна перевага металокерамічних твердих сплавів над інструментальними й швидкорізальними? На скільки груп і за якою ознакою вони поділяються?
19. Які металокерамічні тверді сплави віднесені до першої групи? За якими характеристиками розрізняються марки сплавів цієї групи?
20. Як відрізняються зносостійкість, міцність і, відповідно, призначення марок твердих сплавів першої групи?
21. В чому полягають переваги твердих сплавів другої групи? Як вміст кобальту, карбиду титану позначається на різальних властивостях твердих сплавів другої групи?
22. Які металокерамічні тверді сплави віднесені до третьої групи? Як вміст карбиду танталу позначається на різальних властивостях твердих сплавів третьої групи?
23. Які металокерамічні тверді сплави віднесені до групи МС? З чим пов'язана висока стабільність їх різальних властивостей і надійність інструмента?
24. На скільки груп і за яким критерієм поділяються металокерамічні тверді сплави в залежності від умов різання? З чим пов'язана розбивка на групи й підгрупи застосування?
25. Які основні тенденції вдосконалення твердих сплавів? Навіщо створюють тверді сплави ультра- і особливодрібнозернистої структури? Для чого їх застосовують?
26. Якими є світові тенденції застосування безвольфрамових твердих сплавів? На якій основі виробляють БВТС? В чому є переваги БВТС над вольфрамовмісними твердими сплавами?
27. Які основні тенденції вдосконалення безвольфрамових твердих сплавів?
28. В чому полягають особливості обробки різанням лезовим інструментом авіакосмічних сталей і сплавів? Які заходи застосовують для інтенсифікації процесів механічної обробки?

Розділ 2. СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ СТРУКТУРИ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

Кваліфіковані інженери-технологи, що мають справу із процесами механічної обробки деталей, прекрасно розуміють, що його результат характеризують такі показники, як точність і якість обробленої поверхні. Чим характеризується якість обробленої поверхні? Це геометрична структура обробленої поверхні й стан поверхневого шару. Від цих показників обробленої поверхні залежать її експлуатаційні характеристики. Залежно від службового призначення найбільш часто необхідно забезпечити вимоги із зносостійкості, контактної міцності, світловідбивної здатності, теплопередачі, утримання змащення, адгезії, обтічності рідинами й газами, герметичності з'єднань, низької заповнюваності, магнітних властивостей тощо.

Правильно вибираючи технологічний маршрут обробки деталей з урахуванням їхньої певної конструкції, використовуваних матеріалів і на базі можливих методів формоутворення, ми розраховуємо на певну якість геометричної структури їхніх поверхонь і в остаточному підсумку на певну якість експлуатаційних властивостей виробів. Загальновідомим є постулат про те, що досягнуті показники точності і якості обробленої поверхні залежать від технологічної спадковості і формуються протягом всього процесу механічної обробки деталі.

Як видно з табл. 2.1, експлуатаційні властивості з'єднання, наприклад, посадки валу і отвору залежать не лише від точності виконання їх спряжених поверхонь, але й значною мірою від форми, положення, хвилястості й шорсткості цих поверхонь. Або, наприклад, поведінка деталі під час зношування залежить не лише від положення поверхні тертя, її хвилястості й шорсткості, але й від її пошкодженості, фізичних і хімічних властивостей, напруженого стану й твердості. Змащення поверхні значною мірою залежить від геометричної структури й фізичних властивостей поверхні. Сучасне бачення таких зв'язків є наступним.

Національний стандарт ДСТУ ISO 12085-2001, який називається "Технічні вимоги до геометрії виробів. Структура поверхні. Профільний метод. Параметри структурних елементів" є ідентичним перекладом відповідного стандарту ISO і визначає терміни й параметри для визначення структури поверхні методом структурних елементів. Зокрема він дає уявлення про сучасне бачення на відношення між параметрами структурних елементів і функціями поверхонь (табл. 2.2). Згідно ДСТУ ISO 12085-2001 середня глибина структурних елементів шорсткості $R = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_j$ – це середнє арифметичне значення глибин H_j стру-

ктурних елементів шорсткості в межах оцінкової довжини (рис. 2.1, *a*); максимальна глибина нерівностей профілю R_x – це найбільша глибина H_{jt} в межах оцінкової довжини; середня глибина структурних елементів хвилястості $W = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_{Wj}$ – це середнє арифметичне значення глибин H_{Wj} структурних елементів хвилястості, в межах оцінної довжини (рис. 2.1, *б*); максимальна глибина хвилястості W_x – це найбільша глибина H_{Wj} в межах оцінної довжини.

Таблиця 2.1 – Вплив властивостей поверхні на її функціональність*

Функціональність поверхні	Геометрична структура, властивості й стан поверхні							
	Форма	Положення	Хвилястість	Шорсткість	Пошкодження	Властивості		Напружений стан, твердість
						фізичні	хімічні	
Герметичність	+	+	+	+	–	–	–	–
Точність	+	–	+	+	+	–	–	+
З'єднання	+	+	+	+	–	–	–	+
Корозія	–	–	–	+	–	+	+	–
Тертя	–	+	+	+	+	+	–	+
Зношування	–	+	+	+	+	+	+	+
Змашування	+	+	+	+	+	+	–	–
Протікання рідини	–	+	+	+	–	–	–	–
Пластичні деформації	–	–	+	+	–	+	–	+
Магнітні властивості	–	–	–	+	+	+	+	–

* – за даними дослідників часів СРСР.

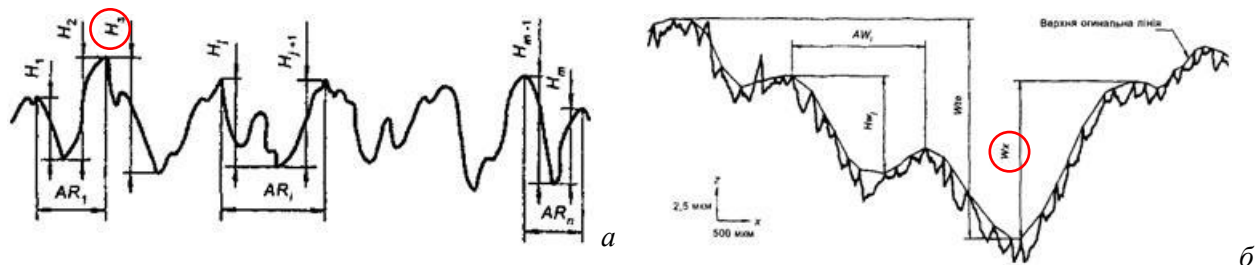


Рисунок 2.1 – Показники структурних елементів шорсткості і хвилястості поверхні: R_x (*a*) W_x (*б*)

Середня глибина структурних елементів шорсткості є одним з найважливіших показників якості поверхні, від якого залежать змащене ковзання, сухе й рідинне тертя, динамічне ущільнення (якщо з'єднання з набивкою), зчеплення (склеювання), опір корозії. Як один з найважливіших чинників, максимальна глибина нерівностей профілю R_x з цієї точки зору відповідає за динамічне й статичне ущільнення, напруженість від втоми, опір корозії. А максимальна глибина хвилястості W_x є відповідальною за сухе тертя, динамічне ущільнення, обертання. Те ж саме стосується показника піків основного профілю, від якого залежать змащене ковзання, опір ударам, динамічне ущільнення без набивки, посадка із зусиллям для виключення переміщення.

Таблиця 2.2 – Відношення між параметрами структурних елементів і функціями поверхонь (ДСТУ ISO 12085-2001)

Поверхня		Функції, що їх застосовують до поверхні		Параметри								
				Шорсткість профілю			Хвилястість профілю				Основний профіль	
		Позначення	Символ ^{a)}	R	Rx	AR	W	Wx	Wte	AW	Pt	Pdc
дві частини в контакті	з відносним переміщенням	Ковзання (змащення)	FG	●			≤ 0,8R			○		●
		Сухе тертя	FS	●		○		●		○		
		Обертання	FR	●			≤ 0,3R	●		○		○
		Опір ударам	RM	○		○	○			○		●
		Рідинне тертя	FF	●		○				○		
	без переміщення	Динамічне ущільнення з набивкою	ED	●	○	○	≤ 0,6R	●		○		
				○	●		≤ 0,6R					●
		Статичне ущільнення з набивкою	ES	○	●		≤ R		○	○		
				○	●		≤ R		●			
		Установка без переміщення з зусиллям	AC	○								●
незалежні поверхні	із зусиллям	Інструменти (різальна поверхня)	OC	○		○	●			●		
		Напруженість від втоми	EA	○	●	○						○
	без зусилля	Опір корозії	RC	●	●							
		Лакофарбове покриття	RE			○				○		
		Електролітичне покриття	DE	●	≤ 2R	●						
		Міри	ME	●			≤ R					
		Вид (аспект)	AS	●		○	○			○		

● Найважливіші параметри: визначте, принаймні, один із них.
 ○ Вторинні параметри: належить визначати за необхідності, згідно з функціями деталей.
 Позначення ≤ 0,8R, наприклад, означає що, якщо символ FG позначений на кресленні, і W не визначено, верхній допуск для W дорівнює верхньому допуску для R, помноженому на 0,8.

Наостанок знайомства із стандартом ДСТУ ISO 12085-2001 слід сказати про межі його використання. Цей стандарт встановлює параметри шорсткості і хвилястості, які доповнюють параметри профільного методу, встановленого в ISO 4287 "Технічні вимоги до геометрії виробів. Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення і параметри структури поверхні". Їх можна використовувати, коли виступи на поверхні є значимі для функції поверхні.

Чому існує зв'язок між геометричною структурою поверхні і її функціональними властивостями? Тому що функціональність поверхні визначається, як правило, її поведінкою у контакті із взаємодіючою з нею поверхнею. Контакт взаємодіючих поверхонь залежить значною мірою від нерівностей цих поверхонь, тому реальна поверхня контакту відрізняється від поверхні номінальної.

В чому різниця таких понять, як реальна поверхня предмета, номінальна (геометрична) поверхня предмета й поверхня виміру. Одне з визначень реальної поверхні може бути наступним. Це є границя, що відокремлює поверхневий

шар предмета від оточення. Виділяють наступні види взаємодії предмета й оточення:

- дію одного фактору (вплив оточення на предмет);
- взаємодію двох факторів (безпосередній контакт двох предметів);
- взаємодію трьох факторів (контакт двох предметів через змащувальну субстанцію).

Номінальна (геометрична) поверхня є поверхнею теоретичною, визначеною розрахунковим шляхом, і представлена на технічному рисунку, або ж аналітичним способом за допомогою математичних формул (рис. 2.2).

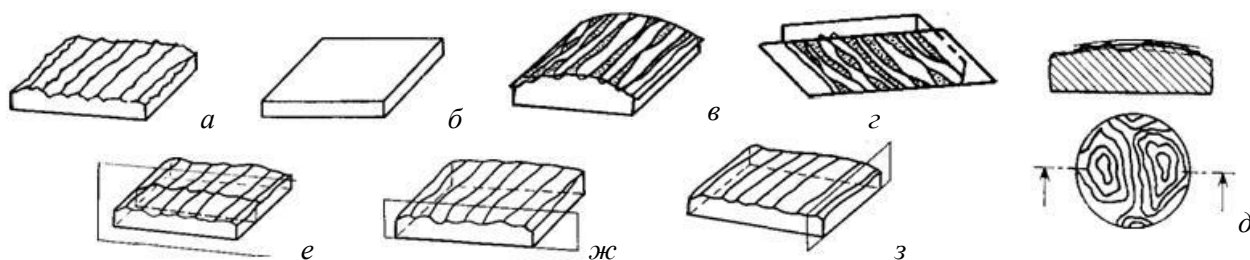


Рисунок 2.2 – Поверхня, профіль і бази відліку: реальна (а), номінальна (б), еквідистантний переріз (в), дотичний переріз плоскої номінальної поверхні (г), контурна картина поверхні (д), профіль реальної поверхні (е), поперечний профіль реальної поверхні (ж), поздовжній профіль реальної поверхні (з)

Вона визначається після видалення всіх нерівностей. Як довідатися, наскільки реальна поверхня відрізняється від номінальної? Для цього потрібно виміряти реальну поверхню. Однак парадокс виміру полягає в тому, що результат виміру завжди буде відрізнятися від реальної картини, тому що при будь-якому методі виміру неминучо є похибка, пов'язана з умовами виміру (радіус заокруглення голки-щупа, розсіювання лазерного променя тощо). Реальна поверхня, яка визначена за допомогою вимірювальних пристосувань, називається поверхнею виміру. Тому, коли говорять про оцінку геометричної структури обробленої поверхні, мають на увазі показники оцінки, отримані на поверхні виміру. Поверхня виміру може бути представлена двовимірними (2D-) і тривимірними (3D-) зображеннями (рис. 2.3).

Технологічний процес виготовлення виробу будується таким чином, щоб отримана геометрична структура його поверхні забезпечувала необхідну якість його експлуатаційних властивостей (рис. 2.4).

Що таке геометрична структура обробленої поверхні?

Згідно стандарту ISO 4287:1997 *геометрична структура поверхні (ГСП)* – це всі нерівності реальної поверхні (відхилення форми й положення, дефекти

поверхні, хвилястості й шорсткості). Відповідно, топографія поверхні – це просторове, тривимірне представлення нерівностей поверхні.

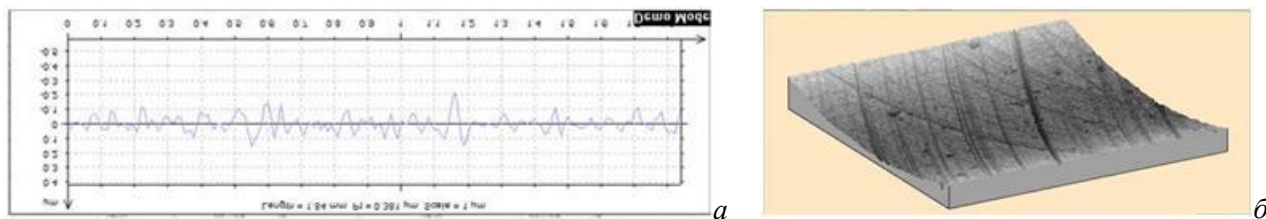


Рисунок 2.3 – Двовимірні (2D – *a*) і тривимірні (3D – *б*) зображення окремого профілю і поверхні виміру

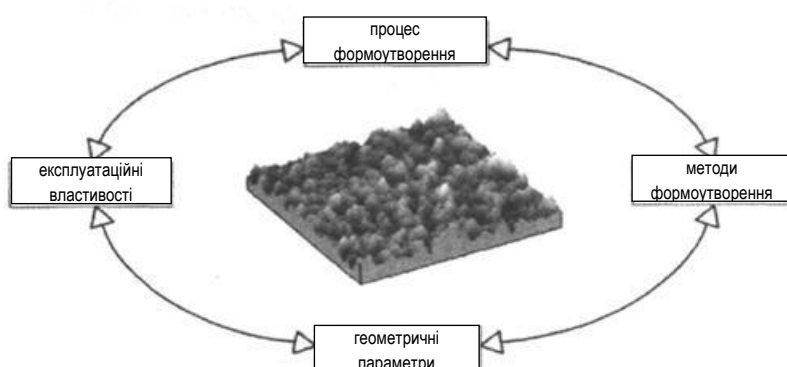


Рисунок 2.4 – Взаємозв’язок між процесом формоутворення поверхні, методами її формоутворення і геометричними параметрами та експлуатаційними властивостями поверхні

Стан геометричної структури поверхні визначається наступними класами нерегулярності поверхні (рис. 2.5):

- клас I – неточності форми й положення;
- клас II – хвилястість поверхні;
- клас III – шорсткість поверхні;
- клас IV – мікрошорсткість.

Система міжнародних стандартів (ISO) на профільну оцінку поверхні охоплює наступні стандарти:

- ISO 4287-1997 Текстура поверхні. Профільний метод. Термінологія, визначення й параметри текстури поверхні;
- ISO 11562-1996 Текстура поверхні. Профільний метод. Метрологічні характеристики фазокорегованих фільтрів;
- ISO 12085-1996 Функціональні параметри. Метод (Motif);
- ISO 12179-2000 Текстура поверхні. Профільний метод. Калібрування контактних (щупових) приладів;

- ISO 1302-2002 Позначення шорсткості поверхні на кресленні;
- ISO 13565-1996 Опис поверхонь, що мають функціональні властивості поверхонь, отриманих накладенням технологічних процесів. Частина 1. Фільтри й загальні умови вимірів. Частина 2. Висотні параметри, отримані на основі відносної опорної кривої профілю. Частина 3. Висотні параметри, отримані на основі імовірнісної кривої для поверхонь, обумовлених двома вертикальними випадковими компонентами;
- ISO 3274-1996 Текстура поверхні. Профільний метод. Номінальні характеристики контактних (стилусних) приладів;
- ISO 4288-1996 Текстура поверхні. Профільний метод. Правила й процедури оцінки текстури поверхні;
- ISO 5436-1-2000 Текстура поверхні. Профільний метод. Еталони. Частина 1. Матеріальні міри;
- ISO 5436-2-2000 Текстура поверхні. Профільний метод. Еталони. Частина 2. Формат програмних еталонів;
- ISO 8785-1999 Текстура поверхні. Профільний метод. Вади поверхні – Терміни, визначення й параметри.

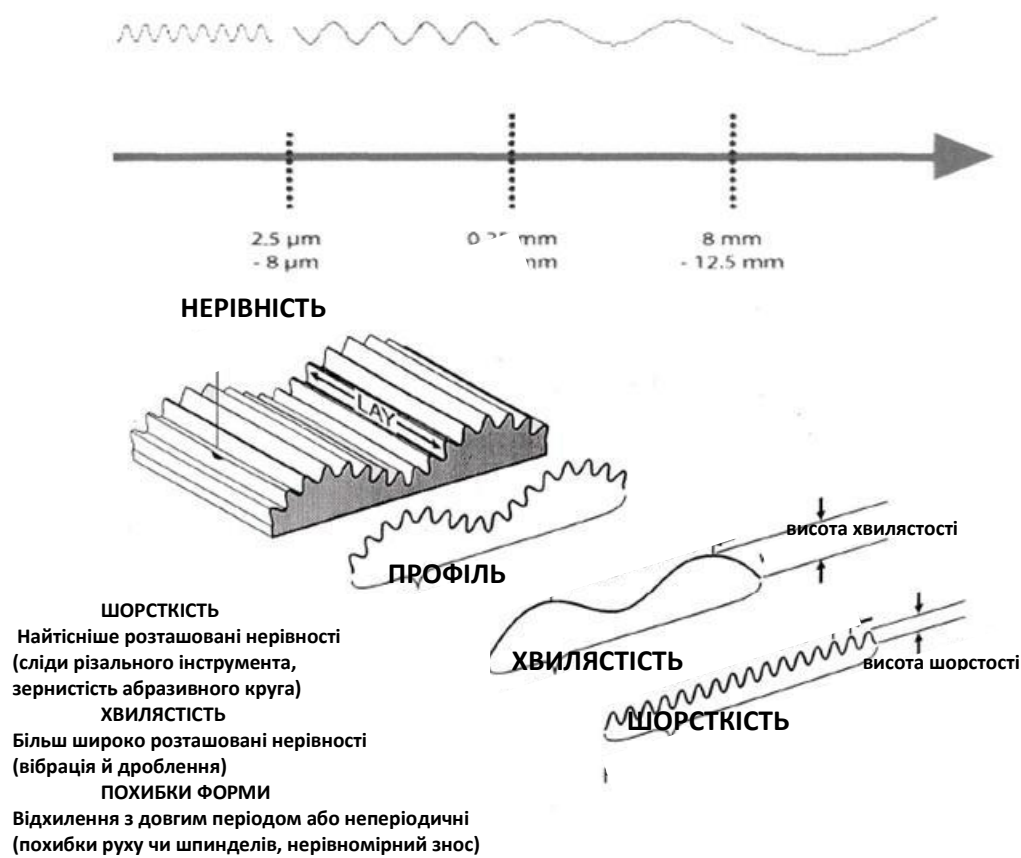


Рисунок 2.5 – Основні компоненти і елементи топографії обробленої поверхні

Дані стандарти утворюють наступну логічно-зв'язану систему.

Перша група стандартів. У стандарті ISO 3274 дано опис типового стилусного профілометра і його метрологічних характеристик. У стандарті ISO 4287 сформульовано визначення параметрів характеристики рельєфу поверхні (тобто визначення параметрів типу P, W й R) і способи їхнього обчислення. Стандарт ISO 4288 визначає значення за замовчуванням різних параметрів й основні правила й порядок дій при аналізі профілю поверхні. Стандарт ISO 11562 описує гаусовий фільтр корекції фази, який використовується у різних фільтрах відсічення для аналізу профілю поверхні. В стандарті ISO 12179 викладено методи калібрування контактних стилусних засобів виміру профілю поверхні, а в стандарті ISO 5436, частина 1 – еталони, які використовуються для калібрування таких засобів вимірів. Стандарт ISO 5436, частина 2 містить основні принципи й способи використання програмного забезпечення засобів вимірів. В стандарті ISO 1302 закріплено правила позначення текстури поверхні в інженерно-технічній документації, тобто кресленниках, специфікаціях, контрактах і звітах.

Друга група стандартів. Стандарт 13565, частини 1, 2 й 3 відносяться до виміру поверхонь зі стратифікованими (тобто такими, що чергуються) функціональними властивостями. Профіль шорсткості, одержуваний за допомогою фільтра, описаного в стандарті 11562, є підданим ряду небажаних спотворень при вимірі поверхонь, що складаються з відносно глибоких западин під більш гладким плато з мінімальною хвилястістю. Такий тип поверхні часто зустрічається на гільзах циліндрів двигунів внутрішнього згоряння. В стандарті 13565, частина 1, викладено метод істотного зменшення таких спотворень, що дозволяє використати параметри, описані в стандарті 13565, частини 2 й 3, для оцінки таких типів поверхонь із мінімальним впливом спотворень.

В останні десятиліття більш активно ведуться дослідження з розробки національних стандартів, еталонів і засобів виміру шорсткості поверхні на основі її тривимірного аналізу. Це пов'язане з тим, що профільні виміри поверхні і здійснювана на їхній основі оцінка поверхні носить обмежений характер.

Слід зазначити, що відповідно до поточних планів ISO, стандарти характеристики профілю поверхні стануть підрозділом стандартів характеристики тривимірної текстури поверхні, хоча зміст стандартів і не перетерпить істотних змін.

Першим міжнародним стандартом, що враховує специфіку виміру й аналізу 3D- текстури поверхні, став стандарт ISO 25178-2:2012 «Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: Ареал», яким введено ряд нових параметрів, у тому числі просторових, висотних, і таких, що стосуються сегментації поверхні на підвищення й низини, а також параметри на основі так званої опорної кривої або кривої Abbott-Firestone.

Розглянемо тепер сутність апарату математичної логіки, в основі якого лежить аналіз ландшафту поверхні, запропонований Максвеллом, і на якому побудована сегментація зображення в процесі підготовки до розпізнавання образу.

Поняття сегментації поверхні. Понад 100 років тому Maxwell запропонував розділяти ландшафт на області з підвищеннями, а також області із низинами. Підвищення Максвелла – це область, від якої шляхи, спрямовані максимально вгору, ведуть до одного певного піку. Низина Максвелла – це область, від якої шляхи, спрямовані максимально вниз, ведуть до однієї певної западини. За визначенням межами між підвищеннями є лінії курсу (русла), а межами між низинами – лінії хребта (лінії вододілу). Максвелл зміг показати, що лінії курсу і лінії хребта є шляхи, спрямовані максимально вгору і вниз, які беруть початок від точок сідла і закінчуються на піках і в западинах. Нещодавно низину Максвелла (лінії вододілу) стали вважати основним інструментом математичної морфології при сегментації зображення в процесі підготовки до розпізнавання образу. Таким чином, згідно ISO 25178, сегментація поверхні – це метод, який розділяє поверхню обмеженого масштабу (тобто після застосування до первинної поверхні спеціальних фільтрів) на окремі зони, а функція сегментації – це функція, яка розділяє набір «явищ» на два різних набори, названі значущими й незначущими явищами, й задовольняє трьом особливостям сегментації.

На жаль, сегментація поверхні або зображення на низини Максвелла нерідко не виправдовує надій, оскільки поверхня/зображення надмірно сегментується на велике число незначних дрібних неглибоких низин, а не на кілька значних великих і глибоких низин. Все, що необхідно – об'єднати незначущі низини в більші значущі.

Запропоновано розширити визначення Максвелла і визначити низину як одну домінуючу западину, оточену кільцем з ліній хребта, які з'єднують піки і точки сідла. Крім того, підвищення визначається як один домінантний пік, оточений кільцем з ліній курсу, що з'єднують западини і точки сідла. У низині або підвищенні можуть перебувати інші западини/піки, проте всі вони будуть незначущі в порівнянні з домінантними западиною/піком.

Низина – це ареал, еквівалентний мотиву профілю (див. ISO 12085). Підвищення – це також корисне додаткове поняття. За аналогією з мотивом профілю підвищення й низини характеризуються декількома типами специфічних точок і ліній поверхні. Вони включають критичні точки (піки, западини й точки сідла), а також критичні лінії (лінії хребта і лінії курсу) (див. рис. 2.6).

Також важливо враховувати ефекти краю. Принцип (брита) Оккама (*non sunt multiplicands entia praeter necessitatem* – об'єкти не підлягають множенню понад необхідність) використовується для поширення контурних ліній за межі

області, яка нас цікавить, таким чином, щоб було створено мінімальне число нових критичних точок. Принцип Оккама веде до двох можливих рішень, названих «віртуальним провалом» і «віртуальним піком», кожне є двійником іншого. Прийнята концепція віртуального провалу. Передбачається, що віртуальний провал – це точка висоти за вирахуванням нескінченності, з якою з'єднані всі точки межі. (Передбачається, що віртуальний пік – це точка нескінченної висоти, з якою з'єднані всі точки межі).

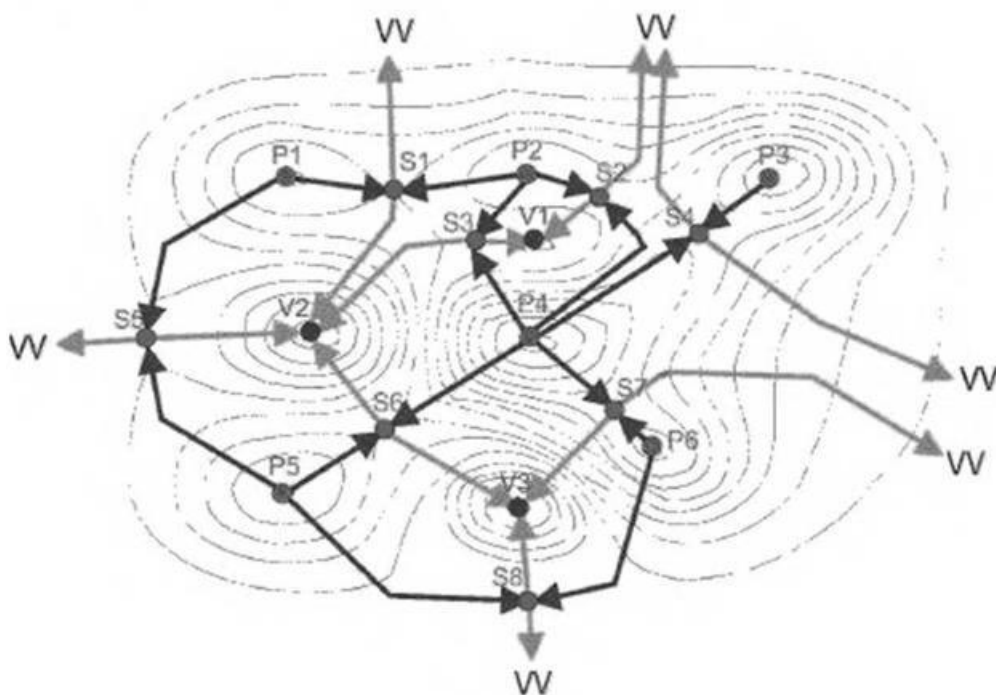


Рисунок 2.6 – Контурна карта, на якій представлені критичні лінії і точки (P – піки; V – западини; S – точки сідла; W – віртуальний провал)

Сегменти, що поєднуються. Дерево змін. Корисним методом організації зв'язків між критичними точками в підвищеннях й низинах зі збереженням важливої інформації є дерево змін. У стандарті використовується концепція дерева змін обмеженого масштабу для опису можливості з'єднання поверхні. Дерево змін – це графік, в якому кожна лінія контуру представлена в якості точки відносно висоти таким чином, щоб сусідні лінії контуру представляли собою сусідні точки на графіку. Піки й западини представлені на дереві змін у кінці ліній. Точки сідла представлені на дереві змін за допомогою ліній, що поєднуються.

Дерево змін відображає зв'язок між контурними лініями від поверхні і є одним прикладом більш загального топологічного об'єкта, названого графіком Реев. Вертикальний напрямок на дереві змін відповідає висоті. При заданій висоті всі індивідуальні контурні лінії представлені точкою. Остання є частиною

лінії, що відображає той факт, що контурна лінія безперервно змінюється в залежності від висоти. Точки сідла представлені об'єднанням двох або більше таких ліній в одну; піки і западини представлені припиненням лінії. До дерева змін застосовують функцію відсікання, тобто спрощення дерева змін шляхом видалення ліній від піків (або западин) до найближчих з'єднаних точок сідла.

Уявімо собі поступове заповнення низини водою. Точка, в якій вода спочатку випливає з низини – це точка сідла. Западина в низині з'єднана з цією точкою сідла в дереві змін. За умови подовження заповнення нового озера наступна точка, в якій вода витікає з озера, також є точкою сідла. І знову лінія на дереві змін, що відображає контур берегової лінії озера, буде з'єднана з даної точкою сідла в дереві змін. Даний процес може тривати і визначає з'єднання між западинами, точками сідла і деревом змін. Після перевероту ландшафту таким чином, щоб піки стали западинами, подібний процес сформує з'єднання між піками, точками сідла і деревом змін.

Комбінація ареалу. На практиці дерево змін може бути дуже короткими контурними лініями через шум тощо, що заважає інтерпретації (надлишкова сегментація поверхні/зображення підвищеннями й низинами Максвелла). Потрібен механізм відсікання дерева змін, який знижує шум, але залишає важливу інформацію. Таким механізмом є комбінація ареалу, це спрощує дерево змін, зберігаючи при цьому важливу інформацію.

Правила комбінації ареалу. Далі описано алгоритм комбінації ареалу для повного дерева змін. Представлений спрощений алгоритм передбачає накладення умов віртуального провалу.

Етап 1: припускаючи умови віртуального провалу, шукають всі підвищення й низини Максвелла, щоб сформувані повне дерево змін.

Етап 2: класифікують всі піки, западини, краї піків і краї западин на значущі або незначущі згідно функції поверхні.

Етап 3: комбінують незначущі піки й западини з прилеглою точкою сідла, з якою вони з'єднані в дереві змін.

Отримане дерево змін буде відображати значущі піки, западини, крайові піки й крайові западини, а також зв'язки між ними. Таким чином, дерево змін підрізали, щоб знизити шум, але зберегли важливу інформацію.

Спираючись на логіку сегментації поверхні або зображення, зрозумілим стає термінологічний апарат ISO 12178, а саме:

Система координат характеристики (specification coordinate system): Система координат, в якій вказані параметри структури поверхні. Якщо номінальна поверхня є площиною (або частиною площини), то зазвичай (на практиці) використовується прямокутна система координат, в якій осі утворюють правосторонню декартову систему, в якій вісі X і Y розташовуються на номіна-

льної поверхні, а вісь Z спрямована назовні (від матеріалу до навколишнього середовища).

Первинна поверхня (primary surface): Частина поверхні, отримана в тому випадку, коли дана частина представлена у вигляді певної первинної математичної моделі з певним індексом розміщення. У цій частині ISO 25178 для отримання первинної поверхні використовується S-фільтр.

Первинна здобута поверхня (primary extracted surface): Кінцевий набір точкових даних, отриманих з первинної поверхні.

Фільтр поверхні (surface filter): Оператор фільтрації, який застосовується до поверхні. На практиці оператор фільтра буде застосовуватися до первинної витягнутої поверхні.

S-фільтр (S-filter): Поверхневий фільтр, який видаляє з поверхні дрібні латеральні компоненти, щоб привести до отримання первинної поверхні.

L-фільтр (L-filter): Поверхневий фільтр, який видаляє з первинної поверхні або S-F-поверхні великі латеральні компоненти.

F-операція (F-operation): Операція, яка видаляє форми з первинної поверхні. Деякі F-операції (наприклад, операції об'єднання) мають дію, вельми відмінну від фільтрації. І хоча їх дія може обмежувати більші масштаби латерального компонента поверхні, дана дія є дуже нечіткою. З іншого боку, багато L-фільтрів є чутливими до форми і перед застосуванням вимагають виконання F-операції в якості попереднього фільтрування.

S-F поверхня (S-F surface): Поверхня, отримана з первинної поверхні шляхом видалення форми за допомогою F-операції.

S-L поверхня (S-L surface): Поверхня, отримана з S-F поверхні шляхом видалення компонентів великого масштабу за допомогою L-фільтра.

Поверхня обмеженого масштабу (scale limited surface): S-F поверхня або S-L поверхня.

Область оцінки (evaluation area): Частина поверхні обмеженого масштабу для визначення оцінюваної області.

Область визначення (definition area): Частина області оцінки для визначення параметрів, які характеризують поверхню обмеженого масштабу.

Роберт Ліч, фахівець Національної Фізичної Практики (NPL, Великобританія), у своїй книзі вказує на фундаментальне розходження між параметрами характеристикації профілю й параметрами характеристикації тривимірної текстури поверхні:

«Найбільше розходження між методами характеристикації профілю й методами характеристикації тривимірної текстури поверхні складається у використуваних способах фільтрації. Профіль, отриманий з SL- або SF-поверхні, математично не є рівним профілю, який аналізується за допомогою методів, викладе-

них у стандартах по характеристиці профілю поверхні. В останньому випадку використовується фільтрація профілю (ортогонального напрямку нерівностей поверхні), а в першому – тривимірна фільтрація. Два таких типи фільтрації можуть дати абсолютно різні результати навіть при використанні фільтрів однакового типу (наприклад, гаусових) з однаковим відсіченням (або індексом вкладення).

З параметрами характеристики профілю можна зіставляти лише ті параметри характеристики тривимірної текстури поверхні, які мають прямий "профільний" еквівалент, наприклад, середньоквадратичні параметри висоти поверхні R_q й S_q . Зворотним прикладом є аспектне відношення тривимірної текстури поверхні S_{tr} , яке не має профільного аналога. Параметри характеристики тривимірної текстури поверхні, що описують екстремуми поверхні (наприклад, параметр максимальної висоти піків S_p), звичайно мають більші значення, ніж їхні профільні еквіваленти внаслідок того, що піки й западини, відображені на профілі, не є реальними екстремумами (тобто профіль звичайно не проходить по вершинах виступів і дну западин).»

Стандарт ISO 25178 вводить такі терміни **геометричних ознак і властивостей**:

пік (peak): Точка на поверхні, яка є вищою за всі інші точки поблизу від даної точки.

підвищення (hill): Область навкруги піку, в якій всі варіанти траєкторії максимального підйому закінчуються на піку.

лінія курсу (course line): Крива, яка розділяє сусідні підвищення.

западина (pit): Точка на поверхні, яка розташовується нижче всіх інших точок поблизу від даної точки.

низина (dale): Область навкруги западини, в якій всі варіанти траєкторії максимального спуску закінчуються у западині.

лінія хребта (ridge line): Крива, яка розділяє сусідні низини.

сідло (saddle): Набір точок на поверхні обмеженого масштабу, в яких лінії хребта й лінії курсу перетинаються.

точка сідла (saddle point): Сідло, яке складається з однієї точки.

топографічна характеристика (topographic feature): Характеристика ареалу, лінії або точки на поверхні обмеженого масштабу.

характеристика ареалу (areal feature): Підвищення або низина.

характеристика лінії (line feature): Лінія курсу або лінія хребта.

характеристика точки (point feature): Точка піку, западини або сідла.

лінія контуру (contour line): Лінія на поверхні, яка складається з точок рівної висоти.

локальна висота піку (local peak height): Різниця між висотою піку й ви-

сотою найближчого з'єднаного сідла на дереві змін.

локальна висота западини (local pit height): Різниця між висотою найближчого з'єднаного сідла на дереві змін й висотою западини.

відсікання по Вольфу (wolf pruning): відсікання, за якого лінії видаляються у порядку від піку/западини з найменшою локальною висотою піку/западини до піку/западини зі вказаною локальною висотою.

висота піку по Вольфу (wolf peak height): Мінімальний поріг, за якого пік відсікається за допомогою правила відсікання Вольфа.

висота западини по Вольфу (Wolf pit height): Мінімальний поріг, за якого западина відсікається за допомогою правила відсікання Вольфа.

розрізнення висот (height discrimination): мінімальна висота піку по Вольфу або мінімальна висота западини по Вольфу на поверхні обмеженого масштабу, яку слід брати до уваги. Розрізнення висот зазвичай зазначають в процентах від Sz.

Стандарт ISO 25178 вводить такі **геометричні параметри:**

параметр поля (field parameter): Параметр, визначений на підставі всіх точок поверхні обмеженого масштабу.

параметр функції (feature parameter): Параметр, визначений і підгрупі заздалегідь заданих топографічних функцій на підставі поверхні з обмеженим масштабом.

До параметрів поля відносяться такі **параметри висоти:**

середньоквадратичне значення висоти поверхні обмеженого масштабу Sq, Sq (root mean square height of the scale-limited surface Sq, Sq): Середньоквадратичне значення ординати в області визначення (A)

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$$

асиметрія поверхні обмеженого масштабу Ssk, Ssk (skewness of the scale-limited surface Ssk, Ssk): Відношення середнього значення ординати в третьому ступені і куба Sq в області визначення (A)

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy} \right]$$

ексцес поверхні обмеженого масштабу Sku, Sku (kurtosis of the scale-limited surface Sku, Sku): Відношення середнього значення ординати в четвертому ступені і Sq в четвертій ступені в області визначення (A)

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy} \right]$$

максимальна висота піку поверхні обмеженого масштабу Sp, Sp (maximum peak height of the scale limited surface Sp, Sp): Найбільше значення ви-

соти піку в області визначення.

максимальна висота западини поверхні обмеженого масштабу S_v , S_v (maximum pit height of the scale limited surface S_v , S_v): Негативне значення найбільшої висоти западини в області визначення.

максимальна висота поверхні обмеженого масштабу S_z , S_z (maximum height of the scale-limited surface S_z , S_z): Сума максимальної висоти піка і максимальної висоти западини в області визначення.

арифметичне середнє значення висоти поверхні обмеженого масштабу S_a , S_a (arithmetical mean height of the scale limited surface S_a , S_a): Арифметичне середнє абсолютного значення ординати в області визначення (A).

Крім згаданих параметрів висоти, до параметрів поля відносяться також **просторові і гібридні параметри**, а також **функції та пов'язані з ними параметри**. Просторові і гібридні параметри розглядати не будемо.

Для прикладу розглянемо **функцію коефіцієнта зминання ареалу на поверхні обмеженого масштабу** (areal material ratio function of the scale-limited surface). Це функція, яка відображає коефіцієнт зминання ареалу поверхні обмеженого масштабу як функцію висоти. Що таке коефіцієнт зминання ареалу поверхні обмеженого масштабу? або зворотний коефіцієнт зминання ареалу поверхні обмеженого масштабу?

коефіцієнт зминання ареалу поверхні обмеженого масштабу $S_{mr}(c)$, $S_{mr}(c)$ (areal material ratio of the scale-limited surface $S_{mr}(c)$, $S_{mr}(c)$): Відношення площі матеріалу за вказаної висоти c до області оцінки. $S_{mr}(c)$ зазвичай виражається у відсотках.

зворотний коефіцієнт зминання ареалу поверхні обмеженого масштабу $S_{mc}(mr)$, $S_{mc}(mr)$ (inverse areal material ratio of the scale-limited surface $S_{mc}(mr)$, $S_{mc}(mr)$): Висота c , за якої досягається заданий коефіцієнт зминання ареалу (material ratio, mr) (рис. 2.7).

Для цієї функції також існує поняття **поверхня ядра** (core surface): Поверхня обмеженого масштабу, за винятком підвищень і западин, які виступають за межі ядра (рис. 2.8).

Параметрами, пов'язаними з цією функцією, виступають:

висота ядра S_k , S_k (core height S_k , S_k): Відстань між найбільшим і найменшим рівнем поверхні ядра (рис. 2.8).

знижена висота піку S_{pk} , S_{pk} (reduced peak height S_{pk} , S_{pk}): Середнє значення висоти піків, які виступають над поверхнею ядра.

знижена висота западини S_{vk} , S_{vk} (reduced dale height S_{vk} , S_{vk}): Середнє значення висоти западин, які виступають нижче поверхні ядра.

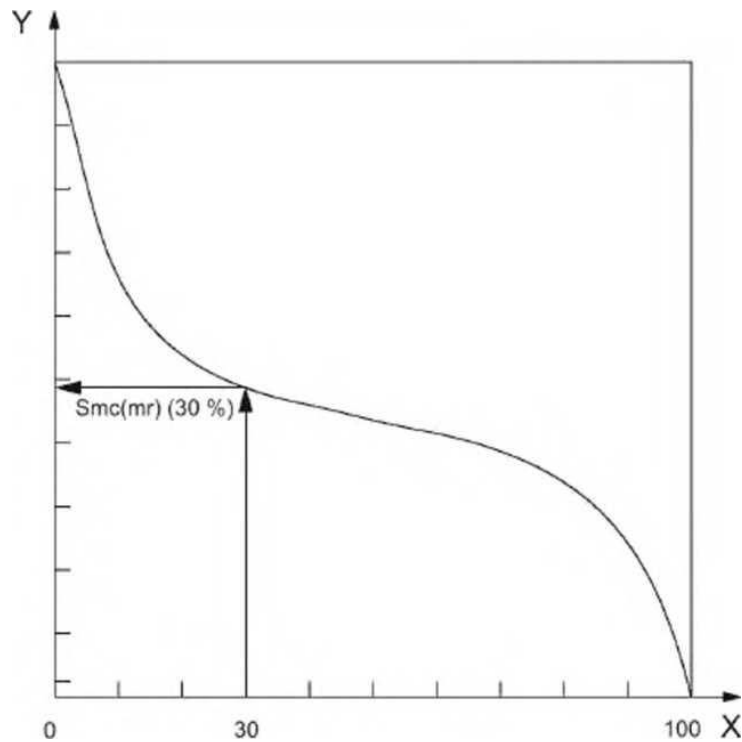


Рисунок 2.7 – Зворотний коефіцієнт зминання ареалу
(X – коефіцієнт зминання ареалу $S_{mc}(mr)$, %; Y – висота)

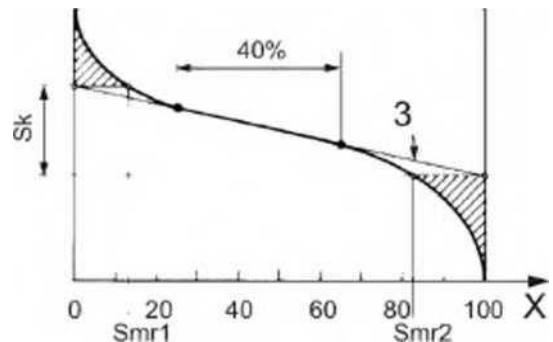
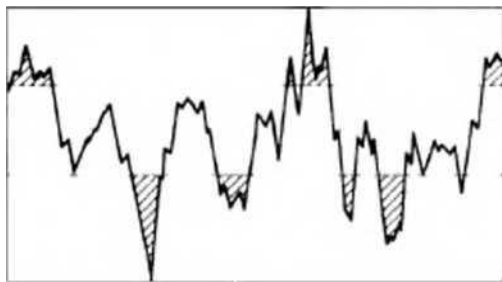


Рисунок 2.8 – Ілюстрація до розрахунку значень S_k , S_{mr1} і S_{mr2}
(X – коефіцієнт зминання ареалу, Y – положення лінії перетину, S_k – висота ядра, S_{mr1} , S_{mr2} – коефіцієнти зминання. Рисунок демонструє профіль, а не площу поверхні. Принцип є аналогічним для площі поверхні)

З кривою коефіцієнта зминання ареалу на поверхні обмеженого масштабу пов'язані також поняття:

об'єм порожнин $V_v(p)$, $V_v(p)$ (void volume $V_v(p)$, $V_v(p)$): Об'єм порожнин на одиницю площі при заданому коефіцієнті зминання, розрахованому на підставі кривої коефіцієнта зминання ареалу

$$V_v(p) = \frac{K}{100\%} \int_p^{100\%} [S_{mc}(p) - S_{mc}(q)] dq,$$

де K – коефіцієнт перерахунку в міліметри на квадратний метр.

об'єм порожнин западини поверхні обмеженого масштабу V_{vv} , V_{vv} (dale void volume of the scale-limited surface V_{vv} , V_{vv}): Об'єм западини за коефіцієнту змінання p :

$$V_{vv} = V_v(p).$$

об'єм порожнин ядра поверхні обмеженого масштабу V_{vc} , V_{vc} (core void volume of the scale-limited surface V_{vc} , V_{vc}): Різниця об'єму порожнин між коефіцієнтами змінання p і q :

$$V_{vc} = V_v(p) - V_v(q).$$

об'єм матеріалу $V_m(p)$, $V_m(p)$ (material volume $V_m(p)$, $V_m(p)$): Об'єм матеріалу на одиницю площі при заданому коефіцієнті змінання, розрахованому на підставі кривої коефіцієнта змінання ареалу:

$$V_m(p) = \frac{K}{100\%} \int_0^p [S_{mc}(q) - S_{dc}(p)] dq,$$

де K – коефіцієнт перерахунку в міліметри на квадратний метр (рис. 2.9).

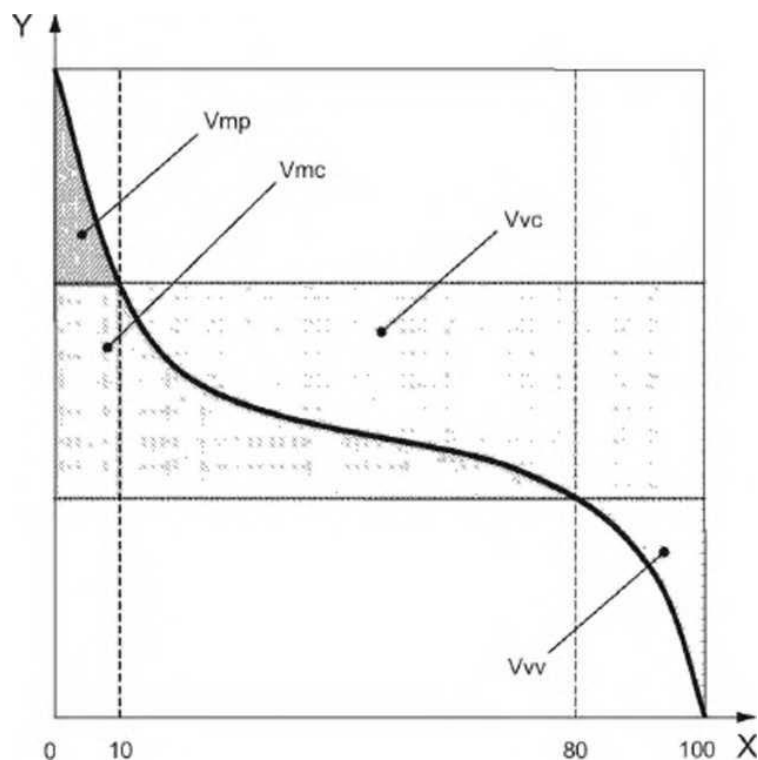


Рисунок 2.9 – Параметри об'єму порожнин й об'єму матеріалу
(X – коефіцієнт змінання ареалу, %; Y – висота)

об'єм матеріалу піку поверхні обмеженого масштабу V_{mp} , V_{mp} (peak material volume of the scale-limited surface V_{mp} , V_{mp}): Об'єм матеріалу при значенні p .

об'єм матеріалу ядра поверхні обмеженого масштабу V_{mc} , (core material volume of the scale-limited surface V_{mc} . V_{mc}): Різниця об'єму матеріалу між коефіцієнтами змінання p і q :

$$V_{mc} = V_m(q) - V_m(p).$$

Основними характеристиками геометричної структури поверхні, що дозволяють класифікувати геометричну будову поверхні, є: напрямність, ізотропність, періодичність, детермінація.

Напрямність ГСП – це взаємне розташування слідів поверхні, безпосередньо пов'язаних з технологічним процесом виготовлення. Напрямність тісно пов'язана з поняттям ізо- й анізотропності ГСП. ГСП є анізотропною, якщо сліди, залишені в результаті обробки, добре видимі, а їхні напрямки не збігаються. У протилежному випадку поверхня є ізотропною.

Ізотропність ГСП означає, що вона має однакові фізичні й стереометричні властивості у всіх напрямках. Є різні способи визначення ізотропності ГСП, з яких найбільш обґрунтованим є аналіз автокореляції. Ця функція може приймати різні форми. Форма, що характеризується асиметричністю, подовженням в одному з напрямків, вказує на анізотропні тенденції ГСП. Якщо ж функція приймає круглу, симетричну форму, ГСП є ізотропною. Ізотропність ГСП виражається у відсотках у межах від 0 (анізотропна поверхня) до 100 (ізотропна поверхня).

З точки зору *періодичності* ГСП може бути періодичною детермінованою (профіль визначається аналітичним або практичним методом) або ж періодичною недетермінованою (випадковою).

Рівень детермінації ГСП визначається кількісно за допомогою коефіцієнта sK_d :

$$sK_d = \frac{D_p}{S_q^2},$$

де S_q – середньоквадратичне відхилення нерівності;

S_q^2 – дисперсія реальної шорсткості;

D_p – дисперсія основного профілю детермінованої складової.

За $sK_d = 1$ поверхня є повністю детермінованою, за $sK_d = 0$ вона є повністю випадковою.

Спираючись на представлені тут характеристики ГСП, реальні поверхні ділять на анізотропні періодичні, анізотропні змішані, анізотропні випадкові, квазіізотропні періодичні. Зрозуміло, що кожна з характеристик відбиває результат використання певних методів виготовлення поверхні.

Вимір і подання ГСП у вигляді стереометрії, 3D-представлення, топографії дозволяють точніше передати природу процесів механічної обробки й взає-

модії поверхонь виробів й інструмента, а комп'ютерна техніка, будучи засобом швидкого аналізу даних, прискорює цей аналіз. Крім того, ці зображення можуть послужити також для:

- перевірки відповідності результатів технологічного впливу конструкторським завданням;
- дослідження ГСП і умов контакту двох реальних поверхонь;
- визначення зв'язків між методом виготовлення, у результаті якого утворена поверхня, і можливістю виконання цієї поверхнею поставлених завдань.

Поверхня як фізичне явище має безліч властивостей, серед яких і її геометрична структура. Для опису останньої застосовують топографію поверхні. Отже, одержання топографії поверхні означає вибір певних характеристик у тривимірному зображенні обмеженої області поверхні.

Методика аналізу ГСП має три етапи: власне вимір ГСП, представлення результату в вигляді топографії поверхні і її параметричну оцінку.

Сьогодні для виміру ГСП існує безліч дослідницьких і вимірювальних методів (рис. 2.10), які за застосуванням принципом ділять на *поверхневі*

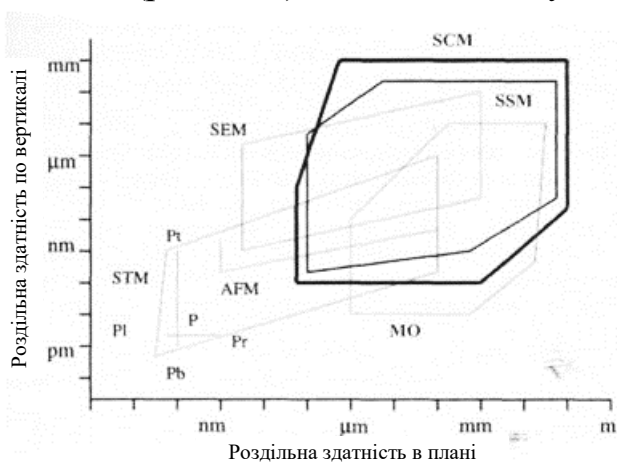


Рисунок 2.10 – Область застосування й роздільна здатність: AFM – атомно-силовий мікроскоп, SCM – растровий сканувальний мікроскоп, SSM – сканувальний пристрій з контактною голівкою, SEM – електронний сканувальний мікроскоп, STM – тунельний сканувальний мікроскоп, MO – оптичний мікроскоп

(методи, що використовують дисперсію світла, техніку контрастних плям, об'ємні) і *профільні* (профілометричні пристрої, оптичні проектори).

Метод аналізу поверхні використовується в сканувальному електронному мікроскопі СЕМ, який дозволяє одержати 2D- зображення поверхні з роздільною здатністю по вертикалі й у плані від міліметрового до нанометричного діапазону (рис. 2.11, а).

Цей же метод використовується у атомно-силовому мікроскопі (AFM), який служить для аналізу топографії ділянки поверхні розміром 30×30 мкм в нанодіапазоні – $\times 10^{-5} \dots \times 10^{-4}$ мм (рис. 2.11, б).

Проте, для оцінки ГСП у виробничих умовах і в дослідницькій практиці найчастіше застосовують профілометричні методи через простоту застосування, способу введення даних і техніки реєстрації, перетворення й інтерпретації результатів, стабільності в промислових умовах. При цьому використовують

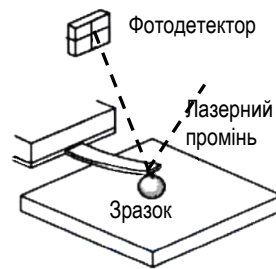
контактні й безконтактні сканувальні пристрої. Контактний сканувальний пристрій оснащений щупом у формі голки з алмазним наконечником, що переміщується по профілю на задану відстань із постійною швидкістю. Так, профілометр Talyscan 150 фірми Taylor–Hobson (Велика Британія) дозволяє сканувати ділянку поверхні розміром до 10×10 мм з кроком сканування до 5 мкм, хоча в більшості випадків для аналізу ГСП достатнім є сканування ділянки поверхні розміром $0,5 \times 0,5$ мм (рис. 2.11, в). У безконтактному сканувальному пристрої для сканування ділянки поверхні використовується лазерний промінь.



а



в

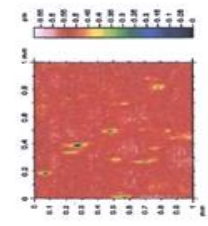
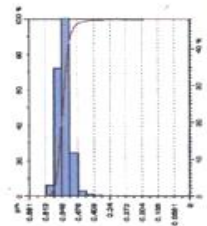
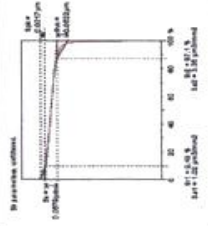
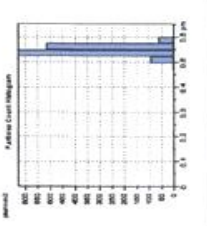
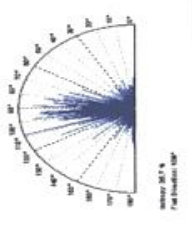
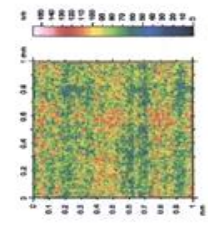
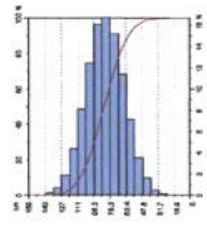
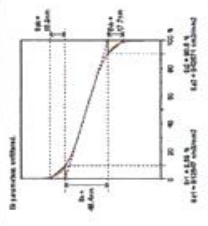
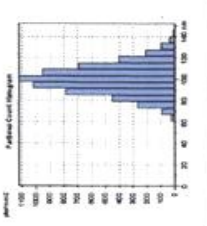
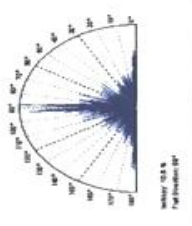
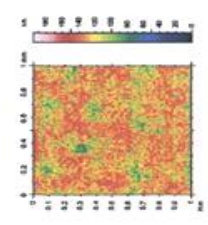
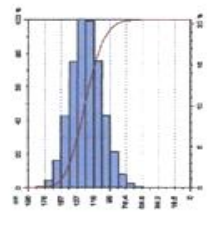
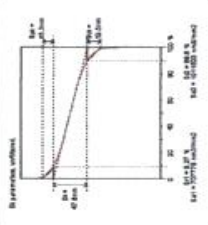
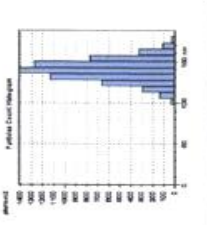
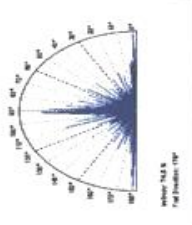
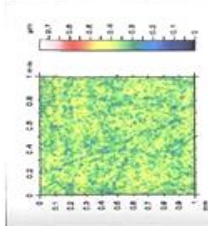
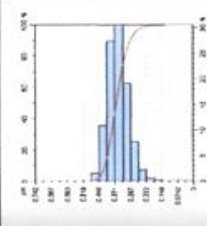
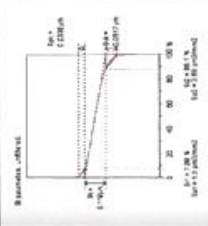
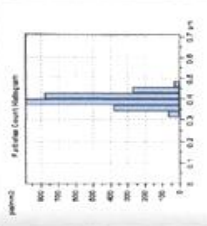
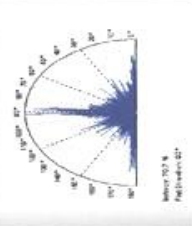
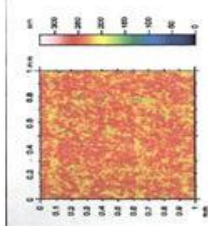
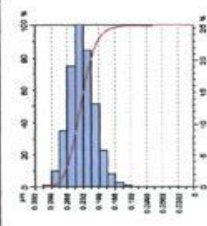
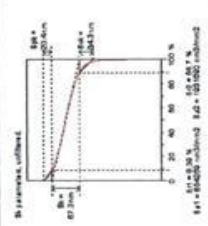
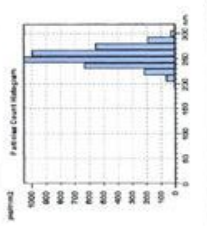
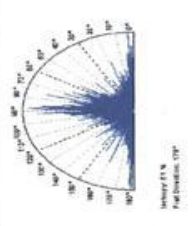
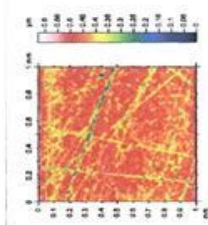
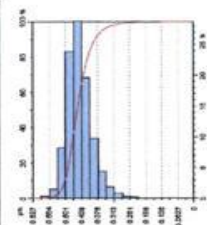
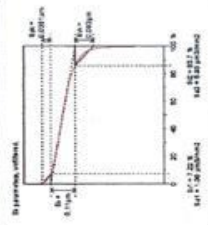
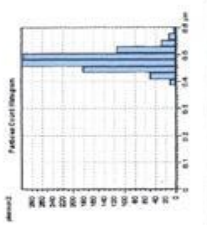
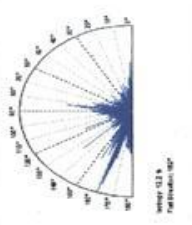
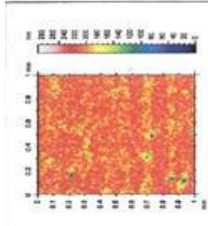
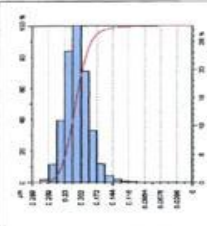
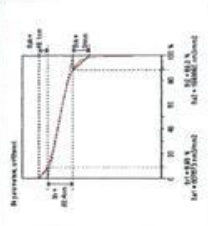
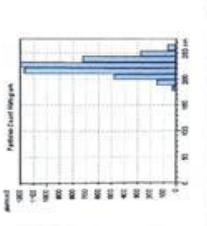
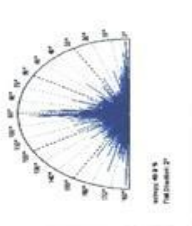
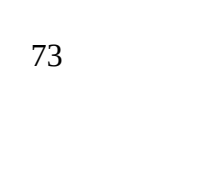


б

Рисунок 2.11 – Прилади для тривимірного (3D) вимірювання поверхні: сканувальний електронний мікроскоп SEM (а), атомно-силовий мікроскоп АФМ і схема вимірювання на ньому (б), профілометр зі сканувальним пристроєм (в)

Наступним після виміру етапом в аналізі ГСП є графічне подання результатів у вигляді топографії поверхні. Воно походить від картографічних методів і полягає в з'єднанні точок виміру таким чином, щоб отримане зображення представляло досліджувану поверхню. Існують два методи графічного подання вимірюваної поверхні – це контурна карта або вид зверху (2D) і аксонометрична проекція (3D). В табл. 2.3 приведені графічне представлення деяких параметрів шорсткості поверхні керамічних композитів з оксидів алюмінію й цирконію.

Таблиця 2.3 – Графічне представлення деяких параметрів шорсткості поверхні керамічних композитів з оксидів алюмінію й цирконію

№ зразка	Карта шарів	Розподіл нерівностей	Крива несної здатності	Розподіл ординат	Ізотропність
Сапфир					
					
Y-TZP					
					
20% ZrO ₂ – 80% Al ₂ O ₃					
					
80% ZrO ₂ – 20% Al ₂ O ₃					
					

Заключним етапом в аналізі ГСП виробів є визначення параметрів, що кількісно описують вимірювану поверхню. Зростаюча зацікавленість у топографічній оцінці поверхні мотивувала науково-дослідні центри до стандартизації методів оцінки поверхні, а також параметрів, що описують її нерівності. Частина термінології була взята із двовимірного опису шорсткості – це стандарти ISO, прийняті в 1996-1998 роках, потім підтверджені у 2012-2015 роках. Характеристики структури (3D), як і профілю (2D) поверхні виробів розділені на функції й параметри, які дозволяють точно визначати взаємозв'язок між експлуатаційними перевагами й характеристиками ГСП. При виборі функцій і параметрів 3D вирішено використовувати тільки ті з них, корисність яких як у промислових, так і науково-дослідних умовах, є безперечною й безсумнівною.

Оцінка поверхні має базуватися на амплітудних, просторових, гібридних, функціональних параметрах, що характеризують геометричне формоутворення і висоту нерівностей поверхні (табл. 2.4, рис. 2.12).

Інші параметри також можна аналізувати, але їх потрібно сприймати як додаткові допоміжні параметри, для уточнення критеріїв вибору поверхні відповідно до її експлуатаційного й конструкційного призначення.

Таблиця 2.4 – 3D параметри геометричної структури поверхні

Категорія	Параметри шорсткості поверхні	
Амплітудні параметри	Sa	Середнє арифметичне відхилення шорсткості поверхні
	Sq	Середньоквадратичне відхилення шорсткості поверхні
	Sz	Висота нерівностей поверхні по десяти точках
	Ssk	Коефіцієнт асиметрії поверхні
	Sku	Коефіцієнт скупчення
	Sz	
Просторові параметри	Sds	Щільність вершин нерівностей поверхні
	Sal	Довжина відрізка самого швидкого затухання функції автокореляції
	Str	Показник структури поверхні
	Std	Напрямість структури поверхні
Гібридні параметри	Sdq	Середньоквадратичне нахилання поверхні
	Ssc	Середня арифметична кривизна вершин нерівностей поверхні
	Sdr	Розгортка поверхні
Функціональні параметри	Sbi	Показник опорної здатності поверхні
	Sci	Показник утримання рідини виступами
	Svi	Показник утримання рідини западинами
	Sm	Показник матеріалу в поверхневому шарі
	Sc	Показник базової шорсткості
	Sv	Показник недієвості западин

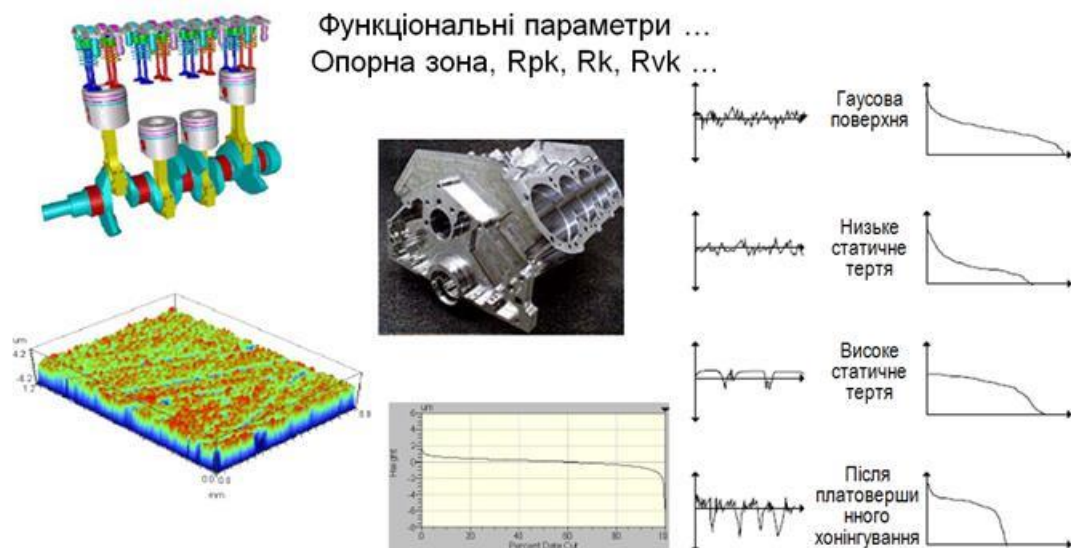


Рисунок 2.12 – Застосування функціональних параметрів

Питання для самоконтролю:

1. Що таке геометрична структура обробленої поверхні згідно ISO 4287:1997? Що таке топографія поверхні? Від чого вони залежать?
2. Скільки класів нерегулярності поверхні згідно ISO 4287:1997 існує і які?
3. Які традиційні параметри і функції використовують для 2D аналізу шорсткості поверхні? Привести приклади основних.
4. Показниками чого є параметри R_a і R_q ? Показником чого є параметр R_z ? В чому полягає їх відмінність?
5. Показниками чого є параметри R_t , R_p і R_v ?
6. Що таке крива розподілу висот нерівностей? Про що вона якісно свідчить?
7. Показниками чого є параметри R_{sk} і R_{ku} ? Який зв'язок між ними і кривою розподілу висот нерівностей?
8. Що таке відносна опорна довжина профілю? Як вона розраховується?
9. Що таке опорна крива (крива Аббота-Фаерстона)? Які параметри її характеризують? Як вони розраховуються?

Розділ 3. ТИПОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Як відомо, газотурбінною називають установку, яка складається з трьох основних елементів: повітряного компресора, камери згоряння і газової турбіни (рис. 3.1). Принцип дії ГТУ зводиться до наступного. З атмосфери повітря забирають компресором К, після чого при підвищеному тиску його подають в камеру згоряння КС, куди одночасно підводять рідке або газоподібне паливо паливним насосом ТН. У камері згоряння повітря розділяється на два потоки: один потік в кількості, необхідній для згоряння палива, надходить всередину жарової труби ЖТ, другий потік обтікає жарову трубу ззовні і підмішується до продуктів згоряння для зниження їх температури. Процес згоряння в камері відбувається як при майже постійному тиску (рис. 3.1, а), так і при постійному об'ємі (рис. 3.1, б).

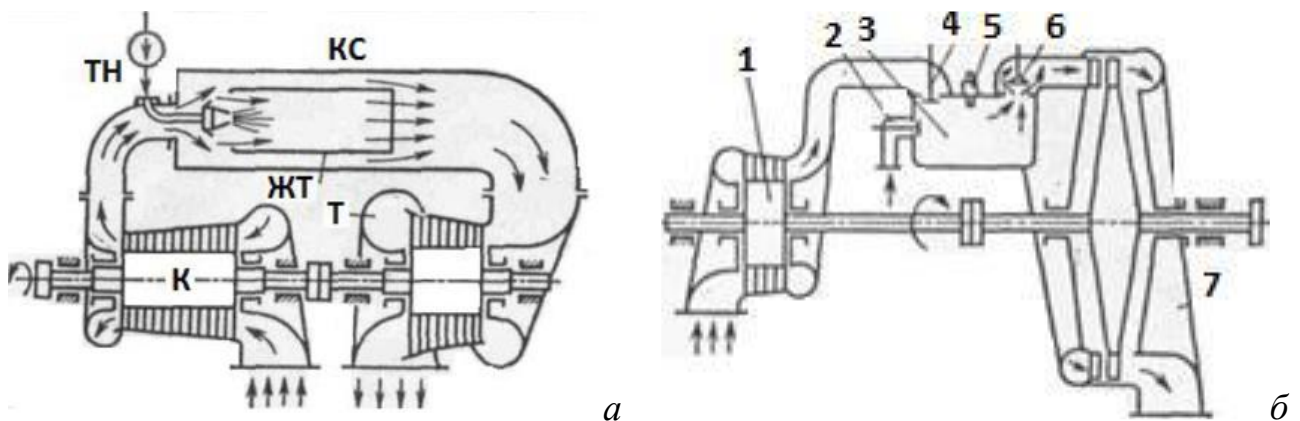


Рисунок 3.1 – Газотурбінна установка з горінням при постійному тиску (а)
і постійному об'ємі (б)

Газ, який утворився після змішування, надходить в газову турбіну, в якій, розширюючись, він здійснює роботу, а потім викидається в атмосферу. Потужність, яка розвивається газовою турбіною, частково витрачається на надання обертання компресору, а частина, що залишилася, є корисною потужністю газотурбінної установки. Частку корисної потужності можна збільшити, підвищивши температуру газу перед турбіною або знизивши температуру повітря, яке засмоктується компресором. У першому випадку зростає робота розширення (використовуваний тепловий перепад) газу в турбіні, у другому – зменшується робота, що витрачається на стиснення повітря в компресорі. Обидва способи призводять до збільшення частки корисної потужності. Таким чином, в лопат-

ній машині потенційна енергія газу, стисненого в компресорі й нагрітого за рахунок спалювання палива у камері згоряння, перетворюється в механічну роботу на валу турбіни або утворює реактивну тягу, або те й інше разом.

Приклади сучасних газотурбінних двигунів. Двигун V2500, розроблений в рамках глобального партнерства аерокосмічних лідерів International Aero Engines, Pratt & Whitney, MTU Aero Engines з використанням найсучасніших технологій, що розвиває тягу від 97900 до 146800 Н за низького рівня шкідливих викидів (рис. 3.2, *а*) та призначений для лінійки аеробусів Airbus A320. Двигун Д-436-148, розроблений ДП "ЗМКБ "Прогрес" ім. акад. А.Г. Івченко (рис. 3.2, *б*). Тяга двигуна на злітному режимі 63000 Н, маса 1400 кг. Відповідає діючим нормам Стандарта ІКАО по екології. Встановлюється на регіональні пасажирські літаки Ан-148.

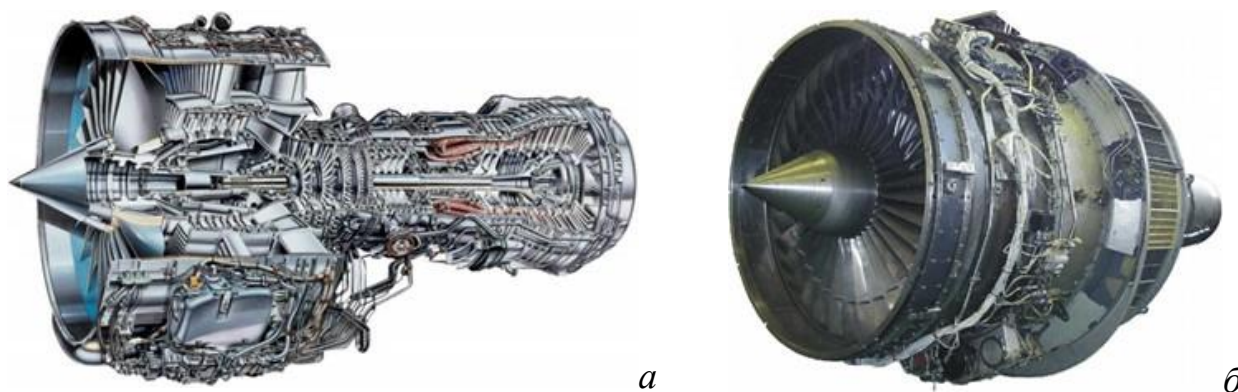


Рисунок 3.2 – Сучасні газотурбінні двигуни: V2500 (*а*) і Д-436-148 (*б*)

Однороторний компресор авіаційного газотурбінного двигуна складається з низки так званих ступенів (рис. 3.3), кількість яких може бути різною в залежності від величини степені підвищення тиску, що вимагається, й призначення: від одного-двох до 14 й більше. Ступінь складається з двох рядів (їх ще називають вінці) лопаток спеціального профілю. Перший ряд – це так зване робоче колесо, яке «сидить» на одній осі з турбіною й від неї ж обертається. Тобто ці лопатки є рухомі. Другий ряд – це так званий напрямний апарат (НА). Ці лопатки є нерухомими й приєднані до корпусу компресора.

На деяких двигунах (літаків сімейства Су-17М) лопатки вхідного НА є керованими. Своїми торцями вони розташовані на поворотних осях й за командами автоматики керування можуть змінювати кут по відношенню до потоку в залежності від режиму роботи двигуна й зовнішніх умов.

Забезпечення високої рентабельності і значне скорочення трудовитрат у виробництві сучасних ГТД є основним завданням, спрямованим на підвищення якості і зниження собівартості виготовлення високоефективних двигунів нового

покоління. Це завдання вельми актуальне для виробництва лопаток турбіни, де до 2000-х років коефіцієнт використання матеріалу (КВМ) залишався вкрай низьким: 0,05-0,30. Це призводить до значних перевитрат матеріалів та енергоресурсів, високої трудомісткості подальшої обробки (частка механічної обробки лопаток турбіни різанням на той момент досягала 60% від всієї трудомісткості виготовлення двигуна) і зниження якості виготовлених лопаток.

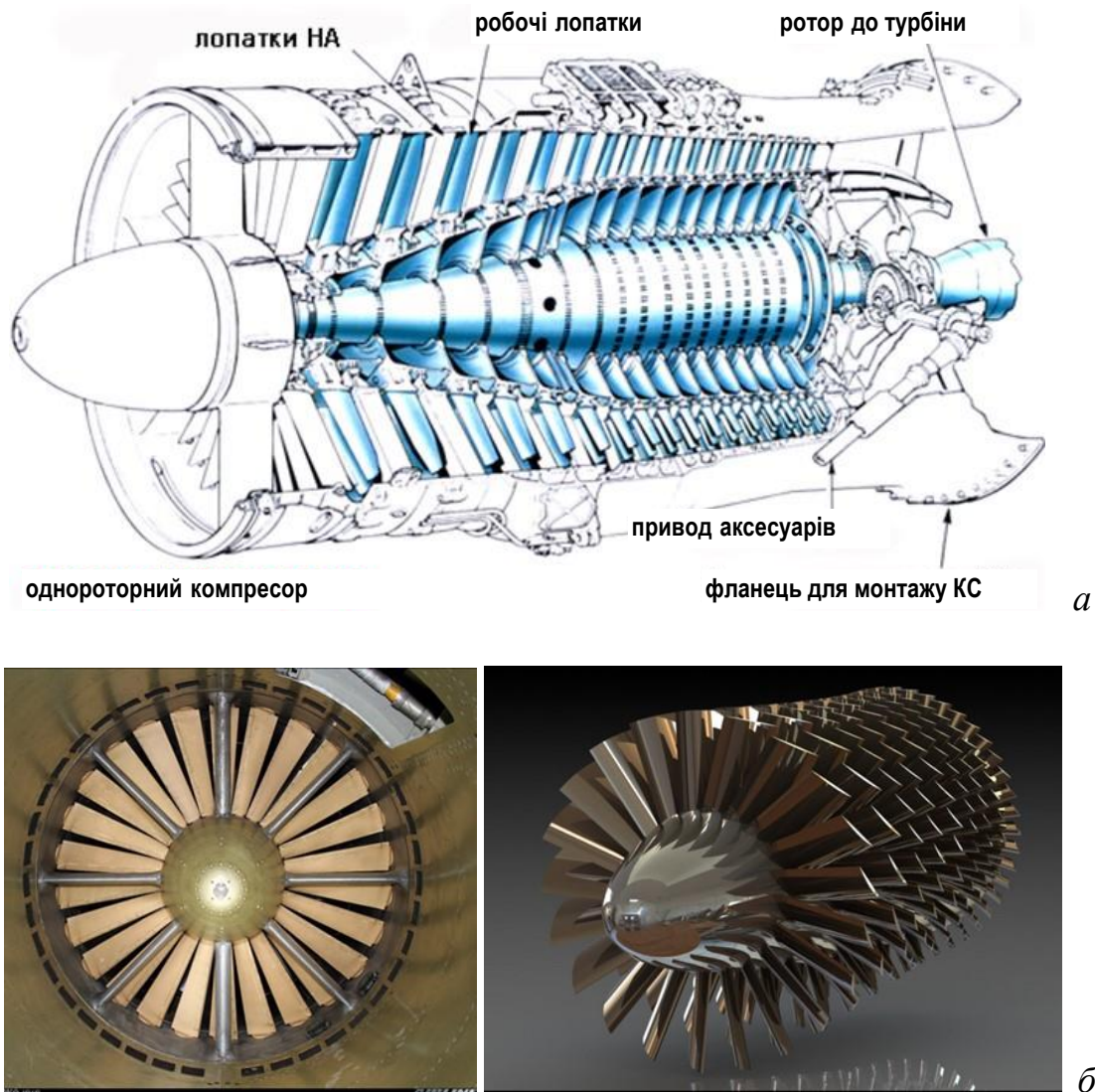


Рисунок 3.3 – Схема розташування ротора в компресорі (а), загальний вигляд ротора (б)

Наразі одним з найважливіших завдань авіаційного двигунобудування є підвищення надійності газотурбінних двигунів. Оскільки надійність ГТД забезпечується, в тому числі, технологічними методами, основні зусилля мають бути спрямовані на вдосконалення виробничих процесів виготовлення основних деталей двигуна. Перш за все це стосується технологій виготовлення деталей ро-

бочого тракту, таких як лопатки турбіни, через те що вони є найбільш відповідальними деталями в двигуні, максимально навантаженими і такими, що визначають ресурс роботи двигуна. Вартість виготовлення комплекту лопаток становить від 20 до 35% загальної вартості двигуна, а трудомісткість їх виготовлення може досягати 20-30% загальної трудомісткості виготовлення двигуна.

Лопатки турбіни характеризуються складною просторовою формою, високими вимогами до точності її геометрії і якості поверхневого шару (рис. 3.4). Перо робочої лопатки має форму зі змінними по довжині профілями поперечних перерізів. Перетини розвернуті один відносно одного по довжині пера, утворюючи закручення, що доходить до 60° . Спинка й корито в перетині окреслені кривою змінного радіуса й задаються у вигляді координат окремих точок. Виробництво лопаток ГТД викликає певні технологічні труднощі, пов'язані з високими вимогами до точності складної просторової поверхні пера й геометричним розмірам хвостової частини, не згадуючи вже про погану оброблюваність жароміцних матеріалів, які використовують для їх виготовлення.

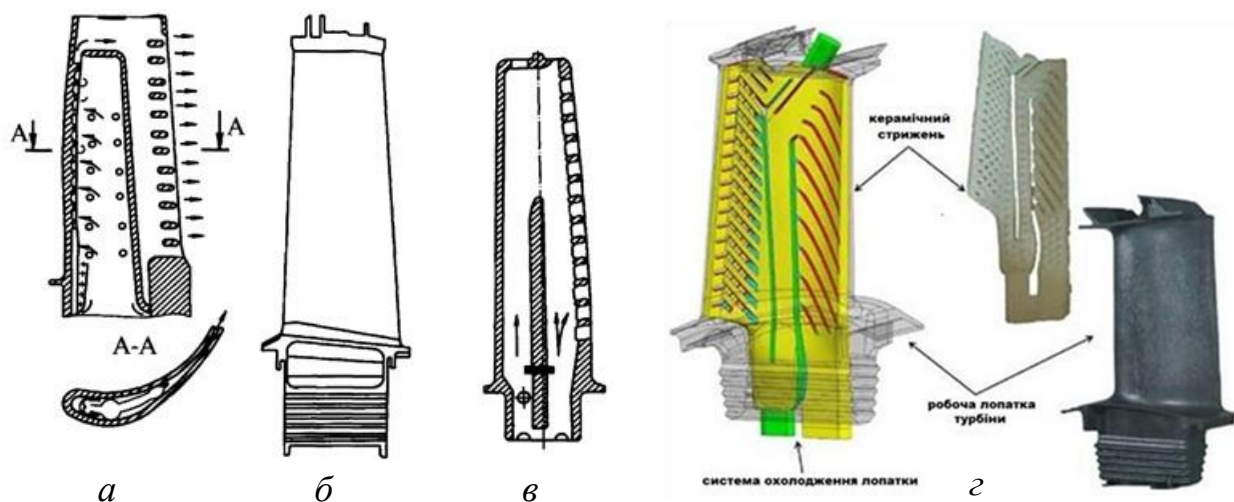


Рисунок 3.4 – Робочі лопатки турбіни: лита охолоджувана лопатка з поздовжніми осьовими каналами (а); лита неохолоджувана лопатка (б); лита охолоджувана лопатка зі вставним дефлектором (в); лопатка з керамічним стрижнем (г)

Лопатки ротора турбіни є найбільш навантаженими деталями ГТД, що визначають їхній ресурс. Найбільша кількість відмов двигунів в експлуатації, що приводять до руйнування, пов'язано з руйнуванням лопаток. Профільна частина й хвостовики лопаток крім розтягання й вигину від відцентрових сил, вигину й крутіння від газового потоку витримують змінні напруження від вібраційних навантажень, частота й амплітуда яких змінюються в широких межах, а також від теплових навантажень. У цьому випадку температура на лопатках першого ступеня турбіни досягає 1200°C .

Під час роботи двигуна вхідна й вихідна кромки лопаток нагріваються й охолоджуються значно швидше, ніж середня частина лопатки. При цьому на вхідній і вихідній кромках лопатки виникають напруження стиснення (при нагріванні) і розтягування (при охолодженні). Циклічність знакозмінних напружень призводить до руйнування лопаток внаслідок термічної втоми; термічні мікротріщини, що утворюються в результаті цього, розвиваються у втомні. Крім того, лопатки турбіни працюють в умовах агресивного газового середовища за високої температури, що може викликати їхню газову корозію. Перебуваючи в запиленому й вологому повітряному потоці, лопатки знаходяться під дією абразивних часток, від чого вхідні й вихідні кромки зношуються.

Через ці обставини матеріали для виготовлення лопаток турбіни ГТД повинні мати високий опір повзучості, втомі, високотемпературній газовій корозії, ерозійного руйнування, а також мати достатню жароміцність і пластичність, бути малочутливими до надрізів (концентраторів напружень). У той же час, вони повинні мати певні технологічні властивості: оброблюваність різанням, зварюваність, хороші ливарні властивості.

3.1. Концепція наскрізної цифрової підтримки життєвого циклу лопаток турбіни

В умовах сильної конкуренції в авіаційній промисловості виробництво стає усе більше наукомістким. Виробники ГТД намагаються різними способами підвищити якість деталей, що виготовляються, при цьому забезпечити невисоку вартість продукції за рахунок впровадження нових технологій. Одним з ефективних способів зниження собівартості продукції є оптимізація процесів обробки, що дозволяє зменшити час виготовлення деталі, тобто збільшити продуктивність обробки. Ще одним способом здешевлення продукції є зниження витрат на інструмент. Ці способи мають значення лише в тому випадку, якщо при їхньому застосуванні якість деталей, що виготовляються, підвищується або залишається незмінною. Рівень сучасних світових вимог у виробництві лопаток турбіни постійно підвищується і зараз проектування виробничих технологій здійснюється відповідно до концепції, суть якої полягає в наскрізній цифровій підтримці всього життєвого циклу виробу (ЖЦВ). В існуючому ж виробництві слабо реалізована комп'ютерна підтримка етапу розробки та апробації технології виготовлення лопаток турбіни. Дана обставина, в тому числі, є причиною великого відсотка браку в лопатках з поздовжньо-орієнтованою структурою (близько 40%) і в лопатках з монокристалічною структурою (близько 60%), позаяк відпрацювання технології проводиться за рахунок проведення ряду натурних експериментів методом проб і помилок, що призводить до значних переви-

трат дорогих матеріалів і енергоресурсів, підвищення трудомісткості виготовлення лопаток і зниження гнучкості технологічних процесів.

