

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ВПЛИВ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ НА СТРУКТУРУ І ТВЕРДІСТЬ СТАЛІ

Мета роботи – вивчити вплив холодної пластичної деформації та подальшого нагрівання на структуру і твердість сталі 08кп (0,08% С, кипляча) та неіржавіючої сталі 08ХІ8Т1 (0,08% С, 18% Cr, 1% Ti); визначити для них температурний поріг рекристалізації та встановити температуру рекристалізаційного відпалення.

4.1. Загальні відомості

Здатність металів і сплавів деформуватися під дією зовнішніх сил використовують у промисловості для формування виробів та напівфабрикатів прокаткою, волочінням, куванням, штампуванням тощо.

Розрізняють холодну (нижче $0,3T_{\text{топ}}$), теплу ($0,3...0,5 T_{\text{топ}}$) та гарячу (вище $0,5T_{\text{топ}}$) деформації.

4.1.1. Пружна та пластична деформація

Під дією напружень, величина яких менше ніж границя пружності, в металах виникає пружна деформація. Якщо навантажити метал вище границі пружності, виникає пластична залишкова деформація. При розвантаженні первісна форма та розміри зразка не відновлюються, тому що відбувається незворотній зсув одних частин кристала відносно інших (рис. 4.1 в, г, д) частин кристалу. Основними механізмами зсуву при пластичній деформації є ковзання та двійникування (рис. 4.2).

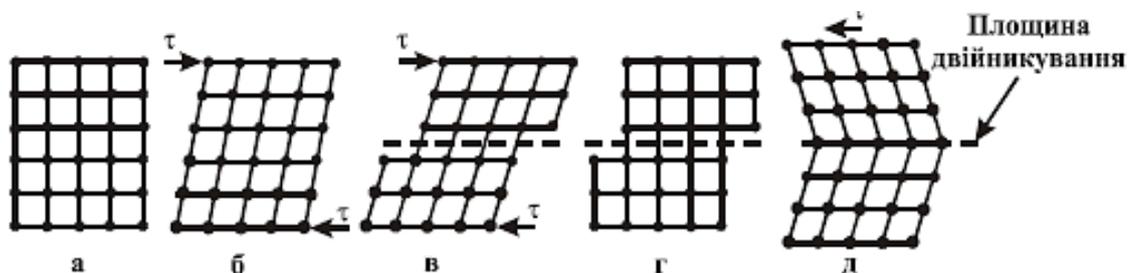


Рис. 4.1. Схема пружної (б) та пластичної (в, г, д) деформації:
а – вихідний стан; в, г – деформації ковзанням;
д – деформація двійникуванням

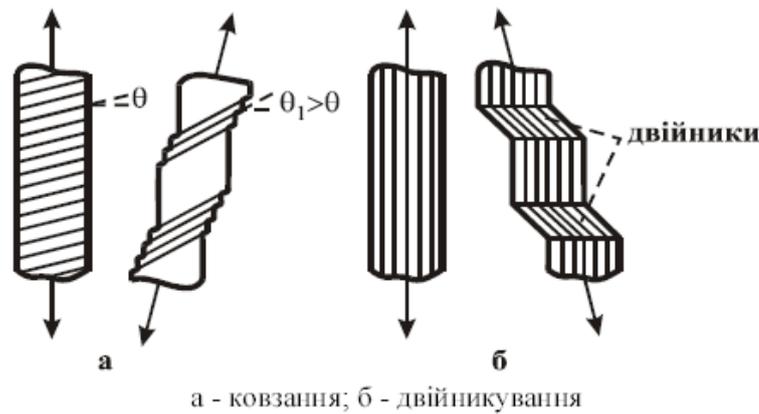


Рис. 4.2. Схеми пластичної деформації

Деформація ковзанням проходить під дією дотичних напружень, більших ніж критичні напруження, по щільно пакованим кристалографічним площинам і напрямкам (рис. 4.3).

