

## Лекція 2. Наклеп і рекристалізація

### План

1. Наклеп та зміцнення.
2. Рівняння Бочвара.
3. Діаграма рекристалізації.

Зміна форми та розмірів тіла, що деформується пов'язано в тій чи іншій мірі зі зміною форми кожного окремо взятого зерна, з яких складається металеве тіло. Тому при пластичній обробці метал виробу зазнає структурні зміни, а це призводить до зміни його механічних та інших властивостей. З розвитком залишкової деформації в умовах холодної обробки зростає твердість металу (показник опору деформуванню), збільшується границя текучості і міцності, зменшуються показники, що характеризують пластичність (відносне подовження, звуження шийки, ударна в'язкість та ін.) У результаті розсіювання провідних електронів дислокаціями помітно зростає електричний опір, магнітна проникність, величина насичення; сприйнятливість і залишкове намагнічування, наприклад, заліза зменшується, а коерцитивна сила зростає, змінюється теплопровідність та ін.. Сукупність зміни властивостей металу в процесі пластичної обробки називають *наклепом*, або *зміцненням*.

При розвитку деформації ковзання атомів одного шару по черзі переходить на інші шари. При цьому продовження ковзання вимагає підвищення напруження зсуву, що тісно пов'язане з заклинюванням, що затримує ковзання атомів кристала уздовж активної площини ковзання, і зростанням щільності дислокацій.

Таким чином, при пластичній обробці метали змінюють свої властивості.

Як правило, при холодній обробці в перший момент (при порівняно низьких ступенях деформації) має місце різке зростання зміцнення. При подальшому збільшенні деформації інтенсивність зміцнення падає. Разом з тим встановлено, що полікристали зміцнюються більш інтенсивно, ніж монокристали; метали з дрібнозернистою структурою зміцнюються інтенсивніше, ніж грубозернисті, тверді розчини - більш інтенсивно, ніж метали.

У процесі виробництва виробів пластичною обробкою зміцнення враховується, по-перше, як технологічний фактор, що визначає можливість отримання виробів даним способом, по-друге, як метод додання необхідних властивостей металевому виробу, особливо в поєднанні з відповідною термічною обробкою.

Поява наклепу при деформації дозволяє в широких границях регулювати кінцеві властивості металевого виробу. Холодною пластичною обробкою (прокаткою, волочінням і ін.) можна в 2-3 рази підняти границю міцності (наприклад, при обробці неіржавіючих сталей) і ще більшою мірою збільшити границю текучості.

Крім того, виникнення зміцнення металу в ряді випадків є вирішальним фактором, що визначає можливість виконання пластичної обробки. Так, наприклад, процес волочіння дроту був би неможливий, якби при проходженні металу через волоку було б відсутнє зміцнення на величину, достатню для компенсації деякої втрати міцності переднього кінця дроту завдяки зменшенню його перетину. В іншому випадку суцільність переднього кінця була б порушена тягнучим зусиллям, яким забезпечується виконання процесу волочіння. З цієї причини, наприклад, практично виключається можливість обробки свинцю волочінням, швидкість зняття наклепу у якого при кімнатній температурі дуже значна порівнянна зі швидкістю розвитку зміцнення.

Як інший приклад позитивного впливу наклепу на пластичну деформацію є широко поширений процес глибокої витяжки при холодному штампуванні, наприклад, стакану з листової сталі. У перший момент штампування в кільцевій області дискової заготовки між краєм пуансона і матрицею спостерігається деяке, хоча і незначне, зменшення товщини стінки майбутнього стакану. При відсутності наклепу металу міцність у зменшеному перерізі заготовки була б знижена, а отже, подальша деформація була б зосереджена саме в цій галузі. У міру просування пуансона в даній ділянці заготівлі стався б відрив однієї частини від іншої з утворенням відповідного отвору. При наявності зміцнення подібне явище не спостерігається і процес витяжки, якщо правильно вибраний технологічний режим, протікає без порушення суцільності металу.

З іншого боку, наклеп помітно збільшує опір металу деформації, що призводить до збільшення необхідної потужності на деформацію. Одночасно з цим наклеп викликає зниження пластичних властивостей металу і завжди з'являється потенційна небезпека утворення тріщин, розшарувань і інших дефектів при подальшій деформації. Наприклад, у низьковуглецевої сталі відносне подовження, яке є одним з показників пластичних властивостей, при значній холодній деформації зменшується з  $\delta_{10} = 30 \div 35\%$  до  $\delta_{10} = 5 \div 6\%$ , тобто в 5-6 разів.

