

УДК 669-155.3:539.378.6

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.144

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Протасенко Т. О.¹, Реброва О. М.², Федоренко Г. А.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. Метою досліджень є визначення впливу параметрів термооброблення на твердість, ударну в'язкість і структуру середньовуглецевих сталей марок 40 і 40Х. У роботі здійснено комплекс механічних досліджень зразків сталей марок 40 і 40Х у вихідному стані та після різних режимів термічного оброблення. На основі аналізу механічних досліджень визначено вплив параметрів термооброблення на механічні властивості та на структуру середньовуглецевих сталей марок 40 і 40Х. На основі механічних та мікроструктурних досліджень проаналізовано зв'язок між впливом економічного легування середньовуглецевої сталі та показниками механічних властивостей в діапазоні температур нагрівання.

Ключові слова: сталі марок 40 і 40Х, структура, твердість, ударна в'язкість, відпускна крихкість.

Вступ

Деталі сучасних машин і конструкцій працюють в умовах високих динамічних навантажень, концентрацій напружень і низьких або високих температур. Усе це сприяє крихкому руйнуванню й знижує надійність роботи машин.

Тому конструкційні сталі, крім високих механічних властивостей, повинні мати високу конструктивну міцність, зокрема в умовах її реального використання [1]

Правильно вибраний режим термічного оброблення дозволяє одержати оптимальну комбінацію властивостей у деталі, забезпечивши її надійність і довготривалу експлуатацію.

Аналіз публікацій

У машинобудуванні для отримання заданих властивостей здійснюють процес гартування деталей і виробів (зазвичай за температури 820–880 °С залежно від хімічного складу сталі), а також високого відпуску (за температури 550–680 °С). Після такого термооброблення отримуємо структуру сорбіт відпуску, що забезпечує високу конструктивну міцність деталей і виробів – досить високу міцність у комбінації з високою пластичністю, в'язкістю і малою схильністю до крихких руйнувань. Сталі, які піддають гартуванню з високим відпуском (поліпшенню), називаються сталями, які поліпшуються. Вони містять 0,3–0,5 % вуглецю.

У відпаленому стані вони мають структуру ферит і евтектоїд.

Вимоги, що висуваються до сталей, які поліпшуються, є такими: підвищена міцність ($\sigma_{0,2} = 800\text{--}950$ МПа, $\sigma_b = 950\text{--}1200$ МПа); висока пластичність ($\delta = 12\text{--}20$ %; $\psi = 40\text{--}55$ %); висока в'язкість ($KCU = 0,7\text{--}1,0$ МДж/м²); мала чутливість до концентраторів напружень; у виробках, які працюють за багаторазовоприкладених навантажень, висока межа витривалості; підвищена прогартуваність; економічність легування.

Хромисті сталі 30Х, 35Х, 40Х, 45Х, 50Х, 35Х2АФ, 40Х2АФЕ є найменш легуваними та забезпечують прогартуваність у трохи більших перерізах (до 20–25 мм у маслі), як порівняти з вуглецевими сталями. Хром майже не впливає на знеміцнення під час відпускання, однак він збільшує схильність сталі до відпускної крихкості. Тому вироби із цих сталей після високого відпускання варто охолоджувати в маслі або у воді, неприпустиме охолодження після відпускання на повітрі. Легування хромом не збільшує схильності до збільшення зерна аустеніту. Однак з метою отримання дрібнозернистої структури в сталі додають ванадій (40ХФ), який перешкоджає збільшенню зерна, а під час відпускання затримує знеміцнення. Тому для отримання однакової міцності сталь 40ХФ необхідно відпустити на 30–50 °С вище, ніж сталь 40Х. Це має велике значення для повного зняття залишкових напружень у виробках і підвищення їхньої межі втоми.

Мета та постановка завдання

Метою роботи було визначення впливу різних параметрів термічного оброблення

(температури, середовища охолодження) на механічні властивості сталей 40 і 40X. Під час експериментів необхідно було визначити взаємозв'язок між видом оброблення (нормалізація, гартування в різних середовищах, різні режими відпускання) і такими характеристиками сталей, як твердість та ударна в'язкість. Актуальним було питання якісного та кількісного аналізу впливу хрому на структуру та твердість середньовуглецевих сталей і схильність легованої сталі 40X до відпускнуї крихкості.

