

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.15'-.74.-194-15.669.17

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-15>

### ТЕРМООБРОБКА КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ 20ГЛ, 25ГФЛ 45Г З НАГРІВОМ У МІЖКРИТИЧНИЙ ІНТЕРВАЛ ТЕМПЕРАТУР (МКІТ) ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

**Бурова Дар'я Володимирівна,**

доцент, кандидат технічних наук,

старший викладач кафедри матеріалознавства та прикладної механіки

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

ORCID ID:0009-0000-3460-8602

У статті узагальнено результати досліджень щодо впливу термообробки з нагрівом у міжкритичний інтервал температур (МКІТ) сталей 20ГЛ, 25ГФЛ і 45Г. Застосовувалися різноманітні види термообробки з нагрівом у МКІТ. У досліджених сталях отримана багатофазна дисперсна за хімічним складом структура. Використано дюриметричний, металографічний і рентгенівський методи дослідження. Отримано дані щодо механічних властивостей при розтягненні й ударної в'язкості. Ці властивості порівняно з отриманими в досліджених сталях після типової термообробки. Вдалося показати, що в досліджених сталях при проведенні різних способів термообробки немає необхідності при нагріванні отримувати однофазну однорідну за хімічним складом аустенітну структуру. Отримання в сталях, які досліджувалися, багатофазної дисперсної мікронеоднорідної структури способами термообробки з регламентованими нагріванням і витримкою в МКІТ дає змогу отримати після нормалізації, гарту й високої або низької відпустки, а також ізотермічного гарту добре поєднання міцнісних і пластичних властивостей. Їх рівень перевищує одержуваний після звичайної термообробки.

У дослідженні розглядається альтернативна версія, згідно з якою для підвищення механічних і службових властивостей сталей необхідне отримання в них багатофазних дисперсних мікронеоднорідних структур, що складаються з мартенситу, бейніту, фериту, карбідів, карбонітридів і метастабільного залишкового аустеніту, а також їх комбінацій. Щоб отримати такі структури, має сенс при проведенні термообробки доєвтектоїдних сталей проводити нагрівання й витримку в МКІТ, у яких утворюється аустеніт, також поряд із ним присутні ферит і карбіди. У цьому випадку аустеніт має хімічну мікронеоднорідність, тому що на його кордоні з карбідом концентрація вуглецю значно вища, ніж на кордоні з феритом. Це дає змогу отримувати багатофазну дисперсну мікронеоднорідну структуру після термообробки.

Видається можливим збільшити експлуатаційну стійкість деталей машин за рахунок підвищення механічних властивостей сталей, що є важливим завданням матеріалознавства. Одним зі способів вирішення цього завдання є отримання в сталях багатофазної структури, однією зі складових якої є метастабільний аустеніт, у якому відбувається динамічне деформаційне мартенситне перетворення (ДДМП) при навантаженні й ефект само гартування при навантаженні (СГН). Способи термообробки з нагріванням у МКІТ просто реалізуються в умовах виробництва та дають змогу забезпечити енергозбереження. Вибирати режими їх проведення треба з урахуванням отримання необхідних властивостей, вихідної структури, її дефектності й перерізу виробів.

**Ключові слова:** міжкритичний інтервал температур (МКІТ), нормалізація, гарт, відпуск, багатофазна структура, механічні властивості.

#### **Burova Daria. Heat treatment of constructural steel 20gl, 25gfl 45g with heating in the intercritical temperature interval (iti) to increase mechanical properties**

In the work, steels 20GL, 25GFL 45G were investigated. Various types of heat treatment were carried out with heating in the intercritical temperature interval. In the studied steels, a multiphase structure dispersed in chemical composition was obtained. Durometric, metallographic and X-ray research methods were used. Mechanical properties under tension and impact toughness were determined. These properties were compared with those obtained from the studied steels after typical heat treatment.

