

## *Вплив режимів термічного зміцнення та наступної криогенної обробки на структуру і властивості сталі 38ХНЗМФА*

С. В. Бобирь, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6816-1554>, [svbobyr07@gmail.com](mailto:svbobyr07@gmail.com)

П. В. Крот\*, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3347-3862>

Г. В. Левченко, доктор технічних наук, завідувач лабораторією, професор,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>

О. Є. Барановська, кандидат технічних наук, науковий співробітник,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4106-5797>

Д. В. Лошкарев, провідний інженер, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3817-7840>

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро

\*Вроцлавський університет науки та технологій, Польща

*Для виробництва різноманітних машинобудівних виробів – прокатних валків, деталей енергетичного обладнання, прошивних оправок – застосовуються складнолеговані сталі, що містять у своєму складі хром і значну кількість дефіцитних легуючих елементів (нікелю, ванадію, молібдену) типу 38ХНЗМФА. В роботі наведено результати досліджень про вплив режимів зміцнення та наступної криогенної обробки на параметри структури, твердість і зносостійкість цієї сталі. Видимих змін мікроструктури зразків термічно полірованої сталі при криогенній обробці не було виявлено, що можна пояснити високою термодинамічною стабільністю структури сорбіту та практичною відсутністю залишкового аустеніту через його розпад протягом високого відпуску. Показано, що криогенна обробка термічно покращеної сталі 38ХНЗМФА сприяє підвищенню її твердості, в'язкості і зносостійкості (на 3,8 %). При цьому відбувається деяке збільшення параметра і величини мікронапружень кристалічної решітки, підвищення щільності дислокацій. Для отримання багатозфазної структури сталі 38ХНЗМФА із залишковим аустенітом запропоновано ізотермічне гартування з  $\gamma$  -  $\alpha$ -області. Застосування криогенної обробки для дослідного режиму зміцнення зразків сталі 38ХНЗМФА сприяє перетворенню залишкового аустеніту в кінцевій структурі в мартенсит із значним збільшенням мікротвердості її структурних складових на 22,3 %. Дослідний режим зміцнення і криогенна обробка забезпечують значне підвищення твердості і зносостійкості сталі на 21,6 % при збереженні певного рівня її ударної в'язкості (понад 4 Дж/см<sup>2</sup>) і може бути рекомендований для реалізації технології диференційованого зміцнення великогабаритних виробів зі сталі 38ХНЗМФА.*

**Ключові слова:** сталь, структура, твердість, зносостійкість, ізотермічне гартування, криогенна обробка.

## Структура та фізико-механічні властивості

Для виробництва різноманітних машинобудівних виробів – прокатних валків, деталей енергетичного обладнання, прошивних оправок – застосовуються складнолеговані сталі, що містять хром і значну кількість інших дефіцитних легуючих елементів (нікелю, ванадію, молібдену) типу 38ХНЗМФА.

Дослідження щодо механічних властивостей і мікроструктури сталі 38ХНЗМФА (ГОСТ 4543-71) виконані в значній кількості робіт [1-7].

Найближчі сталі-аналоги: 35NiCrMoV12-5 (DIN) і 4340 (AISI), які використовуються за кордоном для виробів спеціального призначення, досліджені в роботах [8, 9].

Сталь 38ХНЗМФА застосовується для деталей відповідального призначення, має високу стійкість аустеніту (понад 3 год) в інтервалі температур 400...500 °С [1, 3-5]. Для сталей з великою стійкістю аустеніту часто застосовують ступінчастий або ізотермічний режим охолодження [6]. Як охолоджуючі середовища використовують розплавлені солі, луги, які є екологічно небезпечними середовищами. Тому становить інтерес технологія зміцнення виробів зі сталі 38ХНЗМФА, виконана в одній або двох печах без використання розплавів солей.

Відомо також, що криогенна обробка суттєво підвищує зносостійкість легованих сталей [10, 11], тому вона застосована в якості заключної обробки дослідних зразків сталі 38ХНЗМФА.

В роботі досліджували вплив режимів зміцнення і подальшої криогенної обробки на структуру, твердість і зносостійкість сталі 38ХНЗМФА.

