

УДК 620.178.3:621.785

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-21>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРУ СТАЛІ ПІСЛЯ ТЕРМООБРОБЛЕННЯ

Босий Микола Вікторович,

старший викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва
Центральноукраїнського національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

Боса Олена Анатоліївна,

здобувач вищої освіти
Центральноукраїнського національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0001-7621-6631

У роботі проведено дослідження впливу пластичної деформації за субкритичних температур, зокрема гарячої прокатки, холодної деформаційної прокатки, волочіння на структуру, а також властивості сталей після термооброблення – відпалу, нормалізацію, а також гартування. Показано, що холодна деформація прокаткою, холодне волочіння будуть прискорювати, відповідно, процес сфероїдизації цементиту під час процесу сфероїдизуючого відпалу. При цьому характер, а також ступінь впливу прокатки за субкритичних температур, деформації на структуру та властивості термічного оброблення сплаву, зокрема сталі, так чи інакше будуть подібні. З'ясовано, що незалежно від вибраного способу деформації у ферито-цементній зоні раціональний вибір її параметрів може відбуватися в разі використання подрібнення кінцевої структури і, можливо, субструктурного зміцнення для підвищення механічних властивостей конструкційних сталей. Наприклад, деформація навіть за низьких температур буде сприяти прискоренню процесів сфероїдизації та граничної плинності, а також твердості сталі після здійснення термооброблення з фазовою перекристалізацією за короткочасних витримок та температури нагрівання. Встановлено також, що підвищення ступеня холодної деформації буде впливати на зміцнення сталі після термооброблення. Показано, що позитивний вплив попередньої деформації на властивості конструкційних сталей, як після відпалу, так і термічного поліпшення, зумовлено подрібненням початкового аустенітного зерна і, відповідно, кінцевої структури сталі, а також і субструктурним зміцненням фериту у зв'язку з ефектом успадкування дефектів кристалічної будови за поліморфних перетворень. Вважаємо, що під час прокатки за субкритичних температур у фериті вже буде формуватися розвинена і стійка субструктура, яка успадковується утвореним аустенітом значно краще, ніж неупорядковані дефекти кристалічної будови.

Ключові слова: сталь, деформація, термічне оброблення, структура, відпал, нормалізація, гартування.

Bosyi Mykola, Bosa Olena. Study of the influence of plastic deformation on the properties and structure of steel after heat treatment

The work investigates the influence of plastic deformation at subcritical temperatures, for example, hot rolling, cold deformation rolling, drawing on the structure, as well as the properties of steels after heat treatment – this is annealing, normalizing, and quenching. It is shown that cold deformation by rolling, cold drawing will accelerate the process of spheroidization of cementite during the process of spheroidizing annealing, respectively. At the same time, the nature and degree of influence of rolling at subcritical temperatures, deformation on the structure and properties of heat treatment of an alloy, for example, steel, will be similar in one way or another. It is found that regardless of the selected method of deformation in the ferritic-cement zone, a rational choice of its parameters can occur when using grinding of the final structure and possibly substructural strengthening to increase the mechanical properties of structural steels. For example, deformation even at low temperatures will certainly contribute to the acceleration of the processes of spheroidization and ultimate yield strength, as well as the hardness of steel after heat treatment with phase recrystallization at short exposure times and heating temperatures. It has also been established that increasing the degree of cold deformation will certainly affect the strengthening of steel after heat treatment. It has been shown that the positive effect of preliminary deformation on the properties of structural steels both after annealing and thermal improvement is due to the grinding of the initial austenitic grain and, accordingly, the final structure of the steel, as well as the substructural strengthening of ferrite in connection with the effect of inheritance of defects in the crystal structure, respectively, during polymorphic transformations. We believe that during rolling at subcritical temperatures, a developed and stable substructure will already form in ferrite, which is inherited by the formed austenite much better than disordered defects of the crystal structure.

Keywords: steel, deformation, heat treatment, structure, annealing, normalizing, hardening.

Вступ. Для забезпечення необхідної надійності й міцності всі відповідальні деталі для машинобудування, автомобілебудування, сільськогосподарського машинобудування, кораблебудування, цивільного та промислового будівництва виготовляють із металів та сплавів, які є конструкційними матеріалами. У процесі роботи в тій чи іншій галузі виробництва металеві деталі піддаються великим навантаженням – механічним, динамічним, тепловим та хімічним. Механічні навантаження можуть бути статичними та динамічними (вібрації або удари). Теплові навантаження викликають температурні зміни, а хімічні навантаження можуть спричинити як корозію, так і деформацію матеріалу [1–3]. Прикладене до матеріалу навантаження призведе до його деформації. Деформація може бути пружною, яка зникає після зняття навантаження, і пластичною, яка залишається після зняття навантаження.

За пружного деформування під впливом зовнішньої сили змінюється відстань між атомами в кристалічній решітці. Зняття навантаження усуває причину, що викликала зміну міжатомної відстані, атоми повертаються на колишні місця, і деформація зникає.