It is shown that in the investigated steels, when performing various methods of heat treatment, there is no need to obtain a single-phase austenite structure, which is homogeneous in terms of its chemical composition, during heating. The creation of a multiphase dispersed micro-inhomogeneous structure in the studied steels by heat treatment methods, which include regulated heating and holding in ITI, allows to obtain after normalization, tempering and high or low tempering, as well as isothermal tempering, a good combination of strength and plastic properties, the level of which exceeds that obtained after the usual.

*The paper considers an alternative point of view, according to which to improve the mechanical and service properties of steels, it is necessary to obtain multiphase dispersed micro-inhomogeneous structures in them, consisting of martensite, bainite, ferrite, carbides, carbonitrides and metastable residual austenite, as well as their various combinations. In order to obtain such structures, it is advisable to use heating and holding in ITI during the heat treatment of pre-eutectoid steels, in which austenite is formed, along with ferrite and carbides. At the same time, austenite has chemical micro-heterogeneity, because the carbon concentration at its border with carbide is significantly higher than at the border with ferrite. This makes it possible to obtain a multiphase dispersed micro-inhomogeneous structure after heat treatment.*

*Increasing the mechanical properties of steels makes it possible to increase the operational stability of machine parts, which is an important task of materials science. One of the directions of its solution is to obtain a multiphase structure in steels, one of the components of which is metastable austenite, in which the dynamic deformation martensitic transformation (DSMT) and the effect of self-hardening under load (SHL) occur under load. Methods of heat treatment with heating at ITI are easily implemented in production conditions and allow for energy savings. Modes of their implementation should be chosen taking into account obtaining the necessary properties, the initial structure, its defects and the cross-section of the products.*

**Key words:** *intercritical temperature interval (ITI), normalization, quenching, tempering, multiphase structure, mechanical properties.*

**Вступ.** У довідковій, навчальній літературі й заводській практиці широко поширені уявлення, що при нормалізації та гартуванні доевтектоїдних сталей нагрівання варто проводити в однофазну аустенітну ділянку з невеликим перевищенням точки  $A_{c3}$ , що дає змогу карбідам розчинитися в аустеніті та вирівнювання його. Результатом термообробки є отримання дрібнозернистої структури, а при гартуванні – мартенситу або бейніту, однорідних за хімічним складом, при цьому в структурі відсутні ферит і карбіди. Розглянута альтернативна точка зору, за якою для підвищення механічних і службових властивостей сталей необхідне отримання в них багатофазних дисперсних мікронеоднорідних структур, а саме: мартенситу, бейніту, фериту, карбідів, карбонітрідів і метастабільного залишкового аустеніту, а також їх різноманітних поєднань [1–3]. Існують варіанти структури, які складаються лише з деяких із них. Для отримання таких структур доцільно при проведенні термообробки доевтектоїдних сталей використовувати нагрівання й витримку в МКІТ, у яких утворюється аустеніт, поряд із ним присутні ферит і карбіди. При цьому аустеніт має хімічну мікронеоднорідність, тому що на його кордоні з карбідом концентрація вуглецю істотно вища, ніж на кордоні з феритом. Це дає змогу отримати після термообробки багатофазну дисперсну мікронеоднорідну структуру. Лише гарт із МКІТ низьковуглецевих сталей, що використовуються для глибокої витяжки, має широке промислове застосування. Ця термообробка забезпечує отримання двофазної структури, яка складається з фериту та 25–30% низьковуглецевого мартенситу [4]. У роботі [5] показана ефективність нормалізації з нагріванням у МКІТ спеціально розроблених для цього будівельних сталей 09Г2СЮ4 та 09ХГ2СЮ4. Відомі дослідження з ізотермічного гарту з МКІТ

сталі 37ГС [6], що зазвичай піддається поліпшенню. У роботах [7–9] запропоновано при проведенні термообробок сталей з нагріванням у МКІТ застосовувати комбінований нагрів: спочатку в МКІТ з регламентованою витримкою, а потім в аустенітну ділянку на короткий час. Це дає змогу, якщо потрібно, перешкодити після гартування утворення в структурі фериту, що знижує властивості міцності, і зберегти мікронеоднорідність хімічного складу, отриману попереднім нагріванням в МКІТ. Показана ефективність зазначених термообробок з нагріванням в МКІТ на порівняно невеликій кількості сталей.

