

Лекція 7

ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ.

1. [Відпал вуглецевих сталей](#)
2. [Нормалізація вуглецевих сталей.](#)
3. [Гартування вуглецевих сталей](#)
4. [Відпуск вуглецевих сталей](#)
5. [Старіння вуглецевих сталей](#)

1. Відпал вуглецевих сталей

Відпал частково або повністю усуває відхилення від рівноважного стану сплаву, які виникли внаслідок його попередньої обробки (лиття, обробка тиском, зварювання, термообробка). Залежно від того, які відхилення від рівноважного стану усуваються, розрізняють наступні різновиди відпалювання:

1. *Рекристалізаційний відпал* використовують для зменшення твердості наклепаної холоднодеформованої сталі, підвищення її в'язкості, одержання певного розміру зерна. Сталь для цього нагрівають до температури початку рекристалізації (росту зерен), нижче критичної точки A_1 , витримують 3-6 год і повільно охолоджують до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ і далі на повітрі. У результаті замість структури деформованого металу утворюється рівноважна дрібнозерниста, вільна від залишкових напружень структура.

2. *Гомогенізуючий (дифузійний) відпал* застосовують для вирівнювання хімічного складу та підвищення однорідності структури литої легованої сталі або для зниження схильності прокату до утворення дефектів (флокенів і шиферності). Сталь для цього нагрівають вище температури точок A_3 і A_{cm} ($1000 - 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$) з витримкою протягом 10-15 год і повільно охолоджують. Внаслідок цього утворюється однорідна структура з великим зерном, яке подрібнюють під час наступної термічної обробки або при прокатуванні.

3. *Відпал на велике зерно* застосовують для поліпшення оброблюваності сталі різанням. Оскільки структури з більшим зерном обробляються легше, штучно розмір зерна маловуглецевої сталі збільшують нагріванням до $950-1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і повільним охолодженням її разом з піччю.

Залежно від змін, що відбуваються у фазово-структурному стані сплаву, відпал може бути повним, неповним, сфероїдизуючим та ізотермічним.

П о в н и й в і д п а л застосовують для зменшення твердості, внутрішніх напружень, структурної неоднорідності, подрібнення зерна, підвищення в'язкості й пластичності, поліпшення оброблюваності сталі. За повного відпалювання відбувається фазова перекристалізація феритної та перлітної

складових структури при температурі на $30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище температури точки A_3 і охолодженні зі швидкістю $20 - 200\text{ }^{\circ}\text{C/год}$. Швидкість охолодження залежить від складу сталі, маси і форми виробів.

Неповний відпал використовують для зменшення твердості та поліпшення оброблюваності сталей різанням. При цьому відбувається перекристалізація лише перлітної складової структури. Після нагрівання до температури на $40 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище точки A_1 , витримання і повільного охолодження утворюються перліт і ферит у доєвтектоїдних сталях та перліт і цементит у заєвтектоїдних. Для заєвтектоїдних сталей неповний відпал використовують замість повного.

Сфероїдируючий відпал (відпал для надання карбідам кулястої форми) застосовують для зниження твердості, підвищення оброблюваності різанням високовуглецевих та інструментальних сталей, підвищення пластичності мало- та середньовуглецевих сталей перед холодним штампуванням і волочінням внаслідок сфероїдизації карбідів. Режим такого відпалювання включає нагрівання до температури, трохи вищої від температури A_1 , повільне охолодження ($30 - 40\text{ }^{\circ}\text{C/год}$) до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ і далі на повітрі або циклічне багаторазове нагрівання вище температури точки A_1 і охолодження нижче цієї температури. За цих умов відбувається усунення пластинчастого і змішаного перліту та цементитної сітки, утворюється кінцева структура фериту та зернистого цементиту.

