

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 691.714:621.785

В. В. КЛОЧИХІН<sup>1</sup>, О. Б. МИЛОСЕРДОВ<sup>2</sup>, О. С. ПОДОРОГА<sup>3\*</sup>, В. Г. МІЩЕНКО<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>АТ «Мотор Січ», пр. Моторобудівників, 15, Запоріжжя, Україна, 69068, тел. +38 (061) 720 50 53, ел. пошта [tb.ugmet@motorsich.com](mailto:tb.ugmet@motorsich.com), ORCID 0000-0002-0754-5543

<sup>2</sup>ДП «Івченко–Прогрес», вул. Іванова, 2, Запоріжжя, Україна, 69068, тел. +38 (061) 720 64 03, ел. пошта [77@ivchenko-progress.com](mailto:77@ivchenko-progress.com), ORCID 0000-0002-3914-3725

<sup>3</sup>\*Каф. «Прикладна фізика і наноматеріали», Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, 69600, тел. +38 (068) 262 28 94, ел. пошта [ospodoroha@outlook.com](mailto:ospodoroha@outlook.com), ORCID 0000-0001-7543-1276

<sup>4</sup>\*Каф. «Прикладна фізика і наноматеріали», Запорізький національний університет, вул. Жуковського, 66, Запоріжжя, Україна, 69600, тел. +38 (061) 228 12 06, ел. пошта [mishchen4@gmail.com](mailto:mishchen4@gmail.com), ORCID 0000-0003-0992-478X

### ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 09ХЗНМЗФБЧ ПІД ЧАС ХІМІКО-ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

**Мета.** У роботі необхідно дослідити формування структурного стану нової сталі 09ХЗНМЗФБч після цементації й наступної термічної обробки та азотування. Визначити раціональний режим хіміко-термічного оброблення, який забезпечуватиме створення однорідного дифузійного шару й високі механічні та експлуатаційні характеристики. **Методика.** Хіміко-термічну обробку проводили на первинне й вторинне твердіння за чотирма варіантами з використанням печей SIEMENS і АСЕА. Азотування проводили у два етапи. Для виявлення мікроструктури сталі дослідно-промислового виробництва проводили травлення в 4-відсотковому розчині азотистої кислоти, металографічне дослідження проводили за перетином зразка на мікроскопі Axio Observed.D1m. Для визначення ефективної глибини дифузійних шарів після цементації й азотування вимірювали мікротвердість на приладі LECO LM248AT, а вимірювання гарячої твердості проводили на приладі Wilson Rockwell Hardness Tester. **Результати.** Для отримання однорідного структурного стану сталі 09ХЗНМЗФБч й максимальних результатів механічних та експлуатаційних характеристик проводили хіміко-термічну й термічну обробку за режимом: цементація за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год відпал за 650 °С, 5–7 год гартування від 1 030 °С з охолодженням у маслі, трикратне відпускання 530 °С, обробка холодом – 70 °С з витримкою 1 год 30 хв і наступне відпускання за 510 °С 1 год. Після цементації гартування проводили в інтервалі температур 1 000–1 030 °С для запобігання перенасичення робочого дифузійного шару й утворення карбідної сітки. Наступне трикратне відпускання 530 °С й обробка холодом – 70 °С впродовж 1 год 30 хв сприяли розпаду залишкового аустеніту й утворенню дрібнозернистого мартенситу відпускання. **Наукова новизна.** Розроблено раціональний режим хіміко-термічної й термічної обробки, який забезпечить максимальні механічні та експлуатаційні властивості сталі 09ХЗНМЗФБч завдяки заздалегідь визначеному співвідношенню структурних складових цементованого шару. **Практична значимість.** Апробований режим хіміко-термічної обробки багатокомпонентної легованої сталі 09ХЗНМЗФБч виробництва АТ «Мотор Січ» та ДП «Івченко–Прогрес», яка розроблена для зубчатих коліс авіаційних редукторів газотурбінних двигунів нового покоління, суттєво підвищує тепло- та енергонавантаження.

**Ключові слова:** мікроструктура; мартенсит; аустеніт; цементація; азотування; мікротвердість; твердість; границя міцності

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**Вступ**

Світовий прогрес літакобудування невинно диктує зростання вимог до властивостей матеріалів, які повинні забезпечувати одну з основних його складових – підвищення ресурсу газотурбінних двигунів. На сьогодні постала проблема підвищення потужності двигунів і, відповідно, збільшення обертового моменту авіаційних редукторів літаків за збереження їхньої маси та розмірів. Основні вимоги висувають до важко навантажених зубчастих коліс, які повинні працювати в умовах підвищених робочих температур до 450 °С [6, 11].