Відповідно до концепції виникає потреба у створенні наскрізної цифрової моделі двигуна і технології його виготовлення. Рис. 3.5 ілюструє моделєорієнтований підхід до підготовки виробництва. Створюються часткові цифрові моделі-двійники усіх технологічних процесів, що становлять життєвий цикл виробу у двигуні: проектується 3D- модель деталі, розробляється цифровий технологічний процес її виготовлення, проводяться цифрові газодинамічні дослідження спроектованої деталі, створюється електронний документообіг (безпаперові технології). Таким чином, всі процеси, що відбуваються на стадії проектування двигуна і його подальшої експлуатації, необхідно оцифрувати, тобто паралельно протіканню етапу реального життєвого циклу виробу необхідно проводити етап цифрового проектування.

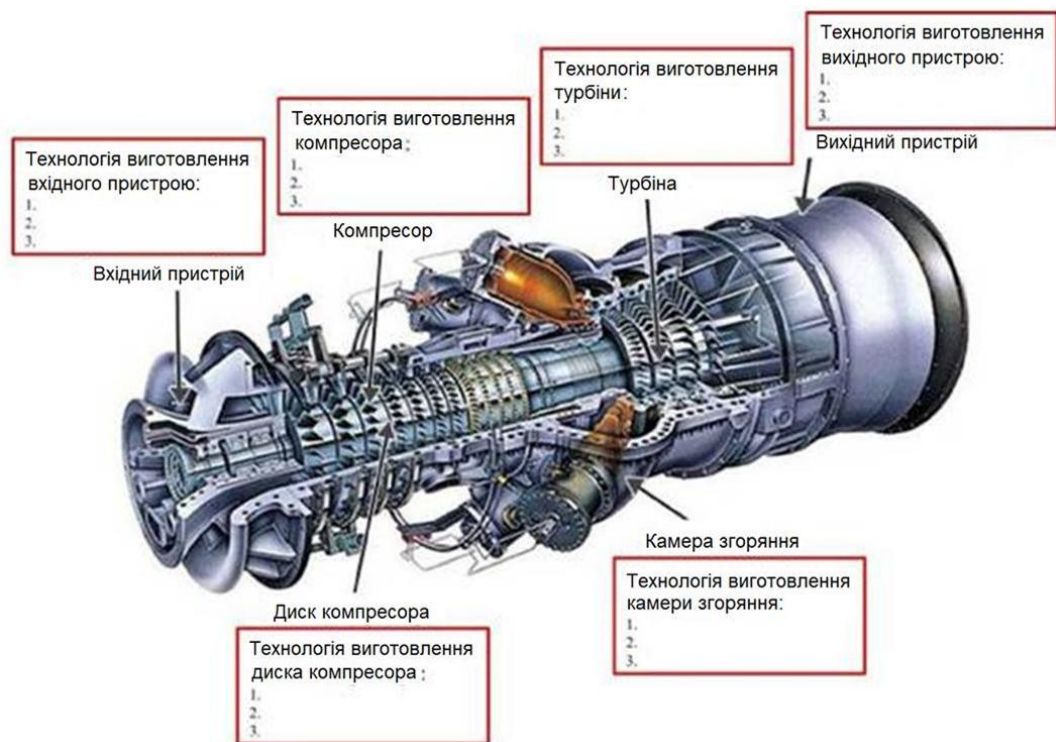


Рисунок 3.5 – Модель ГТД і укрупнена технологія його виготовлення у відповідності до концепції цифрової моделі

Ключові елементи цифрового двійника для ланцюжка виготовлення лопатки представлені на рис. 3.6. Наприклад, для виготовлення робочої лопатки турбіни ГТД 1-го ступеня двигуна НК-32 особливу увагу було приділено розробці універсальних підходів і алгоритмів проектування цифрових моделей технологічного процесу виготовлення безприпускових за профілем пера лопаток, одержуваних методом монокристалічного литва в ливарній установці. Слід зазначити, що існуюча технологія виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД складається з двох технологічних циклів: 1-й цикл включає в себе виготовлення

відливки робочих лопаток і підготовку технологічних баз для подальшої механічної обробки замка лопатки шляхом полірування профілю пера; 2-й цикл – механічну обробку замкової частини лопатки. Надалі будуть розглянуті операції тільки 1-го технологічного циклу і не будуть розглянуті цифрові моделі механічної обробки бандажної полиці і замка лопатки, що відносяться до 2-го виробничого циклу.

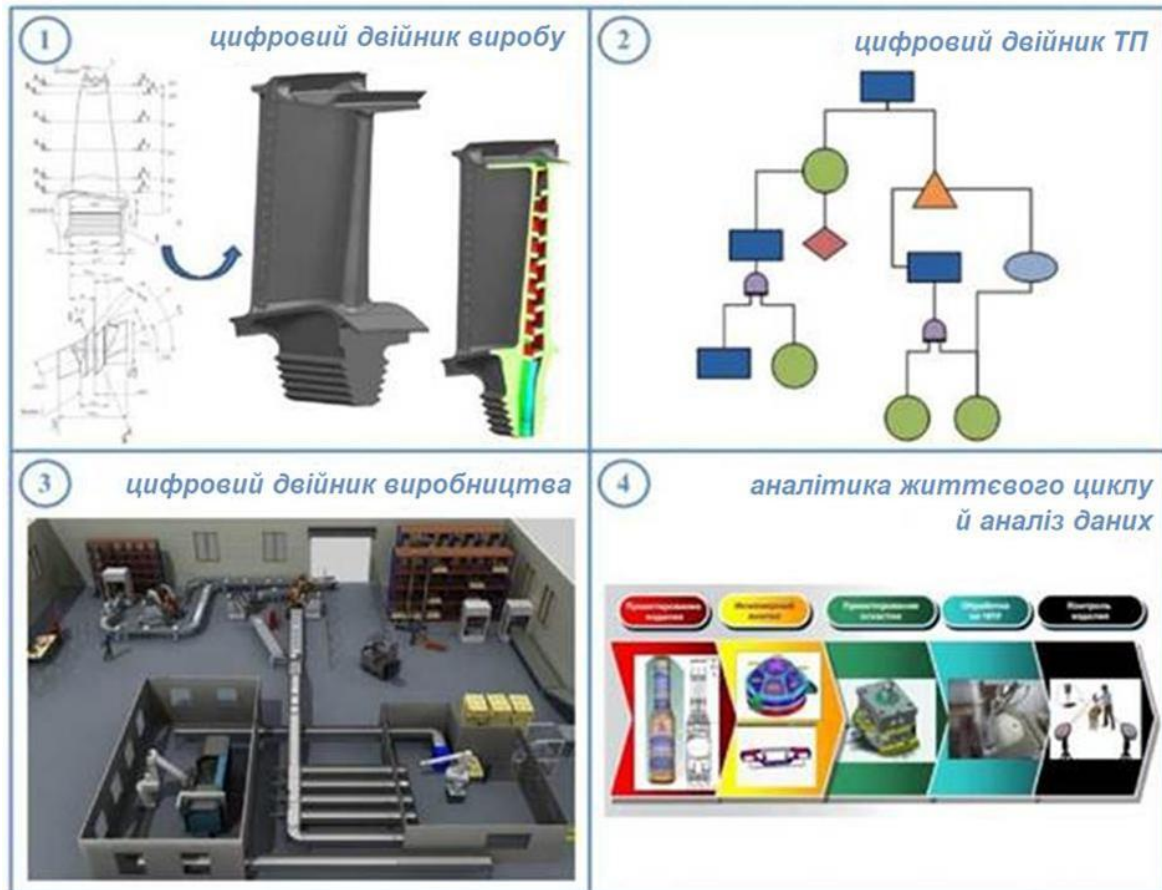


Рисунок 3.6 – Ключові елементи цифрового двійника ланцюжка створення виробу у відповідності до концепції

Резюмуючи, необхідно сказати, що складність технології виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД, її багатофакторність і висока собівартість диктують впровадження етапу комп'ютерного моделювання під час технологічної підготовки виробництва на основі обґрунтованого вибору раціональних параметрів ТП і використання методів і засобів чисельного експерименту. Розробка і використання цифрового двійника існуючого технологічного процесу виготовлення робочих лопаток турбіни, його верифікація і апробація в досвідному виробництві дозволяють в найкоротші терміни і з мінімальними затратами виявити причини виникнення дефектів і розробити комплекс заходів та рекомендацій, спрямованих на їх усунення.

Особливості технологічного процесу виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД. Сучасні газотурбінні двигуни мають величезну номенклатуру деталей і складальних одиниць, однак, на сьогоднішній день охолоджувані лопатки турбіни не мають аналогів за складністю навантаження і відповідальності при роботі. У зв'язку з цим, створення жароміцних нікелевих сплавів як основного матеріалу для литва лопаток сучасних і перспективних ГТД і розробка методу точного (безприпускового) литва вивели авіаційну техніку на новий рівень. Наразі технологія безприпускового литва виливків деталей робочого тракту ГТД з монокристалічною структурою – найважливіше технологічне досягнення в багатомономенклатурному виробництві при виготовленні деталей складної просторово-орієнтованої форми.

Технологія виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД займає першорядне місце в сучасному авіа-двигунобудуванні. Це обумовлено наступними специфічними особливостями виготовлення лопаток.

1. Надзвичайно відповідальним призначенням лопаток у двигуні. Надійність, безвідмовність і ресурс роботи газотурбінного двигуна у вирішальній мірі визначається працездатністю лопаток. Таким чином, технологія виготовлення лопаток і наступна операція контролю геометричних параметрів готової лопатки мають забезпечувати стабільність якості їх виготовлення і повністю виключати можливість установки в двигуні лопаток з відхиленнями розмірів трактової й замкової частини, незадовільну якість поверхневого шару, ливарні і інші види дефектів.

2. Складною просторової геометричною формою лопатки і високими вимогами до точності виготовлення. Трактова поверхня лопатки являє собою лопать змінного перерізу, обмежену з боку корита і спинки поверхнею складної форми, точно орієнтовану в просторі по відношенню до замка лопатки. Допуски на виготовлення пера лопатки складають 0,05...0,15 мм, замкову ж частину виготовляють з точністю 0,01...0,02 мм.

3. Серійним і масовим характером виготовлення лопаток. Сучасні газотурбінні двигуни налічують понад 2000 лопаток, тому навіть при виготовленні експериментальних і дослідних партій лопаток виробництво носить серійний характер.

4. Використанням при виготовленні лопаток дорогого і жароміцного матеріалу. У зв'язку з цим технологічний процес виготовлення лопаток має бути побудований на принципах «бережливого виробництва», гарантуючи мінімальний відсоток браку і забезпечуючи безвідходне або маловідходне виробництво.

5. Незадовільною оброблюваністю використовуваного матеріалу під час механічної обробки. Робочі лопатки турбіни ГТД виготовляються з жароміцних і жаростійких сплавів на нікелевій основі, що мають відносно високу стійкість

та міцність. Необхідно відзначити, що стійкість різального інструмента поки що не відповідає вимогам масового виробництва лопаток турбіни.

Поєднання зазначених факторів визначає специфічність виробництва лопаток турбіни. Класифікація лопаток ГТД за призначенням показана на рис. 3.7.

Розвиток сучасного авіадвигунобудування немислимий без безперервного підвищення тяги двигуна і, як наслідок, збільшення його ККД, що вирішується за рахунок підвищення температури газового потоку перед турбіною. Одним із способів збільшення температури робочого газу перед турбіною є вдосконалення технології виготовлення робочих лопаток турбіни. Крім іншого, підвищити температуру робочого газу перед турбіною можливо шляхом виготовлення робочих лопаток турбіни з нових матеріалів, що характеризуються підвищеною жароміцністю і жаростійкістю, здатних працювати при температурах, які на 200-300°C перевищують температуру плавлення їх матеріалів.



Рисунок 3.7 – Класифікація лопаток ГТД за призначенням

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягає різниця в умовах експлуатації лопаток турбін і компресорів, основна різниця в їх конструкції, різниця у розмірах?
2. Який максимальний кут розвороту один відносно іншого перетинів профілю пера лопаток турбіни по його довжині?
3. В чому полягає сутність концепції наскрізної цифрової підтримки життєвого циклу лопаток турбіни?
4. В чому полягає сутність модеорієнтованого підходу до підготовки виробництва?
5. В чому сутність цифрового двійника технологічного процесу виготовлення лопаток турбіни?

3.2. Технології виготовлення виливків лопаток турбіни

Технологія отримання заготовок робочих лопаток турбіни ГТД і їх подальша механічна обробка вимагають застосування дороговартісного спеціалізованого обладнання, унікального оснащення і контрольно-вимірювальних засобів. Тому конструкція лопаток має бути технологічною, забезпечувати максимальне застосування існуючого технологічного обладнання, а також можливість механізації і автоматизації процесів механічної обробки, різко скорочувати обсяг ручних полірувально-доводочних робіт (суб'єктивного фактору). Це стабілізує технологічний процес і підвищує якість готової продукції.

Умови роботи лопаток турбіни висувають дуже жорсткі вимоги до матеріалів, з яких вони виготовлені. Матеріал повинен бути однорідним за якістю й властивостям. Тому лопатки турбіни виготовляють із жароміцних сплавів на нікель-хромовій або нікель-хром-кобальтовій основі, легованих титаном, алюмінієм, молібденом, вольфрамом, ніобієм, церієм, бором, ванадієм, іттрієм, гафнієм, лантаном, ренієм, танталом та ін. Використовуються в основному ливарні жароміцні сплави. При виготовленні робочих і соплових лопаток застосовують жароміцні сплави таких марок, як ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ12, ЖС6У-ВИ, ЖС6Ф, ЖС30 тощо (рис. 3.8).

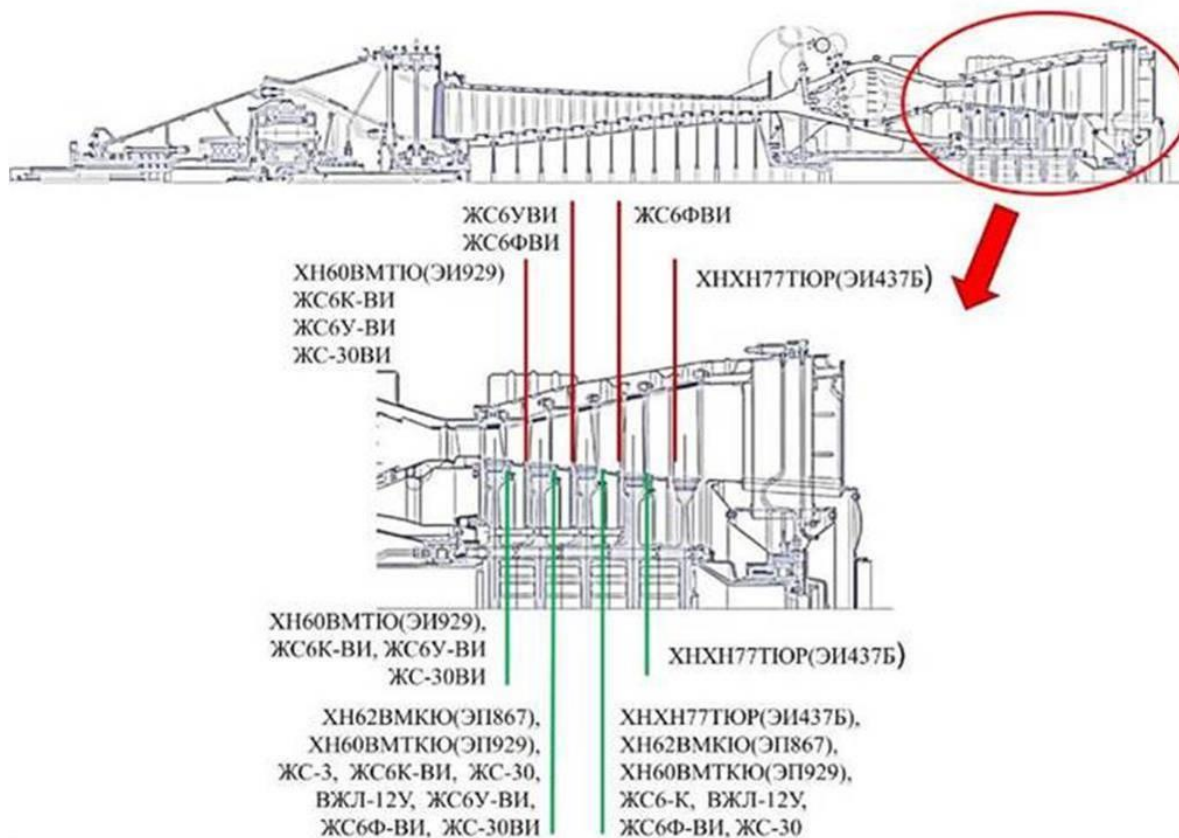


Рисунок 3.8 – Жароміцні сплави, які застосовуються в турбіні ГТД

Ці сплави характеризуються підвищеними експлуатаційними властивостями, однак дуже погано обробляються традиційними способами механічної обробки (точінням, фрезеруванням, свердлінням тощо). Крім того, вони схильні до утворення тріщин і припалів під час обробки традиційними способами шліфування. На рис. 3.9 наведені криві змінювання коефіцієнтів оброблюваності сплавів (відносно сплаву ХН77ТЮР) й температури, за якої зберігається жароміцність, при напруженні $\sigma = 200$ МПа протягом 100 год. Жароміцність різних сплавів відображають дані табл. 3.1. З наведених даних із жароміцності й оброблюваності різних матеріалів витікає, що для забезпечення необхідної довговічності деталей і в цілому працездатності двигунів до конструкцій даних деталей висувають такі вимоги, забезпечення яких можливе лише за умови реалізації спеціальних технологій.

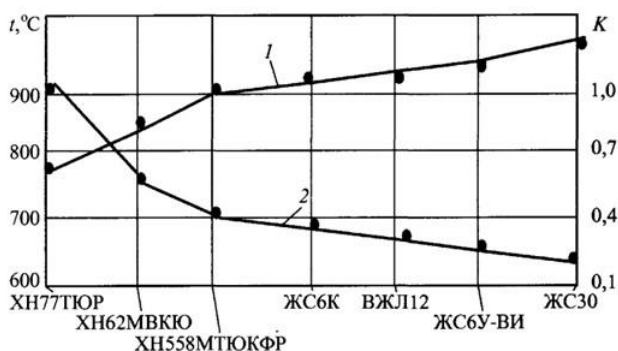


Рисунок 3.9 – Залежність оброблюваності від рівня жароміцності сплавів на нікелевій основі: 1 – рівень жароміцності при $\sigma = 200$ МПа; 2 – змінювання коефіцієнтів оброблюваності K по відношенню до сплаву ХН77ТЮР

Таблиця 3.1 – Марки жароміцних сплавів та температури їх експлуатації

Сплав	Температура експлуатації, $^\circ\text{C}$	Сплав	Температура експлуатації, $^\circ\text{C}$
ХН77ТЮР	750	ЖС6К	900...1000
ХН70ВМТЮ	700...850	ЖС6КП	900...1000
ХН70МВТЮБ	800...850	ЖС6У-ВИ	1050...1100
ХН62МВКЮ	900...950	ЖС6Ф	1050...1100
ХН518МТЮКФР	950	ЖС30	1100

Наразі під час розробки сучасних жароміцних ливарних сплавів розглядаються основні параметри технологічного процесу спрямованої кристалізації, досліджуються властивості ливарних жароміцних сплавів, а також конструктивно-технологічні особливості устаткування. Впроваджується у серійне виробництво новий метод виготовлення робочих лопаток турбіни з використанням стереолітографії. Даний підхід подібний до технології швидкого прототипування, коли зовнішня поверхня лопатки і внутрішні канали охолодження формуються за допомогою різних методів 3D-друку, а заготовки лопаток з нікелевих сплавів виготовляють шляхом литва по виплавлюваним моделям.

Так, вчені з Китаю Lu Z.L., Lu F., Cao J.W., Li D.C. вперше пропонують для серійного виробництва інноваційний гібридний метод виготовлення лопаток турбіни з керамічних і композиційних матеріалів. В їх роботі основна увага

приділяється дослідженням щодо впливу вуглецевого волокна і карбїду кремнію на механічні властивості і точність лопаток, які виготовляються. Експериментально апробовані результати роботи показують, що наявність вуглецевого волокна збільшує міцність на вигин і тріщиностійкість лопаток. При утриманні вуглецевого волокна в межах від 10 до 15% від загального обсягу міцність на вигин і в'язкість руйнування досягає своїх максимальних значень і становить 350 МПа і 4,49 МПа відповідно. Однак, за словами самих авторів, вирішення питань, пов'язаних з дослідженням механічних властивостей і контролем геометричних параметрів готових лопаток турбіни, зважаючи на специфіку властивостей матеріалу, на сьогоднішній день є складним.

В інших роботах пропонується використовувати композитні матеріали з керамічною матрицею в технологічному процесі виготовлення лопаток турбіни. На думку вчених, кераміка має низьку густину і здатна витримувати високі температури, що сприяє підвищенню ККД двигуна. Однак необхідно відзначити, що кераміка має і негативні властивості, які полягають в крихкості і ламкості, що, безсумнівно, на сьогоднішній день обмежує область її застосування.

Безсумнівно, ключовою ланкою в ливарному виробництві лопаток турбіни є розробка технологічних рішень для отримання виливків лопаток з монокристалічною структурою. У зарубіжній практиці на підприємстві Pratt & Whitney (США) знайшов застосування беззатравочний метод литва лопаток, заснований на використанні кристаловоду спеціальної форми – гелікоїда. Однак використання гелікоїда при виготовленні лопаток турбіни з монокристалічною структурою дозволяє одержувати виливки тільки з аксіальною орієнтацією, близькою до $[001]$, і довільної азимутальною орієнтацією.

У зв'язку з практично повним використанням деформовуваними сплавами запасу жароміцності, в кінці ХХ століття почали здійснювати перші спроби з розробки нових ливарних жароміцних сплавів. До того ж підвищені вимоги і надзвичайно відповідальне призначення лопаток стали передумовою до розробки нових ливарних сплавів, що дозволяють лопаткам працювати в агресивних середовищах з температурами, які на 200-300°C перевищують температуру плавлення матеріалу лопаток.

Наразі основним методом виготовлення лопаток з ливарних жароміцних сплавів є метод монокристалічного литва (в оболонкові керамічні форми). За серійного або масового виробництва робочих і соплових турбінних лопаток, які не мають потреби в подальшій механічній обробці поверхонь пера, цей метод литва є найбільш економічно вигідним. Завдяки цьому можна говорити про безприпускове (точне) литво лопаток турбіни ГТД.

За крупносерійного і масового виробництва лопаток заготовки, отримані за ливарними технологіями виробництва, є найбільш економічно вигідними в

порівнянні зі штампованими. При вакуумній плавці-заливці в оболонкові форми наступні технологічні відходи металу у вигляді елементів ливникової системи, випорів тощо не окислюються, тобто є зворотними, і їх можна повторно використовувати при наступних плавках. Це істотно знижує витрату дорогого металу. Таким чином, собівартість виготовлення лопатки турбіни методом литва в оболонкові форми знижується на 50-60%. Заготовки лопаток турбіни, отримані методами гарячого об'ємного деформування, за інших рівних умов є менш ефективними в порівнянні з литими заготовками. Пов'язано це, в першу чергу, з тим, що метал у вигляді облою, який видаляється після штампування, є беззворотним і здається за ціною металобрухту.

Серед заготовок лопаток, отриманих литвом, розрізняють за структурою матеріалу: звичайні з полікристалічною або рівноосною структурою, заготовки зі спрямованою кристалізацією (НК) і монокристалічні (рис. 3.10).

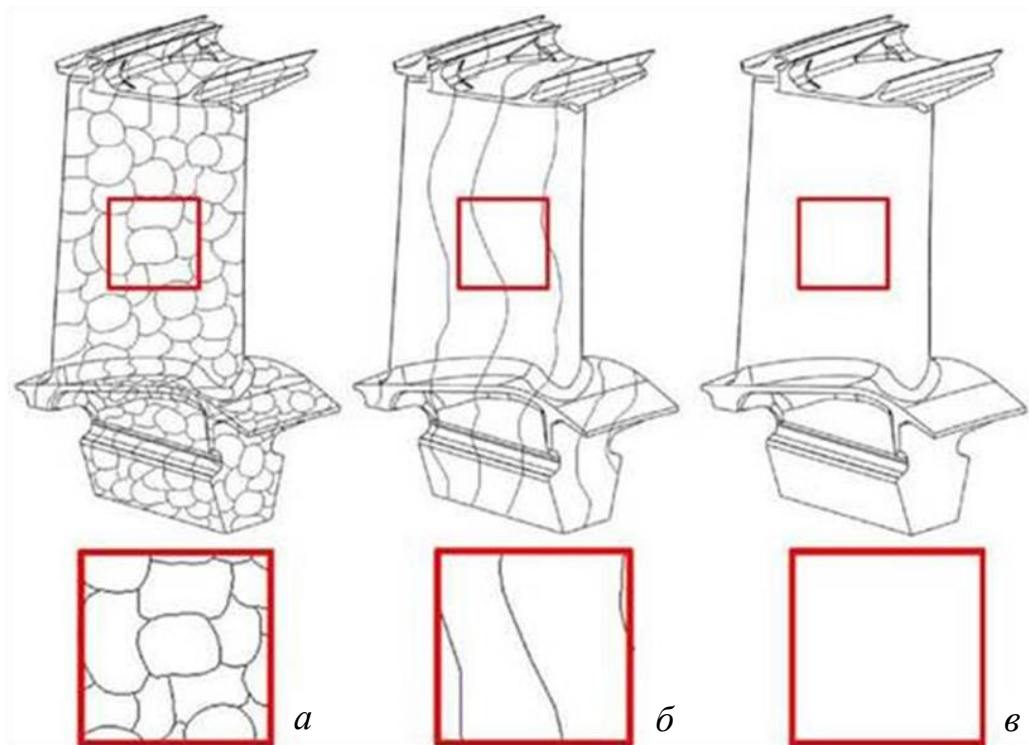


Рисунок 3.10 – Морфології лопаток турбіни ГТД: *а* – рівноосна структура; *б* – структура, отримана литвом з НК; *в* – монокристалічна структура

На рис. 3.10, *а* представлена структура нікелевого сплаву після проведення процедури травлення лопатки. Можна помітити чіткий поділ структури на області певної форми – рівноосні зерна. В процесі експлуатації лопаток газотурбінного двигуна основні навантаження спрямовані уздовж пера лопатки, тому міцнішою є структура лопатки, в якій всі межі зерен вишикувані уздовж її осі (рис. 3.10, *б*). Найбільш міцними є лопатки, в структурі яких повністю відсутні

границі зерен (рис. 3.10, в). Подібний монокристал отримують з використанням спеціальних технологічних рішень: кристаловідбірника або затравки.

Використання методу монокристалічного литва в технології виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД повністю виключає з виливків турбінних лопаток поперечні границі зерен, тим самим підвищуючи механічні характеристики жароміцних сплавів. Монокристалічна структура зерен вилівка формується в процесі проходження оболонкової форми з розплавленим металом фронту кристалізації, який строго контролюється шляхом створення поздовжнього і поперечного градієнта температур. Наявність же областей з поперечними границями зерен вкрай небажано через те, що ці області є концентраторами напружень.

Лопатки, виготовлені за технологією монокристалічного литва, характеризуються більш високою тривалою міцністю в процесі експлуатації двигуна, а ресурс роботи лопаток в 2-3 рази вище в порівнянні з лопатками з полікристалічною рівноважною структурою.

Технологічні можливості заготівельного виробництва не завжди забезпечують високий рівень виходу придатних заготовок лопаток турбіни в силу появи великої кількості ливарних дефектів різного походження. Причиною цього може бути вплив різних технологічних параметрів на технологічний процес. Наприклад, при литті заготовок неруйнівні методи контролю виявляють неспай, рихлоти, тріщини, порушення структури тощо.

Якість заготовок робочих лопаток турбіни характеризується точністю розмірів, заданою кресленням шорсткістю поверхні, структурою, механічними і фізичними властивостями металу, а також відсутністю в виливках лопаток внутрішніх і зовнішніх дефектів (раковин, засмічень, тріщин).

Безсумнівно, технологія отримання заготовок істотно впливає на їх якість і, як наслідок, визначає принципи і методики, якими слід керуватися при їх проектуванні і конструюванні. Зокрема, при виготовленні робочих лопаток турбіни ГТД із спрямованою кристалізацією завдяки розробленим методам і методикам вдалося: на 93-95% ліквідувати брак через ливарні дефекти у вигляді «неспаїв» і на 68% – брак через засмічення і геометрію; зменшити трудомісткість подальшої обробки лопаток на 32%; підняти продуктивність і зменшити енергоємність процесу в 2 рази; збільшити міжремонтний термін роботи обладнання в 2-3 рази; отримати значну економію жароміцного сплаву і графітової оснащення.

Наразі застосовується алгоритм автоматизованого знаходження оптимального, тобто найкращого, просторового розподілу припуску в заготовках робочих лопаток турбіни не для всієї партії заготовок лопаток, а саме для партії, яку відбраковують з первинною ознакою наявності негативного припуску і тому відправляють в переплав. За допомогою цього алгоритму знаходження роз-

поділу припуску в таких заготовках є набагато швидшим і не залежить від суб'єктивних помилок оператора. В основу автоматизованого визначення розподілу припуску покладено метод автоматичного пошуку.

Традиційний процес пошуку складається з поєднання пробних рухів, аналізу результатів проб, визначення подальшого руху, зміни його напрямку (при необхідності), робочого руху, нових проб і т.д. Заготовка лопатки турбіни переміщується в загальному випадку за всіма шістьма ступенями вільності, при цьому проводиться визначення рівномірності розподілу припуску шляхом вимірювання припуску в окремих реперних точках на поверхні заготовки.

Щоб оцінити рівномірність розподілу припуску, необхідно мати критерій цієї рівномірності розподілу, іншими словами – критерій оптимальності.

На рис. 3.11 суцільною потовщеною лінією позначений контур заготовки лопатки, а всередині нього суцільною тонкою лінією позначений контур деталі лопатки після механічної обробки. Спостереження проводиться в системі координат, нерухомій відносно контуру деталі лопатки. Контур заготовки лопатки має 6 ступенів вільності: переміщення за осями x , y , z і поворот (обертання) на кути α , β , γ відносно відповідних осей. Завдання полягає в тому, щоб шляхом переміщення за цими ступенями вільності досягти найбільш вигідного взаємного розташування контурів заготовки та деталі лопатки.

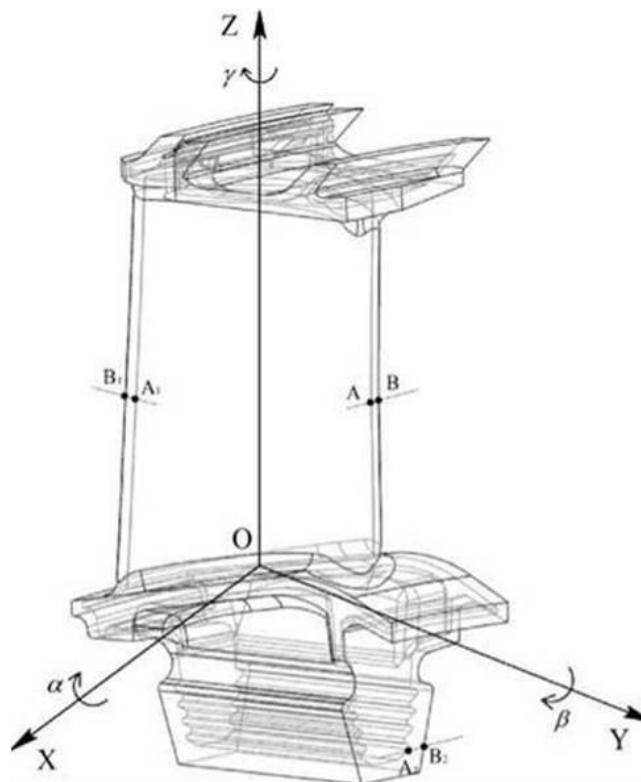


Рисунок 3.11 – Розподіл припуску заготовки робочої лопатки турбіни:

———— контур заготовки лопатки; ————— контур деталі лопатки

Що буде вважатися найбільш вигідним (оптимальним) розташуванням? Припустимо, що форма заготовки лопатки забезпечує отримання готової деталі зняттям рівномірного шару матеріалу з контуру заготовки лопатки. Такий контур називають ізоформним контуру готової деталі лопатки. Тому можна розташувати контур заготовки лопатки відносно контуру деталі таким чином, що відрізки нормалей AB , A_1B_1 та A_2B_2 , побудованих з будь-яких трьох точок контуру готової деталі лопатки, будуть рівні, тобто за математичної постановки завдання необхідно домогтися дотримання тотожності: $AB = A_1B_1 = A_2B_2$. Саме таке розташування і слід вважати найбільш вигідним (оптимальним). Дане твердження справедливе лише в ідеальному випадку. Однак в реальних виробничих умовах контур заготовки лопатки не є ізоформним контуру деталі, і мова може йти тільки лише про максимальне наближення контуру заготовки до контуру, ізоформному контуру готової деталі лопатки. У такому випадку відрізки нормалей AB , A_1B_1 та A_2B_2 не є рівними один одному, але стоїть завдання зробити їх по можливості максимально рівними.

Для вирішення поставленого завдання за розглянутої постановки було висунуто три види критерію оптимальності (K).

Першим критерієм оптимальності (K_1) є максимальне з відстаней, взятих по нормалі до контуру деталі лопатки δ_i , тобто:

$$K_1 = \max_i \delta_i = \max_i \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma); \quad (i = 1, \dots, n).$$

Вимірювання проводиться в n точках контуру. Завдання оптимальної установки контуру заготовки лопатки щодо контуру деталі лопатки полягатиме в такому виборі значень змінних $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$, при яких забезпечується мінімум величини K_1 :

$$\min_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} K_1 = \min_i \{ \max \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \}; \quad (i = 1, \dots, n).$$

В якості другого критерію оптимальності (K_2) може бути прийнято мінімальне з відхилень δ_i , тобто:

$$K_2 = \min_{(i)} \delta_i = \min_{(i)} \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma).$$

Завдання управління полягає в тому, щоб зміною змінних $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ забезпечити максимальне значення критерію K_2 :

$$\max_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} K_2 = \max_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} \{ \min \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \}; \quad (i = 1, \dots, n).$$

З практичної точки зору, критерій K_2 часто є найбільш вдалим, так як при установці заготовки лопатки за цим критерієм заготовка віддаляється від небезпечних положень, в яких припуск може виявитися негативним.

Третім критерієм оптимальності (K_3) може служити різниця між максимальним і мінімальним з відхилень $K_3 = K_1 - K_2$, тобто:

$$K_3 = K_1 - K_2 = \max_i \delta_i - \min_j \delta_j = \max_i \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) - \min_j \delta_j(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma);$$

$$(i = 1, \dots, n); (j = 1, \dots, n).$$

Завдання оптимального розподілу припуску зводиться до мінімізації цього критерію:

$$\min_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} K_3 = \min_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} \left\{ \max_i \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) - \min_j \delta_j(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \right\};$$

$$(i = 1, \dots, n); (j = 1, \dots, n).$$

Слід зазначити, що для пошуку оптимального просторового розподілу припуску в заготовках робочих лопаток турбіни краще вибирати критерій K_2 , зважаючи на його найбільшу пристосованість до деталей складної форми. Однак критерії оптимальності K_1 і K_3 також мають право на існування.

Методика пошуку оптимального просторового розподілу припуску в заготовках робочих лопаток турбіни при використанні шаблонного приладу полягає в наступному: заготовку лопатки розміщують на спеціальні технологічні бази пристрою. Пристрій в загальному випадку повинен мати шість ступенів вільності (поступальне переміщення уздовж кожної з трьох осей і обертання навколо кожної з трьох осей). Поступальні і обертальні рухи забезпечуються переміщенням технологічних баз, тобто бази розневолюються за допомогою послаблення фіксувальних гвинтів і отримують ступінь вільності. Таким чином, заготовка лопатки може бути переміщена в просторі по кожній з цих шести ступенів вільності. Ступені вільності позначимо змінними $x_1, x_2, \dots, x_6$.

Для 5% умовно бракованих заготовок робочих лопаток необхідно провести пробний ультразвуковий контроль пера заготовки лопатки турбіни у відповідних перетинах з метою підбору оптимального положення профілю пера і оцінки товщини стінок. Весь масив даних з відповідними допусками на значення товщини спинки і корита заноситься в спеціально розроблений програмний засіб «АРМ полірувальника» (рис. 3.12). Програмний засіб, ґрунтуючись на введених даних, визначає за розробленим алгоритмом оптимальний просторовий розподіл припуску по перу лопатки і видає рекомендації у вигляді доопрацювання технологічних баз лопатки.

Таким чином, роботи з визначення оптимального просторового розподілу припуску в заготовках умовно-бракованих лопаток (5% із загальної партії) можуть бути здійснені двома варіантами.

1-й варіант. Необхідно встановити заготовку еталонної робочої лопатки турбіни в шаблонний прилад, який має рухливі ступені вільності. Переміщенням і поворотом лопатки домогтися чіткої відповідності шаблонних ложементів у відповідних перетинах профілю спинки і корита лопатки. Фіксувальними гвинтами за часовими індикаторами жорстко закріпити технологічні бази. По-

тім необхідно умовно-браковану заготовку лопатки розташувати на підготовлені технологічні бази. Шляхом механічної додаткової обробки (підгонки) плоских баз заготовки лопатки і пробними проходками полірувальним кругом по профілю пера домогтися чіткої відповідності шаблонного ложементу і профілю спинки і корита лопатки у відповідних перетинах. У цьому варіанті припуск по перу лопатки розподіляється за рахунок незначної механічної додаткової обробки технологічних баз на заготовці пера лопатки.

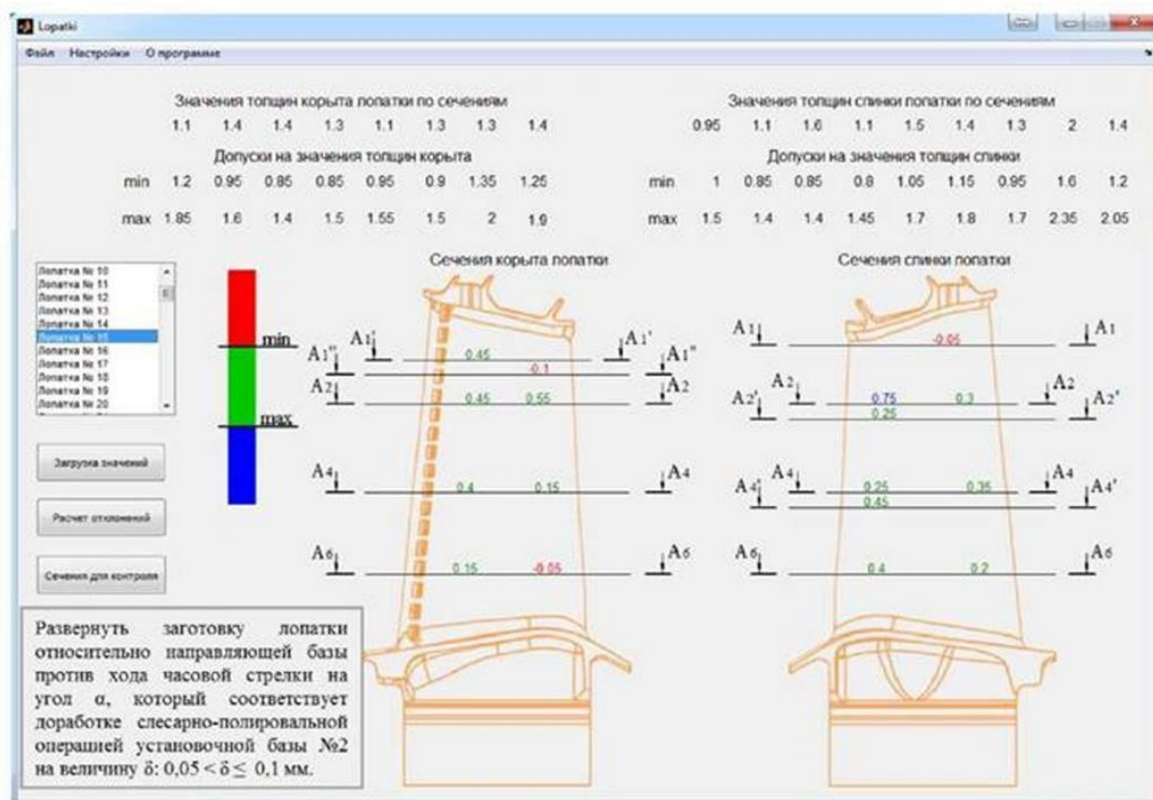


Рисунок 3.12 – Програмний інтерфейс для оптимального просторового розподілу припуску в заготовках лопаток турбіни

2-й варіант. Використати рекомендації, які формуються розробленим програмним засобом «АРМ полірувальника». Для цього необхідно провести ультразвуковий контроль товщини стінок спинки і корита в умовно-бракованих лопатках. Отримані значення товщини стінок ввести в інтерфейс програми «АРМ полірувальника», яка, ґрунтуючись на розроблених алгоритмах, видасть рекомендації з доопрацювання механічним шляхом відповідних технологічних баз.

Використання 2-го варіанту дозволяє об'єктивно і в автоматизованому режимі отримати рекомендації по оптимальному розподілу припуску на заготовці робочої лопатки для полірування профілю. Єдиним недоліком є введення додаткової операції ультразвукового контролю профілю пера тільки для 5% умовно-бракованих лопаток. Важливо відзначити, що дану програму необхідно

використовувати в технології тільки в той момент, коли стандартними методами не вдається домогтися рівномірності припуску.

Розроблений алгоритм і програмний засіб пройшли експериментальну апробацію на прикладі технологічного процесу виготовлення виливків робочих лопаток турбіни ГТД 1-го ступеня. Результати роботи показали, що вдалося знизити трудомісткість операцій контролю профілю пера робочих лопаток турбіни і на 5% знизити рівень браку в заготовках лопаток через невідповідність геометрії лопатки.

Питання для самоконтролю:

1. Спосіб виготовлення заготовок лопаток турбін – виходячи з яких причин застосовують саме цей спосіб? Які способи виготовлення заготовок лопаток турбін є перспективними?
2. Технологічні рішення виготовлення виливків лопаток з монокристалічною структурою?
3. Порівняльний аналіз систем комп'ютерного моделювання ливарних процесів.
4. Який алгоритм застосовують для автоматизованого знаходження оптимального просторового розподілу припуску в заготовках робочих лопаток турбіни?

3.3. Варіанти технологій і способи шліфування лопаток турбіни

Виходячи з аналізу номенклатури лопаточного виробництва, для розробки оптимальних варіантів технологій і способів обробки та контролю лопаток Мубаракшиним (РФ, 2018) запропоновано класифікатор основних типових поверхонь лопаток. Характеристики деяких типових поверхонь, які обробляються шліфуванням, наведені в табл. 3.2.

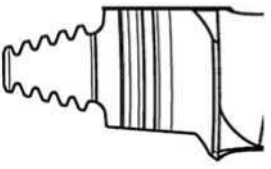
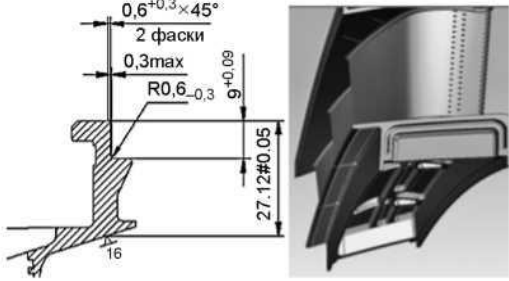
Розглянемо можливі варіанти технологій з різним ступенем концентрації операцій шліфування основних типових поверхонь лопаток (табл. 3.3) в залежності від типу виробництва.

Основними критеріями при виборі варіантів є: забезпечення необхідної якості поверхні, продуктивність і вартість обробки, гнучкість процесу налагодження і переналагодження для випуску нової лопатки, зниження непродуктивних втрат часу.

Варіант технології комплексного шліфування реалізується за мінімальну кількість установів лопатки із застосуванням самоцентрівного швидко-встановлюваного оснащення типу Erowa з механічним закріпленням заготовки. Здійснюється шліфування максимальної кількості поверхонь за 3-4 установи лопатки на 5-ти осьовому багатоопераційному обробному центрі (ОЦ) (рис. 3.13) з поворотно-обертним столом та магазином шліфувальних кругів і фрез, автоматичною зміною інструмента. Прорізання кільцевих пазів і канавок, особливо поверхонь сполучень з малим радіусом, може бути виконано лезвійною обробкою за допомогою кінцевих і дискових фрез. Цей варіант забезпечує найбільшу універсальність технологічного процесу й високу ступінь гнучкості

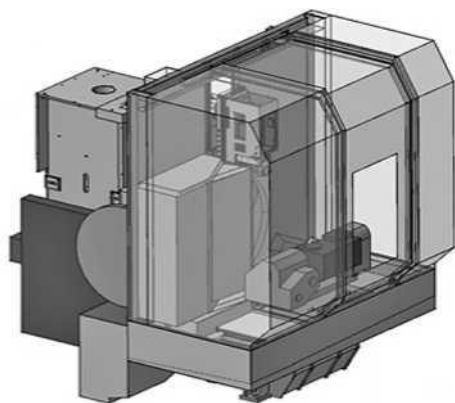
устаткування. Застосування варіанту є доцільним в умовах малосерійного й дослідного виробництва.

Таблиця 3.2 – Характеристики типових поверхонь, які обробляються шліфуванням

Типова поверхня	Вимоги до точності, якості
Робоча лопатка: "Ялинковий" хвостовик: 	– точність взаємного розташування профілів – 0,01 мм – точність кроку профілю – 0,002 мм – шорсткість Ra 1,6 – відсутність припалів, розтягувальних напружень – ресурс $2 \cdot 10^7$ циклів навантаження 14 кг
Соплова лопатка: Діаметральні й торцеві поверхні 	– шорсткість Ra 1,6-3,2 – допуски на розміри 0,2-0,6 мм – радіуси сполучень 0,2-0,8 мм
Кільцеві пази канавки* 	– шорсткість Ra 3,2 – допуски на розміри 0,048-0,6 мм – радіуси сполучень 0,2-0,8 мм

Таблиця 3.3 – Технології шліфування лопаток в залежності від типу виробництва

Тип виробництва	Варіант технології шліфування
Малосерійне виробництво	1. Комплексна обробка основних типових поверхонь лопаток на: а) одному 5-осьовому шліфувальному центрі з магазином шліфувальних кругів за 3-4 установка; б) двох 5-осьових шліфувальних центрів центрах з набором шліфувальних кругів на оправці.
Серійне виробництво	2. Диференційна обробка основних типових поверхонь лопаток на декількох спеціалізованих 3-4-осьових верстатах за кілька установів.
Великосерійне виробництво	3. Обробка основних типових поверхонь лопаток а) в зборі в барабані на карусельно-шліфувальному центрі за 2 установи; б) в ГПС з автоматизованим змінюванням всіх компонентів технологічної системи.



a



б

Рисунок 3.13 – 5-ти осьовий багатоопераційний ОЦ з поворотно-оберттовим столом з магазином інструментів для комплексної обробки лопаток:

a – компоновка верстата, *б* – зона шліфування

Цей варіант забезпечує найбільшу універсальність технологічного процесу й високу ступінь гнучкості обладнання. Застосування варіанту є доцільним в умовах малосерійного і дослідного виробництва.

Варіант комплексної обробки лопатки може бути також реалізований на двох 5-ти осьових багатоопераційних ОЦ з поворотно-оберттовим столом без магазину інструментів але з набором профільних кругів, які встановлюються по ширині оправки, для шліфування типових поверхонь. Недоліком цього варіанту є велика витрата кругів за безперервної (Continuous Dressing – CD) правки, яка може бути зменшена за рахунок застосування двох різних наборів правлячих алмазних роликів, встановлених на незалежних механізмах правки. Цей варіант можливий для застосування в серійному виробництві, але вимагає більшої кількості установів лопатки, ніж за обробки на багатоопераційному ОЦ з магазином шліфувальних кругів і фрез.

Варіант диференційованої обробки здійснюється за кілька установів лопатки на спеціалізованих 3-4-х осьових верстатах із застосуванням самоцентрівного швидкозаставлюваного оснащення типу Erowa з механічним закріпленням заготовки в пристрої на точки пера лопатки й базові опорні точки (альтернативна технологія – заливка пера лопатки в кубик з легкоплавкого металу). Устаткування характеризується спеціальною компоновкою верстатів, наприклад, 2-хшпindelною. Цей варіант більшою мірою застосовується у серійному виробництві. Процес диференційованої обробки поверхонь лопаток може бути організований в поточній або (для випадку з більшою серійністю виробництва) в автоматизованій лінії з прямоточним розташуванням обладнання у вигляді "підкови", з вбудованими в лінію засобами проміжного і остаточного контролю лопаток. Схема лінії за технологічними переходами наведена на рис. 3.14.

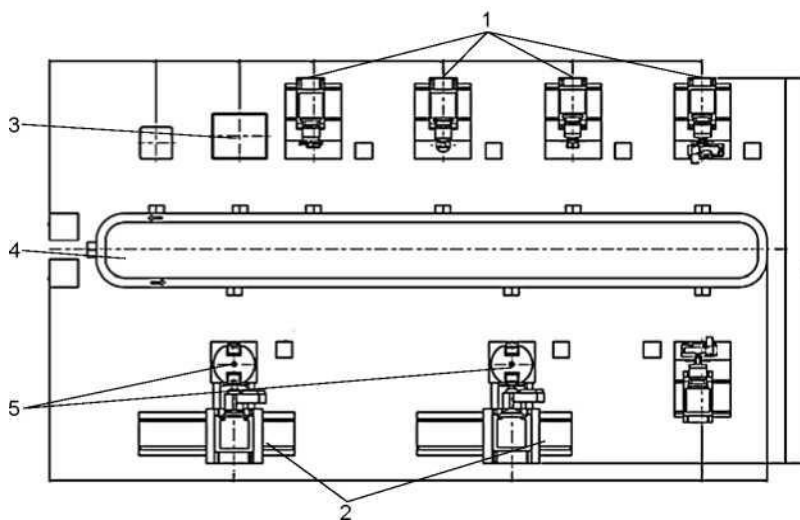


Рисунок 3.14 – Схема прямої лінії для диференційованої обробки типових поверхонь лопаток: 1 – одношпиндельні шліфувальні центри; 2 – двошпиндельні шліфувальні центри; 3 – координатно-вимірвальна машина; 4 – транспортна система; 5 – модуль обробки/завантаження

Шліфування типових поверхонь робочих лопаток здійснюється на спеціалізованих 3-4-х осьових верстатах з CNC- управлінням (ЧПК) з подальшою обробкою "ялинкового" хвостовика на верстатах з 2-хшпиндельною компоновкою із завантажувальним поворотним столом. З метою зменшення довжини потоку і відповідно економії займаної площі доцільно проводити обробку максимальної кількості поверхонь за 1 установ.

Варіант обробки основних типових поверхонь лопаток в зборі або на ГВО. У крупносерійному виробництві (3-й варіант табл. 3.3) шліфування діаметральних поверхонь лопаток здійснюється на багатьох лопаткових виробництвах в зборі в барабані на модернізованих токарно-лобових верстатах бакелітовими кругами без застосування МОР.

Традиційна технологія представляє собою поелементне шліфування на модернізованих токарно-лобових верстатах (рис. 3.15) або карусельних токарних верстатах, при оснащенні їх шліфувальними головками, розміщеними на супорті верстатів, або на спеціальних шліфувальних верстатах. На операції обробки циліндричних поверхонь лопаток (рис. 3.16) останні складають у пристрій у вигляді імітаційного диска (рис. 3.17), тобто спеціального оснащення, що імітує положення лопаток у роботі і відповідає диску того ж ступеня турбіни, що й оброблювані лопатки. На операції обробки канавок лопатки встановлюють у імітаційний диск протилежним торцем й базують по замку, тобто профілю "ялинки" (рис. 3.18).

Токарно-лобовий верстат мод. МК163М (рис. 3.15) призначений для виконання різноманітних токарних робіт при обробці деталей типу фланців, дисків тощо. Достатні діапазони чисел обертів шпинделя, величин подач і потужності головного приводу дозволяють ефективно використовувати верстат для обробки виробів з різних матеріалів. З використанням імітаційного диска шліфується одночасно весь комплект лопаток (рис. 3.17).



Рисунок 3.15 – традиційне шліфування
на токарно-лобовому верстаті мод.
МК163М

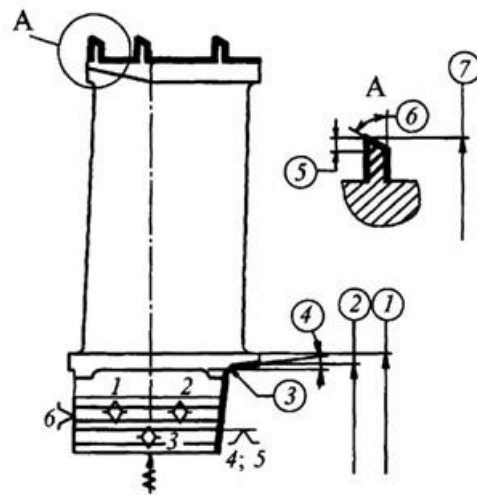


Рисунок 3.16 – схема обробки
циліндричних поверхонь лопатки



Рисунок 3.17 – роторний пристрій для
установки лопаток

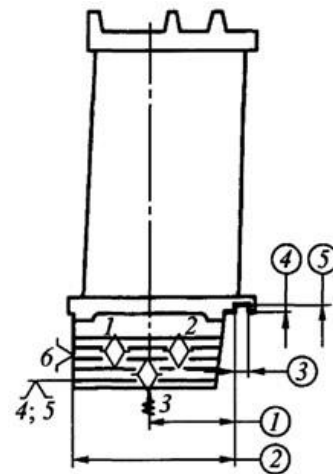


Рисунок 3.18 – схема обробки канавки
лопатки під фіксатор

Формоутворення профільних поверхонь лопаток турбін здійснюється кругами на бакелітовій і вулканітовій зв'язках без застосування ЗМОТС. При цьому деталі можуть оброблятися як окремо, так і у комплекті. Схема обробки деталей у комплекті шляхом їхнього набору в технологічні колеса має ряд недоліків. Вони полягають у тому, що кількість пристроїв має відповідати кількості найменувань деталей, що входять у двигун. При цьому установчі елементи кожного пристрою відрізняються від елементів сусіднього в межах допуску на виготовлення. Відповідно, набрані в колесо лопатки на момент обробки вже мають похибку установки. При цьому сформована при виготовленні циліндрична поверхня вже ніколи не повториться під час складання диску турбіни.

Таким чином, недоліки традиційної технології поелементного шліфування лопаток на модернізованих токарно-лобових верстатах або карусельних токарських верстатах полягають у тому, що:

- необхідна висока кваліфікація робітника;
- потрібне виготовлення великогабаритного технологічного оснащення на кожен тип лопатки;
- точність обробки є низькою;
- трудомістке переналагодження на інший тип лопатки;
- брудні умови праці.

Прогресивним процесом з використанням даної схеми є обробка в зборі в барабані на сучасному обладнанні типу карусельно-шліфувальний обробний центр. Проводиться обробка комплекту лопаток в зборі в барабані за 2 установи із застосуванням методів абразивної й лезвійної обробки. Застосування методів лезвійної обробки дозволяє здійснювати обробку складних поверхонь типу вузьких кільцевих пазів. Метод забезпечує високу продуктивність, але має невисоку гнучкість процесу через складність установки лопаток й низьку ремонтпридатність комплекту лопаток. Істотним недоліком є похибка базування лопатки, яка в кожній позиції барабана різна і в кінцевому підсумку створює загальну похибку установки лопаток в сопловому апараті.

Альтернативним варіантом в умовах великосерійного виробництва, особливо при значній номенклатурі деталей, є обробка лопаток в гнучкій виробничій системі/осередку (ГВС/ГВО) з роботизованим завантаженням/вивантаженням всіх компонентів технологічної системи – лопаток, шліфувальних кругів, алмазних правлячих роликів – й автоматизованою зміною установчих елементів оснащення.

Системи 3-го рівня автоматизації застосовувалися на провідних фірмах при обробці лопаток в 90 рр. минулого століття, але були реалізовані на жорсткій складнопереналагоджуваній елементній базі. Переналагодження системи на випуск нової лопатки здійснювалося шляхом зупинки виробництва на тривалий термін для зміни верстатного, вимірювального обладнання та пристроїв.

Сучасний ГВО на швидкопереналагоджуваній елементній базі, включаючи засоби контролю, роботизоване завантаження лопаток, зміну оснащення, шліфувальних кругів тощо, дозволяє здійснювати оперативне переналагодження системи на випуск нової лопатки протягом декількох хвилин. З метою виключення помилок базування, пов'язаних з похибкою форми заготовок лопаток, система оснащена вбудованим контролем положення базових поверхонь для автоматизованого налагодження і підналагодження процесу. Багаторівнева система CNC- управління забезпечує функціонування компонентів системи процесу обробки і контролю лопаток. Результати розрахунків показали, що варіант двошпиндельного ГВО в разі великої програми випуску турбінних лопаток (більше 250 000-300 000 штук робочих лопаток на рік) буде ефективнішим, ніж варіант автоматизованої лінії з обробкою на кількох спеціалізованих 3-4-осевих

верстатах. Основними критеріями для розрахунків були прийняті продуктивність, ступінь гнучкості системи, непродуктивні втрати часу, площа для розміщення, загальна вартість системи, включаючи обслуговування.

У всіх розглянутих варіантах важливим є визначення необхідних і достатніх параметрів і вимог, що висувуються до шліфувального центру для високопродуктивного та якісного шліфування. Основні технологічні параметри і властивості, які необхідно розглядати при виборі шліфувального центру для високопродуктивного та якісного шліфування турбінних лопаток, наведені нижче:

- ✓ зона шліфування і кількість шпинделів, швидкість обертання і потужність шпинделя, розмір шліфувального круга, діаметр і типи планшайб для установки на шпиндель, автоматичне балансування шліфувального круга;

- ✓ число керованих системою ЧПК/CNC координат, типи вимірювальних систем: абсолютні лінійні датчики (РС 0,00001 мм) переміщень, координатні датчики положення поверхонь;

- ✓ рівень автоматизації основних процесів. Модуль обробка/завантаження, модуль автоматичної зміни шліфувальних кругів, правлячих роликів. Системи активного і пасивного адаптивного контролю параметрів процесу шліфування і налагодження;

- ✓ пристрій для профільної правки круга: безперервна правка CD, циклічна правка (ID) алмазним диском (контурна правка) або роликом (профільна правка) від столу. Опція важлива для малосерійного виробництва;

- ✓ пристрій переміщення сопел МОР з автоматичною компенсацією зношування шліфувального круга. Обладнання для збирання, фільтрування та подачі МОР під тиском в зону різання і гідродинамічної очистки шліфувального круга;

- ✓ ділильні головки для 4-х сторонньої обробки. Модулі позиціонування і кріплення деталі. Затискні пристрої визначають в значній мірі успішність реалізації проекту. Неправильна, маложорстка конструкція затискних пристроїв може призвести до подовження терміну впровадження дорогого оснащення і навіть неможливості досягнення поставлених цілей.

Способи шліфування лопаток.

Ефективність обробки лопаток залежить також від способу шліфування, який застосовують для зняття великих припусків з важкооброблюваних матеріалів. Нижче розглянуті найбільш прийнятні основні способи шліфування.

Спосіб профільного глибинного шліфування є одним із шляхів підвищення продуктивності механічної обробки і у більшості випадків є більш ефективним, ніж оброблення лезовим інструментом, особливо при виготовленні деталей із жароміцних і титанових сплавів, корозійностійких, високолегованих і інструментальних сталей, які призначені для роботи в умовах підвищених термодинамічних навантажень і агресивних середовищ.

Спосіб профільного глибинного шліфування з безперервною правкою високопористого абразивного круга на керамічній зв'язці алмазним роликом CD розглядається як основний через ефективність його використання при шліфуванні лопаток з важкооброблюваних сталей і сплавів. Продуктивність способу шліфування характеризується коефіцієнтом Q/z мм³/с. – величиною питомого зрізування матеріалу. Для технології шліфування з безперервною правкою електрокорундовим кругом це значення знаходиться в залежності від матеріалу лопатки в межах від 20 до 50 мм³ на 1 мм ширини шліфувального круга, зрізаних за 1 секунду роботи. Для охолодження деталі і гідродинамічної очистки круга МОР подається в зону під тиском 18-20 бар за допомогою профільних програмно-керованих сопел.

Для глибинного шліфування турбінних лопаток застосовують високопористі круги із зовнішнім діаметром 400–600 мм прямого або спеціального профілю висотою до 200 мм, виготовлені з електрокорунду на керамічній зв'язці. Лідируючі позиції у світі по виробництву високопористих кругів зі структурами до $N = 16-22$ для профільного глибинного шліфування турбінних лопаток займає австрійська фірма Tyrolit (Австрія). Унікальні високопористі круги з висотою до 200 мм з номером структури 16 для глибинного шліфування хвостовиків лопаток випускає фірма Carborundum (США).

При певних умовах і вимогах до операції шліфування знаходять застосування одношарові кубонітові (CBN) круги на металевій зв'язці. В першу чергу вони ефективні у випадку шліфування зовнішніх і внутрішніх перехідних зон з малими радіусами $R < 1$ мм й високими вимогами до точності й шорсткості поверхні, тому що застосовується дрібне зерно розміром 60-80 мкм і дрібніше. Вартість такого круга на порядок перевищує вартість абразивного круга, наприклад, вартість одношарового круга з "ялинковим" профілем може досягати \$3500. Одного комплекту одношарових кругів вистачає для шліфування 300-500 робочих лопаток в залежності від матеріалу й геометрії поверхонь, що в свою чергу суттєво перевищує цей показник у разі застосування високопористих абразивних кругів. Застосування даної технології не вимагає використання дорогих правлячих алмазних роликів для правки, зменшує оперативні запаси інструмента, але вимагає чіткої організації процесу відновлення, регенерації робочої поверхні кругів. Застосовуються також багатошарові CBN- круги на керамічній зв'язці, з можливістю періодичної правки профілю алмазним роликом для мікроруйнування і видалення зерен, які затупилися. CBN- круги мають меншу зернистість і забезпечують відповідно меншу, порядку 15 мм³/мм в секунду величину продуктивності, ніж при глибинному шліфуванні корундовим кругом з CD- правкою. Перевагою CBN- кругів є більш висока розмірна стійкість й стійкість у часі.

Іншим способом шліфування лопаток є **VIPER** (Very Impressive Performance Extreme Removal – дослівно "екстремальне зняття припуску з велими вражаючими показниками") шліфування. **VIPER**- шліфування характеризується застосуванням профільних шліфувальних кругів малого діаметру на оброблюваних центрах з ЧПК для прецизійної обробки профілю турбінних лопаток з нікелевого сплаву.

Ідея запропонована інженером Rolls-Royce і полягає в інтегруванні процесу точного шліфування зі звичайними операціями фрезерування й свердління на ОЦ зі зміною інструмента. Найбільш вагомими перевагами **VIPER**- шліфування – скорочення витрат на обслуговування процесу й система охолодження деталі, в якій МОР подається з високою витратою й тиском від 40 бар з одночасною тонкою фільтрацією для видалення часток розміром більше за 10 мкм для уникнення розмивання робочої поверхні круга й втрати ефективності верстату. Для гідродинамічного очищення круга МОР подається через програмно-керовані змінні сопла під тиском 70 бар, що забезпечує ефект очищення пористої поверхні зв'язки й зерен, виключає ефект "засалювання" поверхні круга й підтримує ріжучу здатність інструмента. Тут використовуються абразивні круги на керамічній зв'язці з періодичною правкою алмазним роликом. Перевагами застосування кругів малого діаметру (до 350 мм) є:

- а) більш проста заміна кругів в автоматичному циклі з магазину;
- б) можливості застосування кубонітових (CBN) кругів;
- в) менш жорсткі вимоги до шпинделя;
- г) менші габарити верстата й зайнята їм площа;
- д) спрощене балансування, яке в деяких випадках навіть не є потрібним.

Безперервна правка алмазним роликом використана на верстатах типу G9 фірми Makino (Англія). Для шліфування складних поверхонь з малими радіусами профілю застосовуються одношарові CBN- круги з подальшою їх регенерацією й кубонітові CBN- круги на керамічній зв'язці, з можливістю ID- правки. Продуктивність методу складає в залежності від методу правки до 70 мм³ на 1 мм ширини шліфувального круга, зрізаних за 1 секунду роботи, але при тривалому профільному шліфуванні величина питомого зрізування Q різко знижується навіть за безперервної правки.

Таке шліфування є набагато продуктивнішим за шліфування алмазними чи кубонітовими кругами й більш гнучким, ніж глибинне шліфування (creep feed grinding). Але на більш високі показники продуктивності способу **VIPER** притаманні суттєві недоліки, до яких відносяться:

а) відсутність пристрою безперервної правки обмежує застосування обладнання в силу зношування профілю круга й втрати його різальної здатності. На великих лопатках з довжиною шліфування поверхні понад 100 мм ця техноло-

гія не забезпечує необхідну точність, якість і продуктивність обробки;

б) швидке зношування високонапірних насосів й ненадійність конструкції форсунок подачі МОР призводить до тривалих простоїв обладнання й дорогого ремонту;

в) незначне падіння тиску в системі подачі МОР і точність подачі МОР в зону різання істотно впливають на продуктивність, ефективність охолодження і якість поверхні;

г) періодичне засмічення пір шліфувальних кругів стружкою під дією високого тиску МОР;

д) застосування високопористих кругів дуже високою мірою ускладнює отримання шорсткості поверхні нижче $Ra\ 2,5$.

Необхідно відзначити також, що єдиним виробником кругів для технології **VIPER** є фірма Tirolit (Австрія). В силу вищезазначених причин спосіб в даний час знайшов обмежене застосування.

Далі розглянуті особливості глибинного шліфування важкооброблюваних матеріалів. Процес глибинного шліфування характеризується високою швидкістю видалення металу за рахунок зняття більших припусків, але при малих поздовжніх подачах деталі. На відміну від обдирного шліфування процес глибинного шліфування визначають точність оброблення, питома продуктивність і якість поверхневого шару. Перевагою способу є можливість сформувати складний фасонний профіль замка виключно за кілька проходів шліфувального круга (рис. 3.19). Для практичної реалізації способу глибинного шліфування створені спеціальні профіleshліфувальні верстати з великою потужністю приводу головного руху (виробники Blohm, Elb-Schliff, Mögerle та інші).



Рисунок 3.19 – профільне глибинне шліфування фасонних поверхонь турбінних лопаток

Головне співвідношення, яке реалізується при глибинному шліфуванні, – за умови рівної продуктивності, тобто однакового питомого видалення металу в одиницю часу, глибина різання при глибинному шліфуванні на один-два порядки вище, ніж при традиційному шліфуванні, й, відповідно, величина подачі (швидкість деталі) у стільки ж разів менша. Така кінематика процесу різання

дозволяє до 80 % теплоти, що виділяється при різанні, направити в шари металу, що знімаються. У залишковому підсумку така кінематика забезпечує високу якість поверхневого шару деталі, оскільки при глибинному шліфуванні формується поверхневий шар деталі із залишковими напруженнями стиснення, що неможливо при традиційних способах шліфування.

При глибинному шліфуванні критерій Пекле, що характеризує відносну швидкість видалення металу, більше або дорівнює 1:

$$Pe = v_d h / a \geq 1,$$

де v_d – поздовжня швидкість переміщення деталі, м/с.;

h – глибина шліфування, м;

a – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу, м²/с.

Це є гранична умова призначення режимів знизу, тобто мінімальних. Вона дозволяє забезпечити якість шліфування – виключити появу припалів й інших дефектів, але не враховує позитивну дію МОР.

За інших рівних умов найбільша глибина врізання залежить від кінематичного фактору – відношення швидкостей поверхонь деталі й круга, а також масштабного фактора – відношення глибини h шліфування до діаметра круга:

$$a_{z \max} = c \frac{v_o}{v_k} \sqrt{\frac{h}{D}},$$

де c – коефіцієнт, що визначають експериментально;

v_k – лінійна швидкість обертання круга, м/с.;

D – діаметр абразивного круга, м.

Це гранична умова призначення режимів зверху, тобто максимальних.

Звідси умовою реалізації процесу глибинного шліфування є наявність металорізального обладнання підвищеної жорсткості й високоміцний і одночасно високопористий абразивний інструмент.

При визначенні раціональних режимів шліфування виходять з умови максимальної продуктивності при обмеженні за показниками якості обробленої поверхні: відсутність дефектів у вигляді припалів і мікротріщин, забезпечення необхідної шорсткості, заданого рівня залишкових напружень 1-го роду, глибини й ступеня наклепу. Для рівномірного розподілу температури по дузі контакту абразивного круга з деталлю при збільшених глибинах шліфування на плоскошліфувальних верстатах необхідно встановлювати лінійну швидкість подачі деталі в межах 0,2–2 мм/с., тобто $v_d = (0,2-2) \cdot 10^{-3}$ м/с. Тангенційна складова сили різання P_z при постійних максимальних контактних температурах шліфування зростає несуттєво. Зі збільшенням числа різальних зерен по дузі контакту й зменшенням усередненої товщини стружки різко зростає нормальна складова сили різання P_y . Відношення P_y/P_z при глибинному шліфуванні зростає в 10 разів й більше, що визначає вимоги до характеристик жорсткості верстата й по-

тужності приводу головного руху. Зі збільшенням об'єму металу, що видаляється, зростає ймовірність швидкого заповнення пор абразивного круга. Висока температура шліфування сприяє адгезійному схоплюванню оброблюваного металу із зернами круга, що призводить до втрати різальної здатності круга. Тривалий вплив високих температур шліфування при малих поздовжніх швидкостях деталі визначає вимоги до характеристики абразивного круга, кількості й способам підведення МОР в зону різання й очищенню робочої поверхні круга.

Особливості глибинного шліфування важкооброблюваних матеріалів. Звісно, шліфування жароміцних сплавів відрізняється від шліфування конструкційних сталей. Жароміцні деформовувані сплави мають більш низьку оброблюваність, ніж ливарні, через те що вони є більш в'язкими й спричиняють безперервне налипання металу на абразивні зерна з наступним інтенсивним затупленням зерен. Наявність у жароміцних сплавах зміцнюючої інтерметалідної фази й карбідів, що мають високу мікротвердість ($HV\ 2030\text{--}2060$) призводить до інтенсивного зношування круга й збільшення потужності шліфування. Наприклад, при глибинному шліфуванні сплаву ЖС6К спостерігається налипання часточок матеріалу, що шліфується, на зношені площадки абразивних зерен, що викликає тертя металу по металі, збільшує тепловиділення, знижує різальну здатність круга і якість шліфованих поверхонь. При шліфуванні методом врізання на абразивних зернах спостерігаються поздовжні риси – сліди стирання зерен інтерметалідними й карбідними включеннями.

Для врізного шліфування з малими глибинами (рис. 3.20, *а*) визначальним для призначення режимів різання є таке поєднання h , v_d , v_k , що забезпечує температуру шліфування нижче температур фазово-структурних перетворень, тобто гарантовану відсутність на поверхнях, що шліфуються, припалів, мікро- і макротріщин.

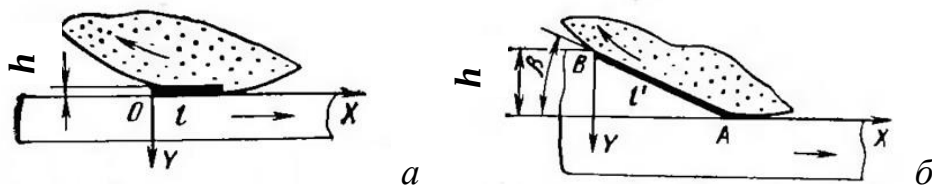


Рисунок 3.20 – Схеми звичайного (*а*) й глибинного (*б*) врізного шліфування:
а – шліфування з великими відносними швидкостями деталі й малою глибиною різання;
б – шліфування з невеликими відносними швидкостями деталі й великою глибиною різання

При глибинному шліфуванні ($h > 0,3$ мм) деталей із сплаву ЖС6К (рис. 3.20, *б*) значення $a_{z\ max}$ не перевищує 5–10 мкм, тобто $(5\text{--}10) \cdot 10^{-6}$ м, що за-

безпечується малими поздовжніми подачами, характерними для процесів глибинного шліфування. Для збереження величини $a_{z \max}$ із збільшенням h в 100 разів необхідно задавати швидкість переміщення деталі в межах $(0,166-16,6) \cdot 10^{-3}$ м/с.

Стійкість круга. Через налипання металу на зерна, особливо поширеного на зношених площадках, стійкість круга зменшується до 10 разів і більше.

При врізному глибинному шліфуванні з подачею МОР звичайним методом поливу в умовах високої теплонапруженості процесу спостерігається об'ємне викидання зерен і ділянок робочої поверхні круга через його засалювання й адгезійні зв'язки зерен з оброблюваним матеріалом. Тому на верстатах для глибинного шліфування, крім подачі МОР у зону шліфування, передбачається очищення пор робочої поверхні круга шляхом подачі МОР через вузьке сопло під тиском 0,7 МПа зі зворотної робочої сторони круга з відносно високою витратою МОР – до 0,0033 м³/с.

Механізми утворення поверхневих дефектів. При шліфуванні деталей зі сплавів, що мають малу теплопровідність й акумулюють теплоту в тонкому поверхневому шарі, росте контактна температура шліфування, підвищується ймовірність появи поверхневих дефектів на деталях. Оброблювана поверхня після нагрівання до високих температур в умовах високих питомих тисків швидко охолоджується за рахунок відводу тепла в МОР і деталь. У поверхневих шарах протікають фазові й мікроструктурні перетворення, дифузійні процеси, причому при тепловому збудженні ці процеси перебувають у невірноваженому стані і відбувається деформація поверхневого шару. При багаторазовому циклічному нагріванні цих сплавів під час звичайного шліфування відбуваються незворотні формоутворення зерен, що призводять до перерозподілу мікронапружень, які за величиною можуть перевищити критичні. Тому відсутність багаторазового циклу нагрівання й охолодження оброблюваної поверхні є одним із переваг глибинного шліфування. Стан структури ливарних жароміцних сплавів ще до механічного оброблення багато в чому визначає ймовірність появи поверхневих дефектів. Неоднорідність структури й розподілу внутрішніх напружень між зернами й групами зерен металу, ливарні дефекти можуть вплинути а утворення мікро- і макротріщин. Таким чином, при глибинному шліфуванні за рахунок зміни кінетики термічного циклу слід створити умови, що виключають перераховані вище явища за рахунок підбору складу й способів подачі МОР, призначення оптимальних характеристик і циклів правки круга й режимів різання.

Вимоги до металорізального обладнання. Специфіка процесу глибинного шліфування висуває особливі вимоги до обладнання. Верстати для глибинного шліфування мають бути вібростійкими, мати підвищену потужність головного приводу, високу статичну й динамічну жорсткість. Особливе значення надаєть-

ся охолодженню опор шпинделя для забезпечення постійної температури при допоміжному (холостому) його обертанні й під навантаженням.

Для робочих переміщень використовують крокові двигуни. Для поздовжньо-профільних верстатів часто використовують електромеханічні урухомники, що забезпечують повільне переміщення стола (від 20 мм/хв. до 10 м/хв.). Верстати для глибинного шліфування оснащують також системами підведення МОР, що включають холодильні установки, сепаратори, гідроциклони, центрифуги тощо.

На верстатах для глибинного шліфування часто передбачають пристрої для компенсації зношування круга, а на верстатах для швидкісного глибинного шліфування – пристрої для балансування кругів під час їх роботи.

Вимоги до абразивного інструмента. Стійкість абразивного інструмента при обробленні деталей із жароміцних сплавів в 15-20 разів нижче, ніж при обробленні деталей з конструкційних сталей. Зниження стійкості абразивного інструмента й оброблюваності важкооброблюваних матеріалів спричинено їх високою міцністю і низькою теплопровідністю.

Підвищення міцності абразивних кругів досягається їхнім армуванням і зміцненням напруженої частини завдяки поліпшенню їхньої характеристики (вибору оптимальної зернистості, пористості, зв'язки й наповнювачів), створенню композиційних кругів або кругів з переривчастою робочою поверхнею й т.і. Використання композиційних кругів і кругів з переривчастою робочою поверхнею є ефективним засобом зниження теплонапруженості шліфування. Композиційні круги поєднують у собі переваги як переривчастих кругів, так і кругів з активним наповнювачем у вигляді твердих зв'язок. Композиційні й переривчасті круги мають підвищену продуктивність і стійкість.

Підвищення продуктивності шліфування і якості поверхневого шару може бути забезпечено також застосуванням високоструктурних кругів, тобто кругів з підвищеною пористістю. Висока пористість кругів досягається застосуванням наповнювачів, що вигоряють або виплавляються при виготовленні круга. Пористий абразивний круг має порожнини, необхідні для розміщення стружки. Пори сприяють додатковому охолодженню, кращій пропитці круга й проникненню МОР у зону різання. Пористі круги мають гарну самозаточуваність й меншу засалюваність. Під час правки пористого круга зменшується щільність зерен і сила різання, що приводиться на одне зерно, забезпечується ефективне використання МОР. При глибинному профільному шліфуванні застосовують високопористі круги на керамічній зв'язці.

МОР і її подача в зону різання. Характерною особливістю глибинного шліфування є висока теплонапруженість процесу, що в значній мірі визначає

його продуктивність. При швидкісному, силовому й глибинному шліфуванні до системи охолодження висувають такі вимоги, як:

- висока мастильна, мюча й проникаюча здатність МОР;
- максимально повний відвід рідиною шламу із зони шліфування;
- високий ступінь очищення МОР;
- її подача в зону оброблення під тиском для подолання повітряного потоку, що виникає навколо круга.

При шліфуванні на підвищених швидкостях і глибинах різання повинні враховуватися способи підведення МОР в зону оброблення. Підвищення динамічності потоку МОР при шліфуванні може бути досягнуто за рахунок збільшення швидкості витікання рідини з сопла. При глибинному шліфуванні витрата МОР повинна становити $0,1\text{--}0,2\text{ дм}^3/\text{с.}$, тобто $(0,1\text{--}0,2)\cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{с.}$, на 1 кВт потужності привода шліфувального круга під тиском $0,3\text{--}0,4\text{ МПа}$. В спеціалізованих верстатах для глибинного шліфування передбачається витрата МОР до $3,3\text{ дм}^3/\text{с.}$, тобто $3,3\cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{с.}$, під тиском $0,3\text{ МПа}$ і більше.

Практика застосування високоструктурних абразивних кругів. Високоструктурні шліфувальні круги – це особливий клас високотехнологічного абразивного інструмента з підвищеною структурністю. Останнім часом найбільшим попитом користується абразивний інструмент із підвищеними номерами структури 12-16 і більше й пористістю до 80% об'єму (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 – Високоструктурні шліфувальні круги різного технологічного призначення

Така високопориста структура забезпечується введенням в абразивну масу різних пороутворювачів – добавок, що спучуються, вигоряють або виплавляються в процесі випалу. Наповнювач або вигоряє, або спучується при високотемпературному випалі, утворюючи великі відкриті пори, або залишається в складі шліфувального круга, беручи участь у формуванні каркаса інструмента разом з абразивними зернами й зв'язкою. Високоструктурні круги застосовують у профільному

глибинному шліфуванні замків турбінних лопаток з нікелевих і титанових сплавів. Обробляється ялинковий профіль замка, торці, основа хвостовика, поверхні бандажних полиць турбінних лопаток з жароміцного сплаву марки ЖС6У-ВИ (рис. 3.22). Оброблення замків турбінних лопаток здійснюється високоструктурними кругами з номером структури 16 типорозміром $500\times 32\times 203$ з

характеристикою 25A F80 G(BM2) 16 V (рис. 3.23) на профіleshліфувальному верстаті мод. MicroCut 4-320-1/2 фірми Elb Schliff в автоматичному режимі за три проходи видалення припуску, рівного по глибині 3,4 мм з максимальною глибиною різання на першому проході 2,85 мм, на другому – 0,5 мм и на третьому – 0,05 мм зі швидкістю круга 28–30 м/с. Швидкість позовжнього переміщення стола вибирається в діапазоні від 150 до 700 мм/хв.



Рисунок 3.22 – Високоструктурний шліфувальний круг 1500×130×203,2 і оброблений хвостовик лопатки

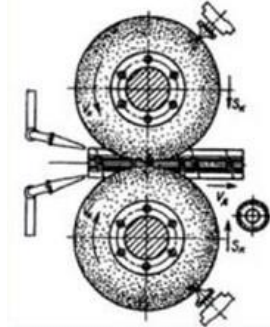


Рисунок 3.23 – Схема двостороннього профільного глибинного шліфування “ялинкового” профілю хвостовика лопатки турбіни авіаційного двигуна й високоструктурний шліфувальний круг

Процес характеризується великою площею контакту круга із заготовкою, наявністю вертикальних ділянок і зон з утрудненим підведенням охолоджувальної рідини. Підвищена потужність витрачається на шліфування за великої кількості одночасно працюючих абразивних зерен, що призводить до збільшення тепловиділення у зоні різання. Тому до характеристик і властивостей абразивного інструмента застосовуються більш жорсткі вимоги, зокрема по твердості й дисбалансу. Підвищення номера структури, що супроводжується зменшенням об'ємного вмісту абразивного зерна у шліфувальному крузі, позитивно впливає на термодинамічну напруженість процесу шліфування, дозволяє підвищити продуктивність й якість оброблення деталей. Висока пористість сприяє кращому підведенню охолоджувальної рідини в зону шліфування й відводу відпрацьованого шлама.

Провідні закордонні фірми-виробники абразивного інструмента, такі як, наприклад, Rappold Winterthur, Tyrolit (Австрія), Atlantic, Krebs&Riedel (Німеччина), Carborundum (США), Norton (США – Франція) й ін. забезпечують в залежності від призначення різні характеристики шліфувального круга не тільки по зернистості й твердості інструмента, але й по номеру структури й пористості. Для цього вони розробляють і впроваджують у виробництво різні технології формування об'ємно-структурної будови, які є ноу-хау й тримаються в найсуворішому секреті.

Іншим типом деталей, для оброблення фасонних поверхонь яких знаходять застосування процеси глибинного шліфування, є зубчасті колеса відповідального призначення (рис. 3.24-3.25), які піддаються високим силовим, температурним і вібраційним навантаженням, а також колеса, які застосовуються в кінематично-точних передачах (наприклад, прецизійних верстатів).

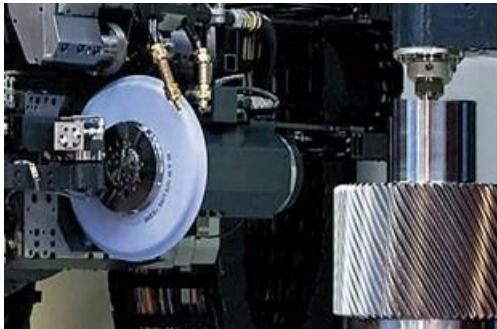
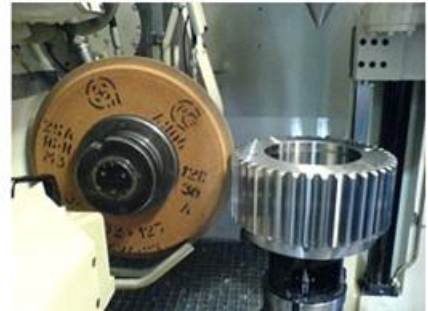


Рисунок 3.24 – Профільне шліфування косозубого зубчастого колеса кругом із зольгелевого монокорунду



Рисунок 3.25 – Профільне шліфування прямозубого зубчастого колеса високоструктурним кругом



Шліфування зубчастих коліс відноситься до числа так званих проблемних технологічних процесів формоутворення. Проблемність цієї операції полягає в тому, що при прагненні забезпечити підвищену точність виготовлення зубчастих коліс із мінімальною трудомісткістю зростає ризик одержати на оброблених поверхнях дефекти шліфувального характеру. Залежно від методу зубошліфування, що застосовується – способом копіювання або обкату з періодичним або безперервним діленням – характер взаємодії шліфувального круга з бічною поверхнею зуба може бути у вигляді точкових, лінійних контактів або їхньої комбінації. Такий характер роботи абразивного інструмента визначає більші контактні навантаження, локалізовані в зоні різання, і відповідно – більш високі температури з наступним розвитком припалів і тріщин. Метод копіювання дозволяє застосувати схеми профільного глибинного шліфування для формоутворення зубців, але високопористими шліфувальними кругами підвищеної міцності й зносостійкості з різними характеристиками по зернистості, твердості й номеру структури.