Пластичне деформування є зовсім іншим, значно складнішим процесом. У разі пластичного деформування одна частина кристала переміщується по відношенню до іншої. Якщо зняти навантаження, то переміщена частина кристала не повернеться на старе місце; деформація зберігається, ці переміщення виявляються під час мікроструктурного дослідження [4; 5].

Розглянемо структурні зміни під час холодної пластичної деформації.

Після зняття навантаження, що перевищує межу плинності, в деталі залишиться залишкова деформація. У разі повторного навантаження буде зростати межа плинності сплаву та зменшення його здатності до пластичної деформації, тобто відбувається зміцнення сплаву, яке,

відповідно, під дією пластичної деформації є наклепанням [6].

За деформації зерна в сплаві міняють свою форму і також орієнтування, утворюючи при цьому більш волокнисту структуру вже з переважною орієнтацією кристалів. Також відбувається розворот безладно орієнтованих зерен осями найбільшої міцності вздовж напрямку деформації. Зерна при цьому деформуються, сплющуються та витягуються в напрямку діючих сил P , з утворенням волокнистої або шаруватої структури (рис. 1) [7; 8].

Метою роботи є дослідження впливу пластичної деформації на властивості та структуру сталі після термооброблення.

Методи та методики дослідження. Під час конструювання виробів, деталей насамперед треба керуватися механічними властивостями конструкційних матеріалів. Механічні властивості матеріалів, відповідно, характеризуються їх здатністю чинити опір деформації і руйнуванню під впливом, наприклад, різного роду навантажень. Механічні навантаження можуть бути статичними, динамічними та циклічними. Крім того, матеріали можуть піддаватися деформації та руйнуванню, зважаючи як на різні температури, так і різні, в тому числі агресивні, середовища [9].

В основі пластичної деформації лежить зміщення одних частин кристала відносно інших. Після зняття навантаження буде зникати тільки пружна складова частина деформації. Пластичність дозволяє перерозподіляти локальне навантаження рівномірно по всьому об'єму сплаву, що буде зменшувати небезпеку руйнування.

Зі зростанням величини деформації механічні властивості (σ_B , $\sigma_{0,2}$, HB), які характеризують опір деформації, будуть підвищуватися, при цьому відбувається деформаційне зміцнення, а здатність до пластичної деформації (δ , ψ) зменшується (рис. 2). Межа плинності зростає інтенсивніше, ніж тимчасовий опір, а за

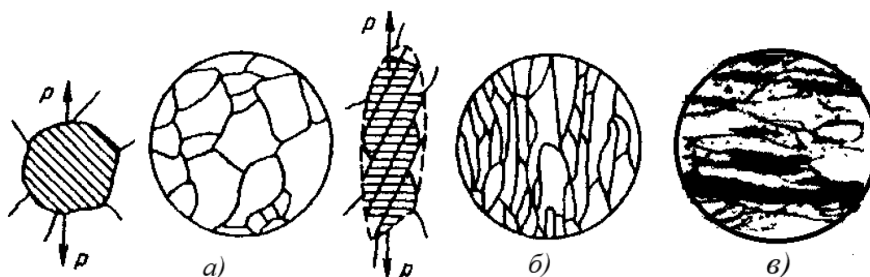


Рис. 1. Вплив деформації на зміну форми зерна:
а, б – схема форми зерен до і після деформації;
в – мікроструктура низьковуглецевої сталі 20 після деформації

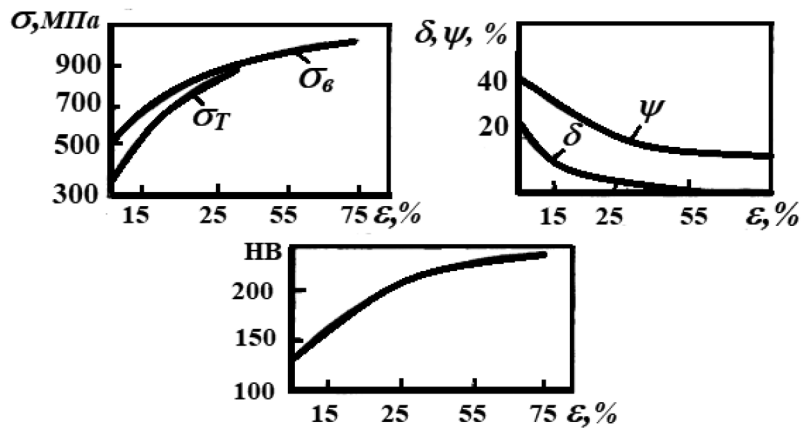


Рис. 2. Механічні властивості низьковуглецевої сталі за впливу пластичної деформації

збільшення величини пластичної деформації значення обох характеристик зближуються.

