

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

С. В. Єршов

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

"Фізичні процеси при пластичній деформації "

для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
зі спеціальності 136 «Металургія» за освітньо-науковою програмою
«Обробка металів тиском»

ЗАТВЕРДЖЕНО:

редакційно-видавничою секцією
науково-методичної ради ДДТУ
« 16 » . 06 2016 р.
протокол № 7

Кам'янське

2016

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу Дніпровського державного технічного університету заборонено.

Конспект лекцій з дисципліни "Фізичні процеси при пластичній деформації" для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 136 «Металургія» за освітньо-науковою програмою «Обробка металів тиском» / Укл. С.В.Єршов. - Кам'янське, ДДТУ. - 2016. - 31 с.

Укладач: докт. техн. наук, проф. Єршов С.В.

Відповідний за випуск: зав. кафедрою ОМТ Єршов С.В.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Самохвал В.М.

Затверджено на засіданні кафедри ОМТ. Протокол №9 від 02.06.2016 р

Конспект лекцій містить матеріали, необхідні для вивчення курсу " Фізичні процеси при пластичній деформації". Конспект складається з опису теоретичних відомостей та контрольних запитань для перевірки глибини засвоєного матеріалу.

Зміст		
Фізичні основи пластичності та деформуємості		
<u>Тема 1.</u> Загальні відомості		6
<u>Тема 2.</u> Механізми пластичної деформації		8
<u>Тема 3.</u> Фізичні основи пластичності й деформуємості		12
<u>Тема 4.</u> Загальні відомості про пластичність і деформуємість		17
<u>Тема 5.</u> Види зниженої пластичності		18
5.1	ПЕРШИЙ ВИД зниження пластичності	20
5.2	ДРУГИЙ ВИД зниження пластичності	24
5.3	ТРЕТІЙ ВИД зниження пластичності	25
5.4	ЧЕТВЕРТИЙ ВИД зниження пластичності	26
Перелік рекомендованої літератури		29
Контрольні питання		30

Тема 1. Загальні відомості

Із сучасної точки зору, елементарним актом зсувної пластичної деформації є ковзання, засноване на дислокаційному механізмі. Можливість ковзання, тобто число можливих площин ковзання в кристалах, і величина ковзання в кожній з них, прийнято вважати мірилом пластичності полікристалічного матеріалу. Вона залежить, насамперед, від таких природних характеристик, як тип кристалічної структури й характер міжатомних зв'язків.

Тільки металевий зв'язок завдяки наявності узагальнених електронів забезпечує можливість ковзання одних атомних площин щодо інших без відриву елементів кристалічної структури друг від друга і його руйнування.

Однак багато особливостей будови металевих сплавів утрудняють успішне проведення пластичної формозміни тіл за допомогою процесів кування, прокатки, штампування, а в ряді випадків воно виявляється доступним лише при створенні інших, більше сприятливих термомеханічних умов деформування.

У зв'язку із цим сучасна теорія пластичної деформації повинна стати основою для створення більш досконалих промислових технологічних процесів пластичної деформації тіл з розглянутих сталей і сплавів, одержання виробів високої якості з погляду їхньої структури, властивостей і форми.

У цьому плані перед теорією процесів кінцевої пластичної деформації виробів із сучасних матеріалів ставляться складні завдання, успішне рішення яких можливо лише за допомогою більше широкого залучення відомостей з області металофізики. Вони повинні стати складовою частиною теорії пластичної обробки сучасних металевих матеріалів.

Нагрівання, гаряча пластична деформація й охолодження виробів з високолегованих сталей і сплавів супроводжуються одночасним протіканням в них складних процесів зміни структури. Ці процеси супроводжуються, як правило, падінням пластичності матеріалу й погіршенням деформуємості виробів. Тому технологія обробки тиском зливків і заготовок із названих сталей і сплавів повинна розроблятися й виконуватися з врахуванням цих найважливіших процесів.

Для опису процесу пластичної формозміни в літературі намітилося кілька напрямків, які умовно можна розділити на три групи:

1) механічне (механіко-математичне), засноване на використанні положень механіки суцільних середовищ;

2) фізико-хімічне, засноване на використанні положень таких найважливіших розділів фізики металів, як теорія недосконалостей, у тому числі теорія дислокацій, а також розділів фізичної хімії, що пояснюють процеси утворення й розпаду хімічних сполук у твердих сталях і сплавах;

3) експериментально-теоретичне, що включає частково положення теорії обробки металів тиском і результати механічних випробувань реальних матеріалів.

Варто помітити, що з фізичної точки зору розгляд пластично деформуємого тіла як суцільного середовища й тим більше однорідної середи не може бути прийняте у зв'язку з відомими особливостями твердого тіла й, зокрема, металів, до яких відносяться:

а) кристалічна будова металів, що обумовлює неоднорідне, краще ковзання в одних кристалографічних площинах при відсутності його в інших;

б) анізотропність властивостей і геометрії ковзання;

в) дискретність дислокаційної структури, вакансій й інших недосконалостей;

г) наявність границь кристалів;

д) нерівномірний розподіл різних структурних складових, що мають досить різномірними властивості, що визначає їх неоднорідне поведіння в деформуємому тілі.

Все це обумовлює неминучість неоднорідної пластичної деформації третього й другого родів (субмікроскопічну й мікроскопічну), а також дискретний характер початку руйнування.

Розробка оптимального режиму обробки того або іншого сплаву бажана при створенні математичної моделі, яка в ідеальному випадку повинна використати досягнення всіх трьох напрямків. Однак створення математичної моделі, що описує поведіння матеріалу при деформації з врахуванням усього різноманіття факторів важко. Тому можна вважати припустимим різне наближення до коректної моделі. У ряді випадків заслуговує на увагу підхід, у якому для прогнозування пластичності й деформуємості прибігають до узагальнень, заснованих на використанні результатів стандартних механічних випробувань.

Тема 2. Механізми пластичної деформації

До останнього часу основними механізмами пластичної деформації вважали ковзання, двійникування й відносне переміщення самих зерен. Результати ряду досліджень механізму пластичної деформації узагальнені в роботі И. А. Одинга, у якій можливі одинадцять видів механізмів пластичної деформації розділені на три основні групи: зсувні, дифузійні й прикордонні.

До групи зсувних процесів відносяться наступні механізми пластичної деформації: нормальне зрушення - процес, при якому відбувається зрушення однієї частини кристала щодо іншої, і двійникування. Однак за допомогою двійникування можливі тільки обмежені величини ковзання й деформації кристалів. У зв'язку із цим частка цього механізму і його значення у звичайних реальних процесах пластичної деформації дуже незначна. До цієї ж групи відносяться вигин, називаний також скиданням, що характеризується несиметричною переорієнтацією деяких областей в середині зерна або кристала, і пластинкування - механізм, аналогічний двійникуванню, але який відрізняється від нього тим, що кут повороту однієї пластинки щодо іншої не є постійним.

Двійникування в більше значному ступені відбувається в металах, у яких можливості для ковзання обмежені, наприклад, у гексагональних щільно упакованих, де ковзання йде часто тільки по єдиній базисній системі (цинк, кадмій, магній).