Основний матеріал дослідження

Робота складалася із двох частин, метою яких було:

1 здійснити порівняльний аналіз впливу швидкості охолодження на розпад аустеніту в сталях 40 і 40X;

2 визначити вплив температури відпускання на структуру й властивості середньовуглецевих сталей та схильність сталі 40X до відпускнуї крихкості.

Для визначення цих залежностей було здійснено такі процеси:

- 1 випробування на ударну в'язкість зразків з U-подібним надрізом (два зразки на кожний режим термічного оброблення);
- 2 вимірювання твердості за Роквеллом;
- 3 мікроструктурні дослідження.

Результати дослідження ударної в'язкості KCU та твердості HRC наведені в табл. 1–4 і на рис. 1–2. Згідно з рис. 1–2, охолодження у воді (гартування у воду) призводить до отримання максимальної твердості в обох сталях за низького рівня ударної в'язкості.

Сталь 40 під час охолодження в маслі

(гартування в маслі) і на повітрі (нормалізація) має приблизно однаковий рівень ударної в'язкості та низькі значення твердості (у випадку нормалізації вони нижчі за ті, що гартувані в маслі).

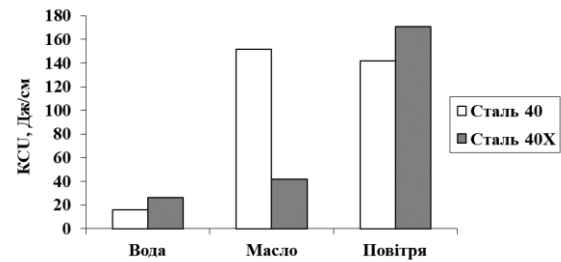


Рис. 1. Вплив швидкості охолодження на ударну в'язкість сталей 40 і 40X

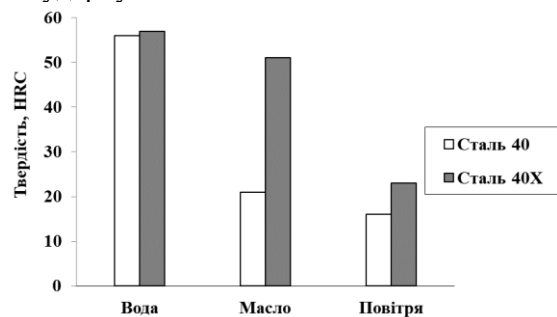


Рис. 2. Вплив швидкості охолодження на твердість сталей 40 і 40X

Сталь 40X має більшу стійкість переохолодженого аустеніту, як порівняти зі сталлю 40 та в процесі охолодженні в маслі досить високі значення твердості – до 51 HRC, але водночас ударна в'язкість майже вдвічі вище, ніж у процесі загартування у воді.

Таблиця 1 – Вплив швидкості охолодження на ударну в'язкість сталей 40 і 40X

Марка сталі	KCU, МДж/см ² ;					
	середовище охолодження					
	вода		масло		повітря	
	1	2	1	2	1	2
40	15,8	8,3	151,5	145,5	141,8	135,8
40X	26,3	26,3	41,8	38,3	111	171

Примітка. Температура аустенітування дорівнювала $t_{нагр} = 850$ °С.

Таблиця 2 – Вплив температури відпускання на ударну в'язкість сталей 40 і 40X

Марка сталі	Середовище охолодження	KCU, МДж/см ² ;					
		Температура відпускання, °С					
		400		500		600	
	1	2	1	2	1	2	
40	повітря	83,3	69,8	152,3	148,5	193,5	210,8
40X	повітря	17,3	30,8	124,5	118,5	109,5	177,8
40X	вода	48,8	45,8	125,3	123,8	165,8	188,3

Примітка. Зразки попередньо гартувалися за $t_{нагр} = 850$ °С у воді.

Таблиця 3 – Вплив швидкості охолодження на твердість сталей 40 і 40X

Марка сталі	Твердість, HRC		
	середовище охолодження		
	вода	масло	повітря
40	51–56	14–21	162–197 HB
40X	52–57	47–51	18–23

Примітка. Температура аустенітування дорівнювала $t_{нагр}$ (850 °C).