Викривлення кристалічної решітки тіла в процесі холодної пластичної деформації викликає появу термодинамічної нестійкості металу. Атоми в такій решітці мають тенденцію до перебудови, внаслідок якої вони наближалися б до стану з мінімумом вільної енергії. У силу цього холоднодеформований метал навіть після деякого «вилежування» в тій чи іншій мірі відновлює свої властивості: твердість і міцність зменшуються, поліпшується пластичність і змінюються інші властивості. Помітного зміння розмірів зерна чи видимої мікроструктури в даному випадку не спостерігається, але має місце усунення локальних спотворень кристалічної

будови і зняття макро- і мікроскопічних напружень. Сукупність зазначених змін в холодно-деформованому металі називають *поверненням*.

Повернення при кімнатних температурах, за винятком таких металів, як олово, свинець та інші з низькою температурою плавлення, виконується дуже повільно. При збільшенні температури металу час повернення помітно зменшується. Академік А. А. Бочвар вказує, що найбільш інтенсивно в чистих металах повернення виконується при температурі

$$T_0 = (0,25-0,30) T_{пл},$$

де  $T_0$  - абсолютна температура відпочинку;

$T_{пл}$  - абсолютна температура плавлення цього металу.

Підвищення температури металу збільшує амплітуду теплових коливань його атомів, а це змінює як поведінку окремих атомів, так і їх взаємодію один з одним, оскільки має місце значне збільшення швидкості дифузійних процесів і в зв'язку з цим створення сприятливих умов для зростання зерна. У будь-якому кристалічному тілі, що представляє собою ізольовану систему, згідно з другим законом термодинаміки відбуваються процеси зі зменшенням вільної енергії. Найбільш помітне зниження енергії полікристала при підвищеній температурі відбувається завдяки скороченню меж його зерен, тобто при об'єднанні зерен в більші утворення, бо становище будь-якого атома всередині великого зерна відповідає меншій енергії, ніж усередині меншого.

Такого роду процеси, при яких спостерігаються утворення і зростання нових кристалів шляхом переходу атомів від одного кристала до іншого, називаються *рекристалізацією*.

Взаємодія між поверхневою енергією, енергією викривлення решітки та тепловою енергією є досить складним і не може бути виражене математичною залежністю. Проте спостереження за рекристалізацією і

викладені теоретичні передумови дозволяють прийти до цілком певних якісних висновків щодо можливих умов процесу і його результатів.

При деяких зовнішніх умовах і внутрішньому стані металу швидкість росту зерна може бути незначною і рекристалізацію практично неможливо виявити. Температура, при якій відбувається рекристалізація, визначається багатьма факторами, в тому числі чистотою металу, ступенем наклепу і тривалістю процесу рекристалізації (відпалу). Для кожного металу є своя температура, нижче якої рекристалізація зазвичай не відбувається або для цього потрібно дуже багато часу. За даними А.А. Бочвара, температура рекристалізації чистих металів для практичних цілей може бути визначена з такого співвідношення:

$$T_p = 0,4T_{пл},$$

де  $T_{пл}$  - абсолютна температура плавлення металу.

При рекристалізації металу не спостерігається змін складу або типу решітки, але відбувається зміна структурного стану в напрямку наближення його термодинамічної рівноваги. Відомо, що будь-які перетворення, в тому числі і структурні, визначаються наявністю або утворенням центрів перетворення і наявністю поверхні розділу. Для металів це будуть центри рекристалізації. Однак механізм формування центрів рекристалізації є однією з найбільш складних невирішених проблем сучасного металознавства.

Вважається, що при нагріванні холоднодеформованого металу дрібні блоки - уламки зерен з відносно правильною, не викривленою в процесі деформації решіткою - перетворюються на нові зародки, або центри, вторинної кристалізації, виростають при перекристалізації до таких розмірів, що їх енергія стає мінімальною при даній температурі, якщо, звичайно, для цього відпущено достатньо часу.

Весь процес рекристалізації можна розбити на два періоди. Перший період відповідає виникненню зародків нової структури та їх зростанню. Зародок може бути активним лише в тому випадку, якщо його границі рухомі.

Коли зерна, які утворюються з різних зародків, стикаються, одні з них починають збільшуватися за рахунок інших (сусідніх). Це означає, що розпочався другий період рекристалізації, названий *збиральною рекристалізацією*. Рушійною силою цього періоду є вільна енергія між зерен. Інші сили, по видимому, відсутні.