До групи дифузійних процесів відносяться наступні механізми пластичної деформації:

1) Механізм дифузійної пластичності. Якщо виріб з металу перебуває тривалий час під напругою при високій температурі, то в ньому протікають внутрішні (і в тому числі дифузійні) процеси, які можуть не тільки змінити його властивості, але й викликати пластичну формозміну. Основна відмінність дифузійної пластичності від ковзання й двійникування полягає в тому, що в останніх процесах елементарні акти здійснюються за допомогою закономірного переміщення цілих груп атомів уздовж певних кристалографічних площин і напрямків, у той час як елементарний акт дифузійної пластичності здійснюється шляхом хаотичного переміщення індивідуальних атомів.

2) Дифузійно-дислокаційний механізм, розроблений і запропонований Коттреллом.

До групи прикордонних процесів відносяться наступні механізми пластичної деформації:

- 1) Відносне переміщення зерен і блоків.
- 2) Процеси полігонізації й рекристалізації.

Пластична деформація здійснюється звичайно при одночасному протіканні декількох механізмів. Однак залежно від умов у процесі деформування завжди переважає той або інший з названих механізмів.

При звичайних процесах пластичної деформації металів і сплавів основним механізмом деформування є нормальне зрушення (ковзання), що дозволяє досягати найбільших швидкостей і величин деформації. Інші механізми пластичної деформації мають практичне значення при процесах деформування, що характеризуються малими швидкостями й величинами деформації й, що протікають при відносно високих температурах.

При ковзанні спостерігається процес зрушення однієї частини кристала (зерна) щодо іншої по певних кристалографічних площинах і напрямкам.

Сили зрушення не у всіх випадках можуть викликати ковзання. Ковзання можливо лише тоді, коли між сусідніми площинами атомів, незважаючи на їхній відносний зсув, зберігається зчеплення. Якби при цьому було відсутнє або порушувалося зчеплення між атомними площинами, то відбувалося б руйнування.

У кристалах звичайно є одна або кілька сімейств площин, уздовж яких атоми упаковані щільніше в порівнянні з іншими площинами. У цих площинах є також напрямки, уздовж яких відстані між атомами мінімальні. Ковзання найбільш легко відбувається звичайно паралельно зазначеним площинам і напрямкам завдяки тому, що при цьому досягається мінімальне порушення правильності в розташуванні атомів. На можливість ковзання, а також на величину й напрямок ковзання, таким чином, впливають тип зв'язку кристалічної структури, величина напруг зрушення, геометрія кристалічної структури, орієнтування кристала щодо діючої сили, наявність недосконалостей кристалічної структури (границь зерен, домішок, дислокацій й ін.).

Чим більше площин ковзання тим більше можна спостерігати на поверхні тіла смуг ковзання. Чим більше площин ковзання і чим більше можлива величина ковзання в кожній площині, тим, більше пластичність. Здатність кристалів утворювати можливо більше число площин ковзання розглядається як міра пластичності.

Загальним у всіх випадках деформації є те, що утворення смуги ковзання відбувається не шляхом зсуву атомів по якій-небудь окремо взятій площині, а в результаті зсуву уздовж цілої системи паралельних площин.

В міру розвитку деформації збільшується число активних площин ковзання, завдяки чому ширина смуги ковзання збільшується, але не безмежно. Збільшується також і число смуг ковзання. Однак число площин ковзання, що активно беруть участь у процесі ковзання, відносно мало. Навіть при значній деформації кристала активізується звичайно не більше 1% можливих площин ковзання, а відстань між активними площинами навіть в середині даної смуги ковзання становить приблизно 20 нм (200 Å).

В процесі деформації зростають напруги, і в ковзання включаються нові площини, орієнтовані менш сприятливо. Ковзання може також відновлятися й у площинах, у яких воно раніше припинялося, якщо величина напруг досягла значення, достатнього для подолання виниклих перешкод ковзанню. У процесі вторинного ковзання опір ковзанню знову зростає й ковзання в даній площині знову припиняється доти, поки напруги не зростуть знову й не досягнуть величини, достатньої для виникнення третинного ковзання, і т.д. Таким чином, ковзання відбувається стрибками. Стрибкоподібна деформація пояснюється проривом щораз лавини дислокацій, затриманих біля перешкод, коли деформуючі напруги досягають певного значення й здатні перебороти виникаючі перешкоди. Ковзання може мати місце, коли діючі дотичні напруги досягають критичного значення. Раніше при класичному описі ковзання виходили з того, що ковзанням - це переміщення одного шару атомів, що рухається як єдине ціле щодо аналогічного шару. Одержувана розрахункова напруга, необхідна для здійснення ковзання, виявлялася приблизно в 1000 разів більше фактичної.

Це протиріччя пояснене за допомогою теорії дислокацій, що розглядає процес ковзання як процес, що поширюється по площині ковзання послідовно, а не одночасно. Крім того, наявність фронту дислокацій, що рухаються, додатково полегшує протікання ковзання в реальних кристалах. Ковзання в по-різному орієнтованих кристалах даного металу починається при різній величині напруг, прикладених до поперечного перерізу зразка. Однак величина напруги, необхідної для ковзання в дані площини й напрямку, завжди постійна й дорівнює величині критичної напруги, що сколює.

Вчені, прийшли до виводу, що початкова пластична деформація відбувається шляхом відносного повороту цілих зерен, а на певній стадії міжзеренне переміщення змінюється внутрішньозеренним ковзанням. Ступінь деформації, при якій починаються зсувні процеси, умовно названа критичним ступенем деформації. Величина цієї деформації залежить від умов обробки, чистоти металу й інших факторів

Для випадку гарячої деформації збільшення швидкості деформації, зниження температури деформації і підвищення об'ємного стиску, знижують можливість протікання міжзеренних переміщень і сприяють протіканню внутрішньозеренних зрушень. Підвищення температури деформації й зниження швидкості приводять до протилежних результатів.

У різних зонах деформуємого тіла напружений стан відрізняється. Там, де переважає об'ємний стиск, буде ймовірніше внутрішньозеренна початкова деформація, а в зонах з перевагою напруг, що розтягують, - початкова міжзеренна деформація.

Відносно переміщення зерен без порушення цілісності границь, по яких відбувається переміщення, називається міжзеренною (пластичною) деформацією, а здатність полікристалічного матеріалу до такої деформації - міжзеренною пластичністю.

Міжзеренна деформація може протікати поряд із внутрішньозеренною. Такий механізм деформації називається змішаним.

При міжзеренному механізмі деформації неминуче порушення зв'язку між зернами. Якщо має місце часткове відновлення порушених зв'язків, то при значних

деформаціях буде відбуватися нагромадженням ушкоджень і наступить руйнування границі. Тільки у випадку, коли виникаючі ушкодження границь зерен відновлюються повністю, можлива міжзеренна пластична деформація. Одним з видів відновлення є рекристалізація. Чим більше можливість відновлення ушкоджень границь зерен, тим значніше може бути міжзеренна пластична деформація.

Можливість протікання міжзеренної деформації або руйнування ґрунтується на ослабленні границь зерен щодо самих зерен. Доти поки міцність границь більше міцності зерна, границі виявляються стійкими й тим більше, чим більше різниця між цими значеннями. За умови, коли границі виявляються ослабленими з більше низьким опором деформації, створюються більш сприятливі умови для міжзеренної деформації.