Таблиця 4 – Вплив температури відпускання на твердість сталей 40 і 40X

Марка сталі	Середовище охолодження	Твердість, HRC		
		Температура відпускання, °C		
		400	500	600
40	повітря	36–42	29–36	16–23
40X	повітря	36–44	35–39	25–33
40X	вода	38–45	34–38	20–26

Нормалізація легованої сталі, хоча й знеміцнює її, але не значною мірою, як порівняти з вуглецевою, а ударна в'язкість у цьому випадку залишається приблизно на одному рівні (з огляду на розкид значень).

На деяких зразках легованої сталі були виявлені ділянки зі зниженою твердістю 37–45 HRC, загартовані у воді й 32–42 HRC, загартовані в маслі. Це знеуглецьовані ділянки, які утворювалися внаслідок вигорання вуглецю за тривалих витримках попередньо здійсненого повного відпалу. Знеуглецювання могло також призвести до отримання завищених значень ударної в'язкості в зразках.

Загальною закономірністю є те, що в разі збільшення температури нагрівання під час відпускання ці два види сталі знеміцнюються, але водночас підвищується їхня здатність здійснювати опір динамічній крихкості. У вуглецевої сталі 40 цей процес зниження твердості є більш інтенсивним, як порівняти з леговою сталлю 40X, водночас її в'язкість є вищою у всьому дослідженому інтервалі температури відпускання.

Щодо схильності сталі 40X до відпускнуої крихкості II роду, то згідно з експериментальними даними прискорене охолодження під час відпускання підвищує ударну в'язкість цієї сталі, зокрема за високих температур: якщо $t_{відп} = 600$ °C, різниця в КСУ дорівнює 33,4 Дж/см² або 23,3 % для зразків, охолоджених у воді й на повітрі. Згідно з літературними даними [2] максимальна розбіжність значень за різної швидкості охолодження після відпускання спостерігається для цієї сталі в разі нагрівання до температур $t_{відп} = 600$ –650 °C.

Твердість зразків легованої сталі, охолоджених з різною швидкістю під час відпус-

кання майже однакова в інтервалі відпускнух температур 400–500 °C, а якщо $t_{відп} = 600$ °C, вона нижче в прискорено охолоджених зразках.

На основі аналізу механічних властивостей сталей 40 і 40X можна дійти таких висновків:

1 гартування вуглецевої сталі 40 можливе тільки в процесі охолодження у воді, а легованої сталі 40X – у воді й у маслі (для дрібногабаритних деталей);

2 з метою пом'якшення структури під час знеміцнювального термічного оброблення для сталей 40 і 40X можна використовувати нормалізацію як найбільш економічний з усіх процесів відпалювання;

3 зі збільшенням $t_{відп}$ в інтервалі 400–600 °C відбувається зниження твердості сталей двох видів, але у вуглецевої знеміцнення є більш інтенсивним;

4 в інтервалі досліджених відпускнух температур ударна в'язкість збільшується для зразків двох марок сталей. Для запобігання відпускнуої крихкості сталь 40X рекомендується прискорено охолоджувати, зокрема за високих температур $t_{відп} \geq 550$ °C.

Металографічні дослідження здійснювали на ударних зразках після механічних випробувань. Результати мікроструктурних досліджень наведені на рис. 3–7.

Відповідно до наведених рисунків, охолодження зразків у воді після аустенітування за $t = 850$ °C призвело до утворення дрібно-голчастої мартенситної структури в двох марках сталі (рис. 3, а і 4, а). Однак під час дослідження внутрішньої області зразків сталі 40 була виявлена наявність розірваної трооститної сітки, розташованої вздовж границь колишніх аустенітних зерен (рис. 3, б).

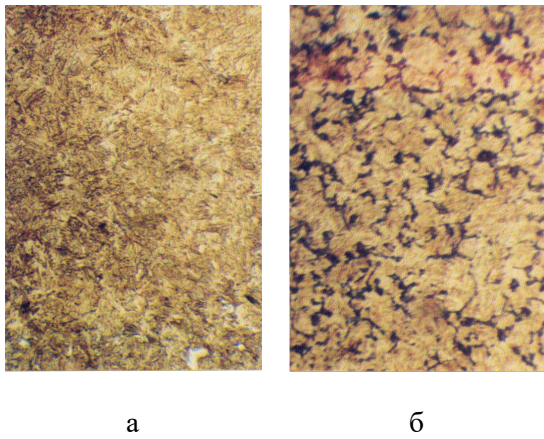


Рис. 3. Мікроструктура сталі 40 після гартування у воді, $\times 500$: а – поверхневий шар; б – серцевина зразка