Найбільш відомі вітчизняні цементовані сталі 14ХГСН2МА (ДИ–3А), 16Х3НВМФБ

(ВКС–5) вже давно застаріли та не відповідають сучасним вимогам щодо експлуатаційних характеристик [1, 4, 5].

Закордонний аналог сталь M50 NiL має високі показники механічних властивостей, проте за рахунок невиправдано високого легування вимагає складної хіміко-термічної обробки для отримання задовільної структури та властивостей [7, 9].

Співробітники кафедри прикладної фізики і наноматеріалів Запорізького національного університету (ЗНУ), ДП «Івченко–Прогрес», АТ «Мотор Січ» розробили нову цементовану вторинно-твердіючу сталь 09Х3НМ3ФБч з раціональним хімічним складом (табл. 1).

Таблиця 1

**Хімічний склад цементованих сталей\***

Table 1

**Chemical composition of cemented steel\***

№ з/п	Марка сталі	Вміст легувальних елементів, %									
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Ce(Al)
1	14ХГСН2МА (ДИ–3А)	0,14	0,8	0,6	1,4	1,8	0,35	–	≤0,06	–	–
2	16Х3НВМФБ (ВКС–5)	0,16	0,5	0,5	2,8	1,2	0,5	1,2	0,5	0,15	0,04
3	M50 NiL	0,13	0,3	0,25	4,0	3,5	4,25	–	1,2	–	–
4	09Х3НМ3ФБч	0,1	0,48	0,34	2,9	1,44	2,99	–	0,33	0,3	0,0058 (0,05)

\*Вміст P, S ≤ 0,025 %

Проведені авторами попередні дослідження з оптимізації хімічного складу [3, 10] сприяли збільшенню границі плинності нової сталі й підвищили контактну витривалість у 5 разів порівняно зі сталлю ВКС–5 [2].

Перевагою цементованої сталі 09Х3НМ3ФБч є висока теплостійкість – максимальна температура експлуатації сягає 450 °С, водночас у сталях 14ХГСН2МА (ДИ–3А) й 16Х3НВМФБ (ВКС–5) вона не перевищує 180 та 300 °С відповідно [8, 11]. За рахунок оптимального легування розроблена сталь 09Х3НМ3ФБч має високі показники границі міцності ( $\sigma_b$ ) та меншу твердість серцевини (39,5–40 HRC), що робить сталь більш техноло-

гічною до обробки різанням порівняно з M50 NiL (43–45 HRC).

**Мета**

Основна мета роботи полягає у виборі раціонального режиму хіміко-термічного (ХТО) й термічного (ТО), який забезпечуватиме формування однорідної структури й задовільні механічні властивості поверхневого робочого шару та серцевини сталі 09Х3НМ3ФБч.

**Методика**

Для дослідження структури й механічних властивостей дослідно-промислової партії сталі виготовлені прутки Ø 90 мм та поковки

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Ø 150 мм висотою 70 мм на ДП «УкрНДІспецталь». Дослідні сталі виготовляли у вакуумній індукційній печі з наступним вакуумним переплавленням в електродуговій печі.

Вхідний контроль, який провели в АТ «Мотор Січ», показав наступні результати механічних випробувань (табл. 2).

Для дослідження формування раціональної структури розроблені декілька режимів хіміко-термічного оброблення сталі промислового виробництва на первинне і вторинне твердіння (табл. 3).

Таблиця 2

## Механічні властивості дослідно-промислової сталі 09X3NM3ФБч

Table 2

## Mechanical properties of experimental and industrial steel 09Cr3NiMo3VNbr

№ зразка	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	HRC	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
Пруток Ø 90 мм	1 219...1 223	16,4...18,4	58,8...66,1	39,5...40	12...28
Поковка Ø 150 мм, висота 70 мм	1 243...1 309	16,0...18,4	56,6...64,1	39,5...41	15...17