При профільному шліфуванні зубчастих коліс за схемою копіювання, за аналогією із профільним шліфуванням турбінних лопаток, утворюється більша площа контакту круга з оброблюваною поверхнею заготовки (рис. 3.25), що призводить до більших контактних навантажень, локалізованих в зоні різання, і відповідно – до більш високих температур з наступним розвитком припалів і тріщин. Крім того, спеціальні легуючі елементи, що входять до складу сталі,

погіршують її оброблюваність шліфуванням, підвищують схильність до утворення припалів. Ситуація погіршується ще більше при шліфуванні загартованих зубчастих коліс із високою твердістю поверхні. Високоструктурні абразивні круги ефективно застосовуються при профільному й обкатному шліфуванні циліндричних і конічних високоточних зубчастих коліс. Доведено можливість попереднього формування зубчастого профілю на глибину до 9 мм за 1...5 проходів високоструктурним кругом на керамічній зв'язці з підвищенням продуктивності за об'ємом видалення матеріалу до 2...4 разів.

Профільне шліфування циліндричних зубчастих коліс за схемою копіювання виконується на спеціальних профіleshліфувальних верстатах, наприклад, фірм Gleason – Pfauter (США-Німеччина), Höfler (Німеччина), Niles (Німеччина), Oerlikon (Швейцарія), Liebherr (Швейцарія- Німеччина) шліфувальними кругами прямого й конічного профілю з електрокорунду білого зернистістю F60...F120 й кубічного нітриду бору зернистістю 125/100-160/125, твердістю F...L, зі структурою 12...14.

Шліфування конічних зубчастих коліс із круговим зубом за схемою періодичного обкату (рис. 3.26) здійснюється на зубошліфувальних верстатах фірм Klingelnberg-Oerlikon (США-Швейцарія), Gleason (США) шліфувальними кругами кільцевого або чашкового профілю з електрокорунду білого зернистістю F80...F120 й кубічного нітриду бору зернистістю 100/80, твердістю F...K, зі структурою 12...14.

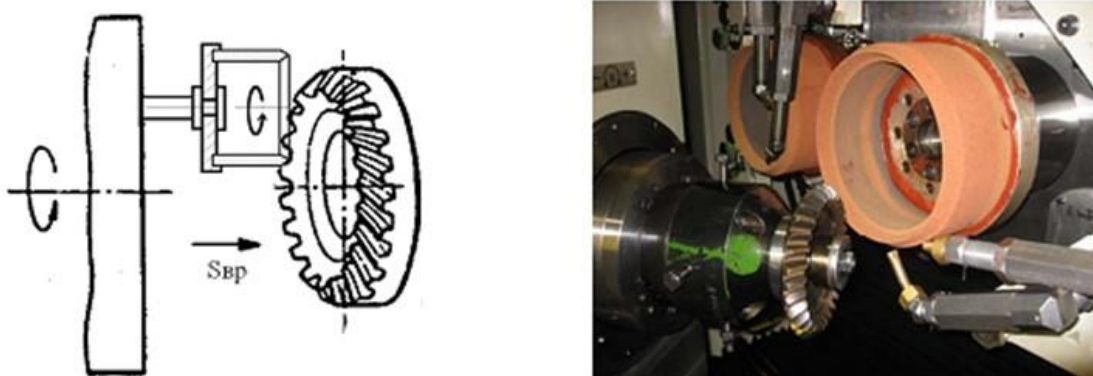


Рисунок 3.26 – Шліфування конічного зубчастого колеса за схемою періодичного обкату

Шліфування методом безперервного обкату циліндричних прямозубих зубчастих коліс (рис. 3.27) здійснюється на спеціальних зубошліфувальних верстатах, наприклад, фірм Reishauer (Швейцарія), Liebherr (Швейцарія- Німеччина), Gleason-Hurth (США- Німеччина), Okamoto (Японія). Для цього використовуються шліфувальні круги зі спеціальним черв'ячним профілем з електрокорунду білого зернистістю F80...F120, твердістю F...I, зі структурою 10...14.



Рисунок 3.27 – Шліфування прямозубого зубчастого довбача черв'ячним кругом за схемою безперервного обкату

Автоматизація управління технологічними процесами глибинного шліфування. Технологію оброблення деталей абразивними кругами удосконалюють у напрямку підвищення продуктивності шліфувальних верстатів, точності оброблення, автоматизації операцій шліфування, у тому числі за рахунок підтримки постійної різальної здатності кругів з використанням безперервної правки інструмента.

Основний технологічний час, тобто час, що витрачається на здійснення формотворних рухів верстата й зрізування стружки з деталі, займає важливу частку у часі оброблення деталі і у більшості випадків перевищує частку всіх інших елементів технологічного процесу. Характерною рисою профільного глибинного шліфування є значне збільшення поверхні контакту круга з оброблюваною заготовкою й відповідно кількості вершин абразивних зерен, що беруть участь у роботі шліфування, що приводить до високої теплової напруженості процесу оброблення. Під час розроблення технологічних процесів для верстатів з ЧПК виникають труднощі, обумовлені неможливістю забезпечити однакові умови оброблення на всій оброблюваній поверхні, тому технологи значно занижують режими оброблення, прагнучі одержати надійну програму для виготовлення деталі й убезпечити її від теплових ушкоджень, і збільшуючи тим самим основний час в 2–4 рази.

Автоматизація управління технологічними процесами глибинного шліфування має велике значення з позицій підвищення продуктивності і якості оброблення. При глибинному шліфуванні деталей ГТД, які мають переважно невелику довжину, порівняну з довжиною дуги контакту круга і деталі, оброблення з максимальною глибиною шліфування становить лише 10-20%, а інший час витрачається на ділянки врізання й виходу інструмента, де процес є менш напруженим. У цьому випадку призначення режимів глибинного шліфування з постійною швидкістю поздовжньої подачі призводить до зниження продуктив-

ності процесу. Підвищення продуктивності при обробленні деталей такого типу може бути досягнуто, якщо поздовжню подачу змінювати відповідно до зміни умов оброблення.

Оскільки процес шліфування є багатофакторним і характеризується великою кількістю незалежних параметрів, що істотно впливають на хід процесу й експлуатаційні показники абразивного інструмента (як-от складові режиму оброблення й характеристики інструмента, матеріал заготовки й припуск на оброблення, жорсткість і стан технологічної системи, спосіб правки, МОР й ін.), через неможливість врахування всіх цих факторів для стабілізації силових і температурних умов оброблення варто застосовувати різні схеми керування процесом шліфування, наприклад, шліфування з постійним перетином зрізів, або шліфування з постійним видаленням об'єму металу.

Далі розглянуто реалізовані у виробництві варіанти шліфування найбільш складних типових поверхонь робочих і соплових турбінних лопаток із застосуванням прогресивних методів обробки згідно з варіантами технологій, вказаними в табл. 3.3.

Диференційована обробка типових поверхонь робочих лопаток турбін.
Шліфування "ялинкового" хвостовика. За цим варіантом "ялинковий" хвостовик робочих лопаток шліфується на двошпиндельних верстатах методом глибинного шліфування. Схема забезпечує високу продуктивність за рахунок безперервної правки і взаємної компенсації радіальних зусиль. Рішенням проблеми налагодження правлячих пристроїв в осьовому напрямку для прогресивного процесу шліфування стало застосування двошпиндельних верстатів зі зміненою конструкцією шпиндельного вузла і правлячих пристроїв, з комбінованою CD- й ID- правкою, а також з можливістю CNC- налагодження й підналагодження в осьовому напрямку верхнього шпинделя механізму безперервної правки для забезпечення необхідної точності взаємного розташування профілів (рис. 3.28).

Дана схема забезпечує високу точність взаємного розташування профілів за рахунок наявності CNC- регулювання в осьовому напрямку верхнього механізму CD- правки і застосування на остаточних проходах ID- правки від столу для забезпечення точності взаємного розташування профілів в межах 0,01 мм. Виключення з процесу CD- правки призводить до значного підвищення (більш ніж в 1,5 рази) тривалості циклу шліфування. Наприклад, шліфування профілю 5-зубної лопатки з високожароміцного ливарного сплаву на хромонікелевій основі типу ЖС-32, схильного до утворення тріщин, здійснюється кругами характеристики 25А 10П ЗІ31-32. Для видалення основного припуску без виникнення припалів й розтягувальних залишкових напружень необхідно 8-10 проходів з CD- правкою. Після чого здійснюється 3-4 проходи з правкою від столу, вклю-

чаючи виходжування для забезпечення необхідної точності взаємного розташування профілів в межах 0,01 мм і зниження шорсткості поверхні до $Ra\ 1,6$.

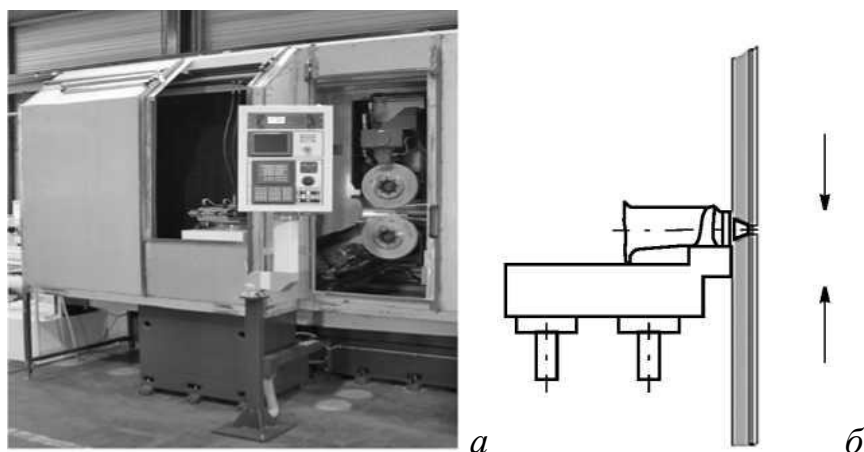


Рисунок 3.28 – Компонівка двошпиндельного верстату MICRO-CUT 4-320DS з рухомою колоною – *а*; наладка операції шліфування ялинкового хвостовика – *б*

За шліфування без CD- правки із застосуванням тільки правки від столу потрібно 22 проходи. Збільшуються також втрати часу, пов'язані з холостими ходами при правці. Двошпиндельна система може працювати з великими радіальними силами шліфування завдяки їх взаємній компенсації. З огляду на те, що вказане вище значення параметра $Q'z$ дано для 1 шпинделя, в разі якщо верстат має 2 одночасно працюючих шпинделя, технологічні можливості верстата по параметру продуктивності теоретично мають подвоюватися. Практично продуктивність збільшується в 1,5-1,7 рази в порівнянні зі схемою одношпиндельного шліфування. Зростання продуктивності в 2 рази не спостерігається в зв'язку з різними умовами шліфування на ділянках ялинкового профілю. Вершина профілю працює за схемою зовнішнього шліфування зі сприятливими умовами для роботи зерна в режимі самозагострення з максимальною ріжучою здатністю круга, а на бічних ділянках профілю, який шліфується, зерна круга працюють в несприятливих умовах торцевого шліфування в режимі затуплення й утворення майданчиків зносу, що призводить до виникнення припалів. Внаслідок несиметричного розташування осей профілів верхнього і нижнього кругів (рис. 3.28, б) щодо осі профілів лопатки, які шліфуються, ця обставина посилюється на торці профілю, розташованому ближче до бандажної полиці, і призводить до необхідності зниження режимів шліфування для виключення припалів. За одношпиндельної схеми профіль круга розташований симетрично щодо ялинкового профілю, який шліфується.

Шліфування бандажних полок, лабіринтів, торців пера. Бандажна полка, гребінці лабіринтів, торці пера обробляються найчастіше в зборі в барабані на

модернізованих токарно-лобових верстатах бакелітовими кругами. Даний процес є екологічно шкідливим, травмонебезпечним, нестабільним, а також має низький рівень механізації.

Прогресивний і оптимальний варіант шліфування цих поверхонь реалізований на 4-х координатних верстатах типу Micro-Cut 4-250 і Smart N6 з CD-правкою. Верстати мають модульну конструкцію з рухомою стійкою з CNC-керуванням за 4-ма координатами. Вони компактні, займають малу площу по фронту й відповідають всім вимогам для вбудовування в технологічну лінію для реалізації технології диференційованої обробки поверхонь лопаток, можуть оснащуватися магазином шліфувальних кругів і системою для їх автоматичного зняття і установки. Приклад даного варіанту і результати за якістю та продуктивністю наведені далі. Ескіз лопатки з конструкцією бандажної полки показаний на рис. 3.29, *а*. Лопатка базується по ялинковому профілю з упором й підтиском по торцю полки у верхній частині. Така схема закріплення (рис. 3.29, *б*) забезпечує точне базування лопатки. Для зняття припуску використовують два типи профільних кругів (рис. 3.29, *в*), що дозволяє знизити час обробки бандажної полиці і домогтися отримання більш точного профілю.

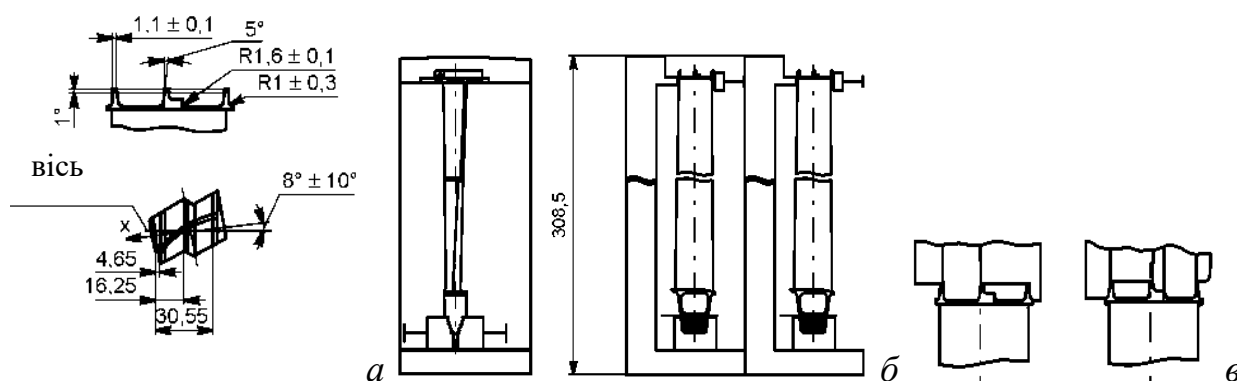


Рисунок 3.29 – Профіль лопатки з бандажної полицею, який шліфується – *а*, схема базування лопатки – *б*, профіль кругів для шліфування полок – *в*

Застосування нового обладнання й технології з використанням високопористих електрокорундових кругів марки 25A10 12K зі шліфуванням з МОР забезпечує значне зменшення величини шорсткості обробленої поверхні. Аналіз отриманих експериментальних даних показує, що середнє арифметичне відхилення профіля торця бандажної полиці турбінної лопатки, шліфованого на верстаті Micro-Cut 4 становить $Ra\ 0,7...0,8$ (рис. 3.30), тоді як після обробки на токарно-лобовому верстаті МК163М шорсткість поверхні $Ra\ 1,06...1,25$. Шорсткість поверхні периферійної частини бандажної полиці, шліфованої на верстаті Micro-Cut 4, становить $Ra\ 0,63...0,68$, а на МК163М – $Ra\ 0,85...1,1$.

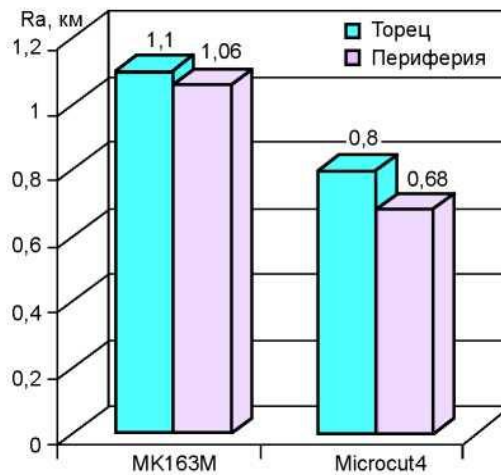


Рисунок 3.30 – Вплив методу обробки на шорсткість торцевих і периферійних поверхонь полиць турбінних лопаток

Величина і характер розподілу по глибині залишкових напружень 1-го роду є найважливішими показниками якості деталі, за яким оцінюють нові процеси, що впроваджуються при обробці деталей з жароміцних матеріалів. При обробці периферійних поверхонь найбільші розтягувальні напруження до $65,1 \text{ кг/мм}^2$ виявлені (рис. 3.31, а) після шліфування на токарно-лобовому верстаті МК163М.

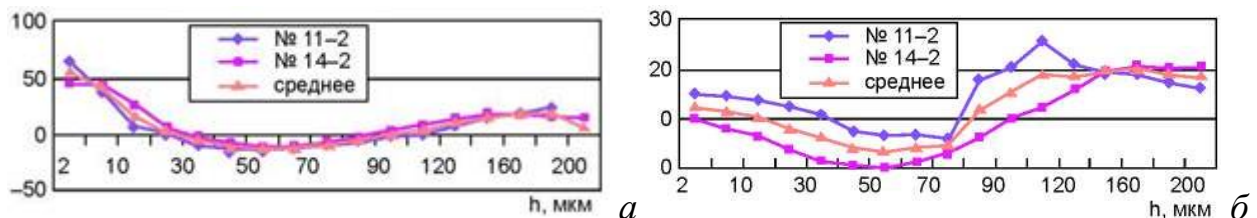


Рисунок 3.31 – Характер розподілу залишкових напружень σ по глибині шару h правої периферійної частини полки лопатки турбіни після обробки на токарно-лобовому верстаті МК163М – а; на верстаті Micro-Cut 4-250 – б

Застосування методу глибинного шліфування на верстаті Micro-Cut 4-250 призводить до зниження величини розтягувальних напружень до $-20,7 \text{ кг/мм}^2$ (рис. 3.31, б). Використання методу глибинного шліфування торцевих поверхонь на верстаті Micro-Cut 4 призводить до збільшення залишкових напружень стиску до $-39,8 \text{ кг/мм}^2$ на глибині 10-70 мкм, що позитивно позначається на експлуатаційних показниках і підвищує межу витривалості лопаток.

Комплексна обробка типових поверхонь соплових лопаток. Усунути відомі недоліки традиційної технології поелементного шліфування лопаток на модернізованих токарно-лобових верстатах дозволяє комплексна обробка діамет-

ральних поверхонь соплових лопаток, що здійснюється відповідно до варіанту 1 (табл. 3.3) на 5-осьовому шліфувальному центрі Micro-Cut 4-520 CNC з поворотно-обертним столом й магазином шліфувальних кругів (рис. 3.32, а). Налаштування верстата Micro-Cut 4-520 CNC для шліфування з пристроєм, в якому закріплюється і базується соплова блокова лопатка, наведені на рис. 3.32, б. Для обробки профільних поверхонь лопаток турбіни реалізується метод багатокоординатного глибинного шліфування за допомогою глобусного стола. Глобусний стіл дозволяє обертати деталь навколо двох додаткових осей (рис. 3.33). З метою виключення колізій при шліфуванні проведено моделювання процесу шліфування всіх поверхонь лопатки з установкою її в пристрої (рис. 3.34).

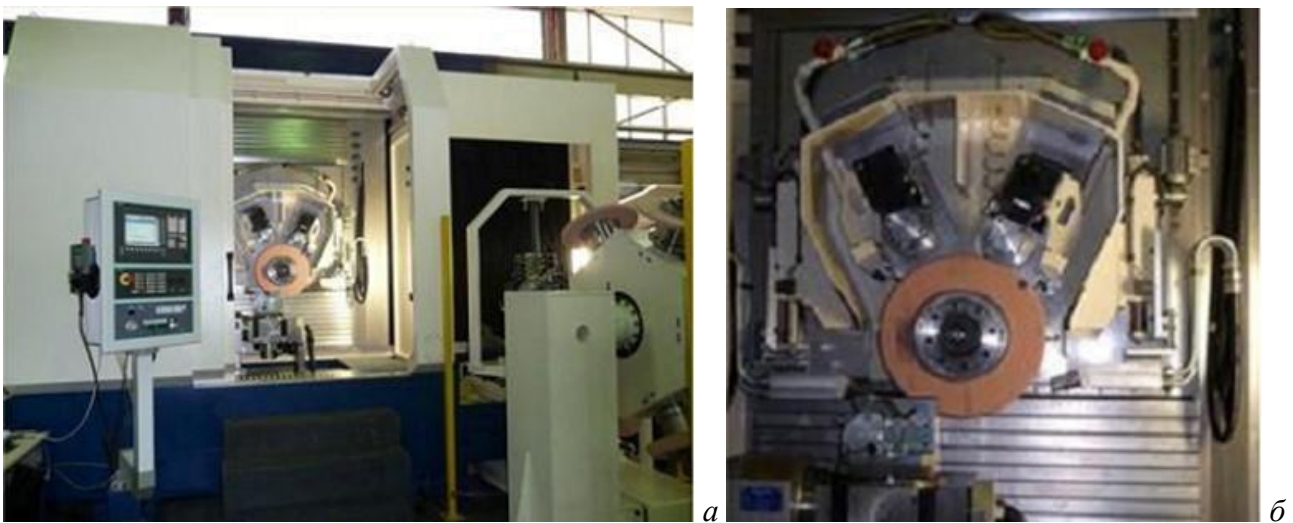


Рисунок 3.32 – П'ятиосьовий верстат ELB-SCHLIF Micro Cut4-520 (а) і його робоча зона (б)

Для поліпшення якості поверхні, що шліфується, у механообробному центрі передбачені механізми постійної правки круга, завдяки якій різальна поверхня круга підтримується в працездатному стані протягом всього процесу різання. З п'яти одночасно керованих координат механообробного центру дві забезпечує глобусний стіл, встановлений на стіл верстата: це обертання деталі навколо осей А і В. Стіл верстата переміщує деталь по координаті Х. Переміщення шпинделя верстата по координатах Z і Y забезпечує обробку ще по двох осях. Використання п'яти координат дозволяє обробляти криволінійні поверхні. Спеціальний пристрій для подачі ЗМОТС дозволяє не тільки охолоджувати зону обробки й видаляти шлам з деталі, але й робити очищення різальної поверхні шліфувального круга. Пристрій має механізм безперервного регулювання положення сопла над оброблюваною поверхнею для постійної компенсації зношування круга.

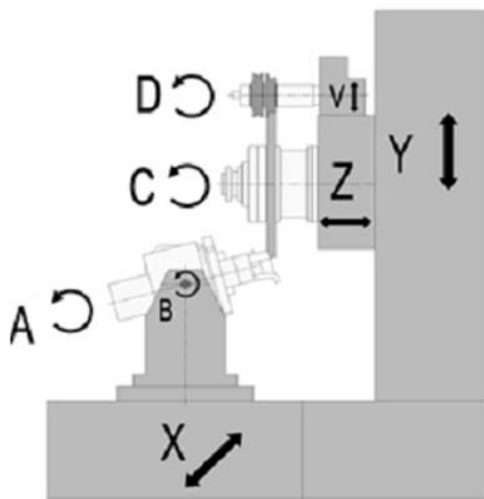


Рисунок 3.33 – Схема обробки лопатки турбіни на п'ятиосьовому верстаті

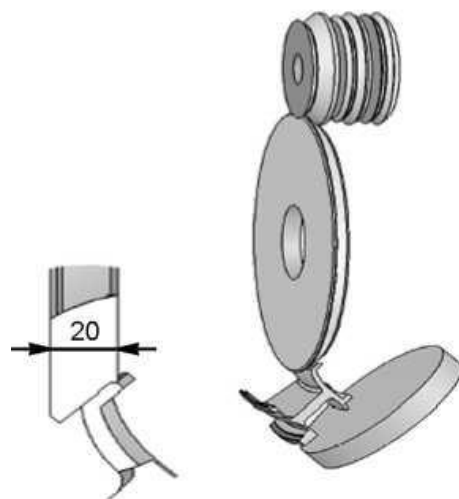


Рисунок 3.34 – Моделювання процесу шліфування соплових лопаток на п'ятиосьовому верстаті

Перевага даної технології: формоутворення поверхонь заготовки здійснюється шляхом її переміщення одночасно по чотирьох осях, а також первісне позиціонування ще по одній осі. У такий спосіб процес багатокоординатного глибинного шліфування має наступні переваги перед традиційною обробкою:

- для обробки одного типу деталей потрібний один пристрій;
- за одне встановлення деталі обробляється відразу кілька поверхонь в автоматичному режимі, відповідно до заданої програми;
- порівняно просте переналагодження на інший тип деталей;
- у випадку виникнення геометричних відхилень або будь-яких інших дефектів, викликаних шліфуванням, бракується тільки одна деталь, на відміну від традиційної обробки в імітаційному диску, коли бракованими стають всі деталі, що шліфують за одне встановлення.

Поверхневий шар деталей за своїми геометричними показниками відрізняється від поверхневих шарів, отриманих після обробки на токарно-лобових верстатах. Параметр Ra шорсткості обробленого на верстаті Micro Cut4-520 торця соплової лопатки турбіни дорівнює 0,7...0,8 мкм в той час, коли обробка на токарно-лобовому верстаті МК163М забезпечувала шорсткість поверхні в межах 1,06...1,25 мкм.

Багатокоординатна обробка лопаток соплових апаратів на багатоцільовому верстаті приводить до концентрації операцій, перетворенню технологічних операцій попередніх технологічних процесів у технологічні переходи. Приклад такої технології наведений на рис. 3.35.

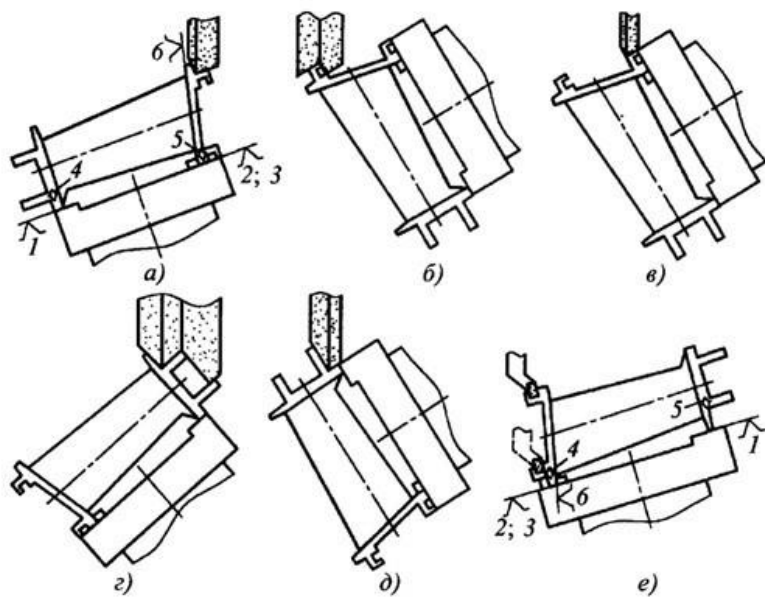


Рисунок 3.35 – Технологічний процес обробки соплової лопатки на багатоцільовому верстаті: *а* – перша операція, перший перехід; *б* – перша операція, другий перехід; *в* – перша операція, третій перехід; *г* – перша операція, четвертий перехід; *д* – перша операція, п'ятий перехід; *е* – друга операція, перший та другий переходи

У представленому технологічному процесі весь контур лопатки соплового апарата обробляється за дві операції. Перша операція складається з п'яти переходів, друга з двох. При першій операції технологічними базами є: точки 1...3 на бандажних площинах (установча база); точки 4 й 5 на торцях верхньої й нижньої бандажних полиць (напрямна база); точка 6 на верхній бандажній полиці з боку проточної частини (опорна база). При зміні операцій технологічні бази переходять на аналогічні поверхні, протилежні тим, які були базами спочатку. П'ять переходів на першій операції виконуються завдяки тому, що деталь й інструмент мають можливість переміщатися одна відносно іншого в п'ятьох координатах, а на шпинделі верстата або в магазині може бути розміщено кілька абразивних кругів, на якихправлячі ролики постійно або дискретно нарізають п'ять різальних фасонних поверхонь. На другій операції обробляються поверхні, закриті при базуванні деталі на першій операції. Тут вони обробляються кругами з надтвердих матеріалів на режимах високошвидкісного шліфування ($v_k = 80$ м/с.). В якості різального інструмента при цьому використовуються шліфувальні круги з кубічного нітриду бору на гальванічній зв'язці.

Фізико-механічні характеристики кубічного нітриду бору значно вищі, ніж абразивних матеріалів. Так, наприклад, мікротвердість кубічного нітриду бору 900 МПа, електрокорунду 200 МПа; модуль пружності нітриду бору 7200 МПа, електрокорунду 3200 МПа; коефіцієнт теплопровідності нітриду бору 0,1 кал/(см·с·°С), електрокорунду 0,047 кал/(см·с·°С). Таким чином різниця в твердості оброблюваного матеріалу й інструментального (кубічного нітриду бору) значно вища, ніж в інших абразивів, тому є можливим застосувати більш високу швидкість різання. Зокрема, швидкість обробки нікелевих сплавів кругами з кубічного нітриду бору складає порядку 60...80 м/с., абразивними кругами < 30

м/с. Теплова енергія, що утворюється при цьому, йде не тільки в шари металу, що зрізуються, але і в круг, який виконується на металевій зв'язці. У порівнянні з кругами на керамічній зв'язці це забезпечує не тільки високий відвід теплоти із зони різання, але й високу міцність різальної системи зерно-зв'язка.

Таким чином, впроваджені прогресивні технології та обладнання для шліфування дозволяють реалізувати комплексну або диференційовану обробку поверхонь робочих лопаток турбін відповідно до варіантів 1 і 2 (табл. 3.3). Остаточний контроль в розглянутих технологіях здійснюється за допомогою координатної вимірювальної машини (КВМ) CenterMax, яка не вимагає створення лабораторних умов при експлуатації і може бути встановлена безпосередньо в цеху – в технологічному ланцюжку обладнання. Система активного сканування поверхонь дозволяє провести контроль з вимірюванням всіх розмірів і взаємного розташування шліфованих поверхонь за 8-10 хвилин в залежності від конструкції.

Питання для самоконтролю:

1. Які критерії вибору варіантів технологій з різним ступенем концентрації операцій шліфування основних типових поверхонь лопаток?
2. В чому полягає сутність варіанту технології комплексного шліфування основних типових поверхонь лопаток?
3. Яке обладнання використовується для комплексного шліфування основних типових поверхонь лопаток, його оснащення?
4. В чому полягають переваги варіанту технології комплексного шліфування основних типових поверхонь лопаток на одному обробному центрі і для яких умов виробництва він є доцільним?
5. В чому полягають переваги і недоліки варіанту технології комплексного шліфування основних типових поверхонь лопаток на двох обробних центрах і для яких умов виробництва він є доцільним?
6. В чому полягає сутність варіанту технології диференційованої обробки основних типових поверхонь лопаток?
7. Яке обладнання використовується для диференційованої обробки основних типових поверхонь лопаток, його оснащення і для яких умов виробництва процес є доцільним?
8. Які варіанти технології обробки основних типових поверхонь лопаток застосовуються у великосерійному виробництві?
9. В чому полягають особливості сучасного гнучкого виробничого осередку (ГВО) на швидкопереналаджуваній елементній базі?
10. Які основні технологічні параметри і властивості, які необхідно розглядати при виборі шліфувального центру для обробки основних типових поверхонь лопаток?
11. Які способи шліфування основних типових поверхонь лопаток існують і їх сутність?
12. В чому полягають недоліки методу VIPER- шліфування лопаток?
13. За яким варіантом технології здійснюється шліфування "ялинкового" хвостовика лопатки, його сутність?

14. За рахунок чого забезпечується висока точність взаємного розташування профілів "ялинкового" хвостовика лопаток?
15. За якими варіантами технології здійснюється шліфування бандажних полок, лабіринтів, торців пера, їх переваги й недоліки?
16. За якими показниками якості деталі оцінюють нові процеси, що впроваджуються при обробці деталей з жароміцних матеріалів, який рівень цих показників?
17. В чому полягає сутність варіанту технології комплексного шліфування соплових лопаток, яке обладнання використовується?
18. В чому полягає сутність процесу глибинного шліфування й у яких випадках його застосовують під час обробки лопаток турбін?
19. В чому полягає особливість профілю шліфувального інструмента, який використовується в процесі глибинного шліфування?
20. Використання якого шліфувального інструмента є необхідною умовою застосування процесу глибинного шліфування профільних поверхонь виробів?
21. Окрім використання спеціального шліфувального інструмента, що ще є необхідною умовою застосування процесу глибинного шліфування профільних поверхонь виробів?
22. Сутність багатокоординатного глибинного шліфування лопаток турбін. Яка необхідна умова його застосування?

3.4. Типова технологія виготовлення лопатки турбіни

Технологія виготовлення лопаток ротора турбіни визначається їхньою геометричною формою, властивостями матеріалу й зазначеними у розд. 1.1 експлуатаційними властивостями.

Конструкції лопаток ротора турбіни, представлених на рис. 3.4, обумовлюють виготовлення заготовок методами литва. Циліндричні канали в лопатках діаметром 1...1,5 мм отримують за допомогою кварцових трубок, які поміщають у порожнину форми, що утворює перо лопатки. Потім вони видаляються шляхом розчинення в плавиковій кислоті, у яку занурюють всю лопатку. Охолоджувані лопатки звичайно мають довжину 80...110 мм. При цьому можна забезпечити товщину між каналами близько 0,7 мм, а товщину стінки між каналами й профілем перетину лопатки близько 0,7...1 мм.

Відлиті лопатки мають наступну точність параметрів проточної частини:

- ✓ допустиме відхилення точок профілю пера від теоретичного положення $\pm (0,08...0,10)$ мм залежно від довжини хорди;
- ✓ допустиме зміщення профілю пера від теоретичного – $\pm (0,15...0,20)$ мм залежно від довжини хорди.

При виготовленні лопатки литвом її проточна частина виходить без припуску, тобто практично не вимагає наступної механічної обробки. У результаті здійснення такої технології на цій стадії формується і якість поверхневого шару пера лопатки. Таким чином, механічній обробці робочих лопаток турбіни в ос-

новному піддаються хвостовики лопаток і бандажні полиці (рис. 3.36). При цьому необхідно забезпечити:

- ✓ допуск на шаг зубців хвостовика 0,01...0,02 мм (п'ятий квалітет);
- ✓ допуск на товщину хвостовика по середній лінії зубів 0,02...0,05 мм (шостий квалітет);
- ✓ допуски на кути замка: кут, що визначає положення опорної поверхні зуба, кут паза, кут клину хвостовика – відповідно на рівні $\pm 10'$; $\pm 30'$; $+30'$;
- ✓ допуск на взаємне зміщення зубців однієї гребінки хвостовика відносно іншої в площині симетрії хвостовика $\pm 0,02$ мм;
- ✓ шорсткість поверхні зубців хвостовика $Ra\ 0,4...0,6$.

Технологія механічної обробки робочих лопаток турбіни обумовлює застосування процесів різання, що забезпечують необхідні продуктивність й якість поверхневого шару. Послідовність технологічних етапів є наступною:

- ✓ Підготовка технологічних баз заготовок, що складається з
 - вхідного контролю заготовки;
 - виготовлення технологічних баз від профілю пера лопатки;
 - обробка площин замка лопатки;
 - встановлення й закріплення лопаток в пристрої-супутнику.
- ✓ Обробка хвостовиків лопаток, що виконується за одно- й двосторонньою схемами обробки, включає також глибинне шліфування хвостовиків лопаток.
- ✓ Обробка бандажних полиць й лабіринтів, що включає наступні операції:
 - попередня механічна обробка;
 - напайка на бандажні полиці пластин зі спеціальних твердих сплавів;
 - остаточна обробка бандажних полиць.
- ✓ Обробка циліндричних поверхонь лопаток, що складається з
 - шліфування циліндричних поверхонь лопаток;
 - виготовлення кільцевих канавок (лабіринтів) під встановлення фіксаторів.
- ✓ Обробка перфораційних отворів на вхідній кромці й бандажних полицях лопаток.
- ✓ Спеціальні й контрольні операції, а саме:
 - нанесення покриттів;
 - контрольні операції.

Підготовка технологічних баз заготовок. Заготовки, отримані литвом по виплавлюваних моделях, мають проточну частину лопатки, що надалі не обробляється. При цьому на заготовці є шість базових точок, які дозволяють контролювати профіль пера лопатки й використати їх надалі для створення технологічних баз при механічній обробці (рис. 3.37). На операціях вхідного контролю лопатка встановлюється в контрольний прилад по шести точкам на заготовці: точки 1...3 на пері в першому й останньому перерізах профілю; точка 4

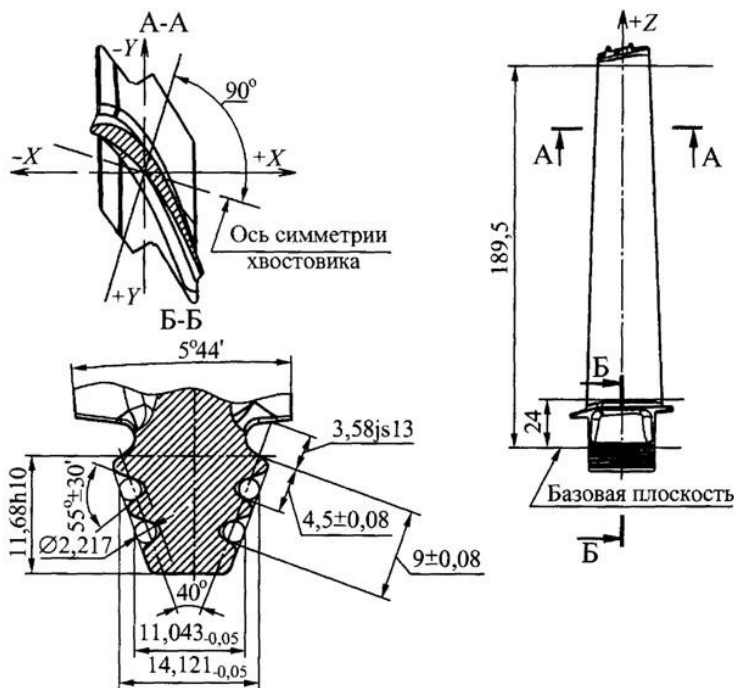


Рисунок 3.36 – основні конструктивні елементи робочої лопатки турбіни, що формуються механічною обробкою

ється в пристрої таким чином, щоб припуск на оброблюваних поверхнях був розташований рівномірно, і закріплюється.

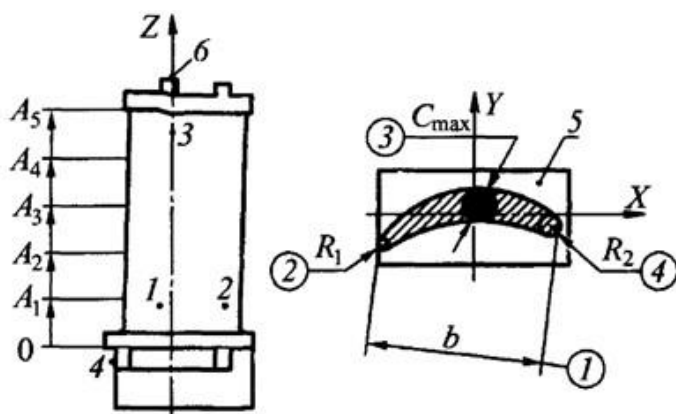


Рисунок 3.37 – схема контролю й доопрацювання заготовки на операціях вхідного контролю: 1...6 – базові точки заготовки

те ж саме, з боку вхідної кромки (д), те ж саме, з боку вихідної кромки (е).

На операції встановлення й закріплення лопаток у пристрої-супутнику однозначність встановлення лопатки по профілю проточної частини, обробленої остаточно, не допускаючи його ушкоджень, вирішується шляхом закріплення деталей по проточній частині лопаток у брикет (пристрій-супутник) за допомогою швидкотвердіючої маси (рис. 3.39).

на торці замка з боку вихідної кромки, точка 5 на полиці замка з боку проточної частини й точка 6 на бобишці з боку бандажної полиці. Контроль профілю здійснюється в кожному перетині. При цьому виконуються слюсарно-полірувальні операції вхідної й вихідної кромки лопаток, у ході яких витримуються розміри проточної частини пера, тобто радіуси R_1 , R_2 кромки відповідно ②, ④, довжина b хорди ① й товщина максимального перетину $C_{\max}$ ③. При виготовленні технологічних баз від профілю пера лопатки заготовка орієнту

Обробка площин замка лопатки від ливарних баз – заготовка встановлюється в центри спеціального пристрою й закріплюється. Обробка здійснюється на плоскошліфувальному верстаті (мод. ЗБ722, ЗД722). На рис. 3.38. показані схеми: обробки торця хвостовика з боку вхідної кромки (а), – те ж саме, з боку вихідної кромки (б), обробки кліпа з боку спинки (в), те ж саме, з боку корита (г),

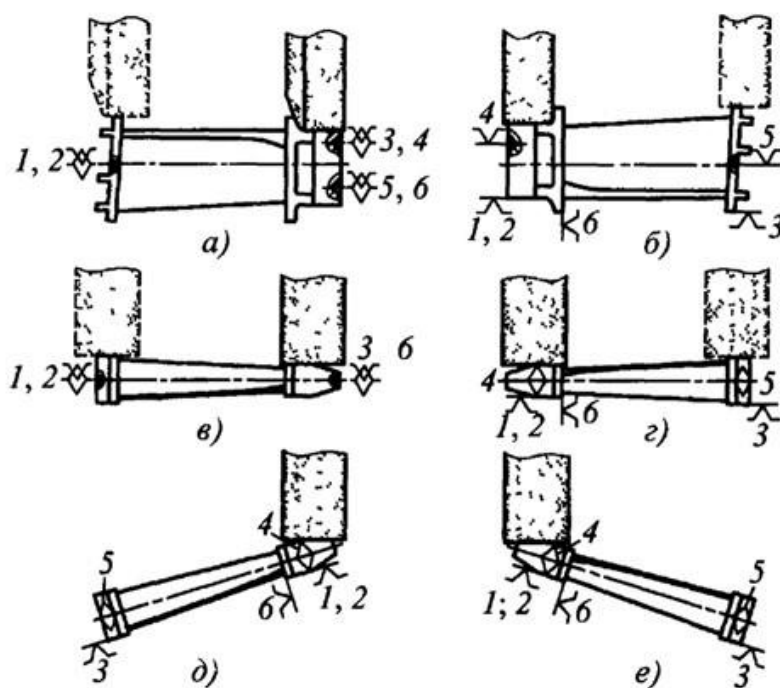


Рисунок 3.38 – Схеми обробки поверхонь лопаток, які характеризують перехід від технологічних баз у вигляді дрібних центрових отворів до розвинутих баз у вигляді площин

Суттю даної операції є здійснення переходу від баз, виконаних у тілі заготовки, до баз пристрою-супутника. Закріплення деталі в брикет здійснюється за допомогою спеціального пристрою, що представляє собою заливальну камеру із внутрішньою поверхнею у вигляді паралелепіпеда, обмеженого з п'яти сторін. Усередині камери розташовані установчі елементи у вигляді центрів і призм, що дозволяють однозначно встановити заготовку лопатки на її технологічні бази. Тобто встановлення здійснюється на технологічні бази лопатки, які використовувалися для обробки проточної частини лопатки, а саме: центрові отвори у хвостовику (бази 1, 2, 3, 4), торець хвостовика з боку входної кромки (база 5) і фаска на технологічній бобишці (база 6). Бази можуть бути й іншими, головне, щоб вони розташовувалися в "тілі" заготовки. Встановлення лопатки в заливальній камері здійснюється уздовж осі Z, що збігається з віссю проточної частини лопатки, знизу заливальна камера закривається двома стулками, що контактують із проточною частиною лопатки з її протилежних сторін, тобто з боку спинки й з боку корита. Зверху камери встановлюється горловина, через яку й заливається розплав швидкоотвердіючої маси, що представляє собою сплав легкоплавких металів у складі свинцю, олова, кадмію й вісмуту. Приклад такого брикету наведений на рис. 3.40.

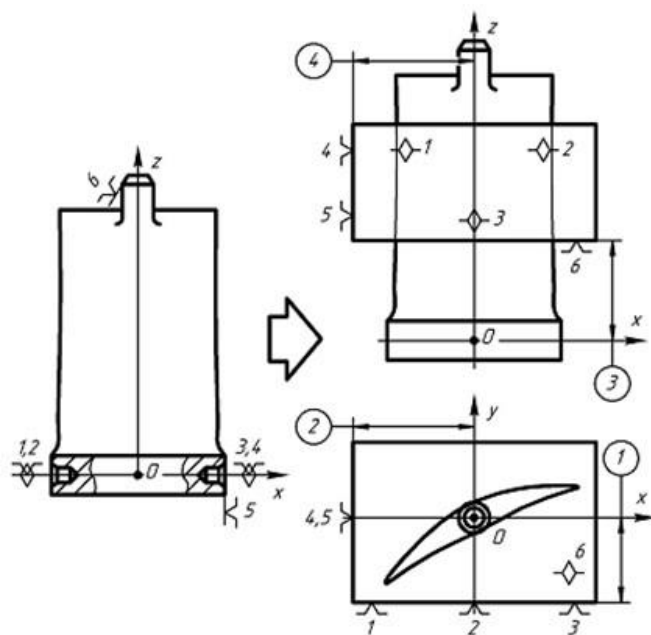


Рисунок 3.39 – Схема зміни технологічних баз у вигляді центрових отворів й фасок на технологічні бази брикету (пристрій-супутник)

брикету (база 6), паралельна площині XOY й віддалена від неї на розмір ③, є опорною.

Реалізація даного переходу дозволяє перейти від технологічних баз в "тілі" заготовки до технологічних баз пристрою-супутника брикету. Причому бази являють собою його зовнішні поверхні, сформовані стінками заливальної камери й перпендикулярні одна одній. З них найбільш розвинена площина (бази 1, 2, 3), паралельна площини XOZ і віддалена від неї на розмір ①, є установчою базою, бічна площина брикету, паралельна площини YOZ (бази 4, 5) і віддалена від неї на розмір ②, є напрямною, торцева поверхня



а



б

Рисунок 3.40 – Лопатки з технологічними базами у штампувальних бобишках перед обробкою замка: а – до заливки; б – після заливки

Дані поверхні використовуються для обробки зовнішнього контуру деталі, приклад такої операції наведений на рис. 3.41. Тут базовими поверхнями при обробці зовнішнього контуру деталі є поверхні брикету й вся система координат, у якій відбувається відлік розмірів ①...⑥, що формуються, зв'язана із цими площинами, тобто всі розміри, що формуються під час обробки, відлічуються від установчої, напрямної й опорної бази брикету. Самі технологічні операції виконуються в автоматичному циклі на багатоцільових обробних центрах з

ЧПК. Після обробки брикет розбивається, його осколки йдуть у переплав для повторного використання, а деталь переправляється на операції суперфінішування (видалення слідів заливальної маси). Приклад такої деталі, звільненої з брикету, наведений на рис. 3.42. Як видно, всі вихідні технологічні бази в "тілі" заготовки, які використовувалися на початковому етапі наскрізного техпроцеса, вилучені: в процесі обробки зроблена заміна баз, що не вплинула на точність обробки та не призвела до втрати жорсткості оброблюваної деталі.

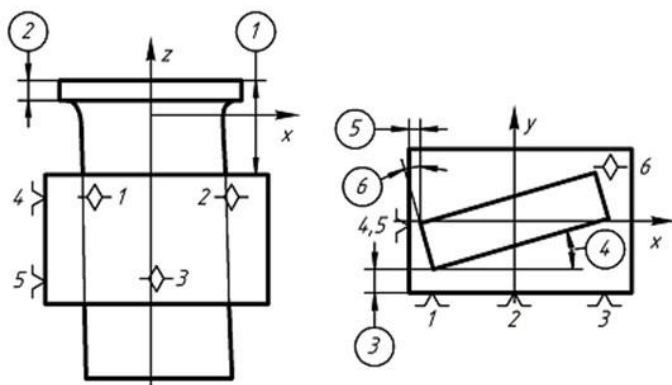


Рисунок 3.41 – Схема розташування установчої й опорної баз під час обробки хвостовика лопатки компресора при її закріпленні в брикет (пристрій-супутник)



Рисунок 3.42 – лопатка статора компресора, звільнена з брикету, перед операціями полірування

Після обробки базових поверхонь лопатки, скосів з боку вхідної й вихідної кромки та площин замка, що утворюють центральний кут, деталі переходять на найбільш відповідальну операцію всього технологічного процесу виготовлення лопаток турбіни. Це операція виготовлення "ялинкового" профілю замка хвостовика. Точність взаємного розташування різних поверхонь цього профілю і якість одержаного поверхневого шару визначають ресурс даних деталей і довговічність виробу в цілому.

Операції обробки хвостовиків лопаток передбачають як дво-, так і односторонню обробку профілю "ялинки" (рис. 3.43). Деталь встановлюється по площинах однієї з полиць замка й бандажної полиці (базы 1...3), на торцеві площини хвостовика й бандажної полиці (базы 4 и 5) і точку на хвостовику з боку проточної частини лопатки (база 6). У цьому положенні деталь закріплюється. Розмір ① забезпечується при обробці налагодженням пристрою, всі інші розміри, тобто ② ... ⑥ – фасонним шліфувальним кругом. Обробка замка здійснюється з однієї або двох сторін одночасно на спеціальних плоскошліфувальних верстатах з ЧПК.

Одностороння схема обробки може бути виконана на будь-якому універсальному плоскошліфувальному верстаті методом глибинного шліфування –

шліфувальні верстати з ЧПК мод. MFP і MFC фірми Magerle (Швейцарія), Profimat і Planomat фірми Blom (Німеччина) та інші. У всіх перерахованих вище моделей по три одночасно керовані координати й по дві системи правки шліфувального круга. Одна із цих систем характеризується розташуванням правлячого ролика над кругом на шліфувальній бабці, інша – розміщенням правлячого інструмента на столі й верстаті. Перевага методу глибинного шліфування в даному випадку – він дозволяє об'єднати в одному процесі обробки формоутворення фасонної поверхні замка, що відрізняється високою геометричною точністю, і формування високоякісного поверхневого шару.

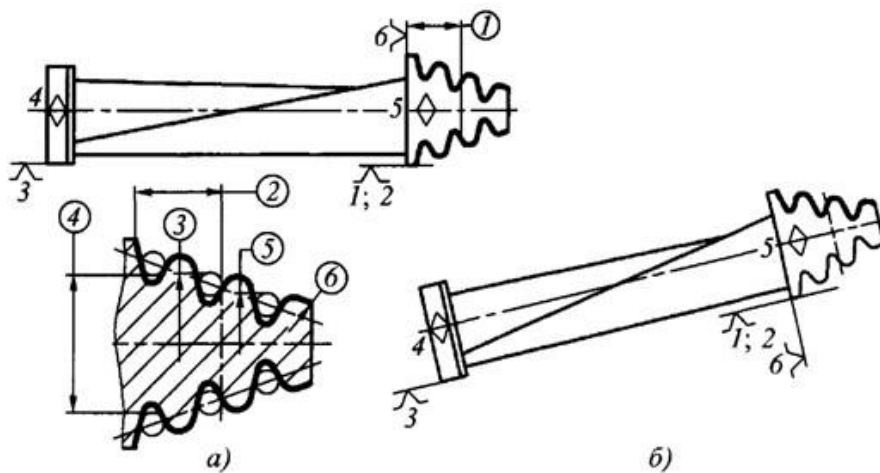


Рисунок 3.43 – Двобічна (а) й однобічна (б) схеми обробки замка лопатки

Схема двосторонньої обробки може бути реалізована винятково на спеціальних шліфувальних верстатах фірм ELB-Schliff (рис. 3.44) або Blom (Німеччина), а також Magerle (Швейцарія), які здійснюють обробку методом глибинного шліфування. Представлений на рис. 3.44 верстат має станину, на якій встановлений хрестовий стіл, що несе вертикальну колону. Завдяки хрестовому столу колона може переміщатися по осях X і Z . В колоні передбачені інструментальні бабки, які здатні вертикально незалежно переміщатися по осях Y і U . В шліфувальних бабках розташовані мотор-шпинделі великої потужності, над якими розміщені механізми правки круга. Схема роботи цих механізмів наведена на рис. 3.45. Кожен із правлячих роликів має можливість незалежно від круга переміщатися по осях Y і U . До станини верстата примикає верстатний модуль, що несе круговий стіл, який може повертатися навколо осей B і C . На столі знаходиться механізм правки й палета для встановлення деталей, тобто даний верстат оснащений двома механізмами безперервної правки й механізмами дискретної правки. Тут деталі 1, встановлені в пристрої-супутники 2, розміщуються на касеті 3. Число деталей, які розташовують на палеті, залежно від їхніх розмірів може змінюватися від однієї до декількох штук.

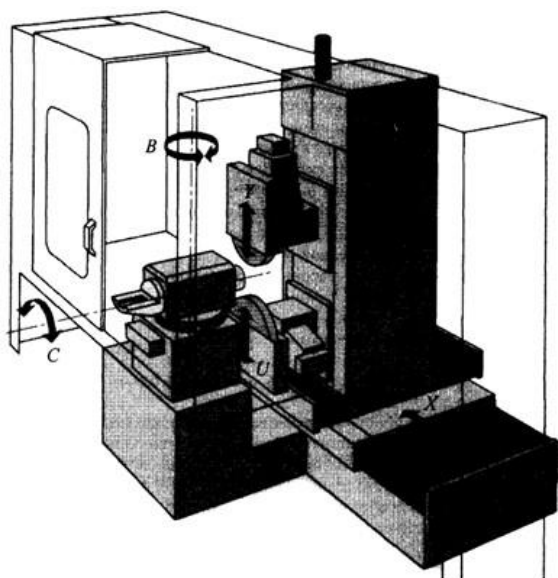


Рисунок 3.44 – Компонувочна схема спеціального плоскошліфувального верстату для двосторонньої обробки мод. Compact-Master фірми ELB-Schliff

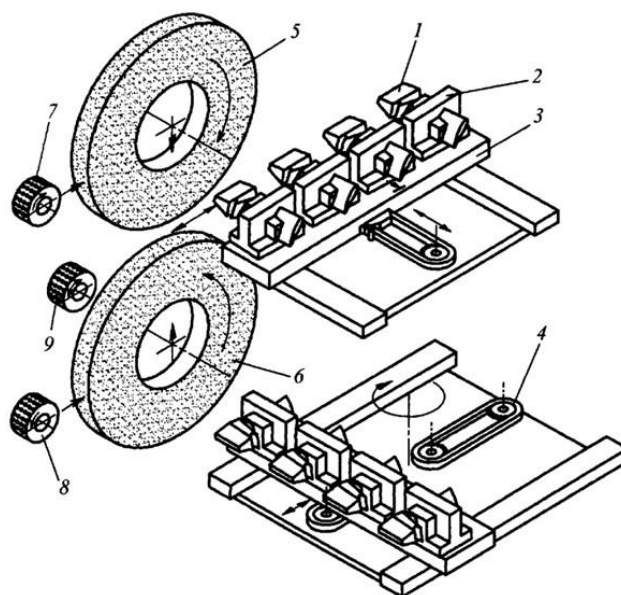


Рисунок 3.45 – Схеми роботи верстата в режимах безперервної й дискретної правки

У даному випадку на столі перебувають чотири лопатки. Палета 3 переміщається в зону обробки механізмом 4 й у цьому положенні фіксується. У процесі обробки стіл виконує повздовжні переміщення зі швидкістю робочої подачі між двома шліфувальними кругами 5 і 6, що працюють периферією круга. У процесі роботи ці круги постійно контактують із правлячими роликами 7 і 8, у тому числі й у процесі здійснення робочої подачі (шліфування) деталі. Зменшення діаметра кругів 5 і 6 внаслідок зношування компенсується переміщенням кругів до оброблюваної поверхні. Такий режим правки дозволяє постійно підтримувати максимально можливі різальні властивості шліфувальних кругів, не допускати їхнього засалювання, втрати геометричної форми й розмірів профілю, що нарізується. Разом з тим, дана схема правки допускає можливість зсуву профілю, що нарізається, на протилежних сторонах деталі. Це обумовлено тим, що в подібній схемі існують взаємні зсуви правлячих роликів 7 і 8 від теоретичної площини симетрії профілю. Тому практично всі верстати даного типу мають додатковий механізм правки, розташований на станині або столі верстата. Цей механізм використовується для особливо точної правки інструментів. Тут шліфувальні круги по черзі підходять до ролика 9 і правляться врізанням або тангенціально. При правці верхнього або нижнього кругів, що обертаються в різних напрямках, ролик 9 змінює напрямок свого обертання, забезпечуючи постійний режим попутної правки. При такій схемі глибинного шліфування забезпечуються наступні характеристики геометричної точності (рис. 3.46):

- ✓ розмір і товщина ялинкового профілю в кожному струмку замка (розмір по роликах) у межах $\pm 0,01$ мм;
- ✓ відхилення по кроку одного зуба відносно іншого $\pm 0,01$ мм;
- ✓ відхилення по куту профілю в межах $\pm 0,15'$;
- ✓ зсув однієї сторони профілю "ялинки" відносно іншої (довжина до базової лінії) $\pm 0,01$ мм.

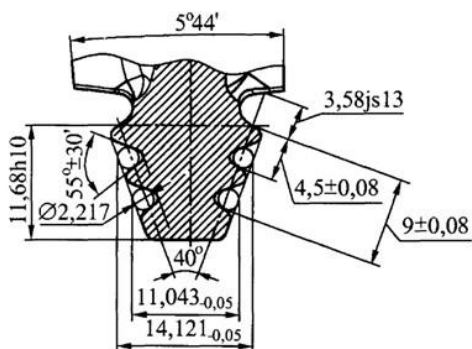


Рисунок 3.46 – Конструкція поперечного перерізу хвостовика лопатки турбіни

Глибинне шліфування реалізується в наступних технологічних умовах.

1. *Характеристика інструмента*: вид абразивного матеріалу, зернистість, твердість, структура, зв'язка мають забезпечити максимальну продуктивність у випадку бездефектного (без припалів) шліфування й у той же час зберегти високу геометричну точність профілю, який шліфується. При шліфуванні сталей і жароміцних сплавів на нікелевій основі використовують білі електрокорунди 24А, 25А, а при шліфуванні титанових сплавів – карбіди кремнію 54С, 63С.

Зернистість визначається в основному вимогами до точності профілю, що шліфується, і умовами бездефектного шліфування. Так, зі зменшенням зернистості круга збільшується число різальних зерен, що формують ту саму поверхню, тобто зростає геометрична точність формоутворення. Твердість круга T_k впливає на його зношування й температуру шліфування, від яких залежить ймовірність появи припалів. Підвищення твердості сприяє зниженню розмірного зношування і зменшенню самозаточуваності круга, однак з більшою ймовірністю приводить до появи припалів. Оптимальні співвідношення зернистості Z_k і твердості T_k встановлюються в кожному конкретному випадку експериментально.

Структура кругів, що використовуються при глибинному шліфуванні, має забезпечувати вільне розміщення й вимивання стружки з пор різальної поверхні круга, а також перенос порами часток рідини в зону контакту круга з деталлю. Ці властивості мають круги зернистістю 9...12 з пористістю $>80\%$, тобто структури 12...16.

Так, при шліфуванні "ялинкового" профілю хвостовиків лопаток ГТД найбільша розмірна й стійкість інструмента до появи припалювання, обумовлена довжиною обробки на обраних режимах, забезпечується при зернистості круга 8...12 і твердості ВМ1, ВМ2, М1.

Зв'язка абразивних кругів для глибинного шліфування має витримувати високі термодинамічні навантаження, бути водостійкою й мати високу хімічну стійкість. Ці властивості інструмента надають керамічні зв'язки К3, К5, К11.

2. *Правлячий інструмент й режими правки.* Обробка профільних поверхонь деталей з високою геометричною точністю забезпечується правкою кругів алмазними роликами. Зі всіх схем правки найбільше застосування знайшла врізна профільна (рис. 3.47).

Для її реалізації необхідно, щоб профіль робочої поверхні правлячого ролика відповідав профілю обробленої поверхні деталі. Ролики виготовляються з розташуванням алмазів в один шар, тому що зношування зерен не перевищує меж поля допуску на геометричні розміри оброблюваної поверхні деталі. Звичайно розмір поля допуску на геометричні розміри правлячого ролика становить 25...30 % від поля допуску оброблюваної деталі.

Діаметр ролика дорівнює 100...200 мм. Мікропрофіль оброблюваної поверхні при даній схемі правки визначається зернистістю ролика й концентрацією алмазів в алмазному шарі. Ролики, як правило, виготовляються зернистістю 500/400 або змішаною зернистістю (500/400...250/200).

Круги звичайно правлять методом врізання, що забезпечує більш високу геометричну точність профілю. Метод вимагає точного позиціонування алмазного ролика й круга, збігу осей симетрії. Правка може проводитися з певною періодичністю або безперервно. В останньому випадку профілювання шліфувального круга здійснюється в процесі обробки. Абразивний круг й правлячий ролик під час усього циклу обробки перебувають у постійному контакті. Компенсація зношування круга виконується дискретно або безперервно (рис. 3.48).

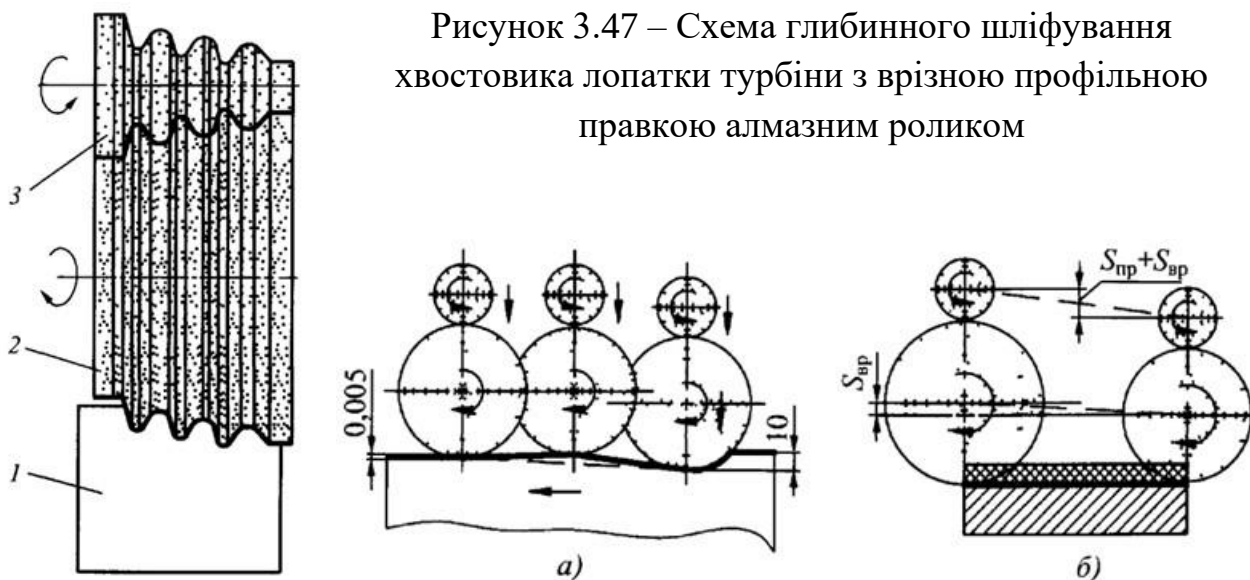


Рисунок 3.47 – Схема глибокого шліфування хвостовика лопатки турбіни з врізною профільною правкою алмазним роликом

Рисунок 3.48 – Схеми правки з дискретною (а) та безперервною (б) компенсацією зношування

Сучасні системи керування дають можливість робити переміщення на правку й компенсацію круга абсолютно синхронно, виключаючи тим самим по-

яву хвилястості на обробленій поверхні. При цьому подача на правку змінюється в межах $0,1 \dots 1$ мкм/об круга. Безперервна правка найбільш ефективна при обробці матеріалів з низькою теплопровідністю, наприклад жароміцних сталей і нікелевих сплавів, а також матеріалів, схильних до адгезійного схоплювання з різальною поверхнею круга, наприклад титанових сплавів

Режими правки визначають наступні характеристики:

- відношення швидкостей правлячого алмазного ролика й круга V_p/V_k ;
- напрямок їхнього обертання;
- товщина абразивного шару h , що знімається з круга при правці;
- тривалість виходжування круга без врізання ролика τ_e .

Для кругів твердістю ВМ1...М1, що використовуються при глибинному шліфуванні, напрямок обертання ролика відносно круга повинен бути тільки попутним, тому що в цьому випадку забезпечується найбільший градієнт ущільнення різальних зерен по товщині шару інструмента, зміненого правкою. Неприпустимо, щоб при цьому співвідношення частот їхнього обертання дорівнювало цілому числу, оскільки всі дефекти робочої поверхні ролика або погрішності його установки в цьому випадку копіюються на робочу поверхню круга. Відношення V_p/V_k повинно бути в межах $0,8 \dots 0,9$. При інших значеннях спостерігається підвищене зношування алмазного ролика.

Товщина h абразивного шару, що знімається під час правки, не повинна перевищувати зернистості круга. Істотно впливає на шорсткість обробленої поверхні тривалість виходжування τ_e , що звичайно коливається в інтервалі $1 \dots 5$ с. Подальше збільшення τ_e не знижує шорсткість на обробленій поверхні й економічно недоцільно.

3. *ЗМОТС і техніка його подачі.* Вибір ЗМОТС визначає характер температурно-деформаційної напруженості шліфування. При глибинному шліфуванні ЗМОТС повинно мати високу здатність до проникнення, змазування й миття, забезпечувати найбільш повний відвід теплоти із зони шліфування. Оптимальне поєднання цих властивостей досягається у випадку застосування синтетичних і напівсинтетичних водних ЗМОТС.

Транспортування ЗМОТС в зону різання має забезпечити ефективне використання мийних властивостей рідини, відвід шламу й відходів шліфування із зони обробки, доставку рідини в зону контакту круга з деталлю. Перераховані вимоги задовольняються у випадку подачі ЗМОТС напірним струменем. При глибинному шліфуванні цей спосіб реалізується, якщо тиск подачі рідини складає $0,6 \dots 1,2$ МПа, а її витрата на один круг складає $120 \dots 200$ л/хв.

4. *Очищення охолоджувальної рідини.* У процесі шліфування охолоджувальна рідина поступово забруднюється частинками абразивних зерен, зв'язки, стружки, пилом, волокнистими й мастильними матеріалами. Внаслідок цього

зменшується стійкість інструмента, погіршується якість поверхні, що шліфується. Тому кожен верстат для глибокого шліфування оснащений спеціальною системою очищення, що здійснює фільтрацію шляхом пропускання рідини через пористі або щільні перегородки; очищення в силових полях; фізико-механічне очищення.

5. *Режими шліфування.* Вибором технологічної схеми обробки, характеристики різального й правлячого інструмента, методу правки, способів і техніки подачі ЗМОТС можна забезпечити необхідну продуктивність процесу глибокого шліфування й необхідну якість обробки поверхні при оптимізації кожної із зазначених технологічних умов.

6. Відсутність дефектів поверхневого шару (припалів і мікротріщин) є обов'язковою умовою здійснення глибокого шліфування. Гарантоване досягнення бездефектної обробки забезпечується режимними параметрами й технікою подачі ЗМОТС.

7. При обробці жароміцних сплавів, що мають низьку теплопровідність, рекомендується вести обробку при попутній подачі деталі, що збільшує продуктивність на 30%. В'язкі теплопровідні сплави й конструкційні сталі найбільш доцільно обробляти при зустрічній подачі деталі, що забезпечує в порівнянні з попутною більш високу якість або підвищення продуктивності на 30%.

Режими різання призначаються технологом з наступних міркувань.

- ✓ Останній (чистовий) прохід здійснюється із глибиною різання й подачею деталі, які забезпечують необхідні геометричні розміри й шорсткість оброблюваної поверхні.

- ✓ Передостанній (напівчистовий) прохід виконується із глибиною різання, що гарантує видалення зміненого поверхневого шару, що виникає після чорнових проходів.

Попередні (чорнові) проходи здійснюються з метою зняття основного припуску. Тут обмеженням режимів стає потужність верстата. Тому залежно від розмірів поверхні, що шліфується, і глибини профілю, число проходів може бути різним: у першому випадку один прохід; у другому – п'ять.

З кожним попереднім проходом глибина різання зменшується. Це обумовлено тим, що при обробці "ялинкового" профілю фактична ширина обробки постійно збільшується. Тому при одній і тій же споживаній потужності шліфування глибини різання відрізняються одна від одної в широких межах.

Оскільки на успішне виконання глибокого шліфування впливають багато факторів, перед обробкою кожної нової партії деталей на встановлених режимах обробляється зразок, що атестується в центральній вимірювальній лабораторії. Тільки після цього дається дозвіл на обробку всієї партії деталей.

Після виконання операції на робочому місці проводиться повний контроль замка лопатки.

Обробка бандажних полиць і лабіринтів (рис. 3.49).

Під час попереднього механічної обробки бандажних полиць і лабіринтів деталь встановлюється по "ялинковому" профілю хвостовика (точки 1...3) установча база орієнтується уздовж осі лопатки по точках на торцях хвостовика й бандажної полиці (точки 4, 5) – напрямна база, а також уздовж осі точкой на хвостовику з боку проточної частини (точка 6) – опорна база. В цьому положенні обробляються плоскі поверхні бандажної полиці.

Обробка цих поверхонь може бути двостороннім й поєднуватися при використанні фасонного інструмента, як на наведеній технологічній схемі, або виконуватися поелементно. У кожному разі технологічні схеми базування і закріплення заготовки залишаються однаковими.

На операції напаювання на бандажні полиці пластин зі спеціальних твердих сплавів бандажні полиці лопаток турбіни, що контактують одна з одною у процесі експлуатації, для підвищення їхньої зносостійкості напаюються пластинами з більш зносостійкого матеріалу, ніж основний сплав ЖС6К.

Для напаювання звичайно застосовують пластини з таких матеріалів, як ВКНА2; ВЖЛ15; ВЖЛ2. Ці сплави відносяться до групи легованих багатофазних зносостійких твердих нікелевих сплавів. Сплави є жароміцними. У порівнянні з матеріалом лопатки вони мають більш високу твердість й міцність, особливо в умовах високих температур. Звичайно використовують припої ВПр24 й ВПр27 на основі нікелю, які мають температуру паяння 1170...1180 °С, що дещо менше температури фазових перетворень основного матеріалу (ЖС6К, ЖС6У).

Операції обробки бандажних полиць після напаювання є аналогічними (за схемами базування й закріплення, задіяному обладнанню й режимами обробки) операціям, що виконуються на етапі попередньої обробки полиць під напаювання.

На операції обробки циліндричних поверхонь лопаток (рис. 3.50) останні збирають у пристрої у вигляді імітаційного диска, що відповідає диску того ж ступеня турбіни, що й оброблювані лопатки. Лопатки встановлюють хвостовиком в імітаційний диск, при цьому лопатку фіксують в шести напрямках Точки 1...3 визначають її положення на площині (установча база), бічна поверхня зуба (точки 4, 5) фіксують її від поворотів відносно осі лопатки (напрямна база). Опорною базою є точка 6 на торці, протилежному тому, що обробляється. Ця база визначає положення осі лопатки.

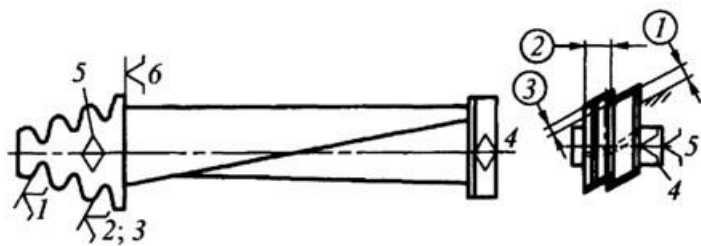


Рисунок 3.49 – Технологічна схема обробки площин бандажної полиці

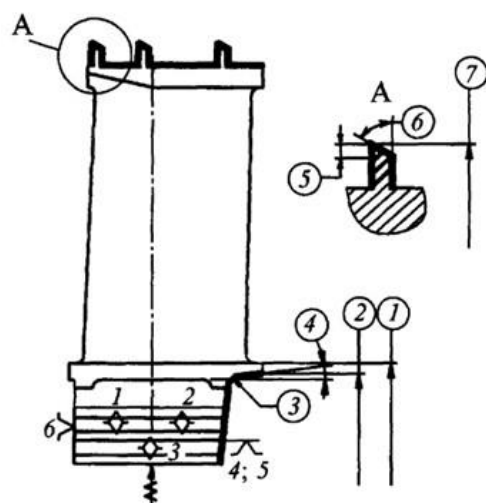


Рисунок 3.50 – Схема базування лопатки під час обробки циліндричних поверхонь

Операцію виконують на спеціальних шліфувальних верстатах, або на токарно-лобовому чи карусельному токарському верстатах, за умови їх оснащення шліфувальними головками, розміщеними на супорті верстатів. У процесі обробки спочатку формують діаметральні розміри, потім кути й радіуси. Фасонну поверхню (радіуси переходу) одержують шляхом виконання фасонної поверхні на крузі в процесі його правки, причому сам процес правки здійснюється робітником вручну. Недоліки цієї схеми обробки частково усуваються за допомогою її реалізації на карусельно-шліфувальних верстатах з ЧПК, оснащених механізмом правки круга алмазними роликами.

Тут верстат має можливість вести обробку в автоматичному режимі, тобто без втручання оператора безпосередньо в процес шліфування. Це забезпечується тим, що:

- шліфувальний круг може повертатися в площині, перпендикулярній до оброблюваної поверхні, на той або інший кут;
- різальна поверхня круга формується в ході автоматичної правки алмазним роликом або їхнім набором;
- система ЧПК верстата забезпечує керування одночасно не менш ніж трьома координатами.

Крім того, дані верстати оснащені герметичним захистом робочої зони, що дозволяє вести обробку з інтенсивною подачею охолоджувальної рідини.

Операцію обробки канавок здійснюють аналогічно попередній з тою відмінністю, що лопатки встановлюють в імітаційний диск протилежним торцем (рис. 3.51).

Лопатку встановлюють у пристрій, базують по замку, тобто профілю "ялинки". При цьому він визначає положення лопатки на площині (установні бази 1...3) і її розміщення в кутовому положенні (напрямні бази 4, 5). Уздовж осі лопатка базується за допомогою торця (опорна база 6). У цьому положенні

лопатки вижимаються гвинтами в межах зазорів між замками лопатки й пристрою. Закріплюють деталь шляхом притиснення торця хвостовика (база 6). В такому положенні обробляють канавку під фіксатор.

У процесі обробки витримують розміри ①...⑤. Розміри ①, ②, ④, ⑤ одержують за допомогою настроювання обладнання, а розмір ③ – завдяки геометричним розмірам інструмента.

Технологічні операції обробки перфораційних отворів на входній кромці й бандажних полицях: (рис. 3.52) на сьогоднішній момент загальновизнаною й найбільш широко застосовуваною технологією одержання цих отворів є електроерозійна обробка.

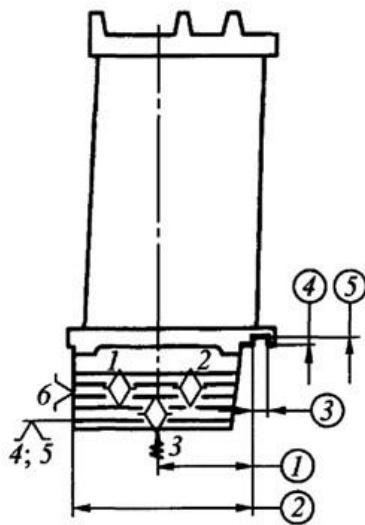


Рисунок 3.51 – Схема базування лопатки під час обробки канавки під фіксатор



Рисунок 3.52 – Схема переміщення лопатки під час прошивання охолоджувальних отворів на входній кромці: 1...3 – положення лопатки відносно електрода при послідовному прошиванні отворів

Схема обробки й обладнання, що використовується для її реалізації, визначаються конструкцією лопатки, зокрема взаємним розташуванням отворів і їхніх діаметрів. У тому випадку, якщо отвори у входній кромці лопатки перебувають на одній лінії, або паралельні один одному, технологічна схема обробки передбачає їхнє одночасне прошивання суцільними електродами з міді, латуні, вольфраму. Гребінка електродів набирається в спеціальній державці, встановленій на вертикальному супорті верстата; електроди вирівнюються по висоті в лінію, еквідистантну лінії розташування отворів на входній кромці, і за умови занурення деталі у ванну з діелектричною рідиною всі отвори прошиваються одночасно.

Нове покоління ГТД використовує деталі більш складної конструкції. Наявні в них отвори розташовані в кілька рядів, під кутом один до одного й різного діаметра. Все це вимагає постійної взаємної орієнтації деталі й інструмента

одна відносно одного в процесі налагодження, тобто перед початком робочого циклу. Після перфорації вхідної кромки й бандажної полиці потрібно видалити з отворів дефектний шар і виконати плавні переходи в трактових порожнинах лопатки, що сполучають із щілиною на вихідній кромці. З метою закруглення гострих кромek у внутрішніх трактових порожнинах лопаток у технологічний процес їхнього виготовлення вводять операції абразивно-рідинного полірування. З них найпоширенішим є метод гідроабразивної обробки. Він реалізується шляхом прокачування через внутрішні порожнини лопатки абразивно-рідинної суміші. Суміш прокачується під тиском порядку 0,6 МПа через трактову порожнину з виходом через щілину на вихідній кромці. Швидкість знімання металу визначає тиск, під яким подається абразивно-рідинна суміш, і зернистість абразиву. Після гідроабразивної обробки перевіряється витрата охолоджувального середовища через внутрішні порожнини лопатки. Перевірка здійснюється на спеціальних установках під постійним тиском. У ході операції контролюється загальна витрата охолоджувального середовища (води) через внутрішню порожнину лопатки. Витрата вимірюється кількістю прокачаної в одиницю часу рідини. Одночасно фіксується рівномірність витікання рідини через вихідну кромку лопатки. Цей параметр контролюється на відповідність установленому конструктором еталону. У випадку невідповідності заданим параметрам лопатка піддається повторному хонінгуванню. Якщо вона визнається придатною, на неї наносять відповідне покриття.

Технологічний процес виготовлення лопаток турбіни завершується здійсненням спеціальних операцій, пов'язаних із нанесенням на робочі поверхні лопаток (насамперед на проточну частину лопатки) жароміцних покриттів. З метою подальшого поліпшення робочих характеристик газових турбін й, зокрема, підвищення надійності лопаток, які працюють при високих (1000...1300 °C) температурах, при цьому зазнають знакозмінних навантажень й піддаються корозійному й ерозійному руйнуванню, у теперішній час застосовують теплозахисні покриття, що складаються з жаростійкого металевого підшару системи Me-Cr-Al-Y й термобар'єрного керамічного покриття $ZrO_2-Y_2O_3$.

Їхнє застосування зумовлене тим, що металевий підшар захищає матеріал лопатки від інтенсивного окислювання під впливом високих температур, а керамічний захисний шар має корозійну стійкість і протистоїть ерозійному впливу часток пилу, коксу й окалини, що знаходяться в газовому потоці. Такі покриття забезпечують підвищення довговічності лопаток ГТД в 2,5...3 рази в порівнянні з лопатками без покриттів.

Технологічний процес виготовлення турбінних лопаток завершується слюсарними, полірувальними, мийними операціями. Технологічними операціями остаточного контролю лопаток закінчується їхнє виготовлення. Контроль

лопаток виконується з метою виявлення відхилень від конструкторської документації, допущених під час виготовлення деталей.

Технологія виготовлення лопаток турбін на мультифункціональних верстатах. Поопераційна технологія виготовлення робочих і соплових лопаток турбін передбачає порядок виконання операцій у рамках серійного й крупносерійного виробництва. В умовах одиничного, дослідного й дрібносерійного виробництва дана технологія неприйнятна. Вона не забезпечує необхідної гнучкості (переналагоджуваності) потужностей, вимагає тривалої й вартісної підготовки виробництва, а також має тривалий цикл виготовлення деталей.

Названі проблеми усуваються при реалізації процесу виготовлення лопаток турбіни на багатоцільових механообробних центрах, зокрема фірм Magerle, Blom, ELB-Schliff (рис. 3.53).

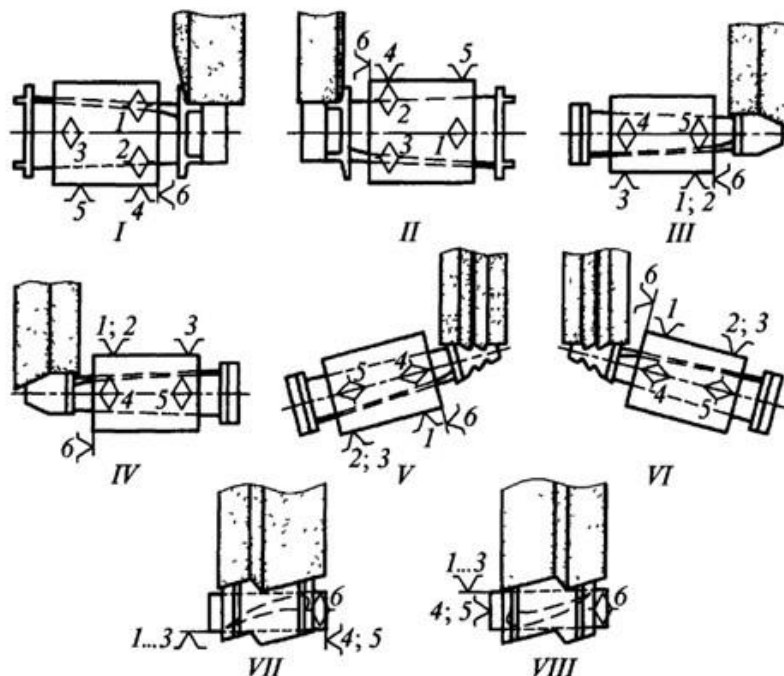


Рисунок 3.53 – Технологічний процес обробки соплової лопатки на багатоцільовому верстаті: I...VIII – відповідно перший ... восьмий переходи

Механообробні центри цих фірм мають до п'яти одночасно керованих координат, кілька механізмів правки, шпиндельні вузли, здатні розмістити низку шліфувальних кругів або інструментальні магазини на шість-вісім планшайб. У той же час, пристрій для встановлення й закріплення деталей забезпечують єдність технологічних баз при перевстановленні деталей. У першу чергу це досягається за допомогою закріплення деталей у касеті (брикеті). Встановлення й закріплення деталі шляхом заливання в брикет дозволяють при обробці лопатки на багатоцільовому верстаті здійснити обробку практично всіх її поверхонь за одне встановлення, не міняючи технологічних баз. Тут операції обробки торців

хвостовика з боку вхідної й вихідної кромок, шліфування площин і клина хвостовика з боку спинки корита, обробки "ялинкового" профілю замка з боку спинки й корита, обробки зигів та інші операції можуть бути виконані за один установ брикету. Обмеженням числа поєднаних переходів тут є число шліфувальних кругів у магазині верстата, що мають відповідний тій або іншій операції профіль круга. Однак такий спосіб можна застосовувати не на всіх типорозмірах деталей і конструкціях лопаток, зокрема блоки лопаток соплового апарата, що складаються із трьох-шести деталей, заливати в брикет явно недоцільно. У цьому випадку число перевстановлень при зміні технологічних баз повинно бути мінімальним, краще два. При дотриманні цих умов обробки лопаток соплових апаратів на багатоцільовому верстаті також приводить до концентрації операцій, перетворенню технологічних операцій попередніх технологічних процесів у технологічні переходи. Приклад такої технології наведений на рис. 3.35.

При цьому використовуваний для даної обробки механообробний центр повинен мати:

- можливість взаємного переміщення деталей й інструмента не менш ніж у п'ятьох координатах;
- систему керування, що забезпечує одночасне переміщення деталі й інструмента в п'ятьох координатах;
- магазин інструментів або можливість розміщення на шпинделі верстата низки інструментів;
- кілька механізмів правки, працюючих у безперервному й дискретному режимах;
- можливість регулювання частоти обертання шпинделя в широкому діапазоні без втрати потужності приводу;
- спеціальну систему подачі й очищення ЗМОТС.

Такі технологічні можливості забезпечують механообробні центри фірм Blom (серії Profimat), ELB-Schliff (серії Compact-Master); Magerle (серії MFC). Наприклад, верстат мод. MFC-130 фірми Magerle має три керовані координати. Широкі технологічні можливості забезпечуються тут за допомогою двох механізмів безперервної правки, встановлених над шліфувальною бабкою, і "глобусного" стола, розміщеного на станині верстата.

Завдяки механізмам безперервної правки різальна поверхня круга постійно підтримується в працездатному стані. При цьому система керування верстата дозволяє компенсувати зношування круга й зменшення його окружної швидкості. Два алмазні ролики, зміщені один відносно одного уздовж циліндричної утворюючої шліфувального круга, дають можливість сформувати на його периферії різні профільні поверхні. Внаслідок цього тим же самим кругом ведуть обробку будь-яких профільних елементів лопаток.

Оскільки вильоту шпинделя не завжди досить для розміщення необхідного числа шліфувальних кругів або вони обмежують переміщення глобусного стола, фірма Magerle пропонує як опцію до даного обладнання інструментальний магазин на шість-вісім кругів. Ця опція суттєво розширює технологічні можливості верстата. Це тим більш важливо тому, що останні моделі верстатів дозволяють вести обробку жароміцних сплавів не тільки в режимі глибинного шліфування зі швидкістю круга до 30 м/с, але й в режимі високошвидкісного шліфування кругами з надтвердих матеріалів (НТМ) зі швидкістю 80 м/с. Для даних кругів не потрібен механізм правки, але наявність магазину для їхньої автоматичної зміни є обов'язковою.