Твердість заміряли на приладі ТК-2, рентгеноструктурний аналіз виконували на дифрактометрі ДРОН-2 УМ, структуру вивчали на мікроскопі Axiovert 200 Mat. Кількість залишкового аустеніту визначали ультразвуковим методом на приладі УТ-1 за розробленою методикою. Зносостійкість зразків встановлювали на установці СМЦ-2 при постійній швидкості обертання ведучого валу 300 об/хв, величині проковзування зразка і контр-тіла 10 %, зусиллі притиснення 800 Н. Зношування визначали по втраті маси зразків за 60000 обертів зразка з точністю до 0.0001 г.

Зразки сталі 38ХНЗМФА були термічно оброблені за базовим режимом: завантаження в піч при температурі 630 °С, нагрівання з піччю до температури 850 °С, гартування в маслі, наступний високий відпуск при температурі 630 - 650 °С 3,5 години.

Частина зразків потім проходила криогенну обробку зануренням в рідкий азот протягом різного часу. Мікроструктура зразків наведена на рис 1. Зразки сталі після базової обробки мають структуру (сорбіту відпуску ферит + дисперсні округлі карбіди) з твердістю 35 HRC (рис. 1). Видимих змін мікроструктури зразків термічно поліпшеної сталі при криогенній обробці не було виявлено. Це можна пояснити високою термодинамічною стабільністю структури сорбіту та практичної відсутності залишкового аустеніту через його розпад протягом високого відпуску [7].

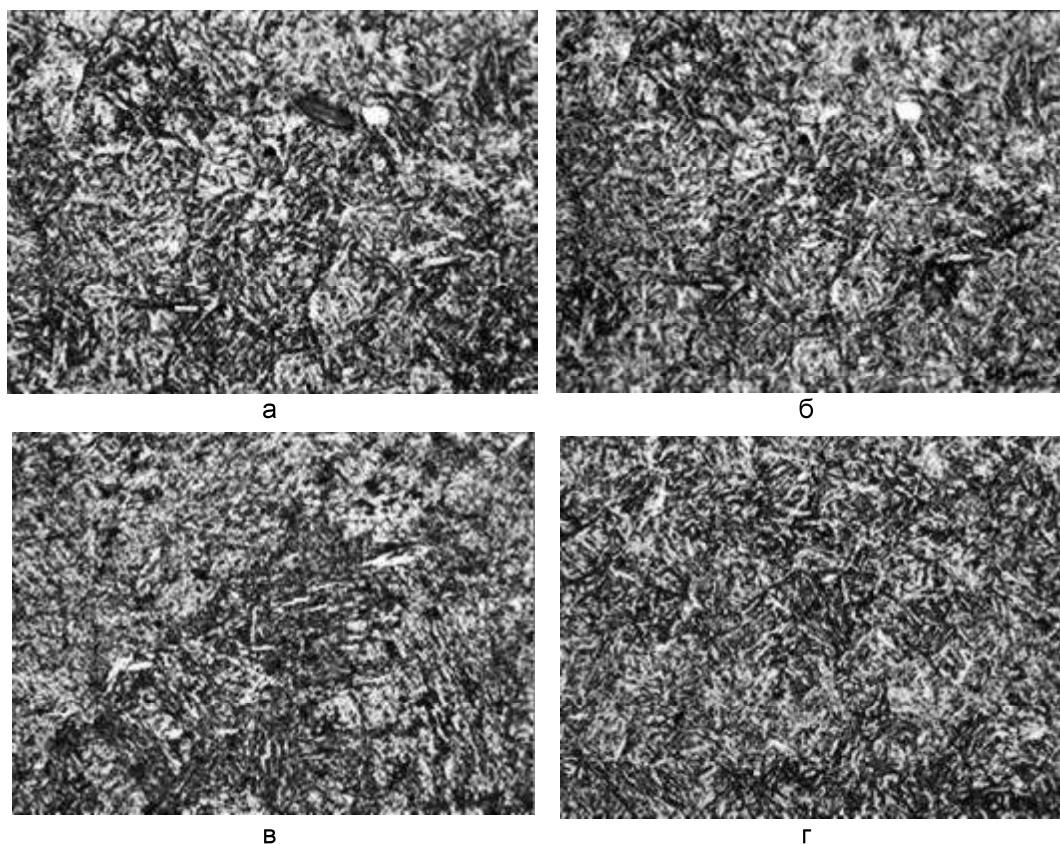


Рис. 1. Мікроструктура сталі 38ХНЗМФА вихідна (а) і після криогенної обробки протягом 10 хв (б), 1 год (в) і 24 год (г) (а та б – одне й теж місце зразка).  $\times 500$ .