Таблиця 3

## Режими ХТО сталі 09X3NM3ФБч

Table 3

## Types of thermochemical treatment of steel 09Cr3NiMo3VNbr

Варіант	Режим ХТО
1	Цементация за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год, відпал за 650 °С, 5–7 год, гартування від 900 °С з охолодженням в маслі, обробка холодом – 60 °С, відпускання за 250 °С
2	Цементация за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год, відпал за 650 °С, 5–7 год, гартування від 1 030 °С з охолодженням у маслі, трикратне відпускання за 530 °С
3	Цементация за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год, відпал за 650 °С, 5–7 год, гартування від 1 030 °С з охолодженням у маслі, п'ятикратне відпускання за 530 °С
4	Цементация за 930 °С з вуглецевим потенціалом 0,22, 13 год, відпал за 650 °С, 5–7 год, гартування від 1 030 °С з охолодженням у маслі, трикратне відпускання за 530 °С, обробка холодом –70 °С з витримкою 1 год 30 хв, відпускання за 510 °С, 1 год

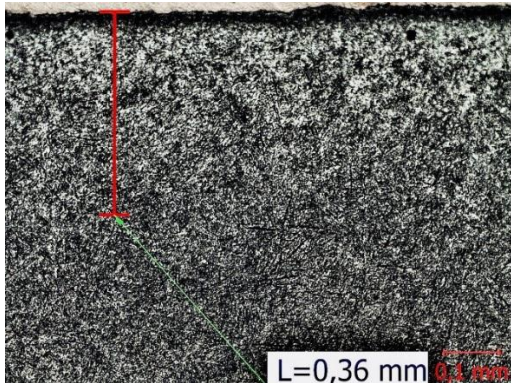
## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ХТО проводили в печах SIEMENS і ACEA. Температуру й витримку під час цементації підбирали таким чином, щоб забезпечити необхідну товщину дифузійного шару 1,4–1,6 мм. Рідке азотування проводили у два етапи для забезпечення заданої товщини азотованого шару 0,5–0,7 мм. Перший етап азотування проводили за температури 520 °С, витримки 25 год, дисоціації 25–30 %, потім нагрівали до 540 °С з витримкою 35 год, дисоціацією 40–50 % і наступним деазотуванням 10 год. Дифузійне насичення у всіх варіантах проводили за технологією АТ «Мотор Січ» для конструкційних сталей мартенситного класу. Підготовлені шліфи пройшли травлення в 4-відсотковому водному розчині азотистої кислоти. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі Axio Observed.D1m за збільшень у 100 й 200. Для контролю якості дифузійних шарів і визначення міцності мікрооб'ємів дослідної сталі після цементації й азотування вимірювали мікротвердість на приладі LECO LM248AT.

## Результати

Хіміко-термічне оброблення за варіантом 1 (табл. 3), який відповідав режиму гартування на

*a – a*



первинну твердість для сталі ВКС–5 [4, 8], сприяло отриманню глибини цементованого шару 1,53 мм.

Товщина поверхневого дифузійного шару становила лише 0,14 мм, що обумовлено низькою температурою гартування і, відповідно, уповільненим протіканням дифузійних процесів. Мікроструктура цементованого шару складала дрібногочастий мартенсит і значною кількістю надлишкових спеціальних карбідів овальної та стовпчастої форми, що свідчило про перенасичення поверхневого шару сталі вуглецем. Уздовж перетину зразка зустрічалися надлишкові спеціальні карбіди типу MeC, Me<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Me<sub>3</sub>C у вигляді поодиноких дисперсних фаз і карбідна сітка другого бала відповідно до ГОСТу 8233–56.

Після хіміко-термічної обробки за варіантом 2 (табл. 3), що відповідав ТУ У 27.1–00186536–005.2016 [3], глибина цементованого шару збільшилась до 1,6 мм. Поверхневий дифузійний шар також збільшився у 2,5 рази порівняно з попереднім режимом ХТО і становив 0,36 мм. Мікроструктура відповідала крупногочастому мартенситу й залишковому аустеніту до 30 % (рис. 1, *a, б*).

*б – б*



Рис. 1. Мікроструктура дифузійного шару сталі після режиму ХТО (варіант 2, табл. 3):  
*a* – збільшення  $\times 100$ ; *б* – збільшення  $\times 200$

Fig. 1. Microstructure of steel after the thermochemical treatment (option 2, Table 3):  
*a* – increase  $\times 100$ ; *b* – increase of  $\times 200$

У перехідній зоні кількість залишкового аустеніту зменшувалась майже вдвічі ( $\approx 15\%$ ). Мікроструктура серцевини становила низьковуглецевий мартенсит відпускання.

Зразки, оброблені за варіантами 1 і 2 (табл. 3), випробували на термостійкість із наступним вимірюванням гарячої твердості (табл. 4). Установлено значну перевагу твердості зразків, які оброблені на вторинну твердість.