Ізотермічний відпал використовують для скорочення тривалості відпалювання прокату або заготовок після кування з легованих сталей. Здійснюють його нагріванням на $30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище температури точок A_1 або A_{cm} (для заєвтектоїдних сталей) і витриманням при цих температурах. Далі прискорено охолоджують до температури найменшої стабільності аустеніту ($650 - 680\text{ }^{\circ}\text{C}$) та витримують ізотермічно до повного розпаду аустеніту з подальшим охолодженням на повітрі. При цьому спочатку утворюється аустеніт, а потім відбувається його ізотермічний розпад на ферито-карбідну суміш. Кінцева структура після ізотермічного відпалювання — пластинчастий перліт і ферит, а в заєвтектоїдних сталях — перліт і цементит.

Для відпалювання потрібна дуже мала швидкість охолодження (до $0,1\text{ }^{\circ}\text{C/с}$). Таку швидкість забезпечує охолодження нагрітих деталей разом з піччю протягом $6 - 12$ і більше годин. Така мала швидкість охолодження потрібна лише при охолодженні деталі до температури 550°C .

[На початок](#)

2. Нормалізація вуглецевих сталей.

Нормалізація є ефективним засобом усунення грубозернистої структури після лиття та кування. Для низьковуглецевих сталей використовують замість повного відпалювання. Виливки середньовуглецевих сталей нормалізують замість гартування для зменшення короблення та тріщиноутворення. Нормалізацію з високим відпуском замість

повного відпалювання використовують для виправлення структури легованих сталей.

Нормалізацію здійснюють при температурах $A_{C3} + 30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для доевтектоїдних сталей) або $A_{cm} + 30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для заевтектоїдних) з наступним охолодженням на спокійному повітрі ($V_{ox} \approx 30\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$). При цьому отримують дрібне зерно і досягають рівномірного розподілу структурних складових сталей. Порівняно з відпалюванням, нормалізація є більш дешевою термічною операцією, оскільки у цьому випадку термічні печі використовують лише для нагрівання та витримування сталі при температурі нормалізації.

Зміна температур нормалізації та відпалювання сталей в залежності від вмісту вуглецю показана на рис. 66.

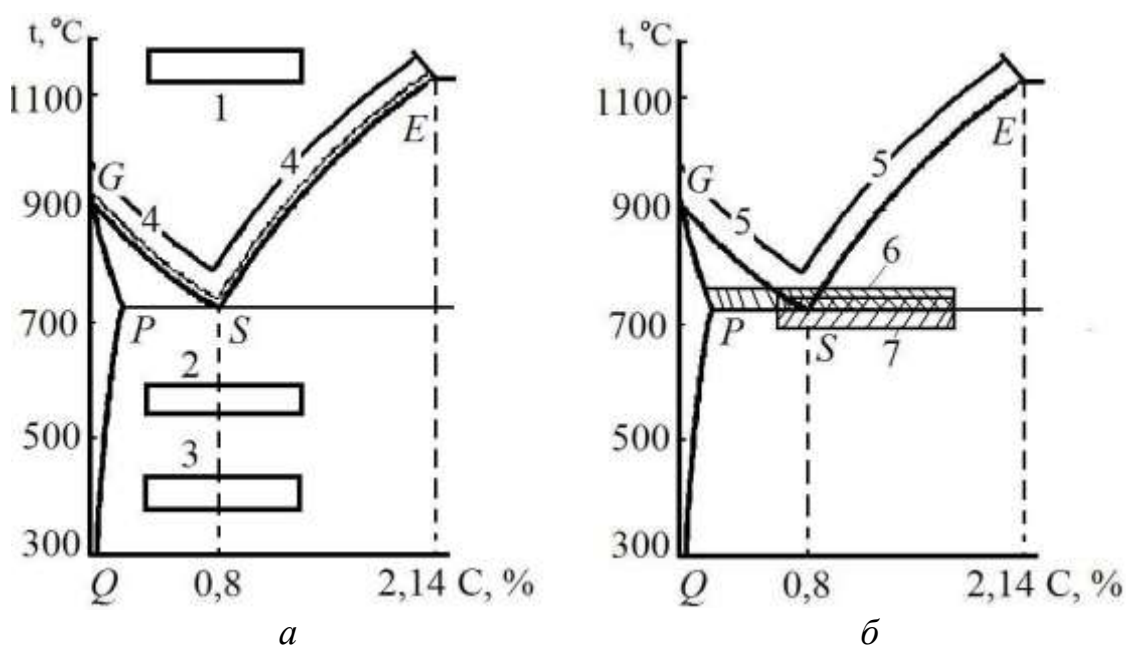


Рис. 66. Вплив вмісту вуглецю на температури нормалізації та відпалювання сталей: а - 1 - дифузійний; 2 - рекристалізаційний; 3 - для зняття напруг; 4 - нормалізація; б - 5 - повний; 6 - неповний; 7 - сфероїдизуючий