Таким чином, пластична деформація полікристалічного тіла може здійснюватися за допомогою внутризеренного й межзеренного механізмів. Можливості протікання того або іншого механізму і його частка в загальній деформації визначаються умовами деформації й природою металу, його структурним станом, станом границь. Першим вступає в дію той механізм, для якого потрібно менша початкова напруга. Чим більше механізмів одночасно бере участь у процесі, тим більше пластичність деформуємого тіла. Вибором правильного режиму деформації можна зменшити значення міжзеренної деформації й поліпшити деформуємість малопластичних сплавів у реальних умовах гарячої обробки тиском.

Тема 3. Фізичні основи пластичності й деформуємість

Поняття *пластичність* і *деформуємість* дотепер чітко не розмежовують, а іноді в них вкладають схожий зміст, і, таким чином, поняття *деформуємість* ототожнюється з поняттям *пластичність*.

Будемо виходити з того, що в процесах обробки тиском об'єктом деформування є не метал взагалі, а конкретне тіло, що складається з даного металу, який у кожному випадку має певну форму й розміри, які впливають на його *деформуємість*. Такими тілами є зливки й заготовки різної форми, а також поковки й прокат.

Поводження тіла (зливка, заготовки) при деформуванні його в промислових умовах куванням, прокаткою, штампуванням, пресуванням, тобто здатність його деформуватися без порушення цілісності, виражають часто термінами «деформуємість», «ковкість», «прокативаємість», «штампуємість», «пресуємість» і т.п. Іноді те же саме неправильно виражають термінами «пластичність», «технологічна пластичність». Надалі під деформуємістю будемо розуміти здатність тіла (зливка, заготовки) необоротно змінювати свою форму без порушення цілісності при деформуванні його в даних умовах.

Термін «деформуємість» не характеризує умови деформування тіла й агрегат, на якому здійснюється деформування. Більше конкретними є терміни «ковкість», «прокативаємість», «штампуємість». Вони відображають деформуємість тіла при куванні, прокатці, штампуванні. Тому замість більше загального терміна «деформуємість» при деформуванні у виробничих умовах зливоків і заготовок іноді доцільно вживати терміни: «ковкість», «прокативаємість», «штампуємість».

У кожному з перерахованих способів деформування створюються відмінні від інших умови деформації тіла. Їм властиві різні ступені одиничних деформацій, неоднорідності деформації, різні напружені стани.

Тому при оцінці деформуємісті тіла в промислових умовах завжди варто вказувати спосіб деформування й оцінювати деформуємість тіла роздільно у випадках кування й прокатки.

Кількісно деформуємість тіла можна виразити:

- або в балах п'ятибальної шкали;
- або за допомогою величини деформації (у відсотках), при якій у суцільному деформуємому тілі утворюються перші тріщини.

Деформуємість зв'язується з такими факторами, як:

- а) властивості самого матеріалу, що дозволяє необоротно змінювати форму тіла, що, інакше кажучи, варто назвати пластичністю матеріалу;
- б) умови деформування, створювані при куванні, прокатці, пресуванні тіла;
- б) характеристика самого деформуємого тіла, його розміри й форми.

Все різноманіття факторів, що впливають на деформуємість тіла, можна розділити на дві групи.

До першої групи відносяться фактори, що обумовлюють пластичність матеріалу *П*. До другої групи варто віднести комплекс так званих зовнішніх (або механічних) факторів деформації *Мх*, що характеризують зовнішні умови деформування.

Зниження пластичності може бути компенсовано поліпшенням механічних умов деформування й навпаки.

Пластичність є закономірним відображенням внутрішньої природи матеріалу й фізико-хімічних процесів, що протікають у ньому.

Що стосується механічних умов деформування, те їх можна розглядати як середовище, у якому протікають процеси пластичної зміни форми тіла. Вони можуть сприяти розвитку цих процесів або, навпаки, утрудняти їх.

З великої кількості відомих механізмів пластичної деформації найбільше прикладне значення має нормальне зсув (або ковзання), заснований на дислокаційному механізмі. Інші механізми пластичної деформації мало проявляються в сучасних процесах обробки металів тиском.

Можна сказати, що кожен матеріал володіє в даному стані певним комплексом потенційної (природної) пластичності, що більш повно може виявитися при деформуванні тіла.

У цей час ще немає методу випробування, за допомогою якого можна було б виявляти й оцінювати кількісно весь комплекс природної пластичності матеріалу.

При кожному виді випробувань (ударний вигин, розтягання, крутіння й ін.) створюються специфічні умови деформування й руйнування зразка, при яких не повністю виявляється комплекс його природної пластичності. Тому рівень пластичності матеріалу, одержуваний за допомогою лише одного з названих методів випробування, носить умовний характер, виражається у своїх умовних одиницях і його вірніше називати *умовною пластичністю Пу*. У той же час ці методи випробування вільні від впливу зовнішніх факторів і тому можуть більш правильно відображати пластичність металу, особливо при використанні показника-критерію пластичності.

Пластична деформація за допомогою механізму ковзання можлива й реалізується у звичайних умовах лише в наступних випадках: наявності сприятливої кристалічної структури; наявності металевого міжатомного зв'язку.

Пластичність тим вище, чим більшим числом можливих площин і напрямків ковзання володіють кристали, більше період легкого ламінарного ковзання, менше коефіцієнт зміцнення. Ці фактори прийнято вважати мірилом пластичності металу.

Таким чином, у фізичному сенсі пластичність — це властивість кристалів й їхнього конгломерату, що дозволяє здійснювати значні відносні переміщення елементів кристалічної структури без її руйнування за допомогою одного або декількох механізмів.

Стосовно ж до теорії пластичної деформації *пластичність варто розглядати як властивість металу, сплаву, яка дозволяє необоротно змінювати форму тіла або зразка без порушення його цілісності, яке визначено за допомогою об'єктивного випробування й виражене кількісно в умовних одиницях.* Такими об'єктивними методами є випробування на крутіння, на розтягання й ін. При цьому в кожному випадку визначення умовної пластичності варто користуватися не кожним з названих методів випробування, а тим з них, що є для даного матеріалу показником-критерієм пластичності.

Термін *пластичність* завжди відноситься до металу (матеріалу), з якого складається тіло. Що ж стосується терміна *деформуємість*, то його варто застосовувати тільки у відношенні деформуємого тіла (зливка, заготовки й ін.) і неправильно відносити цей термін до матеріалу, з якого складається тіло. Не слід говорити "деформуємість металу", або "пластичність тіла". Правильно говорити, «деформуємість тіла» або «пластичність металу».

Тіла з даного матеріалу, але різного розміру деформуються в даних умовах неоднаково. Тоді як зразки, вирізані з них, виявляють при випробуванні однакову умовну пластичність.

Тіло, яке деформується в промислових умовах, має значні й у той же час змінні розміри й форму, які самостійно впливають на його деформуємість. На відміну від цього зразок, який деформується для визначення

пластичності, має строго визначену форму з мінімальними й постійними розмірами, при яких вплив їх мінімальний й постійний.

При деформуванні тіла в промислових умовах зовнішні фактори деформації дуже впливають на його деформуємість. На відміну від цього при деформуванні зразка вплив зовнішніх факторів деформації має мінімальне значення.

На пластичність матеріалу II впливають різні фізико-хімічні фактори:

1) *Тип кристалічної структури* й пов'язана з ним кількість можливих площин і напрямків ковзання в кристалах, легкість протікання ковзання й ін.