Таблиця 4

## Результати випробувань гарячої твердості сталі 09Х3НМ3ФБч

Table 4

## Hot hardness test of steel 09Cr3NiMo3VNbr

№ зразка	Температура витримки, °С	Твердість HRC	
		До випробувань на термостійкість	Після випробувань
1	350	58,5–59	57
	400	59,5	57–58
	450	60	56–57
2	350	60	60
	400	61	61
	450	60,5	61

Випробування гарячої твердості показали задовільні результати зразків після термічної обробки за варіантом 2 (табл. 3), що свідчить про забезпечення стабільної структури в умовах експлуатації сталі. Наступні режими ХТО розроблені з метою зменшення кількості залишкового аустеніту й отримання однорідної структури в дифузійному та перехідному шарі.

Хіміко-термічна обробка зразків за варіантом 3 (табл. 3) сприяла незначному зменшенню кількості залишкового аустеніту. Збільшення кількості відпускань порівняно з режимом обробки викликало появу дисперсних спеціальних карбідних фаз типу MeC.

Після обробки за варіантом 4 (табл. 3) мікроструктура цементованого шару представляла собою дрібногочастий мартенсит і залишковий аустеніт (10 %) у поверхневому шарі. Таким чином, гартування за високої температури забезпечило отримання бажаної глибини цементованого шару, трикратне відпускання надало однорідності структурі, а додаткова обробка холодом зменшила кількість залишкового аустеніту в 3 рази порівняно з варіантами обробки 2 і 3.

Для визначення ефективної глибини дифузійного шару міряли мікротвердість за перетином зразка (рис. 2). У поверхневих шарах 0,2–0,4 мм найвищу твердість мали зразки, які оброблені за варіантом 4 (табл. 3). Це обумовлено мінімальною кількістю залишкового аустеніту.

Відповідно до результатів вимірювання мікротвердості за перетином зразків установили глибину азотованого шару, яка складала 0,42 мм. Мікроструктурний аналіз показав, що в приповерхневій зоні виникла частково деазотована  $\epsilon$ -фаза, а також надлишкові нітриди більшого розміру загальною глибиною залягання 0,053–0,047 мм (рис. 3, а). По перетину азотованого шару утворився азотистий мартенсит і залишковий аустеніт, надлишкові нітриди майже відсутні. На глибині 0,26 мм від поверхні утворились продольні тріщини (рис. 3, б).

Детальне вивчення тонкої мікроструктури сталі виявило ліквідаційні ділянки Nb, переважно орієнтовані за границями зерен. Суцільні їх виділення можуть перешкоджати дифузії вуглецю та азоту й обумовлювати підвищення напружень у міжфазних зонах, що приводить до появи тріщин.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

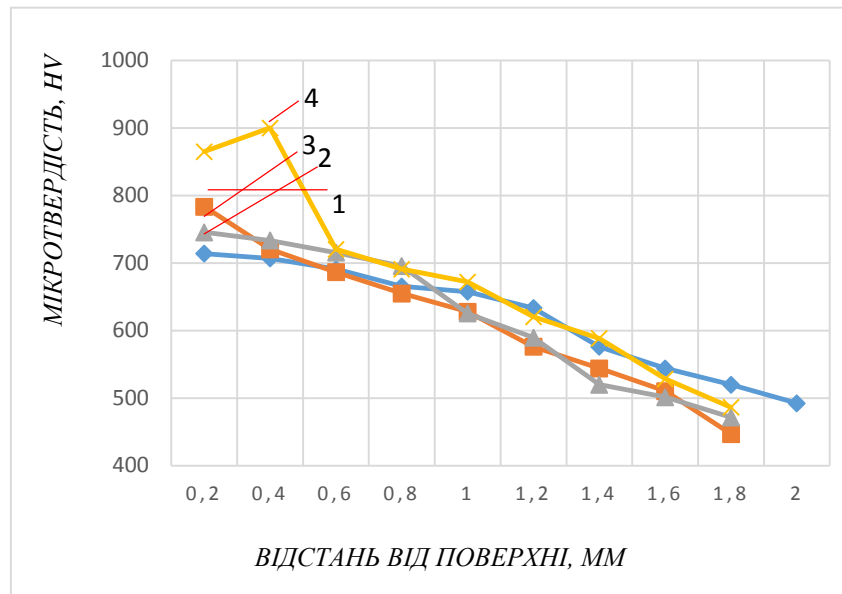
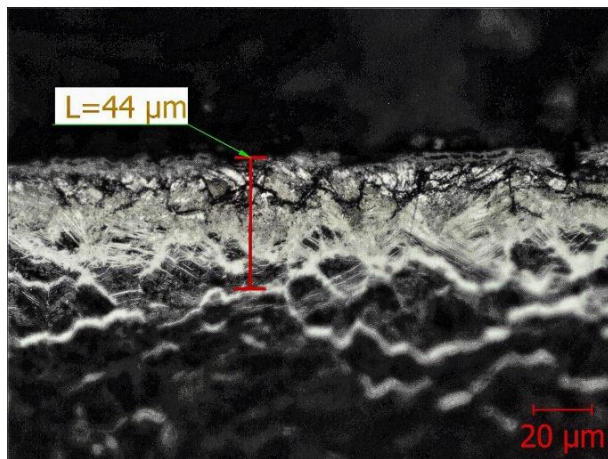