Конструкції глобусних столів можуть бути різні, так само, як і фірми, що їх випускають. Цей вузол являє собою опцію, що може бути поставлена на будь-яку плоскошліфувальну машину, чия система ЧПУ дозволяє керувати одночасно п'ятьма координатами. Глобусний стіл забезпечує поворот лопатки під кругом для обробки її різних профільних елементів зовнішнього контуру. Більше того, використання п'яти керованих координат дозволяє обробляти циліндричні поверхні лопатки. При цьому радіус таких поверхонь визначається мінімальним діаметром шліфувального круга, що може бути в них уписаний.

Використання такого обладнання дає можливість значно скоротити цикл технологічної підготовки нових виробів (приблизно з 2...3 місяців до 2...3 тижнів). Сам же цикл виробництва турбінних і соплових лопаток з 1,5...2 місяців скорочується до 1...2 тижнів.

Для умов одиничного й дрібносерійного виробництва застосування даної технології є найбільш доцільним, оскільки обробка деталі за один установ (коли це є можливим) або з невеликим числом перевстановлень на єдиних базах істотно підвищує точність обробки.

Розглянуту технологію й відповідні їй технологічні потужності доцільно запровадити на кожному підприємстві, що виготовляє лопатки турбіни. Дані потужності становлять технологічний мінімум підприємства, тому що дозволяють виготовити відповідно до вимог кресленика лопатку турбіни будь-якої конструкції. При цьому технологічний цикл виготовлення мотокомплекту зі 100...120 шт. деталей не перевищує одного тижня, а терміни технологічної підготовки зведені до мінімуму. Однак при збільшенні потреби у випуску лопаток ця технологія поступається місцем технологіям крупносерійного чи масового виробництва з більш дрібними операціями, що виконуються на спеціальному обладнанні в рамках поопераційних технологій, описаних раніше.

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягає різниця в умовах експлуатації лопаток турбін і компресорів, основна різниця в їх конструкції, різниця у розмірах?

2. Який максимальний кут розвороту один відносно іншого перетинів профілю пера лопаток турбіни по його довжині?
3. Які головні чинники впливають на побудову технології виготовлення лопаток ротора турбіни?
4. Метод одержання заготовок лопаток турбін, виходячи з яких причин застосовують саме цей метод?
5. В яких випадках під час обробки лопаток турбін застосовують пристрої-супутники?
6. Який рівень точності виготовлення досягається під час обробки ялинкового профілю лопаток турбін і за рахунок застосування чого?
7. Шліфування яким методом: копіювання, обкату чи іншим – використовують для формоутворення зубів ялинкового профілю лопаток турбін по цілому без застосування лезової обробки? Де іще використовують метод формоутворення по цілому без застосування лезової обробки?
8. Чи застосовують процес високошвидкісного шліфування під час обробки лопаток турбін і за яких умов? На яких швидкостях різання?

3.5. Типова технологія виготовлення лопатки компресора

Технологія виготовлення лопаток ГТД визначається, виходячи з їхньої геометричної форми, властивостей матеріалу й експлуатаційних характеристик, що вимагаються. Технологія виготовлення лопаток компресора відрізняється від технології виготовлення робочих лопаток турбіни тим, що в тому числі вони працюють у порівняно помірних температурних умовах.

На відміну від умов роботи лопаток турбіни умови роботи лопаток ротора компресора висувають до матеріалів, з яких вони виготовлені, вимоги збереження міцності при температурі до 600°C и високої корозійної стійкості. Для їхнього виготовлення широке застосування знаходять титанові сплави. Головна перевага цієї групи матеріалів перед іншими конструкційними сплавами полягає в тому, що високі механічні характеристики й корозійна стійкість поєднуються в них з малою густиною. Титанові сплави за питомою міцністю перевершують більшість жароміцних сталей при температурі 500°C, що дає більшу економію маси. Теплопровідність титану, що дорівнює 7,5 Вт/(м·°C), в 5 разів менша, ніж у заліза, й у 14 разів менша, ніж у алюмінію. У стільки ж раз нижче і його температуропровідність. В експлуатаційних умовах вони мають високу корозійну стійкість у різних кліматичних умовах і в 3 % розчині кухонної солі. Титанові сплави задовільно деформуються в гарячому стані, після чого заготовки потрібно відпалювати.

Ці сплави мають високу термічну стабільність й не стають крихкими за умов тривалої експлуатації під напруженням в умовах нагрівання до 400...550°C, задовільно обробляються різним лезовим й абразивним інструментом. Вони відносяться до VII групи за їх оброблюваністю різанням. Орієнтовна

швидкість різання сплавів ВТ8, ВТ9 складає 0,30-0,32 від швидкості різання сталі 45. Найбільше поширення одержали сплави марок ВТЗ-1, ВТ8, ВТ9, ВТ20. Хімічний склад й механічні характеристики титанових сплавів наведено в табл. 3.4-3.5.

Крім титанових сплавів для виготовлення лопаток компресора раніше широко застосовувалися корозійностійкі сталі марок 13Х14НВФРА, 1Х12Н2ВРФ й ХН35ВТЮ-ВД, а також різні алюмінієві сплави. Але навіть їхня низька вартість і хороша оброблюваність у порівнянні з титановими сплавами не дозволяють використати їх в сучасних напружених конструкціях ГТД.

**Таблиця 3.4 – Хімічний склад титанових сплавів
для виготовлення лопаток компресора**

Марка сплава	Хімічний склад, %						
	Al	Mo	Cr	Si	Fe	C	Zr
ВТЗ-1	5,5...7,0	2,0...3,0	0,8...2,3	0,14...0,4	0,2...0,7	< 0,1	< 0,5
ВТ8	6,0...7,3	2,8...3,8	–	0,2...0,4	< 0,3		
ВТ9	5,8...7,0			0,2...0,35	≤ 0,25		0,8...2,5

**Таблиця 3.5 – Механічні характеристики титанових сплавів
для виготовлення лопаток**

Марка сплава	Температура випробування, $T, ^\circ C$	Межа міцності σ_b , МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Ударна вязкість a_k , кДж/м ²	Межа тривалої міцності σ_1 , МПа
ВТЗ-1	20	1000...1200	10	30	3,0	—
	400	750	—	—	—	680
	450	650				650
ВТ8	20	1000...1200	9	30		—
	450	750	—	—		650
	500	650				500
ВТ9	20	1050...1250	9	30		—
	500	700	—	—		600

Лопатки компресора (рис. 3.54-3.55) характеризуються більшою різноманітністю конструкцій, широким діапазоном типорозмірів і матеріалів, що застосовуються. При цьому геометрична точність виготовлення лопаток компресора

тісно пов'язана з параметрами якості поверхневого шару: шорсткістю, величинами й розподілом залишкових напружень, глибиною й ступенем наклепу, тобто з тими параметрами, які багато в чому визначають опір утомлюваності даних деталей.

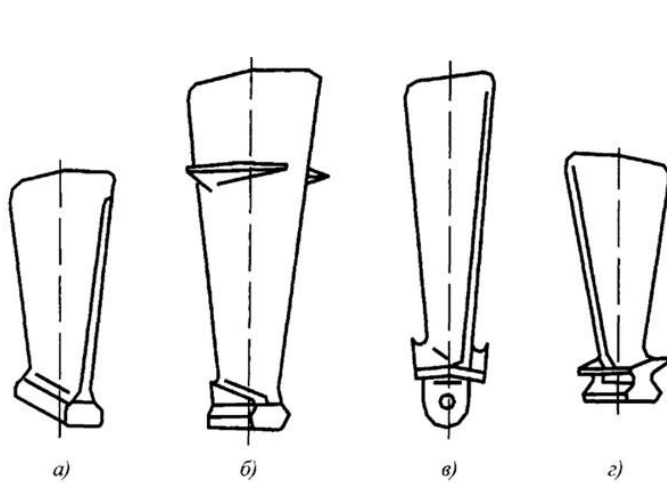


Рисунок 3.54 – Конструкції лопаток компресора: *а* – з хвостовиком типу "ластівчин хвіст"; *б* – з антивібраційними полками; *в* – з шарнірним хвостовиком; *з* – з трапецеїдальним хвостовиком

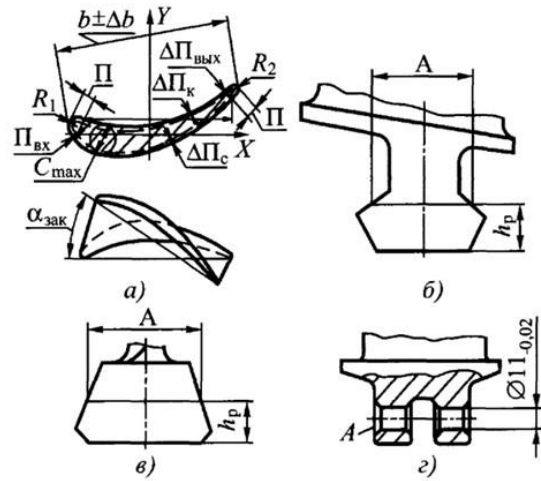


Рисунок 3.55 – Конструктивні елементи робочих лопаток компресора: *а* – перо лопатки; *б* – хвостовик типу "ластівчин хвіст"; *в* – кільцевий трапецеїдальний хвостовик; *з* – шарнірний хвостовик

Все різноманіття типорозмірів лопаток компресора доцільно розділити на групи за наступними конструктивно-технологічними ознаками:

- за довжиною пера: до 80 мм, з 80 до 600 мм, та понад 600 мм;
- за матеріалом: корозійностійкі сталі, титанові, жароміцні й алюмінієві сплави;
- за конструкцією хвостовика: типу ластівчин хвіст, шарнірний, призматичний та циліндричний (поворотні лопатки статора);
- за наявністю антивібраційних полиць.

Перо лопаток компресора має складну просторову форму з профілями перетинів, що змінюються по довжині лопатки. Перетини профілю пера лопаток розвернуті по його довжині один відносно іншого на кути до 90° .

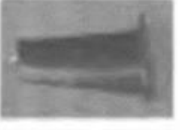
Поверхні спинки й корита пера лопатки можуть бути:

- лінійчаті, що являють собою прямі лінії, які переміщують у просторі за певним законом;
- складно-фасонні, що утворюються в результаті руху будь-якої кривої по криволінійній утворюючій.

Високі вимоги до циклічної міцності лопаток компресора обумовлюють метод одержання заготовок – це гаряче штампування. Воно може бути ізотермічним або високошвидкісним, але в кожному разі заготовка має високі механічні характеристики деформованого при штампуванні матеріалу.

Конструкція лопатки й спосіб одержання заготовки визначають структуру групового технологічного процесу. Найбільш широко застосовуються технологічні процеси, наведені в табл. 3.6. Тут всі технологічні процеси визначені видом заготовки й конструкцією деталі.

Таблиця 3.6 – Найбільш поширені типові процеси виготовлення лопаток компресора

Метод обробки прото- чної частини	Технологічний процес				
Ізотермічне штампування					
	Заготовка	Обробка замка у брикеті	Полірування стрічкою	Безрозмірне полірування	
					
	Заготовка	Підготовка баз під ЕХО	ЕХО	Обробка замка	Безрозмірне полірування
					
	Підготовка баз під ЕХО	ЕХО	Фрезерування профілю	Полірування стрічкою	Безрозмірне полірування

У першому випадку проточна частина лопатки сформована методом ізотермічного штампування остаточно, тобто в технологічному процесі проточна частина не піддається розмірній механічній обробці. Точність виготовлення ізотермічно штампованих лопаток з наступною термофіксацією 0,05...0,1 мм. Для низки конструкцій лопаток, що використовуються у двигунах наземного застосування, ця точність цілком припустима. Для виробництва таких лопаток технологічний процес передбачає тільки операції механічної обробки замка й полірування проточної частини з метою одержання необхідної шорсткості.

У другому випадку заготовка виготовлена методом гарячої штамповки з припуском 1,0 ...1,5 мм на сторону й допуском +0,4/-0,3 мм. Конструкція проточної частини забезпечує вільний доступ до неї інструмента, який має зворотну кривизну профілю. Такі конструкції визначають використання об'ємного

електрохімічної обробки при формуванні проточної частини лопаток. Вільний доступ об'ємних електродів як з боку спинки, так і з боку корита лопатки дозволяють сформувати профіль проточної частини лопатки без наступного доопрацювання.

У третьому випадку наявність антивібраційних полиць на проточній частині лопатки визначає використання в якості основного технологічного процесу високошвидкісного фрезерування проточної частини. При цьому наявність антивібраційних полиць визначає необхідність застосування кінцевих фрез зі сферичною різальною частиною.

Разом з тим, всім наведеним вище технологічним процесам властиво багато загальних технологічних операцій, що дозволяє будувати технологічний процес їхнього групової обробки.

Типовою технологією механічної обробки лопаток компресора є:

- ✓ Підготовка технологічних баз заготовок:
 - вхідний контроль заготовки;
 - виготовлення технологічних баз від штампувальних баз лопатки;
 - забезпечення рівномірності припуску з боку спинки, корита й прикомлевих ділянок;
- ✓ Електрохімічна обробка профілю пера;
- ✓ Механічна обробка профілю пера:
 - поопераційна обробка спинки й корита (варіант 1);
 - одночасна обробка спинки й корита лопатки (варіант 2);
- ✓ Обробка хвостовиків лопаток;
- ✓ Технологічні операції шліфування проточної частини лопаток;
- ✓ Технологічні процеси викінчувальної обробки:
 - розмірне полірування лопаток;
 - безрозмірне полірування лопаток;
 - зміцнювання лопаток;
- ✓ Спеціальні операції:
 - нанесення покриття;
 - операції зварювання лопаток;
- ✓ Контрольні операції.

Підготовка технологічних баз заготовок.

Під час вхідного контролю заготовок використовують шість базових точок, які забезпечують їх вхідний контроль. Розташування цих точок залежить від конструкції заготовки. Найбільш поширені конструкції наведені на рис. 3.56.

На рис. 3.56, а, технологічними базами є три точки на профілі пера (дві в перетині A_5 й одна в перетині A_2) – це установча база. Опорною базою слугує точка 4 на полиці замка лопатки, напрямною – точка 5 на торці хвостовика з

боку вхідної кромки й точка 6 на бобишці з боку профілю пера. На рис. 3.56, б установчою базою є три точки на проточній частині (1...3); напрямною базою – точки 5 і 6 на технологічних бобишках; опорною – точка 4 на одній зі сторін технологічної бобишки, розташований на боковій поверхні замка. У третьому випадку (рис. 3.56, в) установчу базу також складають точки 1...3 на проточній частині деталі; напрямну – точки 5 і 6 на циліндричних бобишках; опорну – точка 4 на торці хвостовика з боку проточної частини. На заготовчих операціях контролюють профіль пера в перетинах. Перевіряють величину припуску по перу з боку спинки або корита. Звичайно для гарячого штампування це $>1,5...2$ мм на сторону, ізотермічного штампування – $0,2...0,4$ мм.

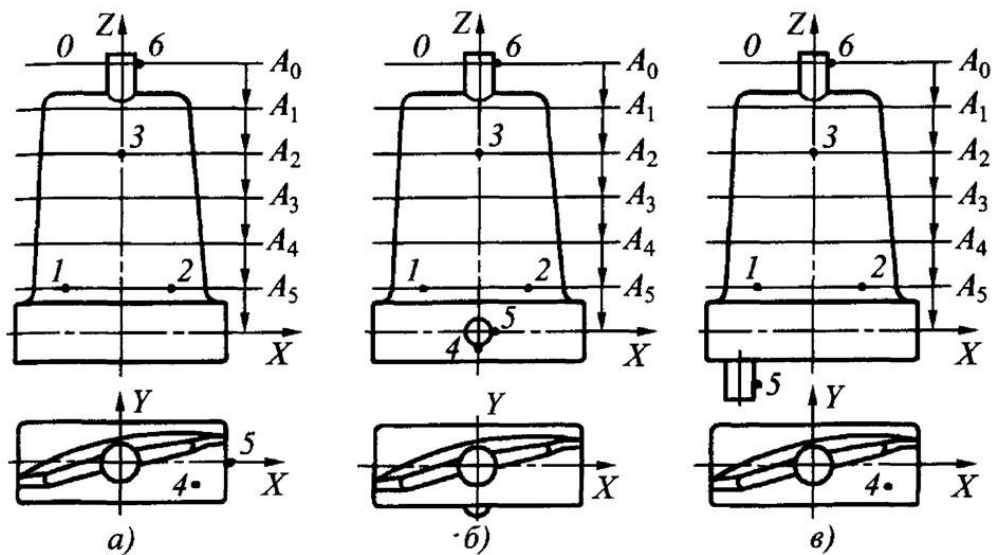


Рисунок 3.56 – Ескізи заготовок компресорних лопаток з різним розташуванням технологічних баз: а – з однією технологічною бобишкою; б – з двома технологічними бобишками, одна з яких знаходиться на боковій частині хвостовика; в – з двома технологічними бобишками у вигляді цапф, розташованих на торцях пера й хвостовика

Сутність операції виготовлення технологічних баз від штампувальних баз лопатки – це перехід від штампувальних баз (баз на заготовці), себто точок 1...6, на бази (поверхні), сформовані механічною обробкою, а саме: центрові отвори на торцях хвостовика – бази 1', 2' і 3', 4', що виключають можливість переміщення деталі уздовж осей Y і Z , а також обертання навколо них; торець хвостовика – база 5', що не дозволяє заготовці переміщатися по осі X ; фаска на технологічній бобишці – база 6', що виключає обертання деталі навколо осі X . Схема зміни баз від штампування до напівфабрикату деталі наведена на рис. 3.57. Тут заготовка лопатки встановлюється в пристрій на точки 1...6, сформовані під час штампування, й механічно обробляється. Під час обробки ви-

тримуються розміри ①...⑤. Одержання необхідних розмірів є умовою стабільності одержання нових технологічних баз 1'...6'.

Найбільш важливим під час виконання даної технологічної операції є встановлення лопатки в пристрій (касету) для виготовлення технологічних баз. Від цього залежить рівномірність розподілу припусків на заготовці з боку спинки й корита лопатки. Сутність операції полягає в тому, що зацентрування лопаток здійснюється на багатоцільовому оброблювальному центрі, оснащеному вимірювальною головкою фірми Zeiss. Для реалізації цієї технології розроблено спеціальний пристрій (рис. 3.58).

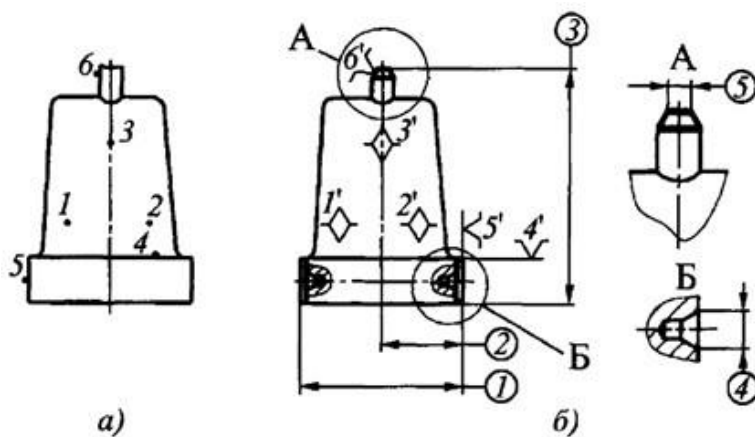


Рисунок 3.57 – Схема створення нових технологічних баз для механічної обробки від баз заготовки: *а* – розташування баз заготовки; *б* – бази, сформовані під час механічної обробки

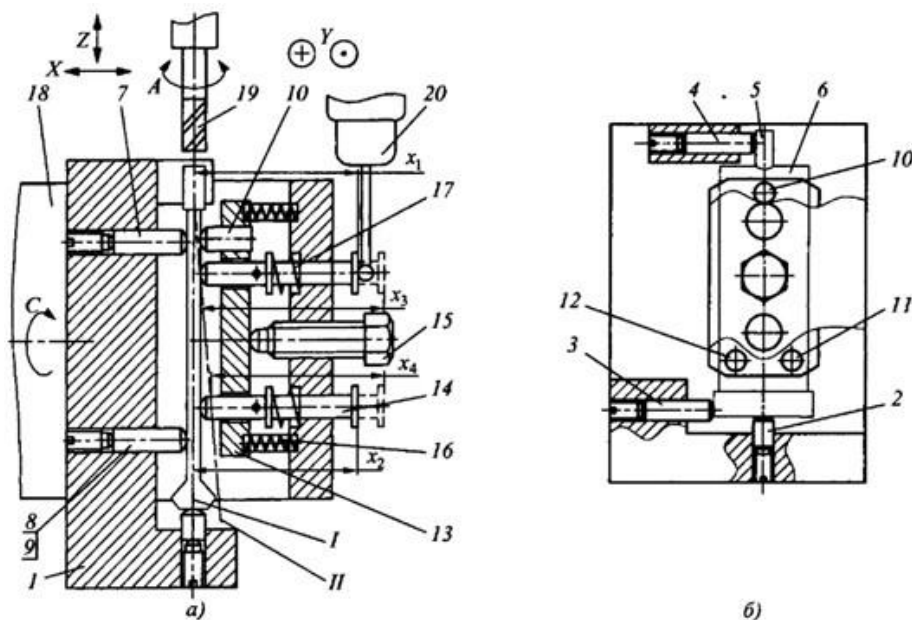


Рисунок 3.58 – Схема пристрою для виготовлення технологічних баз: *а* – загальний вигляд; *б* – вигляд зверху

Спосіб закріплення лопаток в даному пристрої є наступним. На столі 18 багатоцільового механообробного центру, який має декілька одночасно керованих координат, розміщують пристрій для закріплення лопатки. Лопатку 6 встановлюють у пристрій на шість установчих елементів. Положення всіх шести установчих елементів спочатку налагоджують по еталону, переміщуючи їх за

допомогою гвинтів до тих пір, поки вісь еталону (положення *I*) не співпадає з віссю 19 інструмента (шпинделя станка). У подальшому положення упорів 2...4 й 7...9 є незмінним. У встановленому положенні лопатку 6 закріплюють за допомогою затискних елементів 10...12. В процесі закріплення вісь 5 лопатки 6 займає положення *II*, відмінне від положення *I* осі еталона. У закріпленому положенні вимірюють відхилення положення *II* осі 5 лопатки 6 від положення *I* осі еталона. Операцію здійснюють за допомогою вимірювальної процедури, що передбачає: встановлення в шпиндель верстату вимірювальної головки 20; її підхід до кожної скалки 14, яка виходить за межі корпусу 1; обмацування торця скалки 14, протилежний кінець котрої є притиснутим до поверхні лопатки 6 пружиною 17. В результаті цього вимірюють відстані між віссю *II* й торцями кожної зі скалок 14, встановленої в тому чи іншому місці, себто розміри x_3 й x_4 . Їх порівнюють з відстанями між еталонним положенням осі *I* й торцями скалок x_1 й x_2 . Потім визначають відхилення осі у місці встановлення кожної зі скалок.

Після визначення відхилення осі 5 чергової закріплюваної лопатки 6 від еталонного положення система керування верстатом переміщує інструмент (шпиндель станка) по осям *X*, *Y*, *Z* й *A*, а також повертає стіл 18 верстату з розміщеним на ньому пристроєм навколо осі *C*. Обопільне переміщення здійснюють до тих пір, поки вісь 5 закріпленої лопатки 6 не співпадає з віссю 19 інструмента. Таким чином деталь орієнтується завдяки переміщенню шпинделя й пристрою відносно один одного, а не завдяки переміщенню деталі у пристрої.

Далі виконується механічна обробка поверхонь лопаток, наприклад зацентрування технологічних базових поверхонь, фрезерування замка й т.п.

Операція забезпечення рівномірності припуску з боку спинки, корита й прикомлевих ділянок застосовується у тих випадках, коли профіль лопатки піддають електрохімічній обробці (ЕХО). При цьому необхідно забезпечити рівномірний зазор між профілями пера лопатки й електродами, встановленими як з боку спинки пера, так і з боку корита (рис. 3.59). Тут треба стабілізувати значення припуску, що знімається, в радіусах переходу до замка лопатки. Цей припуск, як правило, значно більший за припуск по профілю пера. Крім того, існує деяка нерівномірність в його розподілі з різних боків профілю пера, що обумовлено особливостями штампування випуклих і увігнутих поверхонь. Для цього здійснюються обов'язкові операції фрезерування радіусів переходу від пера до замка. Лопатка встановлюється у центри спеціального пристрою, в якому технологічні центри й фаски використовуються як для встановлення (позиціонування) деталі, так і для її закріплення, й оброблюється на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК, що дозволяє вести обробку у трьох координатах, які є одночасно керованими.

Після обробки лопатки з одної сторони профілю її перевертають навколо осі X на 180° . Під час повороту деталі на 180° однозначність її положення не змінюється. Деталь як з однієї сторони криволінійної поверхні, так і з іншої оброблюється відносно однієї осі, положення якої не змінилося.

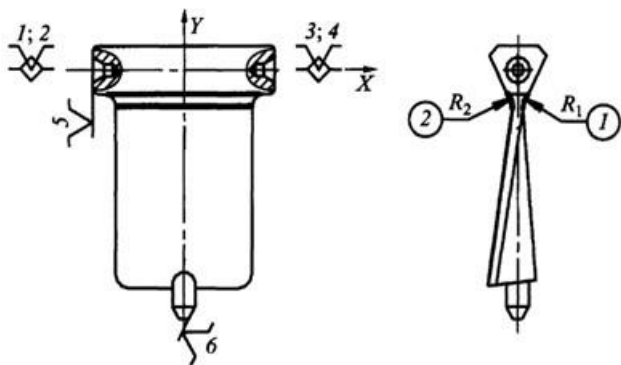


Рисунок 3.59 – Схема базування лопатки під час обробки радіусів R_1 і R_2 переходу з боку спинки й корита

Радіус спряження фрезерується кінцевим інструментом з різальною частиною у вигляді конуса, який є спряженим зі сферичною кінцевою частиною, радіус якої відповідає радіусу переходу на деталі.

Операція електрохімічної обробки профілю пера.

Процес ЕХО ґрунтується на використанні явищ розчинення поверхні анода (деталі) в електроліті. Сутність даного методу: струмінь електроліту,

що протікає з великою швидкістю у зазорі між катодом (електродом-інструментом) и поверхнею анода (лопаткою), при пропущенні струму великої щільності інтенсивно розчиняє метал на поверхні аноду (рис. 3.60). При малих відстанях між електродами й лопаткою (0,08...0,1 мм) на аноді копіюється профіль інструмента (пера лопатки з боку корита чи спинки). Для підвищення інтенсивності знімання металу з анода збільшують щільність струму до 75 А/см^2 й вище. Інтенсивна циркуляція електроліту між лопаткою й катодом забезпечує видалення продуктів анодного розчинення, охолодження електродів і перемішування електроліту. При виконанні даної операції заготовка встановлюється в

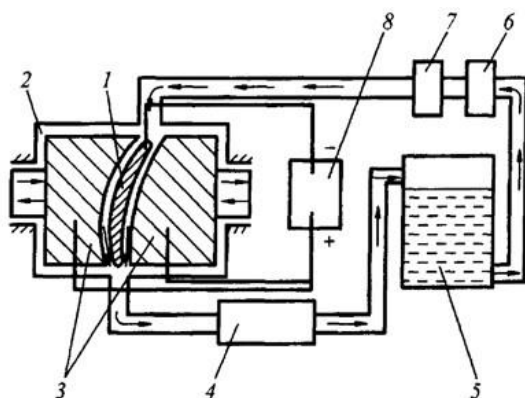


Рисунок 3.60 – Схема установки для ЕХО: 1 – робоча камера; 2 – лопатка; 3 – джерело струму; 4 – нагнітач; 5 – теплообмінник; 6 – бак з електролітом; 7 – центрифуга; 8 – електроди (інструменти)

спеціальний пристрій, при цьому базування здійснюється аналогічно попередній операції. Час обробки лопатки з довжиною пера до 100 мм становить 7...8 хв.; шорсткість обробленої поверхні Ra 1,25...2,5.

Необхідна точність обробки залежить від способу прокачування електроліту, характеру

плину рідини в міжелектродному зазорі й багатьох інших факторів, у тому числі температури електроліту, ступеня його очищення й т.п.

На ці процеси впливає й криволінійність поверхні проточної частини лопатки, і насамперед радіусного переходу від пера лопатки до хвостовика. Експериментально встановлений оптимальний діапазон кута одночасного нахилу електродів-інструментів до осі лопатки ($60\ldots 80^\circ$) при подачі електроліту з боку кінцевої частини пера лопатки.

Після операції ЕХО лопатки проходять слюсарно-полірувальні операції. В ході цих операцій виконується припасування вхідної й вихідної кромки до проточної частини лопатки, а також спряжень профілю пера з хвостовиком по відповідним еталонам, потім радіусні частини полірують вручну.

Недолік ЕХО – на поверхні пера лопатки після операції спостерігається травлення по границях зерен. Глибина травлення досягає $0,01\ldots 0,03$ мм. Через те, що розтравлені границі зерен можуть служити джерелами руйнування, цей поверхневий шар має бути знятим. Звичайно для цього застосовують безрозмірне полірування лопаток, яке здійснюється на фінішних операціях. Необхідність процесу полірування обумовлена ще й тим, що після ЕХО в поверхневому шарі лопаток виникають розтягувальні напруження досить великих значень ($120\ldots 140$ МПа) на глибині $5\ldots 7$ мкм.

Метод ЕХО є директивним при обробці профілю пера лопаток довжиною до 120 мм. У цьому випадку він забезпечує одержання необхідної точності. При обробці деталей довжиною >150 мм альтернативою даному виду обробки служать операції механічної обробки профілю пера, які можуть виконуватися без операцій попереднього розподілу припуску.

Операція механічної обробки профілю пера.

Існують два варіанти виконання цього виду обробки. Вибір того або іншого з них залежить від конструкції деталі й устаткування для цього.

Поопераційна обробка спинки й корита (варіант 1).

За цим варіантом ведуть обробку лопаток як ротора, так і статора. Схема базування, вид технологічних баз, а відповідно, і конструкції робочих пристроїв для встановлення й закріплення деталі залежать від типорозміру й конструкції деталі. У тому випадку, якщо проточна частина лопатки має розміри по довжині пера в межах 150 мм, ширину хорди до 80 мм, кути закручення профілів відносно хвостовика до $\pm 10^\circ$, можливе використання технологічних центрів і фасок як для встановлення (позиціювання) деталі, так і для її закріплення. Конструкції таких пристроїв ми вже розглядали.

Однак не всі конструкції лопаток дозволяють використання технологічного центра не тільки для встановлення, але й для закріплення деталі. У першу

чергу це стосується лопаток статора, що мають полки хвостовика з обох сторін проточної частини (рис. 3.61).

У цьому випадку лопатка встановлюється на базові поверхні, у якості яких можуть служити центрові отвори у бобишках полиць хвостовиків (бази 1, 2 й 3, 4, а також торець будь-якої з бобишок (база 5)). Повороту лопатки навколо власної осі (осі X) перешкоджає наявність упору в одну із площин хвостовика (база 6). Дані бази дозволяють однозначно визначити положення деталі в просторі, однак при обробці профілю пера їхня жорсткість може виявитися недостатньою для надійного закріплення заготовки й утримання її у встановленому положенні під дією сил різання. Тому при обробці деталей досить великих розмірів встановлення деталей відбувається на площині хвостовиків, що характеризується розмірами A_1 й A_2 (рис. 3.61). У цьому випадку деталь встановлюється в пристрій за схемою, наведеної на рис. 3.62, й оброблюється. При цьому інструмент переміщається в напрямках X , Y , Z (три одночасно керовані координати). Деталь у даній схемі має дві керовані координати, що забезпечують поворот навколо осі B на 360° (четверта координата) і поворот навколо осі C (п'ята координата).

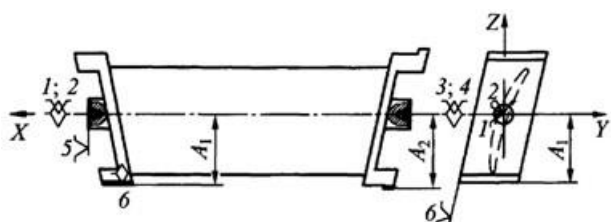


Рисунок 3.61 – Схема базування статорної лопатки при фрезеруванні профілю пера

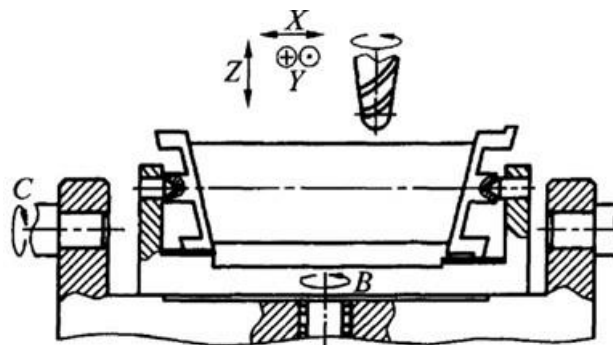


Рисунок 3.62 – Схема руху інструмента й заготовки при фрезеруванні профілю пера (варіант 1)

Як правило, кут повороту навколо осі C не перевищує $\pm 110^\circ$. Однак у залежності від положення пристрою на качалці верстата, що виконує роль координати C , значення цього кута може бути різним. Якщо вісь C перебуває вище центрів пристрою (осі X деталі), то можливим є поворот на більший кут й, відповідно, обробка максимальної площі поверхонь за один установ. Якщо вісь C розташована нижче осі X , то можливості обробки істотно знижуються, тому що зменшується кут нахилу деталі по осі C .

Дана схема обробки реалізується на багатоцільових фрезерних центрах, оснащених системою керування Sinumerik 840D, що забезпечує можливість одночасної п'ятикоординатної обробки і гарантує практично "точкове" торкання

заготовки. Таким чином, вся оброблювана поверхня може бути сформована дуже вузькими рядками шириною від 0,2 мм.

Одночасна обробка спинки й корита лопатки (варіант 2). У ряді випадків він забезпечує більш точне взаємне розташування оброблюваних поверхонь відносно осі деталі. Обробка пера лопатки здійснюється за один установ заготовки (одночасна обробка спинки й корита пера лопатки) і передбачає обробку деталі при її обертанні навколо власної осі. Схема базування заготовки повинна забезпечувати збіг осей обертання деталі й верстата, тобто тут не припустима погрішність встановлення деталі, зв'язана з розбіжністю осі деталі й пристрою.

Ця умова виконується в тому випадку, якщо базові поверхні заготовки як з боку спинки, так і з боку пера концентричні один одній й осі лопатки, тобто точно скоординовані відносно її осі. Таке положення досить просто забезпечити при обробці лопаток статора, що мають циліндричні цапфи, наприклад поворотних лопаток напрямного апарата, закрилків і т.п. (рис. 3.63).

Конструкція лопатки обумовлює використання попередньо оброблених циліндричних цапф як бази й місць закріплення заготовки, що дозволяють передавати на неї обертання. При цьому циліндричні цапфи дають можливість зафіксувати заготовку у чотирьох напрямках (бази 1...4). Торець цапфи великого діаметра є базою 5, що визначає положення заготовки уздовж осі X. Базою 6 служать притиски цапфи лопаток. Це припустимо в тому випадку, якщо немає необхідності фіксувати лопатку в кутовому положенні.

Сучасні схеми керування верстатів дозволяють перед початком операції обмацати базові точки профілю й повернути заготовку в потрібне кутове положення до збігання нульової точки відліку переміщень інструмента з початком його руху по програмі. При обробці проточної частини лопаток, що мають хвостовик типу ластівчин хвіст, саме його після обробки у розмір перед операцією фрезерування проточної частини лопатки використовують у якості технологічної бази (рис. 3.64).

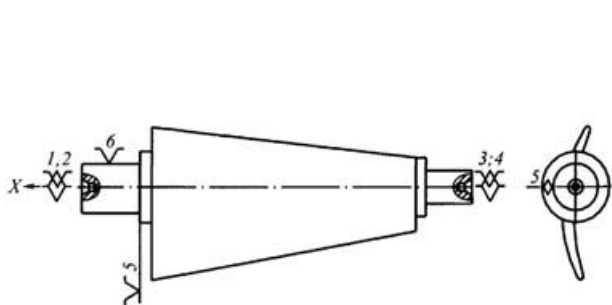


Рисунок 3.63 – Схема базування поворотної лопатки статора

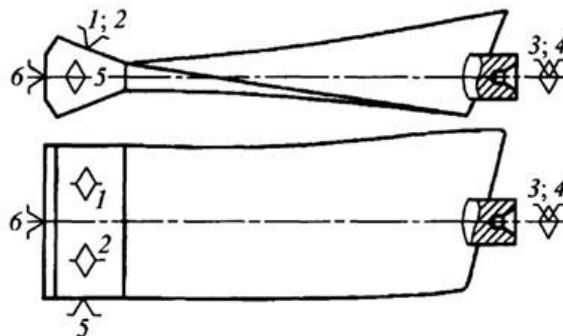
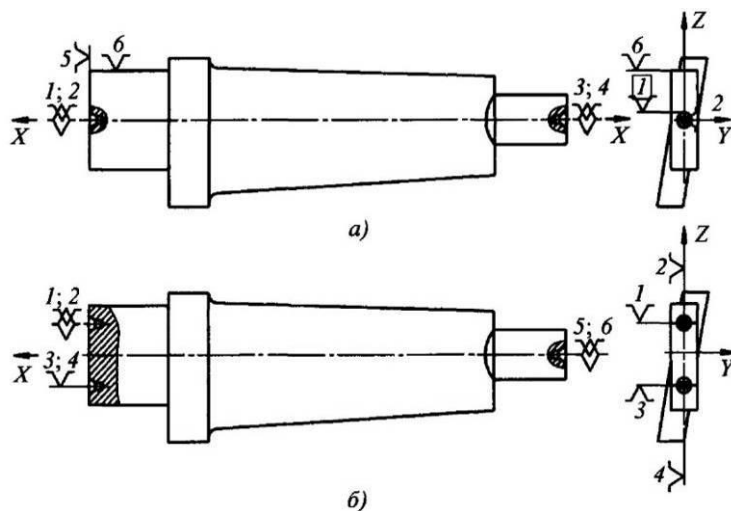


Рисунок 3.64 – Схема базування заготовки з хвостовиком типу «ластівчин хвіст» при фрезеруванні проточної частини

Разом з тим, схема кругового фрезерування проточної частини забезпечує одночасну обробку не тільки пера, але й радіусного переходу, й замка лопатки. Це стає можливим при створенні на заготовці з боку хвостовика спеціальної бобишки. Конструкція бобишки, її габаритні розміри й форма вибираються виходячи з розмірів лопатки, кута закручення проточної частини, величини припуску, що знімається (рис. 3.65). У розглянутій на рисунку заготовці передбачені спеціальні технологічні додатки – призматична бобишка з боку хвостовика й циліндрична з боку пера, у яких створені технологічні бази у вигляді центрових отворів (бази 1...4), що визначають положення заготовки в чотирьох напрямках. Положення заготовки в напрямку X визначає торець бобишки (база 5), у кутовому положенні відносно осі X – упор (база 6). Ця схема базування дозволяє реалізувати наступну схему виконання операції (рис. 3.66). Інструмент, обертаючись навколо своєї осі, переміщається в напрямках X , Y , Z (три координати). У ряді верстатів по осі Y пересувається стіл верстату з розміщенням на ньому пристроєм.

Рисунок 3.65 – Схема базування робочої лопатки компресора з хвостовиком типу ластівчин хвіст з двома (а) і з трьома (б) центровими отворами



Крім того, фрезерна головка з інструментом здійснює поворот (нахил) у площині обертання заготовки на кут $\pm 110^\circ$ (координата A). При цьому деталь обертається навколо своєї осі зі швидкістю кругової подачі (координата C). У залежності від довжини оброблюваної поверхні (довжини пера) таких координат може бути дві: C_1 – передня шпиндельна бабка, що здійснює закріплення деталі з боку хвостовика, і C_2 – задня шпиндельна бабка, що затискає деталі з боку пера. Обертний рух координат C_1 і C_2 синхронізовано, що дозволяє виключити деформації скручування заготовки. Більше того, закріплення заготовок одночасно з боку хвостовика й пера лопатки за допомогою спеціальних технологічних бобишок дає можливість істотно підвищити жорсткість заготовки й зменшити її деформації під дією сил різання. Таку кінематику рухів інструмента й заготовки забезпечують механообробні центри, наприклад, верстат НХ-151 фірми Starragheckert (рис. 3.67-3.68). Дана схема дозволяє одночасно фрезу-

рувати спинку й корито профілю пера лопатки й одержати припуск під наступну обробку, рівномірно розташований як з боку спинки, так і з боку корита. Під час обох варіантів фрезерування необхідно дотримувати наступні обов'язкові умови, що дозволяють досягти необхідної точності обробки.

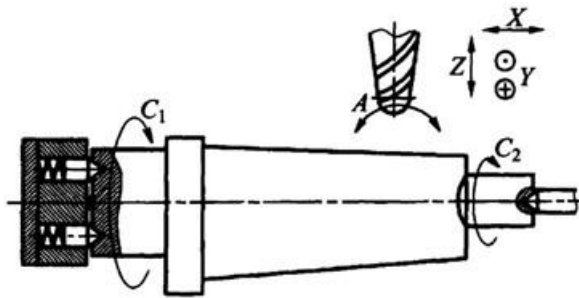


Рисунок 3.66 – Схема руху інструмента й заготовки при фрезеруванні профілю пера (варіант 2)

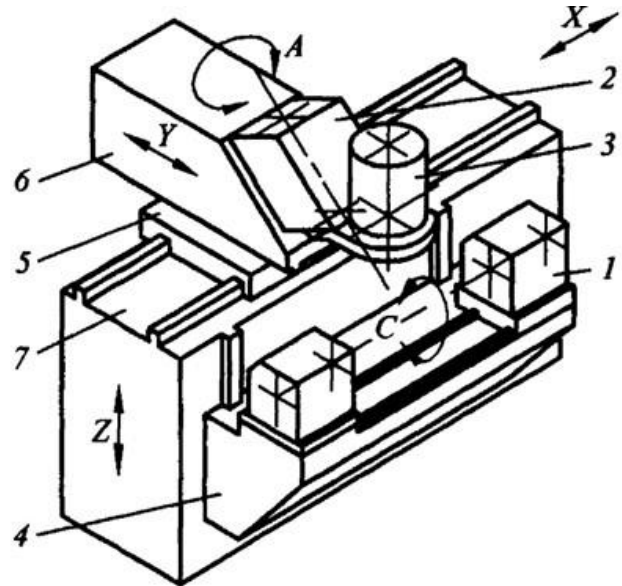


Рисунок 3.67 – Принципова схема верстата НХ-151 для кругової обробки лопатки: 1 – шпиндельні бабки кругової подачі заготовки; 2 – супорт кутового переміщення фрезерної головки; 3 – фрезерна головка; 4, 5, 6 – вертикальний, поздовжній і поперечний супорти верстату відповідно; 7 – станина

1. Використання при обробці профілю пера лопаток п'ятиосьових фрезерних центрів. Наявність у верстаті п'яťох одночасно керованих координат є обов'язковим не тільки для створення технологічних траєкторій інструмента, що збігаються з теоретичним профілем деталі в межах допуску на його виготовлення, але й для забезпечення сталості швидкості різання. Відповідно до схеми, представленої на рис. 3.69, в процесі утворення поперечного рядка кут нахилу фрези має постійно мінятися через те, що кожна з точок, що утворюють профіль спинки пера, характеризується своїм положенням нормалі. При цьому кут нахилу γ осі фрези до нормалі до оброблюваної поверхні має бути відмінним від нуля, що виключає процеси пластичного деформування, підминання металу вершиною інструмента. Дану умову вдається виконати тільки при п'ятикоординатній обробці лопаток компресора.

2. Здійснення процесу різання на режимах, що забезпечують постійне значення деформації лопатки незалежно від положення фрези на поверхні деталі. Ця умова впливає з розвитку першої й полягає в розробці алгоритму зміни умов різання, що гарантує деформацію деталі в межах допуску на її виготовлення (рис. 3.70). Перо лопатки формується в процесі його фрезерування кін-

цевою фрезою. У випадку обробки пера поперечними рядками (рис. 3.66, а) лопатка обертається навколо осі Z , а фреза переміщається при проходженні кожного рядка в напрямках Y й X з подачею S . Після одного повного повороту деталі навколо осі Z фреза зміщується в поздовжньому напрямку на ширину рядка й процес різання відновлюється. Зміна кутів нахилу фрези й відповідні їм зміни радіусів різальної частини змінюють окружні швидкості різання. Якщо збільшення кута нахилу не змінює радіус різальної кромки фрези, у процесі фрезерування змінюють величину подачі фрези.



Рисунок 3.68 – Двостороння обробка лопатки на верстаті НХ-151

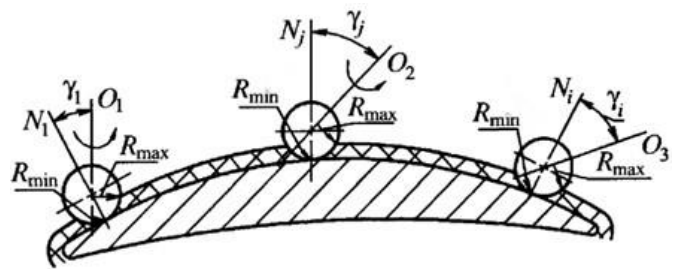


Рисунок 3.69 – Схема положень інструмента з радіусною різальною поверхнею на поверхні заготовки

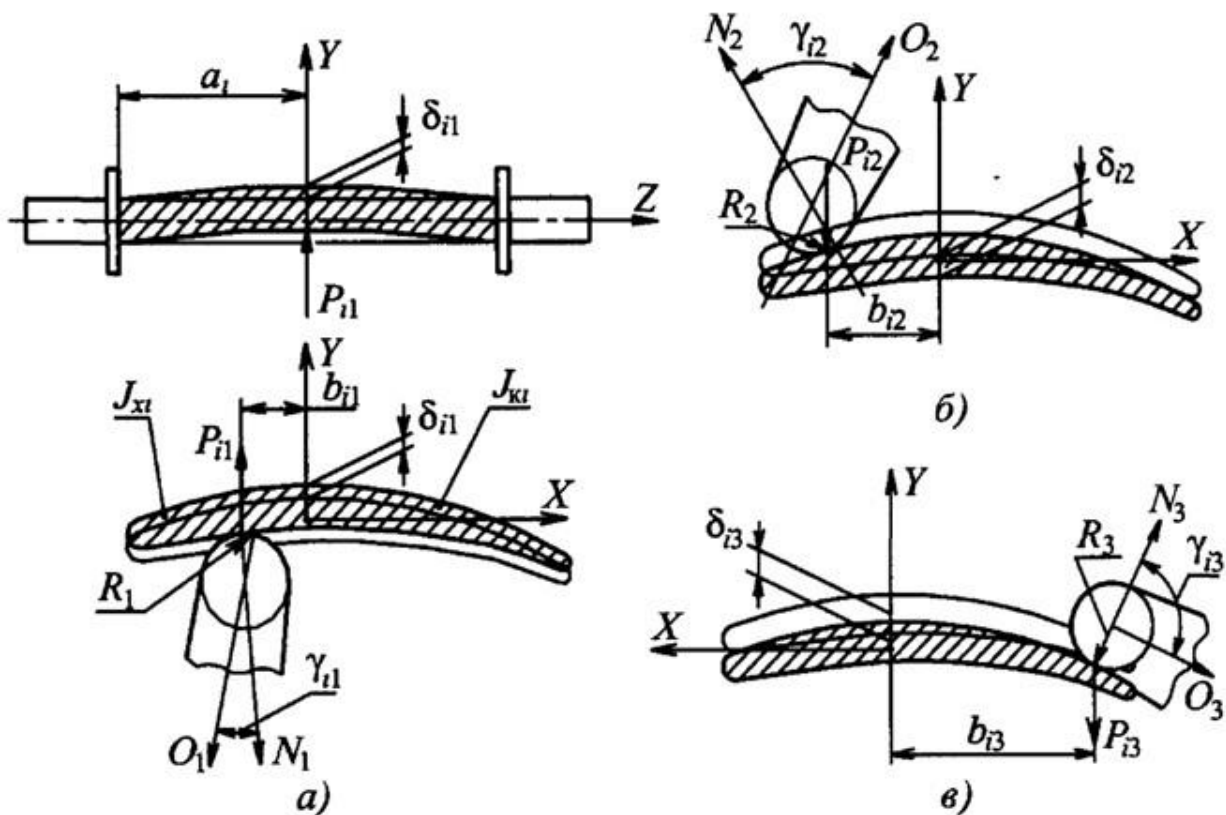


Рисунок 3.70 – Схеми до розрахунку деформації лопатки при круговому фрезеруванні

Таким чином, алгоритм керування полягає в наступному: значення кута нахилу осі фрези, який визначає окружну швидкість різання й подачу, у кожен момент часу обирають, виходячи з умови забезпечення рівності деформації пера лопатки допуску на розміри оброблюваної поверхні.

При встановленні деталі нерухомо відносно пристрою (однобічний варіант обробки) найчастіше використовують схему фрезерування поперечними рядками. При базуванні деталі в обертові центри (варіант одночасної обробки профілю) застосовують, як правило, комбінацію двох видів рядків, тобто фрезерування з поперечною й поздовжньою подачами.

Обробка з поздовжньою подачею переважно використовують на етапах попередньої обробки, а з поперечною – при остаточній обробці. Це обумовлено тим, що при обробці деталей за допомогою поперечної подачі при обертанні заготовки її жорсткість змінюється зі зміною припуску рівномірно як з боку спинки, так і з боку корита.

До кінцевих фрез висувають вимоги, виходячи в цілому із двох умов:

1. Компресорні лопатки – найпоширеніші деталі в ГТД. Їхнє число досягає 1500...2000 шт. у кожному виробі. Тому перша й сама головна умова, що пред'являється до різального інструмента – забезпечення високопродуктивної обробки.

2. Конструкції лопаток визначають їхню малу жорсткість у площині, що перпендикулярна до проточної частини. Пружні деформації деталі в цій площині при фрезеруванні обумовлюють наявність на наступних операціях значних припусків, як правило нерівномірних. Це, у свою чергу, вимагає введення додаткових операцій розмірного шліфування, полірування, ручного доведення. Тому друга умова, що пред'являється до різального інструмента – забезпечення високої точності обробки.

Виходячи із цих умов, проектують і виготовляють різальний інструмент, при цьому поряд із загальновідомими принципами розрахунку інструмента обов'язково виконують наступні принципові положення.

✓ Різальний інструмент повинен мати твердість, що значно перевищує твердість оброблюваного матеріалу, як правило того або іншого титанового сплаву. Для їхньої обробки у відповідності до умови забезпечення високопродуктивної обробки повинен бути використаний твердосплавний інструмент із дрібнозернистого твердого сплаву. Такий інструмент дозволяє при обробці титанових сплавів використати швидкості різання 100...250 м/хв. у залежності від конструкції деталі.

✓ Різальна поверхня інструмента по лінії контакту з заготовкою не повинна мати точок, у яких швидкість різання дорівнює нулю або близька до нього. Тому при проектуванні в різальній частині фрези передбачають отвір або викону-

ють її сферичної форми. При цьому шляхом нахилу фрези по відношенню до нормалі в точці торкання оброблюваної поверхні виключають такі зони застою, причому сталість дотримання цієї умови при обробці гарантується керуючою програмою. Отже, система керування верстату має забезпечувати можливість створення таких програм. Дана умова звичайно дотримується під час одночасного керування п'ятьма координатами.

✓ Частота коливань сил різання (сил, що деформують деталь) повинна бути не менш ніж на два порядки вище частоти власних коливань заготовки. У цьому випадку деталь через свою інерційність не встигає деформуватися під дією сил різання. Це враховується при розрахунку числа різальних зубів, а при обмеженнях по діаметру фрези визначає частоту обертання заготовки. Геометрія проточної частини лопатки (а саме: наявність ділянок подвійної кривизни, малих значень радіусів переходів від проточної частини до хвостовика) вносить обмеження по діаметру різальної частини фрези. Тому, як правило, використовують фрези діаметром 2...10 мм й обробка лопаток фрезеруванням здійснюють на дуже високих частотах обертання шпинделя: 2000...10000 об/хв.

✓ У свою чергу, такі оберти інструмента визначають обов'язкові умови по рівномірності заточення кожної різальної кромки й відсутності биття всіх поверхонь фрези, тобто їх точне взаємне розташування. Дана умова диктує необхідність виготовлення фрези за один установ.

Основна відмінність фрез для попередньої й остаточної обробки полягає у формі різальної частини фрези. З рис. 3.71 і 3.72 витікає, що при попередній й остаточній обробці передні кути однакові: $\gamma = 8^\circ$; задні змінюються у межах $\pm 10...14^\circ$; допоміжні $\alpha_1 = 20...25^\circ$; ширина стрічки $f = 0,5...0,6$, тобто геометрія різальних кромок дуже близька одна до одної, при цьому різальна кромка чистової фрези є більш гостро заточеною.

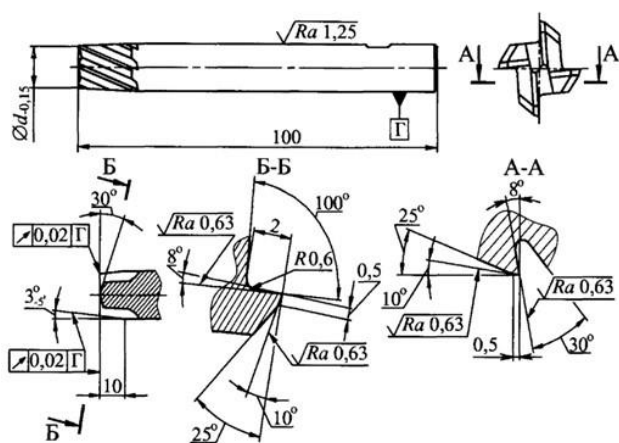


Рисунок 3.71 – Фреза кінцева для остаточної обробки складних профільних поверхонь

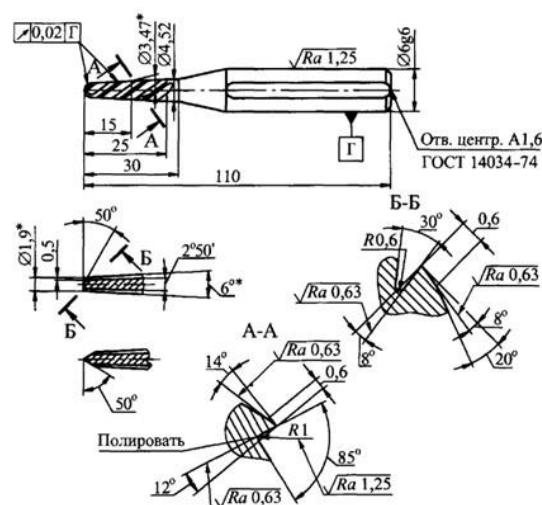


Рисунок 3.72 – Фреза кінцева для попередньої обробки складних профільних поверхонь

Фреза зі сферичною різальною частиною має значно більшу зону контакту із заготовкою, ніж фреза для остаточної обробки. При чистовому фрезеруванні форма різальної частини забезпечує значно більш вузький рядок, її серцевина істотно більша по діаметру, що підвищує її власну стійкість до пружних деформацій (відтиску).

Обробка хвостовиків лопаток компресора.

Обробка хвостовиків лопаток, звичайно виконаних конструктивно у вигляді ластівчиного хвоста, здійснюється різними способами, у тому числі й фрезеруванням окремо кожної з поверхонь його складових. Однак найбільш продуктивним й прийнятним для умов серійного виробництва є обробка за допомогою різних методів протягання. Процес виготовлення здійснюється плоскими протяжками на вертикальних і горизонтальних верстатах, що працюють у діапазоні як звичайних, так і підвищених швидкостей, за наступної схеми базування заготовки (рис. 3.73).

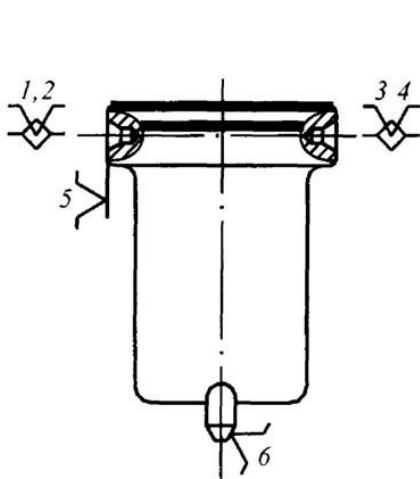


Рисунок 3.73 – Схема базування лопаток ротора компресора при протягуванні

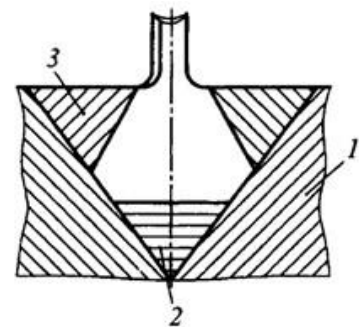
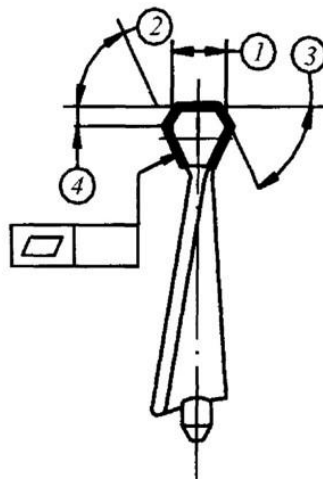


Рисунок 3.74 – Схема зрізування припуску при протягуванні хвостовиків компресорних лопаток типу "ластівчин хвіст"

Лопатка встановлюється в пристрій на технологічні центри (бази 1...4), упирається в торець з боку входної кромки (база 5) й фіксується від повороту відносно осі технологічних центрів за допомогою бази 6 на бобишці заготовки. Замки типу "ластівчин хвіст" звичайно протягають, використовуючи схему зняття припуску, показану на рис. 3.74. Спочатку обробляють фаски 1, потім підшву 2 і бічні (робочі) поверхні 3. Збірна протяжка звичайно складається з п'яти секцій. Положення кожної секції можна регулювати у корпусі. При протяганні замків лопаток зі сталей і титанових сплавів, як правило, швидкість протягання 2...5 м/хв.; подача на зуб 0,02... 0,05 мм; охолодження розчином емульсола ЕГТ. Протягування ведеться на горизонтально-протягувальних верстатах мод. 7510 й 7520. Застосовують також процес швидкісного протягання, що до-

звояє підвищити швидкість різання з 2...5 до 10...20 м/хв. Сутність методу полягає в забезпеченні високої швидкості протягання завдяки застосуванню твердосплавних протяжок і зменшенню подачі на зуб. Тим не менш деяке зменшення подачі при застосуванні високих швидкостей багаторазово компенсується збільшенням швидкості різання, що в підсумку підвищує продуктивність обробки.

Технологія протягання хвостовиків лопаток компресора найбільш доцільна в серійному виробництві. В умовах дрібносерійного й багатонаменклатурного виробництва все більше застосування знаходить процес фрезерування. Це особливо зручно, коли наявність спеціальних технологічних бобишок дозволяє поєднати цей процес з операцією фрезерування профілю пера. Перо й замок лопатки обробляються за один установ.

У випадку, якщо профіль пера лопатки оброблений ЕХО, для фрезерування замків застосовують заливання в брикет і надалі використовують 3-осьові механообробні центри.

Технологічні операції шліфування проточної частини лопаток.

Завдяки технології високошвидкісного фрезерування проточної частини лопаток на багатоцільових механообробних центрах з одночасним керуванням взаємним переміщенням інструмента й заготовки в п'ятьох координатах, стало можливим одержання необхідної точності на стадії фрезерування проточної частини. При цьому після фрезерування на наступні операції залишають тільки припуск, що необхідний для усунення слідів від рядків фрези. Власне кажучи, ця величина дорівнює полю допуску на операцію полірування. Згаданий припуск досить швидко видаляється ручним доведенням радіусів вхідної й вихідної кромки з перевіркою розміру пера по хорді. У такий спосіб обробляють деталі з довжиною проточної частини 100...250 мм і хордою 40...100 мм.

Разом з тим, існує велика група лопаток, в основному для компресорів низького тиску (КНТ), які вимагають після фрезерування додаткових операцій фінішної обробки, зокрема шліфування. Ця група лопаток має значні типорозміри й масу, а саме: довжину проточної частини 250...1000 мм; хорду 100...300 мм; максимальну товщину профілю пера $C_{\max} = 2,5...7$ мм; $C_1 = 0,5...2,5$ мм; $C_2 = 0,8...3,0$ мм. Незважаючи на більші габаритні розміри, ці лопатки досить тонкі. Деформації проточної частини таких лопаток при фрезеруванні обумовлюють утворення нерівномірного припуску як по довжині проточної частини, так і по ширині. Відповідно, з метою виключення цієї нерівномірності або хоча б її часткового зниження в технологічний процес додають операції шліфування. Метою цих операцій є усунення дефектів фрезерування (слідів від фрези) і максимальне наближення одержуваного профілю до теоретичного.

Існуючі технологічні процеси шліфування, полірування й поопераційного контролю геометричних розмірів проточної частини лопаток здійснюються від тих самих технологічних баз. У якості таких баз в залежності від конструкції лопатки використовують три центрові фаски або замок лопатки й центрову фаску на технологічній бобишці з боку проточної частини. На ці бази деталь встановлюють для механічної обробки, їх же використовують і для контролю після її закінчення.

Доопрацювання, проведене в локальних зонах, приводить до того, що деталі, придатні по довжині проточної частини від замка до периферії, здобувають у процесі обробки хвилястість поверхні. Хоча така поверхня й перебуває в межах допуску на зміщення профілів у тому чи іншому перетині, це знижує експлуатаційні властивості виробу. Після доведення лопатки до необхідних геометричних розмірів технологічну бобишку видаляють і здійснити остаточний контроль геометричної форми деталі можна тільки за допомогою координатно-вимірювальної машини. Контроль ведуть від конструкторської бази, що у процесі виготовлення й поопераційного контролю лопатки не збігалася з технологічною і при виготовленні лопатки не використовувалася. Тут у якості конструкторської бази, яка визначає положення деталі у виробі, використовують хвостовик лопатки, тобто його криволінійну поверхню, і торець.

Технологія шліфування проточної частини лопатки містить технологічні переходи розмітки припуску по довжині проточної частини. Причому ця розмітка виконується від конструкторської бази, а механічну обробку ведеться від технологічних баз, які не збігаються з конструкторськими.

Заготовка лопатки компресора після попередньої обробки (фрезерування проточної частини) встановлюється на технологічні бази в стрічково-шліфувальний верстат з системою ЧПК, що має шість керованих координат, необхідних для встановлення поверхні ролика, що притискає абразивну стрічку до оброблюваної поверхні (рис. 3.75). Сила притиску плавно змінюється в межах 50...450 Н за допомогою пневмоциліндру, що створює силу, спрямовану протилежно масі вузла притискного ролика.

Процес розробки програми для верстату називається teach – навчання. На деталі маркером намічають лінії й вузлові точки, по яких будуть налаштовувати верстат. Можна програмувати до 10 ліній і до 10 точок у кожній з них. Ролик виставляють у крайню точку першої лінії, використовуючи всі шість лінійних і поворотних осей, так, щоб встановити лінію переміщення вузла притискного ролика по нормалі до оброблюваної поверхні, і потім виконують пробне торкання. Якщо поверхня торкання має форму сегмента циліндричної поверхні, то це означає, що ролик встановлений правильно й поточні положення керованих координат заносять у пам'ять ЧПК. Аналогічним чином налаштовують верстат

у всіх розмічених точках. При обробці проточної частини деталі ЧПК верстата використовує дані з оперативної пам'яті, занесені в неї при розрахунку переміщень вузлів всіх одночасно керованих координат. У проміжках між розміченими точками рух вузлів розраховується по найкоротшій відстані, тобто за допомогою лінійної інтерполяції.

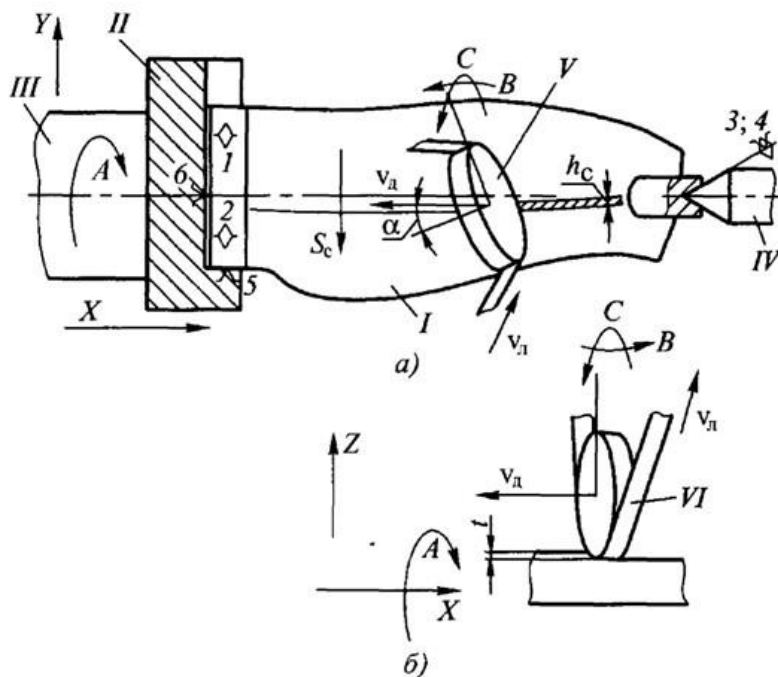


Рисунок 3.75 – Схема базування заготовки й обробки на стрічково-шліфувальному верстаті з ЧПК: *a* – схема базування деталі і взаємних переміщень деталі й інструмента при утворенні повздовжнього рядка шириною h_c ; *б* – схема зняття припуску глибиною t ; α – кут розвороту притискного ролика до напрямку повздовжньої подачі деталі

Величина припуску, що знімається, становить 0,01...0,5 мм. При цьому обробка ведеться не по всій поверхні деталі, а ділянками. Спочатку знімається найбільш виступаюча ділянка, а потім застосовується наступна програма й обробляється інша ділянка, потім застосовується програма, що передбачає обробку всієї поверхні. При такому підході за один або кілька проходів шліфується одна зі сторін (внутрішня) проточної частини лопатки (корита). Загальна величина спеціального припуску має бути не менша, ніж половина загального припуску, залишеного на операцію шліфування, тобто, шліфуючи деталь з однієї сторони (наприклад, корита), знімають половину сумарного припуску, залишеного після попередньої операції на товщину теоретичного профілю лопатки. Така технологія дозволяє значно знизити трудомісткість фінішної обробки, тому що вибірково обробляється тільки одна сторона деталі.

Технологічні процеси викінчувальної обробки.

Розмірне полірування лопаток компресора. Проточну частину лопатки, отриману послідовно методами фрезерування й шліфування, ретельно полірують. Додаткова викінчувальна обробка зумовлена необхідністю:

- одержання необхідної шорсткості;

- ліквідації слідів рядків, утворених рухом фрези або стрічки на попередніх операціях;
- зменшення товщини деформованого шару, що залишився від попередньої обробки;
- формування нового поверхневого шару з меншою глибиною наклепу.

Полірування – це найбільш відповідальна зі всіх попередніх і наступних операцій механічної обробки лопаток компресора, тому що ця операція повинна забезпечити збереження геометричної форми лопатки, досягнутої на попередніх операціях. Це є тим більш відповідальним в теперішній час, коли технологія обробки лопаток на багатоцільових верстатах з ЧПК дозволяє на стадіях фрезерування й шліфування (для лопаток великої довжини) одержувати лопатки з геометричними розмірами, що відрізняються від креслення в межах допуску на операцію полірування.

Тому після розмітки полірують розмічені місця до досягнення необхідних розмірів C_1 , C_2 , $C_{\max}$, b . Крім того, у процесі полірування згладжують переходи від одного перетину до іншого. При стрічковому шліфуванні головна умова успішного полірування лопатки, особливо з титанових сплавів – відсутність припалів. Після розмірного полірування лопатка компресора проходить 100 % травлення на відсутність припалів. У випадку їхньої відсутності деталь піддається наступній стадії полірування.

Технологічні операції безрозмірного полірування лопаток

Безрозмірне полірування лопаток (віброабразивна обробка) дозволяє створити на поверхні деталі рівномірну шорсткість і необхідний ступінь зміцнення поверхневого шару. Їхні параметри можуть мати широкі межі, що визначається можливістю варіювання режимами вібрацій, напрямком і тривалістю їхнього виконання.

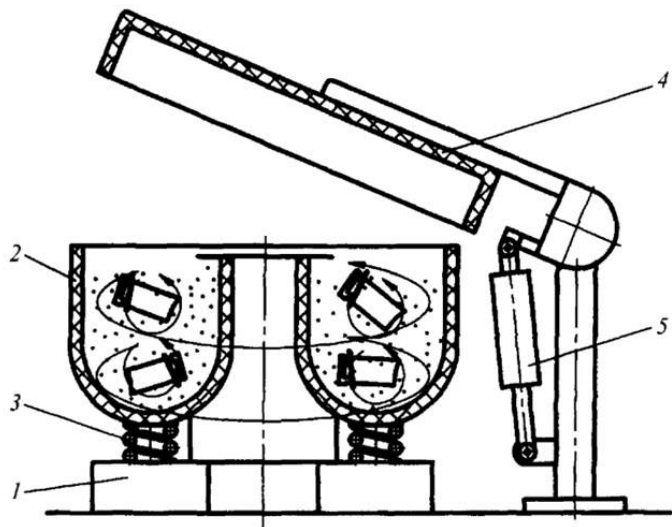
Фізична сутність процесу віброабразивної обробки полягає в тому, що деталям й абразиву надають коливання, змушуючи їх переміщатися одна відносно одного з різними швидкостями. Внаслідок різної інерційності деталей й абразивних зерен виникає прослизання зерен відносно деталі, а оскільки матеріал зерен значно твердіший від матеріалу деталі, на останній виникають мікроподрипини, що формують поверхневий шар деталі. Міняючи частоту коливань, як правило, від 20 до 50 Гц, і амплітуду від 1,0 до 10 мм, можна домогтися істотної відмінності швидкостей взаємного переміщення деталі й абразивних зерен, забезпечити необхідну інтенсивність знімання металу або зміцнення поверхневого шару. Тут важливо, щоб створювані вібрації не тільки викликали відносні переміщення деталі й абразивних зерен одна відносно одних, але й надавали б їхній загальній масі спрямований рух, тобто утворювали б загальний потік. Для здійснення цього при обробці лопатки компресора довжиною до 200 мм найбільш доцільно застосовувати радіальні вібратори торового типу (рис. 3.76).

Технологічні операції зміцнення лопаток компресора.

Стан поверхневого шару лопаток компресора визначає тривалість життєвого циклу цих деталей. Застосування пластичного деформування поліпшує шорсткість поверхні, збільшує глибину й ступінь наклепу; створює залишкові напруження стиснення. Всі ці фактори з однієї сторони послаблюють поверхневий шар деталі, з іншої – навпаки сприяють тому, що джерело виникнення тріщини зміщується в підповерхневі шари деталі. Все це в сукупності з регламентованими знакозмінними навантаженнями лопатки й обмеженим інтервалом температур, у яких вони діють (300...400°C), сприяє збільшенню циклічної міцності лопаток на 20...30 %.

Рисунок 3.76 – Схема радіального вібратора торового типу:

1 – основа; 2 – абразивна камера торового типу; 3 – амортизатори коливань; 4 – кришка; 5 – механізм відкривання/закривання камери



Реалізація методу досить складна, тому що потрібно:

- 1) одержати однаковий по товщині деформований шар на всіх ділянках лопатки, включаючи проточну частину й хвостовик.
- 2) виключити деформації (жолоблення) лопаток, зв'язані з послідовним деформуванням окремих ділянок проточної частини лопатки, насамперед спинки й корита.

Сучасні дробеструменеві установки дозволяють жорстко регламентувати швидкість робочих тіл (дробу); зв'язати переміщення зміцнювального сопла з переміщенням проточної частини лопатки, тобто гарантувати рівномірне переміщення зони деформації, а також забезпечити одночасну двосторонню обробку спинки й корита зі збігом плям обробки з однієї й іншої сторін.

Спеціальні операції, пов'язані з підвищенням експлуатаційних властивостей лопаток: Технологічні операції нанесення покриттів. До таких операцій належить нанесення зносостійких покриттів, що дозволяють підвищувати корозійну стійкість деталей. Розроблено спеціальну технологію плазмового нанесення тришарового покриття на замки лопаток вентилятора. Перший шар: Ni +

5%A1; другий: Cu + 36%Ni + 5%In; третій: Ni + 20%C. Товщина кожного шару 10...50 мкм.

Складність технології нанесення покриттів на такі поверхні полягає в їхній формі. Разом з тим, якість покриття залежить від його товщини. Тому існує технологічне завдання забезпечення рівномірного переміщення лопатки й сопла одна відносно одного в будь-який момент часу. Поверхні лопатки, які не піддаються плазмовому напиленню, попередньо ізолюють за допомогою спеціальних плівок. Покриття наносяться в автоматичному циклі.

Операції зварювання лопаток компресора

Сучасні конструкції лопаток все частіше й частіше містять у собі збірні конструкції, утворені шляхом зварювання. У першу чергу це стосується приварювання поверхонь, які найбільш швидко зношуються під час експлуатації, що, зокрема, стосується вхідної кромки лопаток вентилятора, найбільш підвладної зовнішнім механічним ушкодженням, абразивному зношуванню, корозії. Тому в низці конструкцій таких лопаток вхідну кромку виконують у вигляді носка, який приварюють на проточну частину за допомогою електронно-променевого зварювання. Підготовка поверхонь, що зварюються, здійснюється в ході фрезерування кромки лопатки й носка.

Після встановлення факту збігу параметрів лопатки з вимогою креслення в ході контрольних операцій лопатки таврують (маркірують) і здають на склад готової продукції.

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягає різниця в умовах експлуатації лопаток компресорів і турбін, основна різниця в їх конструкції, різниця у розмірах?
2. Який максимальний кут розвороту один відносно іншого перетинів профілю пера лопаток компресора по його довжині?
3. За переміщенням у просторі яких ліній для утворення поверхонь спинки й корита пера лопатки класифікують останні?
4. Метод одержання заготовок лопаток компресорів, виходячи з яких причин застосовують саме цей метод?
5. Яка точність виготовлення ізотермічно штампованих лопаток з наступною термофіксацією?
6. Яка точність виготовлення лопаток високошвидкісним гарячим штампуванням?
7. Які три технології застосовуються при виготовленні профільної поверхні лопаток компресорів?
8. Чому в технології виготовлення лопаток компресорів важливе значення має операція виготовлення технологічних баз від штампувальних баз лопатки?
9. В чому полягає основна ідея застосування пристрою, який використовують під час виготовлення технологічних баз на багатоцільовому оброблювальному центрі, оснащеному вимірювальною голівкою фірми Zeiss?

10. У яких випадках застосовується операція забезпечення рівномірності припуску з боку спинки, корита й прикомлевих ділянок?
11. На яких відстанях між електродами й пером лопатки з боку корита чи спинки на аноді копіюється профіль інструмента під час ЕХО? Які наслідки недотримання оптимального діапазону кута одночасного нахилу електродів-інструментів до осі лопатки під час ЕХО у бік зменшення і навпаки?
12. Які недоліки ЕХО (два) виправляються на наступних операціях?
13. Для яких розмірів лопаток метод ЕХО є директивним, і які види технологічної обробки застосовується для лопаток інших розмірів?
14. В чому полягає різниця двох варіантів механічної обробки профілю пера лопаток компресорів, який технологічний метод і скількох координатна обробка використовується?
15. В чому полягає необхідна умова, закладена в основу алгоритму керування високошвидкісного фрезерування профільної поверхні лопаток компресорів? В чому полягають основні вимоги до різального інструмента для високошвидкісного фрезерування лопаток компресорів?
16. Яка технологія використовується для хвостовиків лопаток компресора в умовах крупносерійного і масового виробництва? В умовах дрібносерійного й багатомоделного виробництва?
17. Навіщо застосовують технологічні процеси викінчувальної обробки лопаток компресорів і які саме?
18. В яких випадках і навіщо застосовують операції шліфування проточної частини лопаток?
19. Навіщо застосовують операції розмірного полірування проточної частини лопаток і на якому обладнанні?
20. Який технологічний метод покладений в основу безрозмірного полірування лопаток?
21. Який технологічний метод застосовують на операції зміцнення лопаток і які два завдання він вирішує?
22. Які спеціальні операції передбачені для підвищення експлуатаційних властивостей лопаток?
23. Яка частина лопатки приварюється на операції зварювання і навіщо?

3.6. Групові технології й автоматизоване виробництво лопаток

Удосконалення технологічних процесів виготовлення головних деталей газотурбінних двигунів (ГТД), що визначають їх собівартість, покликано вирішити насамперед завдання підвищення економічних показників процесу, а саме: збільшення коефіцієнта використання матеріалу; зниження трудомісткості виготовлення; скорочення технологічного циклу виготовлення деталей і витрат на технологічну підготовку виробництва. Основою рішення цього завдання є розроблення групових технологій виготовлення таких деталей, як лопатки турбіни й компресора, соплові лопатки; відкриті й напівзакриті крильчатки; кільця; диски; вали; дефлектори; опори й т.д.

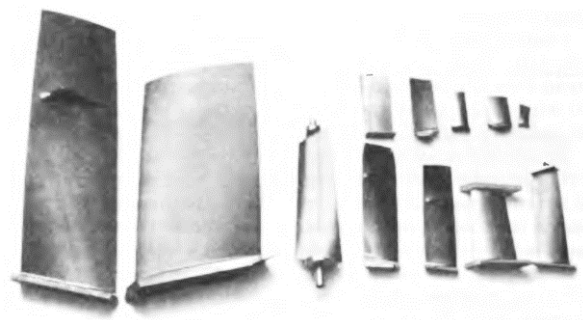
Лопатки ГТД є найбільш масовими деталями у виробництві даних силових установок. Загальна кількість лопаток у роторі й статорі ГТД залежно від

його конструкції може досягати декількох тисяч штук при номенклатурі у два-три десятки найменувань, при цьому за типорозмірами вони можуть становити від декількох десятків міліметрів до одного-півтора метрів. Лопатки турбін найбільш складні у виготовленні й найбільш відповідальні в експлуатації. Трудомісткість виготовлення даних деталей у загальних трудовитратах по виробництву газотурбінних двигунів становить не менше 70-80 %.

Вибір тієї чи іншої технології їхнього виготовлення залежить від конструктивних особливостей деталей. Однак для однієї й тієї ж конструкції лопатки можуть бути використані різні технологічні процеси, вибір найбільш оптимального з яких визначається економічною доцільністю його використання в рамках тієї чи іншої програми випуску, тобто при виготовленні однієї й тієї ж деталі на різних стадіях розвитку виробництва – від одиничного до серійного – використовуються різні технології, при цьому перехід від однієї технології до іншої може бути істотно скорочено за умови дотримання деяких загальних принципів. Ці принципи мають відповідати умовам автоматизованого виробництва, де досягнення необхідної геометричної точності і якості поверхневого шару гарантовано дотриманням тієї чи іншої групової технології, реалізованої на багатоцільових верстатах, і використанням спеціальних процесів.

Групова технологія спирається на типові конструкції деталей. Класифікація останніх на різні типи здійснюється з урахуванням подібності їхніх конструктивних ознак і функціонального призначення. Це дозволяє при обробці деталей тієї чи іншої групи застосовувати подібні технології. Стосовно деталей, які використовуються у ГТД, на основі однакових ознак подібності й розходження деталей можна сформувати наступні групи з характерними ознаками: лопатки; кільця; диски; вали; дефлектори; опори й т.д. Так, на рис. 3.77 наведена група деталей – компресорні лопатки ГТД, які належить виготовляти в рамках однієї типової технології.

Рисунок 3.77 – Компресорні лопатки ГТД, що виготовляються в рамках однієї групової технології



Використання групової технології в якості одного з етапів виробництва вимагає її обов'язкового кодування, заснованого на системі класифікації деталей. Ця система будується за принципом розподілу деталей по групах конструктором виробу. Геометрична подібність деталей грає при цьому вирішальне

значення. Ця геометрична подібність визначає іншу спільність – подібність способів обробки, тобто однакову послідовність виконання операцій, методів обробки різанням й, відповідно, однакове технологічне устаткування для їхнього виготовлення.

Наступним етапом класифікації є використання кодів (номерів) операцій групової технології. Код операції позначає конкретну технологічну операцію, що використовується на тому чи іншому етапі групової технології. Наприклад, операція 005 – виготовлення технологічних баз для механічної обробки від ливарних баз; операція 095 – обробка посадкових поверхонь, що слугують для з'єднання з іншою деталлю, від технологічної бази, і т.д. Отже, при складанні нової технології для виготовлення деталі, що входить у ту чи іншу групу, номер (код) операції використовується для інтеграції даної деталі в технологічні потужності, задіяні для цієї операції.

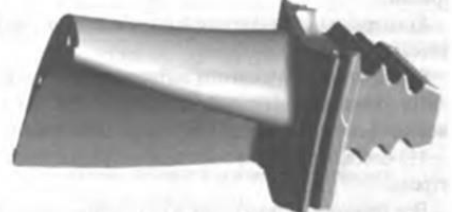
Однак існуючі виробництва вже містять у собі велику кількість технологій, створених у попередній період, які також повинні бути об'єднані в рамках групової технології, при цьому потрібно зберегти наявну в них систему класифікації деталей, технологічних процесів, оснащення й т.і. Крім того, у межах однієї групи можуть зустрічатися деталі з конструктивними відмінностями, що тягнуть за собою введення в технологію додаткових операцій. Ці операції кардинально не змінюють групову технологію, здійснюються в її рамках. Однак вони істотно змінюють технологію конкретної деталі, що входить у дану групу. Внаслідок цих конструктивних відмінностей для виконання того або іншого етапу групової технології для конкретної деталі може бути використане різне число технологічних операцій і, відповідно, пристосувань, різального й вимірювального інструментів і т.ін.

Таким чином, технологічна система групових технологій покликана з однієї сторони узагальнити досвід попередніх етапів розвитку підприємства, з іншою створити впорядковану систему технологічної підготовки виробництва для наступного розвитку підприємства. Вона містить у собі сукупність баз даних по найменуваннях деталей, що мають загальну геометрію й однакове функціональне призначення (лопатки компресорні; лопатки турбінні; диски; вали; шестірні й т.д.). Кожна база з таким найменуванням містить всю сукупність деталей такого функціонального призначення, що виготовляються у цей час або виготовлених раніше. До неї входять код деталі (шифр), її креслення, математична модель (табл. 3.5). Номер (код) деталі записується в базі в такому вигляді, який було йому надано за весь період проектування й виготовлення даних деталей на тому або іншому підприємстві. Кожному з номерів, тобто кожному виробу відповідає конструкторське креслення деталі. Їхнє число обов'язково

повинно збігатися. На основі конструкторської бази формується технологічна база даних, наприклад "Лопатка турбінна".

Вертикальна будова технологічної бази даних являє собою групову технологію механічної обробки турбінної лопатки – послідовність технологічних операцій, обов'язково здійснюваних під час обробки кожної лопатки, що входить у базу даних деталі "Лопатка турбінна" – приклад наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.5 – Схема бази даних "Лопатка турбінна"

Номер деталі	Математична модель
XXXX	
YYYY	
ZZZZ	

У якості групової може бути обрана найскладніша й найдовша технологія виготовлення лопатки, усередині якої розміщуються технології всіх інших виготовлених деталей, або розроблена деяка послідовність основних етапів технології виготовлення даних деталей (обов'язкових для всіх деталей групи); при цьому на кожному з етапів число операцій для тої або іншої деталі може бути різним залежно від конструкції конкретної деталі.

У даному випадку групова технологія представлена у вигляді 11 основних принципових етапів (зразкового маршруту обробки), що визначають послідовність виготовлення деталі, а саме:

- заготівельні операції (слюсарні, полірувальні, операції вхідного контролю);
- операції виготовлення технологічних баз від профілю пера лопатки (виконання центрових отворів);
- операції виготовлення технологічних баз від ливарних баз або центрових отворів, виконаних від профілю пера на заготовці; пропалення перфораційних отворів;

- операції обробки замка лопаток турбіни;
- операції обробки площин бандажної полиці (зигів) під наплавлення;
- операції наплавлення бандажної полиці, в тому числі контрольні операції;
- операції остаточної обробки бандажної полиці, в тому числі слюсарні й полірувальні;
- операції виготовлення лабіринтів на бандажній полиці лопатки;
- операції виготовлення лабіринтів (каналок) під встановлення фіксаторів лопатки (контровок) під час її закріплення в диску турбіни;
- слюсарні, полірувальні операції, промивання, остаточний контроль.