У результаті зміцнення сплаву під дією пластичної деформації наклепанням механічні властивості будуть змінюватися суттєво: наприклад, за деформації $\varepsilon = 75\%$ середньовуглецевої сталі її тимчасовий опір σ_B знаходиться в діапазоні від 450 до 700 МПа і буде збільшуватися майже у два рази, а відносне подовження δ буде зменшуватися з 35 до 2 %. Наприклад, сталевий дріт, який отримується холодним волочінням за величини деформації 70 %, має значення $\sigma_B = 1500$ МПа, але це не може бути досягнуто легуванням і термічним обробленням. Отже, можливо збільшити експлуатаційну стійкість деталей машин шляхом підвищення механічних властивостей сталей, що є важливим завданням матеріалознавства [10–12].

У разі пластичної деформації суттєво будуть змінюватись фізико-механічні властивості сплавів. У роботі [12] вивчено вплив волочіння зі зсувом як на структуру, так і властивості малоуглецевої сталі, що здійснювалось за різного поєднання деформування в круглих волоках і волоках зі зсувом. Було показано, що використання волоки зі зсувом за різних обтискань та схем волочіння буде впливати на механічні властивості, а також густину низьковуглецевого дроту.

Розмір зерна сплаву має важливе значення для межі плинності, опору крихкому руйнуванню та для температури в'язко-крихкого перетворення. Подрібнення зерна суттєво знижує критичну температуру крихкості. Зміною технології виплавки і розливання сплаву у форми, шляхом пластичної деформації та термічного оброблення можна впливати на розмір зерна, а при цьому управляти властивостями сплаву та його холодостійкістю. Тривала витримка за кімнатної

температури, а тим більше нагрівання, повинна сприяти переходу сплаву в стійкий структурний стан [13; 14].

Наприклад, за невеликого нагрівання (до 400 °С для заліза) відбувається зняття дефектів кристалічної решітки, зменшення щільності дислокацій шляхом їх анігіляції, зменшення кількості вакансій, зниження внутрішніх напружень. При цьому таких видимих змін структури не відбувається, і витягнута форма зерен буде зберігатися. Цей процес характеризується поверненням сплаву. У разі повернення міцність буде зменшуватися на 20–30 % у порівнянні з початковим станом, а пластичність дещо збільшується.

Процес повернення завершується полігонізацією, механізм якої полягає в такому. У результаті наклепання дислокації виявилися безладно розподіленими в площинах ковзання всередині зерен. Під час нагрівання до температури, яка необхідна для процесу самодифузії, дислокації протилежних знаків знищуються, а дислокації одного знаку будуть перегруповуватися в дислокаційні стінки з утворенням комірчастої структури. У зернах полікристала будуть утворюватися субмежі, що розділяють субзерна, які вільні від дислокацій [15].

Процес укрупнення субзерен зі збільшенням їх тривалості витримки або підвищенням температури нагрівання сплаву призводить до зниження його міцності. За наступного нагрівання буде відбуватися зміна мікроструктури наклепаного сплаву (рис. 3).

У разі зростання температури рухливість атомів зростає, й утворюються вже нові зерна замість орієнтованої волокнистої структури сплаву. Утворення нових рівноосних зерен указує на процес рекристалізації, який буде протікати у дві стадії. Розрізняють первинну,

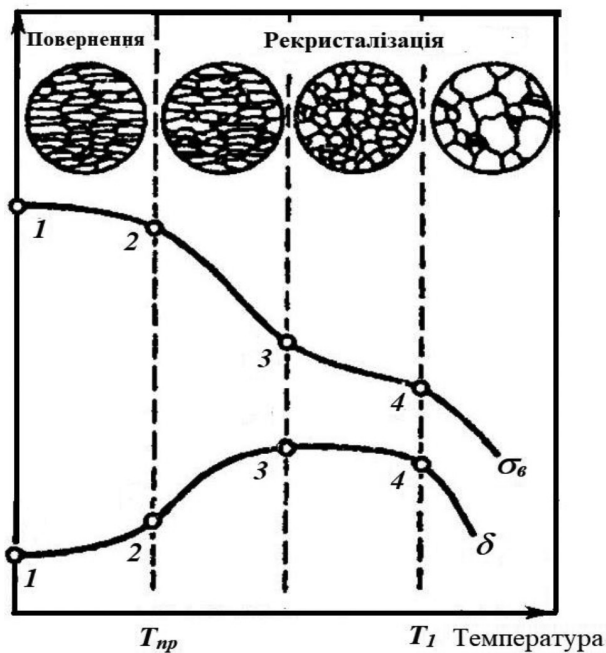


Рис. 3. Зміна структури і властивостей деформованого сплаву під час його нагрівання: 1–2 – повернення; 2–3 – первинна кристалізація; 3–4 – збиральна рекристалізація

або рекристалізацію оброблення, а також збиральну рекристалізацію.

