

А.К. Автухов, О.Б. Калюжний, О.С. Борисенко, О.С. Корнєв

Державний біотехнологічний університет

**ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ  
ВЛАСТИВОСТІ ЗАЕВТЕКТОЇДНИХ СТАЛЕЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ  
ПІДВИЩЕНИХ ЗНАКОЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ТЕМПЕРАТУР**

*У даній роботі досліджується вплив хімічного складу та режимів термічної обробки заевтектоїдних сталей на основні оціночні критерії працездатності виробів, що експлуатуються в умовах підвищених знакозмінних навантажень та температур. У статті аналізуються мікроструктурні особливості сталей залежно від вмісту вуглецю та впливу термічної обробки (відпал, подвійна та потрійна нормалізація) на їх механічні властивості, такі як межа міцності на розрив та згин, твердість, термічна витривалість та зносостійкість. Зроблено висновок, що для покращення експлуатаційних властивостей заевтектоїдних сталей у важких умовах експлуатації доцільно застосовувати подвійну нормалізацію з відпалом при 600°C, а також використовувати оптимізований хімічний склад для досягнення максимальної ефективності.*

*Ключові слова:* заевтектоїдна сталь, хімічний склад, термічна обробка, мікроструктура, термічна тріщиностійкість, зносостійкість, механічні властивості

A.K. Avtukhov, O.B. Kalyuzhny, O.S. Borisenko, O.S. Kornev

**INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND HEAT TREATMENT ON THE  
PERFORMANCE PROPERTIES OF HYPEREUTECTOID STEELS OPERATING UNDER  
CONDITIONS OF INCREASED VARIABLE LOADS AND TEMPERATURES**

*In this work examines the influence of chemical composition and modes of heat treatment of eutectoid steels on the basic evaluative criteria for the performance of products, which are operated in conditions of increased variable loads and temperatures. The article analyzes the microstructural features of the steels depending on the carbon content and the impact of heat treatment (annealing, double and triple normalization) on their mechanical properties, such as the limit of rupture and flexion, hardness, thermal endurance and durability. The obtained regression equations made it possible to evaluate the effect of individual chemical elements on thermal endurance and durability at double normalization. On the basis of these equations, the optimized chemical composition of the eutectoid steel was calculated, which can provide the maximum level of operational indicators after double normalization. It is concluded that it is advisable to use double normalization with annealing at 600 °C to improve the performance properties of eutectoid steels in severe operating conditions, as well as to use optimized chemical composition to maximize efficiency.*

*Keywords:* eutectoid steel, chemical composition, heat treatment, microstructure, thermal fracture, durability, mechanical properties

**Постановка проблеми.** Заевтектоїдні сталі – це сталі, що містять більше за 0,8% вуглецю, але менше ніж 2,0%. Вони мають у своїй структурі основні компоненти, такі як ферит та цементит, і є частиною сталевих сплавів, які використовують у різних галузях за рахунок своїх властивостей.

Заевтектоїдні сталі мають високу міцність, що робить їх зручними для використання в умовах, де потрібна висока стійкість до зношування. Вони також застосовуються для виготовлення інструментів, що піддаються значним механічним навантаженням.

Широке використання заевтектоїдні сталі знайшли для виготовлення сталевих литих валків, які ефективно використовуються на листо- та сортопрокатних, трубних станах, а також на профілезагибальних агрегатах.

Найчастіше валки виготовляють із вмістом вуглецю у межах 1,0-2,0%. Від його частки в сплаві залежить структура металу. З підвищенням вмісту вуглецю до 1,2% структура сталі перлітна з окремими голками цементиту по тілу зерна. При 1,2-1,5% додатково з'являється розірвана цементитна сітка по межах зерен перлітної матриці. Сталі з більшою концентрацією вуглецю характеризуються формуванням грубої цементитної сітки та значною часткою голок вторинного цементиту[1]. При використанні валків із заевтектоїдної сталі застосовують сплави з різним вмістом легуючих елементів, що забезпечує необхідну частку карбідної фази, а, отже, і більшу твердість, зносостійкість в литому стані [2,3]. Додаткова термічна обробка заевтектоїдних сталей також сприяє підвищенню рівню їх експлуатаційних властивостей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах професорів Скобло Т.С. [4] та Власовця В.М. [5] наведені результати досліджень щодо впливу режимів термічної обробки на розподіл структурних складових на механічні властивості заевтектоїдних сталей та залежності, що надають можливість прогнозувати рівень властивостей виливок за коерцитивною силою, але питання щодо прогнозування вмісту хімічних елементів на рівень на основних оціночних критеріях працездатності

виробів, що працюють в умовах підвищених знакозмінних навантажень та температур досі залишається актуальним.