Рис. 2. Залежність мікротвердості цементованого шару сталі 09ХЗНМЗФБч від його глибини за різних варіантів ХТО (табл. 3)

Fig. 2. Dependence of microhardness distribution on depth of the carbonized layer of steel 09Cr3NiMo3VNbr under different variants of thermochemical treatment (Table 3)

*a – a*



*б – б*

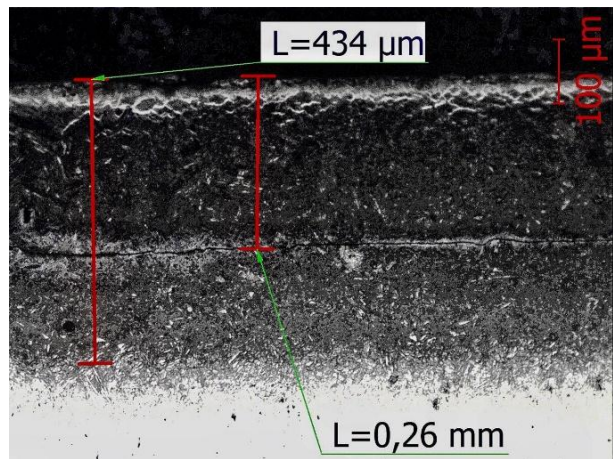


Рис. 3. Мікроструктура азотованого шару сталі 09ХЗНМЗФБч:  
*a* – збільшення у 200; *б* – збільшення у 100 разів

Fig. 3. Microstructure of nitrated steel layer on 09Cr3NiMo3VNbr steel:  
*a* – increase of 200; *b* – increase of 100 times

### Наукова новизна та практична значимість

Розроблено раціональний режим хіміко-термічної й термічної обробки для нової багатокомпонентної сталі 09ХЗНМЗФБч, який дозволяє отримати високі показники гарячої тве-

рдості 61 HRC й границі міцності 1219–1309 МПа. Ударна в'язкість забезпечується високою термостійкістю дисперсної фази, яка складається зі спеціальних карбідів молібдену, ніобію, хрому сприятливої морфології. Вибраний режим хіміко-термічної й термічної оброб-



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ки забезпечує отримання однорідної структури й мінімальної кількості аустеніту (до 10 %), у результаті чого досягається висока зносостійкість робочого шару зубчастих коліс авіаційних редукторів.

**Висновки**

За результатами проведених досліджень встановлено оптимальний режим ХТО й ТО для сталі 09ХЗНМЗФБч промислового виробництва, який забезпечує оптимальну структуру

й високі показники експлуатаційних властивостей.