**Методи та методики дослідження.** У роботі ставилося завдання: у сталях, які широко застосовуються, – 20ГЛ, 25ГФЛ, 45Г (таблиця 1), використовувати способи термообробки, що застосовують на виробництві (нормалізація, гартування й відпустка), здійснивши нагрівання та витримку в МКІТ, отримати в них багатофазну за хімічним складом і дисперсну структуру. Така термообробка дає змогу підвищити механічні властивості досліджених сталей. Відповідної інформації для цих сталей у літературі немає. Позитивні результати підтвердили б правильність альтернативної точки зору про недоцільність у низці випадків, наприклад, при загартуванні досліджених доевтектоїдних сталей, обов'язково досягати нагріванням і витримкою отримання однорідного за хімічним складом аустеніту. Це дало б змогу реалізувати ресурсозбереження за рахунок нагріву в МКІТ і, відповідно, зниження температури нагріву.

При проведенні термообробки в низці випадків після нагрівання в МКІТ [8] або перед ним [9] проводилася аустенітизація. У цьому полягала особливість досліджень. Також реалізований спосіб ізотермічного гарту, що полягає в охолодженні до необхідної температури утворення нижнього бейніту (після нагрівання в МКІТ або

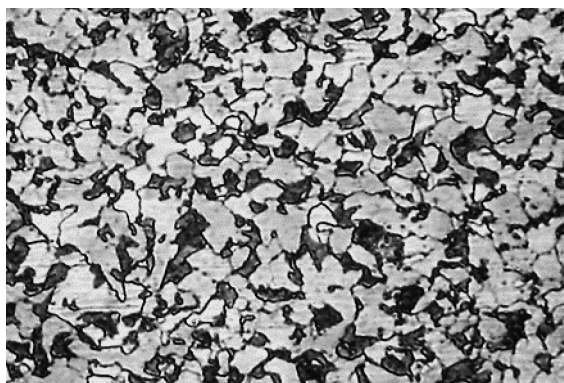
Таблиця 1

**Хімічний склад і критичні точки досліджених сталей**

| Сталь | Хімічний склад, мас, % |      |      |      |       |       | Критичні точки  |                 |     |
|-------|------------------------|------|------|------|-------|-------|-----------------|-----------------|-----|
|       | C                      | Mn   | Si   | V    | S     | P     | Ac <sub>1</sub> | Ac <sub>3</sub> | Mn  |
| 20ГЛ  | 0,19                   | 1,38 | 0,45 | –    | 0,019 | 0,020 | 720             | 860             | 420 |
| 25ГФЛ | 0,25                   | 1,55 | 0,51 | 0,12 | 0,025 | 0,025 | 735             | 875             | 435 |
| 45Г   | 0,46                   | 0,87 | 0,32 | –    | 0,027 | 0,021 | 720             | 770             |     |

аустенітну ділянку) не в розплаві солей, як це зазвичай прийнято, а у воді, що більш екологічно. Після цього проводилася витримка в печі [7]. У роботі застосовувалися металографічний, рентгенівський методи дослідження й визначалися механічні властивості досліджених сталей. У таблиці 2 наведені дані, які показують, що нормалізація з нагріванням в МКІТ за оптимальними режимами дає змогу отримати більш високий рівень механічних властивостей, аніж аналогічна термообробка за типовим режимом з нагріванням в аустенітну ділянку. Для сталі 20ГЛ додатково проведено нормалізацію з нагріванням у МКІТ з попередньою і також подальшою аустенітизацією. Їхня роль полягає