Таблиця 3.6 – Вертикальна структура БД "Лопатка турбінна"

	Заготовительные операции									
1	Номер технологии	XXXX			YYYY		ZZZZ			
	Номер технологической операции	005	010	015	005	010	005	010	015	020
↓										
Операции изготовления технологических баз от литейных баз заготовки										
2	Номер технологии	XXXX			YYYY		ZZZZ			
	Номер технологической операции	-			015	020	-			
↓										
Операции обработки замка лопаток турбины										
5	Номер технологии	XXXX			YYYY		ZZZZ			
	Номер технологической операции	060	065	070	075	065	070			
↓										
Операции обработки плоскостей бандажной полки (зигов) под наплавку										
6	Номер технологии	XXXX			YYYY		ZZZZ			
	Номер технологической операции	070	075	080	085	075	080			
↓										
Операции изготовления лабиринта в замке под установку фиксаторов лопатки										
10	Номер технологии	XXXX			YYYY		ZZZZ			
	Номер технологической операции	120	125	130	135	115	120	125		
				140	150	130	135	-		
↓										
Слесарные, полировальные операции, промывка, окончательный контроль										
11	Номер технологии	XXXX			YYYY		ZZZZ			
	Номер технологической операции	130	135	155	160	140	145	150		

Всі технології, що входять до бази даних під своїм номером (XXXX, YYYY або ZZZZ), у тій чи іншій мірі містить зазначені етапи: одні всі 11, інші менше, але жодна технологія не перевищує це число. При цьому число операцій на тому чи іншому етапі є різним. Однак у будь-якому випадку для будь-якої технології кожний основний етап групової технології містить певне число операцій, кожна з яких характеризується номером операції й операційною картою, а при необхідності й картою налагодження. Наявність операційної карти надає інфо-

рмацію про використовувані верстатні й контрольні пристосування, різальний й вимірювальний інструмент, режими обробки й машинний час здійснення операції. Дана інформація дозволяє розгорнути вертикальну ієрархію технологічної бази даних на кожному її щаблі в горизонтальні бази даних оснащення, інструмента й режимів обробки.

В табл. 3.7 наведено горизонтальну структуру технологічних даних по оснащенню, використовуваному для реалізації п'ятого етапу здійснення групової технології виготовлення деталей типу "Лопатка турбінна", що містить у собі наступні блоки даних: верстатні пристосування; контрольні пристосування; різальний інструмент; вимірювальний інструмент; металорізальне устаткування; режими різання (у тому числі технологічні засоби, технологічні засоби змащення й охолодження й т.д.); машинний й допоміжний час, у тому числі штучно-калькуляційний. Побудована подібним чином структура технологічної бази даних має наступні переваги перед всіма іншими підходами, заснованими на розробленні групового виробництва.

1. Викладена ієрархія дозволяє залучати до неї наявну на підприємстві інтелектуальну власність у вигляді технологічної документації без зміни її кодів.

2. Бази даних оснащення й інструмента, побудовані на основі врахованих технологічних процесів, дають можливість залучати до них тільки те оснащення й інструмент, які реально використовуються у виробництві. При цьому виключаються оснащення й інструмент, які були створені на етапах впровадження технологічного процесу як його різні варіанти й надалі не знайшли застосування. Крім того, це рятує від повторення помилок, які можливі, якщо спиратися тільки на базу даних "Оснащення" або "Інструмент", створювану у відриві від технологічних процесів.

3. Значно спрощується й прискорюється створення нового технологічного процесу. У цьому випадку при використанні різних систем автоматичного проектування технолог, що проектує технологічний процес або оснащення, спирається на досить вузьку базу даних, цілеспрямовано сформовану тим чи іншим етапом групової технології. Більше того, при цьому проектується інструмент і оснащення, точно зорієнтовані на тип металорізального устаткування, оброблювані матеріали і якість поверхневого шару, що формується.

Таким чином, на етапі проектування нового технологічного процесу групова технологічна база виготовлення ГТД дозволяє настільки звузити рамки пошуку технологічного рішення, що це може виконати практично недосвідчений технолог, який спирається на інтелектуальний досвід своїх попередників. При цьому проектування технологічних процесів, створення оснащення, різального й вимірювального інструмента є результатом алгоритму рішення тої або іншої проблеми, що визначає групова технологія. Відповідно новий етап розвитку обробки тої чи іншої деталі здійснюється тільки при заміні групової технології, що здійснюється лише в тому випадку, коли змінюється серійність вироб-

ництва або застосовуються нові способи механічної або фізико-технічної обробки матеріалів.

Таблиця 3.7 – Горизонтальна структура БД "Лопатка турбінна"

5	Операции обработки замка лопаток турбины (посадочные места крепления в диске)						
	Номер технологии	XXXX		YYYY		ZZZZ	
	Номер технологической операции	060	065	070	075	065	070
↓							
5.1	Станочные приспособления для выполнения операций на этапе 5						
	Номер технологии	XXXX		YYYY		ZZZZ	
	Номер технологической операции	060	065	070	075	065	070
	Номер приспособления	X111	X112	Y111	Y112	Z111	Z112
	↓						
5.2	Контрольные приспособления для выполнения операций на этапе 5						
	Номер технологии	XXXX		YYYY		ZZZZ	
	Номер технологической операции	060	065	070	075	065	070
	Номер приспособления	X222	X221	Y222	Y221	Z222	Z221
	↓						
5.3	Режущий инструмент для выполнения операций на этапе 5						
	Номер технологии	XXXX		YYYY		ZZZZ	
	Номер технологической операции	060	065	070	075	065	070
	Номер инструмента	X331, X332	X333, X334, X335	Y331	Y331, Y332, Y333	Z331, Z332, Z333	Z334
	↓						
5.4	Измерительный инструмент для выполнения операций на этапе 5						
	Номер технологии	XXXX		YYYY		ZZZZ	
	Номер технологической операции	060	065	070	075	065	070
	Номер инструмента	X441	X442	Y441	Y442	Z441, Z442, Z443	Z444, Z445

Основні технологічні принципи автоматизованого виробництва лопаток ГТД.

При розробленні технологічних процесів виходять із вимог забезпечення необхідної точності форми поверхонь і їхнього відносного розташування (див. рис. 3.19 і 3.40). При цьому геометрична точність виготовлення лопаток тісно пов'язана з параметрами якості поверхневого шару: шорсткістю, величинами й розподілом залишкових напружень, глибиною й рівнем наклепу, тобто з тими параметрами, які багато в чому визначають опір втоми даних деталей. За таких вимог даний тип деталей, а саме: лопатки вентилятора й вхідного пристрою; компресорів низького й високого тиску; напрямні лопатки статора компресора; робочі лопатки турбіни високого й низького тиску; соплові лопатки турбіни, а також багато інших деталей, що входять у газоповітряний тракт ГТД, є об'єктами автоматизованого виробництва газових турбін. Виробництво лопаток ГТД в умовах автоматизованих технологічних процесів є реальним інструментом забезпечення високої якості виготовлення даних деталей при мінімально можливих трудовитратах.

При цьому, незважаючи на їх істотні конструктивні відмінності: типорозміри; геометричні відмінності у формі проточної частини; застосовувані конструкційні матеріали, а також різні технології одержання заготовок (литва, гаряче штампування, вальцювання й ін.) – технологічні процеси механічної обробки лопаток мають однакові (типові) принципи побудови, що забезпечують найменші трудовитрати при максимально можливій повторюваності досягнутого результату.

Дані принципи пов'язані з базуванням деталей у процесі їхнього виготовлення. Так, при проектуванні технологічних процесів механічної обробки лопаток ГТД мають бути дотримані наступні основні принципи, а саме:

- ✓ в процесі виготовлення має бути забезпечено єдність технологічних баз;
- ✓ розташування технологічних баз має забезпечувати мінімально можливий, рівномірно розподілений по контуру припуск проточної частини деталей;
- ✓ технологічні бази мають забезпечувати однозначність встановлення й міцне, надійне закріплення заготовки, що виключає можливість її розкріплення в пристосуванні в момент обробки.

На практиці дотримати всі три принципи в одному технологічному процесі практично неможливо, тим більше, що технологічні бази, як правило, розміщаються в "тілі" заготовки й у процесі її обробки рано чи пізно, але неминуче віддаляються, що вимагає в остаточному підсумку зміни баз. Проте, під час реалізації автоматизованих технологічних процесів виготовлення лопаток газотурбінних компресорів можливі компромісні технічні рішення, що дозволяють дотримати ідеології основних принципів базування заготовок.

У першу чергу це стосується операцій створення технологічних баз для обробки проточної частини лопатки. Для лопаток компресора типовими базами є: центрові отвори в торцях хвостовика; торець хвостовика з боку вхідної кромки й фаска на технологічній бобишці з боку проточної частини лопатки. Дані бази створюються на операціях переходу від штампувальних (заготівельних) баз, являють собою шість базових точок, розташованих у такий спосіб: три точки на проточній частині лопатки (1, 2, 3); дві точки на торці хвостовика й технологічної бобишки з боку проточної частини (4, 5); одна точка на торці хвостовика з боку проточної частини (6), рис. 3.42.

Операції переходу від заготівельних баз лопаток до баз для механічної обробки є основними операціями автоматизованого технологічного процесу.

Суттю операцій є перехід від технологічних баз, створених при штампуванні заготовок у вигляді точок, до технологічних баз у вигляді площин і центрових фасок, використовуваних для механічної обробки, що представляють собою: центрові отвори на торцях хвостовика (1, 2 і 3, 4); торець хвостовика з боку вхідної кромки лопаток (5); і фаску на технологічній бобишці з боку про-

точної частини лопаток (6). У результаті цього переходу від технологічних баз звільняється проточна частина лопатки, а утворені знову базові поверхні дозволяють не тільки однозначно встановлювати заготовку, але й надійно її закріплювати при механічній обробці проточної частини лопатки.

Здійснення даного переходу відбувається за кілька операцій, що включають у себе: обмір всієї партії відштампованих деталей, поданих на механічну обробку і їхню розбивку на групи за величиною припуску, що знімається, (обмір заготовок від штампувальних баз здійснюється за допомогою оптико-механічних приладів); друга група операцій являє собою механічну обробку створюваних базових поверхонь, вона полягає у встановленні заготовки на штампувальні бази й почерговій обробці центрових отворів у торцях хвостовика, торця замка з боку вхідної кромки й в обробці фаски на технологічній бобишці з боку "пера" лопатки. Тут виконується як мінімум три операції на універсальних верстатах зі спеціальними налагодженнями, або одна на агрегатному верстаті, що має кілька шпиндельних груп. У тому й іншому випадку при обробці виникає геометрична похибка взаємного розташування знову створених технологічних баз одна відносно одної, обумовлена або багаторазовим перевстановленням деталей, або відхиленнями взаємного розташування шпинделів агрегатного верстата. Все це приводить до необхідності збільшення припуску на проточній частині заготовки, обумовленого необхідністю усунення похибок розташування технологічних баз при механічній обробці проточної частини лопатки. Збільшення припуску відповідно збільшує трудовитрати й витрати, пов'язані із забезпеченням технологічного процесу, тобто існуючі операції створення технологічних баз для механічної обробки проточної частини лопаток не забезпечують принцип мінімізації припуску по контуру заготовок.

Перехід до автоматизованих технологічних процесів цей недолік досить легко усуває за рахунок виконання операції зміни баз на фрезерних центрах з ЧПУ. У цьому випадку всі технологічні операції виконуються за один установ деталі й містять досить прості переходи, а саме: фрезерування торця з боку вхідної кромки; центрування торця з боку вхідної кромки; фрезерування торця з боку вихідної кромки; центрування торця з боку вихідної кромки; фрезерування фаски на технологічній бобишці. Всі розміри ①...⑧ сформовані на даній операції в одній системі координат (без перевстановлення деталей), точність взаємного розташування сформованих поверхонь визначається точністю взаємних переміщень інструмента й деталі, що мають для технологічного устаткування такого типу точність близько 0,0001 мм. Використовується при цьому 5...6 інструментів, досить коротких і таких, що мають однакову величину затуплення, у виді їхньої примусової заміни по заздалегідь складеній програмі. Переміщення інструментів і деталі здійснюється по програмі в системі координат верста-

та, зв'язаній із системою координат деталі. Повторюваність геометричних розмірів сформованих поверхонь деталі близька до 100%. Виконуються дані операції на п'ятикоординатних обробних фрезерних центрах. Здавалося б, що використання такого складного технологічного устаткування для настільки простих операцій не є виправданим економічно. Однак перенос цих операцій з агрегатних верстатів і тим більше з універсальних на верстати з ЧПУ дозволяє одержати головний ефект, а саме: зменшити більш ніж у 2...3 рази припуск на механічну обробку проточної частини лопатки, а, отже, і в рази скоротити трудовитрати на наступну обробку даних деталей.

Аналогічна проблема наявна й при обробці турбінних лопаток. Тут також існують операції переходу від заготівельних (ливарних) баз у вигляді точок до баз для механічної обробки, що представляє собою центрові отвори (найчастіше цековки, керна й ін.), розташовані на торцях хвостовиків і бандажній полиці. Природно розміри поверхонь таких технологічних баз недостатні для надійного закріплення заготовки при обробці зовнішнього контуру деталі, тому в технологічних процесах виготовлення турбін існує ціла послідовність операцій обробки зовнішнього контуру, що супроводжуються поетапним переходом від технологічних баз у вигляді цековок (конічних фасок) до більш розвинених поверхонь (найчастіше плоских) на хвостовику й бандажній полиці. При цьому відбувається багаторазова зміна баз.

Автоматизоване виробництво лопаток турбін не може бути реалізоване в умовах постійної зміни технологічних баз, тому для його реалізації необхідно використати такі технологічні бази, які могли б зберегтися під час усього часу обробки зовнішнього контуру деталі. Ця проблема може бути вирішена на етапі виготовлення заготовки, тобто при виконанні виливка лопатки.

В процесі виливка деталі, на заготовці можуть бути виконані спеціальні технологічні поверхні у вигляді прямих або зворотних центрів, закоординованих із профілем проточної частини лопатки. Приклад такого виливка наведено на рис. 3.78-3.79. Тут на торці хвостовика й бандажній полиці лопатки на стадії виготовлення виливки виконані три бобишки у вигляді зворотних центрів, кожний з яких обмежує заготовку в її системі координат за двома ступенями вільності. У загальній системі координат вони зв'язані один з одним розмірами ①...⑤, а також з аеродинамічним профілем проточної частини лопатки розмірами ⑥...⑩. Такі технологічні бази визначають однозначне положення деталі при її встановленні в робочі й контрольні пристосування, а також забезпечують її надійне закріплення при обробці профілю лопатки й більшої частини її зовнішнього контуру з боку хвостовика й бандажної полиці. Цей ефект є визначальним при обробці контуру деталі на багатоцільових шліфувальних верстатах з

ЧПУ, які усе більш широко використовуються в умовах багатомасштабного, серійного виробництва.

Дані або подібні до них технологічні бази лопаток турбін і компресора використовуються в технологічних процесах на операціях обробки проточної частини лопаток, причому поза залежністю від виду обробки, включаючи різні способи фрезерування, шліфування й полірування профілю пера або операції кругової імпульсної електрохімічної обробки (ЕХО), з наступним обрізанням і поліруванням вхідної й вихідної кромки.

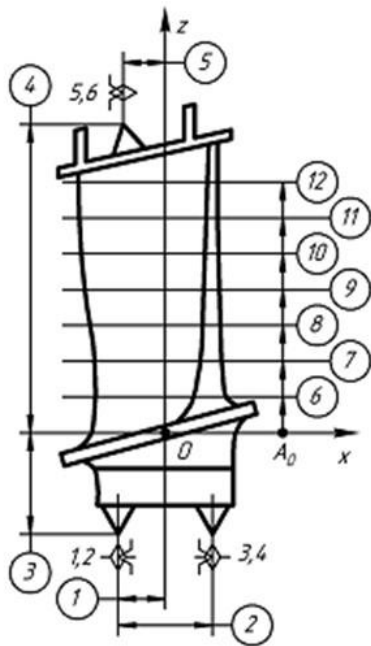


Рисунок 3.78 – Схема заготовки (виливка) лопатки турбіни з виконаними на ній технологічними базами для механічної обробки, які закординовані з проточною частиною лопатки

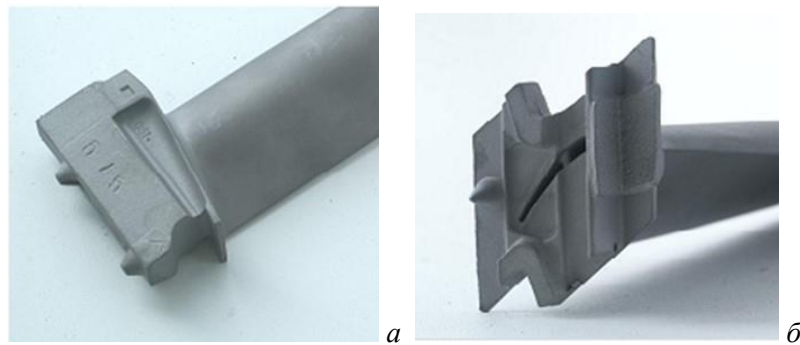


Рисунок 3.79 – Базові поверхні турбінної лопатки, виконані у виливку заготовки: а – з боку хвостовика; б – з боку бандажної полиці

Однак подальший перехід від баз, створених для обробки проточної частини до баз для обробки хвостовиків, являє собою серйозну проблему. Тут необхідно забезпечити однозначність встановлення лопатки по профілю проточної частини, обробленому остаточно, не допускаючи його ушкоджень, а також забезпечити надійність закріплення заготовки на нових технологічних базах в умовах інтенсивної механічної обробки хвостовиків методами протягання, силового фрезерування, глибинного шліфування. Дана проблема вирішується шляхом закріплення деталей по проточній частині лопаток у брикет (пристрій-супутник) за допомогою швидкотвердіючої маси. Закріплення (заливання) лопаток у брикет здійснюється від технологічних баз, використовуваних при обробці проточної частини лопаток (див. рис. 3.22).

Аналогічним образом організовано заливання в брикет і наступну обробку турбінних лопаток. Однак проблеми, які виникають при заливанні турбінних і компресорних лопаток, різні. Так, компресорні лопатки в процесі кристалізації

(затвердіння) заливальної маси найчастіше сильно деформуються, піддаються жолобленню. Турбінні лопатки практично не деформуються, але зрушуються (спливають) з настановних елементів. Дані проблеми вирішуються в такий спосіб: компресорні лопатки заливають (заповнюють форму) винятково уздовж найбільшої осі лопатки, причому вільний (такий, що виходить за межі заливальної камери) кінець лопатки інтенсивно охолоджують з метою формування центрів кристалізації брикету по осі лопатки. Розміри брикету звичайно починають, виходячи з необхідності закріплення однієї третини, у крайньому випадку, половини довжини проточної частини. Пристосування для закріплення в брикет турбінних лопаток обладнані системою контролю за збіганням базових поверхонь лопаток з настановними елементами пристосувань.

Таким чином, переоснащення виробництва ГТД у частині автоматизації технологічних процесів лопаток турбін і компресорів, перехід з універсального й спеціального технологічного устаткування на багатоцільові механообробні верстати з ЧПУ вимагає кардинальної зміни підходу до вибору технологічних баз. При проектуванні й реалізації технологічних процесів автоматизованого виробництва необхідна й достатня дворазова зміна баз: перша з яких здійснюється на етапі переходу від заготівельних баз (штампувальних і ливарних) до баз в "тілі" заготовки, які використовують для обробки проточної частини лопатки; друга здійснюється на етапі переходу до обробки зовнішнього контуру деталі й полягає в переході до баз за межами контуру деталі. Найбільш універсальним технологічним прийомом в автоматизованих технологічних процесах є обробка деталей у пристроях-супутниках (касетах), що створюються для однократного використання шляхом заливання деталей у брикет (касету) швидко-твердіючої масою.

Питання для самоконтролю:

1. Які переваги дозволяє отримати застосування групової технології виробництва лопаток ГТД?
2. Сформулювати основний принцип побудови групової технології виробництва лопаток ГТД.
3. В чому полягає сутність вертикальної будови технологічної бази даних для групової технології?
4. В чому полягає сутність горизонтальної будови технологічної бази даних для групової технології?
5. Які переваги дозволяє отримати побудова вертикальної і горизонтальної структури технологічної бази даних для групової технології?
6. В чому полягають три основні технологічні принципи автоматизованого виробництва лопаток ГТД?
7. В чому полягає головний ефект від переносу операцій зміни баз (від заготівельних баз лопаток до баз для механічної обробки) на п'ятикоординатні фрезерні центри з ЧПУ?
8. Яким чином здійснюють перехід від баз, створених для обробки проточної частини лопаток, до баз для обробки хвостовиків?

Розділ 4. ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ (досвід ВАТ "Мотор-Січ")

Аналіз руйнувань високонавантажених деталей – лопаток компресорів газотурбінних двигунів у процесі експлуатації показує, що в основному це відбувається через наявність технологічних мікродефектів та експлуатаційних ушкоджень кромки і пера, що виникають при зіткненні зі сторонніми предметами (пісок, град та ін.).

Лопатки III ступ, компресора низького тиску (КНТ) двигуна Д-36 зі сплаву ВТЗ-1 та I ступ, компресора двигуна ТВЗ-117 зі сплаву ВТ8М, які працюють при впливі знакозмінних навантажень і відцентрових сил, є найбільш навантаженими деталями та значною мірою визначають їхній ресурс. Сплави ВТЗ-1 і ВТ8М мають високі характеристики міцності, здатні їх зберігати при тривалій експлуатації, але чутливі до наявності концентраторів напружень.

Джерелами зародження тріщин від втомленості, що приводять до руйнування робочих лопаток компресора, є дефекти структури матеріалу, поверхневі дефекти, що утворені в процесі виготовлення та експлуатації. Ступінь впливу поверхневих дефектів визначається рівнем концентрації напружень, які вони викликають, рівнем і знаком залишкових напружень.

Несуча здатність лопаток багато в чому залежить від поєднання сприятливих характеристик поверхневого шару (особливо в тонких кромках), які повинні нейтралізувати технологічні концентратори напружень і несприятливий вплив різних мікродефектів. Мікрорельєф пера лопатки часто має мікро- і макроушкодження у вигляді подряпин, розтравлень, а в окремих випадках відколів і сколів, що ініціюють зародження тріщин від втомленості на вхідних і вихідних кромках при напруженнях, близьких до границі витривалості. При цьому ушкодження, навіть мікроскопічного порядку, впливають на опір втомленості, збільшують розсіювання довговічності та підвищують імовірність зародження тріщин від втомленості.

Поверхня пера лопатки в порівнянні із серцевиною має ряд особливостей. Атоми на поверхні перебувають у невірноваженому стані, вони більш активні та мають надлишкову енергію, що створює умови для взаємодії поверхневого шару із зовнішнім середовищем (адсорбування та наводорожування), що знижують пластичність матеріалу та опір руйнуванню від втомленості.

Руйнування лопаток під впливом знакозмінних навантажень при напруженнях, близьких до границі витривалості, являє собою досить тривалий

процес зародження та розвитку тріщин від втомленості. Однак зміни на атомному та субструктурному рівнях, викликані технологічними мікрODEфектами в поверхневому шарі деталі, проявляються на ранніх стадіях процесу руйнування від втомленості. Істотним фактором варто вважати текстуру матеріалу, що формується в процесі виготовлення лопаток. На опір руйнуванню від втомленості лопаток компресора впливають наступні характеристики поверхневого шару:

- текстура та структура, розміри зерен і блоків кристалічної мозаїки;
- параметри наклепу, залишкових напружень, шорсткості та характер мікрорельєфу.

Для підвищення несучої здатності лопаток компресора в авіаційній галузі широко застосовуються оздоблювально-зміцнювальні методи, які дозволяють формувати сприятливе сполучення характеристик поверхневого шару: параметрів шорсткості, наклепу, залишкових напружень і текстури. Формування характеристик поверхневого шару пера лопаток компресора з титанових сплавів при різних оздоблювально-зміцнювальних методах обробки відбувається в результаті взаємозалежних явищ, які відбуваються у осередку деформування та у прилежних до нього зонах: багаторазових пружно-пластичних деформацій, що приводять до зміни пластичних властивостей металу, фазового складу та мікроструктури.

Одним з основних технологічних прийомів підвищення міцності, надійності та довговічності виробів у сучасному машинобудуванні є зміцнення деталей методами поверхневого пластичного деформування.

Специфічність виробництва та експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів висуває підвищені вимоги до технології ППД та устаткування для її здійснення через перераховані нижче причини.

1. Відносно мала твердість цілого ряду деталей сучасного авіаційного двигуна та висока точність їхнього виготовлення утрудняють застосування процесів ППД через короблення та зміну розмірів оброблюваних поверхонь, наприклад, відхилення товщини кромки пера лопаток компресора ГТД перебувають у межах 0,11 мм, а припустимі відхилення поверхонь пера лопатки від номінального положення перебувають у межах 0,06...0,2 мм.

2. Сучасний газотурбінний двигун має більшу номенклатуру деталей, які необхідно обробляти ППД, наприклад, лопатки вентилятора, компресора та турбіни, диски компресора та турбіни, шліцові поверхні валів, шестірні та інші деталі. Причому одних тільки роторних (робочих) лопаток, у сучасному двигуні, налічується до 5000 шт. Лопатки, у межах одного конкретного двигуна, по своїх типорозмірах значно відрізняються один від одного, так, наприклад, лопатки вентилятора, мають довжину до 1000 мм, а лопатки останньої ступені компресора високого тиску – 20 мм.

Велика номенклатура деталей, що піддаються обробці ППД, висуває високі вимоги до універсальності устаткування для здійснення процесу. Відсутність універсальності приводить до збільшення номенклатури та типорозмірів устаткування, збільшення потреби у виробничих площах та інструментальному господарстві, збільшення чисельності обслуговуючого персоналу.

4.1. Технології застосування алмазного вигладжування

Формування напруженого стану поверхневого шару валів. Залишкові стискаючі напруження, що утворюються в поверхневому шарі деталей при механічній обробці, впливають на їхню несучу здатність. Тому при проектуванні технологічних процесів необхідно призначати режими зміцнення, які дозволяють одержати сприятливий розподіл залишкових напружень по перерізу деталі.

Алмазне вигладжування сприяє виникненню залишкових напружень через нерівномірну пластичну деформацію поверхневих шарів і наявність теплового впливу (рис. 4.1). Деформація супроводжується взаємозалежними процесами зсуву, переорієнтації, дробленням складових структури, що приводить до зменшення щільності пластично-деформованого шару. Збільшення питомого об'єму при пластичному деформуванні може досягати 0,3...0,8%. Прагненню пластично-деформованого шару збільшити свій об'єм перешкоджають пружно-деформовані шари металу, які знаходяться нижче. Таким чином взаємодія пластично- та пружно-деформованих шарів створює стискаючі залишкові напруження, а в глибині – розтягувальні залишкові напруження, що врівноважують поверхневі.

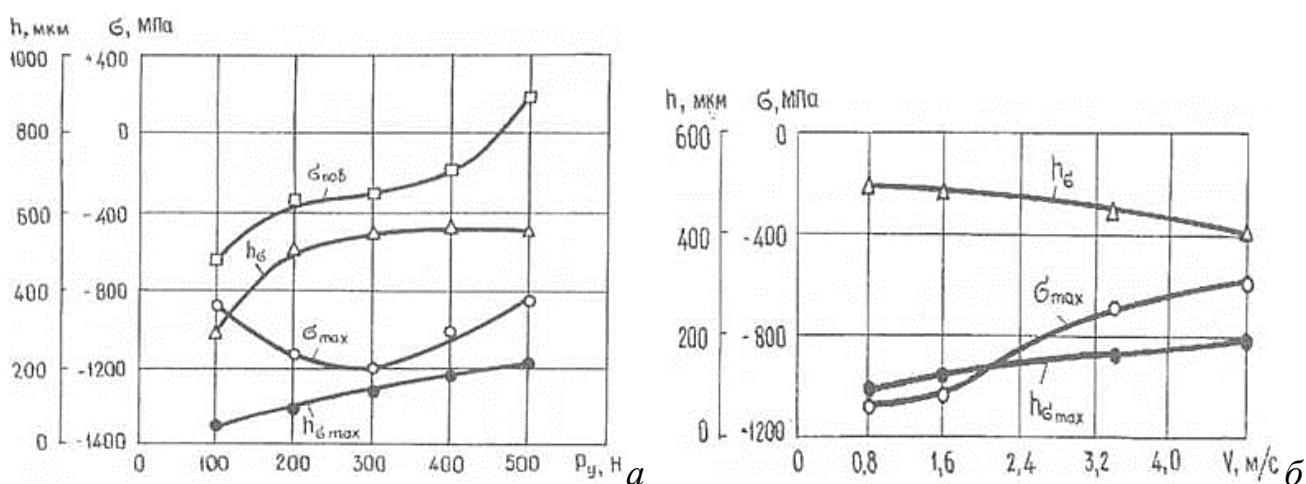


Рисунок 4.1 – Залежності глибини залягання тангенціальних залишкових напружень та їхнього рівня ($v = 1,3$ м/с) від сили (а) і швидкості вигладжування ($P_y = 400$ Н) валу зі сталі 13Х11Н2В2МФШ (б)

За алмазного вигладжування із середніми швидкостями відбувається незначне нагрівання поверхневого шару, що практично не впливає на формування залишкових напружень. Однак збільшення швидкості вигладжування приводить до значного нагрівання поверхневого шару, що може змінити характер епюри залишкових напружень біля поверхні. Як видно з рис. 4.1, *а*, підвищення сили вигладжування приводить до збільшення глибини залягання стискаючих залишкових напружень і до зсуву вглиб поверхневого шару їхнього максимального рівня. Максимальний рівень стискаючих напружень утворюється при вигладжуванні сталі 13X11H2B2MФШ із силою $P_y = 300$ Н.

Збільшення швидкості вигладжування (рис. 4.1, *б*), починаючи з 2 м/с., приводить до помітного зниження рівня стискаючих залишкових напружень біля поверхні, що викликано впливом температурного фактору. З підвищенням швидкості вигладжування спостерігається зсув максимального рівня стискаючих напружень углиб поверхневого шару.

Технологічні особливості алмазного вигладжування тонкостінних валів.

Несуча здатність валів газотурбінних двигунів, що працюють при знакозмінних навантаженнях, значною мірою залежить від характеристик поверхневого шару, сформованих на фінішних операціях технологічного процесу. Для остаточної обробки внутрішніх поверхонь валів широко застосовують чистове точіння, шліфування та полірування, що забезпечують необхідну точність і шорсткість. Шліфування в окремих випадках супроводжується структурними та фазовими перетвореннями, наведенням несприятливих залишкових розтягувальних напружень, утворенням глибоких рисок і приладів (технологічних концентраторів напружень), що знижують несучу здатність валів.

У процесі експлуатації через високочастотні оболонкові вібрації мали місце випадки руйнування деталей ГТД, викликані зародженням тріщин від втомленості у місцях концентрації напружень, що виникають через наявність технологічних концентраторів напружень. Найбільш чутливими до концентраторів напружень є тонкостінні вали. Для підвищення опору втомленості за рахунок нейтралізації технологічних концентраторів напружень застосовують оздоблювально-зміцнювальну обробку внутрішніх поверхонь тонкостінних валів алмазним вигладжуванням. Зміцнення металу при алмазному вигладжуванні полягає в концентрації дислокацій біля ліній зсуву, а оскільки дислокації оточені полями пружних напружень, то для наступних пластичних деформацій (переміщень дислокацій) необхідно більші напруження, ніж у незміцненому металі. У поверхневому шарі спостерігається зменшення щільності металу пропорційно ступеню пластичної деформації, що пояснюється збільшенням числа дислокацій і вакансій.

Для утворення сприятливої епюри залишкових напружень по перерізу стінки тонкостінного валу необхідно зміцнювати зовнішню та внутрішню поверхні (рис. 4.2). Двостороннє зміцнення тонкостінних валів ГТД, що забезпечує рівномірність зовнішньої та внутрішньої поверхонь, і сприяє переводу осередку зародження тріщини від втомленості в підповерхневу область, що приводить до значного підвищення їх опору втомленості. При товщині стінки 3 мм рівень залишкових розтягувальних напружень в пружно-деформованій серцевині, які врівноважують стискаючі напруження в поверхневому шарі, досягає 150 МПа, що може привести до зниження опору втомленості. Аналогічна картина спостерігається при збільшенні сили вигладжування.

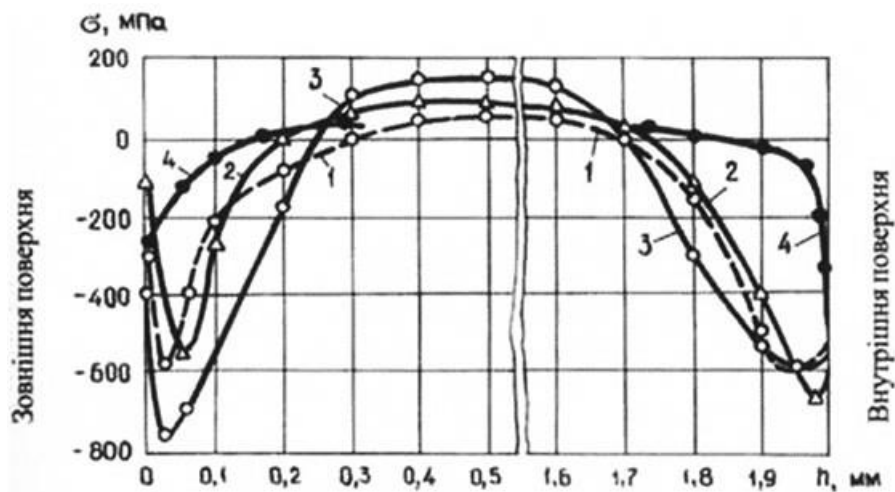


Рисунок 4.2 – Розподіл тангенціальних залишкових напружень по перерізу стінки валу ГТД зі сталі Х12НМБФШ після вигладжування із силами P , рівними 100 Н (1), 150 Н (2), 200 Н (3) і чистового точіння (4)

Алмазне вигладжування деталей, що працюють при підвищених температурах. Опір втомленості деталей, які працюють при високих температурах, суттєво залежить від режимів деформаційного зміцнення поверхневого шару. Деформаційне зміцнення, незалежно від знаке залишкових напружень, сприяє підвищенню дифузійної рухливості атомів при високих температурах, що прискорює процеси, які приводять до крихкого руйнування металу та зниження опору відриву. З підвищенням температури в пластично деформованому металі підвищується концентрація вакансій, тому що в цьому випадку в русі перебуває більша кількість дислокацій. Насичення металу вакансіями за рахунок деформаційного зміцнення підвищує швидкість їхньої коагуляції, осадження вакансій на мікропорах і росту мікротріщин. Зі збільшенням тривалості дії високої температури при циклічному навантаженні ефективність поверхневого зміцнення буде знижуватися.

Алмазне вигладжування привело до підвищення границі витривалості на 60%. При температурах випробування 300...780 °С границі витривалості як

шліфованих, так і вигладжених зразків знизилися в порівнянні із границями витривалості, отриманими при нормальній температурі. Це пояснюється зниженням рівня залишкових стискаючих напружень у поверхневому шарі, окислюванням і дорозпадом твердого розчину внаслідок високої дифузійної рухливості атомів.

Алмазне вигладжування підвищує опір втомленості деталей з високолегованих сталей 40ХН2МА-Ш та 13Х11Н2У2МФ-Ш, що працюють при температурах до 400 °С (табл. 4.1-4.2), деталей зі сплаву ХН77ТЮР при нагріванні до 600 °С (табл. 4.3), що пояснюється тим, що при цих температурах і короткому строку випробування домінуючою є здрібнювання структури поверхневого шару та сприятливий вплив залишкових стискаючих напружень. Вже при температурах понад 700°С переважаючий вплив на властивості матеріалу має більша дифузійна рухливість атомів і розпад твердого розчину, що зменшує опір відриву. У цьому випадку розвиток тріщин відбувається по границях зерен, що обумовлено місцевим зменшенням опору відриву через

Таблиця 4.1 – Результати випробувань на втомленість зразків зі сталі 40ХН2МА-Ш

Вид обробки зразків	Температура дослідження, °С	σ_{-1} ($N = 10^7$ циклів)	
		МПа	%
Полірування	20	500	100
	200	480	96
	400	430	86
Вигладжування за: один робочий хід	20	600	120
	200	550	110
Вигладжування за два робочих ходи	20	630	126
	200	600	120
	400	550	110

Таблиця 4.2 – Результати випробувань на втомленість зразків зі сталі 13Х11Н2В2МФ-Ш

Вид обробки	Температура, °С	σ_{-1} , МПа
Полірування	20	500
Полірування	200	350
Полірування	400	300
Алмазне вигладжування	20	640
Алмазне вигладжування	200	400
Алмазне вигладжування	400	375

Таблиця 4.3 – Результати випробувань зразків зі сплаву ХН77ТЮР

Вид обробки	Темпе- ратура до- сліджен- ня, °С	R_a	ρ	Глибина зміщення	Ступінь зміщення, %	Межа витри- валості σ_{-1}	
		мкм				МПа	%
Шліфу- вання	20	0,75	78	80	20	315	100
	300	0,80	75	80	32	315	97
	600	0,83	70	80	40	290	92
	780	0,85	65	50	10	290	92
Вигла- джування	20	0,11	470	270	65	505	160
	300	0,12	450	270	81	460	146
	600	0,16	440	270	90	405	128
	780	0,32	410	200	56	350	111

структурні зміни. Рекомендації з вибору режимів алмазного вигладжування деталей, що працюють в умовах підвищених температур, повинні враховувати агресивність середовища, рівень діючих температур і необхідний ресурс. Сприятливими слід вважати режими зміцнення, що забезпечують високий рівень стискаючих залишкових напружень при порівняно невеликому ступені деформаційного зміцнення, а саме: застосовуючи згладжувальний режим обробки: один робочий хід, оптимальні значення сили вигладжування та радіуса сфери інструмента, а також можливо більшу подачу.

Вплив вигладжування на опір контактній втомленості деталей. Під контактною втомленістю розуміють процес руйнування поверхневого шару (викришування) у результаті дії дотичних напружень. Причому ці напруження концентруються на відносно невеликих площах і можуть виникати в умовах статичного та динамічного навантаження, а також при коченні без проковзування або коченні із проковзуванням. Контактна втомленість в загальному має ті ж характерні властивості, що і будь-який інший вид втомленості. Для контактної втомленості також існує певна межа величини навантаження – межа контактної витривалості, при навантаженнях менше якого руйнування поверхні не виникає при як завгодно великій кількості циклів. Явища від контактної втомленості можуть розвиватися на поверхнях великої кількості деталей, які можуть бути зміцнені алмазним вигладжуванням. До таких варто віднести деталі типу шестірень, обойм голчастих підшипників, зубчастих муфт, роликів кулачкових валів та ін.

Серед технологічних методів, що дозволяють підвищити опір контактної втомленості деталей, значне місце займає алмазне вигладжування. У результаті обробки цим методом поліпшуються параметри якості поверхневого шару, його фізико-механічні властивості, збільшується однорідність структури, а тим самим, збільшується і опір контактної втомленості деталей. Причому це збільшення може становити істотну величину. Зміцнення вигладжуванням бігових доріжок радіально-упорних підшипників високомоментного турбобура забезпечило підвищення довговічності в 2...3 рази.

Підвищення опору контактної втомленості хромових покриттів, оброблених алмазним вигладжуванням, у порівнянні з полірованими пояснюється специфікою руйнування поверхневого шару. У вигладжених покриттях, на відміну від полірованих, тріщина із шару хрому не переходить в основний метал, метал основи затікає в тріщини покриття. Поверхневий шар з вигладженим хромовим покриттям руйнується в результаті розклинювальної дії металу в тріщинах хрому, а поверхневий шар з полірованим хромовим покриттям – у результаті розвитку тріщин під шаром хрому. Інтенсивність руйнування поверхневого шару в другому випадку більше, ніж у першому.

З підвищенням температури, ефективність алмазного вигладжування хромованих поверхонь (рис. 4.3) зменшується. Однак, до температури порядку 200 °С межа контактної витривалості зразків зі сталі 12Х2Н4А (*HRC* 31 ...33) із хромовим покриттям товщиною 50 мкм вище, ніж у полірованих.

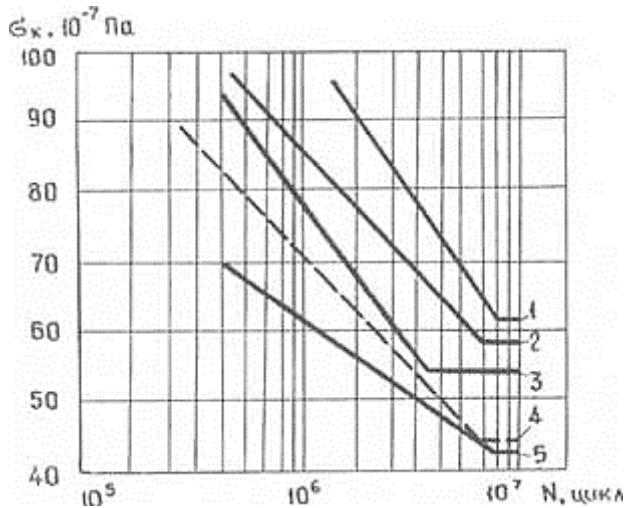


Рисунок 4.3 – Контактна втомленість хромованих зразків в умовах тертя ковчання та 6% ковзання: 1 – алмазне вигладжування, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – алмазне вигладжування, $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – алмазне вигладжування, $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – полірування, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 – полірування, $t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$

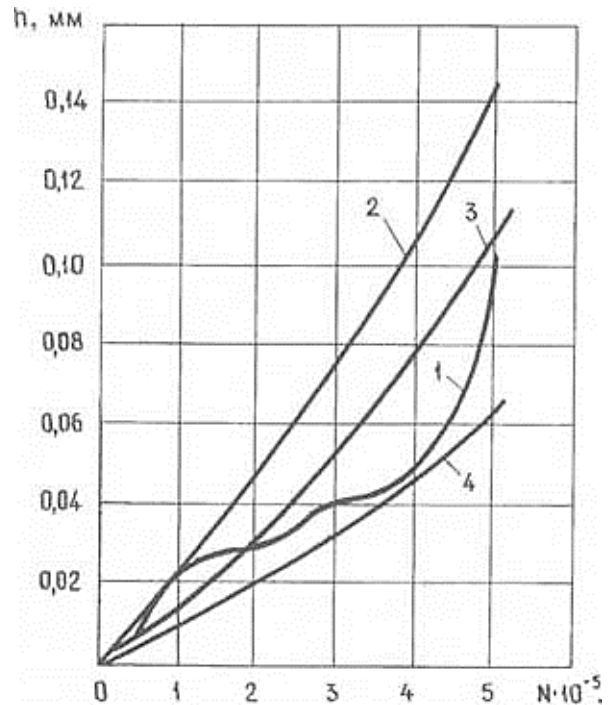


Рисунок 4.4 – Зношування поверхонь, відновлених сплавом 08Х17Н8С6Г, після обробки різними способами залежно від числа циклів навантаження 1 – точіння+притирання; 2, 3, 4 – точіння+вигладжування із силою P_y відповідно 300, 200, 100 Н

Підвищення зносостійкості методом вигладжування відновлених поверхонь. Для відновлення зношених поверхонь на практиці широке поширення одержали різного роду металопокриття та наплавлення. Однак істотними недоліками цих способів відновлення є зниження опору втомленості та зносостійкості внаслідок пористості, тріщинуватості, неоднорідності структури нанесеного шару та ін. Значне зниження шкідливого впливу зазначених факторів досягається застосуванням у якості фінішної обробки алмазного вигладжування. Відомо, що практично всі деталі, що зношуються в умовах контактної взаємодії, зазнають на собі вплив вібрацій з певними рівнями прискорень, швидкостей, частот і т.п. При впливі вібрацій на працюючий вузол у контактній парі виникає динамічне контактне навантаження, що характеризується ударом із проковзуванням та ініціює процеси зношування. Якщо вузол до того ж працює в умовах підви-

щених температур та агресивного середовища, то інтенсивність зношування контактуючих поверхонь ще більше зростає. У таких умовах, наприклад, працюють деталі двигунів внутрішнього згоряння, газотурбінних двигунів та ін.

Ефект від алмазного вигладжування для наплавлених поверхонь полягає більшою мірою у стабілізації властивостей поверхневого шару по його глибині. При порівнянні кривих зношування залежно від наробітку вигладжених і притертих зразків (рис. 4.4) видно, що зношування останніх відрізняється великою нерівномірністю. Це, у свою чергу, обумовлено наявністю недосконалостей макроструктури, місць зниженої твердості, пор та ін., поява яких викликана самим процесом наплавлення. Алмазне вигладжування усуває ці недоліки, тим самим зменшуючи ймовірність утворення локальних ушкоджень, що ведуть до появи задирів, вимивин та утворення «свищів».

Алмазне вигладжування металопокриттів, азотованих деталей і титанових сплавів. Гальванічні покриття знаходять широке застосування для відновлення деталей машин і підвищення їх зносостійкості. У галузі найбільш широке застосування знайшло хромове покриття, що має високу корозійну стійкість і зносостійкість.

Через розходження в модулях пружності хромового покриття та матеріалу основи, структурних перетворень і впливу осадженого водню в покритті утворюються залишкові розтягувальні напруження, які знижують опір деталей руйнуванню від втомленості. Зі збільшенням товщини хромованого шару, особливо у високоміцних сталей, спостерігається значне зниження границі витривалості.

Алмазне вигладжування металопокриттів дозволяє практично повністю відновити несучу здатність деталей машин за рахунок утворення стискаючих залишкових напружень (табл. 4.4). При цьому значно підвищується опір руйнуванню від втомленості (рис. 4.5).

Таблиця 4.4 – Характеристики якості поверхні та витривалості зразків зі сталі 13X11H2B2MФ-III

Вид обробки	R_a	ρ_n	H_{μ} , МПА	Ступінь наклепу, %	Глибина наклепу, мкм	σ_{-1}	
	мкм					МПа	%
Шліфування	0,78	75	4020	10	60	520	100
Шліфування+ +хромовання	0,68	97	4220	15	65	460	88,5
Шліфування+ +хромовання+ +вигладжування	0,11	410	5700	56	210	720	138
Шліфування+ +вигладжування+ +хромовання	0,09	485	4980	36	105	640	123
Шліфування+ вигладжування	0,10	460	4720	29	100	690	133

Вигладжування після шліфування підвищило границю витривалості на 33%, вигладжування після хромування – на 49,5%.

Значне підвищення опору корозійній втомленості сталі 13X11H2B2MФ-III спостерігається після вигладжування зразків, покритих хромом. Обмежена границя корозійної втомленості зразків, вигладжених після хромування, на 10

МПа вище, ніж границя витривалості шліфованих зразків, випробуваних у навколишній середовищі.

Для підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та відновлення деталей енергетичних установок все більш широке застосування знаходить детонаційне напилювання. Якість детонаційних покриттів в основному визначається властивостями та гранулометричним складом порошкових матеріалів: ВК18, ВК8, КХН-15 та ін., які наносяться на поверхню. Комплексне зміцнення деталей детонаційним напилюванням з алмазним вигладжуванням підвищує їх границю витривалості на 26...29% у порівнянні зі шліфуванням.

Для оцінки ефективності вигладжування азотованих деталей були проведені випробування на втомленість чотирьох груп зразків зі сталі 40ХН2МА-Ш: полірованих (вихідних); азотованих після полірування; вигладжених після шліфування та після азотування і алмазного вигладжування. Як видно з рис. 4.6, алмазне вигладжування після шліфування підвищило границю витривалості до 590 МПа, що на 20% вище, ніж після полірування. При вигладжуванні азотованих зразків границя витривалості не змінилася, але довговічність при напруженнях вище σ_{-1} збільшилася в 2...4 рази. Невелика ефективність зміцнення пояснюється порівняно великою глибиною азотованого шару ($h = 0,5$ мм).

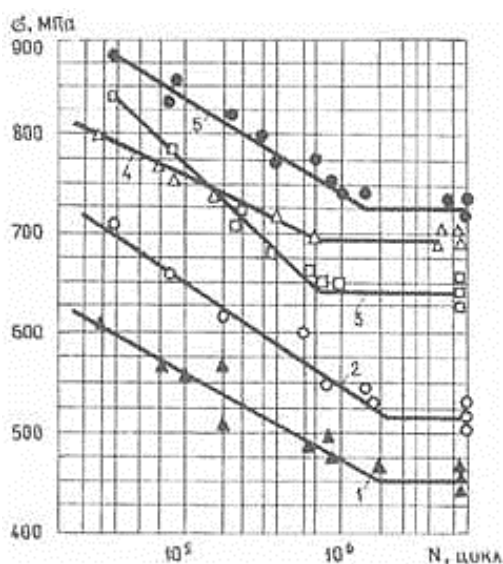


Рисунок 4.5 – Криві втомленості зразків зі сталі 13Х11Н2В2МФ-Ш:

- 1 – шліфування та хромування;
- 2 – шліфування; 3 – хромування після вигладжування; 4 – вигладжування після шліфування; 5 – вигладжування після хромування

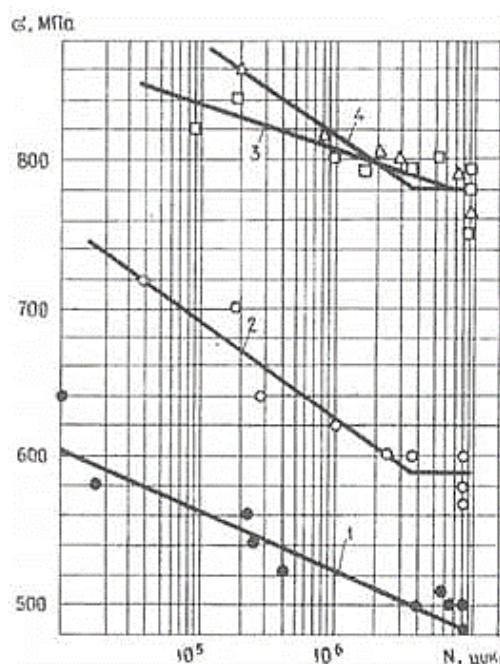


Рисунок 4.6 – Криві втомленості зразків зі сталі 40ХН2МА-Ш ($P_y = 150$ Н; $R_{сф} = 2$ мм; $s = 0,05$ мм/об):

- 1 – після шліфування; 2 – вигладжені після шліфування; 3 – азотовані після полірування; 4 – вигладжені після азотування

Алмазне вигладжування плазмових покриттів. Спосіб КІБ (конденсація речовини у вакуумі із плазмової фази в умовах іонного бомбардування) розроблений у Харківському ФТІ АН України.

Сутність КІБ полягає у тому, що матеріал катода випаровується у вигляді швидкісних струменів, що містять як заряджені, так і нейтральні частки. Ці струмені являють собою плазмові потоки з високим ступенем іонізації. Розміщаючи на шляху цих струменів деталь, можна концентрувати пари матеріалу катода та одержати покриття. У процесі нанесення плівки матеріал, що утворює її, здобуває нові фізико-механічні властивості, які істотно відрізняються від вихідних властивостей використовуваних матеріалів.

Алмазне вигладжування повністю нейтралізує несприятливий вплив покриття з нітридів титана на опір втомленості сталі 40ХН2МА-Ш. Найкраще поєднання властивостей поверхневого шару забезпечує напилювання нітридами титана з наступним алмазним вигладжуванням. У цьому випадку обмежена границя втомленості в агресивному корозійному середовищі сталі 40ХН2МА-Ш підвищилася на 85% у порівнянні з поліруванням.

Алмазне вигладжування титанових сплавів. Відомо, що деталі з титанових сплавів, які працюють при знакозмінних навантаженнях, досить чутливі до концентрації напружень.

Алмазне вигладжування особливо ефективно для деталей, що мають конструктивні та технологічні концентратори напружень. Однак вигладжування деталей з титанових сплавів не знайшло застосування через наволакування металу на інструмент. При вигладжуванні спостерігається високий рівень адгезійної взаємодії титанового сплаву з алмазним інструментом. При вигладжуванні інструментом із природних алмазів коефіцієнт тертя приблизно в 1,5 рази менше, ніж при обробці синтетичними наконечниками. Для вигладжування деталей з титанових сплавів необхідно створити на поверхні проміжний шар, що ізолює інструмент і поверхню від їх безпосереднього контакту. Попередня обробка титанових сплавів перед вигладжуванням сприяє формуванню на поверхні проміжного шару, за своїми фізико-механічними властивостями, структурі, хімічному складу та іншим характеристикам відмінного від основного матеріалу. Для створення проміжного шару використовують газонасичення, хіміко-термічну обробку та електроіскрове легування деталей з титанових сплавів.

Відносно менш трудомістким процесом підготовки поверхні деталей з титанових сплавів є створення газонасиченого шару, що представляє собою продукт одночасного розчинення в кристалічних ґратах металу елементів повітряного середовища: кисню, азоту, водню та пару води. Газонасичений шар має більш високу мікротвердість, ніж вихідний матеріал. Так, вихідна мікротвердість сплаву ВТЗ-1 склала 3830 МПа, після газонасичення – 4500 МПа та наступного алмазного вигладжування – 6000 МПа. Сила вигладжування в основ-

ному визначається міцністю газонасиченого шару. Збільшення P_y понад 200 Н ($R_{сф} = 1,5$ мм) може привести до руйнування крихкого шару.

Алмазне вигладжування полотна дисків компресора. При виготовленні дисків зі сталі 18Х15НЗМШ для досягнення необхідної точності та шорсткості поверхні полотна застосовують ручне полірування після чистового точіння. Ці операції часто супроводжуються виникненням залишкових розтягувальних напружень, що знижують несучу здатність матеріалу. На обробленій поверхні полотна залишаються сліди інструмента, шаржовані абразивні зерна, що є концентраторами напружень, які сприяють появі корозії та зниженню несучої здатності диска. Заміна ручного полірування полотна алмазним вигладжуванням передбачає одержання більш сприятливих і стабільних властивостей поверхневого шару за рахунок пластичної деформації та механізації процесу, що дозволяють підвищити надійність і ресурс дисків компресора.

При вигладжуванні важким завданням є обробка галтелі між ободом і полотном диска, де виникають найбільші напруження від спільної дії вібраційних навантажень, відцентрових сил і концентрації напружень. Для вигладжування полотна дисків з виходом на галтель був розроблений поворотний пристрій для токарного верстата зі ЧПУ. Цей пристрій разом із системою ЧПУ верстата дозволяє орієнтувати алмазний інструмент у процесі обробки по нормалі до оброблюваної поверхні диска та забезпечує сталість нормальної складової сили вигладжування, що є необхідною умовою для одержання стабільних властивостей поверхневого шару (рис. 4.7). При цьому вигладжуванню можна піддавати галтелі з радіусом, порівняним з радіусом сфери алмазного інструмента.

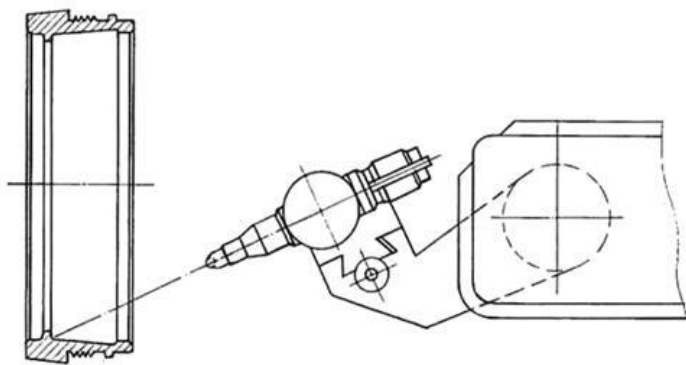


Рисунок 4.7 – Схема пристрою для алмазного вигладжування галтелей дисків ГТД

Диски, вигладжені з двох сторін з $P_y = 150$ Н, мають практично симетричні епюри залишкових напружень, обмірювані на різній відстані від осі обертання диска, що свідчить про стабільний поверхневий шар по радіусу, незважаючи на значне збільшення швидкості вигладжування з наближенням інструмента до периферії.

4.2. Ультразвукове зміцнення деталей ГТД сталевими кульками

Застосування ультразвукового зміцнення на деталях ГТД в умовах крупносерійного і масового виробництва та ремонту має істотні переваги в порів-

нянні із традиційними способами ППД, тому що дозволяє зі значно меншими витратами та більш високою якістю виконувати зміцнення деталей різної жорсткості та складної просторової конфігурації. Процес зміцнення заснований на наданні кінетичної енергії робочим тілам (кулькам) за допомогою ультразвукового поля, що виникає в замкнутому об'ємі при порушенні в ньому пружних коливань ультразвукової частоти. Деталі, поміщені в робочу камеру, піддаються обробці одночасно по всіх поверхнях, незахищених від впливу.

Типова установка для ППД складається з ультразвукового генератора, магнітострикційного перетворювача, змінних хвилеводів, пристрою для закріплення магнітострикційного перетворювача, робочого столу для установки оснащення та оброблюваних деталей і звукоізолюючого кожуха (рис. 4.8).

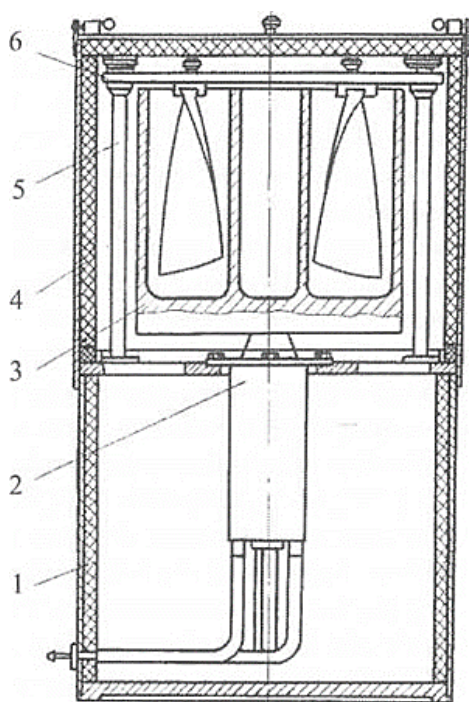


Рисунок 4.8 – Установка для ультразвукового деформаційного зміцнення лопаток: 1 – основа; 2 – ПМС15А-18; 3 – хвилевід; 4 – шумопоглинаючий кожух із кришкою; 5 – штанги; 6 – технологічний фланець

Оптимальний режим ППД в ультразвуковому полі, що забезпечує одержання заданої з умов експлуатації деталі якості поверхневого шару, здійснюється регулюванням основних параметрів процесу:

- енергії та частоти ударів кульок;
- розміру і якості застосовуваних кульок;
- тривалості процесу зміцнення.

Кінетична енергія удару кульки об оброблювану поверхню деталі прямо пропорційна його масі, квадрату амплітуди та частоті коливань випромінюючої поверхні хвилеводу, що озвучує робочий об'єм, тобто може змінюватися в широких межах, що істотно розширює технологічні можливості ультразвукового способу. Величина амплітуди коливань випромінюючої поверхні хвилеводу залежить від потужності, яка підводиться. Інтервал застосовуваних амплітуд перебуває в межах 0,01...0,15 мм. Використовуваний діапазон частот коливань випромінюючих поверхонь хвилеводів перебуває в межах 16...22 кГц.

Як робочі тіла використовують сталеві кульки з матеріалу ШХ15 або нержавіючої сталі діаметром 0,4...3 мм. Розмір застосовуваних кульок визначається з умови можливості обробки всіх радіусів переходу від однієї поверхні деталі до іншої, а також можливості одержання оптимального ступеня деформації оброблюваних поверхонь і виконання вимог до шорсткості. Для обробки відповідальних деталей: лопаток, дисків, бігових доріжок кілець підшипників, газот-

ракових поверхонь крильчаток осьових нагнітачів і відцентрових компресорів, застосовуються поліровані підшипникові кульки.

На формування якості поверхневого шару лопаток найбільш істотно впливає тривалість процесу зміцнення. При її збільшенні якість поверхні поліпшується, а величина та глибина залягання наведених залишкових напружень збільшуються. Рекомендований час зміцнення по перу однієї партії при перпендикулярному розташуванні лопаток становить 4...10 хв, при радіальному – збільшується до 15 хв; оптимальний час зміцнення по хвостовику перебуває в межах 20...45 с. При зміцненні поверхонь пера та антивібраційних поличок робочої лопатки вентилятора довжиною 1000 мм, для здійснення обробки в ультразвуковому полі потрібно всього 1 кг сталевих кульок діаметром 2 мм.

Кількість одночасно зміцнюваних лопаток становить 10...60 штук залежно від розміру лопаток і конструкції хвилеводу. Задири на кромках пера та антивібраційних поличках, що утворюються в результаті зміцнення, необхідно видаляти, не торкаючись профілю пера та антивібраційних поличок, без наступного зміцнення.

З метою інтенсифікації процесу та виключення явища сухого тертя при ударах кульок об оброблювану поверхню деталі застосовується змочувальна рідина – вода з антикорозійними добавками. Кількість змочувальної рідини, що заливається в робочий об'єм, перебуває в межах 4...10 мл.

Тривалість обробки в ультразвуковому полі, залежно від розмірів оброблюваних поверхонь деталі, перебуває в межах від 20 секунд до 30 хвилин. Наприклад, оптимальний час обробки хвостовиків робочих лопаток компресора та турбін перебуває в межах 20...45 с., а тривалість зміцнення поверхонь пера та антивібраційних поличок робочої лопатки вентилятора, довжиною 1000 мм (хорда 280 мм) становить 25 хвилин.

4.3. Пневмодробострумінне зміцнення деталей ГТД

Дробострумінна обробка – процес, що заснований на передачі кінетичної енергії робочому тілу за допомогою струменя стисненого повітря.

Пневмодробострумінна установка (рис. 4.9) містить виконавчий механізм типу МЗК-2 для обертання диска з оброблюваними лопатками по та проти годинникової стрілки; пневмосистему 1, дробозбірник 2 із соплами 3 для забезпечення заданої швидкості та напрямку польоту кульок; спеціальні диски 4 для кріплення лопаток різних типорозмірів; робочу камеру для розміщення диска з лопатками, що складається з корпусу 5 і сітчастого екрана 6 (відстань від зрізу сопла до зміцнюваної поверхні повинна бути не менш 30 мм).

Зміцнення лопаток компресорів проводиться кульками зі сталі ШХ15 діаметром 1,3...1,6 мм за ГОСТ 3722-81 «Підшипники кочення. Кульки. Технічні умови». Розміри кульок підібрані дослідним шляхом у процесі тривалої експлуатації установок для ультразвукового зміцнення лопаток на ЗМКБ «Прогрес», виходячи з необхідного рівня стискаючих залишкових напружень і недопущення перекручування геометричних параметрів пера лопаток. Маса кульок у камері установки при зміцненні лопаток III-го ступеня КВТ двигуна Д-36 становила 400 г. Періодично, через 45 годин безперервної роботи, необхідно робити

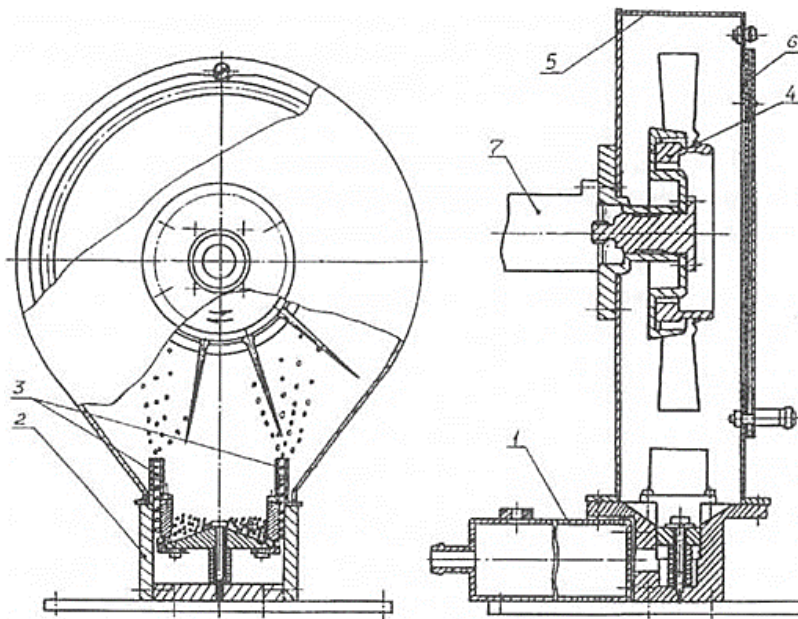


Рисунок 4.9 – Установка для пневмодробоструминного зміцнення

очищення кульок просіванням через сито та контроль маси. При цьому не допускається застосування суміші кульок різних діаметрів і з різних матеріалів.

Під час вибору режиму пневмодробоструминного зміцнення у якості параметру оптимізації режимів зміцнення була обрана границя обмеженої витривалості σ_{-1} на базі $N = 2 \cdot 10^7$ циклів.

Вибір оптимального режиму ПДУ, проведений за результатами випробувань на втомленість, був раніше підтверджений розрахунками та дослідженнями залишкових напружень. При зміцненні на цьому режимі утворюється найбільш сприятлива епюра залишкових стискаючих напружень.

4.4. Віброобробка лопаток компресора

Для фінішної обробки лопаток з титанових сплавів з метою нейтралізації технологічних мікродефектів застосовують віброабразивне полірування (ВП), віброгалтування та ультразвукову обробку кульками (УЗЗ).

Віброабразивна обробка, а також зміцнювальна віброобробка сталевими кульками виконуються на одностипному устаткуванні, які поєднують шліфування та полірування із пластичним деформуванням поверхневого шару, в останні роки знайшли широке застосування у виробництві лопаток.

Залежно від матеріалу лопатки, виду попередньої обробки, вихідної величини мікронерівностей поверхні призначаються режими обробки – частота та величина амплітуди коливань, характеристики робочих тіл (бій абразиву, керамічні, скляні або металеві кулі, дерев'яні кубики та ін.), співвідношення мас та ін. Для компресорних лопаток з титанових сплавів остаточною формотворною операцією є холодне вальцювання з наступним заокругленням кромek абразивним кругом. У цьому випадку параметр шорсткості поверхні Ra 1,6 і вище, тому використовуються «м'які» режими віброобробки для вирівнювання мікронерівностей по поверхні та створення стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі.

В теперішній час у серійному виробництві широко застосовують віброабразивну обробку робочих лопаток компресора та турбіни, а також інших деталей замість ручних слюсарних операцій. Тривалість віброгалтування є основним чинником, що визначає трудомісткість технологічного процесу.

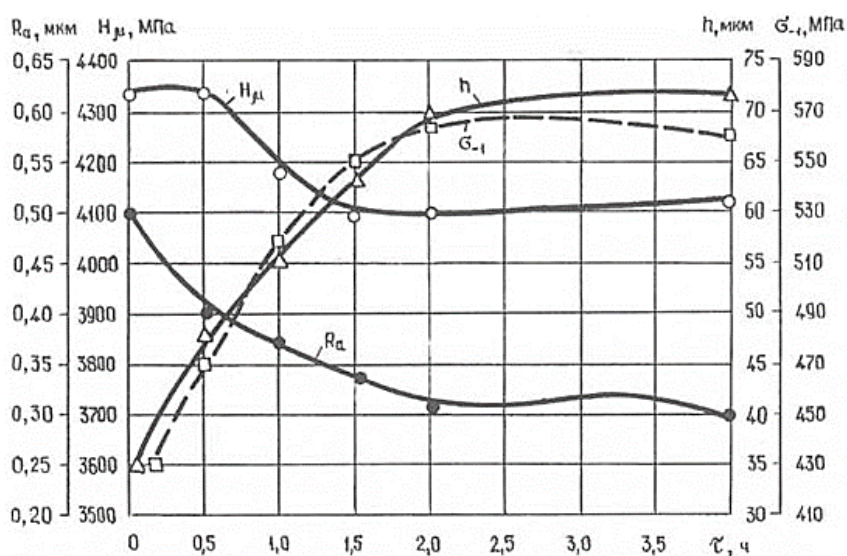


Рисунок 4.10 – Зміна параметрів шорсткості (Ra), наклепу (H_m і h) і границь витривалості зразків зі сплаву ВТ8 залежно від тривалості віброгалтування τ

На рис. 4.10 показано зменшення шорсткості за рахунок полірувального ефекту, створеного ковзними зіткненнями кульок і зразків у контейнері, що коливається в трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Поряд із цим рельєф поверхні здобуває плавні обриси, що збільшує опір втомленості деталей з титанових сплавів, досить чутливих до надрізу.

При віброгалтуванні відбувається перерозподіл рівня і глибина залягання стискаючих напружень – до 400 МПа та 40 мкм відповідно. Найбільша величина та глибина залягання стискаючих напружень зафіксовані на зразках, що піддавалися зміцненню протягом 2 год. Зі збільшенням тривалості віброгалтування параметри наклепу, величина та глибина залягання залишкових напружень змінюються до певної межі.

Досвід експлуатації та результати випробувань на втомленість деталей свідчать про значне розсіювання довговічності до появи тріщин або руйнування

від втомленості. Значний вплив на розсіювання характеристик втомленості має нестабільність властивостей поверхневого шару, утвореного на фінішних операціях технологічного процесу. Віброгалтування є ефективним технологічним засобом підвищення надійності та довговічності лопаток компресора зі сталі 14X17H2Ш. У результаті поліпшення основних параметрів поверхневого шару границя витривалості лопаток збільшується на 15%. При віброгалтуванні утворюється стабільна якість поверхні, що зменшує розсіювання основних характеристик втомленості, особливо довговічності. В результаті віброгалтування повністю видалялися сліди абразивних зерен від попередньої обробки; мікрорельєф поверхні після віброгалтування не мав певної орієнтації. Глибина наклепу збільшилася з 0,015... 0,020 мм до 0,050... 0,060 мм при порівняно невеликому збільшенні ступеня наклепу. Після віброгалтування зафіксовані стискаючі напруження від 300 до 500 МПа, які зі збільшенням відстані від поверхні меншають поступово. Глибина напруженого шару на зміцнених лопатках збільшилася до 0,060... 0,090 мм.

На двигунах з великим ресурсом зі збільшенням наробітку знижується якість поверхні пера робочих лопаток компресорів, що приводить до зниження їхнього опору втомленості. Особливо значна втрата міцності лопаток спостерігається на двигунах, що експлуатувалися при несприятливих умовах, які сприяють розвитку ерозії та утворенню механічних ушкоджень у вигляді дрібних точкових забоїв і вм'ятин.

Віброгалтування поліпшує якість поверхні пера сталевих лопаток компресорів після тривалої експлуатації – повністю видаляє ушкоджений ерозією шар і механічні ушкодження глибиною від 0,02...0,03 мм. У поверхневому шарі наводяться тільки залишкові напруження стиску порівняно невеликого рівня. У результаті поліпшення якості поверхні пера відновлюється опір втомленості лопаток.

4.5. Гідродробоструминне зміцнення деталей ГТД

Гідродробоструминний спосіб зміцнення – якісно новий процес, завдяки якому у поверхневому шарі та на поверхні деталі формуються:

- тільки стискаючі залишкові напруження і, як правило, вони практично не мають підповерхневого максимуму;
- порівняно низька шорсткість (Ra 1,25...0,16) поверхні зберігається, висока (Ra 10...2,5) зменшується до Ra 2,5...1,25;
- мікрогеометрія поліпшується, тому що радіуси заокруглення западин (лунок від куль) і виступів, що визначають опорну поверхню, збільшуються;

– виключений процес газонасичення у зв'язку зі зниженням температури в зоні контакту та наявністю ізоляції поверхневого шару від атмосфери безперервною рідинною плівкою.

Сутність гідродробоструминного зміцнення (ГДЗ) полягає в обробці деталей кульками, що ежектуються змащувально-охолоджувальною рідиною. На рис. 4.11 показана принципова схема гідродробоструминної ежекторної установки (ГДЕУ). Тут оброблювану деталь 1 встановлюють на шпинделі в камері 2, розділеною сіткою 3 на дві порожнини А і Б. У сітці поміщений дріб (кульки), у порожнині Б – змащувально-охолоджувальна рідина. У порожнині А встановлений сопло-ежектор 4 (від одного до декількох десятків). У нього насосом 5 подається струмінь змащувально-охолоджувальної рідини, що підхоплює дріб і направляє його на оброблювану деталь, здійснюючи обробку поверхні деталі. Відділена від дробу сіткою 3 рідина зливається по патрубку 6 у бак 7. Фільтр 8, розташований у баку, відокремлює дрібні частки матеріалу деталі, що утворюються при «лузненні» поверхневого шару, і зношені дробинки, що пройшли через сітку 3. Потім насос 5 знову засмоктує рідину і процес триває.

ГДЕУ мають наступні істотні переваги перед звичайними дробоструминними (ДУ) елеваторними установками.

По стійкості сталевих кульок: стійкість кульок від підшипників при роботі із трансформаторним маслом у тисячі разів вища, ніж у дробу при ДУ. У результаті, незважаючи на високу вартість кульок у порівнянні з

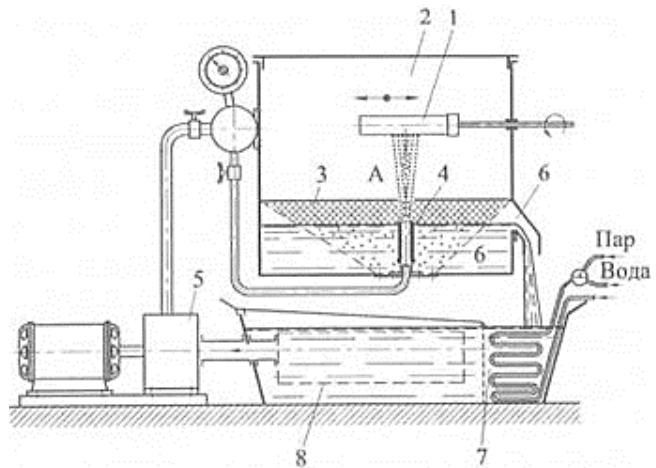


Рисунок 4.11 – Принципова схема ГДЕУ

литим дробом, використання їх обходиться в кілька разів дешевше. Стійкість сопел ГДЕУ обчислюється роками при дво- чи тризмінній роботі. Підвищення стійкості пояснюється виключенням сухого тертя дробинки як між собою, так і об поверхню деталі, сопла та стінки камери.

По контролю процесу зміцнення: уведений візуальний контроль роботи всіх сопел-ежекторів по відбитках струменів робочої суспензії на прозорій кришці установки, що особливо важливо для багатосоплових установок.

По продуктивності: наприклад, установка моделі ГДЕУ-ЛК забезпечує одночасне зміцнення шести лопаток компресора, кожна трьома соплами протягом 8 хв, тобто для кожної лопатки $T_{\text{маш}} = 1,3$ хв при незначному допоміжному часі.

В той же час процес зміцнення деталей на ГДЕУ має наступні недоліки:

– після зміцнення потрібне промивання деталей від масла. У тих випадках, коли можливі витрати часу між операціями, змащення може виявитися навіть корисним, наприклад для алюмінієвих деталей, коли після зміцнення перед анодуванням за технологією однаково промивають;

– порівняно підвищений ступінь пожежонебезпеки на робочих місцях через утворення парів під час роботи ГДЕУ при застосуванні як робочої рідини масла;

– при роботі на ГДЕУ, щоб уникнути змочування рук робочою рідиною, необхідно працювати в рукавичках, чого необхідно особливо дотримуватися при застосуванні токсичних рідин.

Сферу застосування ГДЕУ важко обмежити, тому що вже в цей час на них зміцнюються у серійному виробництві такі різнохарактерні деталі, як лопатки компресорів з титанових та алюмінієвих сплавів, сталеві шестірні, трубопроводи, пружини.

Формування залишкових напружень. Схематично процес створення залишкових напружень при ГДЗ представлений на рис. 4.12. При ударі кульки, що летить і має достатньою кінетичною енергією, об деталь через плівку змащувально-охолоджувальної рідини на поверхні залишається лунка. У поверхневому шарі деталі виникають напруження, що перевищують границю текучості (див. епюру напружень на рис. 4.12) і приводять до залишкової деформації.

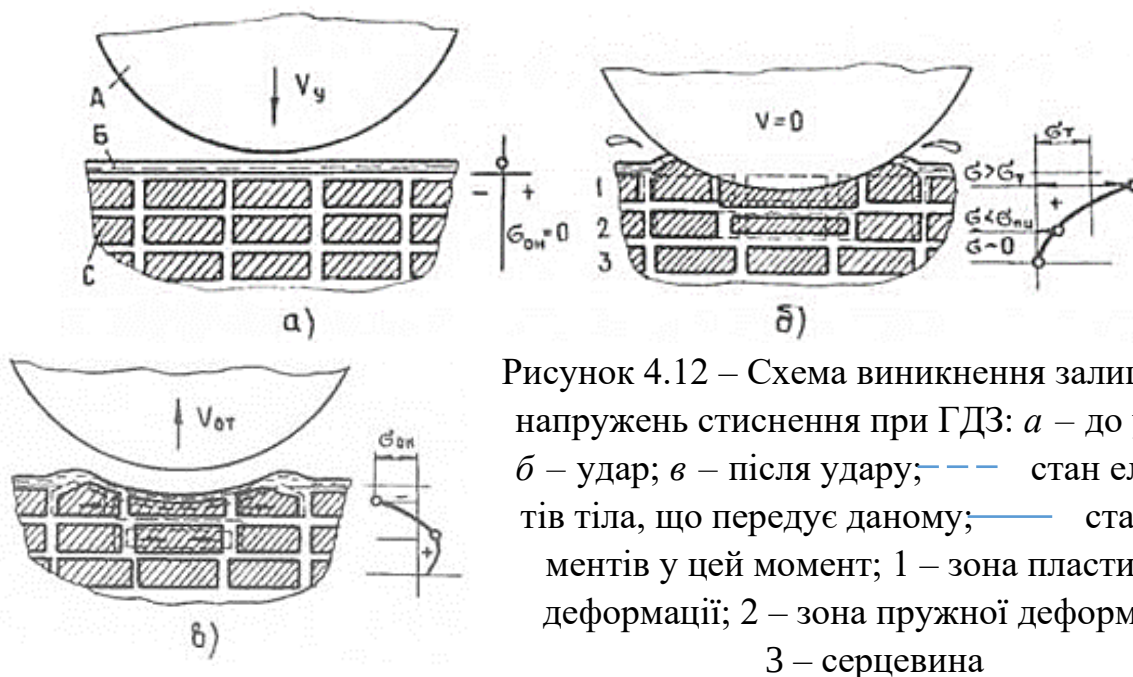


Рисунок 4.12 – Схема виникнення залишкових напружень стиснення при ГДЗ: а – до удару; б – удар; в – після удару; — — стан елементів тіла, що передуює даному; — стан елементів у цей момент; 1 – зона пластичної деформації; 2 – зона пружної деформації; 3 – серцевина

У той же час, підповерхневий шар і серцевина, у яких напруження не перевищували границі пропорційності, після відскоку кульки, маючи нерозривний зв'язок з поверхневим шаром, прагнуть, будучи як пружина, повернути поверхневий шар у первісне положення та створюють у ньому напруження стис-

нення. Самі вони при цьому не можуть повернутися у вихідне положення, тому що заважає поверхневий шар, і в них виникають розтягувальні напруження. У зв'язку з тим, що при наявності змащувально-охолоджувальної рідини між кулькою та тілом пластична деформація поверхневого шару відбувається рівномірно, тобто починаючи безпосередньо з верхнього шару, розподіл залишкових напружень по глибині не має підповерхневого максимуму.

Зміцнення поверхні. Пластична деформація приводить до утворення вакансій (точкових дефектів), щільність яких у наклепаному металі також збільшується. Скупчення вакансій, у свою чергу, можуть бути джерелами нових дислокацій. При пластичній деформації відбувається роздроблення кристалів на фрагменти та блоки з більшими перекручуваннями кристалічних ґраток на їх границях. Оскільки зазначені границі (фрагменти та блоки) служать перешкодами для деформації зсуву, то зі збільшенням числа фрагментів і блоків відповідно зростає число границь, біля яких затримуються дислокації. Збільшення ступеня розорієнтування фрагментів і блоків додатково підвищує опір границь проходженню через них дислокацій. Все це сприяє підвищенню міцності деформованого шару й, відповідно, його твердості. Критерій оцінки наклепу – ступінь наклепу показує величину підвищення мікротвердості поверхневого шару відносно вихідного стану або серцевини. Після зміцнення пера лопаток компресора зі сплаву ВТЗ-1 ступінь наклепу 15%, а глибина 0,08...0,1 мм.

Особливості мікрогеометрії після обробки. Западини мікронерівностей впливають на витривалість деталей, тому що руйнування від втомленості починаються саме з мікротріщин, що беруть початок, як правило, із дна западин. Западина оцінюється радіусом і гладкістю її закруглення, на які впливають застосовуваний інструмент – форма та шорсткість поверхні кожної кульки, а також змащувально-охолоджувальна рідина. З рис. 4.13 видно, що найменший радіус

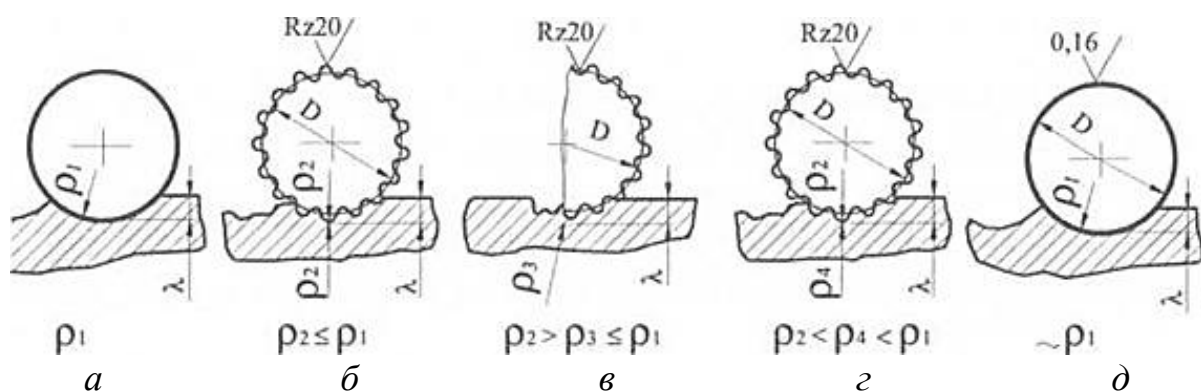


Рисунок 4.13 – Зони контакту з поверхнею деталі (твердість дробинки вище, ніж у деталі): а – ідеальна куля; б, г – чавунний або сталевий литий дріб цілий; в – чавунний литий дріб розколотий; д – кулька від підшипника; а, б, в – сухий удар; г, д – удар через змащувально-охолоджувальну рідину

западини лунки, що є практично надрізом, тобто концентратором напружень у випадку наявності розколотої дробинки (рис. 4.13, в), і найбільший для ГДЗ кульками за наявності змашувально-охолоджувальної рідини (рис. 4.13, д).

Необхідна шорсткість поверхні пера лопаток компресора зі сплаву ВТЗ-1 ($Ra\ 0,63...0,16$) забезпечується при ГДЗ кульками діаметром 2 мм.

4.6. Магнітно-абразивне полірування деталей ГТД

Процес магнітно-абразивного полірування (МАП) являє собою обробки деталей у середовищі абразивного порошку, утримуваного силами магнітного поля в робочій зоні. Магнітно-абразивний матеріал розташовується між полюсами електромагнітів, створюючи різальний інструмент («щітки»), щільністю якого можна варіювати в широких межах, змінюючи напруженість магнітного поля в зазорах. При русі деталі через робочу зону абразивний порошок охоплює оброблювану деталь, натискаючи на неї в кожній точці поверхні. Наявність складових тисків на деталь із боку порошку по нормалі (магнітного походження) і тангенціальної складової, обумовленою переміщенням виробу відносно порошку, приводить до знімання металу та згладжування мікронерівностей на поверхні деталі. МАП має наступні переваги: універсальність абразивного інструмента дозволяє обробляти деталі з різних матеріалів і конфігурацій з формуванням поверхні зі сприятливими характеристиками; поєднання в одному процесі оздоблювальної та зміцнювальної операцій; можливість механізувати обробку практично будь-якої деталі.

Титанові сплави при високих температурах мають підвищену хімічну активність до кисню, азоту, водню, що перебувають у повітрі. Це приводить при шліфуванні до наводнювання, появи гібридних плівок і шарів, які є причиною появи розтягувальних напружень крихкості поверхні та утворення мікротріщин. Як видно з рис. 4.14, мікротвердість зразків титанового сплаву ВТ5 після МАП більше, ніж шліфованих зразків при однаковій глибині (наприклад, при $h = 2$ мкм, після МАП $H_\mu = 3080$ МПа, після шліфування $H_\mu = 2800$ МПа).