Нормалізація підвищує міцність і пластичність сталі порівняно з відпалом. Різниця між твердістю сталі після нормалізації та відпалювання показана на рис. 67.

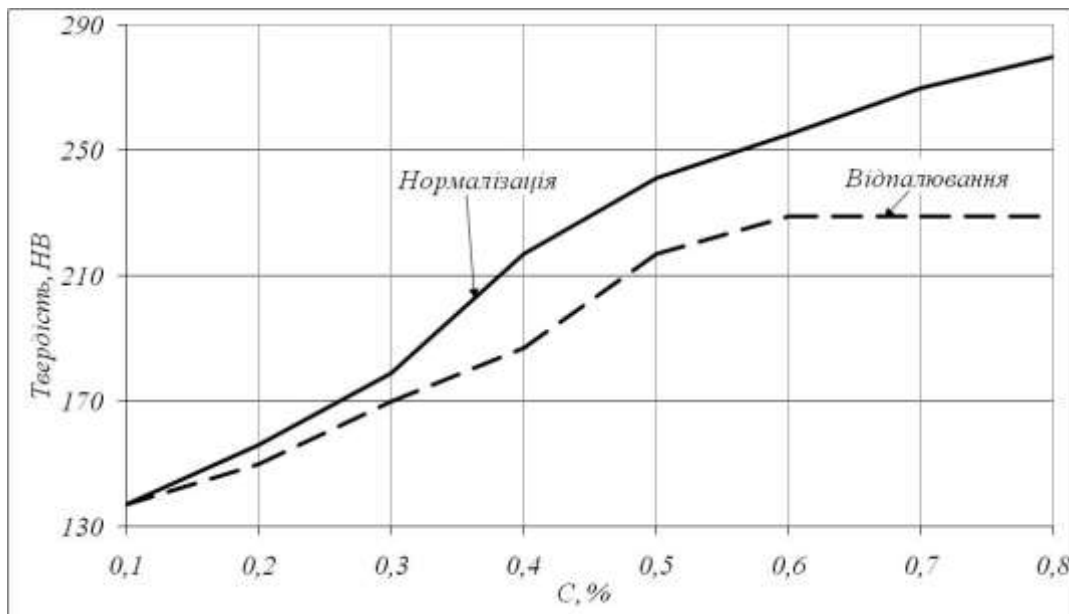


Рис. 67. Вплив вуглецю на твердість сталі після нормалізації та відпалюванні

[На початок](#)

3. Гартування вуглецевих сталей

Мета гартування - підвищення міцності та твердості сталі за рахунок одержання нерівноважної структури.

Існує гартування без і з поліморфним перетворенням. *Гартування без поліморфного перетворення* - це термічна обробка, яка фіксує стан сплаву, властивий йому при високих температур. Гартування зводиться до нагрівання сталі або іншого сплаву до температури розчинення надлишкових фаз, витримування і швидкого охолодження для запобігання виділень надлишкових фаз з пересиченого твердого розчину. Таку обробку здійснюють для одержання гомогенної структури.

Гартування з поліморфним перетворенням - це термічна обробка, де головним процесом є мартенситне перетворення високотемпературної фази. Тому таку термічну обробку називають *гартуванням на мартенсит* і вона може бути застосована практично до будь-яких металів і сплавів, здатних при охолодженні перебудувати кристалічну ґратку.

Основними факторами, які визначають властивості сталі після гартування є температура та тривалість нагрівання і швидкість охолодження.