Мікротвердість сталі до криогенної обробки становила 3130 МПа, а після криогенної обробки протягом 1 година – 3500 МПа, тобто істотно підвищувалася. Збільшення часу витримки зразка в рідкому азоті до 24 годин не впливало на його структуру, але дещо збільшувало мікротвердість (рис. 2).

Підвищення мікротвердості пов'язано, ймовірно, зі змінами параметрів тонкої структури сталі 38ХНЗМФА при криогенному впливі (табл. 1).

В процесі криогенної обробки сталі 38ХНЗМФА відбувається деяке збільшення параметра ( $a_{110}$ ) і величини мікронапружень кристалічної решітки ( $\epsilon$ ), підвищення щільності дислокацій ( $\rho$ ), ймовірно через зняття термічних напружень, що виникали при криогенній обробці зразків.

З метою підвищення зносостійкості виробів зі сталі 38ХНЗМФА при забезпеченні необхідної її твердості (менше 40 HRC перед механічною обробкою) було розглянуто варіант отримання багатофазної троостито – бейнітно-мартенситної структури [12, 13]. Як технологія, що дозволяє отримати таку структуру, було застосоване ізотермічне гартування [6]. Оскільки твердість сталі 38ХНЗМФА при ізотермічному гартуванні з аустенітної області (850-900 °С) значно більша 40 HRC [6], запропоновано

## Структура та фізико-механічні властивості

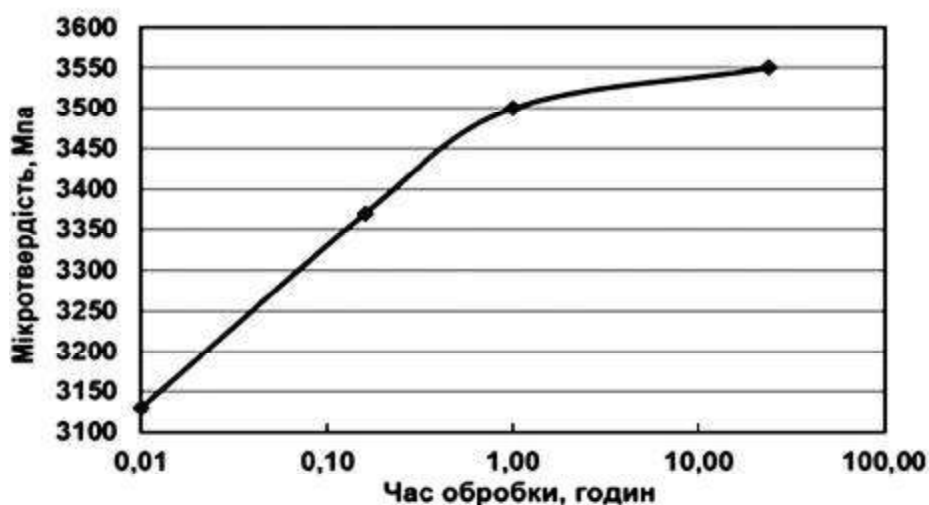


Рис. 2. Вплив часу криогенної обробки на мікротвердість сталі.