в отриманні дрібнозернистого аустеніту. При вибраній температурі й витримці в МКІТ зменшується частка фериту і збільшується кількість аустеніту в структурі. Відбувається перерозподіл вуглецю та марганцю між  $\alpha$  й  $\gamma$  фазами та збагачення ними останньої. Унаслідок цього підвищується стійкість  $\gamma$  фази до розпаду при охолодженні. Сформована після нормалізації з МКІТ структура – це ферит і дисперсна феритокарбідна суміш. Її більше, ніж при аналогічній термообробці за типовим режимом, що передбачає нагрівання в аустенітну ділянку (рис. 1а, б). Це зумовлює підвищення властивостей міцності. Велика пластичність виникає внаслідок очищення фериту від вуглецю,



а



б



в



г

**Рис. 1. Мікроструктура після термообробок сталі 25ГФЛ х 500:**  
**а – нормалізація за типовим режимом; б – нормалізація з нагріванням в МКІТ 760 °С, 60 хв; в – гартування з нагріванням МКІТ 760 °С, 60 хв, відпуск 630 °С, 60 хв; г – ізотермічне гартування з нагріванням МКІТ 760 °С, 60 хв, охолодження у воді до 470 °С, витримка 40 хв**

Таблиця 2

**Механічні властивості досліджених сталей після нормалізації за типовим режимом і з нагріванням у МКІТ**

| Сталь | Режим термообробки                | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | КСУ, МДж/м <sup>2</sup> |
|-------|-----------------------------------|----------------------|------------------|--------------|------------|-------------------------|
| 20ГЛ  | 890 °С, 20 хв, пов                | 408                  | 562              | 22           | 38         | 1,20                    |
|       | 760 °С, 60 хв, пов                | 420                  | 586              | 30           | 50         | 1,67                    |
|       | 890 °С, 20 хв, 760 °С, 60 хв, пов | 452                  | 605              | 34           | 67         | 1,73                    |
|       | 760 °С, 60 хв, 890 °С, 5 хв, пов  | 435                  | 596              | 35           | 70         | 1,85                    |
| 25ГФЛ | 930 °С, 20 хв, пов                | 415                  | 570              | 25           | 53         | 1,40                    |
|       | 780 °С, 60 хв, пов                | 546                  | 632              | 26           | 68         | 1,67                    |
| 45Г   | 850 °С, 20 хв, пов                | 640                  | 730              | 23           | 67         | 1,40                    |
|       | 760 °С, 60 хв, пов                | 650                  | 750              | 25           | 70         | 1,55                    |

Примітка: \* пов – охолодження на повітрі.

а можливо, й азоту, що є у сталі [2]. У роботі [6] докладно досліджена кінетика утворення аустеніту в доевтектоїдних сталях, збільшення в ньому вмісту вуглецю порівняно з вихідним і фазовий склад при різних витримках у МКІТ. Так, у сталі 20 після витримки 60–120 хв у МКІТ кількість аустеніту більше ніж у 2 рази перевищує рівноважну. Також уміст у ньому вуглецю значно вищий за вихідний.

**Результати.** Відповідно, після охолодження з МКІТ на повітрі в структурі присутня більша кількість феритокарбідної суміші, ніж після нормалізації за типовим режимом. Це підтверджують отримані в роботі результати.