Залежно від температури нагрівання розрізняють повне та неповне гартування. *Повне гартування* включає нагрів сталі до температур на 30-60 °С вище точки A_3 (вище лінії GS на діаграмі стану) для отримання вихідної аустенітної структури і швидке охолодження. Застосовують для термічної обробки доєвтектоїдних сталей.

Неповне гартування - нагрів сталі в інтервалі температур $A_1 - A_3$ (на 30 - 50°C вище A_1 , тобто до 760 - 780 °C) для отримання вихідної структури аустеніту та цементиту і швидке охолодження, при якому аустеніт перетворюється в мартенсит, а цементит зберігається у загартованій структурі сталі. Внаслідок такої обробки отримують сталь з більш високою міцністю, ніж чисто мартенситна структура, оскільки цементит має вищу твердість порівняно з мартенситом. Таке гартування застосовують для термічної обробки заєвтектоїдних сталей.

Залежно від способу охолодження існують наступні методи гартування:

1. *Безперервне гартування*, це гартування, при якому після нагрівання виріб охолоджується в одному середовищі (рис. 68, лінія 1). Залежно від вмісту вуглецю, структура сталі після безперервного гартування являє мартенсит і залишковий аустеніт або мартенсит, карбіди і залишковий аустеніт. Використовують для деталей простої форми.

2. *Переривчасте гартування* здійснюють у двох охолоджувальних

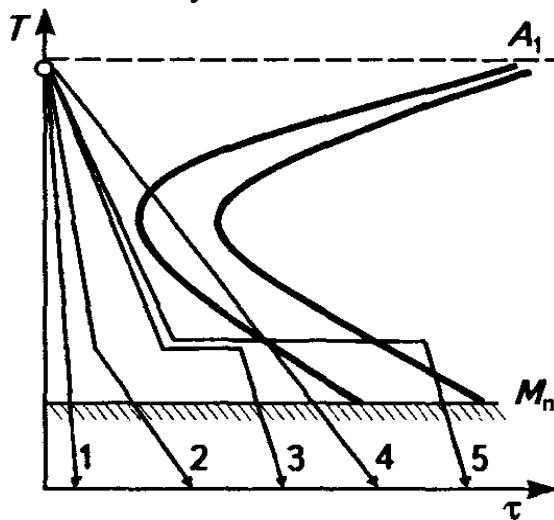


Рис. 68. Криві охолодження для деяких способів гартування, нанесені на діаграму ізотермічного розпаду аустеніту:

1 - безперервне; 2 - переривчасте; 3 — сходинокве (ступінчасте); 4 - неповне; 5 - ізотермічне

середовищах: спочатку деталь швидко охолоджують у воді до температури дещо вище температури початку мартенситного перетворення (лінія M_n), а потім швидко переносять до менш інтенсивного охолоджувача (олива, повітря), де охолоджують до 20 °C (рис. 68, лінія 2). У результаті використання другого охолоджуючого середовища зменшуються внутрішні напруження, які б мали місце за умов швидкого охолодження в одному середовищі (воді), в тому числі й в області температур мартенситного перетворення.

3. *Сходинокве гартування* використовують для зменшення напружень, деформації та запобігання утворенню тріщин в інструменті з вуглецевих і легованих сталей. Сталь, нагріту до температури гартування, охолоджують у середовищі з температурою, дещо вищою M_n (180 - 250 °C), і витримують порівняно короткий термін. Далі сталь охолоджують на повітрі до нормальної температури (рис. 68, лінія 3). Внаслідок витримки у середовищі гартування досягають вирівнювання температури за перерізом виробу, проте перетворення аустеніту з утворенням бейніту не відбувається.

Мартенситне перетворення відбувається під час охолодження на повітрі (але значно повніше), внаслідок чого сталь зберігає більше залишкового аустеніту порівняно з режимом безперервного гартування.

