

# Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 621.9.031

DOI: 10.30748/zhups.2020.63.12

Р.М. Джус, М.Г. Стадніченко, В.М. Стадніченко, С.А. Плешкунов

*Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## МІКРОСТРУКТУРНІ ТА ФАЗОВІ ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ, ЗМІЦНЕНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВИМ АЗОТУВАННЯМ, ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ

*У статті представлені результати дослідження мікроструктурних та фазових особливостей поверхневого шару зразків зі сталі 20ХЗМВФ, зміцнених традиційним цементуванням та новим іонно-плазмовим азотуванням по технології АВІНІТ N (АТ "ФЕД", м. Харків, Україна). Комплексні мікроструктурні та фазові дослідження особливостей поверхневого шару пар зразків було виконано фахівцями і на обладнанні АТ "Мотор Січ" (м. Запоріжжя, Україна) після довготривалих випробувань на контактну втомну міцність, проведених авторами. В ході цих випробувань було виявлено значну перевагу зміцнення іонно-плазмовим азотуванням перед традиційним цементуванням.*

**Ключові слова:** *втомна міцність, зміцнення поверхонь тертя цементациєю, зміцнення поверхонь тертя азотуванням, іонно-плазмове азотування, мікроструктура поверхні, мікроструктурні особливості, фазові особливості, технологія зміцнення АВІНІТ N.*

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасні дослідження з використання іонно-плазмових технологій, проведені авторами [1] показують переваги цих технологій перед цементуванням.

Так іонно-плазмове азотування при проведенні прискорених та довготривалих випробувань на втомну міцність показали його значну (майже десятикратну) перевагу перед зміцненням цементуванням. Ці переваги пояснюються значним підвищенням твердості поверхневого шару азотованих зразків у порівнянні з цементациєю.

Однак відомо, що між підвищенням твердості та зростанням довговічності матеріалів в загальному випадку кореляція відсутня, більш того, високий ступінь зміцнення часто сприяє прояву при експлуатації аномальних форм втомного руйнування [2–3]. Причиною цього є зменшення запасу пластичності матеріалів, яке призводить до окрихчування при довготривалій експлуатації.

Для оцінки впливу даного фактору, як у позитивному, так і негативному напрямі, необхідне проведення структурно-фазових досліджень.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Великий вклад у вивчення структурних властивостей кристалічної решітки поверхневих шарів внесли В.С. Іванова, Л.М. Рибаківа, Л.І. Куксенова,

Л.І. Бершадський, В.І. Владимиров та ін. [4–6]. Металографічний та рентгеноструктурний аналізи поверхневого шару матеріалів показали, що при довготривалій експлуатації процеси зношування супроводжуються істотною зміною структури та властивостей поверхневого шару на макрорівні. При цьому, одну з лідируючих позицій в поясненні даних змін набула дислокаційна теорія втомного руйнування матеріалів, розвиваємо в працях вітчизняних та закордонних вчених [5; 7–9]. Об'єктивність дислокаційної теорії обумовлена тим, що в процесі пошкоджуваності відбувається поступове зростання щільності дислокацій, максимальне значення якої в матеріалі спостерігається безпосередньо перед руйнуванням.

Так, В.І. Владимиров в [10] відмітив, що руйнування матеріалу поверхневого шару настає при досягненні щільності дислокацій  $\rho \approx 0,5 \dots 5,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , що дозволяє прийняти цю характеристику, як внутрішній параметр, який контролює втомне зношування.

Зв'язок між поведінкою дефектів кристалічної решітки та властивостями матеріалу на макрорівні вивчалася і в [11–12].

Однак, використання даного критерію в реальних практичних дослідженнях не є можливим, оскільки до цих пір єдиним способом безпосереднього спостереження дислокацій, є метод просвічуючої електронної мікроскопії.

Іншим підходом до оцінки структурно-чутливих параметрів є використання рентгеноструктурного аналізу, який дозволяє визначити фазовий склад поверхневого шару азотованих зразків [13–16].

**Метою роботи** є дослідження мікроструктурних та фазових особливостей поверхневого шару сталевих зразків, зміцнених іонно-плазмовим азотуванням [17–19].