Досліджувався також вплив на механічні властивості поліпшення з нагріванням під гартування в МКІТ, тому що аналогічна термообробка з аустенітизацією при температурах  $A_{c3} + (30-50)^\circ\text{C}$  широко застосовується для досліджених сталей. Дані, які отримані, показують, що гартування з МКІТ і високий відпуск дають змогу отримати підвищений рівень механічних властивостей порівняно з ними після поліпшення за типовим режимом (таблиця 3). Зростання властивостей міцності можна пояснити збільшенням кількості карбідів, що виділилися при високій відпустці в результаті розпаду мартенситу з підвищеним умістом вуглецю, що утворився зі збагаченого ним аустеніту, який виник після витримки в МКІТ. Роботи [5] підтверджують це. Згідно з даними роботи, мартенсит, що виник у результаті гартування сталей 40ГС і 40Г2С з МКІТ, мав на 10–20% більшу твердість, ніж після звичайного гартування. Карбіди, які не розчинилися при нагріванні під гарт, також можуть відігравати певну роль. Більша пластичність сталей після поліпшення, що включає на першому етапі нагрівання та витримку в МКІТ, зумовлена дрібнозернистістю структури, наявністю в ній рівномірно

розподілених невеликих за розмірами ділянок фериту (рис. 1, в), який очищений від вуглецю й азоту, формуванням розвиненої субструктури в а-твердому розчині, коагуляцією карбідів. Вплив на механічні властивості аустенітизації, проведеної перед витримкою МКІТ і після неї, вивчено на сталі 45Г, яка піддавалася поліпшенню (таблиця 3). Попередня аустенітизація з охолодженням на повітрі до 500–550 °С, далі нагрівання МКІТ і витримка 60 хв дають змогу отримати дрібне зерно в сталі (10 бал). Короткочасна аустенітизація після витримки в МКІТ і подальше охолодження у воді виключають утворення фериту, але зберігають хімічну неоднорідність мартенситу, що утворився. Комбінований нагрів підвищує властивості міцності, зберігає добрий рівень пластичності й ударної в'язкості. Такі дані узгоджуються з результатами, отриманими для маловуглецевих складнолегованих високоміцних сталей мартенситного класу в роботі [4].

Гартування з МКІТ і низька відпустка дають змогу в досліджених сталях отримати більш високі властивості міцності, ніж після нормалізації та поліпшення, які здійснені з нагріванням на ту ж температуру. Крім того, на достатньому рівні зберігається пластичність та ударна в'язкість (таблиця 4). Режимми нагріву в МКІТ та відпустки є можливість корегувати механічні властивості в потрібному напрямку. При поясненні впливу хімічної мікронеоднорідності структури на механічні властивості, які отримали після загартування з МКІТ і низької відпустки, варто враховувати утворення кристалів мартенситу з широким спектром умісту вуглецю. Дуже важливу роль відіграє метастабільний залишковий аустеніт, незважаючи на те що його кількість не перевищує 10 % [1–3]. Він знаходиться за межами рейок відпущеного мартенситу й підвищує опір руйнуванню. Крім

Таблиця 3

**Механічні властивості досліджених сталей після поліпшення за типовим режимом і гарту з МКІТ і високого відпуску**

| Сталь | Режим термообробки                                            | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | КСУ, МДж/м <sup>2</sup> |
|-------|---------------------------------------------------------------|----------------------|------------------|--------------|------------|-------------------------|
| 20ГЛ  | 890 °С, 20 хв, в, від,<br>630 °С, 60 хв, пов                  | 563                  | 661              | 21           | 56         | 1,18                    |
|       | 760 °С, 60 хв, в, від,<br>630 °С, 60 хв, пов                  | 575                  | 678              | 28           | 68         | 1,66                    |
| 25ГФЛ | 930 °С, 60 хв, в, від,<br>670 °С, 60 хв, пов                  | 533                  | 619              | 19           | 50         | 1,24                    |
|       | 890 °С, 20 хв,<br>760 °С, 60 хв, пов                          | 544                  | 631              | 23           | 65         | 1,60                    |
| 45Г   | 850 °С, 20 хв, в, від,<br>550 °С, 60 хв, в.                   | 640                  | 750              | 16           | 55         | 0,91                    |
|       | 760 °С, 60 хв, в, від,<br>550 °С, 60 хв, в.                   | 670                  | 840              | 19           | 61         | 1,3                     |
|       | 850 °С, 20 хв,<br>760 °С, 60 хв, в, від,<br>550 °С, 60 хв, в. | 690                  | 895              | 15           | 57         | 1,2                     |
|       | 760 °С, 60 хв,<br>890 °С, 5 хв в, від,<br>550 °С, 60 хв, в.   | 710                  | 910              | 13           | 55         | 0,98                    |

Примітка: \* в – охолодження у воді, пов – охолодження на повітрі, від – відпустка.