4. *Ізотермічне гартування* здійснюють охолодженням сталі у середовищі з температурою вище M_n (у розплавах солей), з ізотермічним витримуванням у ньому до повного або неповного перетворення аустеніту з наступним охолодженням на повітрі (рис. 68, лінія 5). Кінцева структура — бейніт або бейніт і карбіди, іноді також мартенсит і залишковий аустеніт. Таке гартування використовують для зменшення теплових і структурних напружень, запобігання тріщин і деформації, підвищення конструктивної міцності.

5. *Гартування з самовідпуском* здійснюють охолодженням лише частини або поверхні виробу у воді або оливі, далі виріб охолоджується на повітрі. Загартована зона при цьому відпускається за рахунок тепла серцевини або тієї частини, що не була занурена в охолоджуючу рідину. Таке гартування застосовують для зменшення залишкових напружень і як заміну наступного низького відпуску, а в окремих випадках — для місцевого гартування при індукційному поверхневому гартуванні.

6. *Гартування з обробкою холодом* застосовують для усунення залишкового аустеніту, підвищення твердості й зносостійкості, стабілізації розмірів виробів. Обробку холодом виконують одразу після гартування, щоб уникнути стабілізації аустеніту при витримці за нормальних температур. Охолодження виробів здійснюють до температури нижче 0°C (мінус 30 - мінус 70°C), але в інтервалі M_n — M_k для додаткового перетворення аустеніту на мартенсит. Це підвищує твердість сталей з $0,8$ - $1,1\%$ С на 1 - 3 HRC. Проте зростають напруження, тому після обробки холодом вироби піддають відпуску. Таку обробку використовують, в основному, для вимірювального інструменту, пружин і деталей з цементованих високолегованих сталей, що після гартування зберігають значну кількість залишкового аустеніту.

Тривалість нагрівання складається з тривалості нагрівання деталі до заданої температури і тривалості витримки при цій температурі та визначається вимогами досягнення максимальної однорідності (гомогенізації) і мінімального розміру зерен твердого розчину, який отриманий при температурі нагріву (як правило аустеніту). Тривалість нагрівання залежить від температури та середовища нагрівання і форми виробу. Чим вище температура, тим менше повинна бути витримка для одержання однакових властивостей.

Швидкість охолодження є одним з основних факторів, який суттєво впливає на структуру та властивості матеріалу при гартуванні. Необхідну для проведення гартування швидкість охолодження забезпечують

використанням певних середовищ з високою охолоджувальною здатністю (вода, олива, розчини солей тощо).

Вода є найдешевшим та інтенсивним охолоджувальним середовищем. Для забезпечення великої швидкості охолодження, необхідної під час гартування, нагріту деталь з вуглецевої сталі занурюють у холодну воду, а для забезпечення ще більшої швидкості охолодження і підвищення гартівної дії води до неї додають їдкого натрію або кухонної солі.

Як видно з табл. 9, гартівна дія води при підвищенні її температури різко знижується, тому велику кількість деталей потрібно гартувати в баку з проточною водою, щоб підтримувалася необхідна температура. Для зниження швидкості охолодження у воді до неї додають рідке мило, масляну емульсію або вапняне молоко. Щоб забезпечити високу швидкість охолодження і запобігти утворенню на поверхні охолоджуваної деталі парових бульбашок, деталь треба різко і безперервно переміщувати у воді або додати солі NaCl.

При гартуванні слід розрізняти і розуміти два важливих поняття: загартованість і прогартованість сталі.

Загартованість — це здатність сталі набувати максимальної твердості внаслідок гартування. Загартованість визначає вміст вуглецю у сталі. Так, низьковуглецеві сталі (до 0,20 % C) практично не загартовуються, їхня твердість внаслідок гартування майже не підвищується.

Прогартваність — це глибина загартованої зони. Відомо, що швидкість охолодження найбільша на поверхні виробу, а в його середині — найменша.