Таблиця 1

Результати рентгеноструктурного аналізу зразків сталі 38ХНЗМФА

Тип зразку	Параметр кристалічної решітки $a_{110}$ , ангстрем	Розмір блоків D, нм	Величина мікродеформацій кристалічної решітки, $\epsilon$ , %	Щільність дислокацій $\rho$ , $1/\text{см}^2$
стандартний	2,861	11,25	2,13	3,9
з криогенною обробкою	2,865	8,61	2,7	6,7

гартування з проміжної  $\gamma$  -  $\alpha$ -області [13]. Розроблена технологія термічної обробки передбачала витримку виробу при температурі 750 °С 20 хвилин, охолодження на повітрі до 400 °С, посадка в піч при температурі 400 °С, витримка 20 хвилин, охолодження на повітрі. Мікроструктура обробленої за даним режимом сталі складається з трооститу (темні ділянки) з мікротвердістю 3620 МПа і світлих ділянок (бейніт + залишковий аустеніт) з мікротвердістю 6350 МПа (рис. 3 а).

Це вказує на те, що застосування криогенної обробки для дослідного режиму зміцнення сталі 38ХНЗМФА сприяло перетворенню залишкового аустеніту в кінцевій структурі сталі в мартенсит з істотним підвищенням мікротвердості структурних складових. Заміри вмісту залишкового аустеніту, що був сформований при бейнітному перетворенні, підтверджують

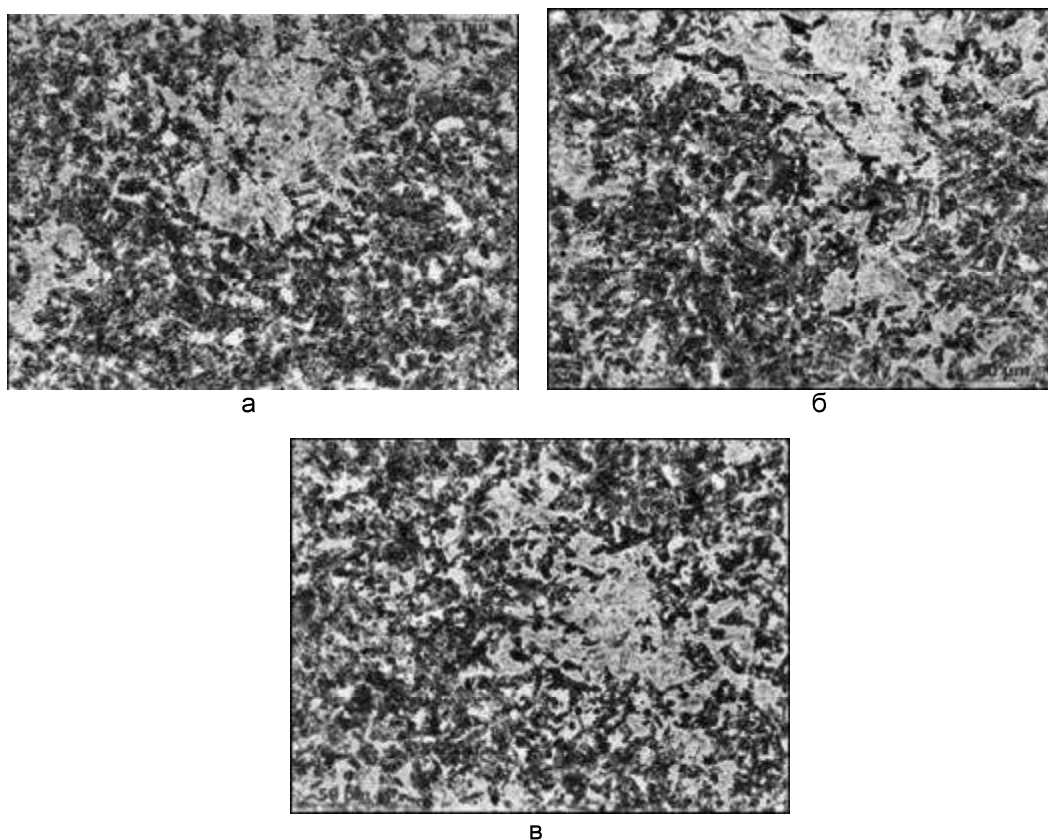


Рис. 3. Мікроструктура сталі 38ХНЗМФА до (а) і після криогенної обробки протягом 1 год (б) і 24 год (в).  $\times 500$ .

його метастабільність та схильність до трансформації при криогенних температурах (рис. 4 б).