Таблиця 4

**Механічні властивості досліджених сталей після гарту з МКІТ і низького відпуску**

| Сталь | Режим термообробки                      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | КСУ, МДж/м <sup>2</sup> |
|-------|-----------------------------------------|----------------------|------------------|--------------|------------|-------------------------|
| 20ГЛ  | 760 °С, 60 хв, в, від,<br>300 °С, 60 хв | 1050                 | 1280             | 12           | 47         | 0,74                    |
| 25ГФЛ | 780 °С, 60 хв, в, від,<br>300 °С, 60 хв | 1093                 | 1252             | 14           | 52         | 0,77                    |
| 45Г   | 760 °С, 60 хв, в, від,<br>250 °С, 60 хв | 1340                 | 1590             | 12           | 49         | 0,58                    |

Примітка: \* в – охолодження у воді, в – відпустка.

того, перетворення залишкового аустеніту на мартенсит деформації підвищує пластичність та ударну в'язкість [1–3]. Свою роль у підвищенні пластичності відіграє ферит, що зберігся в структурі. Гартування з МКІТ і низька відпустка потребують менше енерговитрат, ніж покращення за типовим режимом. При необхідності виключити ферит зі структури поверхневого шару, наприклад, для підвищення його зносостійкості, може бути застосовано гартування ТВЧ з нагріванням в аустенітну ділянку [4]. Дані, які отримано в роботі, показують можливість забезпечення гарного поєднання механічних властивостей у досліджених сталях ізотермічним гартуванням з нагріванням МКІТ (таблиця 5). У сталі 20ГЛ, у якій після ізотермічного гартування з МКІТ отримана найбільш висока пластичність, структура являє собою ~20 % фериту, ~20 % залишкового аустеніту, решта – нижній бейніт. Згідно з даними рентгеновського аналізу, при випробуваннях механічних властивостей залишковий аустеніт перетворюється на мартенсит деформації. У зоні

рівномірного подовження зразків при розтягуванні кількість залишкового аустеніту зменшується з ~20 % до ~10 %. Динамічне деформаційне мартенситне перетворення (ДДМП) являє собою не лише механізм зміцнення, а й підвищення пластичності [1–3]. Збільшує пластичність ферит, рівномірно розподілений у структурі у вигляді малих за розмірами ділянок (рис. 1 з). Кількісним співвідношенням структурних складових, розвитком ДДМП, механічними властивостями можна керувати зміною температурно-тимчасових режимів, МКІТ, а також і в бейнітній ділянці. Нагрівання в МКІТ досліджених сталей доцільно проводити при температурах  $A_{c1} + (30-60\text{ }^{\circ}\text{C})$ . Вищий нагрів у ділянці МКІТ збільшує кількість аустеніту, при тому що ступінь його збагачення вуглецем знижується. У результаті після гартування, й ізотермічного в тому числі, у структурі зменшується кількість фериту й залишкового аустеніту, що надають сталям підвищену пластичність, і збільшується частка мартенситу або бейніту при ізотермічному гартуванні, що підвищують