В металах з ГЦК граткою (γ -залізо, нікель, мідь, алюміній тощо) – це система $(111) [110]$; з ОЦК – (α -залізо, хром, вольфрам, молібден тощо) – $(110) [111]$, $(112) [111]$; з ГЦП граткою (магній, цинк, α -титан тощо) – $(0001) [2110]$.

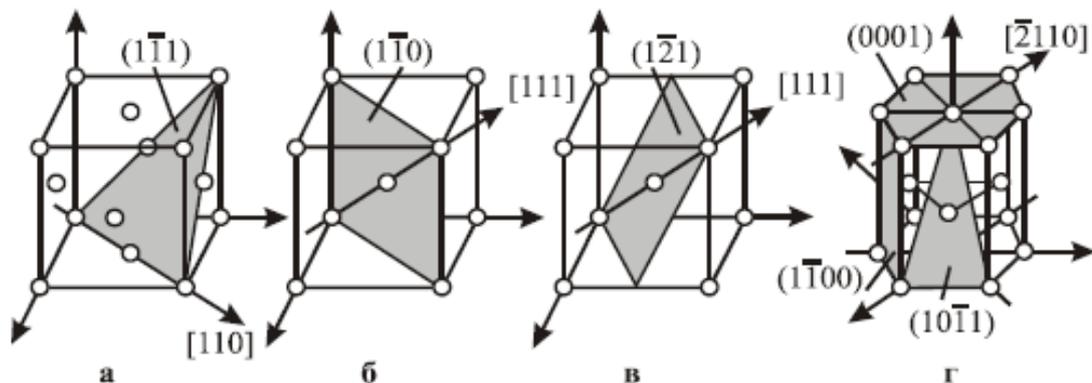


Рис. 4.3. Системи ковзання в ГЦК (а), ОЦК (б, в), ГЦП (г) гратках

Через те, що метали з гексагональною щільнопакованою граткою мають найменшу кількість систем зсуву, вони менш пластичні і тому важче піддаються деформації, ніж метали з ГЦК та ОЦК гратками.

Пластична деформація може також здійснюватися двійникуванням. У цьому випадку частина кристалу перебудовується в дзеркально симетричне положення відносно початкового (рис. 4.1, д та 4.2, б). Двійникування відбувається у тих випадках, коли зсув ускладнено, особливо при низьких температурах та великих швидкостях деформування.

У реальних кристалах дотичні напруження, необхідні для зсуву, в 100...1000 разів менші розрахункових (теоретичних), що зумовлено присутністю великої кількості дислокацій, що полегшують зсув.

Дислокації – лінійні дефекти кристалічної будови, що виникають при кристалізації і завжди існують в кристалах. Їх наявність значно спотворює кристалічну гратку та зменшує рівень дотичних напружень, необхідних для зсуву,

за рахунок реалізації естафетного механізму розриву та відновлення міжатомних зв'язків (рис. 4.4).

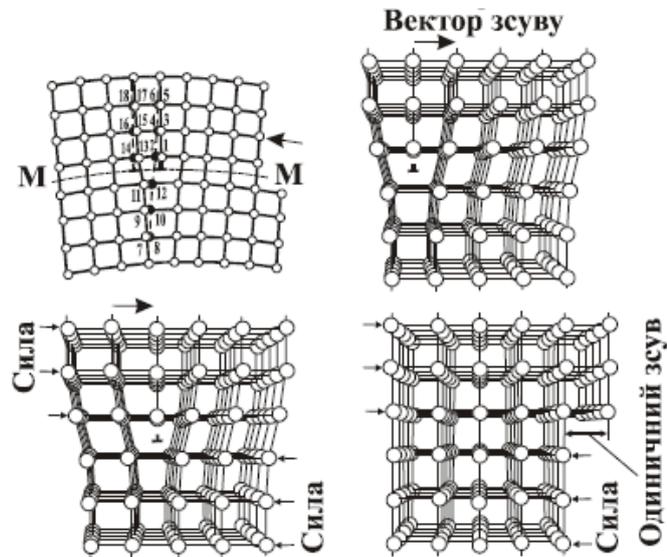


Рис. 4.4. Схема ковзання крайової дислокації з виходом на поверхню

При великій кількості дислокацій можливе їх перетинання, утворення порогів, що зменшує рухомість та потребує для їх переміщення більших напружень, внаслідок чого метал зміцнюється. Кількісною характеристикою дислокацій є густина – сумарна довжина дислокаційних ліній L в одиниці об'єму