Випробування зразків сталі 38ХНЗМФА, оброблених за різними режимами, показали підвищення її зносостійкості після криогенної обробки (табл. 2).

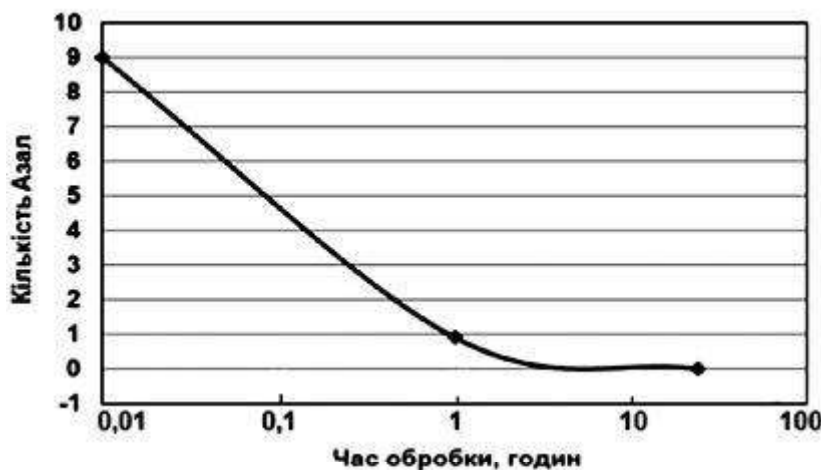
Базовий режим зміцнення (термічне поліпшення) забезпечував високу в'язкість сталі 38ХНЗМФА при найменшій зносостійкості. Криогенна обробка після базового режиму зміцнення сприяла деякому підвищенню твердості, в'язкості та зносостійкості сталі 38ХНЗМФА (на 3,8%). Дослідний режим зміцнення + криогенна обробка забезпечував значне підвищення твердості і зносостійкості сталі на 21,6 % при забезпеченні певного рівня її ударної в'язкості (понад 4 Дж/см<sup>2</sup>).

Таким чином встановлено:

1. Криогенна обробка термічно покращеної сталі 38ХНЗМФА сприяє підвищенню її твердості, в'язкості і зносостійкості (на 3,8%). При цьому відбувається деяке збільшення параметра і величини мікронапружень кристалічної решітки, підвищення щільності дислокацій через зняття термічних напружень.



а



б

Рис. 4. Вплив тривалості криогенної обробки на мікротвердість структурних складових сталі (а) та кількість залишкового аустеніту (б) в сталі 38ХНЗМФА.

2. Для отримання багатофазної структури сталі 38ХНЗМФА із залишковим аустенітом (7,5 – 9,0 %) і певною твердістю (до 40 HRC) запропоновано її ізотермічне гартування з  $\gamma$ - $\alpha$ -області.

3. Застосування криогенної обробки для дослідного режиму зміцнення зразків сталі 38ХНЗМФА сприяє перетворенню залишкового аустеніту в кінцевій структурі в мартенсит з істотним збільшенням мікротвердості її структурних складових на 22,3 %.

4. Дослідний режим зміцнення з наступною криогенною обробкою забезпечує значне підвищення твердості, зносостійкості сталі (на 21,6 %) при забезпеченні необхідного рівня її ударної

## Структура та фізико-механічні властивості

Таблиця 2

Вплив типу обробки на твердість, ударну в'язкість і зношування зразків сталі 38ХНЗМФА

№	Тип обробки	Твердість, HRC	Ударна в'язкість, Дж/см <sup>2</sup>	Зношування за 60000 обертів, г.
1.	Базовий режим – 850°С, загартовування в маслі, відпуск 630°С	34,3	9,6	0,0783
2.	Базовий режим + сгіо 22 години без низького відпуску	35,5	10,8	0,0754
3.	750°С, нормалізація до 400°С, охолодження на повітрі	39,3	3,9	0,0675
4.	750°С, нормалізація до 400°С, охолодження на повітрі, сгіо 22 години	44,7	4,4	0,0644

в'язкості (понад 4 Дж/см<sup>2</sup>) і може бути рекомендований для реалізації технології диференційованого зміцнення великогабаритних виробів зі сталі 38ХНЗМФА.