2) *Характер міжатомних зв'язків у кристалах*. Тільки металевий міжатомний зв'язок дозволяє виконувати значні ковзання без відриву площин, що зрушуються, друг відносно друга.

3) *Хімічний склад*. Одні легуючі елементи різко знижують пластичність матеріалу навіть при малих вмістах (кремній, азот, цирконій, магній, кальцій, свинець, олово й ін.), інші не приводять до такого зниження пластичності навіть при великому їхньому вмісті (нікель, молібден, хром й ін.). Це визначається властивостями й положенням елемента в структурі.

4) *Структурний стан*. Утворення й збільшення кількості надлишкової зміцнюючої γ -фази, σ -фази в нержавіючих сталях, δ -фериту у двофазних сталях (до ~50%), евтектика у швидкорізальних сталях, упорядкування структури й ін. різко знижують пластичність матеріалу до стану, що повністю виключає можливість деформування виробів.

5) *Високий гідростатичний тиск*. Спільний вплив високого тиску й пластичної деформації приводить до «заліковування» внутрішніх дефектів структури, що виникають при деформації, і до значного підвищення пластичності й міцності металу.

6) *Чистота границь зерен* від легкоплавких з'єднань й елементів. Наявність таких включень у полікристалічних матеріалах, що розташовуються по границях зерен. Обумовлюється це технологією виплавки й приводить до втрати пластичності при температурах деформації.

7) *Температурний фактор*. Його вплив неоднозначний. Підвищення температури прискорює процеси знеміцнення, збільшує амплітуду коливання атомів

у решітці і знижує напруженість останньої. Однак доцільно, щоб температура не перевищувала *певного рівня*; вище *цієї температури* відбувається перегрів металу й падіння рівня пластичності.

8) *Швидкість випробування*. При підвищенні швидкості випробування пластичність зразка з одних матеріалів збільшується, з інших зменшується.

Таким чином, пластичність металу (сплаву) може бути виражена як функція перерахованих постійних і змінних елементарних факторів. Із цих факторів тільки останні п'ять є змінними й можуть змінюватися зі зміною стану матеріалу. Що стосується перших трьох факторів, то значення їх для даного матеріалу постійно, не змінюється зі зміною його стану. Це дозволяє розглядати пластичність матеріалу як його властивість, а не стан.

Тема 4. Загальні відомості про пластичність і деформуємість

Деформуємість зливків знижується в міру зростання номера групи сплаву. Чим більше легований сплав і вище номер групи, тим нижче середній бал деформуємість.

Рівень пластичності матеріалу впливає на деформуємість тіла, а при сталості розмірів, форми тіла й зовнішніх факторів деформації розходження в пластичності матеріалів є єдиним чинником, що обумовлює неоднакову деформуємість однакових за формою тіл (зливків, заготовок).

Вплив рівня пластичності матеріалу на деформуємість тіл проявляється також при порівнянні металу різних плавів однієї й тієї ж сталі або того самого сплаву. Зливки плавки 1 (рис. 1, а) кувалися добре, а зливки плавки 2—4 незадовільно. Дані ударної в'язкості (показника - критерію пластичності й деформуємість) збігаються. Такі ж дані отримані для сплаву типу ХН70 (рис. 1, б).

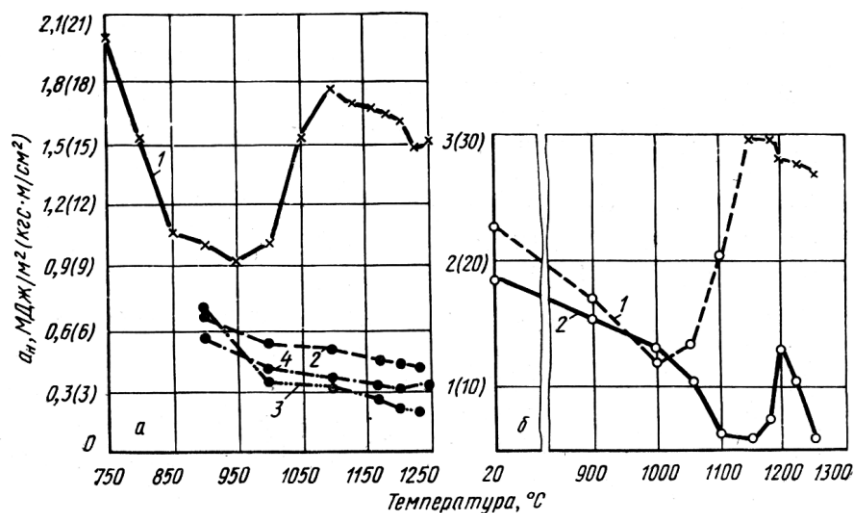


Рис. 1 Залежність ударної в'язкості a_n від температури для різних плавів сплаву типу 80НХС (а) з гарною (1) і незадовільною (2 — 4) ковкістю й типу ХН70 (б) з гарною (1) і незадовільною (2) ковкістю;
X — зразок не руйнувався

Характер зміни ударної в'язкості від температури дозволяє вибрати оптимальні температурні області для деформування, у межах яких забезпечувалася б краща деформуємість зливків і заготовок даної плавки. Наприклад, температурні області задовільної ковкості зливків і максимальної пластичності металу, яка виражена через величину a_n (рис. 1), добре збігаються. Цікаво відзначити, що зливки плавки 1 добре кувалися в інтервалі температур 900—1100 °С, а вище цієї температури їх не вдалося прокувати. У той же час зливки плавки 2 й 3 не могли проковувати задовільно в зазначеному інтервалі, але успішно кувалися в інтервалі температур 1100—1250° С.

Випробування зразків зі сплаву Х20Н80 на ударний вигин і крутіння з балом ковкості злитків 2, 3 й 4, а також випробування на крутіння зразків зі сплаву ХН70 характеризують вплив рівня пластичності металу на деформуємість зливків і заготовок. Можна сказати, що при даних розмірах, формі тіла й даних зовнішніх факторів успішне деформування зливка, заготовки може бути досягнуте у випадку, коли фактичний рівень пластичності матеріалу дорівнює або вище $\Pi_{по}$.

Чим менш сприятливий фактор M_x , тим вище повинен бути рівень потрібної пластичності $\Pi_{по}$. У малолегованих або середньолегованих сталей звичайно завжди $\Pi > \Pi_{по}$ і деформування зливків і заготовок із таких сталей протікає цілком

успішно. Зі зростанням ступеня легування сталей і сплавів за тих самих умов зростає необхідний рівень пластичності, у той час як фактичний рівень пластичності в міру підвищення ступеня легування, навпаки, знижується. У силу цього фактичний рівень пластичності часто виявляється нижче необхідного, тобто $\Pi < \Pi_{\text{по}}$, і тоді успішне деформування тіла в тих же умовах стає неможливим.

В таких випадках поліпшити деформуємість зливків і заготовок можна відповідною зміною їхніх геометричних факторів, поліпшенням зовнішніх факторів деформації, у тому числі схеми напруженого стану, підвищенням дрібності деформації й числа проміжних підігрівів.

Тема 5. Види зниженої пластичності

Основною причиною гіршої деформуємісті високолегованих сталей і сплавів у порівнянні з вуглецевими або легованими конструкційними є зниження рівня пластичності.