У процесі рекристалізації структура металу стає більш однорідною, так як дифузійні процеси забезпечують також вирівнювання хімічної неоднорідності металу. При цьому відбувається усунення (заліковування) мікропорожнеч, тобто щільність металу приймає початкове значення. Все це призводить до того, що механічні та інші властивості металу помітно змінюються.

На рисунку 2.1 представлена типова діаграма зміни механічних властивостей наклепаного металу залежно від температури рекристалізації. На сталевих зразках при порівняно низьких температурах (150 - 200 °C) можна спостерігати збільшення  $\sigma_{пч}$ , що пояснюється вирівнюванням зональних залишкових напружень по перерізу зразка при зазначених температурах. Потім йде поступове зниження величини  $\sigma_{пч}$  і зростання подовження  $\delta$ , однак при подальшому збільшенні температури спостерігається різкий перелом кривих  $\sigma_{пч}$  і  $\delta$ .

Погіршення властивостей металу при високих температурах відпалу пов'язано з надмірним зростанням зерна і надалі можливою втратою необхідного зв'язку між ними. З рисунку 2.1 видно також, що інтенсивність рекристалізації залежить від величини попереднього наклепу. Чим вище наклеп, а отже, більше викривлена просторова решітка, тим інтенсивніше і

повніше відбувається рекристалізація при одній і тій же температурі нагріву.

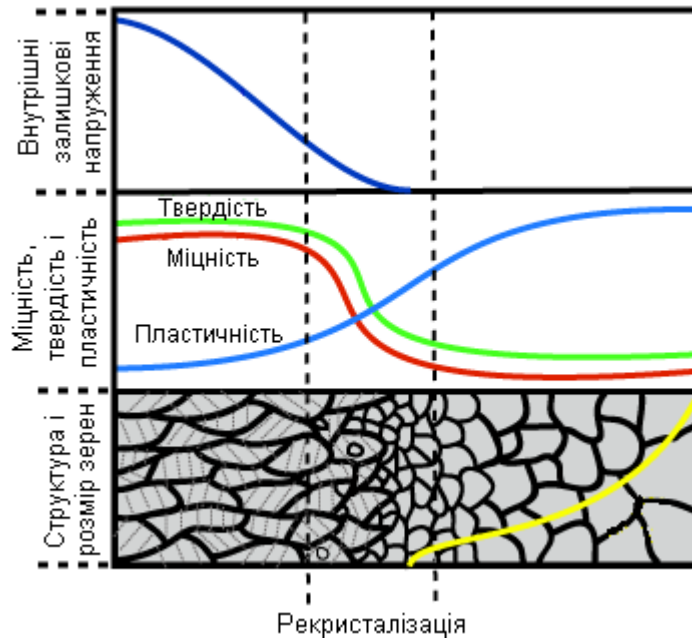


Рисунок 2.1 – Діаграма зміни механічних властивостей металу зі збільшенням температури рекристалізації

Беручи до уваги, що розмір зерна значною мірою визначає властивості металу, знання залежності величини зерна від температури рекристалізації і ступеня деформації і управління цією залежністю мають велику практичну цінність.

Зазвичай залежність між величиною зерна, температурою рекристалізації і ступенем деформації представляється об'ємними діаграмами рекристалізації. На рисунку 2.2 дається частина такої типової діаграми рекристалізації, загальний вид якої практично не змінюється від природи металу. Характерним для цієї діаграми є наявність деякого порога рекристалізації, відповідального порівняно малим ступенями деформації, які називають *критичними*. При цих деформаціях має місце найбільше

зростання зерен. Найчастіше величина критичної ступеня деформації відповідає 5-8%. Зі зростанням температури рекристалізації критична ступінь деформації зсувається до початку координат.