Мета роботи: вивчити вплив хімічних складових та режимів термічної обробки заевтектоїдних сталей на основні оціночні критерії працездатності виробів, що працюють в умовах підвищених знакозмінних навантажень та температур.

Одними з основних оціночних критеріїв працездатності виробів, що працюють в умовах підвищених знакозмінних навантажень та температур, поряд з показниками міцності та твердості є термічна тріщиностійкість та зносостійкість сплавів.

Термічну тріщиностійкість досліджуваних матеріалів оцінювали за кількістю циклів до руйнування зразків, що випробували на устаткуванні розробленому в Українському дослідницькому інституті металів (Харков, Україна). Індукційне нагрівання зразка проводили з кімнатної температури до 600 ° С, охолодження проводили потоком води. Контроль температури проводили контактними термopарами, що приварювали на поверхню в центральній частині зразка. Випробування зразків проводили з зажатими кінцями при навантаженні 176,4 Н.

Знос матеріалу оцінювали по випробуванням дисків при терті під навантаженням 9,8МПа. При цьому температура диску, що імітував метал обробки складала 790-810° С, а досліджуваних зразків – 40-45° С. Зносостійкість сплавів ( $K_z$ ) визначали за втратою маси дослідних зразків у відсотковому відношенню.

Хімічний склад дослідних заевтектоїдних сталей наведено в таблиці 1.

Табл. 1

**Хімічний склад дослідних заевтектоїдних сталей**

| Номер зразка | Вміст елементів, % (інше Fe)* |      |      |      |      |      |      |
|--------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|              | C                             | Si   | Mn   | Cr   | Ni   | Mo   | Ti   |
| 1            | 1,81                          | 0,34 | 0,47 | 0,69 | 0,83 | 0,37 | 0,05 |
| 2            | 1,79                          | 0,46 | 1,31 | 0,87 | 0,80 | 0,41 | 0,04 |
| 3            | 1,77                          | 1,10 | 0,7  | 0,79 | 0,84 | 0,50 | 0,04 |
| 4            | 1,80                          | 1,05 | 0,61 | 0,77 | 0,92 | 0,34 | 0,07 |
| 5            | 1,38                          | 0,75 | 0,86 | 1,00 | 0,98 | 0,51 | 0,06 |
| 6            | 1,60                          | 1,2  | 1,34 | 0,91 | 0,87 | 0,47 | 0,08 |
| 7            | 1,59                          | 1,70 | 1,09 | 0,83 | 0,91 | 0,55 | 0,05 |
| 8            | 1,71                          | 1,34 | 0,37 | 1,12 | 0,78 | 0,44 | 0,04 |

Примітки. \*Вміст шкідливих домішок – сірки 0,020-0,026%, фосфору 0,020-0,026%.

Для підвищення рівня експлуатаційних властивостей заевтектоїдної сталі широко використовують різні види термічної обробки такі, як відпал, подвійна та потрійна нормалізація.

При проведенні лабораторних досліджень для встановлення ступеню дроблення та коагуляції карбідної фази, схильності матеріалу до графітизації проводили три види термічної обробки. Перша обробка складалася з потрійної нормалізації зразків за температурами 950, 900, 850° С з відпусканням при 600° С. На першому етапі нагрівання зразків до температури 650° С виконували зі швидкістю 25° С за годину, а подальше нагрівання до 950° С – зі швидкістю 50° С за годину. Витримка при температурі 950° С складала 12 годин, охолодження до 45° С виконували зі швидкістю 150° С за годину. Друга та третя нормалізація відбувалась з режимами нагрівання та охолодження аналогічними першому етапу. Витримка при температурі 900 та 850 ° С складала 10 годин. При відпусканні зразки до 600° С нагрівали зі швидкістю 25° С за годину, витримували на протязі 15 годин з подальшим охолодженням до температури 450° С зі швидкістю 30° С за годину, витримкою при 450° С – 10 годин і подальшим охолодженням до 150 ° С зі швидкістю 30° С за годину. Остаточне охолодження виконували при кімнатній температурі. Загальний час термічної обробки склав 205 годин.