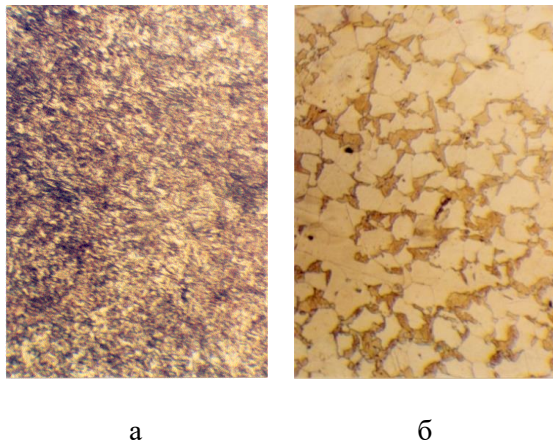


Рис. 4. Мікроструктура сталі 40X після гартування у воді, $\times 500$: а – серцевина зразка; б – поверхневий знеуглецьований шар

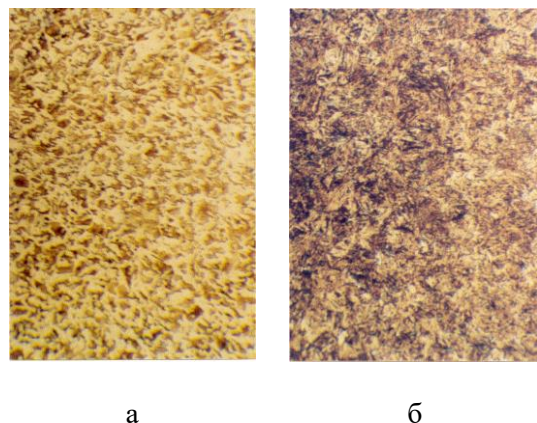


Рис. 5. Мікроструктура сталей 40 і 40X після гартування в маслі, $\times 500$: а – сталь 40; б – сталь 40X

Відповідно до літературних даних, прогартуваність сталі 40, залежно від різнома-

нітних чинників, дорівнює від 3,5 до 8 мм. Отже, через низьку прогартуваність цієї сталі серцевина зразків, які мають розміри в поперечному перерізі 10 x 10 мм, охолоджувалася зі швидкістю, що була нижче за критичну, що й призвело до часткового розпаду аустеніту в перлітній області.

Частка трооститних областей, розрахована методом січних, дорівнює 15–20 % від загального обсягу, але внаслідок того, що загартованою зоною є напівмартенситні області, цей зразок має наскрізну прогартуваність: (80–85) % М + (15–20) % Т.

Під час дослідження зразків сталі 40X, загартованих у воду, на поверхні, розташованій зі зворотного боку надрізу (місце удару маятника), є знеуглецьована область (рис. 4, б). Ширина цієї зони змінна й дорівнює від 0,2 мм до 2,0 мм. Цим можна пояснити знижену твердість і більш високу ударну в'язкість зразків. Хоча перед вимірюваннями твердості поверхневий шар знімався на абразивному колі на глибині до 0,1 мм, але цього, відповідно до металографічних досліджень, недостатньо. Засипання зразків чавунною стружкою є недостатнім заходом захисту від окиснення за тривалих витримок повного відпалювання, здійсненого в печі з окисною атмосферою.

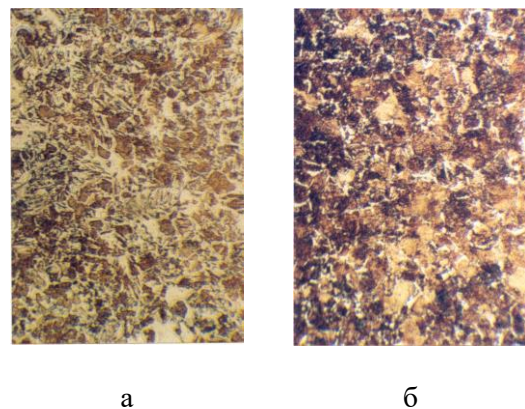


Рис. 6. Мікроструктура сталей 40 і 40X після нормалізації, $\times 500$: а – сталь 40; б – сталь 40X

Наступна партія зразків сталей 40 і 40X охолоджувалася в маслі. Для сталі 40X швидкість охолодження в цьому середовищі була не нижче за критичну, внаслідок чого цей зразок також отримав мартенситну структуру (рис. 5 б). Знижена твердість її, як і в попередньому випадку, пояснюється наявністю знеуглецьованого шару, хоча й меншої глибини (h до 0,20 мм).