### Виклад основного матеріалу

Випробування на порівняння контактної втомної міцності при терті кочення з проковзуванням поверхонь сталі 20Х3МВФ, зміцнених традиційною газовою цементацією і іонно-плазмовим азотуванням по технології АВІНІТН (АТ “ФЕД”) [17–19] проводилися в Харківському національному університеті ПС ім. І. Кожедуба.

На першому етапі досліджень авторами статті проводилися прискорені випробування з використанням методу акустичної емісії (АЕ) за спеціально розробленою методикою [1].

Ці дослідження дали підґрунтя для проведення повноцінних довготривалих випробувань, необхідних для впровадження іонно-плазмового методу для зміцнення реальних агрегатів авіаційної техніки.

Після порівняння контактної втомної міцності при проведенні довготривалих випробувань, фахівцями і на обладнанні АТ “Мотор Січ” (м. Запоріжжя, Україна) було виконано комплексні мікроструктурні та фазові дослідження особливостей поверхневого шару пар зразків 6С/10С (зміцнених цементуванням), та 5А/1А (зміцнених іонно-плазмовим азотуванням).

Дослідження зовнішнього вигляду обкатаної поверхні, мікроструктурний стан матеріалу, а також мікротвердість за перетином зміцненого шару визначали на кожному зразку у чотирьох зонах, вказаних на рис. 1.

Зони 1 – стан до випробувань (так як зони не були задіяні у контакті), зони 2, 3, 4 – після дії контактних навантажень різної величини, що обумовлено вигином верхнього та нижнього валів машини тертя СМТ 2070 від діючого навантаження.

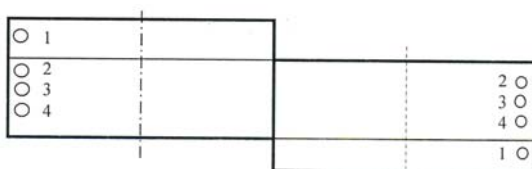


Рис. 1. Схема розташування досліджуваних зон у відповідності до взаємного розташування зразків в процесі випробувань

Подальші дослідження дали наступні результати.

Результати металографічного аналізу, визначення твердості та глибини зміцненого шару наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати металографічного аналізу, визначення твердості та глибини зміцненого шару

№ зразку	Твердість		Глибина зміцненого шару, мм	Мікроструктура, № рисунку
	зміцненої поверхні, HV/HRN15	серцевини, HRC		
6 С (цементац.)	679/89,0	34,5-36,0	1,2	2
10 С (цементац.)	731/90,0	35,0	1,2	3
1 А (азотуван.)	831/91,5	27,0-28,5	0,25	4
5 А (азотуван.)	800/90,0	27,0-28,0	0,25	5

Мікродослідженнями встановлено наступне. Контактуючі поверхні зразків № 6С і № 10С цементовані у відповідності з умовами виготовлення [1]. Фактична глибина цементованого шару складає  $\approx 1,2$  мм (рис. 2 а, 3 а). Мікроструктура цементованого шару на зразках являє собою мартенсит і карбіди: з поверхні до глибини  $\approx 0,18$  мм – карбіди більш крупні, округлі і стовбчатої форми, недопустимі за Шкалою мікроструктур, далі за перерізом шару карбіди дрібнодисперсні, що відповідає 8-му, допустимому балу по Шкалі мікроструктур (рис. 2 б, 3 б). Структурних відмінностей за шириною робочої поверхні зразків в зонах контакту № 1...№ 4 (рис. 1) не відмічено.

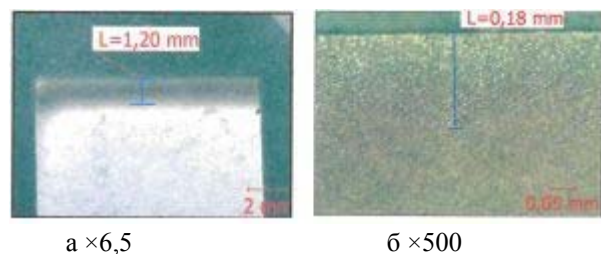


Рис. 2. Мікроструктура цементованого шару і серцевини зразку 6С

Мікроструктура серцевини – маловуглецевий мартенсит, відповідає сталі 20Х3МВФ, термообробленої на вказану твердість. Контактуючі поверхні зразків № 1А і № 5А азотовані. Фактична глибина азотованого шару складає  $\approx 0,25$  мм (рис. 4 а, 5 а).