Подвійну нормалізацію з відпуском проводили при температурі 950 850 та 600° С за аналогічними параметрами, як і при потрійній нормалізації. Загальний час обробки склав 135 годин.

За третім режимом (відпал при 850° С з відпусканням) загальний час обробки склав 70 годин.

Аналіз мікроструктури дослідних сталей показав, що незалежно від виду термічної обробки в сталях з вмістом 1,8% вуглецю не відбувається повного дроблення грубої карбідної сітки. Підвищення концентрації кремнія 1,05-1,20% не забезпечує дестабілізації карбідів при нагріванні навіть до 950°С і графіт не виділяється.

Для вивчення генетики процесу розчинення карбідної сітки досліджували мікрошліфи після кожного ступеню нормалізації. Встановлено, що при одноразовому нагріванні до температури 850 або 950° С і послідовного охолодження на спокійному повітрі не відбувається подрібнення грубої цементитної сітки, а при 950° С спостерігається часткове розчинення голок вторинного цементиту.

Дослідження структури після подвійної нормалізації 950-850 ° С, також показали, що подрібнення сітки не відбувається. В окремих випадках вона стає ще більш грубою. Цей факт може свідчити про те, що при термічній обробці внаслідок недостатньої швидкості охолодження і умов інтенсивної дифузії вуглецю, що знаходиться у вторинному цементиті відбувається огрублення карбідної сітки.

Механічні властивості в литому і термообробленому стані дослідних сталей наведені в табл. 2 та 3.

Табл. 2

**Механічні властивості дослідних сталей в литому і відпаленому стані**

| Номер<br>вилив-<br>ки | Литий стан                                                             |                                                                 |                       |                                                                                      |                                   | Стан після відпалу                                                     |                                                                 |                       |                                                                                      |                                        |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
|                       | Ме-<br>жа<br>міц-<br>ності<br>на<br>роз-<br>рив<br>$\sigma_B$ ,<br>МПа | Ме-<br>жа<br>міц-<br>ності<br>на<br>згин<br>$\sigma_z$ ,<br>МПа | Твер-<br>дість,<br>НВ | Термічна<br>витрива-<br>лість,<br>кількість<br>циклів до<br>руйну-<br>вання, $N_{ц}$ | Зносості-<br>йкість,<br>$K_z$ , % | Ме-<br>жа<br>міц-<br>ності<br>на<br>роз-<br>рив<br>$\sigma_B$ ,<br>МПа | Ме-<br>жа<br>міц-<br>ності<br>на<br>згин<br>$\sigma_z$ ,<br>МПа | Твер-<br>дість,<br>НВ | Термічна<br>витрива-<br>лість,<br>кількість<br>циклів до<br>руйнуван-<br>ня, $N_{ц}$ | Зносо-<br>стій-<br>кість,<br>$K_z$ , % |
| 1                     | 445                                                                    | 400                                                             | 330                   | 877                                                                                  | 3,1                               | 495                                                                    | 440                                                             | 315                   | 980                                                                                  | 2,8                                    |
| 2                     | 455                                                                    | 430                                                             | 335                   | 982                                                                                  | 2,9                               | 465                                                                    | 430                                                             | 310                   | 1080                                                                                 | 2,7                                    |
| 3                     | 510                                                                    | 450                                                             | 337                   | 472                                                                                  | 3,8                               | 530                                                                    | 460                                                             | 300                   | 610                                                                                  | 3,4                                    |
| 4                     | 475                                                                    | 460                                                             | 340                   | 1100                                                                                 | 3,6                               | 495                                                                    | 475                                                             | 320                   | 1193                                                                                 | 3,1                                    |
| 5                     | 490                                                                    | 450                                                             | 352                   | 1243                                                                                 | 3,8                               | 515                                                                    | 465                                                             | 332                   | 1285                                                                                 | 3,3                                    |
| 6                     | 440                                                                    | 450                                                             | 329                   | 991                                                                                  | 3,3                               | 470                                                                    | 480                                                             | 305                   | 1072                                                                                 | 2,8                                    |
| 7                     | 485                                                                    | 440                                                             | 336                   | 819                                                                                  | 2,8                               | 500                                                                    | 475                                                             | 311                   | 923                                                                                  | 2,4                                    |
| 8                     | 450                                                                    | 460                                                             | 312                   | 971                                                                                  | 3,0                               | 485                                                                    | 490                                                             | 302                   | 1063                                                                                 | 2,8                                    |