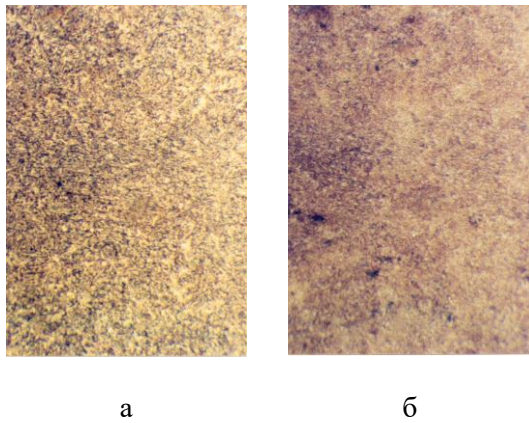


Рис. 7. Мікроструктура сталей 40 і 40Х після гартування і відпускання за $t_{\text{відп}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $\times 500$: а – сталь 40; б – сталь 40Х

У сталі 40 масло не забезпечує отримання мартенситної структури через те, що швидкість охолодження є менше за критичну, отже, переохолоджений аустеніт розпадається у верхній області С-подібної кривої. У результаті цього формується досить дисперсна Ф + Ц суміш, що складається із зерен фериту й сорбітоподібного перліту (рис. 5 а).

Охолодження на повітрі (нормалізація) призвело до утворення ферито-перлітних сумішей в двох марках сталей (рис. 6 а, б).

Однак у цих мікроструктурах сталей є відмінності. Так, об'ємна частка фериту у вуглецевої сталі більше, ніж у легованій, крім того, і тип розташування цієї фази інший. У сталі 40 ферит загалом виділяється у вигляді рівноосних зерен, а в сталі 40Х – у вигляді несучільної сітки вздовж границь зерен перлітних колоній. Дисперсність перлітних областей теж різна: досить груба в сталі 40 і тонкоциференційована в сталі 40Х, тобто сорбіто- або трооститоподібна. Це свідчить про те, що охолодження на повітрі в легованій сталі призводить до розпаду аустеніту за більш низьких температур внаслідок більш великої стійкості переохолодженого аустеніту в хромистих сталях.

Поліпшення сталей ($t_{\text{відп}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$) призводить до повного розпаду мартенситу й утворення подібних структур для двох типів сталей – сорбіту відпускання. Дисперсність карбідних частинок зернистої форми вище в легованій сталі внаслідок гальмування хромом процесу коагуляції цементиту.

На основі металографічного аналізу можна дійти таких висновків:

1 через малу прогартуваність сталі 40 у серцевині зразка, крім мартенситу, наявні ділянки трооститної структури;

2 сталь 40Х загартовується на мартенсит і в маслі, і у воді, а сталь 40 необхідно охолоджувати тільки в середовищах з високою охолоджувальною здатністю;

3 наявність зневуглецьованого шару призвела до зменшення твердості та до збільшення ударної в'язкості зразків, що є наслідком недостатнього захисту від окиснювальної атмосфери печі;

4 нормалізація призводить до розпаду аустеніту у верхніх областях С-подібної кривої з утворенням ферито-перлітних сумішей різної морфології;

5 структура поліпшених сталей 40 і 40Х – сорбіт із зернистою формою цементиту.