Зносостійкість функціонально пов'язана із твердістю, структурою, напруженим станом поверхневого шару матеріалу та шорсткістю поверхні. Зношування оцінювали по зміні маси зразка за контрольні проміжки часу за допомогою аналітичних ваг з точністю до четвертого знаку. Шорсткість зразків після шліфування та точіння становила $Ra\ 0,7...0,8$, шорсткість зразків після МАП – $Ra\ 0,6$. Були вибрані дві партії зразків після МАП з різними напрямками нерівностей. Зношування шліфованих зразків за 32600 циклів склав 31,6 Мг, наточених – 26 Мг, зразків, оброблених МАП: 1) 19,2 Мг; 2) 16,0 Мг (рис. 4.15).

Можливість змінювати режими МАП (сітку на оброблюваній поверхні) дозволяє цілеспрямовано керувати експлуатаційними характеристиками матеріалів для їх оптимізації у конкретних умовах виробництва.

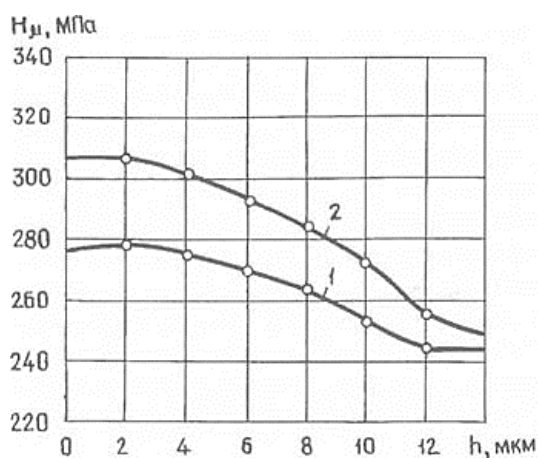


Рисунок 4.14 – Зміна мікротвердості титанового сплаву BT5:
1 – після шліфування; 2 – після МАП

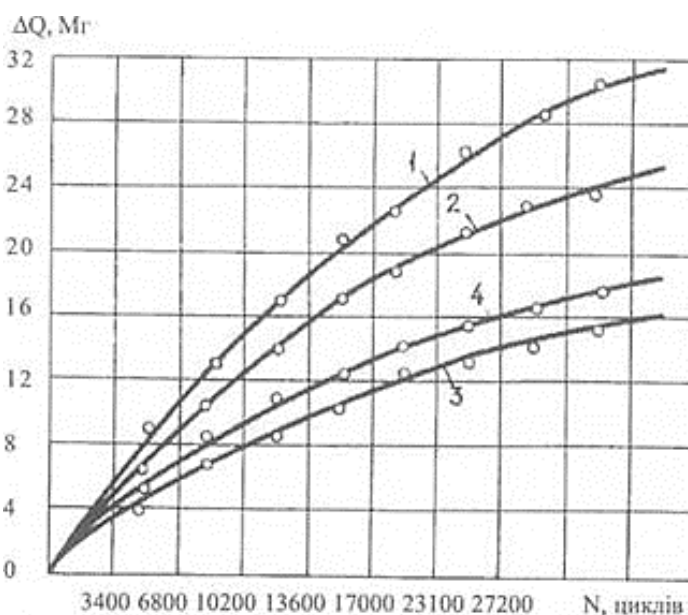


Рисунок 4.15 – Зношування титанового сплаву BT5 залежно від числа циклів: 1 – шліфування; 2 – точіння; 3 – МАП при $N_i = 1,24$; 4 – МАП при $N_i = 17,5$

4.7. Пневмоімпульсна обробка тонкостінних валів ГТД

Експлуатаційні властивості та довговічність тонкостінних валів ГТД, що працюють при циклічних навантаженнях, в основному визначаються станом поверхневого шару, що сформований на фінішних етапах технологічного процесу. Вибір методу остаточної обробки внутрішніх поверхонь валів ГТД залежить від характеристик поверхневого шару, конструктивних особливостей, величини та характеру навантажень, продуктивності процесу та засобів контролю його параметрів. За серійною технологією внутрішня поверхня валів зі сталі Х12НМБФШ остаточно обробляється шліфуванням та алмазним вигладжуванням за два проходи (крім перехідної ділянки конусної поверхні довжиною 12 мм). Алмазне вигладжування введене для зміцнення поверхневого шару та наведення стискувальних залишкових напружень з метою нейтралізації концентраторів напружень після шліфування. Воно забезпечує сприятливі характеристики поверхневого шару та шорсткість $Ra\ 1,24$, але має низьку продуктивність (сумарна трудомісткість шліфування та вигладжування внутрішньої поверхні валу становить більше 9 год).

Одним з методів обробки внутрішніх поверхонь тонкостінних валів ГТД, що попередньо піддаються чистовому точінню в розмір, є пневмоімпульсна об-

робка абразивними гранулами та наступне зміцнення сталевими кульками. На рис. 4.16 показана установка для пневмоімпульсної обробки. З метою надання робочим тілам максимальної окружної швидкості в модернізованій установці закручення потоку здійснюється по периферії внутрішньої поверхні валу у два етапи. Потік стисненого повітря з каналу 2 подається в кільцевий канал 3 тангенціально його основі. У каналі 3 він одержує необхідне обертання, проходячи через установлений на виході з нього направляючий апарат 4. Стиснене повітря надходить у розподільник, що циклічно (із частотою 2 Гц) направляє його по підводних рукавах у розгінні пристрої, що розташовані з протилежних сторін робочої камери (внутрішня частина оброблюваного валу 1). Пульсуючий повітряний потік, виходячи з розгінних пристроїв, змішується з робочими тілами 7, що перебувають у робочій камері, і приводить їх у зворотно-поступальний спіралевидний рух. Відпрацьоване повітря видаляється з камери через щілинні отвори 5 і внутрішню порожнину 8 розгінних пристроїв. З метою запобігання викиду робочих тіл ширина щілинних отворів має бути менше їхнього розміру (1...1,2 мм). Для поліпшення обробки конусної частини валу в установці передбачений обтічник 6, що зменшує прохідний переріз. Контроль параметрів роботи здійснюється виміром статичного тиску потоку повітря за допомогою манометра, встановленого на вході в розгінний пристрій.

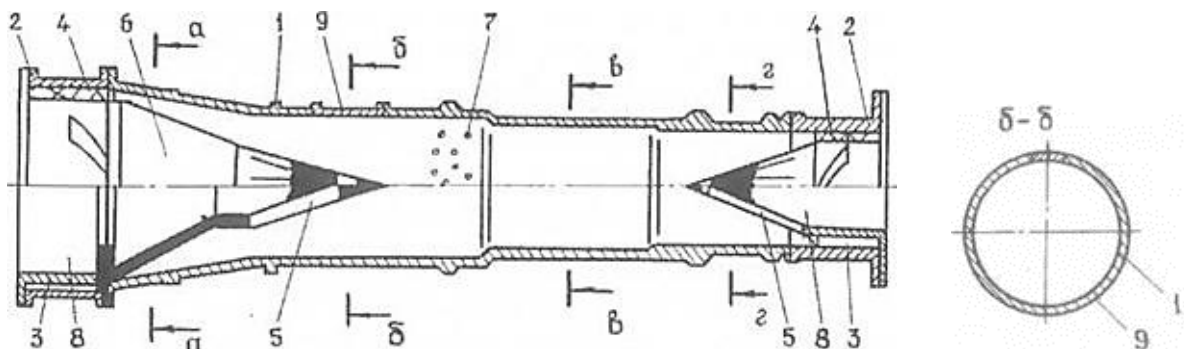


Рисунок 4.16 – Установка для пневмоімпульсної обробки валів ГТД

Раціональний час зміцнення при завантаженні 4 кг сталевих кульок діаметром 1,6 мм становить 15...20 хв, що забезпечує максимальне зміцнення, не допускаючи перенаклепу тонкого шару на поверхні. Зміцнення сталевими кульками знижує шорсткість поверхні та дозволяє одержати по перерізах валу практично однакову шорсткість $Ra\ 0,77...0,88$. Зміцнена сталевими кульками поверхня має сприятливий рельєф, а вершини мікронерівностей – згладжену форму внаслідок невеликих кутів контакту кульок з оброблюваною поверхнею.

Установлено, що найбільш прийнятні абразивні гранули на вулканітовій зв'язці з розміром зерна 200 мкм. При обробці точених зразків цими гранулами

протягом 20 хв знімання металу з поверхні склало до 0,01 мм, протягом 40 хв – до 0,015 мм, а при подальшій обробці – практично не відбувалося. Це пояснюється тим, що при пневмоімпульсній обробці зміна розміру відбувається в основному в результаті зменшення шорсткості оброблюваної поверхні.

Пневмоімпульсна обробка абразивними гранулами супроводжується зняттям тонкого поверхневого шару точеного зразка та має зміцнювальний ефект, що приводить до перерозподілу наведених при токарній обробці залишкових напружень і збільшення їхнього рівня внаслідок наклепу металу при ударному впливі гранул. У результаті цього рівень максимальних залишкових стискаючих напружень збільшується та становить 570...800 МПа. Загальна глибина залягання зменшується до 100 мкм.

З метою визначення впливу пневмоімпульсної обробки на зміну геометрії валу контролювали внутрішні діаметри розміром 85,4 та 117 мм, а також радіальне биття валу на зовнішній поверхні в шести рівномірно розташованих діаметральних перерізах. Внутрішній діаметр валу збільшувався на 20...30 мкм, що необхідно враховувати при призначенні припуску на обробку. На фланці та у вершини конуса спостерігалось збільшення биття на 0,02 мм, що укладається в межі допуску.

4.8. Зміцнення валів ГТД пневмороторним методом

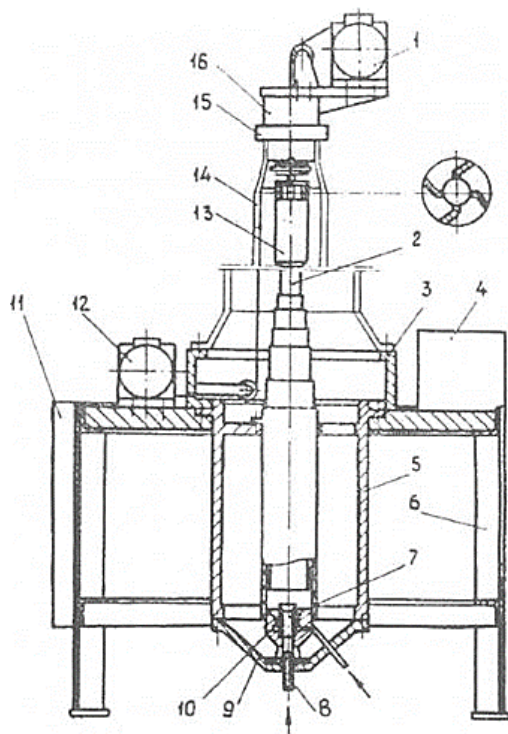


Рисунок 4.17 – Установка для деформаційного зміцнення кульками внутрішніх поверхонь валів ГТД

Для зміцнення внутрішніх поверхонь валу ГТД зі сталі Х12НМБФШ, що має більшу довжину ($L = 2000$ мм), застосовується установка, показана на рис. 4.17. Вона являє собою зварену раму 6, на якій змонтовані циліндр 5 із фланцем 9, камера 3, пульт керування 11 і щиток 4 для кріплення пневмоапаратури. Зміцнюваний вал 14 кріпиться за фланець до камери. Основна частина установки – сопло-ежектор. Воно має робочу форсунку 8, корпус 10 із чотирма отворами та кільцевою проточною для додаткового наддування повітря з магістралі.

У корпус угвинчений змінний насадок 7 з конусом у верхній частині, призначений для формування струменя суспензії, що складається з повітря та

кульок. Повітря підводиться до форсунки, закріпленої на дні фланця. Струмінь суспензії повітря та кульок, що утворюється в змішувальній камері сопла-ежектора, через телескопічну щоглу 2 направляється до дробемету 13. Потрапляючи в конус, він відхиляється від осевого напрямку в радіальний та через тракт пневматичної турбинки, що забезпечує частоту обертання дробемета до 10000...12000 об/хв, виходить на внутрішню поверхню зміцнюваного валу. Дробемет встановлено на підшипниках і при роботі вільно обертається, забезпечуючи рівномірне зміцнення. У процесі обробки дробемету також надається зворотно-поступальне переміщення через телескопічну щоглу. Зверху на зміцнюваний вал нагвинчується стакан 16, на якому змонтований механізм підйому 1 дробемету. Змінна гайка 15 дозволяє обробляти вали різних габаритів. При досягненні дробеметом найвищої точки в механізмі підйому спрацьовує кінцевий вимикач, що включає реверс. Для руху вниз передбачений двигун 12. При досягненні дробеметом нижчої точки також спрацьовує кінцевий вимикач і знову включається двигун 1. На пульті є лічильник циклів і реле, яким задається тривалість обробки вала ($HV = 2450...3410$ МПа).

Максимальні залишкові стискувальні напруження знаходяться на рівні 500 МПа. Біля поверхні рівень напружень перебуває в межах 150...250 МПа, глибина залягання досягає 300...450 мкм. Рівень напружень підвищується зі збільшенням тривалості зміцнення, при цьому спостерігається більш інтенсивне зростання в перерізах, розташованих ближче до дробемету. Максимальне зміцнення поверхні відбувається при обробці протягом 1,5 год, тобто за 12 проходів. Стабільність фізико-механічних властивостей поверхневого шару по довжині валу можна забезпечити, змінюючи тиск повітря залежно від діаметральних розмірів.

4.9. Абразивне полірування дисків ГТД на сизалевих кругах

Стан поверхневого шару, отриманий після фінішної механічної обробки – один з основних факторів, що визначають довговічність найбільш відповідальних деталей авіадвигунів. Полірування рідкими абразивними пастами на сизалевих кругах є прогресивним технологічним методом фінішної обробки полотна дисків. Незначні зусилля та температура в зоні полірування не супроводжуються пружно-пластичними деформаціями поверхневого шару. Частки абразиву практично не заглиблюються в поверхневий шар, як це спостерігається при інших видах обробки. Після обробки утворюється сприятливий мікропрофіль поверхні із шорсткістю $Ra\ 0,3...0,6$. У зв'язку з можливістю механізації, поліпшенням умов праці та високою продуктивністю цей метод успішно замінює ручне полірування.

Схема установки для полірування полотен дисків компресора ГТД зі сплаву ВТ9 наведена на рис. 4.18. Диск, який полірується, кріпиться на планшайбі, що приводиться в обертання від електродвигуна 1 через клиноремінну передачу та черв'ячну пару. Сизалеві круги обертаються електродвигунами 4, 6 зі швидкістю 25...30 м/с. Паста попадає у зону обробки під тиском 30...40 МПа за допомогою форсунок. Одержання шорсткості в межах $Ra\ 0,2$ потребує часу обробки однієї сторони диска в межах 8...10 хв.

Паста, які використовуються при поліруванні, складаються з абразивного матеріалу та зв'язувальної основи, що містить стеаринову та олеїнову кислоти, церезин, парафін і розчинно-інтенсифікатори на основі каніфолі. Основа паст розчинна у воді, що полегшує видалення їхніх залишків з обробленої поверхні диска. Зусилля та температура в зоні полірування на сизалевих кругах не викликають термопластичних деформацій, при обробці знімається незначний (0,001...0,015 мм) шар металу, підвищується роль технологічної спадковості у формуванні поверхневого шару.

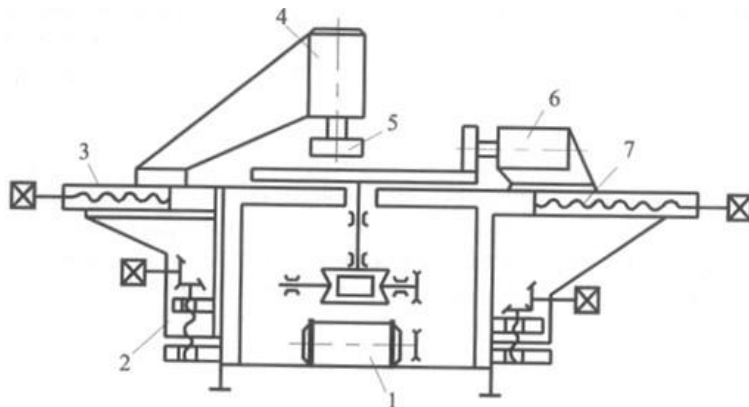


Рисунок 4.18 – Схема установки для полірування дисків компресора сизалевими кругами

Дослідження шорсткості після полірування поверхні вручну та сизалевими кругами показали, що в другому випадку мікропрофіль є кращим. Зменшується розсіювання параметрів шорсткості полотна дисків, що є наслідком сталості режимів – зусилля притиску сизалевого круга встановлюється спочатку та підтримується протягом усього періоду обробки. Якщо після полірування вручну шорсткість поверхні становить $Ra\ 0,4...0,6$, то на сизалевих кругах – не більше $Ra\ 0,25$. Відсутність шаржування у поверхневий шар абразивних зерен і слідів від попередньої обробки є однією з переваг полірування на сизалевих кругах з погляду підвищення опору втомленості.

Машинне полірування полотна дисків на сизалевих кругах підвищує границю витривалості з 319 до 358 МПа, тобто на 12% (імовірність руйнування $p = 10\%$) і значно зменшує розсіювання властивостей поверхневого шару, що проявляється в зміні коефіцієнта варіації з 0,091 до 0,055. Опір матеріалу руйнуванню від втомленості росте внаслідок зменшення шорсткості поверхні та збільшення однорідності властивостей поверхневого шару в порівнянні з одержуваним ручним поліруванням.

4.10. Обробка деталей ГТД у псевдоожиженому шарі абразиву (турбоабразивна обробка)

Сутність процесу турбоабразивної обробки (ТАО) полягає у створенні в робочій камері установки 1 (рис. 4.19) за допомогою потоку повітря, що подається через опорно-розподільні пористі решітки 4 під шар абразиву 5, так званого «киплячого» шару абразивних часток. Він має дуже малу в'язкість і високу плинність. У псевдоожижений шар абразиву поміщають оброблювану заготовку 3 і надають їй обертання з високою коловою швидкістю (порядку $v_d = 15 \dots 30$ м/с.).



Рисунок 4.19 – Схема турбоабразивної обробки: 1 – корпус установки; 2 – кришка; 3 – оброблювана деталь; 4 – розподільна решітка; 5 – киплячий шар абразивних зерен

Шар часток, який має такі властивості, є своєрідним абразивним інструментом, тому що при зіткненні часток з поверхнею обертаної деталі забезпечується інтенсивне знімання металу та формування нового мікрорельєфу поверхні. Висока плинність киплячого шару забезпечує обробку складнопрофільних поверхонь. При цьому одночасно обробляються всі відкриті поверхні заготовки, що обумовлює досягнення високої продуктивності. Інтенсивність знімання може досягати $2 \dots 4$ мкм/хв. і більше, що значно більше, ніж, наприклад, при віброподібній обробці, яка зазвичай становить $0,05 \dots 0,1$ мкм/хв.

Малі зусилля та короткочасність взаємодії зерен з оброблюваною поверхнею, а також відсутність тертя об зв'язку різального інструмента спричиняють низькотемпературний характер процесу ТАО. При цьому повністю виключається можливість механічних і теплових деформацій оброблюваних деталей, що дозволяє механізувати обробку не тільки складнопрофільних, але й ажурних, тонкостінних і легкодеформовуваних деталей (типу пустотілих тонкостінних валів, кілець направляючих апаратів із просічками під лопатки, тонкостінних дисків ГТД і т.д.).

Параметрами, що визначають ефективність процесу, є кінематична схема (схема розташування оброблюваної деталі стосовно площини повітророзподільної решітки), швидкість руху оброблюваної деталі, час обробки, тиск (витрата) повітря, що подається в установку на зрідження абразивного шару, зернистість і вид (марка) абразивного зерна, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу (твердість, міцність), характер вихідної поверхні, що підлягає обробці (висота мікронерівностей та їх напрямок, спосіб попередньої обробки – точіння, фрезерування, литва, штампування та т.д.).

Вибір оптимальної кінематичної схеми обробки залежно від форми та інших геометричних параметрів деталей має значний вплив на інтенсивність знімання металу та рівномірність обробки. Схема обробки з горизонтальною віссю обертання (рис. 4.20, *а*) у порівнянні з вертикальною віссю має переваги (рис. 4.20, *б*). Продуктивність обробки за першої схеми, за інших рівних умов, в 3...4 рази вище, ніж за другої. Перша схема застосовується при обробці деталей типу тіл обертання (циліндри, кільця, диски та т.п.). Схема з коливальним рухом деталі (рис. 4.20, *в*) в 3...5 разів менш ефективна за продуктивністю, ніж схема на рис. 4.20, *б*, але вона може бути використана при обробці деталей, що не має форми тіл обертання (наприклад, при обробці лопаток ГТД і т.п.).

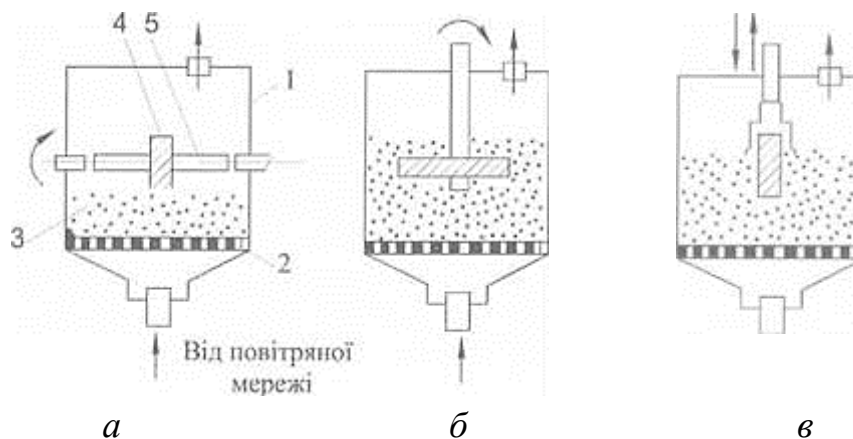


Рисунок 4.20 – Схеми турбоабразивної обробки з горизонтальною віссю обертання (*а*), з вертикальною віссю обертання (*б*), з коливальним обертанням деталі (*в*): 1 – апарат «киплячого» шару; 2 – розподільна решітка; 3 – абразивний шар; 4 – оброблювана деталь; 5 – оправка

Обробка дисків компресорів і турбін. Обробка дисків компресорів діаметром від 200 до 820 мм різних виробів проводиться, залежно від їхніх типорозмірів, на спеціалізованих турбоабразивних установках типу АПС (рис. 4.21). Установки АПС містять робочу камеру 1 і бункер 2 для абразиву 3, забезпечені пористими повітророзподільними решітками 4 та 5 і камерами 6 та 7, які подають повітря, з'єднані із пневмосіттю або напірним вентилятором. Відпрацьоване запилене повітря з робочої камери прямує через циклон 15 і далі через фільтр у витяжну систему вентиляції. На задній стінці робочої камери 1 розміщений горизонтальний шпиндель 16 оброблюваної деталі 17. У шарі абразиву робочої камери 1 розташовані повітряні сопла 18, забезпечені приводами їх переміщення і які локально впливають на важкодоступні ділянки деталі. Після закінчення циклу обробки абразив зливається з робочої камери в бункер 2 через зливальні вікна 9, відкриваються двері робочої камери для зняття деталі. Один оператор може обслуговувати дві установки.

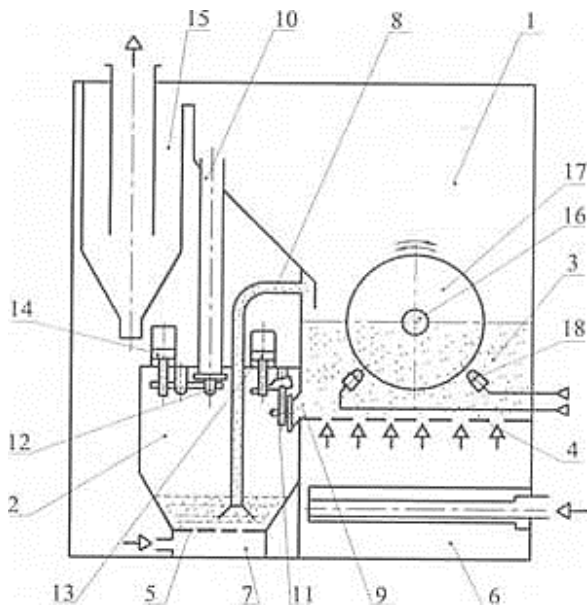


Рисунок 4.21 – Принципова схема турбоабразивних установок типу АПС

Диск, що підлягає обробці, кріпиться за допомогою спеціального технологічного оснащення на шпинделі установки, при цьому глибина занурення диска в шар абразиву становить $0,8...1,0$ радіуса диска. Використовують абразивні шліфзерна електрокорунду нормального 14А зернистістю №63. Швидкість обертання дисків становить $20...23$ м/с. В процесі обробки роблять реверс обертання шпинделя деталі. Машинний час обробки для дисків з титанових сплавів (ВТЗ-1, ВТ8, ВТ9) становить $2...5$ хв, а для дисків, виготовлених з жароміцних сплавів (ЕІ698-ВД та ін.) – $4...8$ хв. Шорсткість поверхні дисків після ТАО $Ra\ 0,7...0,5$ при вихідній шорсткості після токарної обробки $Ra\ 2,5...1,6$. Кромки по торцю пазів на зовнішньому ободі дисків мають радіус округлення $0,3...0,8$ мм, правильну геометрію, однорідний мікрорельєф (відсутні окремі риски) і шорсткість $Ra\ 0,5...0,3$.

Обробка зварених барабанів роторів компресорів ГТД. Після зварювання дисків у барабани здійснюють їх наступне відпалювання для зняття термічних напружень, що, залежно від режимів термообробки, частково або повністю знищує ефект від попереднього зміцнення дисків, повертаючи їхню довговічність до вихідного стану. Проведені дослідження показали, що ТАО відпалених барабанів на установках АПС за схемою рис. 4.20, а не забезпечують зміцнення ободної частини їх дисків й, отже, збільшення їхньої довговічності через те, що оболонки барабанів ускладнюють доступ абразивних часток «киплячого» шару до ділянок дисків, які підлягають зміцненню, у районі дна пазів під лопатки.

Ефект зміцнення досягається обробкою за схемою наведеною на рис. 4.22. Тут барабан 1, закріплений на шпинделі 2 у робочій камері 3 установки та занурений в «киплячий» шар абразиву 4, реверсивно обертають із робочою швидкістю обробки, а на підлягаючі зміцненню важкодоступні кромки дна па-

Деталі на ТАО надходять після операцій протягування пазів дисків, свердлення отворів і підготовки, при необхідності, кромки під остаточну обробку. За вимогами стану поверхні не допускається наявність подряпин, глибоких рисок, забоїв, які не усуваються при обробці. Поверхні, які не обробляються, повинні технологічно захищатися. Якість оброблених поверхонь дисків, геометрії та величин округлення кромки пазів після ТАО перевіряється на відповідність установленим контрольним зразкам.

зів 5, місця їхнього сполучення з бічними кромками та поверхні міжпазових виступів кожного з дисків барабана локально впливають повітряними струменями з розміщених у шарі абразиву сопел 6.

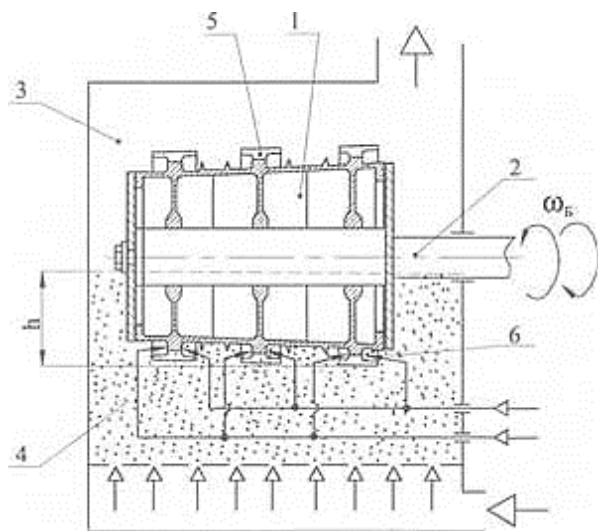


Рисунок 4.22 – Схема обробки зварених барабанів роторів компресорів ГТД

Час зміцнювальної обробки зварених барабанів роторів КНТ, КСТ і КВТ діаметром від 470 до 820 мм і довжиною від 160 до 470 мм шліфзерном електрокорунду нормального 14А складає 3...5 хвилин. ТАО застосовують для повторного зміцнення ремонтних деталей (у тому числі зварених барабанів) з метою продовження призначеного ресурсу, а також для видалення з них окисних плівок і нагару замість застосовуваного у виробництві трудомісткого процесу хімічного травлення. Метод застосовують також і для зняття нагару з ремонтних деталей турбін ГТД, наприклад з поверхонь пера лопаток.

Питання для самоконтролю:

1. Які фактори механічної обробки і експлуатації впливають на несучу здатність лопаток компресора? Чим оцінюється ступінь їх впливу? Які методи механічної обробки застосовують для підвищення несучої здатності лопаток? В чому полягає їх специфічність?
2. З якою метою застосовують технології застосування алмазного вигладжування?
3. В чому полягають технологічні особливості алмазного вигладжування тонкостінних валів?
4. Що дає алмазне вигладжування деталей, які працюють при підвищених температурах?
5. В чому полягає вплив алмазного вигладжування на опір контактній втомленості деталей?
6. В чому полягає вплив алмазного вигладжування на зносостійкість відновлених поверхонь, азотованих деталей і титанових сплавів?
7. В чому полягає особливість алмазного вигладжування полотна дисків компресора?
8. За якої схеми здійснюють ультразвукове зміцнення деталей ГТД сталевими кульками? його переваги?
9. Що дає пневмодробоструминне зміцнення деталей ГТД? схема обробки, переваги?
10. Що дає віброобробка лопаток компресора? її різновиди, переваги?
11. Що дає гідродробоструминне зміцнення деталей ГТД? схема обробки, переваги?
12. Що дає магнітно-абразивне полірування деталей ГТД? схема обробки, переваги?
13. Що дає пневмоімпульсна обробка тонкостінних валів ГТД? схема обробки, переваги?
14. В чому полягає зміцнення валів ГТД пневмоторним методом? схема обробки?
15. Що дає абразивне полірування дисків ГТД на сизалевих кругах? переваги?
16. Що дає турбоабразивна обробка деталей ГТД? схема обробки дисків компресора? схема обробки звареного барабану ротора компресора?

Розділ 5. ТЕХНОЛОГІЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З КЕРАМІЧНИХ, ПОЛІМЕРНИХ І МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

5.1. Класифікація технічної кераміки, галузі застосування.

Як згадувалося в розділі 1, під технічною керамікою розуміється клас твердих полікристалічних матеріалів, які отримані спіканням тонкодисперсних порошків і застосовуються у промислових цілях. Існує значна кількість різновидів технічної кераміки, фізико-механічні характеристики яких визначають переважні області їхнього використання.

За областями застосування ТК можна умовно розділити на електротехнічну й радіоелектронну кераміки, які використовуються для виробів електротехніки й радіоелектроніки – їхня частка становить до 85% від загального випуску ТК, а також конструкційну кераміку (КК) для вогнетривких, хімічно- й радіаційностійких виробів машино- і приладобудування, на яку доводиться до 8% кераміки, що випускається, й інші види кераміки – близько 7%. Доля конструкційної кераміки безперервно зростає. З конструкційної кераміки виготовляють робочі органи теплових й автомобільних двигунів, підшипників, різального інструмента. Особливо перспективним є застосування керамічних композиційних матеріалів.

Кераміка чистих оксидів – призначена для виготовлення електротехнічних і вогнетривких виробів. Основні види керамік: оксид алюмінію (Al_2O_3) – корунд; діоксид кремнію (SiO_2) – кварц, кварцове скло; діоксид цирконію (ZrO_2); оксид берилію (BeO); оксид магнію (MgO); оксид урану (UO_2); шпінель (MgAl_2O_4).

Корундова кераміка (Al_2O_3 , іонний тип зв'язку між молекулами) – виробляється на основі гарячепресованого оксиду алюмінію Al_2O_3 (Гп) й спеченого оксиду алюмінію Al_2O_3 (Сп) – характеризується високою хімічною й фізичною стійкістю до високих температур, корозійною стійкістю, сумісністю з живими організмами. Використовується для футерування печей, в підшипниках, електроізоляторах, в системах передачі електроенергії, в МГД-генераторах, застосовується як абразив під час операцій шліфування й полірування. Завдяки унікальному поєднанню властивостей (висока механічна міцність, твердість, зносостійкість, вогнетривкість, теплопровідність, хімічна інертність) широко застосовується в сучасній техніці. На її основі створений широкий спектр високоякісних матеріалів для електроніки, електротехніки, машинобудування й ряду інших галузей промисловості.

Кварцова кераміка (SiO_2) – відрізняється корозійною стійкістю, стійкістю до дії кислот, має низку теплопровідність ($0,8 \dots 1,6$) Вт/(м·К) й малий коефіцієнт термічного розширення $(1,3-0,8) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Використовується як термостійкий посуд, матеріал для оптичних волокон, електроізолятор.

Кераміка діоксиду цирконію (ZrO_2 , іонний тип зв'язку між молекулами) – має високу температуру плавлення (2700°C), низьку теплопровідність – $2,5-3,0$ Вт/(м·К). Утворює тверді розчини з CaO , MgO , Y_2O_3 ($7 \dots 10\%$), які називають стабілізованим діоксидом цирконію – в результаті структура набуває стабільності в широкому діапазоні температур. Використовується для футерування печей, газових датчиків. Через високу зносостійкість в умовах абразивного зношування частково стабілізований (Y_2O_3) діоксид цирконію використовують як інструментальний матеріал для різання й пластичного деформування: від кухонних ножів і ножиців до високошвидкісних різальних агрегатів у промисловості, які використовують під час переробки кевлара, сигаретних фільтрів. В медичних цілях корундову й цирконієву кераміки використовують для виготовлення пар тертя ендопротезів кульшового й інших суглобів, зубопротезних штифтів, пластин і дисків для нейрохірургії. Вироби, виконані з кераміки, мають високу біологічну сумісність й зносостійкість, гарантійний строк їхньої служби становить 25 років.

Карбідна кераміка – яскравий представник SiC (ковалентний зв'язок між молекулами, дуже міцний) – має високі показники жароміцності, механічної міцності, твердості, високотемпературної міцності, корозійної стійкості, теплопровідності ($40 \dots 160$) Вт/(м·К), й низький коефіцієнт термічного розширення $4 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Застосовують як інструментальний матеріал – абразив для шліфування, як матеріал лопаток газових турбін, камер згоряння, оболонок для палива в реакторах, теплообмінниках. Висока зносостійкість дозволяє протягом тривалого часу зберігати працездатність у середовищах з підвищеною абразивністю, наприклад, в умовах сильної запиленості (гірничодобувна, будівельна промисловість). Насамперед це стосується сферичних виробів для гідравлічних клапанів типу "куля-сідло".

Нітридна кераміка – яскравий представник Si_3N_4 (α, β) – ковалентний тип зв'язку між молекулами, виробляється на основі гарячепресованого нітриду кремнію Si_3N_4 (Гп). Має високі показники жароміцності, механічної міцності, твердості, корозійної стійкості, стійкості до термоударів, однак має низьку теплопровідність ($12 \dots 24$) Вт/(м·К). Використовується для виробництва різальних інструментів, лопаток газових турбін, камер згоряння. Високі робочі температури й зносостійкість керамічних матеріалів дозволяють підвищити швидкість обертання роторів, знизити вимоги до змащення й охолодження. Важли-

вими факторами використання керамічних матеріалів є їх немагнітність й високі електроізоляційні властивості.

Гарячепресований нітрид кремнію (Si_3N_4) є основним матеріалом при створенні керамічних підшипників кочення, хоча зберігається інтерес й до таких матеріалів, як оксид алюмінію (Al_2O_3) й карбід кремнію (SiC). Висока вартість таких підшипників компенсується більш високими довговічністю (в 3...10 разів) й зносостійкістю (в 10 разів при температурах експлуатації до 800°C) у порівнянні з аналогами з металу. Низка фірм Німеччини, Японії, США вже сьогодні випускають керамічні підшипники кочення. Гібридні кулькові підшипники використовують переваги керамічних тіл кочення з високою якістю обробки поверхні сталевих кілець. Така "гібридна" конструкція дозволяє керамічним підшипникам забезпечити більш тривалий термін служби й кращі робочі характеристики при високих швидкостях обертання шпинделя. Особливо привабливим є той факт, що вже на стадії одержання керамічного матеріалу є можливим введення в нього твердих змащень, що значно поліпшують працездатність вузлів тертя. На основі оксиду алюмінію (Al_2O_3) створюють композити, які містять оксид молибдену (MoO_3) або оксид вольфраму (WO_3) і мають поверхневу сульфідну плівку, з яких можна виготовляти прецизійні підшипники з низьким (до 0,13) коефіцієнтом тертя. У матеріалах на основі Si_3N_4 як тверде змащення використовують графіт й нітрид бора.

Пірокерами або ситали – неорганічні матеріали, одержані тонкою кристалізацією різних видів скла або розплавів різноманітних складів, що протікає по всьому об'єму виробу, що формується. Найважливіші властивості – низький коефіцієнт термічного розширення, мала теплопровідність, стабільність діелектричної проникності в широкому діапазоні температур, радіопроникність, висока термостійкість. Ситали поділяють на комбіновано-дефектні (КД) й одноріднодефектні (ОД). ОД-ситали мають однакову дефектність поверхні й об'єму, яка визначається складом, будовою

й способом одержання ситалу, є стійкими до зовнішніх пошкоджень. КД-ситали мають різну дефектність поверхні й об'єму. Дефектність об'єму визначається тими ж факторами, що і для ОД-ситалів, поверхнева дефектність формується під час пошкоджень поверхні зовнішніми силовими діями, наприклад, під час механічної обробки.

Ситали застосовуються в аеро- й космічній техніці. У Росії й країнах НАТО основними матеріалами головних антенних обтічників високошвидкісних літальних апаратів, керованих методом радіолокаційного наведення на ціль, є кварцова кераміка й ситали, які також відносяться до групи керамічних матеріалів. Крім цього вони широко використовуються для виробництва ілюмінаторів, теплового захисту космічних апаратів, дифузійних відбивачів високоінтен-

сивних оптичних квантових генераторів й інших установок різного призначення. Так, наприклад, умови експлуатації літальних апаратів, у яких широко й успішно використовуються керамічні матеріали на основі скла, характеризуються високою тепловою й силовою напруженістю найбільш відповідальних частин. Щільність теплових потоків, що діють на деякі конструкції, досягає 32 МВт/м². При цьому теплообмін, який у загальному випадку протікає шляхом теплопровідності, конвекції й випромінювання, викликає підвищення температури елементів конструкції, приводячи до появи просторових температурних градієнтів, що є причиною виникнення термічних напружень, які можуть при використанні металів перевищити їхню міцність і викликати втрати стійкості конструкції або її руйнування.

5.2. Оброблюваність деталей з технічної кераміки

Ефективність механічної обробки важкооброблюваних матеріалів, до яких відноситься й технічна кераміка, значною мірою залежить від їхніх фізико-механічних властивостей. Розгорнуті фізико-механічні властивості технічної кераміки наведені в табл. 5.1, з якої видно, що розглянуті матеріали близькі до ідеально крихких.

Таблиця 5.1 - Основні фізико-механічні властивості найбільш поширених марок

Параметри	Різновиди кераміки						
	Корундова Al ₂ O ₃ (Сп)	Корундова Al ₂ O ₃ (Гп)	Кварцова SiO ₂	Цирконієва ZrO ₂	Нітридна Si ₃ N ₄ (Гп)	Ситал ОД АС-370	Ситал КД АС-418
Густина ρ , кг/м ³ ·10 ³	3,8	3,9	2,0-2,2	5,95	3,1	2,6-2,7	2,5-2,6
Модуль пружності E , ГПа	350	365	50-60	205	310	132	90
Межа міцності, МПа на:							
згин σ_z	820	930	35-85	230	690	170-210	100-145
розтягування σ_p	220	360	35	120	400	80	60
стиснення σ_c	2000	3273	304	2000	3077	1600	1500
Коефіцієнт Пуассона, μ	0,21	0,24	0,28	0,2	0,28	0,34	0,25
Твердість HV , ГПа	11,7±0,9	14,9±0,5	3,2±0,1	11±0,1	13,9±0,1	8±0,1	7,8±0,1
Коефіцієнт інтенсивності напружень 1 роду K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	2,54±0,2	4,2±0,4	1±0,1	4,4±0,2	4,3±0,7	2,1±0,1	1,7±0,1
Критерій крихкості $\chi = \sigma_p / \sigma_c$	0,11	0,11	0,115	0,06	0,1-0,14	0,05	0,04
Пористість P , %	0,2	0,1	до 10	—	0,15	8	1,2
Температура плавлення T , °C	2050	2050	2200	2700	2000	1300	1320
Теплопровідність λ , Вт/(м·К)·10 ⁻³ при:							
0 °C	20	25	0,5-1,3	1,8	20	3,1	1,8
800 °C	6,1	7,2	1,6-1,9	2,1	15	2,1	2,0
Теплоємність c , Дж/(кг·К)·10 ⁻³ при:							
0 °C	0,88	0,88	0,8	0,502	0,7	0,92	1,1
800 °C	0,988	0,988	1,2	0,595	1,14	1,3	1,8
Коефіцієнт термічного лінійного розширення (КТЛР) α_t , °C·10 ⁻⁷	80	80	5-7	80-110	30-32	20-40	5-22
Температурний коефіцієнт κ_t	-0,012	-0,012	—	-0,011	-0,011	-0,002	-0,013

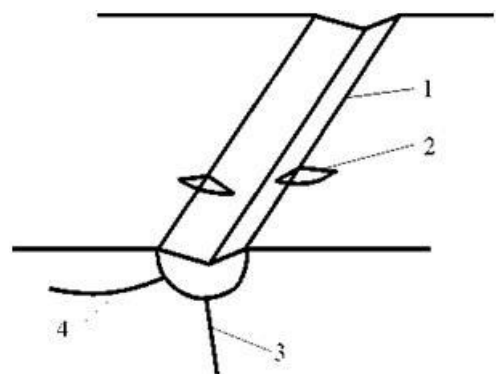
Про це свідчать значення коефіцієнта χ – критерію крихкості матеріалу ($\chi = \sigma_p / \sigma_c$, де σ_p й σ_c – відповідно, межі міцності на розтягування й стиснення), для керамік $\chi = 0,04 \dots 0,14$. У цих матеріалах залежність між напруженнями й деформаціями підкоряється закону Гука аж до їх руйнування. Поряд з розглянутим застосовують інший критерій крихкості матеріалу – це індекс крихкості H_μ / K_{IC} , тобто відношення мікротвердості H_μ до коефіцієнту інтенсивності напружень I роду (критичної інтенсивності тріщиноутворення) K_{IC} .

Висока твердість, замала або відсутність пластичності, низька стійкість до теплових ударів, схильність до розтріскування, створюють труднощі при механічній обробці, особливо при одержанні виробів складної геометричної форми з високою точністю і якістю обробки. Створення високоефективних методів обробки ТК являє собою одне з найскладніших завдань сучасного машинобудування.

Основним методом одержання високоточних поверхонь деталей із ТК є алмазне шліфування. Шліфування деталей із ТК в основному ведуть алмазними кругами. Знімання матеріалу в процесі алмазного шліфування здійснюється в результаті створення в поверхневому шарі керамічної заготовки напружень, що перевищують напруження руйнування її матеріалу. У результаті абразивна обробка може залишати на оброблюваній заготовці шар, що включає мікротріщини й певну макро- й мікрогеометрію поверхні.

Оскільки всі керамічні деталі є крихкими, при точкових навантаженнях під впливом ріжучого або шліфувального інструмента вони мають тенденцію до розтріскування. Точкове навантаження при відсутності пластичної деформації призводить до того, що під впливом зерен алмазу шліфувального інструмента кераміка, відчуваючи сильні механічні і термічні навантаження, викришується і в результаті цього виникає канавка (рис. 5.1).

Рисунок 5.1 – Схема утворення тріщин в поверхні керамічних деталей після обробки одиничним абразивним зерном: 1 – канавка; 2 – радіальна тріщина; 3 – поздовжня тріщина; 4 – латеральна тріщина



Експериментально встановлено, що ширина канавки перевищує площу зіткнення абразивного зерна з матеріалом і в областях, прилеглих до канавки, виникають тріщини. Розрізняють такі типи тріщин (див. рис. 5.1): поздовжня тріщина (перпендикулярна поверхні і паралельна канавці), радіальна тріщина (перпендикулярна поверхні і канавці), латеральна тріщина (паралельна під повер-

хнею обробки і перпендикулярна канавці). Утворення типових раковиноподібних відколів і розтріскування пов'язано з ростом латеральних тріщин. Під канавкою простягається область так званої деформованої зони, яка має напівкруглий перетин. При подальшому чистовому шліфуванні канавки видаляються, але залишаються довгі тріщини під ними. Експериментально встановлено, що розтягувальні навантаження, що діють перпендикулярно напрямку обробки, швидше ведуть до руйнування виробів, ніж ті, що проходять паралельно.

Оскільки ріст поверхневих мікротріщин вимагає значно меншої енергії, ніж ріст внутрішніх, а також внаслідок їхньої близькості до зон концентрації контактних напружень при експлуатації, наявність поверхневих мікротріщин впливає на довговічність деталей із ТК.

Оцінюючи дефектність матеріалу й виникнення дефектів у процесі шліфування, використовують поняття пошкодженості. Пошкодженість матеріалу поверхневого шару виробу з ТК після механічної обробки обумовлена виникненням нових дефектів, а також розвитком уже наявних тріщиноподібних дефектів матеріалу. Критерієм переходу від виникнення до розвитку дефектів є менше значення згинаючого руйнівного напруження. Загальне пошкодження деталі після обробки можна представити у вигляді суми вихідної пошкодженості матеріалу заготовки і технологічної пошкодженості в результаті обробки заготовки:

$$\omega = \omega_1 + \omega_2,$$

де ω_1 – вихідна пошкодженість матеріалу заготовки; ω_2 – технологічна пошкодженість в результаті обробки заготовки.

Загальне пошкодження деталі після шліфування характеризується розподілом Вейбула, яким задається імовірність руйнування деталі при випробуваннях на міцність на вигин:

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[-V \left\{ \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma} \right\}^m \right],$$

де V – об'єм зразка; σ_u – граничне напруження; σ – остаточне напруження; m – показник ступеня.

Вплив процесу шліфування на якість деталей проявляється також через геометричні погрішності обробленої поверхні. Відхилення макро- і мікрогеометрії деталі діють як концентратори контактних напружень при її експлуатації й приводять до збільшення розсіювання показників довговічності деталей із ТК.

Властивості поверхні керамічних виробів залежать від різних факторів, наприклад, від складу матеріалу, його мікроструктури, режимів обробки і ін. Підвищення якості поверхні, яке досягається механічною обробкою кераміки з

різним вмістом оксиду алюмінію, показано в табл. 5.2. Завдяки обробці зменшується довжина тріщин, тому час досягнення тріщиною своєї критичної довжини, яка призводить до розтріскування, помітно збільшується.

Таблиця 5.2 – Шорсткість поверхні кераміки на основі оксиду алюмінію

Стан поверхні	Середньоарифметична висота мікронерівностей Ra, мкм	
	Кераміка з 96 % Al ₂ O ₃	Кераміка з 99 % Al ₂ O ₃
Після випалу	0,8-1,3	1,0-1,5
Шліфована	0,7-1,1	0,7-1,1
Притерта	0,2-0,3	0,1-0,2

При підвищенні чистоти поверхні середнє значення міцності на вигин і розтягнення зростає, а розкид розподілу міцності зменшується (модуль Вейбулла збільшується). Це ж явище спостерігається і щодо тривалої міцності, коли з підвищенням якості поверхні зростає також і довговічність деталі.

Серед факторів, що визначають інтенсивність диспергування кераміки в процесі шліфування, а, отже, глибину, структуру і дефектність порушеного обробкою шару, при цьому виникає, основними є межа міцності оброблюваного матеріалу і рівень силового впливу на сформовану поверхню виробу або енергоємність процесу різання, що визначають напружено-деформований стан матеріалу виробу в зоні різання.

Міцність матеріалу виробу може бути змінена за рахунок застосування мастильно-охолоджувальної технологічного середовища (СОТС) зі спрямованими властивостями. При сприятливому впливі середовища відбувається розміцнення матеріалу припуску, що підлягає видаленню при обробці, і за рахунок цього можуть бути знижена енергоємність процесів диспергування і, як наслідок, дефектність поверхні, що формується, або підвищені інтенсивність різання і продуктивність обробки.

До зміни рівня енергетичних витрат на процес різання призводять також зміна умов протікання процесу шліфування: схеми шліфування, режимів обробки, експлуатаційно-технічних характеристик інструмента.

1. Вплив схеми шліфування

До найбільш часто вживаних видів абразивної обробки кераміки, в результаті якої видаляється основний припуск, відносяться:

- різка відрізними кругами;
- плоске шліфування торцем або периферією круга;
- зовнішнє або внутрішнє кругле шліфування виробів простої або складної просторової форми;
- обробка сферичних поверхонь виробів кільцевим алмазним інструментом.

Кожна схема обробки при інших рівних умовах характеризується формою поверхні контакту інструмента і оброблюваного виробу та її розмірами; величиною і розподілом зусиль різання між шаром матеріалу, що видаляється, і сформованою поверхнею виробу, а також напрямком цих зусиль. Все це створює специфічну, властиву для конкретної схеми обробки, картину напружено-деформованого стану зони різання, яка обумовлює формування і розвиток порушеного обробкою шару оброблюваного матеріалу.

2. Вплив тиску в зоні шліфування

З приростом тиску в зоні обробки інтенсифікується процес різання, наслідком чого є підвищення продуктивності шліфування. Збільшення тиску супроводжується зміною дефектності сформованого при шліфуванні поверхневого шару. При цьому відносна щільність дефектів залишається приблизно однаковою для всіх випадків варіації тисків, коливаючись від 10 до 20% при глибині залягання 0-40 мкм і 5-13% при $h_z = 60-220$ мкм.

3. Вплив режиму шліфування

Дефектність порушеного обробкою матеріалу визначається динамікою силового впливу інструмента на виріб, а також умовами, які супроводжують протікання процесу диспергування припуску, а саме, температурним режимом в зоні різання, вібраційними явищами, зносом інструмента і т. п. Навіть м'які режими шліфування призводять до створення дефектного шару – сітки мікротріщин, які розташовані на поверхні оброблюваного матеріалу і поширюються в глибину до 50 мкм для конструкційної кераміки. Все це є причиною зниження механічної міцності виробів або вимагає додаткових, трудомістких операцій, пов'язаних з необхідністю видалення дефектного шару. Варіювання кінематичними параметрами процесу шліфування дозволяє домогтися істотних змін величини і напрямку сил різання, а також умов контакту інструмента і оброблюваної поверхні, що визначають структуру дефектного шару матеріалу.

Впливаючи на швидкість і характер переміщення алмазних зерен відносно оброблюваної поверхні, параметри режиму визначають розміри товщини елементарного зрізу a_z , який знімається одним зерном, і, як наслідок, величину зусиль, що діють на зерна і опрацьований матеріал, продуктивність процесу шліфування і якість обробки.

Фактором режиму шліфування, який зменшує величину товщини зрізу a_z і зусилля різання, є швидкість різання. Збільшення швидкості різання до певної межі (для кераміки це $v = 25-30$ м/с) полегшує процес диспергування, сприяє підвищенню продуктивності обробки, зниженню зносу інструмента, шорсткості поверхні і зменшення глибини дефектного шару. Швидкість різання – єдиний фактор, що забезпечує інтенсифікацію процесу диспергування і підвищує якість обробленої поверхні. Зростання всіх інших факторів, а саме, глибини врізання

(або поперечної подачі), сили притиску круга до оброблюваної поверхні (шліфування з постійним нормальним зусиллям на крузі), поздовжньої подачі, частоти обертання або окружної швидкості виробу, інтенсифікуючи процес диспергування і сприяючи зростанню продуктивності, збільшують зусилля різання (енергоємність процесу різання) і погіршують якість обробки.

При торцевому шліфуванні кераміки була отримана статистична залежність нормальної складової сили різання (P_y , Н) від параметрів режиму і мікротвердості кераміки:

$$P_y = 1,5H^{0,7}V_k^{-1,45}(10HV)^{1,8}V_o^{0,5},$$

де H – величина припуску, що зрізується (глибина різання), мм; HV – мікротвердість кераміки, МПа; V_o – швидкість руху столу верстата з деталлю (поздовжня подача), м/хв.

Як випливає з формули, зі збільшенням швидкості алмазного круга сила різання зменшується через те, що кожне зерно круга починає зрізати стружку меншого перетину. Найбільше на збільшення сили P_y впливає міцність кераміки, характеристикою якої є мікротвердість, а потім глибина різання і подача.

Таким чином, при торцевому шліфуванні кераміки інтенсифікація таких параметрів режиму шліфування, як глибина різання, подача і сила притиску круга до оброблюваної поверхні P_y (шліфування з постійним нормальним зусиллям на крузі), супроводжується збільшенням енергоємності процесу шліфування, що негативно позначається на дефектності формованої поверхні.

При шліфуванні крихких неметалевих матеріалів відношення P_z/P_y , яке деякі автори називають коефіцієнтом абразивного різання f_a , є невеликим і складає від 0,3 для кремнію до 0,13 для сапфіра і 0,12 для кераміки ЦМ332. Для кераміки f_a змінюється у вказаному вище проміжку, зменшуючись зі збільшенням крихкості матеріалу. Отже, для крихких неметалевих матеріалів величина складової сили різання P_y , спрямована в оброблювану поверхню і максимально впливає на розвиненість дефектного шару, практично на порядок більше величини P_z , що забезпечує видалення матеріалу припуску. Тому бажання отримати мінімальний рівень розвитку дефектного шару при шліфуванні кераміки пов'язане з необхідністю вирішення завдання вибору раціональних значень параметрів режиму обробки, що забезпечують зниження сили P_y в поєднанні з економічно виправданим рівнем продуктивності процесу.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити наступний висновок. Інтенсифікація режиму обробки за рахунок збільшення глибини різання, подачі, швидкості обертання деталі викликає збільшення сил різання, призводить до розвитку дефектності поверхневого шару виробу і, як наслідок, до зниження його міцності. Змінюючи параметри режиму шліфування, можна управляти дефектністю обробленої поверхні кераміки.

4. Вплив характеристики алмазного інструмента

Вибір характеристик інструмента є одним з визначальних чинників ефективності процесу шліфування кераміки.

У матеріалів на основі діоксиду цирконію мікротвердість основного компоненту становить 10...12 ГПа і порівнянна з мікротвердістю таких інструментальних матеріалів, як швидкорізальні сталі і тверді сплави. Для ефективного здійснення процесів різання співвідношення мікротвердості інструментального та оброблюваного матеріалів має становити 4...6, тому для обробки таких матеріалів можуть бути застосовані тільки надтверді матеріали (СТМ) – мікротвердість натуральних алмазів дорівнює 98,1 ГПа, синтетичних алмазів АС6 – 89 ГПа і ельбору-Р або гексаніту – 84 ГПа. Однак зерна КНБ не мають гостроти ріжучих кромek, достатньої для ефективного шліфування виробів з кераміки.

Зернистість використовуваного абразиву. При будь-якому виді абразивної обробки крихких неметалевих матеріалів зі збільшенням зернистості вільного або зв'язаного абразивного порошку зростає інтенсивність знімання матеріалу, зменшується питома витрата алмазів, збільшуються шорсткість і дефектність обробленої поверхні.

Марки алмазних порошків і мікропорошків, область їх застосування представлені в табл. 1.10, форма і класифікація алмазного порошку – в табл. 1.11, відповідність зернистості алмазних порошків по ДСТУ 3292-95 закордонним стандартам і їх застосування за видами обробки – в табл. 1.12.

При шліфуванні крихких неметалевих матеріалів в більшості випадків спостерігається різке, практично лінійне зростання продуктивності зі збільшенням зернистості до певного рівня, що залежить від міцності оброблюваного матеріалу і особливостей процесу шліфування. Так, для високоміцної кераміки в діапазоні зернистостей від 40/28 до 100/80 спостерігається підвищення продуктивності в 3-4 рази. Низька продуктивність дрібнозернистих кругів пов'язана з малою висотою виступання зерен зі зв'язки, що призводить до контактування з оброблюваною поверхнею не тільки зерен, але і зв'язки, що сприймає частину навантаження на себе. З ростом зернистості ця висота збільшується і зменшується ймовірність її контактування з поверхнею обробки і, як наслідок, зростає продуктивність. Так, при шліфуванні високоглиноземної кераміки збільшення зернистості алмазів від 40/28 до 100/80 супроводжується зростанням параметра R_a майже в 4 рази, подальше підвищення зернистості від 100/80 до 250/200 призводить до підвищення R_a лише в 1,5 рази.

Глибина дефектного шару (h_d , мкм) кераміки в залежності від зернистості за даними досліджень може бути апроксимована залежністю:

$$h_d = 11,5(10^{-7} HV)^{-0,33} d_z^{0,64}.$$

У формулі слід застосовувати розмірність: HV – в Па, розмір зерна алмазного порошку d_3 – в мкм.

Зміна розмірів зерен супроводжується не тільки зміною їх геометричних параметрів – кутів загострення і радіусів округлення вершин, але і зміною числа зерен на робочій поверхні круга (зменшенням числа зерен при збільшенні зернистості і постійної концентрації). Ці фактори безпосередньо впливають на зусилля, що діють на зерна (при постійному тиску на кожне зерно припадає сила, більша, ніж у дрібнозернистих кругах), і, як наслідок, на глибину їх врізання, температуру в зоні обробки, інтенсивність руйнування оброблюваного матеріалу, знос інструмента. При цьому в залежності від глибини заглиблення зерна і його фактичного радіуса при вершині змінюється вид руйнування оброблюваного матеріалу, рівень напружено-деформованого стану в зоні різання, і, в кінцевому рахунку, шорсткість і дефектність обробленої поверхні. Експериментально доведено, що силовий фактор процесу обробки, який може бути пов'язаний в тому числі з розмірами зерен абразиву, має домінуючий вплив на механізм руйнування матеріалу припуску і супроводжуючі його явища.

Однією з причин, що ускладнюють процес диспергування оброблюваного матеріалу і викликають зниження продуктивності кругів із зернистістю, більшою за критичну, є збільшення радіусу округлення вершин зерна. При цьому, як видно, порушується лінійний зв'язок між глибиною заглиблення і нормальною силою, що припадає на одиничне зерно, тобто, фактичного тиску недостатньо для заглиблення зерен в твердий оброблюваний матеріал на ту ж глибину.

Концентрація алмазів у шліфувальних кругах. Концентрація алмазного порошку – це ваговий вміст алмазів в одиниці об'єму алмазоносного шару. Одиницею ваги алмазу є карат (ct) $1 \text{ ct} = 0,2 \text{ г}$. Відносна концентрація алмазу є однією з найважливіших характеристик алмазного інструмента, що визначають його ріжучу здатність, продуктивність, термін служби і вартість. Вибір концентрації залежить від типу інструмента, форми і розмірів робочої поверхні, зернистості алмазного порошку, зносостійкості зв'язки, умов обробки.

При виборі оптимальної концентрації алмазу в алмазоносном шарі, діють наступні правила:

- велика площа контактної поверхні вимагає вжиття заходів щодо зниження температури шліфування і зменшення зусиль шліфування. В цьому випадку слід використовувати низьку концентрацію алмазів.

- при невеликій площі контактної поверхні між шліфувальним кругом і оброблюваною деталлю, наприклад при круглому шліфуванні, слід обирати високу концентрацію алмазу. Завдяки цьому забезпечується зносостійкість інструмента, навіть при високих навантаженнях.

Алмазні шліфувальні круги випускаються з відотною концентрацією 25, 50, 75, 100 і 150 (табл. 5.3-5.4). Вплив концентрації алмазів на процес диспергування ХНМ пов'язаний з тим, що при зміні концентрації в поєднанні з розміром зерен алмазів змінюється кількість працюючих зерен, а також відстань між ними, висота виступання зерен над зв'язкою. Так при торцевому шліфуванні кераміки кругами 12A2 AC6 80/63 на зв'язці M2-01 при постійному тиску $(3-5) \cdot 10^5$ Па зміна концентрації від 50 до 150% призводить до зниження продуктивності на 5-10%. Підвищення концентрації збільшує число активних зерен і, отже, знижує фактичний тиск зерен на матеріал при тому ж значенні сили різання P_y . Глибина їх заглиблення зменшується, хоча кількість подряпин на обробленій поверхні зростає. Об'єм матеріалу, який видаляється за хвилину, в цілому також трохи зменшується, знижуючи продуктивність.

Таблиця 5.3 – Ваговий вміст алмазів у алмазоносному шарі (ct/cm³)

Відносна концентрація алмазу	25	50	75	100	150
Вага алмазу в каратах на 1cm ³ алмазоносного шару, (ct/1cm ³)	1,1	2,2	3,3	4,4	6,6

Таблиця 5.4 – Об'ємний вміст алмазів у алмазоносному шарі (%)

Відносна концентрація алмазу	25	50	75	100	150
Об'єм, що займає алмазний порошок в алмазоносному шарі (%)	6,25	12,5	18,75	25,0	37,5

Встановлено також зниження температури шліфування при збільшенні концентрації, яке найбільш різко відбувається при малих відносних концентраціях (до 100). Це пояснюється тим, що зі збільшенням числа алмазних зерен в межах площі контакту зростає число миттєвих джерел теплоутворення, але інтенсивність кожного з них через зниження тиску на кожне зерно зменшується, що в сукупності призводить до зниження температури в зоні обробки.

Встановлено вплив концентрації на шорсткість оброблюваної поверхні. Так, при плоскому шліфуванні оптичного скла алмазним кільцевим інструментом при дрібних зернистостях (не більше 50 мкм) з ростом відносної концентрації (діапазон від 50 до 100) шорсткість поверхні збільшується. За більш крупних зернистостей збільшення концентрації супроводжується зменшенням шорсткості. В якості причини подібних явищ висувають те, що при одній і тій же концентрації, але різних зернистостях діючі зусилля на поодинокі зерна різні.

Збільшення зернистості кругів при постійній концентрації алмазів призводить до збільшення зусиль, що припадають на одне зерно, збільшення глибини врізання зерен і, як наслідок, зростання шорсткості обробленої поверхні. Зростання концентрації при постійній зернистості інструмента супроводжується зниженням навантажень на окремі зерна, за рахунок чого підвищується як-

ість обробки, але знижується продуктивність шліфування. Прямих відомостей про вплив концентрації алмазів на глибину і структуру дефектного шару не виявлено, хоча, як видно, цей вплив має бути істотним у зв'язку зі зміною питомих навантажень на сформовану поверхню.

Виходячи з економічних міркувань (раціональні норми витрати алмазного інструмента), при шліфуванні кераміки рекомендується використовувати алмазні круги середньої відносної концентрації 75-100. Така концентрація алмазів використовується для більшості шліфувальних операцій для кругів зернистістю 125/100...63/50, а також для кругів чашкової форми з широким (7...20 мм) алмазозонним шаром. При цьому для обробки з можливо меншою шорсткістю формованої поверхні зі збільшенням зернистості алмазів слід підвищувати їх концентрацію. Висока відносна концентрація (125...200) використовується:

- для кругів зернистістю 160/125 і крупніше, щоб збільшити число працюючих зерен, і, відповідно, зменшити навантаження на зерно;
- в кругах для профільного шліфування з метою підвищення кромкостійкості;
- в кругах малих діаметрів (<50 мм) також для збільшення числа зерен на поверхні контакту круга з деталлю;
- в чашкових кругах з шириною робочого шару <5 мм.

Низька відносна концентрація (50, рідше 37,5) використовується в кругах зернистістю 40/28 і дрібніше.

Зв'язка алмазних кругів. Ефективність використання ріжучих властивостей алмазних зерен залежить від умови їх закріплення в крузі, які в основному визначаються властивостями зв'язки. Склад зв'язки впливає на міцність утримання зерен в крузі під дією тангенціальної складової сили різання.

Алмазний інструмент на органічній зв'язці характеризується незначною твердістю зв'язки, невисокими теплопровідністю і термостійкістю зв'язки, високою продуктивністю знімання припуску, в ряді випадків зменшенням часу обробки. Тому круги на органічних зв'язках застосовуються для чистових і доводочних робіт, доведення деталей з матеріалів високої твердості, в тому числі кераміки. Для ефективної роботи інструмента на органічній зв'язці рекомендується використання зерен з металевим покриттям, яке забезпечує краще алмазоутримання в зв'язці.

Інструмент на металевій зв'язці характеризується значною твердістю зв'язки, високими теплопровідністю і термостійкістю зв'язки, високою продуктивністю знімання, зменшенням часу обробки. Тому круги на металевих зв'язках застосовуються для попередніх операцій, що вимагають великих об'ємів знімання припуску.

Працездатність зв'язки характеризується двома основними властивостями: міцністю утримання зерен алмазу і зносостійкістю. Міцність утримання зерен визначається твердістю зв'язки, межами міцності на вигин і на стиск, її ударною в'язкістю і адгезійною активністю по відношенню до алмазу. Зносостійкість залежить від складу, твердості зв'язки, її теплопровідності, адгезії до оброблюваного матеріалу і від коефіцієнта тертя по ньому. Згідно з дослідженнями, зі зменшенням модуля пружності зв'язки круга знижуються розтріскування кераміки при її шліфуванні, швидкість росту тріщин, викликаних обробкою і їх розмір. Однак при шліфуванні виробів з кераміки в умовах видалення значного припуску, ефективними можуть бути тільки інструменти на основі металевих зв'язок, що мають необхідну механічну міцність. Для підтримки самозаточування кругів, тобто збереження постійної ріжучої здатності інструмента шляхом своєчасного видалення зношених зерен і оголення нового робочого шару зерен, зв'язка повинна мати наступні властивості: оптимальну зносостійкість; високу антифрикційну здатність, що забезпечує зниження коефіцієнта тертя при ковзанні зв'язки по оброблюваній поверхні; якомога високою теплопровідністю; високою міцністю алмазоносного шару.

Виходячи з цих вимог, найбільш широко поширеними на операціях чернового і напівчистового шліфування кераміки є зв'язки М2-01 і М1-10, які мають досить високі антифрикційні властивості, зносостійкість, і забезпечують досить високу продуктивність шліфування в широкому діапазоні режимних параметрів при низькій питомій витраті алмазів.

Отже характеристики шліфувального інструмента істотно впливають на процес диспергування крихких неметалевих матеріалів, енергоємність цього процесу і, як наслідок, змінюють якість сформованої поверхні. Управління інтенсивністю процесу диспергування можливо шляхом призначення раціональних параметрів інструмента, його характеристики і підтримки ріжучої здатності кругів на необхідному рівні.

5.3. Особливості розрахунку міжопераційних припусків при обробці виробів з керамічних матеріалів

Характерною рисою раціональних технологічних процесів обробки керамічних матеріалів є, по-перше, обробка у декілька стадій, що включає, зокрема, чорнові й чистові операції шліфування, і, по-друге, обґрунтовані міжопераційні припуски, що дозволяє в цілому знизити трудомісткість і собівартість отримання виробу. Рішення завдання вибору раціональних міжопераційних припусків пов'язано з необхідністю достовірної оцінки величини порушеного механічною обробкою шару матеріалу H_p , складовою частиною якого є дефектний шар.

На операціях чорнового шліфування має зніматися основний припуск за умови забезпечення найбільшої продуктивності процесу різання, що передбачає: застосування інтенсивних режимів обробки, ЗМОТС з підвищеними диспергувальними властивостями, а також використання шліфувальних кругів з більш міцними алмазними зернами і більшої зернистості. На операціях чистового шліфування, на яких завершується формування поверхневого шару виробу, де першорядну важливість набувають глибина і структура дефектного шару, раціональніше використовувати круги малої зернистості і меншу міцність алмазних зерен, ощадний режим шліфування, періодичну правку круга або використання ЗМОТС, що забезпечують роботу інструмента в режимі самозагострення.

Відповідно до розрахунково-аналітичного методу В.М. Кована мінімальний проміжний припуск $Z_{i \min}$ при обробці, наприклад, площини, розраховується, виходячи з повного видалення висоти мікронерівностей Rz_{i-1} , глибини дефектного шару h_{i-1} й сумарних значень просторових відхилень поверхні ρ_{i-1} , отриманих на попередньому переході (операції), з урахуванням похибки установки деталі ε_{yi} , на поточному переході (операції). Величини ρ_{i-1} й ε_{yi} визначаються конструктивними і технологічними особливостями процесу. Частина припуску, що залежить від методу обробки, дорівнює $Z_i' = Rz_{i-1} + h_{i-1}$ й являє собою глибину порушеного обробкою шару Hr_{i-1} .

Схема впливу порушеного шару на формування загального припуску па обробку показана на рис. 5.2. На рисунку позначені: А і В – поверхні заготовки й остаточно сформованого виробу; Hr_1, Hr_2, Hr_3, Hr_4 – глибина порушеного шару, відповідно, в заготовці і після операцій чорнового, чистового шліфування, оздоблювальної обробки; ΣHr – сумарна величина порушеного шару.

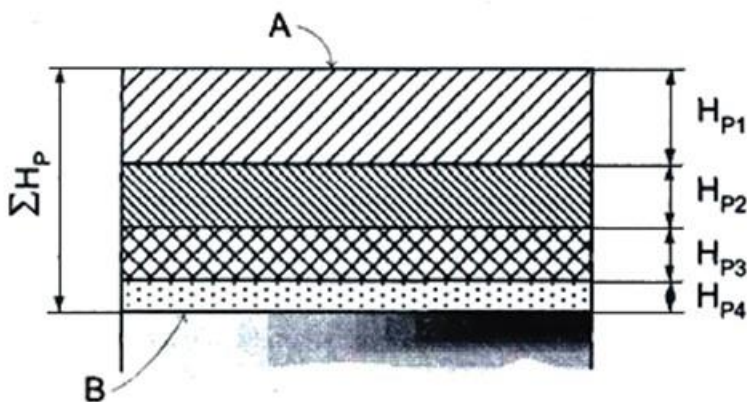


Рисунок 5.2 – Загальноприйнята схема впливу порушеного шару на формування припуску на обробку

Для металів незалежно від способу отримання заготовки величина порушеного шару на її поверхні, що визначається як

$$Hr_{заг} = Hr_1 = Rz_{заг} + h_{заг},$$

істотно більша в порівнянні з будь-якими подальшими операціями механічної обробки. Причому в більшості випадків витримується співвідношення $h_{заг} > Rz_{заг}$, що свідчить

про невідповідність фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу в поверхневому шарі, що поширюється на значну глибину, і в об'ємі заготовки.

Технологія отримання заготовок з керамічних матеріалів включає наступні основні стадії: синтез компонентів матеріалу термічним або хімічним шляхом; помел і змішування для отримання заданого за розмірами частинок порошку; приготування напівфабрикату; оформлення (брикетування) заготовки пресуванням, гарячим або холодним литвом і т. п.; випал, кристалізація або загартування в коміркових або тунельних печах без тиску або під тиском в заданому газовому середовищі і т. п.

Все це передбачає наявність великих припусків на обробку, які досягають у деяких випадках 10-12 мм на сторону. Однак структура цього припуску дещо відрізняється в порівнянні з обробкою металевих матеріалів. Сформовану в процесі отримання заготовки поверхню відрізняє також низький рівень шорсткості при значних макровідхиленнях контуру. Силовий вплив інструмента на поверхню заготовки при механічній обробці, особливо на стадіях попереднього формоутворення, супроводжується утворенням порушеного шару, що перевищує по глибині і розмірами дефектів, що розвинулися, в десятки разів аналогічні параметри, що виникли на стадії отримання заготовки.

В такому випадку сумарний мінімальний припуск, який визначається як різниця розмірів заготовки і готової деталі $\Sigma Z = \Sigma Z_{i \min}$, має бути перерозподілено між операціями механічної обробки і, якщо цього вимагають якісні характеристики виробу, з урахуванням необхідності реалізації операції зміцнення, зокрема, хімічного травлення.

Існуючі рекомендації по організації технологічних процесів обробки крихких неметалевих матеріалів припускають в якості обов'язкової умови незначне перевищення припуску (на кілька мікрометрів) на конкретній операції або переході щодо глибини порушеного шару, сформованого в процесі попередньої обробки. При призначенні припуску мають бути враховані також відхилення форми заготовки від заданої геометрії деталі. У цьому випадку відповідно до сказаного схема розрахунку припусків на обробку виробу матиме вигляд, показаний на рис. 5.3. На рисунку позначені: А і В – поверхні заготовки

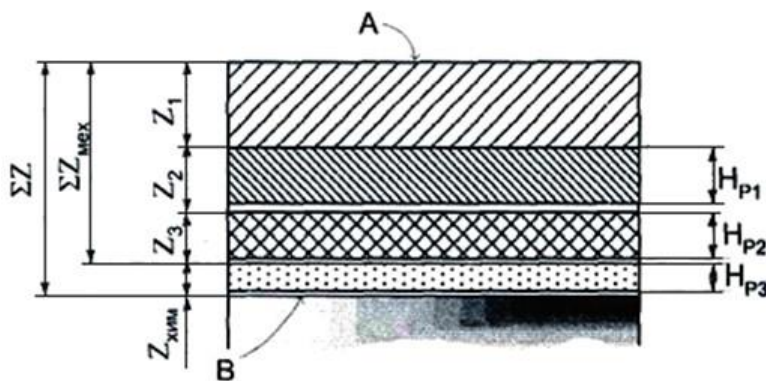


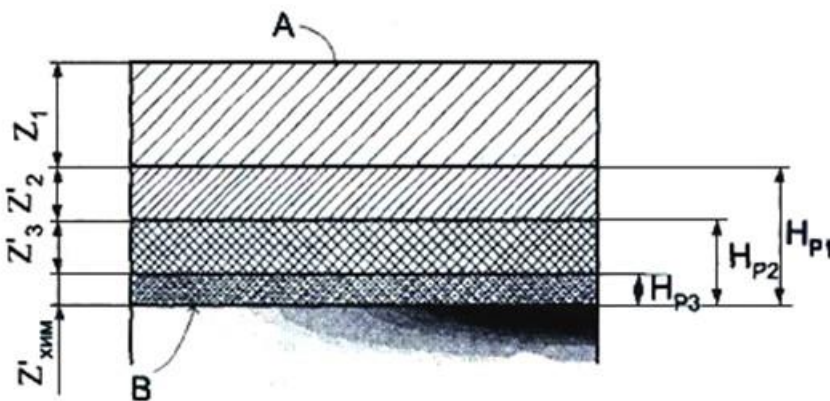
Рисунок 5.3 – схема розрахунку припусків на механічну обробку пластини з кераміки

й остаточно сформованого виробу; $Z_1, Z_2, Z_3, Z_{\text{хим}}$ – припуски, що видаляються, відповідно, на операціях чорнового, чистового шліфування, механічного, хімічного полірування; H_{p1}, H_{p2}, H_{p3} – припуски, що видаляються, відповідно, на операціях

чорнового, чистового шліфування, механічного полірування; $\Sigma Z_{\text{мех}}$, ΣZ – сумарні припуски на механічну обробку й загальний сумарний припуск.

Основне призначення величини припуску – забезпечити необхідні геометрию і габарити виробу, а також якість поверхні готової деталі. Однак з цього зовсім не випливає необхідність видалення всього попереднього дефектного шару на проміжних етапах обробки через те, що головною умовою всієї процедури розрахунку припуску є забезпечення бездефектної поверхні виробу після завершення останньої операції. Від правильності рішення задачі визначення міжопераційних припусків і розмірів багато в чому залежать трудомісткість, собівартість та експлуатаційні характеристики деталей, перш за все їх міцність і довговічність.

Одним із шляхів підвищення ефективності обробки деталей з керамічних матеріалів є раціональний перерозподіл припуску між операціями обробки при видаленні поверхневого порушеного шару, що залишився після чорнового шліфування, як найбільш глибокого і розвиненого, протягом усього подальшого маршруту обробки заготовки. Тоді схему зняття порушених шарів і їх накладення можна представити у вигляді, показаному на рис. 5.4.



На рисунку позначені: А и В – поверхні заготовки й остаточно сформованого виробу; H_{p1} – порушений шар, що залишився після чорнового шліфування; H_{p2} – порушений шар, що залишився після чистового

Рисунок 5.4 – Схема розрахунку мінімальних асиметричних припусків на механічну обробку

шліфування з накладенням дефектів від чорнового шліфування; H_{p3} – порушений шар, що залишився після оздоблювальної обробки з накладенням дефектів від чорнового й чистового шліфування; Z_1 – припуск, що знімається при чорновому шліфуванні; Z_2' – припуск, що знімається при чистовому шліфуванні включно з порушеним шаром з дефектами, що залишився після чорнового шліфування; Z_3' – припуск, що знімається при оздоблювальній обробці включно з порушеним шаром з дефектами, що залишився після чорнового й чистового шліфування; $Z_{\text{хим}}'$ – припуск, що знімається при хімічному травленні включно з порушеним шаром з дефектами, що залишився після механічної обробки.

На рис. 5.4 частина припуску, що знімається на i -тій операції і залежить лише від обробки, позначена як Z_i' . При розрахунку мінімального припуску до величини Z_i' необхідно додати величину сумарних просторових відхилень на

попередньому переході ρ_{i-1} і, якщо це пов'язано з перевстановлення деталі, значення ε_{yi} – похибку установки деталі па виконуваний операції (переході).

При обробці керамічних матеріалів на проміжній стадії немає необхідності повністю видаляти порушений шар, що залишився після попередньої обробки. Це пояснюється наступними причинами. Перехід від чорнових операцій до напівчистових і чистових супроводжується зміною інструмента (послідовне зменшення зернистості) і зміною режимів обробки, вони стають менш напруженими. При цьому зменшується величина мікронерівностей обробленої поверхні, глибина дефектного шару, змінюється його структура – дефекти стають меншими, змінюється їх щільність.

При певній глибині шліфування розміри дефектів, внесених працюючим інструментом в оброблювану поверхню, стають співмірними, а при подальшому заглибленні і більшими, ніж ті, що залишені на цьому рівні в результаті виконання попередньої операції. Тому величину припуску h_{i-1}' , пов'язану з глибиною дефектного шару, що залишився в матеріалі при попередній обробці і знімається на даному переході, доцільно призначати, виходячи з рівності розмірів внесеного дефекту і вже внесених в матеріал на попередній операції. У цьому випадку величина порушеного шару $H\rho_i'$, що підлягає видаленню на розглянутій операції, визначиться залежністю

$$H\rho_i' = Rz_{i-1} + h_{i-1}',$$

а значення раціонального припуску, що видаляється на розглянутій операції, буде дорівнювати

$$Z_{i\min}' = H\rho_i' + \rho_{i-1} + \varepsilon_{yi} = Rz_{i-1} + h_{i-1}' + \rho_{i-1} + \varepsilon_{yi}.$$

Такий підхід при заданій величині загального припуску на обробку ΣZ дозволяє за рахунок збільшення частки припуску, що знімається на чорновій операції, зменшити величину припусків, що знімаються на операціях чистового шліфування, доведення, і звести до мінімуму величину $Z_{\text{хим}}$. При цьому доцільно процес чорнового шліфування вести якомога більш інтенсивно з метою підвищення продуктивності обробки, компенсуючи тим самим витрати часу на реалізацію менш продуктивних заключних операцій. У поєднанні зі скороченням часу на хімічне травлення за рахунок зменшення глибини дефектного шару, що залишився після механічної обробки, це дозволить знизити технологічну собівартість виробництва виробу.

Комбіновані методи алмазного шліфування керамічних матеріалів й альтернативні методи обробки. Перспективним напрямком підвищення ефективності алмазного шліфування керамічних матеріалів є накладення ультразвукових коливань (УЗК) на ріжучу поверхню шліфувального круга. Необхідною умовою успішного використання цього прийому є забезпечення резонансу власної вібрації випромінювача, суміщеного зі шліфувальним кругом, з частотою вібратора. У результаті ультразвукового впливу відбувається розклинення трі-

щин дефектного шару, інтенсифікується процес його руйнування, підвищується проникнення ЗМОТС і поліпшується видалення шламу із зони обробки. На поверхні абразивних зерен формується мікрорельєф з великим числом ріжучих кромок, сили і температури різання падають. При обробці шліфувальними кругами корундової кераміки різних марок з накладенням УЗК продуктивність обробки підвищилася в два рази, лінійний знос кераміки УФ-61 знизився в п'ять разів, Ф-58 – в два рази, шорсткість поверхні збільшилася в порівнянні зі звичайним шліфуванням на 28 і 45% відповідно кераміки УФ-61 і Ф-58.

Одним з найбільш продуктивних і ефективних методів алмазної обробки електропровідної кераміки є метод алмазно-електролітичної обробки. У цьому випадку використовується алмазний інструмент на електропровідній зв'язці, з'єднаний з негативним полюсом джерела струму, а оброблювана деталь приєднується до позитивного полюсу. У зазор між оброблюваною деталлю і електропровідною зв'язкою алмазного інструмента безперервним струменем подається електроліт. При проходженні електричного струму через електроліт поверхня оброблюваної деталі піддається електрохімічному розчиненню з утворенням анодної плівки, яка легко видаляється абразивними зернами круга, тобто забезпечується безперервність процесу анодного розчинення і знімання матеріалу з оброблюваної деталі.

Крім алмазного шліфування керамічні матеріали можна обробляти наступними методами: лазерним, струминним гідроабразивним, електрохімічним й електроерозійною обробкою. На відміну від алмазного шліфування перераховані методи обробки мають деякі особливості. Наприклад, струминна гідроабразивна обробка дозволяє реалізувати процес "холодного" різання матеріалу (практично не розігріваючи деталь). Недолік електрохімічної й електроерозійної обробки – вони реалізуються переважно на струмопровідній кераміці.

Оскільки керамічні матеріали усе більше використовують як конструкційний матеріал для відповідальних деталей, збільшення довговічності цих деталей й надійності конструкції в цілому слід очікувати за раціонального вибору режимів механічних і фізико-хімічних методів обробки, виходячи з аналізу пошкодженості матеріалу.

Питання для самоконтролю:

1. Різновиди технічної кераміки, галузі застосування.
2. Оброблюваність виробів з ТК: в чому проявляється вплив фізико-механічних властивостей? Які процеси відбуваються між алмазним зерном і керамічним матеріалом при шліфуванні?
3. Оцінка дефектності матеріалу й виникнення дефектів у процесі шліфування деталей із ТК. Які фактори впливають на процес шліфування?

4. Як впливають на процес шліфування ТК концентрація алмазів, зернистість, зв'язка шліфувальних кругів?
5. В чому полягають особливості розрахунку міжопераційних припусків при обробці виробів з керамічних матеріалів?

5.4. Технологія, обладнання і методи алмазної обробки керамічних деталей типу «куля»

Області застосування керамічних куль. Як відомо кулі з різних матеріалів виготовляють із різною метою: кулями зі сталі, виготовленими з високою точністю (на рівні часток мікрметра), комплектують шарикопідшипники, кулі з природного каменю – це декоративна прикраса, кулі з конструкційної кераміки – відповідальна деталь гідросистем, які експлуатуються в умовах інтенсивного абразивного, корозійного, хімічного й іншого видів зношування, а також ті ж самі шарикопідшипники для сучасних механооброблюваних центрів, газотурбінних двигунів. Керамічні кулі не мають магнітних властивостей і, як правило, є гарними діелектриками, що відкриває нові області їхнього застосування в приладобудуванні й космічній промисловості. Експлуатація керамічних клапанів типу "куля-сідло" високого тиску (10-60 МПа) для свердловинних штангових насосів в умовах видобутку нафти різної щільності й хімічного складу, що містить різну кількість твердих включень у порівнянні із клапанами з легованих сталей забезпечує невинну роботу насосів протягом не менш одного року, підвищує їх продуктивність на 20-25% (рис. 5.5).

Швидкохідні підшипники з керамічними кулями характеризуються незначним тертям і тепловиділенням при високих швидкостях і навіть при високих навантаженнях (авіа-, автомобіле-, машинобудівна, текстильна промисловість), вони менш чутливі до змащення й можуть працювати взагалі без змазки (хімічна, харчова промисловість, малообслуговувані пристрої). Висока вартість таких підшипників компенсується більш високими довговічністю (в 3...10 разів) і зносостійкістю (в 10 разів при температурах експлуатації до 800°C) у порівнянні з аналогами з металу. Гарячепресований нітрид кремнію (Si_3N_4) твердістю HRC 78 є основним матеріалом при створенні керамічних підшипників кочення, хоча зберігається інтерес й до таких матеріалів, як оксид алюмінію (Al_2O_3), діоксид



Рисунок 5.5 – Гідравлічні клапани типу «куля-сідло» свердловинних глибоких нагнітачів для добування нафти

нітрид кремнію (Si_3N_4) твердістю HRC 78 є основним матеріалом при створенні керамічних підшипників кочення, хоча зберігається інтерес й до таких матеріалів, як оксид алюмінію (Al_2O_3), діоксид

цирконію (ZrO_2) й карбіди кремнію (SiC) й бору (B_4C). Оброблюваність керамічних матеріалів з ZrO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , SiC , B_4C залежить від їх фізико-механічних властивостей – за критичним значенням сили, необхідним для утворення бічних тріщин, вони ранжуються таким чином: 2,2 : 1 : 0,7 : 0,4 : (0,11...0,12). Низка фірм Німеччини, Японії, США вже сьогодні випускають керамічні підшипники кочення (рис. 5.6).