З виконаних експериментальних досліджень (табл.2) видно, що в сталях з мінімальною кількістю кремнія (0,34-0,46%) і вуглецю 1,8% в литому стані має тенденція до підвищення міцнісних характеристик ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_z$ ), а також твердості. Термічна витривалість та зносостійкість суттєво не різняться від цих показників інших досліджуваних сплавів.

В сталях з підвищеним вмістом кремнія (1,05-1,20%) проглядається тенденція щодо зниження всіх міцнісних характеристик.

Встановлено, що термічна обробка призводить до зниження середньої твердості. Після відпалу твердість дослідних заєвтектоїдних сталей знизилась на 18%, подвійної нормалізації - на 7%, потрійної нормалізації – 10%. Одночасно підвищуються міцнісні характеристики сталей незалежно від концентрації кремнія.

Відпал сприяє підвищенню межі міцності на розрив на 5,4%, межі міцності на згин на 4,6%, термічної витривалості на 11%, зносостійкості на 11,4%.

Подвійна та потрійна нормалізація забезпечують підвищення показників що, впливають на експлуатаційні характеристики заєвтектоїдних сталей, відповідно: межі міцності на розрив на 11% та 7,6%, межі міцності на згин на 20% та 9,7%, термічної витривалості на 21% та 15%, зносостійкості на 19 % та 19,7% відповідно.

Виконані дослідження щодо впливу режимів термічної обробки заєвтектоїдних сталей на основні оціночні критерії працездатності виробів, які працюють в умовах підвищених знакозмінних навантажень та температур доцільно застосовувати подвійну нормалізацію з відпалом 600° С.

Для вивчення можливості підвищення термічної витривалості та зносостійкості заєвтектоїдних сталей за рахунок оптимізації хімічного складу за стандартною програмою Excel, були отримано рівняння регресії, що характеризують вплив хімічних елементів сплаву на відповідні показники при подвійній нормалізації.

$$N_{ц} = 5611,88 - 1380,80C + 487,09Si + 72,43Mn + 50,68Cr - 1480,59Ni - 1309,9Mo - 3694,16Ti$$

$$K_z = -14,80 + 4,301C - 0,555Si - 0,420Mn + 3,307Cr + 3,184Ni + 9,132Mo + 25,933Ti$$