Якщо швидкість гартування в середині виробу рівна або більша за швидкість прогартування ($V_{\text{ох}}$ в середині виробу менше від критичної швидкості гартування ($V_{\text{кр}}$) сталі, з якою виготовлено виріб (рис. 69, а, б). Зі зменшенням $V_{\text{кр}}$ даного матеріалу глибина загартованої зони зростає (рис. 69, а, б) ніж $V_{\text{кр}}$, то виріб прогартується наскрізь і всюди буде мартенситна структура (рис. 69, в). Якщо перетин охолоджуваного виробу настільки великий, що неможливо досягти критичної швидкості навіть на його поверхні, то такий виріб не гартується зовсім.

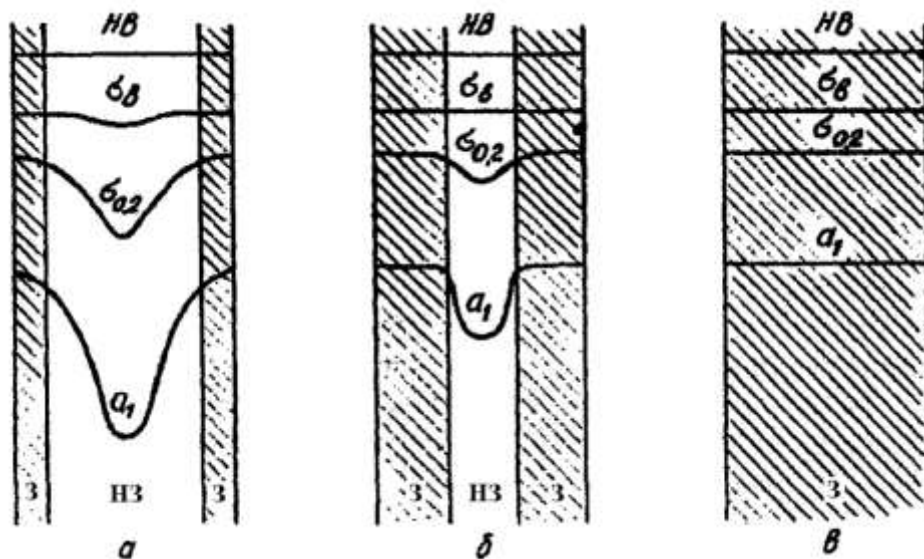


Рис. 69. Вплив глибини гартування на механічні властивості загартованих і відпущених сталей різної прогартуваності: *а, б* - ненаскрізна прогартуваність сталі; *в* - наскрізна прогартуваність сталі. З - загартований шар; НЗ- не загартований шар.

Критична швидкість гартування пов'язана з положенням кривої початку перетворення аустеніту й може бути визначена за діаграмою перетворення аустеніту при охолодженні. До основних факторів, що впливають на стійкість переохолодженого аустеніту, а, отже, і на $V_{кр}$, належать: співвідношення розчинених і не розчинених елементів і фаз в аустеніті та розмір його зерна.

Розчинення елементів і фаз в аустеніті та збільшення розміру його зерен зменшує $V_{кр}$. Нерозчинені в аустеніті карбіди, нітриди або інші фази зменшують стійкість аустеніту, бо вони стають додатковими центрами перекристалізації, а відповідно збільшують $V_{кр}$.

Для деталей, які працюють в умовах підвищених напружень і значних динамічних навантажень, необхідно підбирати сталі з високою прогартуваністю. З рис. 69, *а, б* видно, що у випадку неповної прогартуваності механічні властивості зовнішніх і внутрішніх шарів виробів суттєво відрізняються, що знижує надійність експлуатації виробів. Для сталей із наскрізною прогартуваністю механічні властивості практично однакові (рис. 69, *в*).

Мірою прогартуваності матеріалу слугує *критичний діаметр* ($D_{кр}$), який визначається, як максимальний діаметр циліндричного зразка, що наскрізь прогартувався у даному охолоджувальному середовищі.

[На початок](#)

4. Відпуск вуглецевих сталей

Відпуск загартованої сталі є завершальною операцією її термічної обробки, яка здійснюється для зниження напружень, які виникають під час гартування, та твердості і підвищення в'язкості та пластичності, тобто для надання сталі потрібних механічних властивостей.

Основний вплив на властивості сталі після відпуску має температура та термін відпуску. Залежно від температури розрізняють три види відпуску.