Висновки

Експерименти, проведені в цій роботі, дозволили здійснити порівняльний аналіз впливу різних технологічних параметрів термічного оброблення на структуру та властивості середньовуглецевих сталей 40 і 40Х, які поліпшуються. Також визначені чинники, які можуть вплинути на якість деталей, виготовлених з цих марок сталей. Проаналізувавши отримані результати металографічних досліджень і механічних властивостей, можна дійти таких висновків:

1 сталь 40 з малою стійкістю переохолодженого аустеніту для отримання суцільної прогартуваності деталей має бути охолоджувана (холодна вода, 8–12-відсоткові водні розчини NaOH або NaCl тощо);

2 додавання 1-відсоткового хрому підвищує стійкість переохолодженого аустеніту, тобто збільшує прогартуваність сталі, тому деталі, виготовлені з економно-легованої сталі 40Х, можна охолоджувати в маслі. Якщо деталь великогабаритна, варто використати більш високу швидкість охолодження – у воді;

3 як знеміцнювальне термічне оброблення, що збільшує пластичність і ударну в'язкість, для сталей 40 і 40Х можна рекомендувати нормалізацію. Якщо рівень твердості нормалізованої легованої сталі є високим, то необхідно використати повне або ізотермічне відпалювання;

4 щоб запобігти зневуглецюванню сталі за високих температур і тривалих витримках необхідно використовувати захисні атмосфери. У випадку оброблення деталей у печах з окисною атмосферою засипання деталей необхідно здійснювати з графітом, тому що чавунна стружка не забезпечує надійного захисту від окиснення;

5 у рекомендованому довідковою літературою інтервалі відпускних температур сталей, які поліпшуються (400–600 °С), відбувається монотонне зниження твердості двох типів сталей, але у вуглецевої процес знеміцнення є більш інтенсивним;

6 для запобігання розвитку відпускної крихкості II роду, до якої схильна сталь 40X, охолодження під час відпускання необхідно здійснювати прискорено (у маслі, у воді), зокрема у випадку, якщо температура відпускання більше ніж 550 °С.

Література

1. Куцова В. З., Ковзель М. А., Носко О. А. Спеціальні сплави, рідкоземельні та благородні метали: навч. посіб. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. 162 с.
2. Сушенцева Л. Л., Чорна В. В., Чорний С. В. Матеріалознавство в машинобудуванні: електронний посібник. Харків: СМІТ, 2008.
3. Металознавство: підручник / Бялік О. М. та ін. Київ: Політехніка, 2002. 384 с.
4. Кузін О. А., Яцюк Р. А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник. Львів: Афша, 2002. 300 с.
5. Гапонова О. П., Будник А. Ф. Сталі та сплави з особливими властивостями: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2014. 240 с.
6. Куцова В. З., Ковзель М. А., Носко О. А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями: підручник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 348 с.
7. Руденко Л. Ф., Говорун Т. П. Леговані сталі та сплави: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2012. 171 с.
8. Канарчук В. Є., Шевченко В. І. Методи дослідження металів: навч. посіб. Київ: НТУ, 2001. 98 с.
9. Горват А. А., Молнар О. О., Мінькович В. В. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel: навч. посіб. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2019. 160 с.
10. Климов О. В., Кононенко Ю. І., Грешта В. Л. Сталі та сплави з особливими властивостями: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. 315 с.
11. Методи та засоби мікроскопії: моногр / Антонюк В. С. та ін. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 336 с.

References

1. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Nosko O. A. Spetsialni сплави, rikkozemelni ta blahorodni metaly: navch. posib. Dnipropetrovsk: NMetAU, 2007. 162 s.
2. Sushentseva L. L., Chorna V. V., Chorni S. V. Materialoznavstvo v mashynobuduvanni: elektronnyi posibnyk. Kharkiv: SMIT, 2008.
3. Metaloznavstvo: pidruchnyk / Bialik O. M. ta

in. Kyiv: Politekhnik, 2002. 384 s.

4. Kuzin O. A., Yatsiuk R. A. Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv: pidruchnyk. Lviv: Afisha, 2002. 300 s.
5. Haponova O. P., Budnyk A. F. Stali ta сплаvy z osoblyvymy vlastyvoistamy: navch. posib. Sumy: Sumskyi derzhavnyi universytet, 2014. 240 s.
6. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Nosko O. A. Legovani stali ta сплаvy z osoblyvymy vlastyvoistamy. Pidruchnyk. Dnipropetrovsk: NMetAU, 2008. 348 s.
7. Rudenko L. F., Hovorun T. P. Legovani stali ta сплаvy: navch. posib. Sumy: Sumskyi derzhavnyi universytet, 2012. 171 s.
8. Kanarchuk V. Ye., Shevchenko V. I. Metody doslidzhennia metaliv: navch. posib. Kyiv: NTU, 2001. 98 s.
9. Horvat A. A., Molnar O. O., Minkovych V. V. Metody obrobky eksperymentalnykh danykh z vykorystanniam MS Excel: navch. posib. Uzhhorod: Vydavnytstvo UzhNU "Hoverla", 2019. 160 s.
10. Klymov O. V., Kononenko Yu. I., Hreshta V. L. Stali ta сплаvy z osoblyvymy vlastyvoistamy: navch. posib. Zaporizhzhia: ZNTU, 2014. 315 s.
11. Metody ta zasoby mikroskopii: monohr / Antoniuk V. S. ta in. Kyiv: NTUU "KPI", 2013. 336 s.