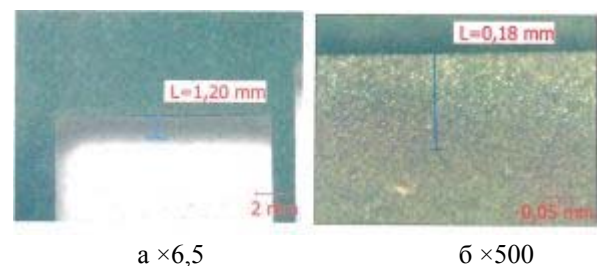


Рис. 3. Мікроструктура цементованого шару і серцевини зразку 10 С

Мікроструктура азотованого шару на зразках ідентична. В поверхневому шарі виявляється фаза товщиною  $\approx 0,01$  мм, далі по перерізу мікроструктура азотованого шару має вигляд, характерний для азотистого мартенситу відпуску з тонкими надлишковими нітридами (рис. 4 б, 5 б).

Мікроструктура серцевини – мартенсит відпуску, відповідає сталі 20Х3МВФ, термообробленої на вказану твердість.

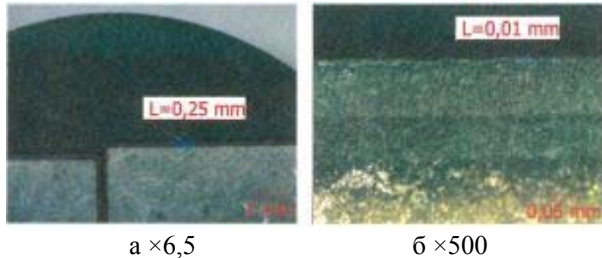


Рис. 4. Мікроструктура цементованого шару і серцевини зразку 1А

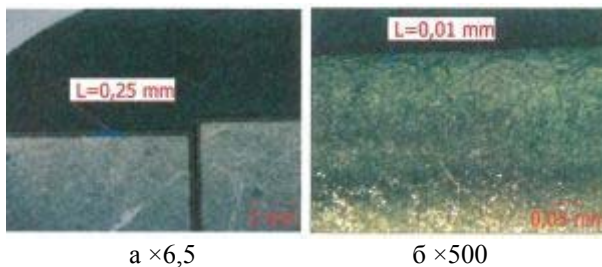


Рис. 5. Мікроструктура цементованого шару і серцевини зразку 5А

Для ідентифікації фазового складу поверхневого шару азотованих зразків було виконано рентгеноструктурні дослідження. Вони проводилися на дифрактометрі ДРОН-2.0 у фільтрованому випромінюванні Fe-K $\alpha$ . Зйомка дифрактограм для фазового аналізу здійснювалася у схемі  $\theta$ -2 $\theta$  сканування з фокусуванням за Брегом-Брентано в інтервалі кутів від 25 до 140 град. Для порівняння було отримано дифрактограми з поверхні азотованого зразку 5А і такого ж фрагменту, вирізаного з цього зразку, поверхня якого була зішліфована на глибину 1 мм для видалення азотованого шару.

Після обробки дифрактограм, визначення кутового положення дифракційних максимумів та ідентифікації фаз за формулою Вульфа-Брегга розраховувалася міжплосинна відстань  $d_{hkl}$  для кристалграфічних площин ( $hkl$ ). Значення параметру решітки  $a$  для виявлених фаз визначалося із співвідношення:

$$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

На дифрактограмі зразку сталі 20Х3МВФ з видаленим азотованим шаром (рис. 6) виявляються вузькі лінії  $\alpha$ -Fe з ОЦК структурою (з об'ємноцентрованою кубічною решіткою) і параметром кристалічної решітки 0,287 нм. Лінії карбиду не виявляються. Співвідношення інтенсивності ліній

наближене до табличних значень, що свідчить про відсутність текстури.