**Механічні властивості дослідних сталей після подвійної та потрійної нормалізації**

| Номер<br>вилив-<br>ки | Подвійна нормалізація                                                  |                                                                 |                       |                                                                                    |                                    | Потрійна нормалізація                                                  |                                                                 |                       |                                                                                                         |                                    |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|                       | Ме-<br>жа<br>міц-<br>ності<br>на<br>роз-<br>рив<br>$\sigma_B$ ,<br>МПа | Ме-<br>жа<br>міц-<br>ності<br>на<br>згин<br>$\sigma_z$ ,<br>МПа | Твер-<br>дість,<br>НВ | Термічна<br>витрива-<br>лість,<br>кількість<br>циклів до<br>руйнуван-<br>ня, $N_c$ | Зносо-<br>стій-<br>кість,<br>Кз, % | Ме-<br>жа<br>міц-<br>ності<br>на<br>роз-<br>рив<br>$\sigma_B$ ,<br>МПа | Ме-<br>жа<br>міц-<br>ності<br>на<br>згин<br>$\sigma_z$ ,<br>МПа | Твер-<br>дість,<br>НВ | Терміч-<br>на<br>витри-<br>ва-<br>лість,<br>кіль-<br>кість<br>циклів<br>до<br>руйну-<br>вання,<br>$N_c$ | Зносо-<br>стій-<br>кість,<br>Кз, % |
| 1                     | 507                                                                    | 550                                                             | 302                   | 1077                                                                               | 2,2                                | 500                                                                    | 450                                                             | 275                   | 1104                                                                                                    | 2,1                                |
| 2                     | 515                                                                    | 535                                                             | 309                   | 1187                                                                               | 2,3                                | 482                                                                    | 475                                                             | 306                   | 961                                                                                                     | 2,3                                |
| 3                     | 610                                                                    | 510                                                             | 295                   | 671                                                                                | 2,8                                | 600                                                                    | 490                                                             | 288                   | 1029                                                                                                    | 2,7                                |
| 4                     | 516                                                                    | 570                                                             | 313                   | 1311                                                                               | 2,5                                | 496                                                                    | 510                                                             | 317                   | 1053                                                                                                    | 2,7                                |
| 5                     | 505                                                                    | 535                                                             | 298                   | 1412                                                                               | 3,0                                | 500                                                                    | 495                                                             | 329                   | 1105                                                                                                    | 3,1                                |
| 6                     | 498                                                                    | 525                                                             | 300                   | 1179                                                                               | 3,0                                | 485                                                                    | 485                                                             | 305                   | 1044                                                                                                    | 2,9                                |
| 7                     | 510                                                                    | 540                                                             | 302                   | 1015                                                                               | 2,6                                | 495                                                                    | 480                                                             | 298                   | 1139                                                                                                    | 2,3                                |
| 8                     | 505                                                                    | 530                                                             | 295                   | 1169                                                                               | 2,9                                | 480                                                                    | 510                                                             | 280                   | 1075                                                                                                    | 3,0                                |

За допомогою програми пошук рішень пакету аналізу Excel був отриман хімічний склад заевтектоїдної сталі: 1,36 %C; 1,69 Si; 1,34 Mn; 1,27 Cr; 0,76 Ni; 0,41Mo; 0,08Ti%, який після подвійної нормалізації, за наведеним вище режимом, надасть можливість отримати максимальний рівень експлуатаційних показників.

**Висновки.**

Отримані в роботі результати надають можливість зробити висновок, що для підвищення експлуатаційних властивостей заевтектоїдних сталей, що працюють в умовах підвищених навантажень та температур, доцільно застосовувати подвійну нормалізацію з відпалом при 600°C. За допомогою рівнянь регресії, отриманих з використанням програми Excel, було визначено вплив хімічних елементів сплаву на термічну витривалість та зносостійкість при подвійній нормалізації. Оптимізований хімічний склад заевтектоїдної сталі (1,36%C; 1,69%Si; 1,34%Mn; 1,27%Cr; 0,76%Ni; 0,41%Mo; 0,08%Ti%), розрахований для досягнення максимального рівня експлуатаційних показників після подвійної нормалізації, може бути рекомендований для подальшого вивчення та застосування.

**Список літератури.**

1. Производство и применение прокатных валков: справочник / Т. С. Скобло и др. Ред. Т. С. Скобло. Харьков, 2013. ЦД № 1. 572 с
2. Cahn R.W. Physical metallurgy. / R.W. Cahn. – Amsterdam: Elsevier science B.V., 1996. – 1505 p.
3. Shen Z.Y. Advances in steel structures: proceedings of the fourth International Conference on Advances in Steel Structures. / Z.Y. Shen, G.Q. Li, Q.L. Zhang. – Berkeley: Elsevier, 2005. – 183 p.
4. Структура и свойства заэвтектоидной стали после термообработки / Т. С. Скобло // Вісник Харків. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. – Харків, 2006. – Вип. 42 : Технічний сервіс АПК, техніка та технології у с.-г. машинобудуванні. – С. 8-11.
5. Власовец В.М. Влияние режимов и параметров термической обработки на свойства заэвтектоидной стали/ Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь, 2010. – Вип. 20 : Технічні науки. – С. 109-112.
6. A. Avtyhov, A. Martynenko V. Bantkovskiy, Y. Kovalevskiy. Influence of cast iron vacuuming on the level of mechanical characteristics of the material of the working layer of double-layer chromium-nickel rolls. Technology audit and production reserves: ПП «Технологічний центр», ПДАУ. - № 4/1(66), 2022. – С. 11-14

**Рецензент:** Рудюк О.С., заступник генерального директора ДП «УКРНТЦ «ЕНЕРГОСТАЛЬ», к.т.н.