Випробування на гарячу твердість за 450 °С сталі 09ХЗНМЗФБч показали задовільні результати після термічної обробки на вторинне твердіння, водночас збільшились показники границі міцності до 1 219–1 309 МПа. Низькі показники ударної в'язкості й утворення тріщин під час азотування обумовлені зональною ліквідацією й пов'язані з порушенням технології виробництва сталі.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Лазечный, И. Н. Формирование при ХТО структуры и свойств цементуемых сталей различной теплоустойчивости / И. Н. Лазечный, И. П. Банас // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2005. – № 1. – С. 37–44.
2. Мартиненко, В. В. Випробування контактної витривалості цементованих сталей для зубчастих коліс та шарикопідшипників / В. В. Мартиненко, В. Г. Міщенко // Зб. наук. пр. студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука-2016»: у 4 т. / Запоріж. нац. ун-т. – Запоріжжя, 2016. – Т. 1. – С. 356–358.
3. Міщенко, В. Г. Дослідження структури та властивостей вториннотвердіючих цементованих сталей / В. Г. Міщенко, О. І. Меньяло, О. С. Багрійчук // Матеріалознавство і термічна обробка металів. – 2013. – № 2-3. – С. 48–53.
4. Мохова, А. С. Вакуумная комбинированная химико-термическая обработка стали ВКС-10 [Електронний ресурс] / А. С. Мохова, А. Е. Смирнов, А. П. Алёхин // Инженерный вестник. – 2015. – № 12. – Режим доступу: <https://engsi.ru/doc/829172.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 12.08.2019.
5. Перетворення аустеніту в цементованій сталі 13ХЗНВМ2Ф / І. М. Лазечний, О. В. Лисиця, В. Г. Міщенко, В. Л. Сніжної, Г. В. Сніжної // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 2. – С. 47–52.
6. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей : произв.-практ. издание / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, И. П. Нежурин [и др.] ; под ред. Ю.С. Елисеев. – Москва : Высшая школа, 2001. – 493 с.
7. Evolution of carbides on surface of carburized M50NiL bearing steel / J. L. Lian, L. J. Zheng, F. F. Wang, H. Zhang // Iron and Steel Research International. – 2018. – Vol. 25. – Iss. 11. – P. 1198–1211. doi: <https://doi.org/10.1007/s42243-018-0166-4>
8. Mixed-surface impregnation of gear wheels made of 13Kh3N3M2VFB-sh age-hardenable integrally alloyed steel aimed at improving surface hardness, wear-resistance, and back-to-back endurance / A. E. Smirnov, A. S. Mokhova, M. Y. Semenov, L. I. Kuksenova, R. S. Fakhurtdinov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2017. – Vol. 46. – Iss. 4. – P. 404–408. doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618817040173>
9. Ooi, S. Duplex Hardening of Steels for Aeroengine / S. Ooi, H. K. D. H. Bhadeshia // ISIJ International. – 2012. – Vol. 52. – Iss. 11. – P. 1927–1934. doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1927>
10. Parameters control of 09Cr3NiMo3VNbr carburizing steel diffusion layer in the process of thermochemical treatment / V. G. Mishchenko, O. I. Meniailo, O. S. Bagriichuk, O. I. Bulakh // Materials Science & Technology Conference and Exhibition 2016 (MS&T'16) (23–27 October 2016). – Salt Lake City, United States, 2016. – Vol. 2. – P. 159–166.
11. Ryzhov, N. M. Technological provision of contact fatigue resistance for cemented gear wheels made of heat-resistant steels / N. M. Ryzhov // Metal Science and Heat Treatment. – 2010. – Vol. 52. – Iss. 7–8. – P. 330–335. doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9277-7>

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

В. В. КЛОЧИХИН<sup>1</sup>, А. Б. МИЛОСЕРДОВ<sup>2</sup>, О. С. ПОДороГА<sup>3\*</sup>, В. Г. МИЩЕНКО<sup>4\*</sup><sup>1</sup>АО «Мотор Сич», пр. Моторостроителей, 15, Запорожье, Украина, 69068, тел. +38 (061) 720 50 53, эл. почта tb.ugmet@motorsich.com, ORCID 0000-0002-0754-5543<sup>2</sup>ГП «Ивченко–Прогресс», ул. Иванова, 2, Запорожье, Украина, 69068, тел. + 38 (061) 720 64 03, эл. почта 77@ivchenko-progress.com, ORCID 0000-0002-3914-3725<sup>3\*</sup>Каф. «Прикладная физика и наноматериалы», Запорожский национальный университет, ул. Жуковского, 66, Запорожье, Украина, 69600, тел. +38 (068) 262 28 94, эл. почта ospodoroha@outlook.com, ORCID 0000-0001-7543-1276<sup>4\*</sup>Каф. «Прикладная физика и наноматериалы», Запорожский национальный университет, ул. Жуковского, 66, Запорожье, Украина, 69600, тел. + 38 (061) 228 12 06, эл. почта mishchen4@gmail.com, ORCID 0000-0003-0992-478X**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛИ 09Х3НМЗФБч ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