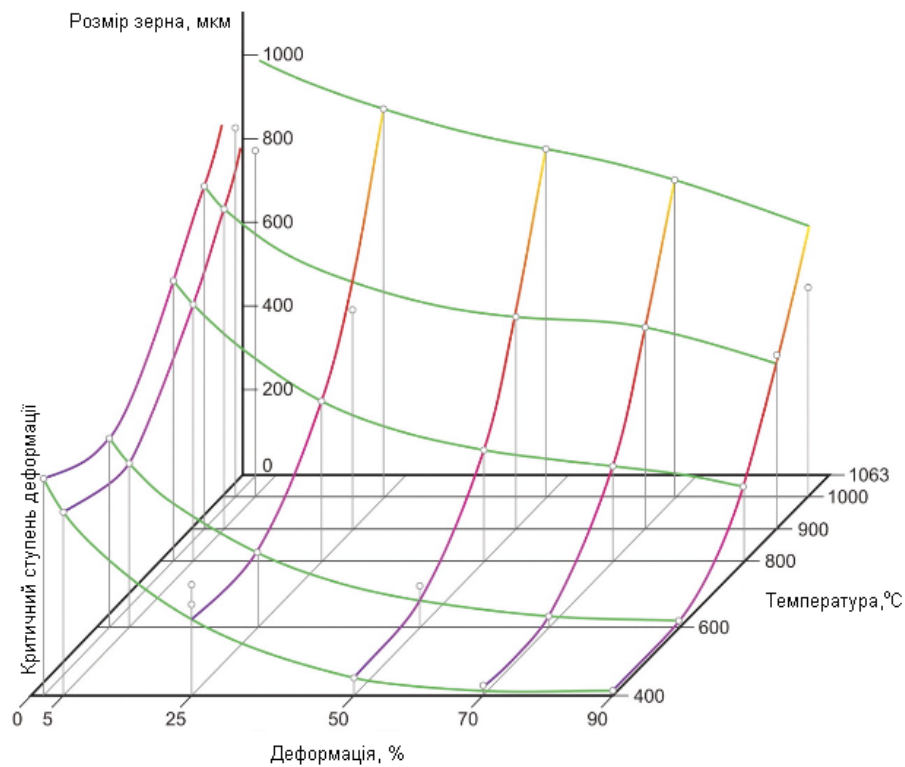


Рисунок 2.2 – Діаграма рекристалізації

Наявність порога рекристалізації не має остаточного пояснення. Проте вважають, що при порівняно малих ступенях деформації прикордонні ділянки не порушуються: тіло деформується за рахунок внутрикристалічних зрушень. Це ускладнює безпосереднє зіткнення сусідніх зерен і їх зрощення. При критичних ступенях деформацій, мабуть, починаються міжзеренне переміщення. При цьому підвищується активність прикордонних ділянок, а тому що число центрів рекристалізації ще порівняно невелика, то пояснення кількох сусідніх зерен призводить в кінцевому підсумку до отримання грубозернистої структури в процесі



рекристалізації. Потім в процесі розвитку деформації зростає число центрів кристалізації, що призводить до отримання дрібного зерна в рекристалізованому металі.

Отже, поєднання холодної деформації (наприклад, холодної прокатки, волочіння) і рекристалізації дозволяє надати металу необхідні розміри зерен, необхідні механічні та інші властивості. При цьому необхідно пам'ятати такі основні закономірності процесів холодної пластичної обробки і рекристалізації:

- 1) ступінь деформації є визначальним фактором остаточного розміру зерна після відпалу;
- 2) зі збільшенням ступеня деформації зменшується необхідна температура рекристалізації;
- 3) збільшення часу відпалу рівноцінно збільшенню температури рекристалізації;
- 4) витримка при температурі рекристалізації викликає безперервне збільшення розмірів зерна.

Механізм процесу рекристалізації холоднодеформованого металу дозволяє перейти до поняття гарячої обробки. Якщо холодна деформація характеризується умовами, коли забезпечується збереження зміцнення і змін внутрішнього стану, пов'язаних з пластичною обробкою при кімнатній температурі і після закінчення процесу, то гаряча деформація являє собою такий вид пластичної обробки металу, коли одночасно протікають два процеси - наклеп і рекристалізація. Тому деформацію, виконувану при температурах нижчих, ніж температура рекристалізації, прийнято називати *холодною деформацією*. Деформацію ж, виконувану при температурах, що забезпечують протікання знеміцнення рекристалізацією безпосередньо в процесі обробки або після в такій мірі, що метал повертається в знеміцнений стан, називають *гарячою деформацією*.

Виходячи з поняття холодної та гарячої деформацій, обробку, наприклад, цинку і свинцю при кімнатній температурі відносять до гарячої деформації, а обробку деяких тугоплавких металів навіть при порівняно високих температурах, наприклад, волочіння вольфраму при  $1100^{\circ}$  - до холодної деформації, оскільки температура рекристалізації Zn і Pb дорівнює  $0^{\circ}$ , а W -  $1210^{\circ}\text{C}$ .