На дифрактограмі зразку № 5А (рис. 7) лінії  $\alpha$ -Fe суттєво ослаблені і виявляються лінії нітридів  $\gamma$ -Fe $_4$ N, найбільш інтенсивними з яких є (111), (200), (311), що відповідає табличним даним. При цьому лінії фази  $\alpha$ -Fe зсуваються в бік менших кутів, що свідчить про збільшення періоду решітки до 0,290 нм, пов'язаного з утворенням твердого розчину азоту в решітці фериту (азотистий ферит). Фаза  $\gamma$ -Fe $_4$ N має ГЦК решітку (гранецентровану кубічну). Атоми заліза розташовані так же, як в структурі аустеніту ( $\gamma$ -Fe), а атоми азоту – у міжвузлях. Параметр решітки цієї фази в азотованому шарі 0,382 нм.

Таким чином, основною фазою, яка утворюється в поверхневому шарі сталі 20Х3МВФ при обраних умовах азотування, є фаза  $\gamma$ -Fe $_4$ N, завтовшки не більше 5 мкм.

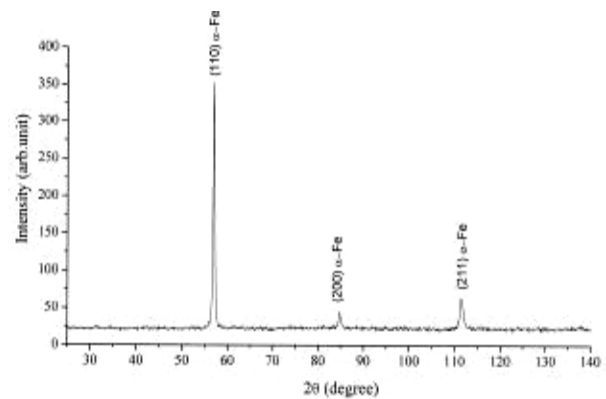


Рис. 6. Дифрактограма зразку зі сталі 20Х3МВФ з видаленим азотованим шаром

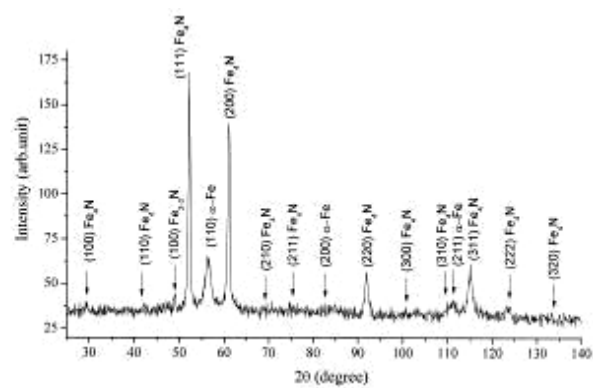


Рис. 7. Дифрактограма поверхні азотованого зразку 5А зі сталі 20Х3МВФ

Додатково виконано визначення мікротвердості за перетином зміцнених шарів зразків в зонах, вказаних на рис. 1. Результати визначення мікротвердості і ефективна глибина шару, яка відповідала мікротвердості 500 НV, наведені в табл. 2, 3.

Отримані результати мікротвердості свідчать про те, що ефективна глибина зміцненого шару, яка відповідає мікротвердості 500 НV, на цементованих

та на азотованих зразках близька за значеннями величині шару, визначеного мікроструктурним способом. Помітної різниці у величині ефективної глибини шару у зонах контакту № 1...№ 4 не визначено.