Рекристалізація оброблення – це процес утворення нових рівноосних зерен. Нові зерна виникають на межах блоків та старих зерен, тобто там, де ґратки найбільш спотворені в результаті наклепування. Здійснення процесу первинної рекристалізації термодинамічно вигідно, тому що перехід деформованого сплаву в стійкий рівноважний стан буде супроводжуватися зменшенням вільної енергії. У результаті первинної рекристалізації наклепання сплаву знімається, і властивості будуть наближатися до початкових значень. Щільність дислокацій також зменшується до їх первинного рівня [16].

Температура початку рекристалізації є температурним порогом рекристалізації та залежить від температури плавлення. Така залежність зумовлена тим, що ці обидва процеси – як плавлення, так і рекристалізація – пов'язані зі зміною взаємного розташування атомів, а для їх розвитку необхідна певна дифузійна рухливість атомів. У сплавах домішки взаємодіють із дислокаціями і обмежують їх рухливість, що ускладнює утворення зародків нових зерен і гальмує рекристалізацію. Тому температура рекристалізації у сплавах повинна бути вища, ніж у чистих сплавах.

Наступне зростання температури буде призводити до другої стадії процесу – збиральної

рекристалізації, яка полягає в зростанні нових зерен, які знову утворюються. Велика кількість дрібних зерен має, відповідно, великий запас поверхневої енергії. У разі збільшення зерен загальна поверхня їх меж буде зменшуватися, що викликає перехід сплаву в більш рівноважний стан. Рухомою силою збиральної рекристалізації є зниження поверхневої енергії [16; 17].

Величина зерна за збиральної рекристалізації буде залежати від температури нагрівання величини попередньої пластичної деформації, але в меншій мірі – від тривалості витримки під час нагрівання. Найбільш великі зерна будуть утворюватися за критичної деформації. У разі невеликих величин деформації має місце неоднорідність наклепання, а отже, неоднорідність дефектів ґраток і напруги. За цих умов межі зерен набувають можливість швидкого переміщення на відносно великі відстані, що сприяє укрупненню зерен. Наочне уявлення про вплив температури і величини деформації на розмір зерна показують діаграми рекристалізації (рис. 4). За допомогою цих діаграм можна в першому наближенні вибрати величину деформації і температуру рекристалізаційного відпалу, за яких виключається ймовірність сильного зростання зерен сплаву. Для уточнення температури відпалу необхідно також урахувувати вміст домішок у сплаві, величину зерна до деформації, швидкість нагрівання і тривалість витримки й інші чинники сплавів [17; 18; 20].

Якщо необхідно зняти наклепання, то для досягнення достатньої швидкості процесу відпалу наклепаного сплаву виконують за більш високої температури, ніж температура рекристалізації.

Відомо, що попередня деформація, наприклад, холодна, буде прискорювати процеси аустенізації залізовуглецевих сплавів. Також залежно від умов попередньої деформації та вхідної структури змінюється кінетика структурних змін уже під час термічного оброблення з нагріванням, як у субкритичному діапазоні температур, так і в аустенітній зоні [18–20].

Результати. У роботі розглядається вплив гарячої, теплової та холодної деформації в разі використання прокатки холодного волочіння на структуру та властивості залізовуглецевого сплаву після термооброблення.

Процес прокатування сталі здійснюється таким чином: після нагрівання до 1510 °С – гаряча прокатка (ГП); далі охолодження на повітрі за температури 680 °С; холодна прокатка (ХП). Під час аналізу впливу холодної деформації волочінням проводиться оброблення зразків, наприклад, дроту діаметром 3,5 мм та катанки

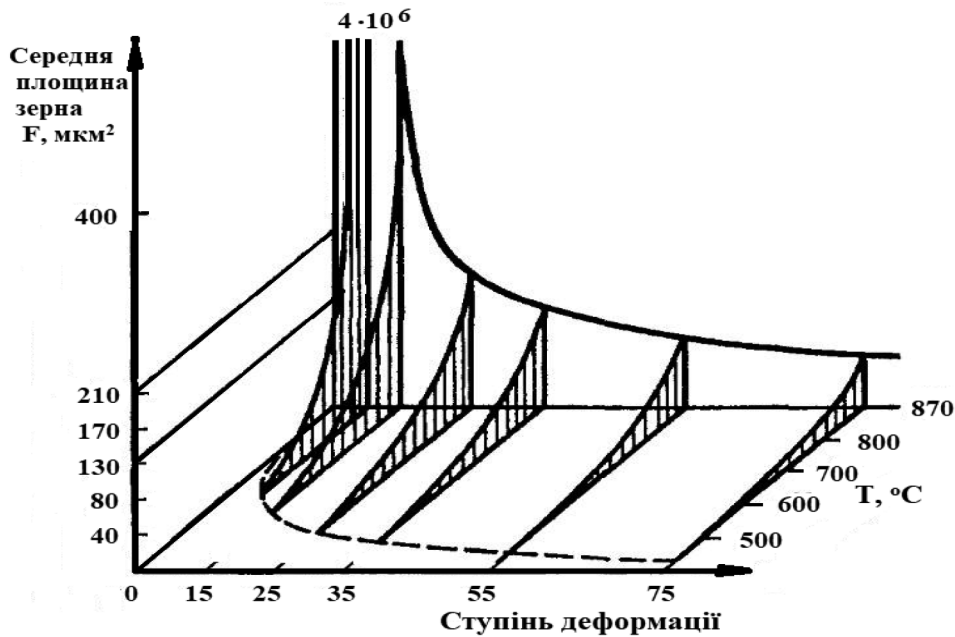


Рис. 4. Діаграма рекристалізації заліза

після прокатки. Наступне термооброблення виконується з використанням відпалу за температури 600 °C та різної тривалості часу, а також можна застосовувати нормалізаційний відпал та гартування з високим відпуском.