$$V \left(\rho = \sum L/V, \text{см}^{-2} \right).$$

Дислокації виникають при кристалізації металів. Значна деформація супроводжується появою великої кількості нових дислокацій. При цьому густина дислокацій зростає від $106...108$ до $1010...1012 \text{ см}^{-2}$.

4.1.2. Структура та властивості холоднодеформованих металів

При малих ступенях деформації (2...5 %) в полікристалах через хаотичність орієнтування зерен деформація не може проходити одночасно у всьому об'ємі металу. В першу чергу деформуються ті зерна, в яких площини легкого ковзання найбільш сприятливо розташовані відносно напрямку діючої сили (під кутом 45°). Зі зростанням деформації зменшується розорієнтація зерен, змінюється їх форма – вони витягуються у напрямку прикладеної сили, утворюють волокнисту структуру. При цьому виникає переважна кристалографічна орієнтація, так звана текстура деформації, характерна тим, що більшість зерен зорієнтовано певним кристалографічним напрямком відносно зовнішніх діючих сил (наприклад, за напрямком прокатки або волочіння). Текстура приводить до анізотропії властивостей.

Одночасно зі зміною форми в останньому виникає особлива комірчаста структура з комітками розміром $1...2 \text{ мкм}$ із розорієнтацією $2...5^\circ$, розділеними невпорядкованими дислокаційними межами. Така структура спостерігається за допомогою електронного мікроскопа. Передача деформації через межі зерен і комірок супроводжується ще більшим нагромадженням дислокацій, зменшенням

їх рухомості; зростає опір деформації – метал зміцнюється. Явище зміцнення металів при пластичній деформації називається наклепом і супроводжується зростанням характеристик міцності, твердості (σ_B , $\sigma_{0,2}$, НВ), зниженням пластичності (δ , Ψ) та ударної в'язкості (КСУ). У цьому проявляється єдність суперечних по своїй суті властивостей – міцності та пластичності: міцність визначається опором рухові дислокацій, а пластичність пов'язана з можливістю їх переміщення.

Відповідно до збільшення ступеня деформації та росту густини дислокацій збільшується їх взаємне блокування і гальмування. В результаті поступово вичерпується можливість пластичної деформації (у дуже наклепаних металах відносно видовження $\delta \approx 0\%$), а зростання прикладеного зусилля приводить до руйнування металу. Внаслідок наклепу твердість і границю міцності вдається збільшити в 1,5...3 рази, а границю плинності – в 5...7 раз.

Із збільшенням ступеня деформації підвищується електроопір, знижується магнітна проникність, густина металу та опір корозії через посилення дифузійних процесів. Зменшення густини зумовлено зниженням компактності просторової ґратки внаслідок виникнення в ній дефектів.

Зміцнення при наклепі використовується для підвищення механічних властивостей деталей. Так, наприклад, наклеп поверхневого шару кульками, зміцнення поверхні струменем дробу, ультразвукова обробка кульками тощо підвищує опір втомі. І, навпаки, зниження пластичності при наклепі використовується з метою покращення обробки різанням в'язких пластичних матеріалів: латуней, сплавів алюмінію та інших.

4.1.3. Вплив нагрівання на структуру та властивості холоднодеформованого металу

Стан деформованого металу термодинамічно нестабільний. Перехід до більш стабільного стану з меншою вільною енергією відбувається при його нагріванні. Процеси, що проходять при нагріванні, супроводжуються практично повним відновленням фізичних та механічних властивостей та умовно поділяються на три температурні стадії: відпочинок, полігонізація, рекристалізація.