Таблиця 2

Мікротвердість за перетином цементованого шару на зразках № 6С та № 10С

№ зразка, № зони	Відстань від поверхні, мм													Ефект. глибина (500HV), мм
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	
№ 6С														
Мікротвердість, мм														
1	679	730	731	727	710	697	681	667	652	637	598	528	506	≈1,30
2	696	705	689	678	652	628	605	585	581	550	529	510	486	≈1,25
3	703	670	657	649	621	597	587	562	554	522	505	486	–	≈1,10
4	699	665	635	630	622	611	587	560	544	529	524	510	478	≈1,25
№ 10С														
Мікротвердість, мм														
1	731	725	714	702	666	662	637	609	585	556	543	537	501	≈1,30
2	731	716	736	739	694	664	660	637	623	591	558	544	506	≈1,30
3	731	743	727	710	670	657	628	598	585	558	544	535	506	≈1,30
4	705	745	716	688	657	649	616	593	579	562	541	537	475	≈1,25

Таблиця 3

Мікротвердість за перетином азотованого шару на зразках № 1А та № 5А

№ зразка, № зони	Відстань від поверхні, мм				Ефект. глибина (500HV), мм
	0,05	0,10	0,15	0,20	
№ 1А					
Мікротвердість, мм					
1	972	831	741	379	≈1,55
2	1024	876	754	388	≈1,55
3	977	892	793	388	≈1,55
4	965	783	749	352	≈1,55
№ 5А					
Мікротвердість, мм					
1	932	800	734	420	≈1,55
2	918	788	718	374	≈1,55
3	930	829	777	421	≈1,55
4	927	813	750	420	≈1,55

Помітної різниці у величині ефективної глибини шару у зонах контакту № 1...№ 4 не визначено.

## Висновки

Мікроструктура азотованого шару має вигляд, характерний для азотистого мартенситу відпуску з тонкими надлишковими нітридами. При цьому спостерігається збільшення періоду решітки до 0,290 нм, пов'язаного з утворенням твердого розчину азоту в решітці фериту. Наявність фази  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  має ГЦК решітку, яка забезпечує мікропластичні

характеристики даного покриття, напряму пов'язаного з підвищенням втомної міцності.

Отримані результати мікротвердості свідчать про те, що ефективна глибина зміцненого шару, яка відповідає мікротвердості 500 HV, близька по значенням до величини шару, який встановлювався мікроструктурним способом та для азотованого шару складає 0,155 мм, а для цементованих зразків 1,25...1,30 мм, що на порядок вище.

Цей висновок дає розуміння того, що, при меншій товщині зміцненого шару, азотування забезпечує кращий показник втомної міцності у порівнянні з цементациєю.

Таким чином, проведені поглиблені фрактографічні, мікроструктурні і фазові дослідження особливостей поверхневого шару сталевих зразків, зміцнених традиційною цементациєю та новим іонно-плазмовим азотуванням АВІНІТ N, виявили причини значної переваги іонно-плазмового азотування перед цементуванням за показником втомної міцності. Це дає цілком обґрунтовану основу для впровадження такої перспективної технології зміцнення для збільшення зносостійкості високонавантажених деталей агрегатів авіаційної та іншої техніки, які працюють в умовах тертя кочення з проковзуванням.

## Список літератури

1. Стадниченко В.М. Методика прискореної оцінки показників втомної пошкоджуваності конструкційних матеріалів / В.М. Стадниченко, Р.М. Джус, С.А. Плешкунов // Системи озброєння і військова техніка. – 2019. – № 2(58). – С. 122-131. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.15>.
2. Денисова Н.Е. Триботехническое материаловедение и триботехнология / Н.Е. Денисова, В.А. Шорин, И.Н. Гонгарь. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2006. – 248 с.
3. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2008. – 387 с.
4. Dmitriev A.I. Simulation of surface topography with the method of movable cellular automata / A.I. Dmitriev, V.L. Popov, S.G. Psakhie // Tribology Int. – 2006. – Vol. 39. – № 5. – P. 444-449.