Низькотемпературний (низький) *відпуск* здійснюють при нагріванні сталі до 150-250 °С протягом 1,5-3 годин. Під час низького відпуску тетрагональний мартенсит гартування перетворюється на мартенсит відпуску (кубічний), при цьому незначно зменшуються внутрішні напруження гартування, твердість і крихкість та зростає пластичність. Низькотемпературний відпуск застосовують як кінцеву термообробку для різальних і вимірювальних інструментів, а також для цементованих і поверхнево-загартованих виробів, умови роботи яких вимагають значної поверхневої твердості й високої зносостійкості.

Середньотемпературний (середній) *відпуск* здійснюють при температурі 300-450 °С для обробки деталей, що працюють в умовах тертя і динамічних

навантажень (штампи, пружини, ресори). Структура сталі після середнього відпуску — троостит відпуску або троостито-мартенсит, твердість сталі 40-50 HRC. Це забезпечує високий поріг пружності, в'язкості та опір руйнуванню сталі.

Високотемпературний (високий) *відпуск* проводять при температурі 500-680°C протягом, як правило 1-2 год. Залежно від габаритів виробу тривалість високого відпуску може складати 1- 6 годин. При цьому відбувається збільшення розміру і сфероїдизація дисперсних карбідних включень, зростає феритне зерно і утворюється сорбіт відпуску. Така зміна структури приводить до зняття залишкових напружень, що виникають при гартуванні, збільшення пластичності та ударної в'язкості при збереженні задовільної міцності. При цьому створюється найкраще співвідношення міцності й в'язкості сталі. Тому термічну обробку, яка складається з гартування та високого відпуску, називають *поліпшенням або покращенням*.

Високий відпуск застосовують для обробки деталей з середньовуглецевих (0,3-0,5 %C) і спеціальних сталей, що працюють при підвищених і знакозмінних динамічних навантаженнях (вали, осі, елементи кріплення).

Технологія проведення відпуску складається з визначення температури та терміну відпуску, які вибирають виходячи з необхідних для деталей механічних властивостей, використовуючи діаграми залежності механічних властивостей сталей від температури та терміну відпуску, які отримують з літературних джерел або будують експериментально. Ці діаграми містять мінімальні та максимальні значення механічних властивостей після різних температур та часу витримки (рис. 74). Використовуючи дані наведені на діаграмах визначають час витримки та потрібну температуру відпуску для отримання певних механічних властивостей відповідно до вимогам.

У випадку коли діаграма залежності механічних властивостей певної сталі від температури та часу відпуску невідома параметри відпуску вибираються залежно від заданої твердості. У цьому випадку виріб гартується на максимальну твердість (температура гартування визначається відповідно до п. 6.2), а температура та термін відпуску змінюються таким чином, щоб твердість дорівнювала заданій. Приклад зміни твердості при відпуску загартованої вуглецевої сталі, що містить 0,8%С, наведено на рис. 75.

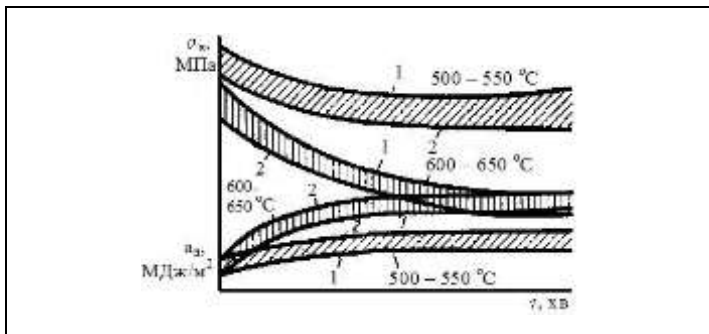


Рис. 74. Залежність механічних властивостей сталі від температури і витримки при відпуску: 1, 2 - верхня та нижня межа за хімічним складом