Відпочинок і полігонізацію називають відновою. Для цих стадій характерно лише часткове відновлення властивостей (рис. 4.5).

Відпочинок металу проходить при низьких температурах нагрівання ($0,1...0,3 T_{пл}$). Перерозподіл та зменшення кількості вакансій і міжвузлових атомів супроводжується зниженням рівня пружних деформацій. Основна частина пружної енергії, внесеної деформацією, пов'язана з високою густиною дислокацій, рухомість яких при температурах відпочинку обмежена.

Полігонізація розвивається при підвищенні температури нагрівання ($0,2...0,4 T_{пл}$). Звільнившись від атомів домішок, дислокації починають рухатися, при цьому їх густина значно зменшується. Надлишкові крайові дислокації трансформуються в малокутові межі, що поділяють кожне зерно на субзерна (комірочки). Виникає комірчаста полігональна структура, яка при певних умовах в

сплавах складної композиції може бути стабільною та сприяє збільшенню довготривалої міцності при високих температурах (жароміцності).

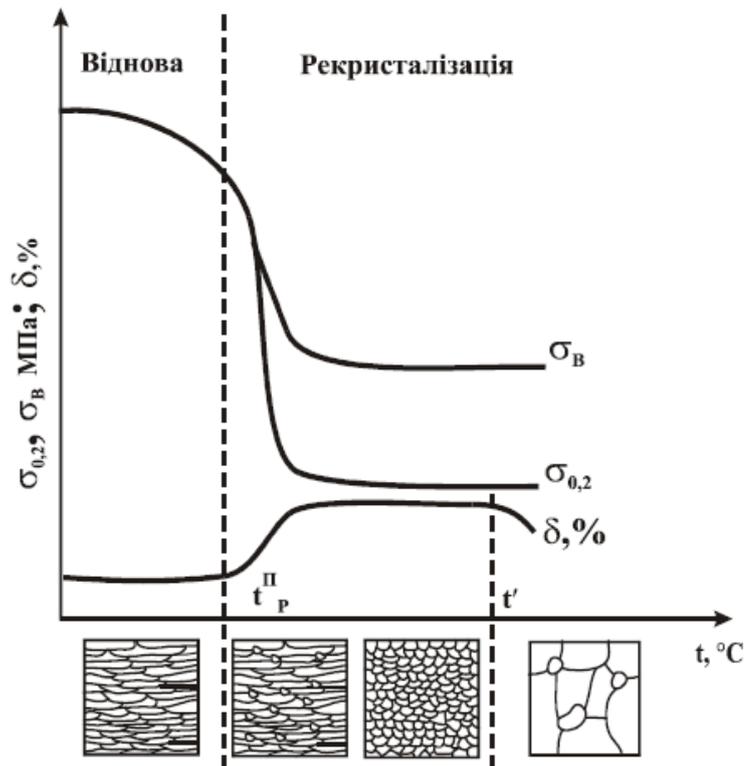


Рис. 4.5. Вплив нагрівання на механічні властивості та структуру деформованого металу

На стадії відновлення видимих змін в мікроструктурі не спостерігається (розмір та форма деформованих зерен зберігається). Зате відновлюється рівень електричного опору, підвищується густина металу та частково зменшуються твердість і міцність (рис. 4.5). Зміну в дислокаційній структурі можна виявити лише при великих збільшеннях за допомогою електронного мікроскопа.

Рекристалізація – це зародження та ріст нових рівновісних зерен, що відрізняються від деформованої матриці досконалішою ґраткою та значно меншою густиною дислокацій (рис. 4.5, 4.6). Зародки рекристалізації виникають на ділянках з найбільшою деформацією ґратки (найчастіше на межах деформованих зерен). Чим вище ступінь пластичної деформації, тим більше виникає центрів рекристалізації. Ріст зародків реалізується міграцією меж. Останні рухаються вглибину наклепаного металу у напрямку більшої густини дислокацій і залишають за собою об'єм з відносно досконалою ґраткою. Із зникненням деформованих зерен завершується первинна рекристалізація (рекристалізація обробки).