5. Kemmer H.A. Investigation of the friction behavior of automotive brakes through experiments tribological modeling / H.A. Kemmer // Проблемы машиностроения и надежности машин. – № 5. – 1998. – С. 113-122.
6. Problems of Kinetics of Surface Destruction / D.G. Gromakovsky, A.G. Kovshov, I.D. Ibatullin, A.V. Dynnikov // Proceedings of VII-th International Symposium “INTERTRIBO 2002”, section B – Wear, Slovak Republic, Stara Lesna, House of Technology, 2002, p. 57-58.
7. The research progress of friction and wear surface self-repairing of machine parts / Q. Liu, Y. Xu, P.J. Shi, B. Shi // China Surface Engineering. – 2005. – № 18(5). – P. 1-5.
8. Amiri M. On the thermodynamics of friction and wear – a review / M. Amiri, M.M. Khonsari // Entropy. – 2010. – № 12. – P. 1021-1049.
9. Gromakovsky D.G. Modelling and Wear Calculation on Friction / D.G. Gromakovsky, A.N. Malyarov, Y.P. Samarin. – Northumberland: Bookcraft Limited, 1997. – 462 p.
10. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания [Электронный ресурс] / В.И. Владимиров // Трение, износ, смазка. – 2008. – № 2(10). – С. 7-31. – Режим доступа: <http://www.tribo.ru/>.
11. Kato K. Wear mechanisms / K. Kato // Plenary Papers of The World Tribology Congress. – Bath, United Kingdom, 1997. – P. 39-56.
12. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания / Д.Г. Громаковский // Трение и износ. – 1997. – № 1(18). – С. 53-62.
13. Азотный потенциал: современное состояние проблемы и концепция развития / В.М. Зинченко, В.Я. Сыропятов, Б.А. Прусаков, Ю.А. Перекатов. – М.: Машиностроение, 2003. – 90 с.
14. Пастух І.М. Вплив режимних параметрів азотування у тліючому розряді на товщину нітридної зони модифікованого шару / І.М. Пастух, Г.М. Соколова, О.С. Здибель // Вісник Хмельницького національного університету, 2014, № 4(215). – С. 130-134.
15. Могильная Е.П. Ионное азотирование изделий из конструкционной стали 38ХМФА / Е.П. Могильная, В.М. Дубасов // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2013. – № 1. – С. 193-198.
16. Костик К.О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивості легваної сталі 30Х3ВА / К.О. Костик, В.О. Костик // Вісник Національно-технічного університету “ХПІ”. – 2014. – № 48(1090). – С. 21-41.
17. Сагалович О.В., Сагалович В.В. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N. Pat. UA №84664 від 25.10.13.
18. Сагалович О.В., Сагалович В.В. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N. Pat. UA №107408 від 28.12.14.
19. Sagalovich V.V., Sagalovich, A.V. The method of ion-plasma precision nitriding of the surfaces of metal products, Patent 2555692, Russian Federation, C23C8/36 (H01J 37/00), C23C14/48, stated 27.12.2014; publ. 10.07.2015, Bull. No. 19, 13 p.

## References

1. Stadnychenko, V.M., Dzhus, R.M. and Pleshkunov, S.A. (2019), “Metodyka pryskorenoi otsinky prokaznykiv vtomnoi poskodzhuvanosti konstruktivnykh materialiv” [Method of accuracy assessment of performance indicators of construction materials], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 2(58), pp. 122-131. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.58.15>.
2. Denisova, N.E., Shorin, V.A., Gontar, I.N., Volchihina, N.I. and Shorina, N.S. (2006), “Tribotekhnicheskoe materialovedenie i tribotekhnologiya” [Tribotechnical material science and tribotechnology], Penza State University, Penza, 248 p.
3. Ibatullin, I.D. (2008), “Kinetika ustalostnoy povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnykh sloev” [Kinetics of fatigue damage and destruction of surface layers], Samara State Technical University, Samara, 387 p.
4. Dmitriev, A.I., Popov, V.L. and Psakhie, S.G. (2006), Simulation of surface topography with the method of movable cellular automata, *Tribology International*, No. 5, Vol. 39, pp. 444-449.
5. Kemmer, H.A. (1998), Investigation of the friction behavior of automotive brakes through experiments tribological modeling, *Problems of Machine Building and Machine Reliability*, No. 5, pp. 113-122.
6. Gromakovsky, D.G., Kovshov, A.G., Ibatullin, I.D. and Dynnikov, A.V. (2002), Problems of Kinetics of Surface Destruction, *Proceedings of VII-th International Symposium “INTERTRIBO 2002”, section B – Wear*, House of Technology, Stara Lesna, Slovak Republic, pp. 57-58.
7. Liu, Q., Xu, Y., Shi, P.J. and Xu, B. (2005), The research progress of friction and wear surface self-repairing of machine parts, *China Surface Engineering*, No. 18(5), pp.1-5.
8. Amiri, M. and Khonsari, M.M. (2010), On the thermodynamics of friction and wear – a review, *Entropy*, Vol. 12, pp. 1021-1049.
9. Gromakovsky, D.G., Malyarov, A.N. and Samarin, Y.P. (1997), Modelling and Wear Calculation on Friction, *Abstracts of Papers of the World Tribology Congress*, Bookcraft Limited, Northumberland, 462 p.
10. Vladimirov, V.I. (2008), “Problemy fiziki treniya i iznashivaniya” [Problems of friction and wear physics], *Friction, wear, grease*, No. 2(10), pp. 7-31, available at: [www.tribo.ru/](http://www.tribo.ru/) (accessed 22 March 2011).
11. Kato, K. (1997), Wear mechanisms, *Plenary Papers of The World Tribology Congress*, Bookcraft Limited, Bath, United Kingdom, Pp. 39-56.