Таблиця 5

**Механічні властивості досліджених сталей після ізотермічного гартування**

| Сталь | Режим термообробки                                           | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\sigma_b$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | КСУ, МДж/м <sup>2</sup> |
|-------|--------------------------------------------------------------|----------------------|------------------|--------------|------------|-------------------------|
| 20ГЛ  | 760 °С, 60 хв, в, до 470 °С, і.в. 40 хв, пов                 | 691                  | 775              | 18           | 56         | 1,12                    |
|       | 890 °С, 20 хв, 760 °С, 60 хв, в. до 470 °С, і.в. 40 хв., пов | 814                  | 992              | 24           | 56         | 1,78                    |
| 25ГФЛ | 780 °С, 60 хв, в, до 500 °С, і.в. 40 пов                     | 761                  | 826              | 18           | 52         | 1,25                    |
| 45Г   | 760 °С, 60 хв, в, до 400 °С, і.в. 40 хв., пов                | 810                  | 920              | 24           | 56         | 1,4                     |

Примітка: \* і.в. – ізотермічна витримка, в – вода, пов – повітря.

міцнісні властивості. Для отримання в зразках досліджених сталей найбільш хорошого поєднання механічних властивостей витримку МКІТ доцільно здійснювати протягом 60 хв. Для зразків сталей 20ГЛ та 25ГФЛ температура ізотерми повинна становити 450–500 °С, 45Г – 400 °С. Нижчі температури ізотерми створюють у бейніті більш високий ступінь його пересичення вуглецем, що підвищує властивості міцності і знижує пластичність та ударну в'язкість. При більш високих температурах утворюється верхній бейніт, який робить сталь більш крихкою. У досліджених сталях при малих витримках після ізотермічного гарту утворюється найбільша кількість залишкового аустеніту, а разом із нижнім бейнітом може бути присутнім у структурі мартенсит. Крім того, залишковий аустеніт при випробуваннях механічних властивостей активно перетворюється на мартенсит деформації. Ці фактори збільшують властивості міцності, але знижують пластичність та ударну в'язкість.

Кількість залишкового аустеніту і ступінь його стабільності оптимізуються при витримках 40–60 хв, а в бейніті – формується розвинена субструктура, що забезпечує високий рівень пластичності й ударної в'язкості за достатньої для багатьох випадків міцності. Варто зазначити, що при виборі режиму термообробки з нагріванням у МКІТ необхідно враховувати хімічний склад сталі, її вихідну структуру та дефектність, що є наслідком деформації, а також переріз виробу [4]. Способи термообробки з нагріванням у МКІТ є ресурсозберігаючими, тому що забезпечують більш високий рівень механічних властивостей при меншій у низці випадків витраті енергоносіїв.

Ці способи термообробки легко можуть бути реалізовані без будь-яких капітальних витрат на термічному обладнанні й дати значний економічний ефект. Це робить необхідним для доевтектоїдних сталей різного хімічного складу проведення системних досліджень щодо визначення оптимальних режимів різних способів термообробки

з нагріванням у МКІТ і широке впровадження їх у виробництво.

**Висновки.** Отже, на основі викладеного вище можемо резюмувати таке:

1. У досліджених сталях показано, що при проведенні різних способів термообробки не треба при нагріванні отримувати однофазну однорідну за хімічним складом аустеніту структуру. Створення в досліджених сталях багатофазної дисперсної мікронеоднорідної структури способами термообробки, що включають регламентовані нагрівання й витримку в МКІТ, дає змогу отримати після нормалізації, гарту і високої або низької відпустки, а також ізотермічного гарту добре поєднання пластичних властивостей і характеристик міцності, рівень яких перевищує одержуваний після звичайного.

2. На властивості після гарту з МКІТ і низької відпустки, а також ізотермічного гарту має великий вплив залишковий аустеніт, що перетворюється при деформації на мартенсит. Кількістю і стабільністю залишкового аустеніту і його структурою необхідно керувати, оптимізуючи їх за рахунок температурно-часових режимів термообробки.