Зниження пластичності (скорочено ЗП) високолегованих сталей і сплавів пояснюють високим легуванням. У дійсності в кожному випадку це зниження обумовлюється певними фізико-хімічними процесами, що протікають у матеріалі: утворенням нових структурних складових і фаз або перерозподілом існуючих, зміною кристалічної структури, утворенням і підвищенням кількості легкоплавких включень й ін.

Кожний з таких фізико-хімічних процесів самотійно або в сполученні з іншими може понизити пластичність. Стосовно до теорії пластичної деформації й обробки металів тиском всі ці процеси можна умовно розділити на чотири основних види (рис. 2).



Рис. 2 Класифікація видів зниженої пластичності

Перші три види ЗП (ЗП1, ЗП2, ЗП3) визначаються головним чином хімічним складом сталі або сплаву, його легуванням структурним станом. Наявність ЗП можна передбачати по структурній діаграмі стану й вибрати режими гарячої пластичної деформації відповідно до передбачуваного рівня пластичності.

Четвертий вид зниження пластичності (ЗП4) визначається головним чином умовами виплавки металу, ступенем розкислення, чистотою його від легкоплавких елементів (Pb, Sn й ін.) і з'єднань, що розташовуються пліночно по границях зерен. Цим пояснюється й те, що ЗП4 притаманне лише металу даної плавки, у той час як інша плавка такого ж марочного складу при тому же структурному стані може не мати цей вид ЗП.

5.1 ПЕРШИЙ ВИД зниження пластичності (ЗП1)

Перший вид ЗП характеризується загальмовуванням у полікристалічному матеріалі внутризеренного ковзання, пов'язаного з високим легуванням. Тому ЗП1 зустрічається звичайно при деформуванні зливків і заготовок із високолегованих сталей і сплавів або при випробуваннях і практично не зустрічається при

деформуванні таких же тіл з вуглецевих або звичайних легованих конструкційних сталей. Перший вид ЗП обумовлюється двома відносно близькими процесами, що послідовно протікають у високолегованих сталях і сплавах.

У першому випадку ЗП1а знижена пластичність викликана високим легуванням твердого розчину різними елементами без утворення помітної кількості дисперсної зміцнюючої фази (наприклад, легування елементами: Mn, Cr, Ni, Mo й ін.). Розчинені елементи спотворюють решітку твердого розчину. Цей ефект зростає зі збільшенням ступеня легування й атомних радіусів легуючих елементів.

При цьому в результаті утворення місцевих опуклостей і скривлень спотворюються площини ковзання й підвищується опір зрушенню, обмежується протікання зсувних процесів. Деформація переходить значно раніше в стадію з різким зростанням коефіцієнта зміцнення.

Одночасно із цим загальмовуються процеси знеміцнення. У результаті виявляється необхідним підвищення температури.

Для сталей, що мають ЗП1 характерна плавна зміна рівня пластичності в широкому діапазоні температур, а також незначне падіння пластичності в області температур 700-900°C. На рис. 3 до ЗП1а відноситься сплав 1.

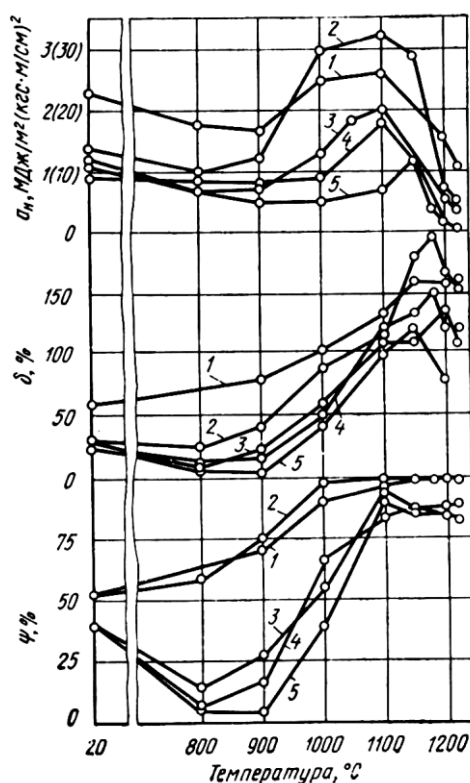


Рис. 3 Криві значень пластичності для п'яти груп сплавів, різних груп:
 1 — Х20Н80; 2 - ХН77ТЮР; 3 — ХН70ВМТЮ; 4 — типу EI826;
 5 — типу EI929

У другому випадку ЗП1б ЗП обумовлюється одночасним протіканням двох процесів: пересиченням твердого розчину й утворенням мілкодисперсних часток зміцнюючої інтерметалідної фази, що розташовуються по площинах ковзання й блокують процеси ковзання не тільки усередині, але й по границях зерен. Тому в цьому випадку рух дислокацій, процеси ковзання й внутрішньозеренна деформація в цілому, як і міжзеренні переміщення, ще більш загальмовуються, у порівнянні із ЗП1а й часто деформація із самого початку переходить у стадію з різким зміцненням. Матеріал досить швидко зміцнюється й подальше деформування його у звичайних умовах практично неможливо, поки в структурі (матриці) утримується значна кількість мілкодисперсної зміцнюючої фази. На мал. 3 до ЗП1б відносяться сплави 2—5, у яких кількість дисперсної зміцнюючої фази послідовно зростає. Це викликає відповідне падіння пластичності при температурах нижче температури розчинення цієї фази, кількість якої зростає в міру збільшення ступеня легування й номера групи сплаву.

Таким чином, важливою технологічною властивістю старіючих сталей і сплавів, що мають перший вид ЗП (ЗП1б), є те, що для них характерні наступні дві структурні області:

1. Область існування двофазної структури, що складається з пересиченого твердого розчину, і часток зміцнюючої фази; міцність її може різко зростати й рівень пластичності знижуватися до рівня, що практично виключає можливість пластичної деформації.

2. Високотемпературна область - область існування лише однофазної структури високолегованого твердого розчину, що має більш високий рівень пластичності в порівнянні із двофазною структурою. Ця область обмежена, з одного боку, двофазною областю (знизу), а з іншого, - температурою перегріву матеріалу, є областю гарячої пластичної деформації старіючих сталей і сплавів.

У міру підвищення ступеня легування підвищується температура початку виділення часток зміцнюючої фази при охолодженні або їхнього розчинення при

нагріванні, розширюється область існування двофазної структури за рахунок відповідного звуження області гомогенної структури й у випадку, коли ця область звужується до певного мінімуму, гаряча пластична деформація сплаву виявляється практично неможливою. У цьому випадку сплав переходить у категорію недеформуємих ливарних сплавів.

Залежно від ступеня легування сучасні важкодеформуємі сталі й сплави, що Мають ЗПІ, поділяють на п'ять груп.

До першої групи (I) відносяться важкодеформуємі сталі й сплави (ХН10ДО, 06ХН28МДТ, Х15Н60, Х20Н80, ХН70, ХН78Т, Х1175МБТЮ, ЭП375, Н70МФ й ін.) Знижена пластичність у сталей і сплавів розглянутої групи обумовлюється викривленням кристалічної структури й перешкодами ковзанню, які створюються чужорідними атомами у твердому розчині.