Для підвищення твердості в сталі можна застосовувати зміцнення фериту, яке буде зростати з підвищенням ступеня деформації. За температури 650 °C відбуваються процеси полігонізації та рекристалізації. Зміцнення металевої матриці після відпалу здійснюється у випадку підвищення кристалічної будови сплаву, зміни мікротвердості сталі залежно від температури та тривалості ізотермічної витримки.

Однією зі змін рівня твердості за короткочасних ізотермічних режимів можна вважати виділення в кристалічній будові дисперсних вкраплень карбідної фази, кількість якої збільшується зі збільшенням ступеня дефектності структури, тобто з підвищенням ступеня деформації. Це спричинить швидке завершення процесу та інтенсифікацію наступних стадій сфероїдизації цементиту, що може вплинути на зміцнення сталі. Коли буде менша температура ізотермічної витримки, будуть зменшуватися процеси утворення карбідних часток і зменшення феритної металевої матриці. Ці моменти визначають подібні за характером зміни властивостей сталі після прокатування за субкритичних температур. У цьому випадку після прокатки та охолодження за таких температур на повітрі максимум твердості з короткочасною витримкою за 650 °C не спостерігаються. Більша твердість спостерігається в разі виконання відпалу за 600 °C. За загального підвищення твердості

сталі в порівнянні з післядеформаційним охолодженням на повітрі за відпалу 600 °C тривалістю 2 години спостерігається збільшення твердості.

У результаті прокатки за субкритичних температур відбувається часткова сфероїдизація цементиту. Процес триває за наступного відпалу та прискорюється з підвищенням температури. У разі відпалу за температури 600 °C сфероїдизація цементиту з формуванням переважно перліту в значній мірі буде завершуватися за умови максимальної тривалості нагрівання. Підвищення температури до 680 °C може призвести до отримання вже сфероїдизованої структури сталі за відпалу тривалістю, наприклад, 2 години.

Ефект прискорення процесів сфероїдизації цементиту може бути пов'язаним із тим, що пластична деформація, прискорюючи процеси перетворення перліту в аустеніт (можливо, і поліморфного $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення), може гальмувати гомогенізацію аустеніту внаслідок наслідування їм від фериту підвищеної кількості дефектів кристалічної будови та збільшення кількості центрів евтектоїдного перетворення під час охолодження. Сфероїдизація цементиту завершується в холоднодеформованій сталі в процесі ізотермічного нагрівання тривалістю до однієї години.

Умови деформації впливають і на процес структуроутворення, що відбуваються під час термооброблення з повною фазовою перекристалізацією. Попередня прокатка за субкритичних температур буде сприяти підвищенню міцносних та пластичних характеристик сталі після

нормалізаційного відпалу, а також і після гартування з високим відпуском, але забезпечує значне підвищення її ударної в'язкості за більш низьких температур у порівнянні з гарячим станом сталі. Холодна прокатка, яка здійснюється перед відпалом, має аналогічний, але все ж таки менш значний, у порівнянні з попередньою пластичною деформацією, вплив на властивості сталі (табл. 1).

Отже, підвищення властивостей термічно обробленої сталі можливо за: 1) подрібнення структури аустеніту нагрітої сталі; 2) підвищення ступеня дисперсності кінцевої структури сталі; 3) частково збереженого структурного зміцнення фериту, викликаного попередньою деформацією у двофазній ферито-цементитній зоні.

Вплив умов деформації на процеси структуроутворення в разі подальших нагрівань та охолоджень, які супроводжуються фазовими перетвореннями, відповідно, залежать від температурночасових параметрів термічного оброблення (табл. 2).

Підвищення температури нагрівання в аустенітній зоні не завжди спричиняє погіршення властивостей сталі. Наприклад, за короткочасних 0,5 годин підвищеннях температури нагрівання можливе зміцнення сталі, а також підвищення її пластичних властивостей, зокрема

в обробленні холоднодеформованого дроту. У випадку, наприклад, повного відпалу, коли сталь перебуває в аустенітній зоні більш тривалий час, підвищення температури нагрівання буде призводити до знеміцнення сталі в діапазоні температур 860–900 °С холоднодеформованого сплаву. Збільшення тривалості за невисоких температур нагрівання 860 °С незначно впливає на міцність сталі після гартування та високого відпуску, але все ж таки буде помітно поліпшувати її пластичні характеристики.