Протасенко Тетяна Олександрівна¹, доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел.: (057) 707-37-92, e-mail: 290854protas@gmail.com,

Рєброва Олена Михайлівна², к.т.н., доцент, доцент кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35,

e-mail: rebrovaem0512@gmail.com

Федоренко Ганна Анатоліївна², інж. I кат, кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35, e-mail: ann161169@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, вул. Ярослава Мудрого, м. Харків, 61002, Україна,

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Studying the influence of heat treatment modes on the properties of medium-carbon steel

Abstract. Problem. *Parts of modern machines and structures operate under high dynamic loads, stress concentrations, and low or high temperatures. All of this contributes to brittle fracture and reduces the reliability of machines. Therefore, structural steels must, in addition to high mechanical properties, have high structural strength, which is manifested in the conditions of its actual use in the form of parts, structures, etc. [1] A properly selected heat treatment mode allows to obtain an optimal combination of properties in a part, thereby ensuring its reliability and operational durability.*

Goal. The aim of the study is to determine the effect of heat treatment parameters on the hardness, impact strength, and structure of 40 and 40X medium-carbon steels. **Method.** In the course of the work, a set of mechanical studies was carried out on samples of 40 and 40X steels in the initial state and after various heat treatment modes. **Results.** Based on the analysis of mechanical studies, the influence of heat treatment parameters on the mechanical properties and structure of medium-carbon steels 40 and 40X was studied. On the basis of mechanical and microstructural studies, the relationship between the effect of economical alloying of medium-carbon steel and the main indicators of mechanical properties in the range of heating temperatures was established. The experiments conducted in this work allowed us to obtain a comparative characterization of the effect of various technological parameters of heat treatment on the structure and properties of medium-carbon steels 40 and 40X, which are being improved. The factors that may affect the quality of parts made from these steel grades were also identified. Summarizing the results of metallographic studies and mechanical properties, the following conclusions can be drawn: 1 steel 40, which has low supercooled austenite stability, must be cooled sharply (cold water, 8–12 % aqueous solutions of NaOH or NaCl, etc.) to obtain continuous hardenability of parts; 2 the addition of 1 % chromium increases the stability of supercooled austenite, i.e. increases the hardenability of steel, so parts made of economical 40X alloy steel can be cooled in oil. However, if the part is large, a higher cooling rate should be used – in water; 3 normalizing can be recommended for 40 and 40X steels as a work hardening heat treatment that increases ductility and impact strength. However, if the hardness level of the normalized alloy steel is high, then full or isothermal annealing should be used;

4 to prevent decarburization of steel at high temperatures and long holding times, protective atmospheres must be used. In the case of processing parts in furnaces with an oxidizing atmosphere, the parts must be filled with graphite, because cast iron chips do not provide reliable protection against oxidation; 5 in the range of tempering temperatures of improving steels recommended by the reference literature (400–600 °C), a monotonic decrease in hardness of both steels occurs, but in carbon steels, the hardening is more intense than in alloy steels; 6 to prevent the development of tempering brittleness of the second kind, to which 40X steel is prone, cooling during tempering should be accelerated (in oil, water), especially if the tempering temperature exceeds 550 °C.

Key words: steel grades 40 and 40X, structure, hardness, impact strength, temper brittleness.

Protasenko Tetiana¹ Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, tel.: (057) 707-37-92, e-mail: 290854protas@gmail.com,

Rebrova Olena², Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: rebroyaem0512@gmail.com,

Fedorenko Hanna², eng. I category, Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: ann161169@gmail.com,

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.