До другої групи (II) відносяться важкодеформуємі сталі й сплави (ХН35ВТЮ, ХН80ТБЮ, ХН60Ю, ХН77ТЮР, ХН60ВТ, Х1177ТЮ, ХН75МБТЮ й ін.), у яких знижена здатність до ковзання, низька пластичність і високий опір деформуванню виражені більш різко, ніж у сплавів першої групи, що обумовлено утворенням при охолодженні з високих температур пересиченого твердого розчину й виділенням дисперсної зміцнюючої γ - фази в кількості 10-15%.

Найбільш значне падіння пластичності досягається в області існування γ - фази. Тому пластичну деформацію варто проводити, коли матеріал нагрітий до температури, що вище температури початку коагуляції й розчинення часток зміцнюючої фази.

Коагуляція й розчинення часток зміцнюючої фази для сплавів даної групи починається з 800—850°C і закінчується при 950—975°C розчиненням цієї фази. Гальмуюча дія часток γ - фази поступово зменшується, а потім і повністю усувається; пластичність сплаву підвищується до рівня пластичності сплавів першої групи.

До третьої групи (III) відносяться важкодеформуємі сталі й сплави (ХН70ВМЮТ, ХН70МТЮ, НХ70МВТЮБ, ХН67МВТЮ, ХН50ВМКТЮ, ХН35ВТЮР й ін.), більше високолеговані й більш інтенсивно старіючі, починаючи з 900—930°C при охолодженні з високих температур. Кількість дисперсної фази, що

виділяється, досягає 20-25%, тому в зістареному стані метал виявляється більше твердим і крихким, що не допускає пластичної деформації. Сплави даної групи мають в області аустенітизації більш високий опір деформації й більш низьку пластичність. У порівнянні зі сплавами другої групи в них більше низька температура перегріву й звужені температурні інтервали деформації.

До четвертої групи (IV) відносяться ще більш високолеговані важкодеформуємі сплави (ХН70ВМТЮФ, ХН75ВМЮ й ін.), що більш інтенсивно старіють, починаючи з 950—980°C при повітряному охолодженні з високих температур, більше тверді й крихкі в зістареному стані й з більшою (до 30—35%) кількістю зміцнюючої фази. Сплави даної групи в стані аустенітизації мають більш високий опір деформації, більше низьку пластичність, більш низьку температуру перегріву й характерні звуженим температурним інтервалом пластичної деформації в порівнянні зі сплавами третьої групи.

До п'ятої групи (V) відносяться особливо важкодеформуємі сплави (ХН55ВМТКЮ, ХН56ВМКЮ, ХН62МВКЮ й ін.), інтенсивно старіючі, починаючи з 1000—1050°C та навіть із 1100° С. При охолодженні з високих температур кількість зміцнюючої фази в цих сплавах досягає 40—45%, завдяки чому в зістареному стані вони ще більш крихкі. Ці сплави характеризуються ще більшим опором деформації, більш низькою температурою перегріву й більш вузьким температурним інтервалом пластичної деформації, що досягає 50—70°C. Вони мають ще більш низьку пластичність в стані аустенітизації, тому пластична деформація їх ще більш утруднена.

5.2 ДРУГИЙ ВИД зниження пластичності (ЗП2)

У литому стані структура сталей і сплавів, що мають ЗП2, складається звичайно із кристалітів твердого розчину й сітки надлишкової евтектичної складової, що завжди має більше низьку пластичність, чим кристали твердого розчину. Рівень пластичності зерен твердого розчину завжди вище, чим в евтектичної складової, і залежить від основи, характеру й ступеня легування твердого розчину.

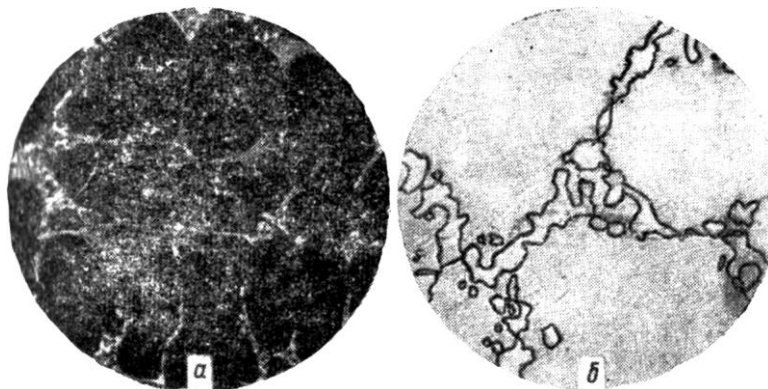


Рис. 4. Мікроструктура сталей у литому стані з характерним розташуванням непластичної евтектичної складової навколо зерен твердого розчину: *a* — швидкорізальна сталь Р18, $\times 100$; *б* — нержавіючий аустенітний сплав марки EI461 (типу EI639), $\times 300$

Найбільш характерними сталями й сплавами, що мають ЗП2, є:

- а) вуглецеві леговані інструментальні й швидкорізальні сталі ледебуритного (евтектичного) класу В20, Х12, Х12М, Р9, Р18, Р18Ф2ДО8М, Р12Ф2ДО8МЗ й ін.;
- б) аустенітні сталі евтектичного класу 4Х18Н25С2, Н65М27 (EI461), Н70МФ (EP496,) ХН65МФ (ЭП567) і ін.

За певних умов пластична деформація руйнує сітку крихкої складової й розосереджує частки, що утворилися, її «уламки» і тим більшою мірою, чим більше деформація.

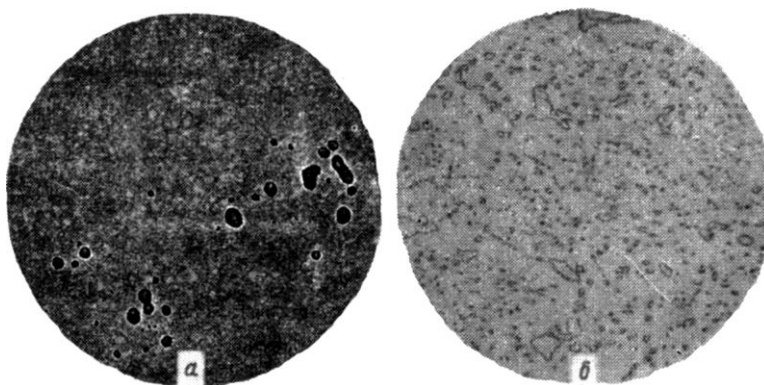


Рис 5. Мікроструктура сталей у деформованому стані:
a - Р18, $\times 100$; *б* — EI461, $\times 300$

Треба, однак, мати на увазі, що перегрів деформованої структури може привести знову до перерозподілу надлишкової складової й повернути її в стан, що відповідає вихідній литій структурі, з одночасним зниженням пластичних властивостей до рівня властивостей литої структури.