Зростання в порівнянні з вихідною катанкою механічних властивостей сталевих дротів діаметром 3,0 мм залежно від тривалості витримки можливо як у результаті повного відпалу, так і нормалізації сталі. Отже, пластичність відпаленого дроту буде перевищувати характеристики термообробленої катанки, що в поєднанні зі значно більшою величиною міцності за тривалості витримки 15 хв підтверджує вплив подрібнення структури аустеніту холоднодеформованої сталі на дисперсність і однорідність її кінцевої структури. У разі реалізації термічного оброблення з фазовими перетвореннями – відпал, нормалізація та термічне поліпшення – ефект попередньої деформації зі зниженою температурою помітніший за короткочасних (30 хв) витримках.

Таблиця 1

Механічні властивості за розтягнення сталі 40 залежно від виду оброблення

Вид термічного оброблення	Вид попередньої деформації	σ_s , Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	δ , %
Повний відпал	Гаряча прокатка	465	270	21,5
	Гаряча прокатка + холодна прокатка	470	280	23,3
Нормалізаційний відпал	Гаряча прокатка	500	345	20,3
	Гаряча прокатка + холодна прокатка	512	318	20,6

Таблиця 2

Механічні властивості сталі 35 залежно від попередньої деформації виду термічного оброблення і тривалості витримки за температури нагрівання 860 °С

Вид термічного оброблення	Показники механічних властивостей	Початкова катанка		Початковий зразок після волочіння	
		15 хв	60 хв	20 хв	60 хв
Повний відпал	σ_s , Н/мм ²	559	515	525	478
	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	294	265	368	245
	δ , %	18	20	19	23
	ψ , %	55	51	57	52
Нормалізація	σ_s , Н/мм ²	642	640	605	600
	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	362	367	421	445
	δ , %	19	18	17	16
	ψ , %	57	58	54	55
Гартування з високим відпуском 600 °С	σ_s , Н/мм ²	685	687	663	667
	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	598	605	586	582
	δ , %	10	12	13	14
	ψ , %	32	36	37	45

Необхідно зазначити, що позитивний вплив попередньої деформації на властивості конструкційних сталей після відпалу та термічного поліпшення зумовлений подрібненням початкового аустенітного зерна і, відповідно, кінцевої структури сталі, а також і субструктурним зміцненням фериту у зв'язку з ефектом успадкування дефектів кристалічної будови за поліморфних перетворень. Також можна вважати, що під час прокатки за субкритичних температур у фериті вже буде формуватися розвинена та стійка субструктура, яка успадковується утворенням аустенітом значно краще, ніж неупорядковані дефекти кристалічної будови. А от з великим ступенем деформації можливо очікувати принаймні часткової реалізації ефекту полігонізації. Це також повинно сприяти стабілізації структури в разі подальшого нагрівання.

За швидкого нагрівання холоднодеформованої сталі з великою кількістю дефектів кристалічної будови полігонізація у фериті, ймовірно, за все, не встигає відбутися в об'ємі, необхідному

для стабілізації структури. Під час нагрівання аустеніт частково успадковує від фериту в основному неупорядковані дефекти, підвищена кількість яких сприяє прискоренню його первинної, а вже за більшої витримки – і збиральної рекристалізації, розвиток котрої буде призводити до зниження властивостей сталі.

Висновки. З'ясовано, що незалежно від способу деформації у ферито-цементній зоні в разі раціонального вибору її параметрів можна підвищити механічні властивості конструкційних сталей, використовуючи подрібнення кінцевої структури, та, можливо, субструктурного зміцнення.

Показано, що деформація, навіть за низьких температур, буде сприяти прискоренню процесів сфероїдизації та граничної плинності і твердості сталі після термооброблення з фазовою перекристалізацією за короткочасних витримок та температури нагрівання.