Гібридні шарикопідшипники використовують переваги керамічних тіл кочення з високою якістю обробки поверхні сталевих кілець, що дозволяє гібридним підшипникам забезпечити більш тривалий термін служби (в 5 разів у порівнянні зі звичайними сталевими підшипниками) й кращі робочі характеристики при високих швидкостях обертання шпинделя (рис. 5.7). Діапазон розмірів: діаметр внутрішнього отвору 10-200 мм.



Рисунок 5.6 – Суцільно керамічні і гібридні шарикопідшипники

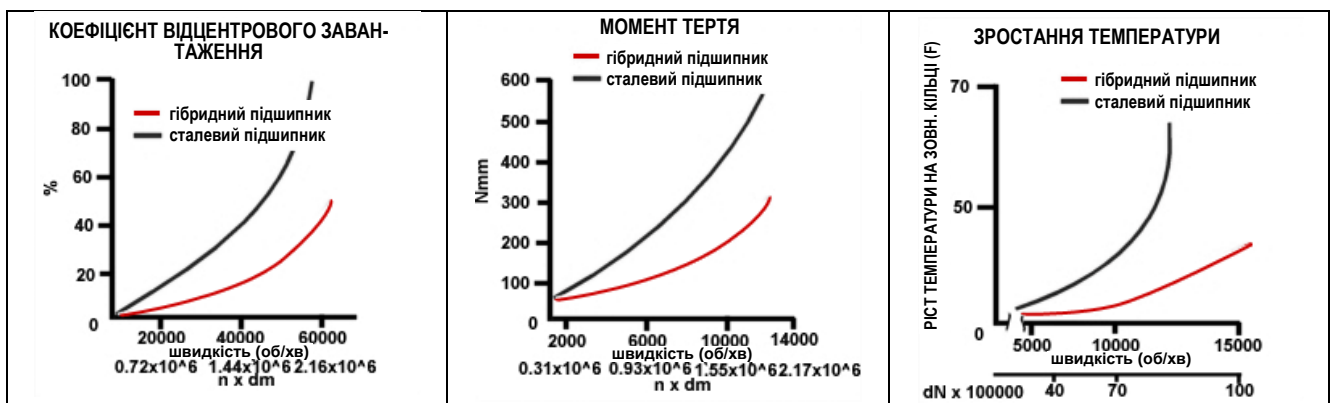


Рисунок 5.7 – Робочі характеристики сталевих і гібридних шарикопідшипників

Авіакосмічна галузь висуває суворі вимоги до вагових і питомих характеристик вузлів і апарата в цілому, у тому числі, і до маси силових установок. Зниження маси силової установки може бути досягнуто використанням композиційних і керамічних матеріалів, а також новими конструктивними рішеннями, що дозволяють ефективно використати властивості матеріалів (рис. 5.8).

Крім зменшення ваги двигуна, використання керамічних матеріалів підвищує характеристики двигуна. При створенні авіаційних газотурбінних двигунів нового покоління, підвищуються вимоги до теплонавантаженості основних конструктивних елементів двигуна. Так підшипники основного валу таких двигунів повинні мати високі експлуатаційні характеристики для роботи в умовах із частотою обертання валу більше 30000 об/хв і температурами робочого газу перед турбіною 1850-2100°K, до того ж значно підвищуються вимоги по надійності й терміну служби. При температурі газу понад 1100°С використовуються тільки керамічні матеріали з більшою твердістю в порівнянні з підшипниковими сталями або навіть кобальтовими сплавами й інструментальними сталями з високим змістом вольфраму. Настільки високі температурні навантаження в окисному середовищі з одночасним впливом знакозмінних силових навантажень призводять до того, що більшість високоміцних легованих сплавів непрацездатні через значну деградацію їхніх фізико-механічних характеристик. В цих умовах крім зменшення ваги двигуна керамічні композиційні матеріали підвищують характеристики ГТД (рис. 5.9). Так у вузлах опори високооборотні керамічні підшипники можуть бути використані при надвисоких швидкостях, що досягають $DN = 1,2 \cdot 10^6$ мм/с (коефіцієнт DN визначається як добуток внутрішнього діаметра підшипника в мм і числа обертів), що в 4 і більше разів перевершує кращі зразки металевих підшипників.



Рисунок 5.8 – Керамічні деталі типу «куля» в авіакосмічній галузі

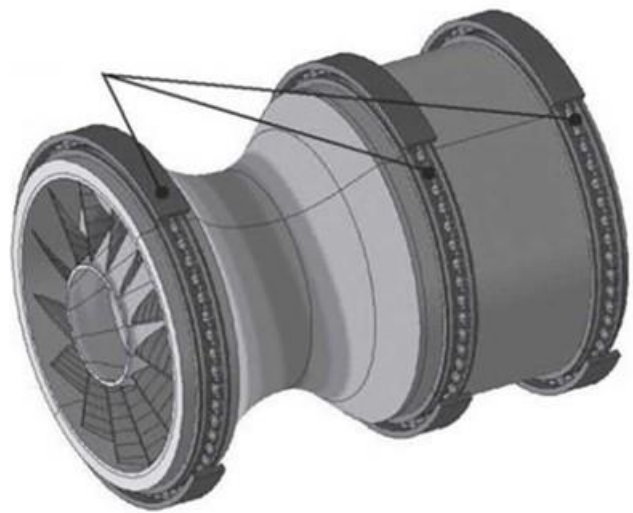


Рисунок 5.9 – Модель ГТД малого розміру із зовнішнім валом і опорою з керамічних матеріалів

Найбільш складним при виготовленні підшипників кочення є технологічний процес виготовлення куль. Заготовки з керамічних матеріалів для майбутніх куль отримують поштучно методами порошкової металургії і, як правило, з

формою, яка є далекою від сферичної (рис. 5.10, *а*). Вимоги до точності і якості виготовлення прецизійних керамічних куль великого діаметру надзвичайно високі – згідно стандарту ISO3290-2:2014 для керамічних куль степені точності G40 (діаметром до 50 мм) відхилення від сферичності виробів $\leq 1,0$ мкм, відхилення діаметру кулі $\leq 1,0$ мкм, різнорозмірність виробів у партії $\leq 2,0$ мкм, і якості виготовлення по параметру шорсткості поверхні виробів $Ra \leq 0,06$ (рис. 5.10, *б*).



а



б

Рисунок 5.10 – Керамічні заготовки після спікання (*а*) й готові кулі з SiC (*б*)

Вказані вимоги забезпечуються груповою алмазною обробкою керамічних куль між обертовими дисками у кілька стадій. На відміну від елеваторної обробки сталевих куль, яку використовують у масовому виробництві, при шліфуванні або доведенні керамічні кулі котяться по нижньому диску без їхнього перемішування (рис. 5.11-5.12).



а

Рисунок 5.11 – Верстат мод. ВШ-Д204М (*а*) і розміщення керамічних заготовок при попередньому алмазному шліфуванні



б

При цьому кількість одночасно оброблюваних куль обмежена геометрією їх розташування на доріжках нижнього диска. Головний недолік існуючих технологій – низька продуктивність обробки прецизійних керамічних куль з карбідів бору, кремнію або нітриду кремнію.



Рисунок 5.12 – Верстат мод. 3Е-814 для алмазного доведення (а)
і його робоча зона (б)

Особливість процесу алмазної обробки визначається тим, що куля (рис. 5.13) має єдину сферичну поверхню, що одночасно об'єднує оброблювану, технологічну й базову поверхні. У зв'язку із цим вся гама технологічних операцій алмазної обробки керамічних куль будується на методі безцентрової обробки функціональної поверхні, що забезпечує принцип суміщення технологічної й контрольної баз. У процесі попереднього шліфування керамічній заготовці надається первісна куляста форма, що уточнюється подальшим доведенням вільним абразивом – суспензіями мікропорошку алмазу – у кілька переходів до досягнення необхідної сферичності й шорсткості поверхні.

При алмазному шліфуванні виробів типу "куля" з керамічних матеріалів застосовують пристрої (див. рис. 5.13), які складаються з нижнього диска 5, що обертається зі швидкістю ω_d від автономного приводу, і виконаного співвісним з ним притискного кільця 3. Кулі 2 розташовані в сепараторі 4 і притиснуті підпружиненим притискним кільцем 3. Вони частково виступають з кільцевого пазу, утвореного внутрішньою бічною поверхнею кільця 3 і зовнішньої бічної поверхнею диска 5. Шліфувальний інструмент 1, що обертається зі швидкістю ω_n також від автономного приводу, розміщений ексцентрично нижньому диску 5, поданий до торкання з виступаючими частинами оброблюваних куль. Робота пристрою з кінематично розв'язаними верхнім та нижнім дисками відрізняється

тим, що диски 1 і 2 можуть обертатися з різною частотою відповідно n_1 і n_2 . При необхідності можна змінювати також і напрямок обертання згаданих дисків 1 та 2 для забезпечення оптимальних параметрів роботи пристрою.

Силове замикання заготовок куль між диском і притискним кільцем, виконаним самовстановним в осьовому напрямку, дозволяє обробляти різнорозмірні заготовки куль й неправильної форми без їхнього заклинювання. Оскільки положення інструмента в осьовому напрямку не визначається геометричними параметрами заготовок, то значно зменшуються ударні навантаження, що також збільшує стійкість алмазного інструмента. Ексцентрична установка шліфувального круга дозволяє більш ефективно використати його робочу поверхню й підвищити якість обробки за рахунок безперервної зміни напрямку вектора силового впливу на оброблювані кулі, в результаті чого останні роблять багатоосьове обертання. Таким чином в наведеній схемі обробки повністю відділені кінематичні ланцюги, що здійснюють формотворний і переносний рух, від кінематичного ланцюга, що забезпечує процес шліфування. Запропоновані пристрої дозволяють виконувати обробку куль торцевим алмазним кругом типу 6A2T зі швидкістю шліфування 25-30 м/с і швидкістю подачі куль 0,15-0,30 м/с, в результаті чого значно зменшується питома витрата алмаза й підвищується продуктивність обробки.

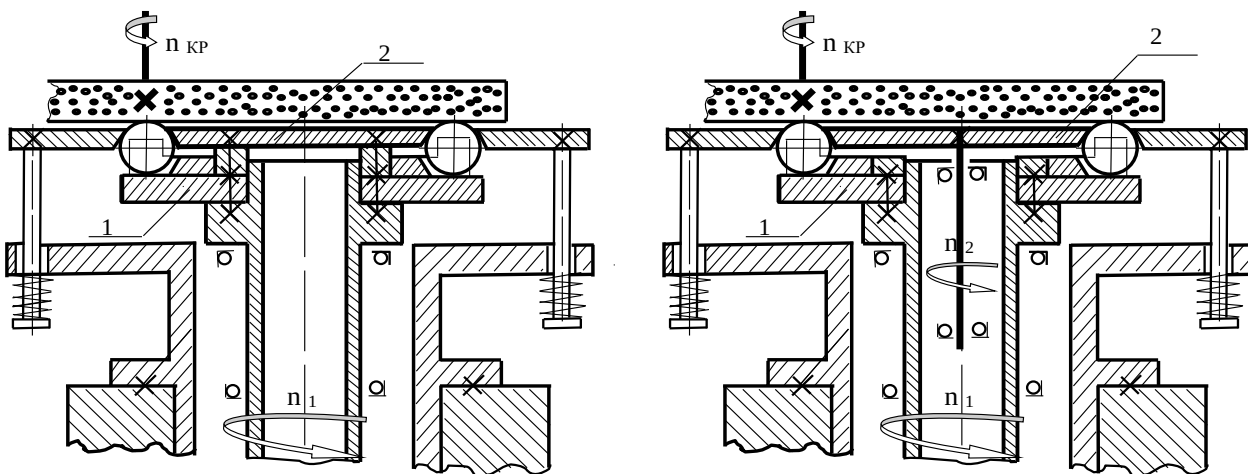


Рисунок 5.13 – Схеми пристроїв з верхнім розташуванням шліфувального інструмента і кінематично зв'язаними або розв'язаними верхнім та нижнім дисками

Так звана зворотна схема шліфування розроблена на базі фрезерного верстата з пристроєм для обробки куль і відрізняється тим, що шліфувальний круг розташований під оброблюваними заготовками (рис. 5.14).

Нижнє розташування шліфувального круга призводить до деякого ускладнення пристрою з конструкційної точки зору, однак у певних випадках обробка керамічних куль за такою схемою виявилася більш ефективною, ніж з верхнім розташуванням інструмента, тому що під час обробки за такою схемою значно

збільшилася швидкість зменшення відхилення від сферичної форми оброблюваних заготовок, особливо в початковий момент, коли воно велике. Це пояснюється тим, що за нижнього положення шліфувального круга оброблювані кулі багато частіше контактують з інструментом, навіть коли розмір однієї з куль менше сусідніх, відтак інтенсивність багатовісьового обертання збільшується. Крім того, через обробку за такою схемою значно зменшилася ймовірність заклинювання куль, що дозволяє обробляти заготовки з більшими початковими відхиленнями від сферичної форми. Підвищується точність форми куль – за продуктивності шліфування до 1000 мкм/год відхилення від сферичної форми поверхні оброблених куль у випадку розташування шліфувального круга знизу складає < 5 мкм.

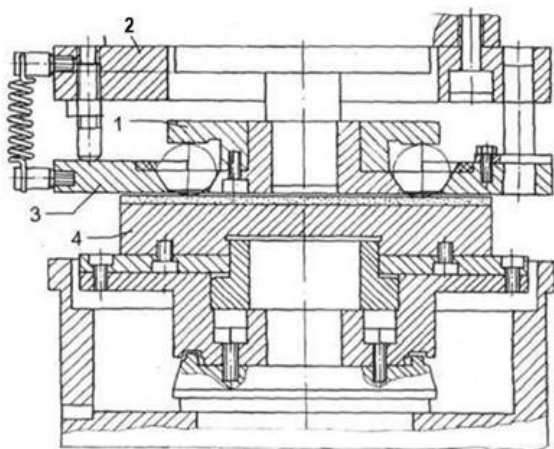


Рисунок 5.14 – Схема пристрою для шліфування куль з нижнім розташуванням інструмента: 1 – верхній диск; 2 – корпус; 3 – притискне кільце; 4 – шліфувальний круг

У переважній більшості випадків прецизійне алмазне доведення виконують за схемою обкатування куль у кільцевих канавках між двома дисками (див. рис. 5.15). Тут оброблювані кулі розташовують в кільцевих канавках обертального нижнього доводочного диска 2, притискаються зверху верхнім доводочним диском 1 з постійним регульованим зусиллям P . Обертний рух нижнього доводочного диска призводить до перекошування куль уздовж кільцевих канавок



Рисунок 5.15 – Схема доведення куль між двома дисками

нижнього диска в напрямку, протилежному обертанню через взаємодію з нижнім і верхнім дисками, і одночасно їх обертання навколо власної осі кочення, за рахунок чого обертний рух передається верхньому доводочному диску.

У зону обробки подається доводочна паста або суспензія. Знімання припуску й формоутворення відбувається внаслідок ефекту відносного прослизання контактуючих поверхонь куль і доводочних дисків в абразивній суспензії. Замість традиційних

дисків з модифікованого чавуну для обробки керамічних куль застосовують доводочні диски з незміцнених сталей підвищеної зносостійкості й твердості (більше HB 230), що виключає ушкодження куль при зіткненнях і взаємному про-

слизанні, нові склади доводочних паст, що містять карбід бору й синтетичний алмаз. Процес супроводжується інтенсивним дробленням абразивних і алмазних зерен, підвищенням зношування доводочних дисків і зниженням швидкості знімання припуску з оброблюваних деталей.

Відносно низька ефективність такої технології доведення багато в чому обумовлена неможливістю формування на поверхні куль рівномірної сітки слідів обробки через практично постійний кут α нахилу осі обертання ОО й низькі швидкості в зонах контакту куль з дисками-інструментами (рис. 5.16). Враховуючи порівнянну твердість оброблюваного й інструментального матеріалів (наприклад, пара карбід бору/алмаз), ця обставина не дозволяє здійснювати обробку куль із надтвердої конструкційної кераміки із прийнятними якістю й продуктивністю. Крім того, специфіка виготовлення керамічних заготовок куль методом спікання полягає в тому, що вони мають відносно велику різнорозмірність (1,0-1,5 мм) і відхилення від сферичної форми (до 1,5 мм).

Технологію високоефективного алмазного доведення керамічних куль у напрямних канавках зі змінною кривизною було розроблено в ІНМ ім. В.М. Бакуля (рис. 5.17).

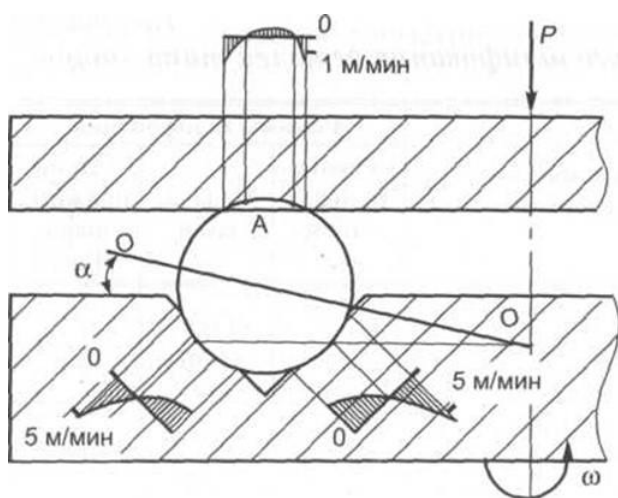


Рисунок 5.16 – Положення власної осі обертання ОО й епюра швидкостей ковзання під час доведення куль у кільцевих канавках

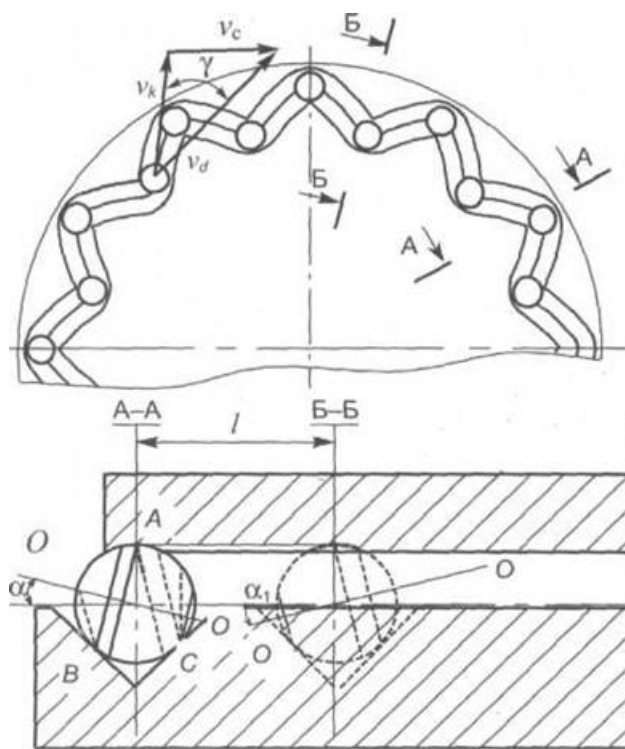


Рисунок 5.17 – Схема алмазного доведення куль у напрямних канавках зі змінною кривизною

Традиційні способи групового доведення заготовок куль такої форми або не можуть бути застосовані через заклинювання куль у процесі обробки, або не-

достатньо ефективні через застосування вільного порошку абразиву у складі пасти чи суспензії. Застосувати ж елеваторне доведення або сортування за розмірами важко через те, що в переважній більшості випадків керамічні кулі виготовляються невеликими партіями в кількості від 8 до 30 шт. Тому технологія групового алмазного доведення повинна була забезпечити можливість обробки невеликих партій керамічних куль з такими відхиленнями форми заготовок.

У результаті їхня сферична поверхня може бути сформована з рівномірною сіткою слідів обробки (рис. 5.18). Під час обробки розбіжність на кут γ векторів руху ділянки поверхні куль v_k і привідного інструмента v_d у точках їхнього контакту обумовлює істотне (більш ніж у 30 разів) збільшення швидкостей ковзання v_c між ними (рис. 5.19), що дозволяє суттєво збільшити продуктивність обробки. Крім того, переміщення куль у радіальному напрямку на величину l дозволяє більш раціонально використати поверхню притискного інструментального диска й реалізує механізм самовирівнювання діаметра куль у партії.

Механізм формування сферичної поверхні під час прецизійної алмазної обробки куль дозволила уточнити розроблена кінематична модель, рівно як і встановити аналітичний зв'язок між параметрами обробки й характеристиками інструмента і основними показниками процесу (швидкістю ковзання в зонах контакту, законом змінювання положення миттєвої осі обертання й ін.). У розробленій моделі використовується приведений коефіцієнт тертя, який враховує той факт, що поверхні технологічного інструмента й оброблюваних куль стикаються не безпосередньо, а через шар доводочної пасти, при цьому поверхня інструмента шаржована алмазом.

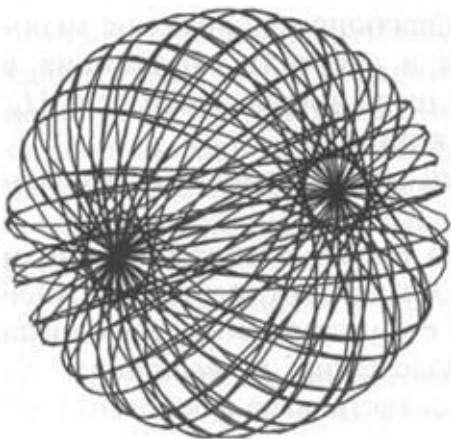


Рисунок 5.18 – Схема розподілу слідів обробки

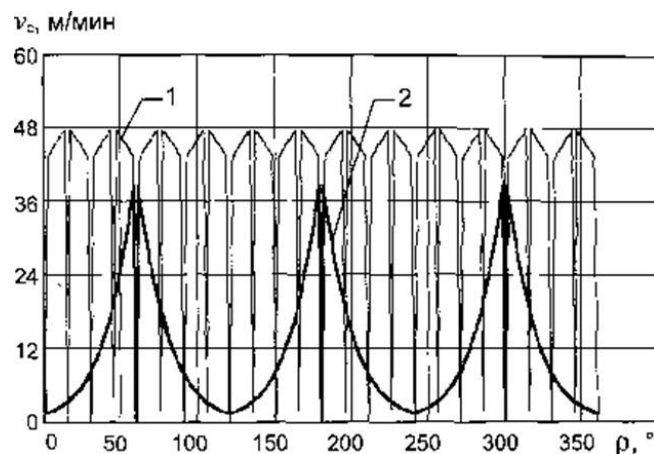


Рисунок 5.19 – Епюри швидкостей ковзання уздовж напрямних канавок: 1 – спіралі Архімеда; 2 – експоненти

Математична модель уперше враховує тертя, величину зношування утворюючої напрямної канавки й розподіл по дугах контакту нормальних сил реакції

дотичних поверхонь (рис. 5.20). Наступні рівняння характеризують умову мінімуму внутрішньої роботи системи:

$$\frac{d}{d\varphi_B} [P_{Ac} V_{Ac} + \omega_{ш} (M_B + M_C)] = 0,$$

$$\frac{d}{d\varphi_C} [P_{Ac} V_{Ac} + \omega_{ш} (M_B + M_C)] = 0,$$

$$M_A = M_B + M_C,$$

де φ_B, φ_C – кути, які визначають положення миттєвої осі обертання; P_{Ac} і V_{Ac} – сила тертя й швидкість ковзання у верхній точці контакту; $\omega_{ш}$ – швидкість обертання кулі навколо своєї осі; M_B, M_C – моменти тертя вертіння в нижніх точках контакту, а також рівняння рівності крутного моменту у верхній точці контакту сумі моментів тертя вертіння в нижній.

Як результат формалізації процесу знайдена умова оптимізації геометричних характеристик технологічного інструмента з позиції досягнення найбільш високої продуктивності обробки. Для досягнення цієї умови зроблено розрахунок параметрів інструментальних дисків, а саме: контурів напрямних канавок, які характеризуються кутом атаки канавки. Чим більше цей кут атаки канавки, тим вище швидкості ковзання в зоні контакту й, відповідно, продуктивність обробки. Тому інструмент, що має кут атаки, близький до критичного значення (при якому кулі перестають котитися уздовж канавки) на більшій частині напрямної канавки, забезпечує максимальну за даних умов продуктивність обробки.

Для обробки куль з кераміки на основі B_4C , SiC , Al_2O_3 й зносостійкого сплаву марки КХН застосовують алмазні планшайби форми 6A2Т 300×3×80 марок АС32, АС15 і АСМ зернистістю 250/200, 125/100 і 40/28 і концентрацією відповідно 150, 100 і 50% на металевій зв'язці марки М2-01, поруватій металевій зв'язці марки МП1 і керамічній зв'язці з металевими наповнювачами марки КМ1. Зусилля притискання шліфувального інструмента 10-50 Н/кулью, зусилля

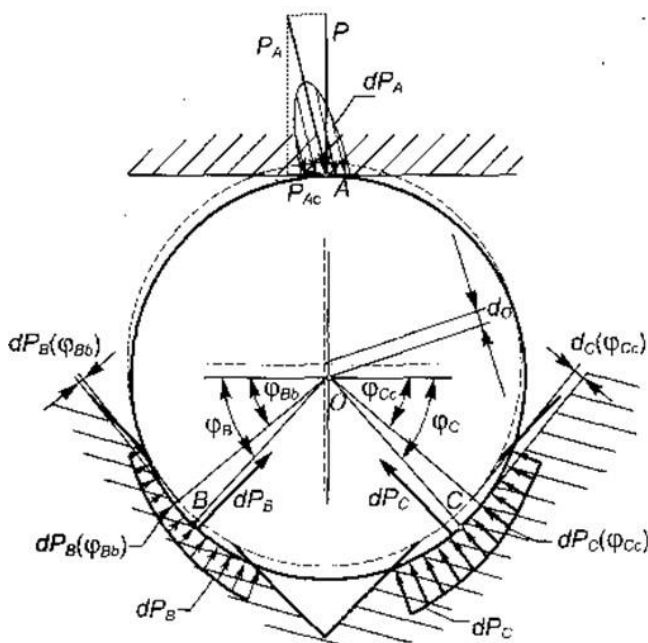


Рисунок 5.20 – Розподіл тиску по дугах контакту кулі з утворюючої напрямної канавки

притискання кільцем – 3-1 Н/кулю. Алмазну обробку виконують із застосуванням ЗМОТС (0,5 %-го розчину Na_2CO_3). Кількість одночасно оброблюваних куль у пристрої становить 8 штук.

Найбільш високу продуктивність мають алмазні круги марки АС6 200/160 на керамічній зв'язці КМ1100 %-ї концентрації. Час обробки однієї кулі з карбіду бору інструментом на зв'язці КМ1 складає ≈ 15 хв., на зв'язці МП1 – 40 хв., на зв'язці КМ1+МП1 – 20 хв. Оброблюваність куль з карбіду бору, карбіду кремнію, оксиду алюмінію й сплаву КХН знаходиться у відношенні відповідно 1,0 : 0,5 : 0,3 : 0,7.

Найкращу зносостійкість мають алмазні круги на зв'язках марок МП1 й М2-01 зернистістю 160/125-250/200 100 %-ї концентрації. Витрата алмазу на обробку однієї кулі з карбіду бору складає для кругів на зв'язках марок КМ1 – 10,3 карати, МП1 й М2-01 – 7,1 карати, КМ1+МП1 – 7,0 карат. За продуктивності до 1000 мкм/год відхилення від сферичної форми поверхні оброблених куль складає < 10 мкм. Оптимальні режими алмазного шліфування виробів типу «куля» представлені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Технологічний процес алмазного шліфування виробів типу «куля»

Операції обробки	Відхилення від сферичної форми, мкм	Марки алмазних інструментів	Режими шліфування		
			Швидкість шліфування, м/с	Подача, мм/год	Зусилля притискання, Н
Чорнове шліфування	50-100	6A2T 300×3×80 АС15-АС20 315/250-125/100 М2-01, МП1-100	20-30	1,00-1,50	300-500
Чистове шліфування	10-20	6A2T 300×3×80 АС6-АС15 125/100-100/80 М2-01, МП1-100	20-30	0,20-0,50	300-500
Доводочне шліфування	5-10	6A2T 300×3×80 АСМ 40/28- 28/14 М2-01, МП1-100	20-30	0,05-0,10	100-300

Прецизійне доведення куль з карбіду бору (B_4C) й карбіду кремнію (SiC) проводили з використанням суспензії порошку алмаза марки АСМ зернистістю від 3/1 до 80/63 з маслом індустріальним марки И-5А (ГОСТ 20119-75). Концентрація алмаза в отриманій суспензії становила 0,05-0,40 кар/мл. Куля з вихідним відхиленням від сферичної форми 20 мкм вважалася обробленою, якщо її точність не змінювалася за контрольний період часу. Алмаз вважався витраченим при зменшенні продуктивності обробки до 5 % від первісної, встановленої для свіжої суспензії. Закономірності обробки є наступними. Чим вище зернистість порошку алмаза в суспензії, тим більше повинна бути його концентрація. Використання порошку алмаза зернистістю менше за 7/5 не призводить до істотного

підвищення точності обробки й зниження шорсткості обробленої поверхні. Порівняльні дослідження шорсткості поверхні куль після доведення, проведені на профілометрі-профілографі «Talysurf 5M-120» (Велика Британія), показали, що в залежності від матеріалу куль (сталь ШХ15, кераміка на основі ZrO_2 , B_4C , SiC) ці показники для куль з різних матеріалів істотно відрізняються.

У порівнянні з традиційною технологією, коли кулі доводяться у кільцевих канавках, їх прецизійне доведення за схемою обробки у напрямних канавках зі змінною кривизною підвищує продуктивність в 10-30 разів за рахунок збільшення шляху обробки за один оберт і, одночасно, забезпечує досягнення точності обробки (відхилення від сферичної форми) $< 0,3$ мкм (0,5-2 мкм за традиційною технологією). При цьому приблизно вдвічі зменшився мінімальний (з умови досягнення максимальної точності обробки) припуск. Параметр шорсткості Ra залишився незмінним на рівні 0,06 мкм, а значення параметрів $Rmax$ і Rt , що характеризують тріщиностійкість, зменшилися й стали більш стабільними.

В табл. 5.6 наведено показники розробленої і традиційної технології доведення керамічних куль, а в табл. 5.7 – результати порівняльних досліджень якості куль закордонного виробництва і оброблених за розробленою технологією.

Таблиця 5.6 – Показники розробленого і базового технологічних процесів прецизійної алмазної обробки куль з кераміки

Показники	Одиниця виміру	Технологічні процеси	
		розроблений	базовий
Продуктивність обробки	мкм/год	30-70	2-5
Відхилення від сферичної форми	мкм	до 0,5	до 1,0
Різномірність за діаметром	мкм	0,3-0,4	2-3
Відносний знос технологічного інструмента	мм ³ /мм ³	0,6-0,8	0,5-0,6
Середня стійкість технологічного інструмента	шт.	2000	1000
Шорсткість поверхні за параметром Ra	мкм	0,06	0,06

Таблиця 5.7 – Показники точності і якості обробки керамічних куль

Показники		Виробники куль			
		Германія		Китай (SiC)	Україна (B_4C)
		(ZrO_2)	(B_4C)		
Відхилення від сферичної форми, мкм		0,120	0,350	0,650	0,300-0,350
Параметри шорсткості поверхні, мкм	Ra	0,026	0,047	0,062	0,046-0,048
	Rz	0,361	0,440	0,536	0,366-0,458
	$Rmax$	0,272	0,439	0,536	0,333-0,399

Як відомо, проблемою експлуатації бурового обладнання нафтових свердловин є відносно низька стійкість клапанів насосів високого тиску. Через швид-

кий знос пари куля-сідло клапанів насосів високого тиску в умовах абразивного середовища бурове обладнання вимушені зупиняти кілька разів протягом напруженого ресурсу роботи насосу. Розроблена технологія виготовлення керамічних куль для клапанів насосів високого тиску забезпечила їхню стійкість, не нижче ресурсу роботи насосів. Сьогодні виготовляють клапани з діаметром кулі від 10 до 100 мм. Поряд з високою зносо- і корозійною стійкістю кераміки, що використовується, а також оптимальним співвідношенням твердості кулі ($HRC\ 85-100$) й сідла ($HRC\ 40-60$), технологія забезпечує точність поверхні на рівні 0,5 мкм й шорсткість за параметром $Ra < 0,05$ мкм. Застосування розроблених клапанів забезпечує невідпущену роботу насосів не менше одного року, підвищує продуктивність насосів на 20-25 % скорочує час зупинки нафтових свердловин, знижує витрати з ремонту насосів і свердловин, як результат, збільшує обсяги добутку нафти й газу. При цьому в 2-3 рази знижується вартість експлуатаційних витрат на заміну клапанів, поліпшуються умови праці.

Питання для самоконтролю:

1. Вплив матеріалу деталі типу "куля" на вибір схеми алмазної обробки..
2. Схема шліфування деталі типу "куля" з ТК з верхнім розташуванням алмазного круга.
3. Схема шліфування деталі типу "куля" з ТК з нижнім розташуванням алмазного круга.
4. Особливість схеми алмазного доведення деталі типу "куля" з ТК у порівнянні із сталевими кулями.
5. Схема алмазного доведення деталі типу "куля" у напрямних канавках зі змінною кривизною. В чому полягає її перевага?

5.5. Актуальність використання ПКМ і МПКМ, їх класифікація, особливості механічної обробки

Актуальність процесів механічної обробки виробів з ПКМ і МПКМ. Розробка й виробництво в Україні сучасних конкурентоздатних на світовому рівні транспортних і цивільних літаків, вертольотів вимагає відповідного росту обсягів виробництва полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на основі високоміцних і високомодульних волокон (вуглецевих, скляних, борних, органічних, базальтових й таке ін.), а також гібридних металополімерних композиційних матеріалів (МПКМ). Останні містять металеву фольгу товщиною 0,02-0,50 мм із нержавіючої сталі, титану, алюмінію й інших матеріалів. Практично всі деталі, вироби й конструкції з ПКМ і МПКМ після основних методів формування піддаються обов'язковій обробці різанням, яке становить від 10 до 50% загальної трудомісткості їхнього виготовлення.

Одним зі шляхів підвищення надійності серійної авіаційної техніки є застосування у найбільш навантажених конструкціях планера літака нових шару-

ватих металополімерних композиційних матеріалів, які складаються із шарів металу й полімерного композиційного матеріалу, що чергуються, і які армовані високоміцними (арамідні, скляні), високомодульними волокнами, що дозволяє регулювати ступінь анізотропії властивостей матеріалу, поліпшувати його характеристики. У цій області створені нові види металополімерних композиційних матеріалів типу ARALL і GLARE в авіаційних конструкціях літаків Боїнг, Фокер й ін., а також типу АЛОП, СИАЛ в Російській Федерації та ін.

АЛОП (аббревіатура від слів алюміній і органопластик) являє собою сполучення адгезійно з'єднаних між собою шарів органопластика й алюмінієвого сплаву, що чергуються. Рівноміцний АЛОП має механічні властивості на рівні алюмінієвого сплаву, однак за рахунок більш низької густини досягається вигаиш по масі. Крім того, швидкість росту втомної тріщини в АЛОПі значно нижче у порівнянні з алюмінієвим сплавом. У конструкціях з АЛОПу тріщина досягає свого критичного значення при числі польотів літальних апаратів, у п'ять разів більшому в порівнянні із традиційними матеріалами. Міцність АЛОПу зростає зі збільшенням вмісту в ньому органопластика.

СИАЛ (аббревіатура від слів скло й алюміній) являє собою листовий матеріал з тонких шарів алюмінієвого сплаву й склопластику на основі клейових препрегів, що чергуються, у яких скло- або вугільна тканина просочується розплавом зв'язки на основі високоміцних епоксидних клеїв. СИАЛи переважають монолітні листи з традиційних алюмінієвих сплавів типу Д16ч, 1163, В95оч й ін. за тріщиностійкістю, втомною й тривалою міцністю, статичними механічними показниками, густині. СИАЛи демонструють високу стійкість до тривалого впливу вологого середовища, що важливо для експлуатації літальних апаратів.

Нові теплостійкі шаруваті металополімерні композити на основі пошарового поєднання тонких листів титанових сплавів з вуглепластиками розробляються для авіаційних конструкцій, що експлуатуються при температурі 150-350°C. Матеріали цього класу перевершують титанові сплави за характеристиками питомої міцності й жорсткості в 1,4-2 рази й по стійкості до вібраційних й акустичних навантажень в 10 разів.

Для авіакосмічної промисловості прогнозується створення наноструктурованих вуглецевих матеріалів у десятки разів більш міцних за сталь, створення полімерних матеріалів – у 3 рази міцніших за існуючі. Винятковий інтерес викликають вуглецеві наномодифікатори – фулерени й нанотрубки, астралени й т.п. (рис. 5.21).

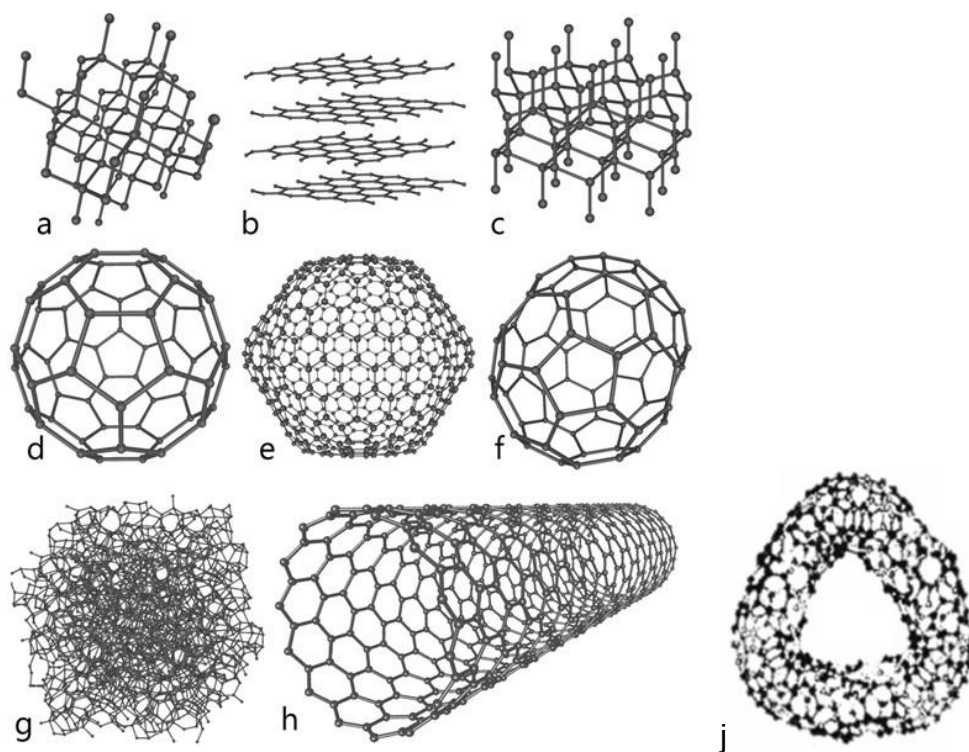


Рисунок 5.21 – Вісім алотропних модифікацій вуглецю: а) алмаз, б) графіт, с) лонсдейліт, d) C_{60} (фулерени), е) C_{540} , f) C_{70} , g) аморфний вуглець, h) одношарова вуглецева нанотрубка, j) астрален

Введення до 2% наночасток фулерена й астралена (рис. 5.22) призводить до комплексного підвищення механічних й експлуатаційних властивостей конструкційних вуглепластиків, надання їм спеціальних властивостей (стійкості проти блискавок, рентгено- і звукопрозорості, екранування електромагнітного випромінювання, електро- й теплопровідності). Фулерен – це молекулярне з'єднання, що належить до класу алотропних форм вуглецю і являє собою опуклі замкнуті багатогранники, складені з парного числа трикоординатних атомів вуглецю. Відповідно вуглецеві нанотрубки – це протяжні циліндричні структури діаметром від одного до декількох десятків нанометрів і довжиною до декількох сантиметрів. При цьому існують технології, що дозволяють сплітати їх у нитці необмеженої довжини. У принципі, за допомогою функціональних похідних фулеренів можна організувати в полімерній матриці об'ємний армувальний каркас. Це дозволило б послабити негативний вплив анізотропії – відомого недоліку шаруватих композитів.

На рис. 5.23 показано порівняння наслідків дії блискавки на конструкційний вуглепластик без захисного покриття і з ним. Як видно з рисунку, у випадку відсутності захисного покриття має місце руйнування матеріалу в епіцентрі ураження, наскрізний пробій, тріщини. У випадку наявності захисного покриття (бронзової сітки) в епіцентрі має місце вигорання сітки, деструкція зв'язуючого у верхньому шарі, розшарування матеріалу.

Перш ніж перейти до розгляду особливостей механічної обробки металополімерних композиційних матеріалів, коротко зупинимося на класифікації за оброблюваністю загалом полімерних композиційних матеріалів як окремого класу матеріалів, що мають відмінності у підходах до їх механообробки і зокрема металополімерних композиційних матеріалів. Останні знайшли широке застосування зокрема в аерокосмічній промисловості.



Рисунок 5.22 – Комплексне підвищення механічних й експлуатаційних властивостей конструкційних вуглепластиків, надання їм спеціальних властивостей



Рисунок 5.23 – Порівняння наслідків дії блискавки на конструкційний вуглепластик без захисного покриття і з ним

На рис. 5.24 показано укрупнену класифікацію полімерних композиційних матеріалів за оброблюваністю. Як видно з рисунка, вони розділені на два великих класи – термопластичні й терморективні. У свою чергу кожен клас ділять на групи з оброблюваності.



Рисунок 5.24 – Класифікація полімерних композиційних матеріалів

Клас термопластичних ПКМ (І) містить групу з порошкоподібним металевим наповнювачем (наприклад на основі фторопласта або полістиролу з додаванням порошків міді, свинцю, дисульфиду молібдену й т.д.).

Клас термореактивних ПКМ (ІІ) складається з чотирьох груп оброблюваності: 3-я група – з газоповітряним наповнювачем (пінопоропласти), 4-а група – з порошкоподібним наповнювачем (фенопласти), 5-я група – з волокнистим наповнювачем (волокніти, скло-, боро-, органо-, вуглеволокніти й т.д.), 6-а група – із шаруватим і листовим наповнювачами (гетинакси, текстоліти й т.д.). Матеріали, що входять в одну групу з оброблюваності, близькі за своїм складом, властивостями й агрегатному стану, тому закономірності їхнього різання однакові, а отже, близька їх оброблюваність.

Виключенням є 5-а група – з волокнистим наповнювачем. Такі матеріали, як високоміцні скло-, органо-, боро- і вуглепластики, маючи однакову волокнисту структуру, суттєво відрізняються за своїми фізико-механічними властивостями, а отже, і закономірності їхнього різання не будуть настільки близькі, як це відзначається для інших груп оброблюваності. Якщо врахувати ще сучасну тенденцію створення гібридних матеріалів, тобто композицій типу органопластик-боропластик, склопластик-вуглепластик і т.п., то 5-ю групу оброблюваності матеріалів доцільно розділити на ряд підгруп. Це скло-, органо-, боро- і вуглепластики, а також гібридні матеріали.

Виклики сучасного матеріалознавства визначили появу нового класу композиційних матеріалів – на основі металів і полімерів, що оптимально поєднують у собі міцність, теплопровідність, електропровідність й інші позитивні властивості металів з хімічною стійкістю, здатністю до демпфування й гарними технологічними властивостями полімерів.

Металополімери – це композиційні матеріали, що містять частки металу в полімерній матриці. Металополімери одержують декількома методами: термічним розкладанням металовмісних з'єднань у розчині-розплаві полімеру, конденсацією пари металу на полімерну підкладку, капсулюванням наночасток політетрафторетиленом й електрохімічним осадженням металевих наночасток у полімерах. Ці комбіновані (композитні) утворення, у яких полімер і метал мають границі розділу, перебувають у вигляді окремих фаз. Нерідко металополімерні матеріали мають не тільки адитивні, але й нові, не властиві окремим компонентам, властивості. Незважаючи на те, що ряд великих компаній представлено на ринку комерційними продуктами на основі наповнених металевими порошками полімерів (наприклад, нагрівальні панелі RAYCHEM, США, що саморегулюються), металополімерні композити відносять до числа перспективних, але маловивчених об'єктів сучасного матеріалознавства. Анізотропія деформацій і міцності є характерною рисою більшості металополімерних матеріалів і конструкцій з них.

Введення в полімерну матрицю металевих часток, не більших, ніж відстань між ланцюгами, зшивками й кристалічними блоками, приводить до зміни властивостей як вихідних композитів, так і композиційного матеріалу. Зміна частки границь розділу фаз дозволяє міняти властивості матеріалу. Металеві наночастки наповнювача приводять до реорганізації надмолекулярної структури полімерної матриці. Відкривається можливість збільшення частки міжфазного компонента впливати на електрофізичні, фізико-механічні й хімічні параметри матеріалу. Характерною рисою більшості металополімерних матеріалів і конструкцій є анізотропія деформаційних і міцностних властивостей.

Серед металополімерних матеріалів з порошкоподібним наповнювачем розрізняють *каркасні* й *матричні*. Основні властивості *каркасних металополімерних матеріалів* визначаються природою й структурою несучого металевого каркасу. Полімерна зв'язка в цих матеріалах забезпечує підвищення однорідності матеріалу за рахунок високої адгезії до металу несучої основи, рівномірність розподілу навантажень і захист від впливу зовнішнього середовища. У якості зв'язки в каркасних матеріалах часто використовують полімери, наповнені сухими мастилами й іншими функціональними добавками.

Унікальні властивості мають *матричні металополімерні матеріали*, в яких матрицею є метали. Вони відрізняються високою електропровідністю, те-

плостійкістю, жорсткістю, зносостійкістю. Такого роду матеріали особливо перспективні як матеріали для електрощіток, для яких необхідне поєднання гарної електропровідності й антифрикційних властивостей.

Матеріали, що складаються із шарів полімеру й металу, що чергуються, називаються шаруватими. До *шаруватих металополімерних матеріалів* відносяться фольговані полімерні плівки (наприклад, фольговані полімерні діелектрики), металізовані полімерні плівки, металевий прокат з полімерним покриттям, багатошарові металополімерні матеріали й ін. Шаруваті металополімерні матеріали широко поширені в різних галузях економіки. Перспективним є застосування листового й стрічкового металу з полімерним покриттям в автомобілебудуванні, будівельній промисловості. У радіоелектронній і радіотехнічній промисловості широко використовуються фольговані полімерні діелектрики для виробництва друкованих плат, гнучких кабелів зв'язку й т. ін.

Шаруваті й каркасні самозмащувальні металополімерні матеріали широко застосовують у промисловості. Є особливо ефективним їх використання у вузлах сухого тертя. На сьогодні накопичено достатній досвід створення самозмащувальних металополімерних матеріалів з різними властивостями.

Інший напрямок удосконалення металополімерних матеріалів – це розробка нових шаруватих металополімерних композитів для авіаційної техніки. Сучасні металополімерні матеріали почали створювати на початку 80-х років минулого сторіччя. Розвиток авіаційної промисловості призвів до росту обсягів виробництва не тільки полімерних композиційних матеріалів з наповнювачем з високоміцних й високомодульних волокон, але також гібридних металополімерних композиційних матеріалів. Останні містять крім волокнистого наповнювача металеву фольгу товщиною 0,02-0,50 мм з нержавіючої сталі, титану, алюмінію й інших матеріалів. Поєднання алюмінієвої фольги з різними полімерними плівками дозволяє одержати *комбіновані металополімерні матеріали*, яким властива світлонепроникність, високі фізико-механічні властивості, низькі коефіцієнти паро-, водо- і газопроникності, здатність зберігати задану форму й зварюватися за порівняно короткий час.

Для потреб авіакосмічної промисловості розробляються наноструктурні композити конструкційного, теплозахисного, радіотехнічного призначення, термопласти, герметики, лакофарбові покриття, високоміцні алюмінієві сплави, шаруваті металополімерні композити й спеціальні матеріали з підвищеними фізико-механічними й експлуатаційними властивостями. Тут можна виділити 4 великі напрямки:

1. Модифікування й зміцнення матеріалів для авіакосмічної техніки малими кількостями наночасток різної природи: вуглецю, оксидів, карбідів й т.ін., у вигляді нанорозмірних часток, нанотрубок, нановолокон й квазікристалів різних систем, що призводить до підвищення механічних, фізико-хімічних власти-

востей, надання матеріалам спеціальних функціональних характеристик і підвищенню ресурсу за рахунок удосконалення складу й структури конструкційних матеріалів з властивостями радіопоглинання, тепло- й вогнезахисту, термопластів, органічного скла й покриттів, еластомірів, клеїв, герметиків, лакофарбових покриттів композитів з керамічними й металевими матрицями.

2. Розробка складів і технологій одержання й термічної обробки легких металевих сплавів шляхом утворення нанодисперсних інтерметалідів, що містять Zn, Sc, Ta, Nb, і таких, що виділяються із твердого розчину. Такі інтерметаліди призводять до утворення наноструктурних областей у матриці і їхній гетерогенності, що дозволяє істотно підвищити жароміцність, опір статичним й динамічним навантаженням матеріалів, а також їх ресурсні характеристики.

3. Створення наноструктурних склокристалічних і керамічних покриттів і матеріалів, що утворюються з використанням "золь-гель" технології й високо-температурних структурно-фазових перетворень, для теплонавантажених конструкцій, у т.ч. рушійних установок.

4. Розробка технології й засобів контролю й ідентифікації наночасток, напівфабрикатів і композитів, що містять наночастки, квазікристали, нанотрубки, нановолокна й їхні похідні, а також їхнього розподілу в об'ємі композита й взаємодії наночасток із матрицями різної природи (полімерними, металевими, інтерметалідними й керамічними) і їхній вплив на формування структури матеріалу. Дослідження структури полімерних, керамічних, металевих й ін. матеріалів і сплавів.

Унікальною розробкою є папір БТТ, яку використали для термічних мостів і плазмовідсічних ущільнень при температурі до 16500 °С. Цей матеріал на основі нитковидних кристалів і нанорозмірних часток Si був використаний у якості термокомпенсаторів і плазмовідсікачів у МКС "Буран" (рис. 5.25).

Використання золь-гель технологій з утворенням наноструктурних фаз у складі керамічних матеріалів й антиокисних захисних покриттів для вуглець-вуглецевих і вуглець-керамічних композиційних матеріалів на робочі температури до 20000 °С ще один ефективний напрямок нанотехнологій (рис. 5.26).

Наразі розроблені технології одержання термостійких до 16500 °С керамокомпозитів без використання тонковолокнистих безкерових волокон Si. Зміцнення керамічної матриці відбувається за рахунок росту нитковидних кристалів нанорозмірного діаметра по механізму "пар-рідина-тверде тіло" усередині матриці з утворенням каркасної структури. Завдяки цьому матеріал здобуває виняткову термостійкість (більше 5000 циклів без руйнування) і в 1,5-2 рази більшу міцність, ніж звичайні керамічні матеріали. Ці розробки призначені для газотурбінних двигунів і прямоточних повітряно-реактивних двигунів крилатих ракет і захисту конструкцій гіперзвукових літальних апаратів.



Рисунок 5.25 – Термічні плазмовідбиваючі ущільнення на основі нитковидних кристалів й наночасток SiC для МКС “Буран”

антиокисне покриття

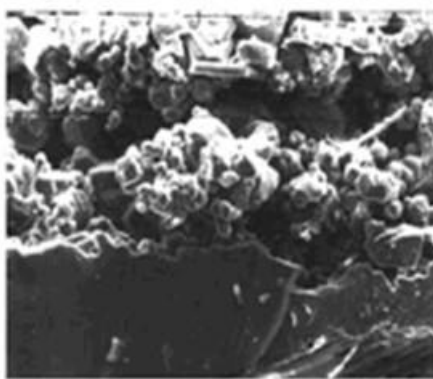
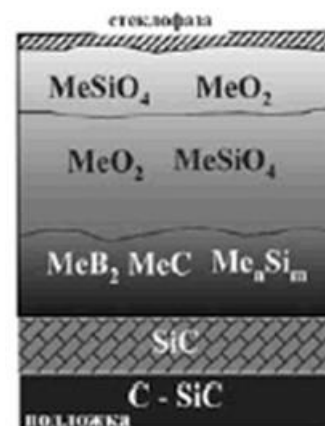


Рисунок 5.26 – Керамічні карбідоксидні покриття (для С-С композитів) з багаторівневим захистом від окислення



Актуальність такого керамокомпозитного захисту для гіперзвукових літальних апаратів. Гіперзвуковий літальний апарат (ГЛА, ГЗЛА) – літальний апарат (ЛА), здатний здійснювати політ в атмосфері з гіперзвуковою швидкістю (більшою або рівною 5М; М – число Маха) і маневрувати з використанням аеродинамічних сил. Крилатий літальний апарат, що має таку швидкість польоту, може планувати на значно більші дальності, ніж звичайний, тому що планування стає "динамічним". Розподіл літальних апаратів на "дозвукові", "надзвукові" й "гіперзвукові" має досить міцну фізичну основу й відбиває сутність явищ при взаємодії ЛА з повітряним середовищем: політ на гіперзвукових швидкостях (рис. 5.27) так само принципово відрізняється від польоту на надзвукових, як останній від польоту на швидкостях дозвукових. У всіх крилатих багаторазових транспортних космічних кораблях (БТКК) і авіаційно-космічних системах (АКС) їх друга (космоплан) або єдина (космоліт) ступінь, яка виходить на орбіту, виконує гіперзвуковий політ на траєкторії спуска, а в деяких – в одно- або двоступінчастих системах з горизонтальним стартом – також і при підйомі.

У США триває проект Boeing X-37 (рис. 5.28) з польотами на орбіту експериментального космоплану, що запускається на РН. Розробляються проекти: у Великобританії – одноступінчастий АКС-космоліт Skylon з горизонтальним стартом і посадкою, в Індії – космоплан-прототип одноступінчастої АКС-космоліта RLV/AVATAR з вертикальним стартом на РН і горизонтальною посадкою, у Китаї – космоплан і його прототип Шеньлонг, що запускається на РН, і двоступінчастий БТКК із горизонтальним стартом і посадкою й ін. Гіперзвукові бойові блоки. 18 листопада 2011 Міноборони США провело випробовування нового плануючого гіперзвукового бойового блоку ANW.

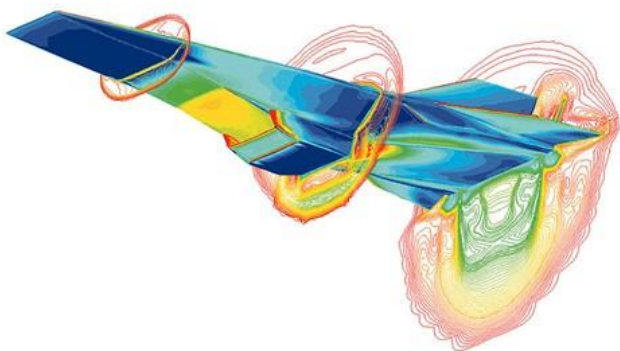


Рисунок 5.27 – Моделювання повітряного потоку навколо «Х-43» (Boeing/NASA) при 7 М



Рисунок 5.28 – Космоплан «Х-37» (Boeing/NASA) на стоянці

Американська ракета Х-51, що створюється компанією Boeing у рамках концепції "швидкого глобального удару", має розвивати швидкість в 6М-7М. Випробування почалися у 2010 році. Максимальна швидкість, досягнута ракетою, становила 5,1 М. На стартову висоту ракету піднімає стратегічний бомбардувальник В-52. Ракета оснащена прямоточним гіперзвуковим повітряно-реактивним двигуном. Вага палива – 120 кг. Дальність польоту – 500 км. Планувалося поставити ракету на озброєння вже в 2017 році.

Більш високі швидкісні характеристики продемонструвала експериментальна ракета Falcon НТВ-2, створювана Агентством по перспективних оборонних науково-дослідних розробках США з 2003 року. Її вдалося розігнати до 20 М. Правда, старт був не атмосферним, "Фалькон" був піднятий ракетою-носієм у ближній космос, звідки ракета була спрямована вниз, розігнавшись до дивовижної швидкості. Після другого випробування, що відбулося в 2011 році, перспективна ракета була визнана Пентагоном безперспективною, оскільки вона була, по-перше, практично некерованою, а, по-друге, з нею неможливо було встановити зв'язок.

Активно працює в області гіперзвуку й Китай. У січні 2014 стало відомо про випробування в КНР гіперзвукового бойового блоку WU-14, що планує з космосу і має швидкість до 10 Мах. WU-14 почали випробовувати в 2013 році. Щорічно проводиться до трьох пусків. Заявлена швидкість планіруючої боєголовки – 10 М. WU-14 запусять у серію приблизно в другій половині 20-х років. Її мають встановлювати на балістичні ракети. Ще одне завдання, яке покладає КНР на нову зброю, – знищення авіаносців. Їхня протиракетна оборона виявиться неспроможною проти боєголовки, що маневрують на швидкості 10 М.

У ході пуску міжконтинентальної балістичної ракети РС-18, що стався 25 жовтня 2016 р., був успішно випробуваний російський гіперзвуковий літальний апарат, відомий під позначенням "виріб 4202" (15Yu71). Гіперзвукова боєголо-

вка 4202, як пишуть "Известия", може підніматися на висоту порядку 100 кілометрів, і має можливість робити маневри у двох площинах – вертикальній і горизонтальній. Перед входом у щільні шари атмосфери безпосередньо над ціллю ГЗЛА робить складний маневр, що утруднює його перехоплення системами протиракетної оборони. Її не може дістати жодна протиракета. Це перше повністю успішне випробування зброї, здатного розганяти до 15 Махів. Можлива довжина Yu-71 – від 5,4 м до 7 м.

Ще одна російська гіперзвукова розробка – крилата протикорабельна ракета "Циркон". Її випробування почалися в 2012 році. З п'яти пусків останній (16 березня 2016 року) виявився повністю успішним. Вона призначена для озброєння ракетних крейсерів. Передбачувана швидкість – до 12 М, дальність – до 1000 км. 19 лютого 2016 року ІА ТАСС повідомило про плани розміщення гіперзвукових протикорабельних ракет «Циркон» на російському важкому атомному ракетному крейсері «Пётр Великий».

Першочергове місце займають розробки з технологій введення наночасток до складу й структури матеріалів і композитів (рис. 5.29):



Рисунок 5.29 – Структурування матриці за рахунок хімічних реакцій функціональних груп полімеру з привитими функціональними групами наночасток та їхня фіксація у складі матриці

– обробка волокон – нанесення на поверхню армувальних волокон композита з розчину фулерена або суспензій наночасток;

– введення до складу зв'язувального в рідко-в'язкій фазі наночасток і диспергування їх в об'ємі;

– введення астраленів до складу зв’язувального у твердій фазі шляхом змішування на спеціальному устаткуванні.

Основними напрямками робіт у цій області технологій є одержання стійких розчинів і суспензій наночастинок, щеплення функціональних груп до наночастинок різного складу й природи, їхня дезінтеграція й розподіл в об’ємі матеріалів.

Виготовлення наноструктурованих матеріалів неможливо як без ретельного контролю якості вихідних наночастинок, так і без поопераційного контролю технологічного процесу. Найбільш інформативними є методи надчуттєвого рентгеноструктурного аналізу й просвічувальної електронної мікроскопії. Їхнє об’єднане застосування дозволяє одержати зображення окремих нанотрубок, підрахувати кількість шарів у багатошарових нанотрубках, виміряти будь-які геометричні параметри нанотрубок, а також інших наночастинок. По виду рентгенограм можна визначити, є нанотрубка ідеальною або її поверхня забруднена, кваліфікувати вид забруднення.

Окремий напрямок застосування металополімерних композитів – це ремонт і відновлення деталей та вузлів промислового обладнання. Галузі застосування металополімерних матеріалів у ремонтних роботах – це машинобудування; енергетика (ТЕЦ, ГЕС, АЕС), тепломережі, водопостачання й каналізація; хімічна й нафтопереробна промисловість; целюлозно-паперова промисловість і поліграфія; судноремонт; авторемонт; гірничодобувна й переробна промисловість; гумовотехнічна промисловість; харчова промисловість і виробництво виробів з пластику.

Відновленню підлягають зношені цапфи валів, зношені внутрішні циліндричні поверхні (наприклад посадочні місця підшипників), зношена зовнішня і внутрішня різьба, зірвана різьба. Деякі способи відновлення таких поверхонь показані на рис. 5.30.

Перевагами використання металополімерів у ремонтних роботах є:

- можливість відновлення деталей практично з будь-яких матеріалів (чорні й кольорові метали, неметали);
- відсутність температурних і монтажних напружень після ремонту;
- можливість усунення дефектів без розбирання й демонтажу вузлів і механізмів;
- збільшення терміну служби устаткування, що експлуатується.

Металополімерні матеріали застосовують у ремонтних роботах під час відновлення деталей машин і механізмів (використовуються металополімери типу «Сталь», «Алюміній», «Бронза», «Антифрикційний»), створення зносостійких й антикорозійних покриттів (використовуються «Сталь-кераміка», «Кераміка», «Феро-хром», «Кварц»), застосування як високотемпературні компо-

зиційні матеріали (використовуються «ВТ-220», «Сталь-ВТ», «Антифрикційний-ВТ», Алуміній-ВТ», «Бронза-ВТ», «Феро-хром-ВТ», «Кварц»-ВТ), застосування як заливальні компаунди.

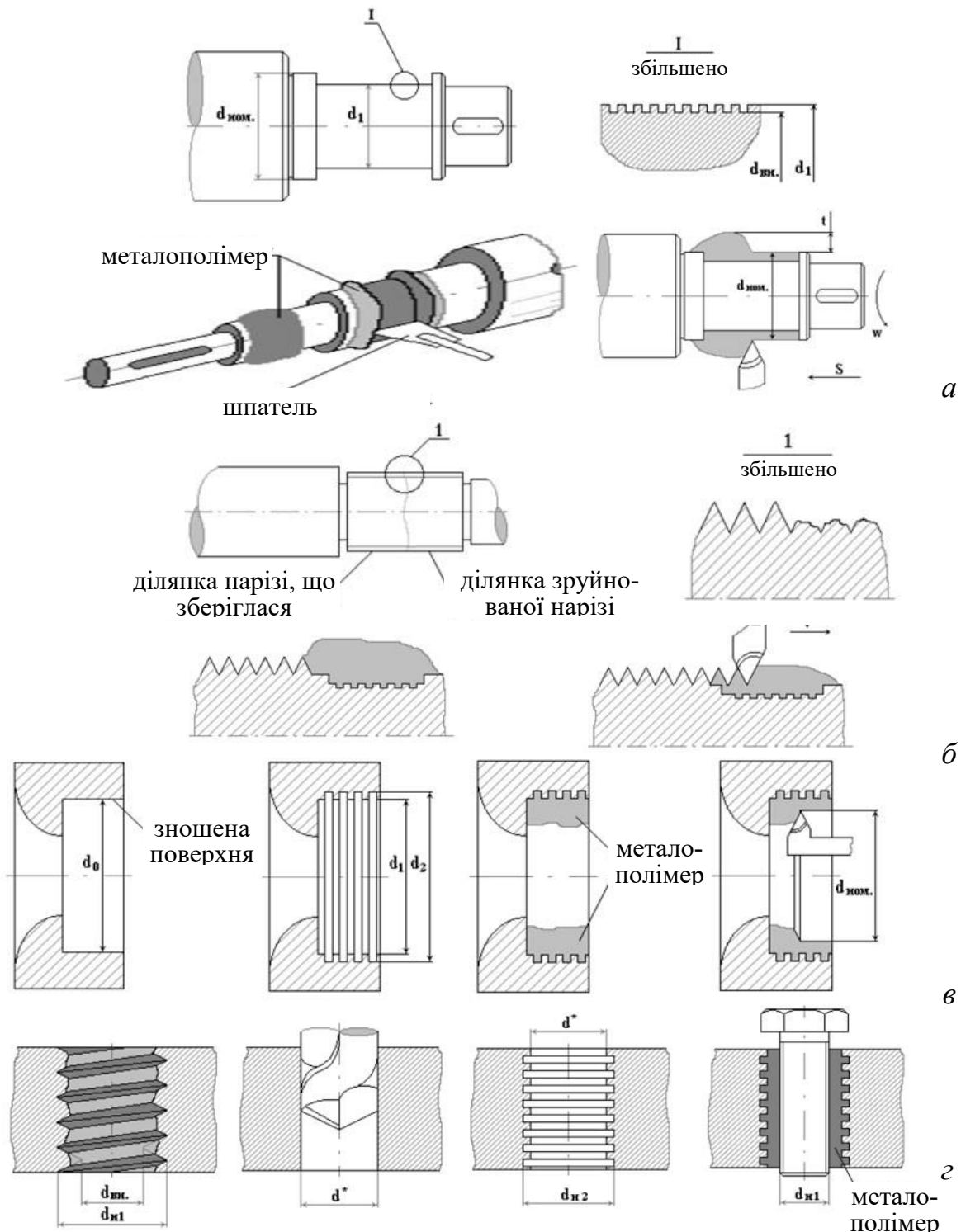


Рисунок 5.30 – Застосування металополімерних матеріалів у ремонтних роботах: відновлення зношеної цапфи валу (а), відновлення зношеної нарізі (б), відновлення зношеної внутрішньої циліндричної поверхні (в), відновлення зірваної нарізі (г)

Оброблюваність полімерних композиційних матеріалів різанням. Як показує досвід, процес різання полімерних композиційних матеріалів істотно відрізняється від процесу різання металів. Ця відмінність пояснюється головним чином специфічними властивостями самих оброблюваних матеріалів: анізотропією їхніх властивостей, їх відносно низькою твердістю і дуже низькою в порівнянні з металами теплопровідністю. Наявність полімеру в матеріалі і його неминуча деструкція під дією механічних і термічних навантажень призводять до специфічних явищ у зоні різання, які відсутні при різанні металів. Так, механічна обробка приводить до зниження міцності виробу, деструкції полімерної зв'язки, що впливає на експлуатаційні характеристики виробів.

Обробка різанням полімерних композиційних матеріалів має низку особливостей, що відрізняють його від аналогічної обробки різанням металів.

Особливості процесу різання ПКМ:

1. *Яскраво виражена анізотропія властивостей матеріалів.* Якщо метали, що мають кристалічну будову, з певним допущенням можна вважати ізотропними, то ПКМ, наповнювачем у яких є волокнисті матеріали різного складу, мають анізотропію властивостей. Це визначає відмінність процесу різання, зокрема, стружкоутворення під час обробки уздовж і поперек армувальних волокон. Істотно схема армування буде впливати й на якість одержуваної поверхні, тому при розробленні технологічної операції механічної обробки ПКМ слід враховувати й напрямок обробки щодо напрямку армування.

2. *Відносна складність отримання високої якості поверхні.* Внаслідок невисоких характеристик міцності полімерних композиційних матеріалів (особливо при підвищених температурах), а також через їхню шарувату структуру й у ряді випадків низький адгезійний зв'язок наповнювача зі зв'язувальним їхня обробка різанням слід виконувати гостро заточеним інструментом. За великого затуплення інструмента через низьку адгезію зв'язувального з армувальним волокном при збільшенні сил різання утворюються тріщини між волокном і зв'язувальним, відбуваються викришування зв'язувального з оброблюваної поверхні виробу, особливо в місцях входу й виходу інструмента, що, природно, позначається на якості обробки. Шарувата структура призводить до того, що при підвищеному зносу інструмента відбувається розшарування матеріалу. Крім того, при перерізуванні армувальних волокон, особливо при перехресному армуванні, спостерігається розкуйовдження перерізованих волокон, що погіршує якість обробленої поверхні й змушує іноді застосовувати додаткову оздоблювальну операцію, наприклад зачищення шкуркою.

3. *Висока твердість наповнювача.* У деяких ПКМ це викликає цілий ряд труднощів під час їхньої обробки. Наприклад, у матеріалів на основі волокон карбіду бора мікротвердість наповнювача становить 40...43 ГПа, що перевер-

шує твердість таких інструментальних матеріалів, як швидкорізальні сталі й тверді сплави, і є порівнянною з мікротвердістю надтвердих матеріалів – натурального алмазу (98,1 ГПа), синтетичного алмазу марки АС6 (89 ГПа) і ельбору-Р чи гексаніту (84 ГПа). Тому для обробки таких матеріалів можуть бути застосовані тільки надтверді матеріали (НТМ), причому й у цьому випадку проблема обробки не знімається, тому що співвідношення мікротвердостей інструментального й оброблюваного матеріалів становить усього 2,5, тоді як для ефективного здійснення процесів різання співвідношення мікротвердостей повинно становити 4...6.

4. *Низька теплопровідність ПКМ.* Їх низька теплопровідність суттєво впливає на співвідношення складових загального теплового балансу. Так, теплопровідність ПКМ складає 0,14...0,50 Вт/(м·К), що у декілька сотень разів менше, ніж у металів. Це обумовлює слабкий відвід теплоти разом зі стружкою і в оброблюваний виріб, тому під час обробки ПКМ основна частка теплоти відводиться через різальний інструмент. Так, за даними В.М. Дрожжина, витрата теплоти під час обробки полімерних композиційних матеріалів розподіляється в такий спосіб: в інструмент – 90 %, в стружку – 5 %, в оброблювану деталь – 5 %. У той же час при обробці металів іноді до 90 % теплоти відводиться зі стружкою й тільки 10 % – деталлю й інструментом. Такий перерозподіл витратної частини теплового балансу накладає певні умови на застосовування різального інструмента, який має інтенсивно відводити теплоту, що виділяється в зоні різання.

5. *Абразивна дія наповнювача.* Наведені види ПКМ викликають найбільші труднощі в обробці, тому що наповнювачем у них є скляні, борні або вугільні волокна, що мають високу твердість й абразивну здатність. Наявність у зоні різання твердих складових призводить до абразивного зношування інструмента, що під час обробки, наприклад боропластиків, має переважне значення. Отже, обробка ПКМ різанням визначається багато в чому властивостями наповнювача.

6. *Деструкції полімерної зв'язки при різанні.* Характерною рисою ПКМ є наявність у матеріалі полімерної зв'язки. При впливі в процесі різання механічних навантажень і теплоти, що виділяється в зоні різання, відбувається неминуча деструкція зв'язки. Відбувається масовий розрив хімічних зв'язків у молекулярних ланцюгах полімеру, утворюється велика кількість вільних макрорадикалів, що мають надлишкову енергію. У результаті цього утворюється в'язкотечкий у мікрооб'ємах полімер, що є поверхнево-активною речовиною (ПАВ). Мігруючи по поверхні механічно напруженого різального клина інструмента й по дефектах його поверхні, деструктований полімер ПАВ знижує поверхневу енергію металу (ефект Ребіндера), що полегшує відрив від його

поверхні окремих мікро- й макрочасток. У результаті цього виникає явище механо-хімічного адсорбційного зношування інструмента як одна зі складових його сумарного зношування. Такий вид зношування характерний тільки для обробки полімерних матеріалів.

7. *Високі пружні властивості ПКМ.* Всі розглянуті види ПКМ мають високі пружні властивості, що визначає особливості процесу різання. У першу чергу мова йде про велику площу контакту із задньою поверхнею інструмента. Це призводить до підвищених значень на ній сил різання.

Якщо під час обробки металів сили на задній поверхні малі й у практичних розрахунках їх не враховують, то під час обробки полімерних матеріалів сили на задній поверхні перевищують часом сили, що діють на передню поверхню. Отже, є необхідним враховувати ці сили під час обробки ПКМ через інтенсивні контактні явища на задніх поверхнях інструмента (його зношування відбувається головним чином по задній поверхні й шляхом округлення різальної кромки). Пружне відновлення обробленої поверхні варто враховувати й при оцінці точності обробки. Сили різання під час обробки ПКМ в 10...20 раз нижче, ніж під час аналогічної обробки металів, а пружні характеристики вище, тому точність їх обробки у меншій мірі визначається пружними деформаціями технологічної системи. На точність виробів із ПКМ під час їхньої обробки різанням впливають пружні деформації самих деталей під дією, нехай і незначних, сил різання й у результаті зусиль закріплення.

8. *Технологічний критерій зношування.* Характерним для обробки ПКМ є технологічний критерій зношування інструмента. Оскільки через шарувату структуру матеріалів, а іноді через низьку адгезію наповнювача й зв'язки, під час обробки ПКМ утворюються характерні дефекти поверхні, такі як відколи, розшарування, розкуйовдження, припали, то при визначенні припустимого зношування переважає технологічний фактор – відсутність цих дефектів і певний рівень шорсткості поверхні, що істотно залежить від ступеня зношування інструмента. Тому припустиме зношування інструмента під час обробки ПКМ завжди нижче, ніж під час аналогічної обробки металів й оцінюється за технологічними факторами, які визначають якість поверхні.

9. *Специфіка процесу стружкоутворення.* Під час обробки ПКМ процес стружкоутворення відбувається інакше, ніж у металів, що пояснюється в першу чергу різницею у їхньої структурі. Анізотропія властивостей ПКМ визначає інші процеси стружкоутворення й при різанні в різних (стосовно напрямку армування) напрямках. Високі пружні властивості матеріалу визначають процес руйнування матеріалу, що носить крихкий характер.

10. *Низька теплостійкість ПКМ.* Залежно від типу зв'язки теплостійкість цих матеріалів становить 160...300 °С. При температурах вище зазначених від-

бувається вигорання зв'язки, на поверхні обробленої деталі з'являються припали. Тому рівень температур у зоні різання має бути значно меншим, ніж під час обробки металів. Це посилюється ще й тим, що в більшості випадків не допускається застосування ЗМОТС. Як відомо, ПКМ мають таку властивість, як вологовбирання, тому застосування ЗМОТС у багатьох випадках спричиняє введення додаткової операції – сушіння виробу. Отже, раніше за все доводиться передбачати механічну обробку виробів із ПКМ без застосування ЗМОТС.

11. *Високий опір вібраціям.* При проектуванні операцій механічної обробки ПКМ необхідно враховувати такі їхні властивості, як більш високий опір стисненню, ніж розтягання.

12. *Виділення дрібних часток матеріалу при різанні.* Обробка ПКМ різанням супроводжується виділенням дрібних часток наповнювача, змішаного зі зв'язкою, виділенням летючих, часом токсичних речовин, тому вимоги техніки безпеки й виробничої санітарії також мають носити специфічний характер.

Дослідження механіки й закономірностей різання металополімерів. Полімерно-композитні матеріали, зокрема металополімери (МП), знаходять широке застосування в різних галузях промисловості. У першу чергу, це обумовлено простотою їхньої реалізації й різними властивостями (високі пружні характеристики, стійкість до агресивним хімічних середовищ і т.д.). Як правило, їх застосовують у вигляді спеціального покриття, до якого застосовують ті ж вимоги по точності і якості, що й до деталей з металів. Тому для досягнення заданих вимог по точності і якості покриттів застосовують механічну обробку – фрезерування, точіння, шліфування й т.д. У зв'язку з усе більше широким застосуванням МП виникає завдання проектування технологічних процесів їхньої механічної обробки. На сьогоднішній день у довідковій літературі відсутні будь-які рекомендації з механічної обробки МП.

Механічна обробка МП є однією з маловивчених галузей науки про різання матеріалів. Як показує досвід, проведення аналогій з різанням металів (призначення аналогічних режимів різання, різального інструмента, схем обробки й т.д.) не дає бажаного результату, тому що процес різання МП істотно відрізняється від процесу різання металів. Ця відмінність пояснюється головним чином яскраво вираженою неоднорідністю цих матеріалів й їхніх специфічних властивостей. Таким чином, важливим є дослідження механіки й закономірностей різання МП.

МП ремонтного призначення, «Лео-Сталь», «Лео-Кераміка», Chestor Monconlar BR, Belzona 1361 й т.п., складаються із двох або більше компонентів: основи-матриці – полімерного зв'язуючого (на основі різних смол) і армувальної складової – мікрочастинок металів або сплавів. У результаті дослідження структури поверхні МП методом електронної мікроскопії отримані фотознімки

поверхонь (рис. 5.31), статистична обробка яких дозволила визначити середні розміри часток наповнювача (табл. 5.8).

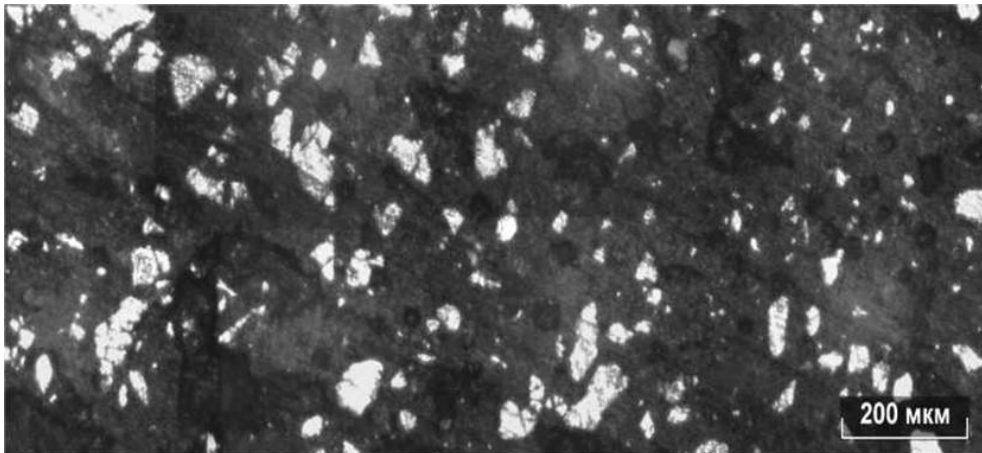


Рисунок 5.31 – Структура поверхні металополімеру марки Devcom Ceramic

Таблиця 5.8. Середні розміри часток наповнювача в МП

№ з/п	Марка МП	Середній розмір часток наповнювача
1	Belzona 1321	9
2	Devcom Ceramic L	6
3	Diamant Ceramic PL	13,5
4	Лео-Керамика	5,5
5	Chestor Monconlar BR	6

Механіка руйнування МП відрізняється від механіки руйнування металу, через цей фактор є однією з причин складності одержання високої чистоти поверхні після механічної обробки ПКМ.

Процес різання металів власне кажучи є процесом пластичної деформації шару, що зрізується, процес різання металополімеру – це процес розриву волокон полімерної матриці й викидання з неї часток наповнювача. В залежності від розмірів зони деформації мають місце різні види стружки утворення: коли зона деформації набагато більше часток наповнювача (чорнове точіння, фрезерування й т.д.) утворюється зливальна стружка (рис. 5.32, а) аналогічна тій, що утворюється у металів (рис. 5.32, в); при глибинах різання, коли зона деформації співмірна з розмірами часток наповнювача (шліфування, тонке точіння) – сипуча (елементна) стружка (рис. 5.32, б). Таким чином коли зона деформації значно більша за дисперсність матеріалу (точіння з глибиною різання більше одного міліметра), можна застосовувати класичну теорію різання з усередненими зна-

ченнями фізико-механічних властивостей матеріалу; але у випадку, коли зона деформації менша за дисперсність матеріалу (шліфування, тонке точіння), необхідно застосовувати спеціальну теорію різання, яка враховує дисперсність матеріалу.



Рисунок 5.32 – Стружка при точінні металополімерів: Diamant MM – глибина різання 0,8 мм (а), Diamant MM – глибина різання 0,4 мм (б), сталь – глибина різання 0,5 мм (в)

Як вам відомо, наслідком механічної обробки є не тільки зняття припуску із заготовки, але й зношування різального інструмента, що призводить до погіршення якості оброблюваних деталей. Оскільки процеси різання композитних матеріалів і металів відрізняються, зношування інструмента має інший характер, що підтверджено дослідженнями зношування різального інструмента з різних ріжучих матеріалів (мінералокераміка, твердий сплав, швидкорізальні сталі, оксид алюмінію (абразивний матеріал) на різних оброблюваних матеріалах (металополімери Лео-Сталь, Лео-Кераміка, Мульти-Метал ММ, Thortex Cerami-Tech). Доведено, що:

а) інтенсивність зношування різального інструмента під час обробки МП в значній степені залежить від дисперсності наповнювача матеріалу;

б) при однакових умовах різання знос різального інструмента, який оброблює крупнодисперсний МП (рис. 5.33, а) в 20 разів перевищує знос тих же ріжучих матеріалів, які оброблюють сталь (рис. 5.33, б);

в) площадка зносу під час обробки МП виникає на задніх поверхнях ріжучого леза й відсутня на передніх, що пов'язано в першу чергу з високими пружними характеристиками, тобто більшому зносу сприяє інтенсивне пружне відновлення оброблюваної поверхні МП, яке збільшує площу тертя різального інструмента об оброблювану поверхню.

Перераховані особливості обробки ПКМ показують, що перенос закономірностей процесу різання металів на ці матеріали не є припустимим. Отже, для оптимізації процесу різання ПКМ, досягнення максимальної продуктивності й

необхідної якості поверхні є необхідним всебічне врахування особливостей процесу різання цих матеріалів, процесу стружкоутворення й зношування інструмента, силових і теплових явищ, якості обробленої поверхні. Тільки на цій основі є можливим розроблення нормативів режимів різання для різних видів обробки ПКМ.

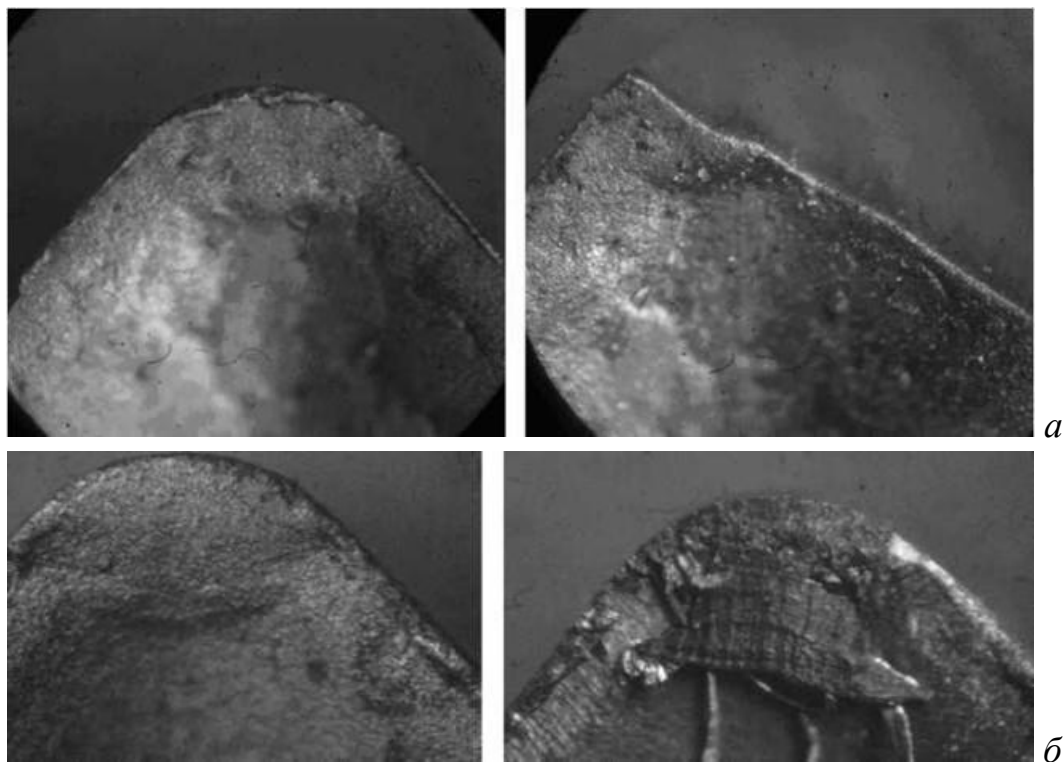


Рисунок 5.33 – Зношування різців при точінні (зліва – нова пластинка, справа – зношена): T15K6, $V=157$ м/хв, $s = 0,1$ мм/об, $H = 0,2$ мм, оброблюваний матеріал «Лео-Кераміка» (а), T15K6, $V=157$ м/хв, $s = 0,1$ мм/об, $H = 0,2$ мм, оброблюваний матеріал Сталь 45 (б)

При виготовленні виробів з ПКМ застосовують наступні види механічної обробки: точіння (зовнішнє й підрізування торця), свердління й розгортання, фрезерування, розрізування, шліфування й нарізування різьби. Вимоги до точності операцій точіння, свердління і фрезерування 11–13-го квалітетів, до параметру шорсткості поверхні $Rz < 20$ мкм.

5.5. Технології механічної обробки деталей з ПКМ і МПКМ

Токарне оброблення виробів з різних видів ПКМ. Токарна обробка є одним з розповсюджених видів обробки виробів з ПКМ й у більшості випадків застосовується для обробки перехідних поверхонь оболонок, конічних ділянок, для проточки шийок під нарізування різьби, а також для підрізання торців заготовок і необхідних канавок, наприклад, для встановлення ущільнюючих елеме-

нтів. Точіння застосовують і для обробки складного східчастого профілю оболонки. Обробку виконують на універсальних токарно-гвинторізних верстатах і на спеціальних верстатах головним чином для оболонок великого діаметра.