3. Підвищити властивості міцності й зберегти достатню пластичність і ударну в'язкість при необхідності в низці випадків доцільно при проведенні відповідної термообробки перед витримкою в МКІТ, здійснюючи аустенітизацію з подальшим охолодженням на повітрі до 500–550 °С. У разі аустенітизації після витримки МКІТ витримка повинна бути короткочасною, що зберігає отриману в МКІТ хімічну мікронеоднорідність, а охолодження після нагрівання в аустенітну ділянку варто проводити, відповідно, цим способом термообробки.

4. Режими проведення термообробок варто вибирати з урахуванням отримання необхідних властивостей, вихідної структури, її дефектності й перерізу виробів.

5. Способи термообробки з нагріванням у МКІТ легко реалізуються в умовах виробництва й дають змогу забезпечити енергозбереження.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Матеріалознавство : підручник / С.С. Дьяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. Харків : Видатництво ХНАДУ, 2007. 440 с.
2. Єфременко В.Г. Підвищення довговічності деталей машин. Маріуполь : ПДТУ, 2000. 183 с.
3. Бекетов О.В. Особливості процесів структуроутворення і розробка параметрів зміцнення сталі 10Г2ФБ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. Дніпро, 2004. 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., Солідор Н.А., Мілентьєв 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.
6. 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.
7. Пат. UA 79717 Україна, С21Д 1/18. Спосіб термообробки / Л.С. Малінов. Заявл. 24.07.2006. Опубл. 15.03.2007. Бюл. № 3.
8. Пат. UA 95409 Україна, С21Д 1/06, С21Д 1/18С21Д 1/78, Спосіб термообробки / Л.С. Малінов, Д.В. Малинова. Заявл. 24.07.2006. Опубл. 15.03.2007. Бюл. № 3.
9. Декл. пат. на корисну модель UA 6414 Україна, С21Д1/00. Спосіб термообробки / Л.С. Малінов. Заявл. 28.07.2004. Опубл. 16.05.2005. Бюл. № 5.

#### REFERENCES:

1. Materialoznavstvo: Pidruchnyk [Material science: Textbook] / S.S. Diachenko, I.V. Doshchekina, A.O. Movlian, E.I. Pleshakov. Kharkiv : Vydnytstvo KhNADU, PUBLISHING COMPANY HNADU, 2007. 440 s. [in Ukrainian].
2. Efremenko, V.H. (2000). Pidvyshchennia dovhovichnosti detalei mashyn [Increasing the durability of machine parts]. *Mariupol: PDTU, Mariupol: PSTU*, 183 s. [in Ukrainian].
3. Beketov, O.V. (2004). Osoblyvosti protsesiv strukturoutvorennia i rozrobka parametriv zmitsnennia stali 10H2FB [Peculiarities of the processes of structure formation and the development of strengthening parameters of steel 10G2FB] / O.V. Beketov. *Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk* (05.02.01). Dnipro. 20 s. [in Ukrainian].
4. Malinov, L.S., Malinov, V.L., & Burova, D.V. (2022). Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei malovuhletsevykh nyzkolehovanykh stalei normalizatsiiei i 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 tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni, New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 3, S. 26–35 [in Ukrainian].
5. 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 tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni, New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 6, 98–99 [in Ukrainian].
6. 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].
7. Pat. UA 79717 Ukraina, S21D 1/18. Sposib termoobrobky [Method of heat treatment] / L.S. Malinov. Zaiavl. 24.07.2006. Opubl. 15.03.2007, Biul. № 3. [in Ukrainian].
8. Pat. UA 95409 Ukraina, S21D 1/06, S21D 1/18S21D 1/78, Sposib termoobrobky [Method of heat treatment] / L.S. Malinov, Malynova D.V. Zaiavl. 24.07.2006. Opubl. 15.03.2007, Biul. № 3 [in Ukrainian].
9. Dekl. pat. na korysnu model UA 6414 Ukraina, S21D1/00. Sposib termoobrobky [Method of heat treatment] / L.S. Malinov. Zaiavl. 28.07.2004. Opubl. 16.05.2005, Biul. № 5 [in Ukrainian].