Встановлено, що підвищення ступеня деформації надає також зміцнення термообробленій сталі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Божидарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пластичності та міцності : навчальний посібник для студентів вузів, які навчаються за спеціальністю «Механіка», «Фізика твердого тіла». Львів : Світ, 1999. Т. 1: Розділи 1–11. 530 с.
2. Матеріалознавство : навчальний посібник / В. І. Бузило та ін. ; Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2021. 243 с.
3. Хоменко О. В. Інтенсивна пластична деформація: методи та математичні моделі формування наноматеріалів. *Журнал фізичних досліджень*. 2020. Т. 24. № 2. 20 с.
4. Малінов Л. С., Малінов В. Л., Бурова Д. В. Підвищення механічних властивостей маловуглецевих низьколегованих сталей нормалізацією і гартуванням з витримкою у міжкритичному інтервалі температур. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2022. № 3. С. 26–35.
5. Малінов Л. С., Бурова Д. В. Вплив гартування з міжкритичного інтервалу температур (МКІТ) і подальшого високого відпуску на структуру і механічні властивості сталей 40ХН і 40ХН2МА. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2013. № 26. С. 93–99.
6. Малінов Л. С., Солідор Н. А., Мілентьев В. О. Підвищення механічних властивостей сталей 35ХМФЛ за рахунок термообробки з нагрівом в МКІТ. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2015. № 6. С. 98–99.
7. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство : навчальний посібник / Л. Г. Бодрова та ін. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. 157 с.
8. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єрьоменко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів : конспект лекцій. Харків : УЦЗУ, 2008. 136 с.
9. Долгов О. М., Колосов Д. Л. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : навчальний посібник ; Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2022. 70 с.
10. Матеріалознавство : підручник / С. С. Дьяченко та ін. Харків : Видавництво ХНАДУ, 2007. 440 с.
11. Бурова Д. В. Термообробка конструкційних сталей 20ГЛ, 25ГФЛ, 25ГФЛ 45Г з нагрівом у міжкритичному інтервалі температур для підвищення механічних властивостей. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 121–127.
12. Пашинська О. Г., Пашинський В. В., Бойко І. О. Визначення оптимальних режимів комбінованої пластичної деформації для отримання покращених механічних та технологічних властивостей маловуглецевих сталей. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2024. № 2. С. 14–19.
13. Скобло Т. С., Ключко О. Ю. Теоретичні та експериментальні основи прогнозування структуроутворення, властивостей високовуглецевих сплавів : монографія. Харків : Діса плюс, 2019. 278 с.

14. Вплив швидкісного термозміцнення на бронестійкість високоміцного сталевих прокату захисного призначення / Я. А. Гарасим та ін. *Металофізика та новітні технології*. 2021. № 9. С. 1235–1246.
15. Клімін В. В. Вплив об'ємної гарячої пластичної деформації на процеси азотування та триботехнічні властивості конструкційної сталі 18ХГТ. *Проблеми трибології*. 2011. № 2. С. 91–95.
16. Ковалік М. Вплив деформації на структуру та властивості матеріалу за поздовжнього холодного вальцювання ступінчастих валів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2020. № 5. С. 97–101.
17. Миронова Т. М. Вплив попередньої термічної обробки на пластичність білих чавунів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2013. № 6. С. 88–98.
18. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів : підручник. Київ : Літера ЛТД, 2019. 224 с.
19. Клименко В. М. Матеріалознавство : навчальний посібник. Вінниця, 2010. 113 с.
20. Кшнякін В. С., Опанасюк А. С., Дядюра К. О. Основи фізичного матеріалознавства : навчальний посібник. Суми : Сумський державний університет, 2015. Ч. 1. 329 с.

REFERENCES:

1. Bozhydarnyk, V. V., & Sulym, H. T. (1999). Elementy teorii plastychnosti ta mitsnosti [Elements of the theory of plasticity and strength]. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vuziv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu "Mekhanika", "Fizyka tverdogo tila". Lviv. Svit, 1999. T.1: Rozdily 1–11. 530. [in Ukrainian].
2. Buzlyo, V. I., Serdiuk, V. P., Yavorskyi, A. V., & Haidai, O. A. (2021). Materialoznavstvo [Materials science]. Navchalnyi posibnyk. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyi tekhnichniy universytet "Dniprovska politekhnika". Dnipro. NTU "DP". 243. [in Ukrainian].
3. Khomenko, O. V. (2020). Intensyvna plastychna deformatsiia: metody ta matematychni modeli formuvannia nanomaterialiv [Intense plastic deformation: methods and mathematical models of nanomaterial formation]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen – Journal of Physical Research* 2001. T. 24. No 2. 20. [in Ukrainian].
4. Malinov, L. S., Malinov, V. L., & Burova, D. V. (2022). Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei malovuhletsevykh nyzkolehovanykh stalei normalizatsiiei u hartuvanniam z vytrymkoiu u mizhkrytychnomu intervali temperature [Increasing the mechanical properties of low-carbon, low-alloy steels by normalizing and tempering with exposure in the intercritical temperature interval]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. 3. 26–35 [in Ukrainian].
5. Malinov, L. S., & Burova, D. V. (2013). Vplyv hartuvannia z mizhkrytychnoho intervalu temperatur (MKIT) i podalshoho vysokoho vidpusku na strukturu i mekhanichni vlastyvosti stalei 40KhN i 40KhN2MA [The influence of tempering from the intercritical temperature interval (ITI) and subsequent high tempering on the structure and mechanical properties of 40HN and 40HN2MA steels]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu, Bulletin of the Azov State Technical University*, 26, 93–99 [in Ukrainian].
6. Malinov, L. S., Solidor, N. A., & Milentiev, V. O. (2015). Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei stalei 35KhMFL za rakhunok termoobrobky z nahrivom v MKIT [Improvement of the mechanical properties of 35HMFL steels due to heat treatment with heating at ITI]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 6, 98–99 [in Ukrainian].
7. Bodrova, L. H., Kramar, H. M., Kovalchuk, Ya. O., & Koval, I. V. (2008). Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv ta materialoznavstvo, rozdil Materialoznavstvo [Construction Materials Technology and Materials Science, Materials Science Section]. Navchalnyi posibnyk. Ternopil. FOP Palianytsia V. A. 2023. 157. [in Ukrainian].
8. Kurska, T. M., Chernobai, H. O., & Yeromenko, S. B. (2008). Materialoznavstvo ta tekhnolohiia materialiv [Materials Science and Materials Technology]. Konspekt leksii. Kharkiv. UTsZU. 136. [in Ukrainian].
9. Dolhov, O. M., & Kolosov, D. L. (2022). Mekhanichni vlastyvosti ta konstruktsiina mitsnist materialiv [Mechanical properties and structural strength of materials]. Navchalnyi posibnyk. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyi tekhnichniy universytet "Dniprovska politekhnika". Dnipro. NTU "DP". 70. [in Ukrainian].
10. Diachenko, S. S., Doshchechkina, I. V., Movlian, A. O., & Pleshakov, E. I. (2007). Materialoznavstvo. Pidruchnyk [Material science. Textbook]. Kharkiv. Vydavnytstvo KhNADU, 440. [in Ukrainian].
11. Burova, D. V. (2025). Termoobrobka konstruktsiinykh stalei 20HL, 25HFL, 25HFL 45H z nahrivom u mizh krytychnomu intervali temperatur dlia pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei [Heat treatment of structural steels 20GL, 25GFL, 25GFL 45G with heating in the critical temperature range to improve mechanical properties]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Journal of Metinvest Polytechnics. Series: Technical Sciences*. № 3, 121–127. [in Ukrainian].