Вимоги до точності розмірів під час обробки оболонок невисокі й відповідають 11-му, 12-му квалітетам, параметр шорсткості поверхні $Rz \geq 20$ мкм, тому за таких вимог до точності й шорсткості поверхні найчастіше обробку виконують за один прохід з повним зняттям припуску (глибини різання до 5 мм). Чистова обробка зі зняттям малих припусків (глибини різання до 1 мм) застосовують порівняно нечасто.

Оскільки оптимальні умови обробки багато в чому залежать від типу армувального матеріалу, то далі розглянемо характерні риси токарської обробки окремих видів ПКМ, а саме: скло-, вугле- й боропластиків, фізико-механічні властивості яких наведені у табл. 5.9.

Особливості точіння виробів зі скло- і вуглепластиків. По механооброблюваності скло- і вуглепластики досить близькі, однак слід зазначити, що при рівних інших умовах кращу оброблюваність має вуглепластик, тому рекомендовані для обробки склопластику оптимальні режими за умови дотримання тієї ж стійкості інструмента можуть бути збільшені не менш ніж на 20...25 %.

Матеріал різальної частини різців. Для обробки склопластиків, що мають низьку теплопровідність, необхідно мати інструментальний матеріал з високою теплопровідністю. Це вкрай важливо через те, що склопластики, які є термореактивними матеріалами, допускають у зоні різання температури, що не перевищують 200...300 °С; вище цих температур відбувається їхнє розм'якшення й вигорання, а також інтенсивна термодеструкція зв'язки.

Найбільш оптимальним інструментальним матеріалом під час обробки ПКМ з армувальним компонентом з абразивного матеріалу, наприклад, скла, є вольфрамокобальтовий твердий сплав. Теплопровідність твердих сплавів в 3-4 рази вище, ніж у швидкорізальних, легованих сталей, в 1,6...2,6 рази вище, ніж у титанових твердих сплавів. Це означає, що їхня стійкість при однаковій твердості відрізняється до 6 разів.

Важливою властивістю інструментального матеріалу під час обробки ПКМ є його зносостійкість, під час обробки ПКМ велике значення для збільшення стійкості різця має його заточення з мінімальним радіусом округлення різальної кромки. При призначенні марки твердого сплаву слід мати на увазі, що з підвищенням вмісту кобальту в сплаві збільшується його міцність, але знижується зносостійкість: як найбільш стійкий матеріал рекомендований сплав ВК25, за ним ВК8, також перевагу слід віддавати дрібнозернистому твердому сплаву типу ВК6-М. Деяке уявлення про відносну стійкість різних марок твердих сплавів дають наведені у табл. 5.10 коефіцієнти стійкості k_c різних марок твердих сплавів під час обробки склопластику.

Таблиця 5.9 – Деякі фізико-механічні властивості скло-, вугле- й боропластиків

Показник	Значення
Склопластики	
Границя міцності, МПа:	
на розтягання:	
у тангенціальному напрямку	930
у осьовому напрямку	570
на вигин:	
у тангенціальному напрямку	490
у осьовому напрямку	290
на сколювання:	
у тангенціальному напрямку	63,0
у осьовому напрямку	43,2
на зрізування	125
на зминання	263
Модуль пружності на розтягання, МПа	263
Густина, кг/м ³	$1,95 \cdot 10^3$
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,394
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	$1,006 \cdot 10^3$
Коефіцієнт Пуассона	0,28...0,32
Органопластики	
Границя міцності, МПа:	
на розтягання	1480...1760
на стиснення	295
на вигин	590...650
на міжшаровий зсув	24,5...32,4
Модуль пружності на розтягання, МПа	78500
Густина, кг/м ³	$1,4 \cdot 10^3$
Коефіцієнт Пуассона	0,34
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,14...0,174
Масовий вміст зв'язки, %	40...44
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	$(1,47...1,89) \cdot 10^3$
Боропластики	
Границя міцності, МПа:	
на розтягання	1030
на стиснення	765
на вигин	1050
на зсув	44,2
Модуль пружності, МПа	
на розтягання	$2,3 \cdot 10^6$
на зсув	5900
Відносне подовження при розриві, %	0,68
Ударна в'язкість, Дж/ м ²	$4,1 \cdot 10^6$
Густина, кг/м ³	2,1
Коефіцієнт Пуассона	0,22
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,49
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	$4,05 \cdot 10^3$
Вуглепластики	
Границя міцності, МПа:	
на розтягання	1030
на вигин	1080
на стиснення	392,4
на зсув	29,4
Модуль пружності, МПа	
на розтягання	$1,76 \cdot 10^6$
на вигин	$1,42 \cdot 10^6$
на зсув	3500
Густина, кг/м ³	1,4
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,58
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	$1,3 \cdot 10^3$
Ступінь наповнення, %	57...63

Таблиця 5.10 – Коефіцієнти стійкості k_c різних марок твердих сплавів для лезової обробки склопластика

Марка сплава	k_c
BK8	1,0
BK25	2,2
BK3-M	1,7
BK3	1,7
BK4	1,4
BK6-M	1,4

Ефективним під час чистової обробки склопластиків є застосування алмазних різців. Внаслідок високої твердості алмазу, залежно від характеру навантаження при терті його зносостійкість в десятки, а то й у сотні разів перевищує зносостійкість інших твердих матеріалів. Однак поряд з високою твердістю й зносостійкістю алмаз має підвищену крихкість. Тому при обробці переривчастих поверхонь застосування

різців, оснащених традиційними АТП (алмазно-твердосплавними пластинами) або новітніми АКП (алмазно-керамічними пластинами), які мають термостійкість до 1200 °С, певним чином обмежено. (АКП являють собою підкладку із КНБ із нанесеним на неї термостійким алмазним шаром товщиною 0,5-1,2 мм, отриманим методом реакційного спікання мікропорошків алмазу зернистістю від 1 до 50 мкм.)

Геометричні параметри різців. Вибір геометричних параметрів різців багато в чому визначає особливості різання ПКМ. Під час обробки ПКМ різець має бути гостро заточеним й у той же час мати гарну тепловіддачу. Для зменшення тертя стружки поверхню різця слід ретельно обробити, що досягається доведенням алмазними кругами.

Найбільший вплив на стійкість різця має головний задній кут α (табл. 5.11). Це пояснюється тим, що ПКМ мають високі пружні властивості й при різанні мають місце більші фактичні площі контакту по задній поверхні через значне пружне відновлення оброблюваного матеріалу. Тому при точінні скло- і вуглепластиків значення кута α набагато більше, ніж при точінні металів.

Особливості точіння виробів з органопластиків. Органопластики – це композиційні матеріали, що представляють собою полімер, наповнений полімером. Механічна обробка, зокрема точіння, органопластиків утруднене, оскільки густина органічних волокон у два-три рази нижче густини мінеральних, питомі значення їхньої міцності й твердості порівняно високі, а невеликий модуль пружності при розтяганні й високе відносне подовження при розриві (до 20 %) органічного волокна призводять до появи на обробленій поверхні задирів і розкуйовджень, причому ворсинки можуть досягати довжини до 5 мм. Особливо часто це зустрічається під час обробки оболонок з перехресним розташуванням армувальних волокон. Через велике відносне подовження органічного волокна необхідно, щоб при різанні різець був, по-перше, гостро заточеним, а по-друге, щоб розтягувальні навантаження були зведені до мінімуму й по можливості замінені стискаючими.

Таблиця 5.11 – Геометричні параметри різальної частини різців для токарної обробки скло- і вуглепластиків

Оброблюваний матеріал	Матеріал ріжучої пластини	Геометричні параметри						
		α	γ	φ	φ_1	λ	r	l_f
		градуси					мм	
Скло-пластик	ВК2, ВК3-М, ВК4, ВК6-М, ВК8	20	10	45	15...45	0	1	—
	АСПК, АСБ	0...2	20	45	20	0	—	0,2...0,6
Вуглепластик	ВК2, ВК3-М, ВК4, ВК6-М, ВК8	25...30	15	45	15...45	0	1	—
	АСПК	0...2	20	45	20	0	—	0,2...0,6

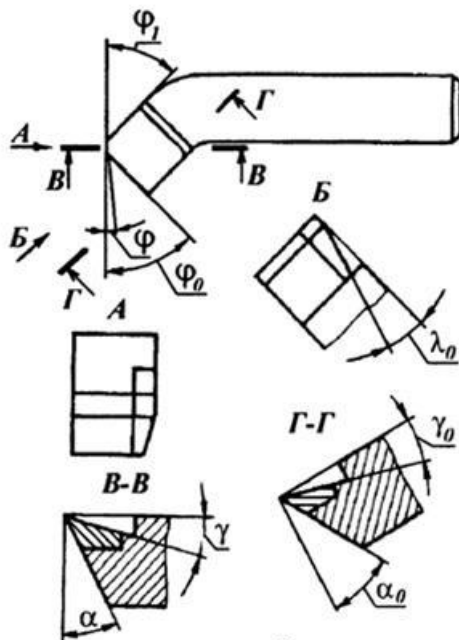


Рисунок 5.34 – Геометрія різальної частини різців для обробки органопластиків з перехресними розташуванням волокон

районі зачисної різальної кромки. Збільшені передній і задній кути дозволяють зменшити сили тертя, що діють на передній і задній поверхнях різця, які через велику пружність органопластика можуть досягати значних величин. Крім того, це дозволяє одержати різець гостро заточеним і мати при різанні в основному зусилля стиснення.

Особливості лезвійної обробки виробів з боропластику. Механічна обробка боропластику являє собою досить серйозну проблему. За своїми фізико-

Геометричні параметри різців. Різець для обробки органопластиків з перехресним розташуванням волокон має складну форму головної різальної кромки, змінний головний кут у плані, кут нахилу головної різальної кромки, а також збільшені передній й головний задній кути (рис. 5.34). Оптимальні геометричні параметри різців наведені в табл. 5.12.

За рахунок змінного головного кута в плані утворюється зачисна різальна кромка з кутом у плані, близьким до нуля, тобто має місце повторне різання, що призводить в остаточному підсумку до підвищення якості обробленої поверхні.

Великий позитивний кут нахилу головної різальної кромки λ_0 дозволяє одержати при заточенні необхідний передній кут у

механічними характеристиками боропластик займає особливе місце в ряду ПКМ, у першу чергу, через досить високу твердість армувальних волокон. Мікротвердість волокон бора (40...43 ГПа) настільки висока, що не витримується відоме співвідношення мікротвердостей інструментального й оброблюваного матеріалів, необхідне для ефективного здійснення процесу різання. Слід підкреслити, що перевагу у цьому випадку має застосування різців, оснащених алмазно-керамічними пластинами (АКП).

Таблиця 5.12 – Геометричні параметри різальної частини різців для токарної обробки боропластиків

Розташування волокон оброблюваного матеріалу	Матеріал ріжучої пластини	Геометричні параметри									
		ϕ	α	γ	ϕ_1	λ	ϕ_0	α_0	γ_0	λ_0	r
		градуси									мм
Однонаправлене	P12, P6M5, T15K6, BK8,	1...3	20	10	45	0	45	—	—	—	2
Перехресне	BK4, BK3, BK3-M	1...2	32	15	45	0	45	32	17	15	—

Вибір режимів різання при точінні пластмас. Як видно з даних, наведених у табл. 5.13, подачу при точінні пластмас різцями з НТМ слід вибирати залежно від необхідної шорсткості поверхні в діапазоні від 0,1 до 0,4 мм/об. Розрахункові значення оптимальної швидкості різання при точінні склопластику різцями з твердого сплаву BK8 залежно від прийнятої глибини різання й поздовжньої подачі показані в табл. 5.14. У діапазоні подач від 0,1 до 0,4 мм/об швидкість різання слід зменшувати з 1,03 до 0,28 м/с при зміні глибини різання від 0,5 мм до 4,0 мм. Для інших марок твердих сплавів слід застосовувати поправочні коефіцієнти, значення яких змінюються від 0,58 до 1,76 (табл. 5.15). Оптимальна швидкість різання змінюється залежно від прийнятого періоду стійкості різця, що також враховується поправочними коефіцієнтами, значення яких зі збільшенням періоду стійкості з 15 до 90 хв змінюються від 1,97 до 0,86. У випадку застосування охолодження швидкість різання може бути збільшена на 17%, тобто помножена на коефіцієнт $K_{cv} = 1,17$.

При точінні вуглепластика режими різання можуть бути збільшені на 25%, тобто швидкість різання слід множити на коефіцієнт $K_{Mv} = 1,25$ (табл. 5.16).

При точінні скло- й вуглепластику різцями з НТМ швидкість різання може бути обрана за допомогою табл. 5.17. Значення швидкості різання зменшуються з 6,38 до 5,03 м/с зі збільшенням подачі з 0,1 до 0,4 мм/об й зміні глиби-

ни різання від 0,5 мм до 1,0 мм. Поправочні коефіцієнти залежно від періоду стійкості наведені в табл. 5.18.

Таблиця 5.13 – Подачі для обробки скло-, вуглепластиків в залежності від шорсткості поверхні

Інструментальний матеріал	R_z , мкм	S_o , мм/об
АСБ	10	До 0,10
	10...20	0,10...0,20
	20...25	0,20...0,30
	25...30	0,30...0,40
АСПК	5	До 0,10
	5...15	0,10...0,20
	15...20	0,20...0,30
	20...25	0,30...0,40

Таблиця 5.14 – Швидкості різання (м/с) для обробки склопластику

Глибина різання, мм	Швидкість різання, м/с, за подачі S_o , мм/об				Глибина різання, мм	Швидкість різання, м/с, за подачі S_o , мм/об			
	0,1	0,2	0,3	0,4		0,1	0,2	0,3	0,4
До 0,5	1,03	0,80	0,68	0,62	Св. 2,0 до 2,5	0,57	0,43	0,37	0,33
Св. 0,5 » 1,0	0,80	0,62	0,53	0,48	» 2,5 » 3,0	0,52	0,40	0,35	0,32
» 1,0 » 1,5	0,68	0,53	0,45	0,42	» 3,0 » 4,0	0,47	0,37	0,32	0,28
» 1,5 » 2,0	0,62	0,47	0,40	0,37					

Таблиця 5.15 – Поправочні коефіцієнти для точіння різцями інших марок твердих сплавів ніж ВК8

Марка інструментального матеріалу	T15K6	ВК8	ВК4	ВК3	ВК3-М
K_{nv}	0,58	1,0	1,16	1,52	1,76

Таблиця 5.16 – Поправочні коефіцієнти на оптимальну швидкість точіння з залежності від прийнятого періоду стійкості різця

T , хв	15	30	60	90
K_{Tv}	1,97	1,40	1,0	0,82

Таким чином вибір оптимальних режимів різання при точінні скло- й вуглепластиків зводиться до наступного.

1. Глибину різання вибирають виходячи з наявного припуску на обробку й необхідності зняття його за один хід або за кілька ходів.
2. Подачу знаходять по таблиці залежно від необхідної шорсткості поверхні.
3. Швидкість різання для заданого періоду стійкості різців вибирають із таблиць по обраним раніше значенням глибини різання й подачі.
4. Відмінні від табличних значень умови обробки враховують шляхом введення поправочних коефіцієнтів.

Таблиця 5.17 – Швидкість різання при точінні склопластику

Глибина різання, мм	Швидкість різання, м/с, за подачі S_o , мм/об			
	0,1	0,2	0,3	0,4
До 0,5	6,38	5,87	5,58	5,40
Св. 0,5 » 1,0	5,95	5,48	5,22	5,03

Таблиця 5.18 – Поправочні коефіцієнти на швидкість різання в залежності від періоду стійкості

Інструментальний матеріал	Період стійкості T , хв			
	Поправочний коефіцієнт K_{Tv}			
АСПК	$\frac{540}{1,33}$	$\frac{720}{1,0}$	$\frac{1440}{0,50}$	$\frac{1620}{0,44}$
АСБ	$\frac{360}{1,33}$	$\frac{480}{1,0}$	$\frac{720}{0,67}$	$\frac{1440}{0,33}$

Слід зазначити, що при обробці скло- й вуглепластиків схема армування матеріалу практично не впливає на вибір оптимальних режимів різання.

При точінні виробів з органопластиків подачу вибирають у діапазоні від 0,1 до 0,5 мм/об, з огляду на те, що при цьому значення параметра шорсткості Ra збільшується з 7,6 мкм до 13,1 мкм зі збільшенням глибини різання з 1,0 мм до 5,0 мм. Поправочний коефіцієнт залежно від марки інструментального матеріалу (швидкорізальна сталь Р9...Р6М5К5) змінюється з 0,92 до 1,06. Зі збільшенням періоду стійкості з 5 до 45 хв. поправочний коефіцієнт змінюється від 1,42 до 0,70. У випадку застосування охолодження швидкість різання може бути збільшена на 38 %, тобто помножена на коефіцієнт $K_{cv} = 1,38$.

Поправочний коефіцієнт залежно від марки твердого сплаву при точінні виробів з органопластиків змінюється з 0,71 до 1,31. Зі збільшенням періоду стійкості з 30 до 180 хв. поправочний коефіцієнт змінюється від 1,24 до 0,71.

С метою підвищення стійкості при точінні боропластика розроблена конструкція спеціального інструмента, яка представлена на рис. 5.35. Інструмент оснащений різцями-вставками із КНБ. Число різців-вставок (до 40 шт.) вибирається з конструктивних міркувань. Вони ретельно виставляються з метою забезпечення максимально можливої рівномірності роботи кожного з них. Для забезпечення обертання багатолезового інструмента із частотою до 9000 об/хв використовують шліфувальну фортунку, встановлену на токарно-гвинто-різному верстаті. Режими обробки: частота обертання оболонки 160 об/хв, частота обертання інструмента $n \geq 9000$ об/хв; повздовжня подача $S_{\text{прод}} = 0,015$ мм/зуб; подача на врізання $S_{\text{круг}} = 1$ мм/зуб, глибина різання $t \leq 1,5$ мм. Такі ре-

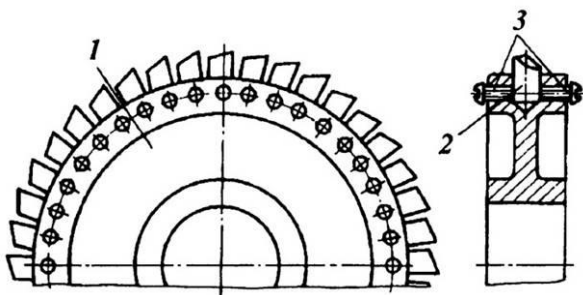


Рисунок 5.35 – Багатолезовий різальний інструмент для лезової обробки боропластику

жими різання забезпечують одержання поверхні високої якості, без відколів, виривів, розшарувань і ворсистості з параметром шорсткості поверхні $Rz \leq 40$ мкм. У порівнянні з точінням одиночним різцем з НТМ має місце істотне збільшення стійкості збірного інструмента, причому це не просте множення стійкості одного різця на їхнє число, а величина в 2...2,5 рази більша.

Свердління отворів у виробах з ПКМ. Свердління наскрізних і глухих отворів – одна з найбільш розповсюджених операцій механічної обробки ПКМ. У плитах і пластинах – це свердління різних отворів під кріпильні елементи й для інших експлуатаційних цілей; в оболонках – це головним чином свердління великої кількості наскрізних і глухих отворів для штифтово-болтового з'єднання оболонки з іншими елементами конструкції. Трудомісткість свердлильних операцій на деяких виробах досягає 70...80 % від загальної трудомісткості процесу механічної обробки.

Свердління отворів у ПКМах виконують як у напрямку армувальних волокон, так і перпендикулярно до них. Вимоги до точності отворів відносно невеликі й не перевищують, як правило, 11–12-го квалітетів; параметр шорсткості поверхні повинен відповідати $Rz \geq 20$ мкм. У більшості випадків застосовують свердління твердосплавними свердлами або свердлами із швидкорізальних сталей. Однак для свердління боропластиків є необхідним застосування інструментів з надтвердих матеріалів.

Геометричні параметри свердел. При свердлінні наскрізних отворів у ПКМах істотне значення має несиметричність заточення δ , обумовлена різницею довжин головних різальних кромки. Несиметричність заточення призво-

дить до розбивки отвору. Оптимальне значення $\delta = 0,1 \dots 0,2$ мм. Форми заточення різальної частини свердел зі швидкорізальних сталей, що рекомендуються, наведені у табл. 5.19, твердосплавних свердел – у табл. 5.20.

Якість поверхні. При свердлінні ПКМ її визначають не тільки шорсткістю обробленої поверхні, але й станом отворів на вході й виході свердла. При неправильно обраних геометричних параметрах свердел і роботі з підвищеним зносом свердла по задній поверхні ($h_3 > 0,3$ мм) на вході свердла, особливо при свердлінні в напрямку, перпендикулярному армувальним волокнам, може з'явитися розкуйовдження матеріалу. На виході свердла з'являються розшарування (при свердлінні перпендикулярно шарам матеріалу) або відколи.

Вибір режимів різання при свердлінні пластмас

Режими різання при свердленні отворів вибирають залежно від необхідної продуктивності процесу і якості поверхні отворів.

Досить важливе значення для правильного вибору режимів різання має стійкість свердлів. На стійкість впливає ряд факторів, основними з яких є матеріал ріжучої частини свердла, швидкість різання, подача, діаметр свердла, а також глибина свердління, наявність або відсутність СОТС і т.д.

Слід зазначити досить малу стійкість свердел (не більше 2 хв.) при свердлінні боропластику. Свердло з ВК8 настільки інтенсивно зношується, що після 1...1,5 хв. воно стає непридатним до експлуатації. Тому свердління боропластиків або гібридних матеріалів, що мають у своєму складі волокна бору, твердосплавними свердлами припустимо лише в одиничних випадках. Використання твердосплавних свердел для свердління боропластиків в умовах серійного виробництва є неможливим через занадто велику витрату інструмента й малу продуктивність. У цьому випадку необхідно користуватися алмазним інструментом.

Режими різання призначаються в наступній послідовності:

- 1) вибирають марку інструментального матеріалу;
- 2) вибирають геометричні параметри свердла й призначають критерій затуплення;
- 3) вибирають подачу, виходячи із заданої шорсткості поверхні;
- 4) по подачі й діаметру свердла вибирають швидкість різання.

Більш докладні таблиці, а також відомості про вибір норм витрати інструмента наведені в нормативних документах.

При свердленні отворів у скло- й вуглепластику, боропластику швидкість різання може бути обрана за допомогою табл. 5.21.

Поправочний коефіцієнт залежно від марки твердого сплаву змінюється з 1,0 до 2,0. Зі збільшенням періоду стійкості з 30 до 120 хв. поправочний коефіцієнт змінюється від 2,46 до 0,41.

Поправочний коефіцієнт залежно від марки швидкорізальної сталі змінюється з 1,0 до 1,4. Зі збільшенням періоду стійкості з 2 до 15 хв. поправочний коефіцієнт змінюється від 1,73 до 0,52.

Таблиця 5.19 – Рекомендовані форми заточки різальної частини і конструкція свердла зі швидкорізальних сталей

Форма різальної частини	Ескіз заточування різальної частини	Рекомендації до застосування
Спиральна з нормальним заточенням		Скло- та вуглепластики
Спиральна з подвійним заточенням		
Спиральна з підрізанням перемички		Скло- та вуглепластик, глухі отвори

Фрезерування виробів з ПКМ. Фрезерування застосовують для прорізання пазів, вирізання вікон, лючків, для одержання різного роду канавок й уступів, причому під час обробки матеріалів типу скло-, органо-, боро- і вуглепластики використовується фрезерування кінцевими, дисковими й шпонковими фрезами й значно рідше – торцевими й циліндричними.

Під час обробки скло-, вугле-, органо- і боропластиків, фрезерування не є визначальною операцією й зустрічається значно рідше, ніж точіння, свердління або розрізання. Фрезерування є необхідним лише у тому випадку, коли потрібно обробити пази, вікна, лючки й т.п. Тому найчастіше при фрезеруванні пластмас застосовують кінцеві, дискові й торцеві фрези й рідше циліндричні.

Через специфічні особливості пластмас як конструкційних матеріалів їх фрезерування має ряд характерних особливостей, що відрізняють цей процес від аналогічного фрезерування металів. Тому має місце деяке конструктивне розходження фрез для фрезерування пластмас, що визначається головним чином вимогами до якості фрезерування пластмас.

Таблиця 5.20 – Рекомендовані форми заточки різальної частини і конструкція свердла з твердих сплавів

Форма різальної частини	Ескіз заточування різальної частини	Рекомендації до застосування
Спіральна з нормальним заточенням		Скло-, вугле- та боро- пластики
Спіральна з подвійним заточенням		
Спіральна з підрізанням перемички		Скло-, вугле- та боро- пластик, глухі отвори

Основні вимоги до фрезерування ПКМ є наступними:

- ✓ діаметр фрез може бути суттєво збільшений, тому що сили різання при фрезеруванні пластмас значно менші, ніж під час обробки металів;
- ✓ є можливим застосування великих хвилинних подач и подач на зуб, тому число зубів у фрези має бути мінімальним, що забезпечує великі значення подачі на зуб фрези;

✓ об'єм простору для розміщення стружки має бути збільшений у порівнянні з фрезами для обробки металів, що пояснюється особливостями стружкоутворення;

✓ конструкція фрез має допускати можливість нескладного заточення й частих переточувань збільшених головних задніх кутів, кутів нахилу різальних кромок, передніх кутів й допоміжних кутів у плані;

✓ напрямок обертання фрези має співпадати з напрямком подачі, особливо під час обробки шаруватих матеріалів, щоб не було їхнього сколювання, розшарування, розкуйовдження.

Таблиця 5.21 – Швидкість різання (м/с) при свердлінні скло-, вугле- і боропластиків

Подача, мм/об	Діаметр свердла, мм							
	4	6	8	10	12	14	16	20
Скло- й вуглепластик, твердосплавні свердла								
0,10	—	—	0,87	0,89	0,90	0,91	0,92	0,94
0,20	0,43	0,45	0,46	0,47	0,47	0,48	0,49	0,49
0,30	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,33	0,33	0,34
0,40	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27
Скло- й вуглепластик, швидкорізальні свердла								
0,10	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23
0,20	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19
0,30	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17
0,40	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16
Боропластик, твердосплавні свердла								
0,05	0,09	0,12	0,14	0,17	0,20	0,23	0,25	0,30 '
0,10	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,23
0,20	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13	0,15	0,18
0,30	0,04	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,13	0,15

З розглянутих пластмас є можливим фрезерування твердосплавними фрезами головним чином скло- і вуглепластиків і якоюсь мірою органопластиків. Фрезерування боропластиків твердосплавними фрезами практично не є можливим через їх катастрофічно швидке зношування. Так, при фрезеруванні пазів у боропластику шпонковими твердосплавними фрезами стійкість їх не перевищувала однієї хвилини, причому фреза зношувалася настільки, що її відновлення було практично неможливим. Тому рекомендації, що наводяться далі, відносяться, головним чином, до фрезерування скло- і вуглепластиків.

Як ми вже відзначали, найбільш доцільним для фрезерування пластмас є застосування фрез із вольфрамокобальтових твердих сплавів, причому сплави з меншим вмістом кобальту є найбільш стійкими. В результаті випробувань на стійкість твердосплавних фрез при фрезеруванні різних видів пластмас встановлені поправочні коефіцієнти для швидкості різання, значення яких збільшуються від 0,6 до 1,25 зі зменшенням вмісту кобальту.

Великий вплив на стійкість мають правильно обрані параметри ріжучої частини інструмента. Як видно з табл. 5.22, в якій наведені оптимальні геометричні параметри для різних типів фрез при обробці скло- і вуглепластиків, при фрезеруванні пластмас зміна головного заднього, переднього й іншого кутів зуба фрези в такий же спосіб, як і при точінні, впливає на стійкість, процес стружкоутворення й т.д. Ці геометричні параметри відносяться до стандартних фрез, що мають специфічне для обробки пластмас заточення. В той же час слід зазначити, що під час обробки ПКМ ефективним є застосування фрез із малим числом зубів. На рис. 5.36 наведені дискова, торцева і кінцева фрези.

Таблиця 5.22 – Геометричні параметри ріжучої частини фрез для обробки пластмас

Тип фрези	$\gamma, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\alpha_1, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$\varphi_1, ^\circ$	$\omega, ^\circ$
Дискова	5...8	18...20	8	90	3	15
Торцева	5...8	18...20	16...18	45	10...15	10
Кінцева	10...15	20	16...18	90	10...15	40

Крім таких фрез під час обробки ПКМ ефективним є застосування спеціальних збірних фрез (рис. 5.37). Універсальна фреза із двома регульованими ножами призначена для циліндричного (*I*), фасонного (*II*), дискового (*III*) і кутового (*IV*) фрезерування. Фреза складається зі сталевго корпуса 1, у якому розташовані два паралельних прямокутних пази, обмежених косинцем 3. У цих пазах знаходяться ножі 2. Діаметр фрезерування регулюють гвинтом 5. Для запобігання вигвинчування регульовального гвинта під час роботи служить стопорний гвинт 6. Гвинт 4 притискає ножі до регульовального гвинта. Напівкришки 7, скріплені болтами 8, притискають ножі до дна паза корпуса фрези.

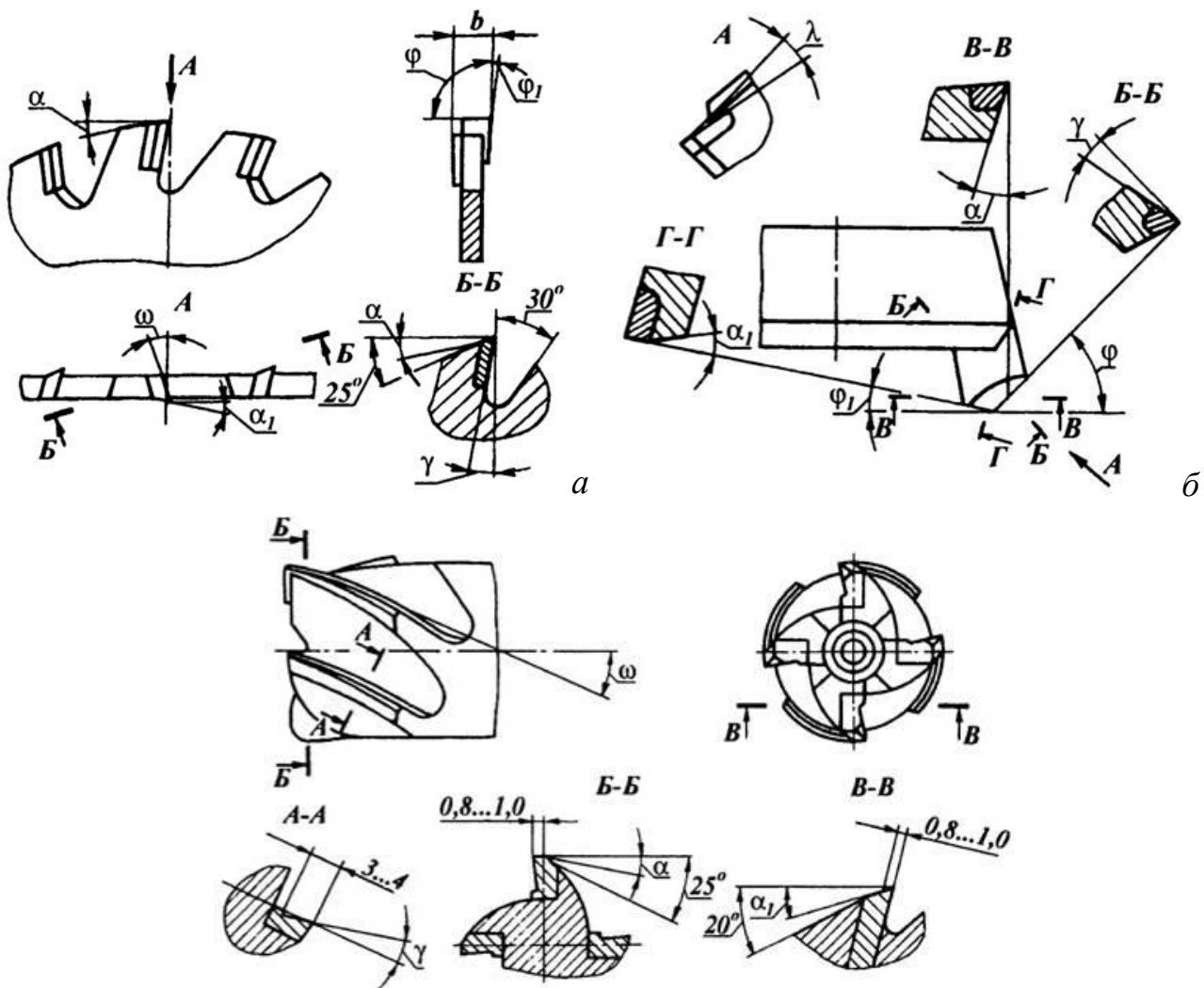


Рисунок 5.36 – Дискова (а), торцева (б) й кінцева (в) фрези для обробки пластмас

Універсальна фреза допускає мінімальну ширину фрезерування 4...5 мм при розрізанні й максимальну ширину 60...70 мм при циліндричному фрезеруванні. Через те, що ножі на фрезі розташовані не радіально, а паралельно зміщені щодо центра, їхні ріжучі кромки зміщені на деяку величину l від вертикальної осі симетрії фрези. Це приводить до того, що у процесі різання значення кутів α й γ відрізняються від відповідних кутів заточення на величину, яка визначається залежністю $\sin \epsilon = 2l/D$, де l – відстань від осі симетрії фрези до ріжучої кромки; D – діаметр фрези. Тоді установний передній кут ножа при його заточенні з урахуванням додаткового кута дорівнює $\gamma_y = \gamma + \epsilon$, а установний головний задній кут α при заточуванні дорівнює $\alpha_y = \alpha + \epsilon$, де α й γ – дійсні значення кутів в процесі різання.

Перевагами конструкції збірної фрези є:

- 1) універсальність, що дозволяє шляхом простої заміни ножів різної конфігурації здійснювати різні види фрезерування;
- 2) можливість роздільного заточення ножів поза корпусом фрези, що істотно спрощує заточення й дозволяє заточувати будь-які необхідні кути;

- 3) можливість заміни ножів й їхнього регулювання безпосередньо на верстаті;
- 4) великий об'єм простору для розміщення стружки через мале число зубів фрези;
- 5) висока жорсткість й простота експлуатації.

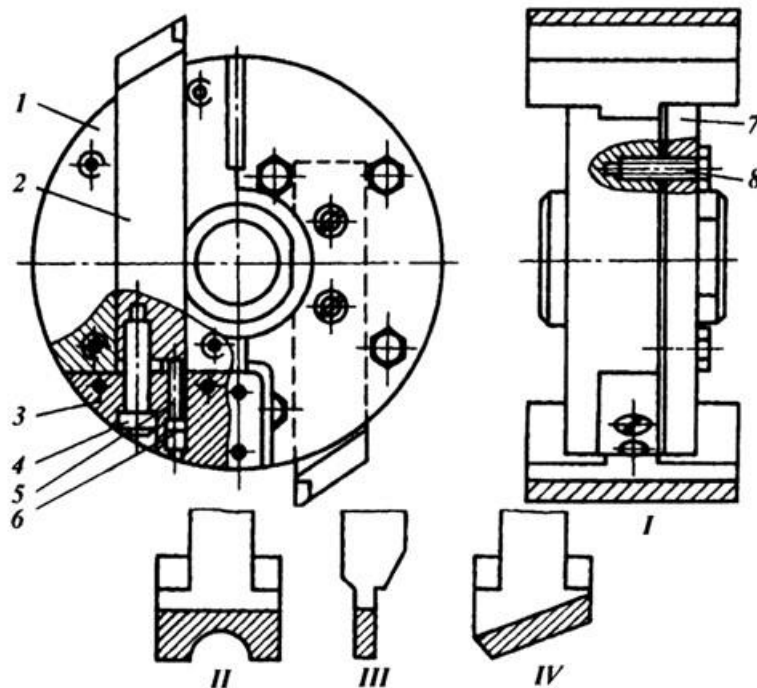


Рисунок 5.37 – Універсальна фреза: / – циліндрична; // – фасонна;
/// – дискова; IV – кутова

Недоліком є неможливість виготовлення збірних фрез малого діаметра – менших за 100...150 мм, особливо з порівняно великим числом зубів і деяке обмеження глибини різання до 50...60 мм при відрізання й фрезеруванні пазів.

При фрезеруванні так само, як і при будь-яких інших видах обробки пластмас, різальний інструмент інтенсивно зношується, причому зношування відбувається головним чином по задній поверхні, а також шляхом округлення ріжучої кромки. При більших величинах зносу зубів фрез по задній поверхні утворюється розшарування оброблюваного матеріалу, відколи, з'являються припали; тому критерієм зношування у даному випадку є технологічний, обумовлений у першу чергу якістю обробленої поверхні. За критерій зношування фрез приймають їхнє зношування по задній поверхні зуба h_z . Для чистових операцій для будь-яких типів твердосплавних фрез $h_z=0,2...0,3$ мм, для чорнових операцій $h_z=0,5...0,6$ мм.

Вибір режимів різання при фрезеруванні пластмас. При фрезеруванні пластмас подача на зуб залежно від необхідної шорсткості поверхні може бути обрана за допомогою табл. 5.23.

Таблиця 5.23 – Вибір подачі на зуб фрези при фрезеруванні пластмас

Параметр шорсткості поверхні, мкм	Вид фрезерування	
	дискове	торцеве
	Подача S_z , мм/зуб	
1,25...2,5	До 0,03	До 0,03
2,5...5	0,03...0,01	0,03...0,06
5,0...10	0,1...0,25	0,06...0,15
10...16	0,25...0,35	0,15...0,25
16...20	0,35...0,55	0,25...0,50

Швидкість різання, узяту з табл. 5.24, слід відкоригувати відповідно до умов обробки, тобто залежно від матеріалу ріжучої частини фрези й заданої стійкості. Поправочні коефіцієнти на швидкість різання залежно від заданої стійкості фрез наведені в табл. 5.25.

Таблиця 5.24 – Швидкість різання (м/с) при фрезеруванні пластмас фрезами з ВК4

Діа-метр фрези, D , мм	Число зубів фрези, z	Глибина різання, t , мм	Подача S_z , мм/зуб							
			0,03	0,04	0,06	0,10	0,15	0,25	0,40	0,60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Фрези дискові										
200	36	До 5	5,48	5,28	5,02	4,70	4,45	4,17	3,92	3,72
		5...10	4,82	4,65	4,40	4,12	3,90	3,65	3,43	3,27
		10...15	4,47	4,30	4,07	3,82	3,62	3,38	3,18	3,03
		15...20	4,22	4,07	3,85	3,60	3,42	3,20	3,02	2,85
		20...30	3,92	3,77	3,57	3,33	3,18	2,97	2,80	2,65
		30...40	3,70	3,57	3,38	3,17	3,00	2,82	2,65	2,50
Фрези торцеві										
200	12	До 2	9,02	8,68	8,23	7,72	7,32	6,85	6,43	6,12
		2...4	6,75	6,50	6,17	5,77	5,48	5,12	4,82	4,57
		4...6	5,68	5,48	5,18	4,87	4,60	4,30	4,07	3,85
		6...8	5,03	4,85	4,60	4,32	4,08	3,82	3,60	3,42
		8...10	4,58	4,42	4,20	3,93	3,73	3,48	3,28	3,12

Слід зазначити, що фрезерування пластмас твердосплавними фрезами не завжди приводить до бажаного результату в першу чергу через якість обробленої поверхні. Крім того, при обробці таких високоабразивних пластмас, як боропластики, застосування твердого сплаву взагалі не виправдано внаслідок ни-

зької стійкості інструмента. Тому при фрезеруванні таких пластмас доцільним є застосовувати фрези, оснащені вставками з надтвердих матеріалів.

Таблиця 5.25 – Поправочні коефіцієнти на швидкість різання залежно від заданої стійкості фрез

Вид фрезерования	Период стойкости T , мин			
	240	300	360	420
	Поправочный коэффициент			
Дисковое	1,0	0,89	0,82	0,75
Торцовое			0,81	

Інші види механічної обробки ПКМ.

Розрізування є також досить розповсюдженим видом механічної обробки ПКМ. При розрізуванні основною є вимога до якості різу (шорсткість поверхні $Rz < 20$ мкм) і його мінімальна ширина.

Шліфування ПКМ застосовують як оздоблювальну операцію, головною метою якої є забезпечення якості поверхні – забезпечення параметра шорсткості поверхні в межах $Rz < 2,5$ мкм. Основні види шліфування – зовнішнє кругле й плоске шліфування периферією круга.

У виробках із ПКМ *нарізають кріпильні різьби* – метричні й спеціального профілю. Нарізування метричної різьби, особливо внутрішньої, роблять мітчиками. Різьбу спеціального профілю, як правило, прямокутного, нарізають абразивними або алмазними кругами й дуже рідко різцем. Основна вимога до різьби – це її якість, тобто відсутність розшарування матеріалу, розкуйовдження (російською – разлохмачивания) армувальних волокон.

Питання для самоконтролю:

1. Технології ремонту деталей з використанням МПКМ «холодної полімеризації».

Приклади застосування.

2. В чому полягають особливості (12) процесу різання ПКМ?
3. Особливості механіки руйнування МПКМ в процесі різання.
4. Порівняти оброблюваність вугле- і склопластиків при точінні. В чому різниця?
5. Особливості лезвийного оброблення органопластиків і боропластиків.
6. Особливості свердління отворів у деталях з ПКМ.
7. Особливості фрезерування виробів з ПКМ.

5.7. Технології алмазної обробки ПКМ і МПКМ

Найпоширенішими видами алмазної обробки ПКМ і МПКМ є розрізування, шліфування (зачищення), свердління й зенкування конічних і циліндричних отворів.

Проблеми, що виникають при алмазній обробці ПКМ і МПКМ.

Механічна обробка ПКМ на виробництві викликає серйозні труднощі: різальні інструменти зношуються більш інтенсивно, ніж під час обробки багатьох металів, у зоні різання виникає висока температура, на виробках формується дефектний поверхневий шар, виділяються газоподібні токсичні речовини – продукти деструкції полімерної матриці, утворюється дрібнодисперсний пил. Ці й інші особливості механічної обробки необхідно враховувати не тільки при проектуванні виробів із ПКМ і МПКМ, але й при розробці технологічних процесів механічної обробки, виборі ефективного різального інструмента й призначенні оптимальних режимів різання. Тому необхідно вишукувати нові, більше ефективні інструментальні матеріали, що зменшують теплонапруженість процесу різання, зношування й витрату різального інструмента й сприяють поліпшенню якості обробленої поверхні.

Одним з перспективних напрямків підвищення ефективності процесів алмазної обробки є розробка високопродуктивної технології й створення надійних, довговічних і зносостійких інструментів на базі таких унікальних за своїми фізико-механічними і теплофізичними властивостями інструментальних матеріалів, як синтетичні алмази. Найважливішою передумовою використання алмазного інструмента для технологій механічної обробки ПКМ і МПКМ є висока теплопровідність алмазів, що у дев'ять разів вище, ніж у карбіду кремнію, і в сім разів, ніж в електрокорунду. Крім того, порівняння фізико-механічних властивостей карбіду кремнію й електрокорунду, які широко використовуються в абразивних інструментах, із синтетичними алмазами показує, що останні мають максимальні мікротвердість і модуль пружності, а отже, мають значну зносостійкість і абразивну здатність.

Основний принцип вибору типу алмазного інструмента для обробки ПКМ і МПКМ – забезпечити ефективніший відвід тепла від зони різання через алмазовмісний шар в глибину шліфувального інструмента. Для цього використовують розміщення зерен синтетичних алмазів на поверхні корпусу інструмента в один шар із закріпленням методом гальваностегії. Ефективному відводу тепла сприяє також висока теплопровідність алмазу. А високі мікротвердість і модуль пружності алмазу забезпечують різальні властивості й зносостійкість такого інструмента при алмазній обробці ПКМ і МПКМ (рис. 5.38).

Особливості механізму стружкоутворення під час обробки ПКМ і МПКМ одношаровим алмазним інструментом. Під впливом алмазного зерна (рис. 5.39), безпосередньо перед його різальними кромками утворюється система тріщин, що розподіляються в напрямку руху різання. Рух зерна супроводжується також розвитком випереджувальної тріщини, що формується вище або нижче поверхні різання. На цьому етапі стружкоутворення відбувається безперервне підвищення сили й температури в зоні різання.

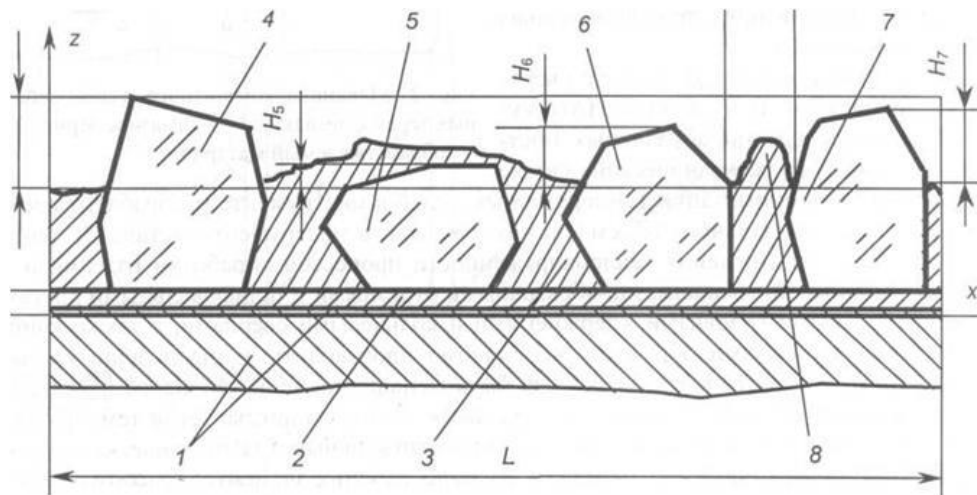


Рисунок 5.38 – Схема одношарового робочого шару алмазного інструмента:
1 – корпус інструмента з підшаром міді; 2 – підшар електроосадженого нікелю;
3 – шар електроосадженого нікелю; 4, 5, 6 й 7 – алмазні зерна; 8 – дендрити
нікелю, обумовлені режимом гальваностегії

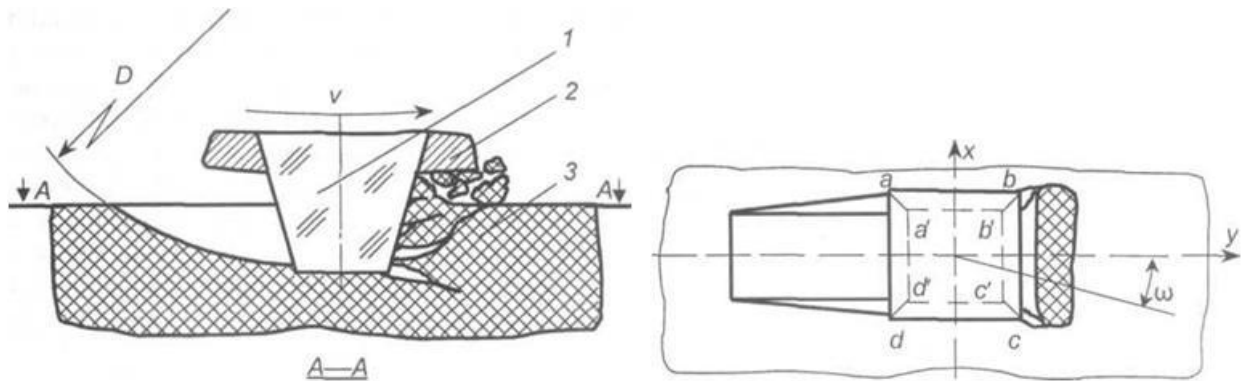


Рисунок 5.39 – Механіка контактної взаємодії алмазних зерен з деталлю:
1 – алмазне зерно; 2 – зв'язка; 3 – оброблюваний матеріал

Етап триває доти, доки напруження вигину не зросте до критичного значення, і не викличе відділення елемента стружки від поверхні й швидке падіння сили різання. На другому етапі, що характеризується відділенням дрібних елементів по тій же схемі, відбувається зачищення поверхні різання. На деяких ділянках поверхні різання цей етап відсутній внаслідок розвитку основної тріщини нижче поверхні різання. Таким чином, процес стружкоутворення ПКМ визначається явищами крихкого відриву, обумовленими періодичним процесом розвитку тріщини.

В основу процесів механічної обробки виробів із ПКМ і МПКМ одношаровими алмазними інструментами покладені принципи мінімізації температурних полів в інструменті й оброблюваній деталі й оптимальності функціонального об'єму зазору в контакті інструмент-деталь. Відповідно до цих принципів

для зниження теплонапруженості процесу його тривалість має бути обмежена терміном теплового насичення оброблюваного матеріалу і таким чином обробка має здійснюватися переривчасто, протягом певних часових інтервалів, тривалість яких має бути меншою за термін теплового насичення оброблюваного матеріалу. Виходячи з цієї умови визначені конструктивні й геометричні параметри переривчастої робочої поверхні інструментів: розміри робочих елементів, відстань між ними, кути нахилу робочих елементів до геометричної осі інструмента й ін.

Розрізування (різання) ПКМ й МПКМ. Розрізування ПКМ і МПКМ у вигляді листових і плиткових матеріалів типа вугле-, боро-, органо- и склопластиків товщиною до 20 мм, а також конструкцій з коміркових заповнювачів товщиною до 60 мм виконують одношаровими алмазними кругами діаметром від 90 до 400 мм. Товщина корпусу круга – 1,0-2,2 мм.

Алмазний відрізний круг із зовнішньою різальною кромкою (рис. 5.40) складається з корпусу у вигляді диска зі стовщеною центральною частиною або без стовщення, на зовнішній периферійній частині якого гальванічним методом закріплений алмазовмісний шар з шліфпорошків синтетичних алмазів марок АС15, АС20, АС32 зернистістю 630/500-200/160. Закріплення алмазних зерен на корпусі круга здійснюється шляхом зарощування проміжків між ними електrolітичним осадженням нікелю.

Одношарові алмазні відрізні круги виготовляються двох видів: із суцільною зовнішньою різальною кромкою (рис. 5.40, виконання I) й з переривчастою зовнішньою різальною кромкою (виконання II, III). Переривчата зовнішня робоча поверхня алмазних відрізних кругів являє собою чергування виступів b і западин a . Основні геометричні параметри одношарових кругів і їхньої робочої поверхні наведені у табл. 5.26.

Режими різання вибирають в залежності від необхідної шорсткості обробленої поверхні ПКМ при розрізанні – табл. 5.27, ресурс роботи алмазних відрізних кругів при розрізанні ПКМ наведено в табл. 5.28, а раціональні режими різання при розрізанні (різанні) вугле-, скло- й органопластиків і коміркових заповнювачів одношаровими алмазними інструментами – в табл. 5.29.

Розрізування (різання) листів і плиткових ПКМ і МПКМ виконують на модернізованих метало- і деревообробних верстатах: фрезерних і заточувальних, а також із застосуванням ручних пневматичних машин. В результаті модернізації устаткування має регульовану частоту обертання шпинделя в діапазонах, відповідно, 3000-6000 і 4000-10000 об/хв., регульовану подачу в діапазоні 0,01-0,20 м/с. (0,6-12 м/хв.), можливість переміщення стола верстата або шпиндельної бабки по висоті ручним або механічним приводом. Схеми різання представлені на рис. 5.41.

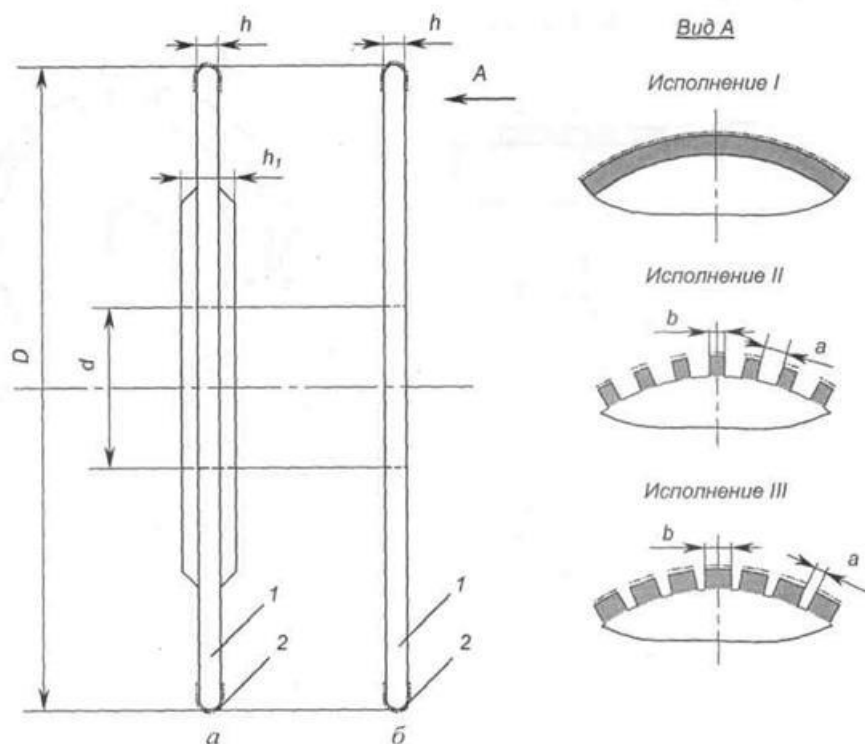


Рисунок 5.40 – Одношаровий відрізний круг із зовнішньою різальною кромкою:
1 – корпус; 2 – алмазовмісний шар

Таблиця 5.26 – Основні конструктивні і геометричні параметри одношарових алмазних кругів та їх робочої поверхні

Розмір, мм						Кількість ви- ступів n , шт.
D	d	h	h_1	a	b	
90	12	1,0	3,0	1,0	2,0	94
125	32	1,2	3,5	1,0	2,0	131
				2,0	3,0	79
160	32	1,8	3,5	1,0	2,0	167
				2,0	4,0	84
200	32	1,8	4,0	1,0	2,0	209
				3,5	7,0	60
250	32	1,8	4,0	1,5	3,0	174
				5,0	10,0	53
320	32	2,2	5,0	1,5	3,0	223

Таблиця 5.27 – Шорсткість обробленої поверхні ПКМ при розрізанні

Режим різання	Шорсткість R_z , мкм	
	20–30	30–40
v , м/с	30–40	
s , м/с	0,04–0,08	0,08–0,15
t , мм	4,0–15,0	15,0–20,0
3 , мкм	200/160–315/250	400/315–630/500

Таблиця 5.28 – Ресурс алмазних відрізних кругів при розрізанні ПКМ

Діаметр круга, мм	Ресурс, м ² , при зернистості алмазов у крузі				
	200/160	315/250	400/315	500/400	630/500
90–125	3,3–3,7	4,6–6,6	5,8–8,3	8,1–11,6	11,3–16,3
160–200	4,8–7,0	5,8–8,3	7,3–10,4	9,4–13,6	12,3–17,6

Таблиця 5.29 – Ресурс алмазних відрізних кругів при розрізанні ПКМ

Діаметр круга, мм	Ресурс, м ² , за зернистості алмазів у крузі				
	200/160	315/250	400/315	500/400	630/500
90–125	3,3–3,7	4,6–6,6	5,8–8,3	8,1–11,6	11,3–16,3
160–200	4,8–7,0	5,8–8,3	7,3–10,4	9,4–13,6	12,3–17,6

Застосування одношарових алмазних відрізних кругів у технології розрізування (різання) ПКМ і МПКМ дозволяє підвищити термін служби інструмента в порівнянні із традиційними алмазними відрізними кругами, виготовленими за порошковою технологією, не менш ніж в 5-7 разів, збільшити продуктивність обробки в 2,5-3,0 рази й поліпшити якість обробленої поверхні (звести до мінімуму дію термічної деструкції полімерної складової, виключити припали, відколи кромки, розшарування й інші дефекти на обробленій поверхні, забезпечуючи при цьому шорсткість поверхні в межах $Rz = 20-40$ мкм).

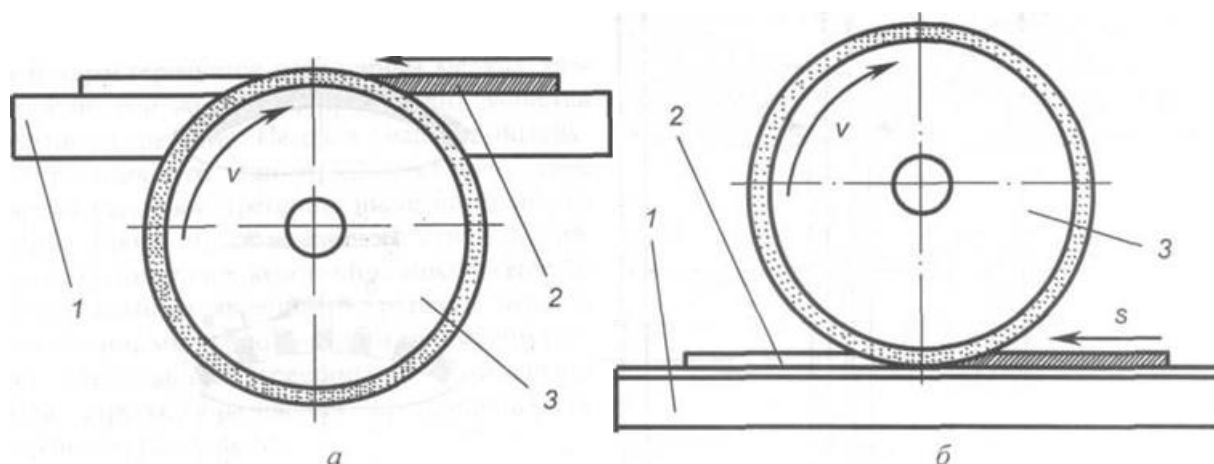


Рисунок 5.41 – Схеми різання при нижньому (а) й верхньому (б) розташуванні алмазного відрізного круга: 1 – стіл верстату; 2 – матеріал, що розрізається; 3 – алмазний відрізний круг

Під час проведення механо-складальних робіт у технології авіабудування виникає необхідність обрізки технологічного припуску, вирізки прорізів, замкнутих контурів і т.п. у деталях і виробах із ПКМ за криволінійним контуром. Для виконання цих робіт розроблені одношарові алмазні ножівкові полотна (рис. 5.42), які складаються зі сталевого корпусу у вигляді пластини довжиною 100 мм, шириною 10 й 15 мм і товщиною 1,2 мм. На одній з торцевих поверхонь А й бічних поверхнях, що примикають до неї, Б закріплений суцільний (виконання I) або переривчастий (виконання II і III) алмазовмісний шар, для виготовлення якого застосовують шліфпорошки синтетичних алмазів марок АС20 зернистістю 200/160-630/500.

Шліфування. Шліфування ПКМ без застосування охолоджувальних технологічних середовищ виконують одношаровими алмазними кругами діаметром від 60 до 80 мм й висотою 20-100 мм, а також кругами-барабанами діаметром 165-200 мм й висотою 640 мм (рис. 5.43-5.44).

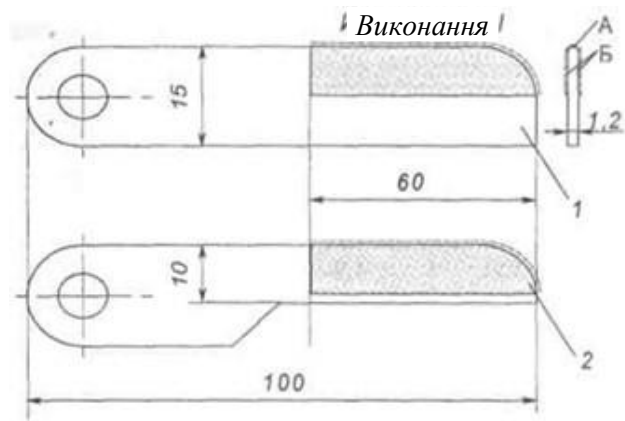


Рисунок 5.42 – Конструкції одношарових алмазних ножовочних полотен:

1 – сталевий корпус; 2 – алмазомісний шар

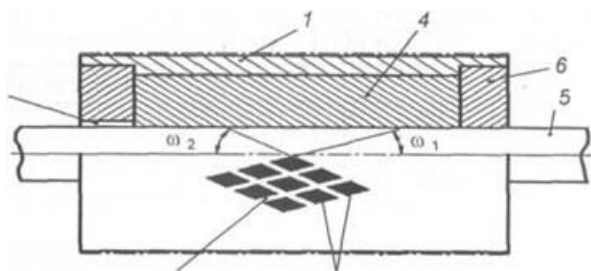
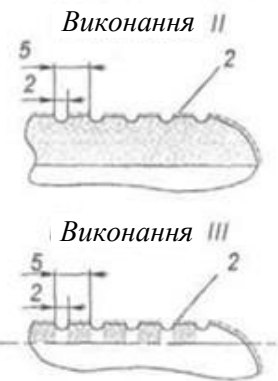
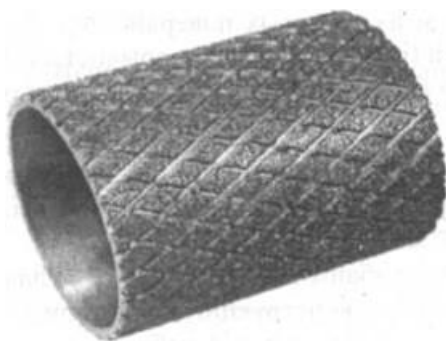
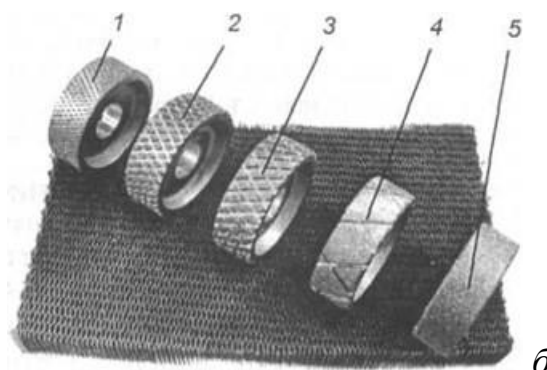


Рисунок 5.43 – Конструкція одношарового алмазного круга-барабана: 1 – корпус; 2 – робочі елементи; 3 – спіральні канавки; 4 – пенополістирол; 5 – оправка; 6 – фланець; 7 – призматична шпонка



а



б

Рисунок 5.44 – Одношаровий алмазний барабан (а) і круги з переривчастою робочою поверхнею (б)

Одношарові алмазні круги й круги-барабани для шліфування виробів з ПКМ являють собою циліндр обертання полегшеної конструкції з переривчастою робочою поверхнею, яка являє собою сукупність алмазних робочих елементів, утворених пересічними між собою гвинтовими канавками правого й лівого напрямків, виконаними під кутами ω_1 й ω_2 до геометричної осі інструмента і рівними 30-40°. На зовнішній робочій поверхні алмазних кругів і барабанів закріплений гальванічним методом алмазомісний шар зі шліфувальних порошків синтетичних алмазів марок АС15-Н, АС32-Н, АС15, АС20 и АС32 зернистістю 500/400-200/160. Шліфування виконується на модернізованих заточувальних, рейсмусових і шліфувальних верстатах, а також із застосуванням ручного пневматичного інструмента.

В табл. 5.30 наведені основні конструктивні й геометричні параметри робочої поверхні одношарових алмазних кругів-барабанів, а в табл. 5.31 – раціональні режими різання при шліфуванні вуглепластиків, склопластиків, органікопластиків і органосклопластиків, а також коміркових заповнювачів одношаровими алмазними кругами й кругами-барабанами.

Застосування одношарових алмазних кругів і кругів-барабанів дозволяє виконувати шліфування ПКМ без застосування охолоджувальних технологічних середовищ при порівняно високих швидкостях, подачах і глибинах різання, що поряд з можливістю інтенсифікації режимів різання забезпечує надзвичайно високу розмірну стійкість інструмента й точність обробки. Якщо при цьому врахувати виключення правки й скорочення часу на заміну при переналагодженні інструмента, то всі перераховані вище переваги технології алмазного шліфування створюють реальні передумови для механізації й автоматизації процесів шліфування ПКМ.

Таблиця 5.30 – Основні конструктивні й геометричні параметри робочої поверхні одношарових алмазних кругів-барабанів

Розмір, мм			n_1	n_2
D	d	L		
4,8–7,0	5,8–8,3	7,3–10,4	9,4–13,6	12,3–17,6
60	20	20	—	—
60	20	20	32	25
60	20	20	75	65
60	12	70	75	65
80	20 (32)	100	32	25
165	50	640	40	44
200	60	640	44	54

Таблиця 5.31 – Рациональні режими шліфування вуглепластиків, склопластиків, органоластиків й коміркових заповнювачів

Режим різання			Характеристика інструмента		
v , м/с	s , м/с	t , мм	Форма круга	Марка алмазів	Зернистість алмазів
Шліфування вуглепластиків, скло- й органосклопластиків					
35–40	0,10–0,15	0,10–0,20	АСК1	АС20 АС32	200/160
35-40	0,15–0,20	0,20–0,30		АС20 АС32	315/250 400/315
30–35	0,10–0,20	0,30–0,50		АС32	400/315
Шліфування коміркових заповнювачів					
35–40	0,20–0,30	0,10–0,50	АСК2 АБ	АС15	200/160 315/250
35–40	0,15–0,20	0,60–1,50		АС20	315/250 400/315
30–35	0,10–0,15	1,5–2,5		АС32	400/315

Одношарові алмазні круги-барабани, оснащені синтетичними алмазами марок АС15 (АС20, АС32), рекомендуються для шліфування наступних матеріалів:

– коміркових заповнювачів типу ССП и ПСП – круги-барабани з переривчастою ріжучою кромкою зернистістю 315/250-500/400; геометричні параметри робочої поверхні: співвідношення гвинтових канавок правого й лівого напрямків 32 і 25; ширина канавок правого й лівого напрямків повинна варіюватися в межах від 2,0 до 3,2 мм; для одержання параметра шорсткості $R_z = 20-30$ мкм застосовують круги зернистістю 200/160-315/250;

– вугле- й склопластиків типу ЕЛУР, УОЛ, Т10-80 – круги-барабани з переривчастою ріжучою кромкою зернистістю 315/250-500/400; геометричні параметри робочої поверхні: співвідношення гвинтових канавок правого й лівого напрямків – 75 и 65 відповідно, ширина канавок – 0,7-1,0 мм;

– органоластиків СВМ, органосклопластиків Т42/1-76 й інших подібних матеріалів – круги-барабани із суцільною ріжучою кромкою зернистістю 400/315-500/400.

Технологічні операції шліфування й зачищення. Шліфування й зачищення поверхонь виробів із ПКМ, а також інші види механічної обробки (обробка по периметру, зняття фасок, скосів, виконання округлень, доведення контурів після обробки на попередній операції й т.д.) виконують здебільшого при необхідності одержати вироби із ПКМ зі складною криволінійною поверхнею, а також у процесі механоскладальних і добудовних робіт. У таких випадках застосовують автоматизовані системи з ЧПУ, але в значно більшій мірі ручні пнев-

матичні машини. Робочим інструментом у цих машинах є алмазні одношарові шліфувальні головки (рис. 5.45) діаметром від 6 до 20 мм. Довжина їх робочої частини – 40 мм, загальна довжина шліфувальної головки – 80 мм.

Алмазна головка шліфувальна складається зі сталевого корпусу й алмазмісного шару зі шліфпорошків синтетичних алмазів марок АС15, АС20 зернистістю 200/160-400/315, закріпленого на зовнішній поверхні корпусу головки. Зовнішня робоча поверхня шліфувальних головок може бути виконана як суцільною, так і переривчастою. Як типова конструкція на рис. 5.45 показаний фрагмент переривчастої робочої поверхні шліфувальної головки. Сукупність алмазних елементів утворена гвинтовими канавками лівого напрямку, виконаними під кутом 30° до геометричної осі інструмента. Основні геометричні параметри одношарових алмазних шліфувальних головок наведені в табл. 5.32.

Свердління отворів у виробах з ПКМ й МПКМ. Призначенням цієї технологічної операції є виготовлення отворів, у тому числі технологічних для забезпечення можливості врізання алмазних відрізних кругів і ножівкових полотен, у виробах з ПКМ і МПКМ, одержання отворів під складальні роботи, виготовлення технологічних зразків-"свідків" оброблюваних матеріалів – для визначення їхніх фізико-механічних характеристик.

Конструкції стрижневих і кільцевих алмазних одношарових свердел $\varnothing 2-60$ мм, призначених для свердління отворів у листових й плиткових полімерних й металополімерних композиційних матеріалах показані на рис. 5.46-5.47.

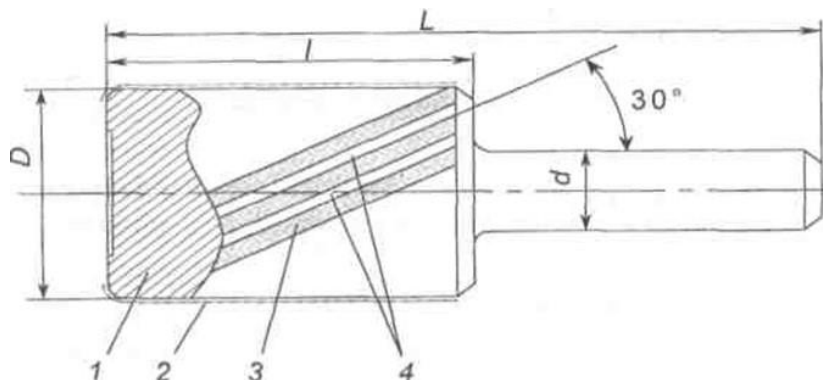


Рисунок 5.45 – Конструкція одношарової алмазної шліфувальної головки:

1 – сталевий корпус; 2 – алмазмісний шар; 3 – алмазні елементи; 4 – гвинтові канавки

Застосування одношарових алмазних свердел замість лезового швидкорізального й твердосплавного інструмента дозволяє підвищити термін служби інструмента в 5-10 разів; збільшити продуктивність обробки в 3-9 разів; поліпшити якість обробленої поверхні (звести до мінімуму дію термічної деструкції полімерної складової, виключити припали, розшарування, ворсистість, викрашування кромek й інші дефекти на обробленій поверхні виробів, забезпечуючи

при цьому параметр шорсткості в межах $Rz = 20 \dots 40$ мкм); підвищити точність обробки в 2,0-2,5 рази, забезпечуючи при цьому одержання отворів по точності не нижче 10 квалітету.

Таблиця 5.32 – Основні конструктивні параметри одношарових алмазних шліфувальних головок

Розмір, мм				Кількість гвинтових канавок, шт.
D	d	l	L	
6	6	40	80	8
8	6	40	80	11
10	8	40	80	14
12	8	40	80	16
16	10	40	80	22
20	10	40	80	27

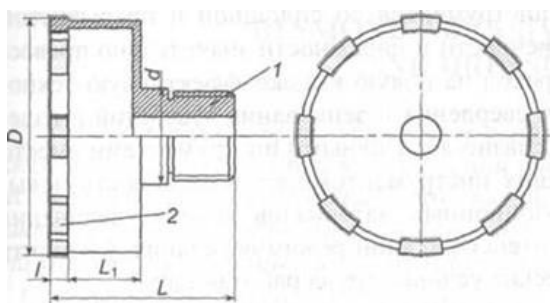


Рисунок 5.46 – Конструкція одношарового алмазного кільцевого свердла

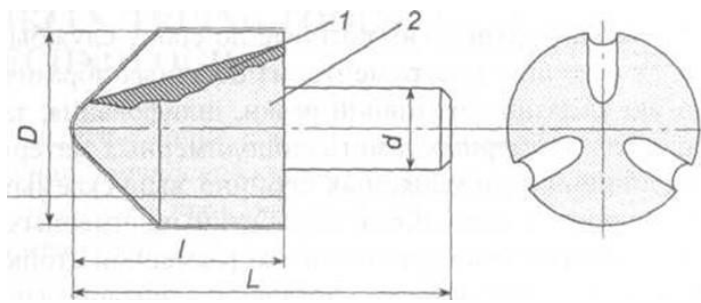


Рисунок 5.47 – Конструкція одношарового алмазного стрижневого свердла

Зенкерування. При виготовленні клепаних елементів конструкцій, що складаються з пакетів листів з ПКМ, наприклад, органопластика й вуглепластика, а також змішаних пакетів з вуглепластика й металу (сплави на основі алюмінію й титану), необхідно виконувати зенкерування конічних поглиблень (гнізд) в отворах під заклепки з кутом конуса $2\varphi = 90$ і 120° . Товщина листових ПКМ і МПКМ, що використовуються у з'єднаннях, не перевищує 6 мм.

Одношарові алмазні абразивні й лезові зенкери, оснащені пластинами АТП, показані на рис. 5.48-5.49. При зенкеруванні отворів у виробах з ПКМ і МПКМ у 7-12 разів; збільшити продуктивність обробки у 3-5 разів; поліпшити якість обробленої поверхні, виключити поверхневі дефекти в зоні кромки – викрашування й округлення, зовнішні тріщини; виключити відшарування й внутрішні дефекти – розшарування, розтріскування й припали; звести до мінімуму дію термічної деструкції полімерної складової, забезпечуючи при цьому параметр шорсткості $Rz = 20-40$ мкм.

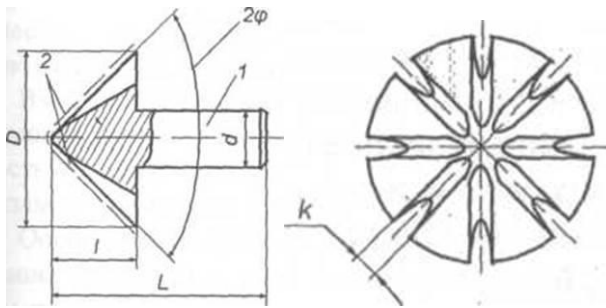


Рисунок 5.48 – Одношарова алмазна конічна зенківка: 1 – корпус зенківки; 2 – алмазовмісний робочий шар

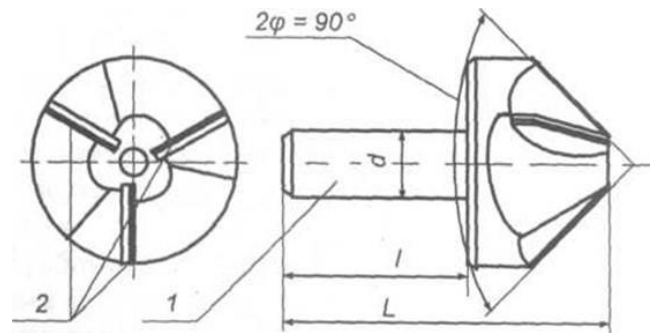


Рисунок 5.49 – Конструкція конічної зенківки, оснащеної пластинами з АТП: 1 – корпус зенківки; 2 – різальні пластины з АТП

Таким чином, для алмазної обробки полімерних і металополімерних композиційних матеріалів створена гама одношарових алмазних інструментів із суцільною й переривчастою робочою поверхнею, які за терміном служби, довговічності й надійності значно перевершують різальні інструмент зі звичайних абразивів.

Питання для самоконтролю:

1. В чому полягають проблеми, які виникають під час алмазної обробки МПКМ?
2. В чому полягають особливості процесу різання МПКМ?
3. Ідеологія вибору типу алмазного інструмента для обробки МПКМ.
4. Алмазний інструмент для розрізування (різання) листів і плит з МПКМ.
5. Алмазний інструмент для свердління отворів у деталях з МПКМ.
6. Алмазний інструмент для шліфування деталей з МПКМ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1982, ч.1. – 239 с.; ч.2.
2. Ковшов А.Н. Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
3. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности “Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты”. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1985. – 496 с.
4. Основы технологии машиностроения / Под ред. В.С. Корсакова. – М.: Машиностроение, 1977. – 416 с.
5. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И.М. Баранчукова, А.А. Гусева, Ю.Б. Крамаренко и др.; Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
6. Технология машиностроения (специальная часть): Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.А. Гусев, Е.Р. Ковальчук, И.М. Колесов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
7. Технология машиностроения (специальная часть) / Картавов С.А. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, Головное изд-во, 1984. – 272 с.
8. Якимов О.В., Гусарев В.С., Якимов О.О., Линчевський П.А. Технологія автоматизованого машинобудування: Підручник. – К.: ІСДО, 1994. – 400 с.
9. Кулик В.К., Петраков Ю.В., Иотов В.В. Прогрессивные процессы обработки фасонных поверхностей. – К.: Техніка, 1987. – 176 с.
10. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей. – К. 1977, 192 с.
11. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ. К. 1991, 192 с.
12. Родин П.Р., Линкин Г.А., Татаренко В.Н. Обработка фасонных поверхностей на станках с ЧПУ. М. 1976, 198 с.
13. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А.А. Панова. – М.: Машиностроение, 1988. – 736 с.
14. Комиссаров В.И., Леонтьев В.И. Точность, производительность и надежность в системе проектирования технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
15. Размерный анализ технологических процессов / Матвеев В.В., Тверской М.М. и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.
16. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985, Т.1. – 656 с.; т.2. – 496 с.
17. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Технологія обробки спеціальних деталей" для студентів спеціальності 131 – "Прикладна механіка" усіх форм навчання / Уклад.: Ю.В. Петраков, В.Г. Біланенко, С.В. Сохань, В.В. Писаренко. – К.: НТУУ «КПІ», Електронне видання, 2016. – 31 с.
18. Конструкторские базы. Методические указания и контрольные задания к практическим занятиям и самостоятельному изучению дисциплины "Технология машиностроения" для студентов специальности 1201 всех форм обучения / Сост. Ф.Н. Абрамов – К.: Минвуз УССР, КПИ, 1988. – 72 с.

19. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту для студентів спеціальності 7.0902 02 “Технологія машинобудування” / Уклад.: Ю.В. Петраков, В.Г. Біланенко, В.А. Пасічник. – К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2003. – 44 с.
20. Оформление технологической документации. Методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине "Технология машиностроения" для студентов специальности "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" всех форм обучения / Сост. В.В. Душинский, В.Г. Беланенко. – К.: Минвуз УССР, КПИ, 1988. – 56 с.
21. Порошин В.В., Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: Монография. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 196 с.
22. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
23. Твердые сплавы - Классификация, история, назначение, сравнение <http://pobedit.com.ua/standarts/articles/43-hard-alloys/201-hard-alloys-classification-history-purpose-comparison.html>.
24. Вдовин Р. А. Повышение качества изготовления лопаток турбины ГТД на основе создания цифровых моделей заготовительных операций: дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2017. – 190 с.
25. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики: монография / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с.
26. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, Н.С. Рыкунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.
27. Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Рябченко С.В., Нежебовский В.В., Середа Г.В. Профильное шлифование зубчатых колес высокопористыми абразивными кругами // Оборудование и инструмент для профессионалов. – №5, 2016. – С. 20-23.
28. Высокоструктурные шлифовальные круги и их эффективное применение / В.К. Старков, С.А. Рябцев, С.В. Костров и др.; под. ред. В.К. Старкова. – М.: МГТУ «Станкин». 2013. – 213 с.
29. Технология автоматизированной комплексной обработки лопаток турбин методами высокопроизводительного шлифования, многоцелевые шлифовальные станки и высокоструктурный абразивный инструмент для ее реализации / В.А. Полетаев, В.К. Старков, В.Н. Крылов, С.А. Рябцев и др.; под. ред. В.А. Полетаева, В.К. Старкова. – М.: Машиностроение. 2013. – 122.
30. Полетаев В.А. Основные технологические принципы автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета. – № 1 (22), 2012. – с. 165-170.
31. Технология производства авиационных двигателей : Учебн. пособ. / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.К. Яценко и др.; Под ред. В.А. Богуслаева / Ч. 3: Методы обработки деталей авиационных двигателей. – 2008. – 638 с.
32. Сакаев А.Х., Макаров В.Ф. Сравнительное исследование шлифования профильных поверхностей лопаток турбины на токарно-лобовом МК163М и станке Elb-Schliff Micro Cut4-520 // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011, № 7 (84) . – С. 165-170.
33. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.

34. Технологии механической обработки материалов: Сб. науч. тр. / Отв. ред. Н.В. Новиков; ИСМ НАН Украины. – К., 2006. – 130 с.
35. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6-и томах / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – Том 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / Под ред. А.А. Шепелева, – Киев: ИСМ НАНУ, 2007. – 340 с.
36. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6-и томах / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – Том 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – Киев: ИСМ НАНУ, 2006. – 316 с.
37. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: Монография в 6-и томах / Под общ. ред. Н.В. Новикова. – Том 4: Инструменты и технологические процессы в прецизионной финишной обработке / Под ред. В.В. Рогова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2006. – 260 с.
38. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials / R. M'Saoubi, D. Axinte, S.L. Soo, Ch. Nobel, H. Attia, Gr. Kappmeyer, S. Engin, W.-M. Sim // CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 64, Issue 2, 2015, Pages 557-580.
39. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites / F. Klocke, S.L. Soo, B. Karpuschewski, J.A. Webster, D. Novovic, A. Elfizy, D.A. Axinte, S. Tonissen // CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 64, Issue 2, 2015, Pages 581-604.
40. Петраков Ю.В., Паньків К.М., Живцов С.П. Формирование геометрических моделей ручья калибров станов холодной прокатки труб // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2009, № 57. – С. 63-70.
41. Петраков Ю.В., Паньків К.М. Визначення параметрів шару припуску, що зрізується, при 3D-обробці // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2008, № 52. – С. 262-266.
42. Петраков Ю.В., Чамата С.М. Підвищення жорсткості технологічної обробляючої системи при шліфуванні оправок станів холодної прокатки труб // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – ЖДТУ, Вип.12, 2012. – С. 118-127.
43. Петраков Ю.В., Чамата С.М. Проектування управляючих програм для шліфування оправок станів холодної прокатки труб на верстаті з ЧПК // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2013, № 69. – С.51-56.
44. Петраков Ю.В., Субін А.А. Математична модель шліфування внутрішньої гвинтової канавки пари кочення // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 1999, № 37. – С.63-68.
45. Петраков Ю.В., Субін А.А. Управління циклом врізного шліфування // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2001, № 40. – С.240-244.
46. Петраков Ю.В., Субін А.А. Визначення граничного алгоритму при шліфуванні внутрішніх гвинтових поверхонь // Вісник Житомирського державного технологічного університету: серія "Технічні науки". – 2003, Вип. 1 (24). – С.56-60.
47. Петраков Ю.В., Писаренко В.В. Формоутворення ендопротеза колінного суглоба людини циліндричною фрезою на фрезерному верстаті з ЧПК // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – №12, 2012. – С.108-117.
48. Петраков Ю.В., Писаренко В.В. Simulation of grinding process of 3-D surface artificial knee-joint // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2011, № 61. – С. 208-211.

49. Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. – Мн., «Наука и техника», 1977. – 256 с.
50. ДСТУ ISO 12085-2001 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Параметри структурних елементів (ISO 12085:1996, IDT).
51. ГОСТ 25142-82 Шероховатость поверхности. Термины и определения.
52. ISO 3274 GPS Instruments for the measurement of surface roughness by the profile method—contact (stylus) instruments of consecutive profile transformation (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Номінальні характеристики контактних (щупових) приладів). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2012 році.
53. ISO 4287:1997/Cor.1:1998 Geometrical product specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters (1997). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення й параметри структури). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2015 році.
54. ISO 4288:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення й параметри структури). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2013 році.
55. ISO 8785 GPS Surface imperfections—terms, definitions, and parameters (1998). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Дефекти поверхні. Терміни, визначення й параметри). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2014 році.
56. ISO 12085 GPS Surface texture. Profile method—motif parameter (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільний метод. Параметри геометричних узорів). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2013 році.
57. ISO 13565/1 GPS Texture profile method—surface having stratified functional properties— Part I: Filtering and overall measuring conditions (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільний метод. Поверхні з пошаровим розподілом функціональних властивостей. Частина 1. Фільтрація й загальні умови вимірювань). Стандарт розглянуто й підтверджено у 2012 році.
58. ISO 13565/2 GPS Characterization of surface texture profile method surfaces having stratified functional properties— Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve (1996). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільний метод. Поверхні з пошаровим розподілом функціональних властивостей. Частина 2. Характеристика шарів методом виділення лінійної ділянки на кривій процентного вмісту матеріалу). Стандарт розглянуто й підтверджено у 2012 році.
59. ISO 13565/3 GPS Surface texture profile method—surfaces having stratified functional properties—Part 3: Height characterization using the linear material ratio curve (1998). (Геометричні характеристики виробів (GPS). Структура поверхні: профільний метод. Поверхні з пошаровим розподілом функціональних властивостей. Частина 3. Характеристики висоти із застосуванням кривої розподілу матеріалу). Стандарт розглянуто й потім підтверджено у 2014 році.
60. UK B15 2TT: Surface Digitization and Parametric Characterization, Birmingham 1993.