12. Gromakovsky, D.G. (1997), "Sistema ponyatiy i struktura modeley iznashivaniya", [The system of concepts and the structure of wear models], *Friction and Wear*, No. 1(18), pp. 53-62.
13. Zynchenko, V.M., Syropiatov, V.Ya., Prusakov, B.A. and Perekatov, Yu.A. (2003), "Azotnyi potentsyal: sovremennoe sostoianye problemy y kontseptsyia razvytiya" [Nitrogen potential: current state of the problem and concept of development], Engineering, Moscow, 90 p.
14. Pastukh, I.M., Sokolova, H.M. and Zdybel, O.S. (2014), "Vplyv rezhyimnykh parametriv azotuvannya u tliuchomu rozriadi na tovshchynu nitrydnoi zony modyfikovanoho шару" [Influence of nitriding in a glow discharge operational parameters on the nitride zone of the modified layer thickness], *Herald of Khmelnytskyi national university*, No. 4 (215), pp. 130-134.
15. Mogilnaya, E.P. and Dubasov, V.M. (2013), "Yonnoe azotyrovanye yzdelyi yz konstruksyonnoi staly 38KhMFA" [Ionic nitriding of wares from the structural steel 38XMFA], *Resource Processing Technology and Processing With the help of Clamping Materials at the Machine*, No. 1, pp. 193-198.
16. Kostik, K.O. and Kostik, V.O. (2014), "Porivnialnyi analiz vplyvu hazovoho ta ionno-plazmovoho azotuvannya na zminu struktury i vlastyosti lehovanoi stali 30Kh3VA" [Particular analysis of gas and ion-plasma nitrogen inflow to winter structure and power of alloy steel 30X3VA], *Newsletter of the National Technical University "KPI"*, No. 48(1090), pp. 21-41.
17. Sagalovich, A.V. and Sagalovich, V.V. (2013), "Sposib ionno-plazmovoho pretsyziinoho azotuvannya poverkhon staley ta splaviv Avinit N" [Method for ion-plasma precision nitriding of steels and alloys surfaces Avinit N], Pat. UA No. 84664 25.10.13., bull. No. 14, 13 p.
18. Sagalovich, A.V. and Sagalovich, V.V. (2013), "Sposib ionno-plazmovoho pretsyziinoho azotuvannya poverkhon staley ta splaviv Avinit N" [Method for ion-plasma precision nitriding of steels and alloys surfaces Avinit N], Pat. UA No. 107408 28.12.14., bull. No. 15, 14 p.
19. Sagalovich, V.V. and Sagalovich, A.V. (2014), "Sposob ionno-plazmennogo pretsizionnogo azotirovaniya poverhnostey metallicheskih izdeliy" [The method of ion-plasma precision nitriding of the surfaces of metal products], Patent 2555692, Russian Federation, C23C8/36 (H01J 37/00), C23C14/48, stated 27.12.2014; publ. 10.07.2015, bull. No. 19, 13 p.