12. Pashynska, O. H., Pashynskiy, V. V., & Boiko, I. O. (2024). Vyznachennia optymalnykh rezhymiv kombinovanoi plastychnoi deformatsii dlia otrymannia pokrashchenykh mekhanichnykh ta tekhnolohichnykh vlastyvostei malo vuhletsevykh stalei [Determination of optimal modes of combined plastic deformation to obtain improved mechanical and technological properties of low-carbon steels]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Journal of Metinvest Polytechnics. Series: Technical Sciences*. № 2, 14–19. [in Ukrainian].
13. Skoblo, T. S., & Klochko, O. Yu. (2019). Teoretychni ta eksperymentalni osnovy prohnozuvannia strukturoutvorennia, vlastyvostei vysokovuhletsevykh splaviv [Theoretical and experimental foundations for predicting the structure formation and properties of high-carbon alloys]. Monohrafiia. Kharkiv. Disa plus, 278. [in Ukrainian].
14. Harasym, Ya. A., Bondarevska, N. A., Teliovich, R. V., Bondarchuk, V. I., Holub, V. A., & Siedov, S. H. (2021). Vplyv shvydkisnogo termozmitsnennia na bronestiikist vysokomitsnogo stalevoho prokatu zakhysnoho pryznachennia [The effect of rapid heat hardening on the armor resistance of high-strength steel rolled products for protective purposes]. *Metalofizyka ta novitni tekhnolohii – Metal physics and new technologies*. 43 № 9. S. 1235–1246. [in Ukrainian].
15. Klimin, V. V. (2011). Vplyv ob'iemnoi hariachoi plastychnoi deformatsii na protsesy azotuvannia ta trybotechhnichni vlastyvosti konstruktsiinoi stali 18KhHT [The influence of volumetric hot plastic deformation on nitriding processes and tribotechnical properties of 18KhGT structural steel]. *Problemy trybolohii – Problems of Tribology*. № 2. 91–95. [in Ukrainian].
16. Kovalik, M. (2020). Vplyv deformatsii na strukturu ta vlastyvosti materialu za pozdovzhnoho kholodnoho valtsiuvannia stupinchastykh valiv [The effect of deformation on the structure and properties of the material during longitudinal cold rolling of stepped shafts]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physicochemical mechanics of materials*. № 5. 97–101. [in Ukrainian].
17. Myronova, T. M. (2013). Vplyv poperednoi termichnoi obrobky na plastychnist bilykh chavuniv [The effect of pre-heat treatment on the ductility of white cast irons]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. akademika V Lazariana*. № 6. 88–98. [in Ukrainian].
18. Vlasenko, A. M. (2019). Materialoznavstvo ta tekhnolohiia metaliv [Materials science and metal technology]. Pidruchnyk. Kyiv. Litera LTD. 224. [in Ukrainian].
19. Klymenko, V. M. (2010). Materialoznavstvo. Navchalnyi posibnyk [Materials Science. Textbook]. Vinnytsia. 113. [in Ukrainian].
20. Kshniakin, V. S., Opanasiuk, A. S., & Diadiura, K. O. (2015). Osnovy fizychnoho materialoznavstva [Fundamentals of Physical Materials Science]. Navchalnyi posibnyk. Sumy. Sumskyi derzhavnyi universytet, Ch. 1. 329. [in Ukrainian].