Після первинної рекристалізації зникає наклеп, створений пластичним деформуванням, збільшується пластичність. Знеміцнення пояснюється усуненням спотворень кристалічної ґратки та зменшенням густини дислокацій з 10^{12} см^{-2} до 10^6 см^{-2} ; метал набуває рівновісної структури з мінімальною кількістю дефектів, відновлюються всі його фізичні та механічні властивості (див. рис. 4.5).

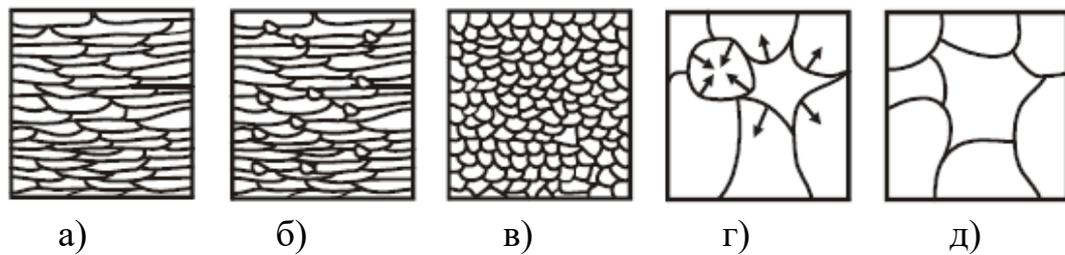


Рис. 4.6. Схема зміни мікроструктури наклепаного металу при нагріванні:
 а – наклепаний метал; б, в – початок та кінець первинної рекристалізації (рекристалізації обробки); г, д – збиральна рекристалізація

Рекристалізація проходить лише після деформації, ступінь якої перевищує визначений рівень, що зветься критичним ступенем деформації (як правило, 2...15%). Якщо *ступінь деформації менше критичного, зародження нових зерен при нагріванні не відбувається.*

Температура початку рекристалізації (T_P^{II}) – це мінімальна температура за якої з'являються 4 – 5 зародків нових зерен. Вона визначається за формулою:

$$T_P^{\text{II}} = kT_{\text{пл}} [t^0 C = k(t_{\text{пл}}^0 C + 273^0) - 273^0]$$

де k – коефіцієнт, який залежить від чистоти металу, ступеня деформації, тривалості нагрівання і дорівнює 0,1...0,2 для металів високої чистоти; 0,4 – для металів технічної чистоти та 0,5...0,8 – для сплавів; $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення металу, К.

Значно впливають на температуру початку рекристалізації домішкові атоми, легувальні елементи та дисперсні частинки надлишкових фаз.

Температурний поріг рекристалізації – це технологічна характеристика, яка залежить від чистоти матеріалу і температури плавлення, в більшості випадків визначають як температуру напівзміцнення після нагрівання тривалістю 1...2 години та значної ($\epsilon > 50\%$) попередньої пластичної деформації.

З метою повного зняття наклепу та досягнення пластичності застосовують рекристалізаційний відпал – нагрівання до температур на 100...200 °С вищих за T_P^{II} з наступним повільним охолодженням. Таке відпалення часто використовують як пом'якшувальну проміжну операцію при волочінні, після холодної прокатки та інших технологічних процесів.

Після завершення первинної рекристалізації підвищення температури викликає ріст одних рекристалізованих зерен за рахунок сусідніх, також рекристалізованих, шляхом міграції меж (збиральна рекристалізація). Основна рушійна сила цього процесу – зменшення зерномежової енергії внаслідок скорочення довжини меж зерен. Межа рухається у напрямку центру її кривизни (рис. 4.6, г). Збільшення розмірів зерен приводить до зниження пластичності (рис. 4.5, $t > t_c$).

4.1.4. Критичний ступінь деформації. Розмір зерна після рекристалізації.