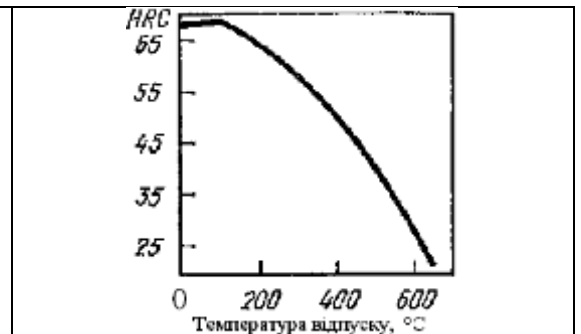


Рис. 75. Вплив температури відпуску на твердість загартованої вуглецевої сталі з 0,8 % C

5. Старіння вуглецевих сталей

Старіння. Термін відпуск прийнято застосовувати тільки до тих сплавів, що були піддані загартуванню з поліморфним перетворенням, а термін старіння - у випадку загартування без поліморфного перетворення (після такого загартування фіксується перенасичений твердий розчин). Головним процесом при старінні є розпад перенасиченого твердого розчину, отриманого в результаті загартування.

Основне призначення старіння — підвищення міцності та стабілізація властивостей. Розрізняють наступні види старіння:

1. *Природне старіння* - самовільне підвищення міцності (зменшення пластичності) загартованого сплаву, що відбувається в процесі його витримки при нормальній температурі;

2. *Штучне старіння* - підвищення міцності, що відбувається в процесі витримки при підвищених температурах. Штучне старіння застосовується для вимірювальних інструментів - калібрів, скоб і подібних деталей точного машинобудування. Температура штучного старіння 150-180°C, тривалість 5-20 г;

3. *Деформаційне старіння* - підвищення міцності внаслідок пластичної деформації;

4. *Термічне старіння* - старіння після термічної обробки.

Старіння є основним способом зміцнення алюмінієвих сплавів, деяких сплавів міді, а також багатьох жароміцних і інших сплавів. В даний час усе більш широко використовують мартенситостаріючі сплави.

Якщо при старінні відбуваються процеси виділення, то таке явище називають *дисперсійним твердінням*.

Зміна механічних властивостей заліза після дисперсійного твердіння показано на рис. 64 і в табл. 7.

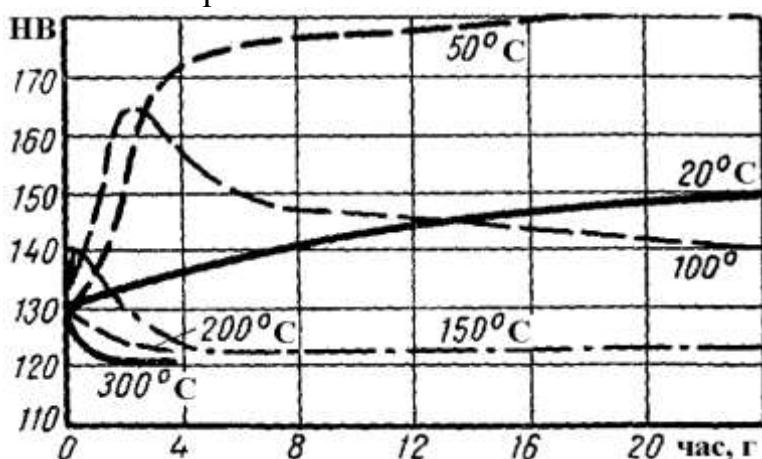


Рис. 64. Вплив тривалості старіння на твердість сталі (0,07% C), загартованої з 680°C

Видно, що при нагріванні до 100 °C збільшення часу старіння приводить до монотонного зростання твердості (рис. 64). При 100 °C спостерігається екстремальна залежність, а при більших температурах зниження твердості (рис. 64).

Після природного дисперсійного твердіння протягом 28 діб відносне подовження заліза зменшується на 50 %, тоді як твердість і межа міцності при розтягуванні підвищуються порівняно мало. Твердість заліза з 119 HB після витримки протягом 28 діб підвищилася до 172 HB, а протягом 33 діб – до 185 HB, при цьому межа міцності на розтяг збільшується на 38 і 43%, відповідно.

[На початок](#)