### Література

1. Лещенко А.Н. Исследование кинетики превращения аустенита в хромоникелевой стали марки 38ХНЗМФА / А.Н. Лещенко, А.П.Вишняков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. №1. – С. 49-50.
2. Иванов Ю.Ф. Электронно-микроскопический анализ мартенситной фазы стали 38ХНЗМФА / Ю.Ф. Иванов, Э.В. Козлов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1991. – № 8. – С. 38-40.
3. Иванов Ю.Ф. Исследование влияния скорости охлаждения на параметры структуры стали 38ХНЗМФА / Ю.Ф. Иванов, Э.В. Козлов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1991. – №6. – С. 50-51.
4. Крамаров М.А., Кондратьев А.С. Влияние высокой термической обработки на механические свойства и трещиностойкость стали 38ХНЗМФА // Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. -№1. – С. 15-20.
5. Калетин А.Ю. Длительный высокотемпературный отпуск стали 38ХНЗМФА со структурой бейнита. / Калетин А.Ю., Кутын А.В., Гербих Н.М. и др. // Физика металлов и металловедение, 1986. №61(5). – С. 915-921.
6. Голубев А.Е., Сергеев Ю.Г. Изотермическая закалка стали 38ХНЗМФА. // Материалы межвузовской научной конференции. XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч. VI: Санкт-Петербургский государственный технический университет, 2002. С. 38-39.
7. Кузнецова Д.П. Влияние температурно-временных параметров отпуска на твердость закаленной на мартенсит стали 38ХНЗМФА / Д. П. Кузнецова //

- XIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых — металлургов. II Международная научная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов». — Екатеринбург, 2012. — С. 104-106.
8. Orkun Umur Cnem. Effect of Temperature on Fatigue Properties of DIN 35NiCrMoV12 5 Steel. Thesis of Master of Science in the Department of Metallurgical and Materials Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University. Turkey, 2003.
  9. Engin Aksu. The Effect of Austempering Parameters on Impact and Fracture Toughness of DIN 35NiCrMoV12.5 Gun Barrel Steel. Thesis of Master of Science in Metallurgical and Materials Engineering, Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University, Turkey, 2005.
  10. Крот П.В. Повышение износостойкости инструментальных сталей методом криогенной закалки / П.В. Крот, С.В. Бобырь, И.П. Жарков и др. // Металлургические процессы и оборудование. — 2013. №4. — С. 88-98.
  11. Krot P.V., Bobyr S.V., Dedik M.O. Simulation of backup rolls quenching with experimental study of deep cryogenic treatment // Int. J. of Micro-structure and Materials Properties, 2017., Vol. 12, No. 3/4, pp. 259-275.
  12. Чейлях А.П. Создание и управление свойствами экономнолегированных метастабильных сплавов нового поколения // Металл и литье Украины. — 2005. — № 7-8. — С. 49–55.
  13. Г.В. Левченко, С.В. Бобырь, Е.Е. Нефедьева, А.Н. Хулин. Влияние изотермической закалки на структурное состояние и свойства арматурного проката из стали 30ГС // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии, Вып. 29. — 2014. — С. 240-244.

### References

1. Leschenko A.N., Vishnyakov A.P., *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 2000, No. 1, pp. 49-50 [in Russian].
2. Ivanov Yu.F., Ivanov Yu.F., Kozlov E.V., *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 1991, No. 8, pp. 38-40 [in Russian].
3. Ivanov Yu.F., Kozlov E.V., *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 1991, No. 6, pp. 50-51 [in Russian].
4. Kramarov M.A., Kondratev A.S., *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1990, No. 1, pp. 15-20 [in Russian].
5. Kaletin A.Yu., Kutin A.V., Gerbih N.M. and other, *Fizika metallov i metallovedenie*, 1986, No. 61(5), pp. 915-921 [in Russian].
6. Golubev A.E., Sergeev Yu.G. *Izotermicheskaya zakalka stali 38HN3MFA*. (Isothermal hardening of steel 38Ni3CrMoV), Materialy mezhvuzovskoy nauchnoy konferentsii. XXX Yubileynaya Nedelya nauki SPbGTU. Ch. VI: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyiy tehnikeskiiy universitet, 2002, pp. 38-39 [in Russian].
7. Kuznetsova D.P. *Vliyanie temperaturno-vremennyih parametrov otpuska na tverdot zakalenny na martensit stali 38HN3MFA* (Influence of temperature-time parameters of tempering on the hardness of 38Ni3CrMoV steel hardened to martensite), XIII Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya Uralskaya shkola-seminar molodyih uchenyih — metallovedov. II Mezhdunarodnaya nauchnaya shkola dlya molodezhi «Materialovedenie i metallofizika legkih splavov». Ekaterinburg, 2012, pp. 104-106 [in Russian].