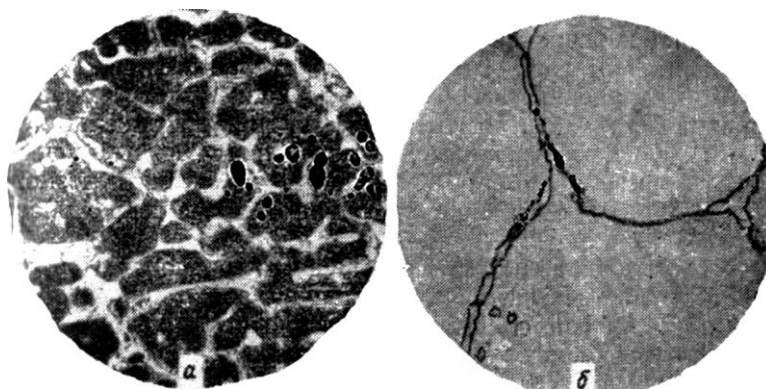


Рис. 6. Мікроструктура деформованого металу після перегріву:
а Р18; х100; б — EI461, х300

У сталі Р18 кількість евтектичної складової досягає 27,5%, а в сталі Р9- 12%

5.3. ТРЕТІЙ ВИД зниження пластичності (ЗПЗ)

Цей вид ЗП обумовлюється наявністю в сталі двох або декількох пластичних металевих структурних складових, що мають різні фізичні властивості. У процесі обробки тиском, коли фази мають різний опір деформації, остання проходить вибірково, головним чином за рахунок фази з мінімальним значенням опору деформації. На частку цієї фази доводяться більші фактичні ступені деформації з більш значними швидкостями. Надмірно високі фактичні ступені й швидкості деформації фази з меншим опором деформації приводять до локального руйнування часток цієї фази в обсязі деформуємого тіла. Ці осередки руйнування розвиваються далі, але вже й за рахунок іншої фази.

Чим більше різниця у властивостях двох структурних складових, тим різкіше буде виражена неоднорідність їх деформації при деформуванні зливків і заготовок. Одним із представників двофазних сталей є сталі 1Х18Н9, 08Х19Н10Б и EI606.

Особливий механізм процесів пластичної деформації двофазних сталей необхідно враховувати при складанні технології їхньої обробки тиском.

Даний вид ЗП (ЗПЗ) добре виявляється за допомогою звичайного випробування на крутіння зразків з будь-яким розташуванням волокна, при визначенні ударної в'язкості й розтяганні зразків.

5.4. ЧЕТВЕРТИЙ ВИД зниження пластичності (ЗП4)

Кристалічна структура навіть у чистого полікристалічного металу не є однорідною (гомогенною). Вона складається зі структури самих зерен, більше однорідної, з відносно правильною кристалічною будовою, і структури границь зерен зі значними порушеннями правильної кристалічної будови. Границі зерен мають підвищений рівень енергії й більше високу хімічну активність.

При температурі T_3 певного рівня $\sigma_{гр} > \sigma_3$ (рис. 7).

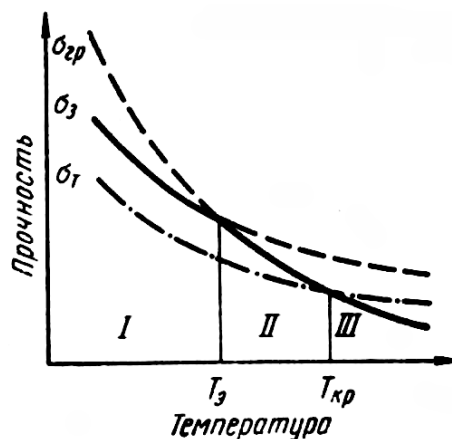


Рис. 7 Схеми зміни співвідношення міцності границь зерна $\sigma_{гр}$, тіла зерна σ_3 та межі текучості $\sigma_Т$ від температури: I – область високої пластичності $\sigma_{гр} > \sigma_3 > \sigma_Т$; II – область обмеженої пластичності $\sigma_3 > \sigma_{гр} > \sigma_Т$; III – область плохого пластичності $\sigma_3 > \sigma_Т < \sigma_{гр}$

При підвищенні температури більш інтенсивно падає значення $\sigma_{гр}$ й у певний момент досягається рівність $\sigma_{гр} = \sigma_3$, а вище цієї температури $\sigma_{гр} < \sigma_3$. Це й обумовлює міжкристалітне руйнування металу при $T_d > T_3$ й зниження рівня його пластичності, а також вибірне оплавлення границь зерен по мірі подальшого підвищення температури. Однак у чистих металів температура T_3 досить висока й наближається до температури початку оплавлення самих зерен. Чисті метали зберігають гарну пластичність до високих температур, оскільки в них мала різниця температур початку оплавлення самих зерен й їхніх границь. Така різниця завжди виявляється в сталях і сплавах з полікристалічною структурою й у чистих металів, навіть якщо відсутній вплив на стан границь зерен атомів легкоплавких елементів

або інших легкоплавких включень. При цьому в чистих металах ця різниця відносно мала.

Для відносно м'яких конструкційних сталей (вуглецевих і легованих), а також для сталей феритного класу різниця описаних температур незначна, тому їх не слід відносити до ЗП4.

У той же час у високолегованих сталей і сплавів на границях зерен поряд з порушенням правильної кристалічної структури й підвищеним рівнем енергії можуть також концентруватися атоми більш легкоплавких елементів, легкоплавкі з'єднання або евтектики. Цим пояснюється більше інтенсивне й більше раннє падіння значення σ_{gr} в порівнянні з σ_z і завдяки цьому більше раннє й більше значне зниження температури T_z й $T_{кр}$ (рис. 7). Вище температури $T_{кр}$ міцнісні характеристики зерен зберігаються ще досить високими, а міцність границь зерен різко падає: полікристалічний матеріал представляється як конгломерат відносно слабо зв'язаних між собою зерен.

Таким чином, ЗП4 має високотемпературний характер і спостерігається, як правило, в області високих температур.

Зниження T_z обумовлює скорочення області, у якій $\sigma_{gr} > \sigma_z$, і внутрішньозеренна деформація є переважною, а рівень пластичності матеріалу найбільший. У цій області матеріал здатний деформуватися при значних напругах, що розтягують, і проявляє максимальну пластичність. В області, де спостерігається $\sigma_{gr} < \sigma_z$, міжзеренні деформації отримують великий розвиток. Завдяки цьому знижується пластичність матеріалу, особливо, якщо при формуванні тіла з такого матеріалу діють значні напруги, що розтягують. Такі напруги можуть приводити до міжзеренного руйнування матеріалу, а успішне деформування тіла з такого матеріалу може протікати лише тоді, коли є об'ємні стискаючі напруги або частка напруг, що розтягують, досить мала.

Даний вид ЗП легко виявляється випробуванням на удар, крутінням або розтяганням в області температур гарячої деформації.

Розходження в характері руйнування матеріалу порівнюваних плавок з нормальною пластичністю й плавок що мають ЗП4 видно з рис. 8 та рис. 9. Зразки

плавки з гарною ковкістю руйнувалися після значної пластичної деформації, їхній злам не має міжкристалітного характеру. Зразки матеріалу із ЗП4 зруйнувалися крихко, без помітної попередньої пластичної деформації.