Нагрівання (вище 0,4...0,8 Ттоп) малодеформованих ($\epsilon = 2...15\%$) металів супроводжується різким ростом зерен. Такий ступінь деформації називається критичним ($\epsilon_{\text{крит}}$). Це такий мінімальний ступінь деформації, перевищення якого приводить при нагріванні до виникнення та росту зародків рекристалізованих зерен. При нагріванні безпосередньо після критичного ступеня деформації зародки рекристалізації не утворюються, а проходить лише міграція меж зерен, за рахунок чого розмір останніх значно зростає.

Критичний ступінь деформації незначний, тому зерна деформуються неоднорідно: у першу чергу ті, у яких площини найбільш легкого ковзання збігаються з напрямком максимальних дотичних напружень. Існуючих дислокацій не вистачає для утворення зародків рекристалізації. Укрупнення зерен після нагрівання зумовлено, по-перше, ростом деяких первинних зерен під впливом градієнту наклепу, а по - друге – злиттям декількох зерен за рахунок поступового зникнення меж зерен при анігіляції дислокацій та інших дефектів. Укрупнення зерен приводить, як правило, до зниження властивостей металу, тому при обробці металів тиском критичного ступеня деформації уникають.

Після значної деформації ($\epsilon > \epsilon_{\text{крит}}$) швидкість появи зародків рекристалізації перевищує швидкість їх росту, що зумовлює утворення дрібних зерен. Розмір зерна залежить в основному від ступеня деформації та температури рекристалізації. Тривалість рекристалізаційного відпалення також збільшує розмір зерна, але меншою мірою, ніж температура.

4.1.5. Холодна та гаряча деформації

Холодною називають деформацію, яку здійснюють за температур нижчих від температури рекристалізації.

Гаряча деформація здійснюється за температур вище ніж $T_{\text{р}}^{\text{п}}$, тому у процесі гарячої деформації в металі одночасно спостерігаються два процеси – зміцнення і знеміцнення. В цьому випадку центри первинної рекристалізації з'являються у процесі деформації, тому рекристалізацію називають динамічною. Після гарячої пластичної деформації завершується рекристалізація і метал не наклепується. Гаряча пластична деформація, як правило, збільшує густину литої сталі, що обумовлено усуненням шпарин та раковин.

4.2. Завдання

Коротко викласти загальні відомості щодо процесів холодної пластичної деформації та рекристалізації, підготувати таблиці 3.1 та 3.2, пункти 3.1, 3.2, 3.5, 3.6.

4.3. Контрольні запитання

1. Механізм пружної та пластичної деформації.
2. Вкажіть системи ковзання для металів з ОЦК, ГЦК та ГЦП ґратками.
3. Типи дефектів кристалічної будови та їх вплив на властивості металів.
4. Поняття наклепу. Роль дислокацій у цьому процесі.
5. Густина дислокацій до та після холодної пластичної деформації.
6. Теоретична та реальна міцність металів.
7. Вплив холодної пластичної деформації на структуру та властивості металів.
8. Які процеси відбуваються в холоднодеформованому металі при нагріванні? Їх рушійні сили.
9. У чому полягає різниця між процесами полігонізації та рекристалізації?
10. Первинна рекристалізація, її відміна від збиральної рекристалізації.
11. Критичний ступінь деформації.
12. Температурний поріг рекристалізації та визначення температури рекристалізаційного відпалення.
13. Холодна та гаряча пластична деформація. Їх відмінні особливості.

4.4. Матеріали, інструмент, прилади та устаткування

Роботу виконують на зразках холоднокатаних та відпалених листових сталей 08кп і 08ХІ8Т1 після деформації 5, 10, 25, 60 та 80 %. Мікроструктуру зразків вивчають за допомогою мікроскопів МІМ-7; твердість (HRB) визначають на приладі ТК-2 методом Роквелла сталеву кулькою при навантаженні 981 Н (100 кгс) за шкалою В. Розмір зерна визначають, використовуючи шкалу балів за ГОСТ 5639-82.