**Цель.** В работе необходимо исследовать формирование структурного состояния новой стали 09Х3НМЗФБч после цементации и последующей термической обработки и азотирования. Определить рациональный режим химико-термической обработки, который будет обеспечивать создание однородного диффузионного слоя и высокие механические и эксплуатационные характеристики. **Методика.** Химико-термическую обработку проводили на первичное и вторичное твердение по четырем вариантам с использованием печей SIEMENS и ACEA. Азотирование проводили в два этапа. Для выявления микроструктуры стали опытно-промышленного производства проводили травление в 4 процентном растворе азотистой кислоты, металлографические исследования проводили по сечению образцов на микроскопе Axio Observed.D1m. Для определения эффективной глубины диффузионных слоев после цементации и азотирования измеряли микротвердость на приборе LECO LM248AT, а измерения горячей твердости проводили на приборе Wilson Rockwell Hardness Tester. **Результаты.** Для получения однородного структурного состояния стали 09Х3НМЗФБч и максимальных результатов механических и эксплуатационных характеристик проводили химико-термическую обработку по режиму: цементация при 930 °С с углеродным потенциалом 0,22, 13 ч отжиг при 650 °С, 5–7 ч закалка от 1 030 °С с охлаждением в масле, трехкратный отпуск при 530 °С, обработка холодом – 70 °С с выдержкой 1 ч 30 мин и последующий отпуск при 510 °С 1 ч. После цементации закалку проводили в интервале температур 1 000–1 030 °С для предотвращения перенасыщения рабочего диффузионного слоя и образования карбидной сетки. Последующий трехкратный отпуск при 530 °С и обработка холодом – 70 °С в течение 1 ч 30 мин способствовали распаду остаточного аустенита и образованию более мелкозернистого мартенсита отпуска. **Научная новизна.** Разработано рациональный режим химико-термической обработки, который обеспечивает максимальные механические и эксплуатационные свойства стали 09Х3НМЗФБч благодаря заранее определенному соотношению структурных составляющих цементированного слоя. **Практическая значимость.** Апробированный режим химико-термической обработки многокомпонентной легированной стали 09Х3НМЗФБч производства АО «Мотор Сич» и ГП «Ивченко–Прогресс», которая разработана для зубчатых колес авиационных редукторов газотурбинных двигателей нового поколения значительно увеличивает тепло- и энергонагрузку.

**Ключевые слова:** микроструктура; мартенсит; аустенит; цементация; азотирование; микротвердость; твердость; предел прочности

V. V. KLOCHIKHIN<sup>1</sup>, O. B. MILOSERDOV<sup>2</sup>, O. S. PODOROHA<sup>3\*</sup>, V. H. MISHCHENKO<sup>4\*</sup><sup>1</sup>Motor Sich JSC, Motorobudivnykiv Av., 15, Zaporizhzhia, Ukraine, 69068, tel. +38 (061) 720 50 53, e-mail tb.ugmet@motorsich.com, ORCID 0000-0002-0754-5543<sup>2</sup>SE «Ivchenko–Progress», Ivanova St., 2, Zaporizhzhia, Ukraine, 69068, tel. + 38 (061) 720 64 03, e-mail 77@ivchenko-progress.com, ORCID 0000-0002-3914-3725<sup>3\*</sup>Dep. «Applied Physics and Nanomaterials», Zaporizhzhia National University, Zhukovskoho St., 66, Zaporizhzhia, Ukraine, 69600, tel. +38 (068) 262 28 94, e-mail ospodoroha@outlook.com, ORCID 0000-0001-7543-1276<sup>4\*</sup>Dep. «Applied Physics and Nanomaterials», Zaporizhzhia National University, Zhukovskoho St., 66, Zaporizhzhia, Ukraine, 69600, tel. + 38 (061) 228 12 06, e-mail mishchen4@gmail.com, ORCID 0000-0003-0992-478X



## FEATURES OF FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF STEEL 09Cr3NiMo3VNbr DURING THERMOCHEMICAL TREATMENT