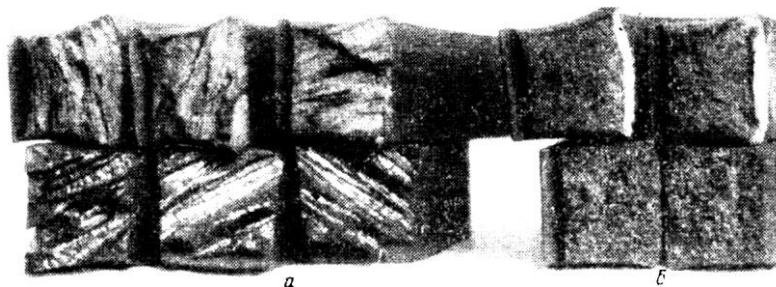


Рис. 8. Злами ударних зразків сплаву EI334 з поганою ковкістю (нижній ряд) і гарною ковкістю (верхній ряд), які взяті з недеформованого зливка (а) і кованої заготовки 80 x 80 мм (б); температура випробування 1150° С

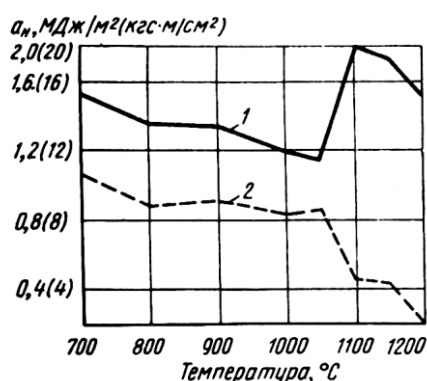


Рис. 9. Ударна в'язкість зразків сплаву EI334 з хорошою (1) та плохую (2) ковкістю при високих температурах

Важливою особливістю ЗП4 є те, що при температурі Нижче T_g міцність границь зерен, а також пластичність матеріалу відновлюються.

Необхідно відзначити, що даний вид ЗП більш чітко виявляється при випробуваннях зразків на удар.

Виникнення четвертого виду ЗП (ЗП4) може бути викликано наявністю по границях зерен атомів легкоплавких елементів, практично нерозчинних у даному матеріалі й тому що завжди концентруються по границях зерен полікристала (свинець, олово, сурма, сірка й ін.), а також утворенням легкоплавких з'єднань типу FeS, FeO, NiO, SiO й ін. Для переводу таких з'єднань у більш тугоплавкі, крім Al й Ti, застосовують звичайно добавки таких активних розкислювачів, як Ca, Ce, Zr й ін.

При недостатності розкислювачів не досягається потрібний ефект, а надлишкова кількість їх може самостійно приводити до такого ж виду ЗП.

Попередня пластична деформація литих і деформованих заготовок звичайно не приводить до помітного підвищення пластичності матеріалу, що має ЗП4.

Зменшення розмірів зливків або заготовок при незмінному рівні пластичності сприяє поліпшенню їх деформуємості при обробці тиском. Поліпшують деформуємість тіла з матеріалу, що має ЗП4, і такі заходи, як заміна при прокатці ящикових або ромбічних калібрів овальними або круглими, використання круглих вирізних бойків при куванні, зменшення одиничних обтиснень.

Поліпшення деформуємості зливків і заготовок у зазначених випадках досягається зменшенням нерівномірності деформації й поліпшенням схеми напруженого стану.

Найбільш радикальним засобом підвищення пластичності матеріалу, що має ЗП4, є переміщення його з області вище T_s в область нижче T_s , тобто підстужування металу. Підстужування приводить до більше значного зміцнення його в процесі обробки. Тому обладнання для обробки повинне мати необхідний запас потужності й міцності. Відповідно необхідно зменшити величини часних обтиснень і збільшити число підігрівів.

У зливків або заготовок підстужується лише поверхнева зона, на якій можливо утворення розривів, а внутрішня зона, піддана до деякої міри об'ємному стиску, зберігає високу температуру, що сприяє більш успішному деформуванню. Підстужування роблять до $1100\text{—}850^\circ\text{C}$ у залежності від ступеня зниження T_s у металу даної плавки. Варто мати на увазі, що підстужування можливо лише в тих випадках, коли це не приводить до значного підвищення крихкості металу. Із цього погляду недоцільно підстужувати метал, що має ЗП1б і ЗП2. У першому випадку підстужування може приводити до утворення дисперсної зміцнюючої фази, підвищення крихкості металу, у другому - до додаткового підвищення крихкості евтектичної складової сплаву.

Часто підстужування є єдиним заходом, що дозволяє більш-менш успішно проковувати зливки або заготовки з матеріалу, що має ЗП4.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що є елементарним актом пластичної деформації?
2. Що є мірилом пластичності матеріалу?
3. Що забезпечує можливість ковзання атомних площин?
4. Які напрямки існують в літературі для опису процесу пластичного формзмінення?
5. Чи може з фізичної точки зору розглядатися метал як однорідне тіло?
6. Чи можна розглядати наявність кордонів кристалів як причину однорідності деформованого середовища?
7. Чи можна розглядати кристалічну будову металів як причину однорідності деформованого середовища?
8. Пластична деформація однорідна або неоднорідна?
9. На які основні групи розділені механізми пластичної деформації?
10. Які механізми пластичної деформації відносяться до зсувних?
11. Які механізми пластичної деформації відносяться до дифузійних?
12. Які механізми пластичної деформації відносяться до прикордонних?
13. У чому полягає механізм дифузійної пластичності?
14. У чому полягає механізм зсувної пластичності?
15. У яких напрямках відбувається переважне ковзання атомів?
16. Більша кількість смуг ковзання свідчить про ...?
17. Підвищення напружень при деформації призводить до?
18. Пластична деформація на мікрорівні йде в наступній послідовності ...?
19. Що називається міжзеренною пластичністю?
20. Яка умова призводить до виникнення внутрішньозеренної деформації?
21. Що розуміється під терміном - пластичність?
22. Що розуміється під терміном - деформуємість?
23. Характеризує чи ні термін "деформуємість" умови деформування тіла або агрегату?
24. З якими факторами зазвичай пов'язують деформуємість?
25. Чи може бути компенсовано зниження пластичності поліпшенням умов деформування?
26. Який з методів випробування є універсальним для визначення показника

пластичності?

27. Які фактори впливають на пластичність?

28. Знижується чи ні пластичність металу при збільшенні легування?

29. Чи існує у спеціальних сталей оптимальний температурний інтервал деформування?

30. У чому причина зниженої пластичності першого типу?

31. У чому причина зниженої пластичності другого типу?

32. У чому причина зниженої пластичності третього типу?

33. Чим супроводжується знижена пластичність першого типу?

34. Чим супроводжується знижена пластичність другого типу?

35. Чим супроводжується знижена пластичність третього типу?

36. Чим супроводжується знижена пластичність четвертого типу?

37. Коли сталь, що володіє ПП1б, має найвищу пластичністю?

38. Чи підвищується пластичність, якщо сталь, що володіє ПП2, піддається деформації для дроблення сітки крихкої складової?

39. Чи підвищується пластичність, якщо сталь, що володіє ПП2, піддається перегріву і перерозподілу надлишкової складової?

40. Чи приводить попередня пластична деформація до підвищення пластичності матеріалу, що володіє ПП4?

41. Чи приводить зменшення розміру злитка до підвищення деформуємості матеріалу, що володіє ПП4?

42. Заміна яких калібрів на які сприяє підвищенню деформуємості матеріалу, що володіє ПП4?

43. Зменшення одиничних обтиснень сприяє чи ні підвищенню деформуємості матеріалу, що володіє ПП4?

44. Підстужування злитка перед деформацією сприяє чи ні підвищенню деформуємості матеріалу, що володіє ПП4?

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А.А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ. - 2002. – 329 с.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением/В. Л. Колмогоров - М: Металлургия, 1986. - 688 с.
3. Дзугутов М.Я. Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением / М.Я. Дзугутов. – М.: Металлургия. – 1974. – 280 с.
4. Дзугутов М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / М.Я. Дзугутов. – М.: Металлургия. – 1977. – 480 с.