4.5. Вказівки з техніки безпеки

Робота виконується відповідно до загальної інструкції з техніки безпеки (додаток А).

4.6. Порядок виконання роботи

- 1 Визначити твердість і зарисувати мікроструктуру зразків після деформації і відпалу. Визначити номер зерна, порівнюючи спостережену структуру з еталонним зображенням структури при збільшенні 100 разів. Дані записати в табл. 4.1.
- 2 Визначити твердість зразків сталей 08кп та 08ХІ8Т1 після холодної пластичної деформації ($\epsilon = 60\%$) та подальшого нагрівання при 400...800°C тривалістю в одну годину (табл. 4.2).

Таблиця 4.1 – Твердість і структура сталі 08кп після холодної деформації та наступного рекристалізаційного відпалу

Ступінь деформації $\epsilon, \%$	Після холодної деформації		Після рекристалізаційного відпалу		
	Твердість, HRB	Структура (зарисувати)	Твердість, HRB	Структура (зарисувати)	Номер зерна
0					
5					
10					
25					
60					
80					

Таблиця 4.2 – Твердість сталей 08кп та 08X18Т1 після нагрівання при різних температурах

Марка сталі	Твердість, HRB				
	Після деформації ($\epsilon=60\%$)	Після нагрівання 1 год. при температурах, $^{\circ}\text{C}$			
		400	500	600	700
08кп					
08X18Т1					

4.7. Зміст звіту

1. Основні положення загальних відомостей.
2. Графік залежності твердості сталі 08кп від ступеня деформації.
3. Обґрунтувати принципи підвищення твердості з ростом ступеня деформації. Вказати, як при цьому змінюється структура.
4. Побудувати графік залежності твердості від ступеня деформації зразків сталі 08кп після рекристалізаційного відпалення.
5. Побудувати графік залежності розміру зерна після деформації і нагрівання 680°C , 1 год. в залежності від ступеня деформації. Пояснити причину аномального росту зерен при нагріванні після деформації ($\epsilon_{\text{крит}}$) та чому зразок, деформований на 80%, має після відпалювання дрібніше зерно порівняно з зерном зразка, попередньо деформованого на 60%.
6. Накреслити графік залежності твердості від температури нагрівання для зразків сталей 08кп і 08X18Т1 ($\epsilon = 60\%$). Пояснити одержані залежності. Визначити температурний поріг рекристалізації та вибрати температуру рекристалізаційного відпалення. Встановити вплив легувальних елементів на ці характеристики.

4.8. Рекомендована література

1. Бялік О.М. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – К: ІВЦ «Потітехніка», 2001. – с. 60–84.
2. Матеріалознавство: [підручник] / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2007. – с. 67–68.
3. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. / Лахтин Ю.М. – М.: Металлургия, 1984. – с. 43–49, 53–60.
4. Гуляев А.П. Металловедение / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1986. – с. 61–19, 83–96.
5. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение / Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. – М.: Машиностроение, 1990. – с. 77–84, 107–120.
6. Материаловедение / Под ред. В.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – с. 66–79.

Корисне відео:

<https://www.youtube.com/watch?v=TXNRNgOaarU> – будова реальних металів

https://www.youtube.com/watch?v=MHtJLSJ8_30 – пластична деформація металів

<https://www.youtube.com/watch?v=mvX4DTIIdrg> – пластична деформація і рекристалізація металів

https://www.youtube.com/watch?v=lYRMbiR_LWE – пластична деформація металів

<https://www.youtube.com/watch?v=o0rWeNiDuTY> – атомно-кристалічна будова металів

<https://www.youtube.com/watch?v=HPDsOheXIMs> – рекристалізація металів та сплавів

Звіт з лабораторної роботи для перевірки та оцінювання до дати наступного заняття надіслати на електронну пошту викладача tmkts_nno@ztu.edu.ua

Лабораторна робота підлягає обов'язковому захисту!