**Purpose.** The article is aimed to investigate the structural state formation of the new 09Cr3NiMo3VNbr steel after cementation and nitration with subsequent heat treatment. To determine the rational mode of thermochemical treatment, which will ensure the creation of a uniform diffusion layer and high mechanical and operational characteristics. **Methodology.** Thermochemical treatment was carried out on primary and secondary hardening in four versions using the SIEMENS and ACEA furnaces. Nitration was carried out in two stages. To identify the microstructure of pilot production steel the nitric acid etching in a 4% solution of nitrous acid was carried out, the metallographic studies were performed on the cross section of the samples on Axio Observed.D1m microscope. To determine the effective depth of the diffusion layers after cementation and nitration, microhardness was measured on LECO LM248AT instrument, and hot hardness measurements were performed on Wilson Rockwell Hardness Tester instrument. **Findings.** To obtain a homogeneous structural state of steel 09Cr3NiMo3VNbr and maximize the results of mechanical and performance characteristics, thermochemical treatment was performed according to the following mode: cementation at 930°C with a carbon potential of 0.22, 13 hours, annealing 650°C, 5-7 hours, hardening from 1 030°C with cooling in oil, three-time tempering 530°C, cold treatment – 70°C with a holding time of 1 h. 30 min. and subsequent tempering at 510°C, 1 hour. After cementation, hardening was carried out in the temperature range of 1000–1030°C to prevent oversaturation of the working diffusion layer and formation of a carbide mesh. Subsequent three-time tempering at 530°C and cold treatment of – 70°C for 1 h. 30 min. contribute to the decomposition of residual austenite and the formation of fine-grained tempering martensite. **Originality.** We developed the optimal mode of thermochemical treatment, which will ensure maximum mechanical and operational properties of steel 09Cr3NiMo3VNbr due to a predetermined ratio of the structural components of the cemented layer. **Practical value.** The tested mode of thermochemical treatment of multicomponent alloyed 09Cr3NiMo3VNbr steel, produced by Motor Sich JSC and Ivchenko–Progress, which was developed for the gears of aviation gearboxes of gas turbine engines of the new generation, significantly increases heat and power load.

**Keywords:** microstructure; martensite; austenite; cementation; nitration; microhardness; hardness; tensile strength

### REFERENCES

1. Lazechnyy, I. N., & Banas, I. P. (2005). Formirovanie pri KhTO struktury i svoystv tsementuemyykh staley razlichnoy teplostoykosti. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 1, 37-44. (in Russian)
2. Martynenko, V. V., & Mishchenko, V. H. (2016). Vyprobuvannya kontaktnoi vytryvalosti tsementovanykh staley dlia zubchastykh kolis ta sharykopydshyynykyv. *Moloda nauka-2016* (Vol. 1-4). Zaporizhzhia, 356-358. (in Ukrainian)
3. Mishchenko, V. H., Meniailo, O. I., & Bahriichuk, O. S. (2013). Doslidzhennia struktury ta vlastyvostei vtorynnotverdiuchykh tsementovanykh staley. *Materialoznavstvo i termichna obrobka metaliv*, 2-3, 48-53. (in Ukrainian)
4. Mokhova, A. S., Smirnov, A. Ye., & Alekhin, A. P. (2015). Vakuumnaya kombinirovannaya khimiko-termicheskaya obrabotka stali VKS-10. *Inzhenernyy vestnik*, 12. Retrieved from <https://engsi.ru/doc/829172.html> (in Russian)
5. Lazechnyi, I. M., Lysytsia, O. V., Mishchenko, V. H., Snizhnoi, V. L., & Snizhnoi, H. V. (2011). Peretvorennya austenitu v tsementovanii stali 13Kh3NVM2F. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 2, 47-52. (in Ukrainian)
6. Yeliseev, Y. S., Krymov, V. V., & Nezhurin, I. P. (2001). *Proizvodstvo zubchatykh koles gazoturbinykh dvigateley*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
7. Lian, J. L., Zheng, L. J., Wang, F. F., & Zhang, H. (2018). Evolution of carbides on surface of carburized M50NiL bearing steel. *Iron and Steel Research International*, 25(11), 1198-1211. doi: <https://doi.org/10.1007/s42243-018-0166-4> (in English)
8. Smirnov, A. E., Mokhova, A. S., Semenov, M. Y., Kuksenova, L. I., & Fakhurtdinov, R. S. (2017) Mixed-surface impregnation of gear wheels made of 13Kh3N3M2VFB-sh age-hardenable integrally alloyed steel

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- aimed at improving surface hardness, wear-resistance, and back-to-back endurance. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 46(4), 404-408. doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618817040173> (in English)
9. Ooi, S., & Bhadeshia, H. K. D., (2012). Duplex Hardening of Steels for Aeroengine. *ISIJ International*, 52(11), 1927-1934. doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1927> (in English)
  10. Mishchenko, V. G., Meniailo, O. I., Bagriichuk, O. S., & Bulakh, O. I. (2016). *Parameters control of 09Cr3NiMo3VNbr carburizing steel diffusion layer in the process of thermochemical treatment, Materials Science & Technology Conference and Exhibition 2016, MS&T'16*. Salt Lake City, United States, 2, 159-166. (in English)
  11. Ryzhov, N. M. (2010). Technological provision of contact fatigue resistance for cemented gear wheels made of heat-resistant steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 52(7), 330-335. doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9277-7> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.02.2019

Прийнята до друку: 25.07.2019