8. Orkun Umur İnem. *Effect of Temperature on Fatigue Properties of DIN 35NiCrMoV12 5 Steel*. Thesis of Master of Science in the Department of Metallurgical and Materials Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University. Turkey, 2003 [in English].
9. Engin Aksu. *The Effect of Austempering Parameters on Impact and Fracture Toughness of DIN 35NiCrMoV12.5 Gun Barrel Steel*. Thesis of Master of Science in Metallurgical and Materials Engineering, Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University, Turkey, 2005 [in English].
10. Krot P.V., Bobyr S.V., Zharkov I.P. and other, *Metallurgicheskie protsessyi i oborudovanie*, 2013, No. 4, pp. 88-98 [in Russian].
11. P.V. Krot, S.V. Bobyr, M.O. Dedik. *Int. J. of Microstructure and Materials Properties*, 2017, Vol. 12, No. 3/4, pp. 259-275 [in English].
12. Cheylyah A.P., *Metall i lit'e Ukrainyi*, 2005, No. 7-8, pp. 49-55 [in Russian].
13. Levchenko G.V., Bobyr S.V., Nefedeva E.E., Hulin A.N., *Fundamentalnyie i prikladnyie problemy chernoy metallurgii*, Vol. 29, 2014, pp. 240-244 [in Russian].

Одержано 05.04.21

**S. V. Bobyr, P. V. Krot, G. V. Levchenko, O. Ye. Baranovska, D. V. Loshkarev**

### **Influence of modes of thermal hardening and the subsequent cryogenic processing on structure and properties of steel 38Ni3CrMoV**

#### **Summary**

For the production of various machine-building products - rolling rolls, parts of power equipment, piercing mandrels - complex alloy steels containing chromium and a significant number of other deficient alloying elements (nickel, vanadium, molybdenum) type 38Ni3CrMoV are used. The paper presents the results of research on the influence of modes of hardening and subsequent cryogenic treatment on the parameters of the structure, hardness and wear resistance of this steel. Visible changes in the microstructure of thermally improved steel samples during cryogenic treatment were not found, which can be explained by the high thermodynamic stability of the sorbitol structure and the practical absence of residual austenite due to its decomposition during high tempering. It is shown that cryogenic treatment of thermally improved 38Ni3CrMoV steel contributes to an increase in the hardness, toughness and wear resistance this steel (~3.8 %). In this case, there is a slight increase in the parameter and magnitude of microstresses of the crystal lattice, an increase in the density of dislocations due to the removal of thermal stresses. To obtain a multiphase structure of 38Ni3CrMoV steel with retained austenite, isothermal quenching from the  $\gamma$ - $\alpha$  region has been proposed. The use of cryogenic treatment for the experimental mode of hardening of 38Ni3CrMoV steel samples promotes the transformation of retained austenite in the final structure of the samples into martensite with a significant increase in the microhardness of its structural components at the 22.3%. The experimental hardening mode + cryogenic treatment provides a significant increase in the hardness and wear resistance of 38Ni3CrMoV steel at the 21.6% while ensuring a certain level of its impact toughness (more than 4 J/cm<sup>2</sup>) and can be recommended for the implementation of the technology of differentiated hardening of large-sized products made of 38Ni3CrMoV steel.

**Keywords:** steel, structure, hardness, wear resistance, isothermal hardening, cryogenic treatment.