Надійшла до редколегії 08.01.2020

Схвалена до друку 11.02.2020

**Відомості про авторів:**

**Джус Роман Миколайович**

кандидат технічних наук старший науковий співробітник  
старший викладач  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-7079-0912>

**Стадніченко Микола Григорович**

кандидат технічних наук доцент  
старший викладач  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-4613-6256>

**Стадніченко Вячеслав Миколайович**

доктор технічних наук професор  
професор Національного авіаційного університету,  
Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-3450-3899>

**Плешкунов Сергій Анатолійович**

старший викладач Харківського національного  
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-0733-4535>

**Information about the authors:**

**Roman Dzhus**

Candidate of Technical Sciences Senior Research  
Senior Instructor  
of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Forces University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-7079-0912>

**Mykola Stadnychenko**

Candidate of Technical Sciences  
Associate Professor  
Senior Instructor of Ivan Kozhedub Kharkiv National  
Air Forces University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-4613-6256>

**Vyacheslav Stadnychenko**

Doctor of Technical Sciences Professor  
Professor of National Aviation University,  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3450-3899>

**Serhii Pleshkunov**

Senior Instructor of Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Forces University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0733-4535>

**МИКРОСТРУКТУРНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, УПРОЧНЕННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ, КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ**

Р.Н. Джус, Н.Г. Стадніченко, В.Н. Стадніченко С.А. Плешкунов

В статье представлены результаты исследования микроструктурных и фазовых особенностей поверхностного слоя образцов из стали 20ХЗМВФ, упрочненных традиционным цементированием и новым ионно-плазменным азотированием по технологии АВИНИТ N (АО "ФЭД", г. Харьков, Украина). Комплексные микроструктурные и фазовые исследования особенностей поверхностного слоя пар образцов были выполнены специалистами и на оборудовании АО "Мо-

тор Сич" (г. Запорозжє, Україна) после длительных испытаний на контактную усталостную прочность, проведенных авторами. В ходе этих испытаний было обнаружено значительное преимущество упрочнения ионно-плазменным азотированием перед традиционным цементированием.

**Ключевые слова:** усталостная прочность, упрочнение поверхностей трения цементацией, упрочнение поверхностей трения азотированием, ионно-плазменное азотирование, микроструктура поверхности, микроструктурные особенности, фазовые особенности, технология упрочнения AVINIT N.

### MICROSTRUCTURAL AND PHASE FEATURES OF A SURFACE LAYER STRENGTHENED BY ION-PLASMA NITROGEN AS A FACTOR OF INCREASING FATIGUE STRENGTH

R. Dzhus, M. Stadnichenko, V. Stadnychenko, S. Pleshkunov

The article presents the results of the study of microstructural and phase features of the surface layer of 20X3MVF steel samples, strengthened by traditional cementing and new ion-plasma nitriding using AVINIT N technology (JSC "FED", Kharkiv, Ukraine). Complex microstructural and phase studies of the features of the surface layer of the sample pairs were performed by specialists and at the equipment of JSC "Motor Sich" (Zaporozhye, Ukraine) after long-term tests for contact fatigue, conducted by the authors. In the course of these tests, a significant advantage of ion-plasma nitriding over traditional cementing was found. The microstructure of the nitrided layer has the appearance characteristic of nitrous release martensite with fine excess nitrides. This increases the lattice period to 0.290 nm due to the formation of a solid solution of nitrogen in the lattice of the ferrite. The presence of the  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  phase has an FCC lattice that provides the microplastic characteristics of this coating, which is directly related to the increase in fatigue strength. The obtained microhardness results indicate that the effective depth of the hardened layer, corresponding to the microhardness of 500 HV, is close to the value of the layer, which was established in the microstructural way and for the nitrided layer is 0.155 mm, and for cemented samples 1.25 ... 1.30 mm, which is an order of magnitude higher. This conclusion gives the understanding that, with a smaller thickness of the reinforced layer, nitriding provides a better indicator of fatigue strength than cementation. The deepened fractographic, microstructural and phase studies of the features of the surface layer of steel samples, strengthened by traditional cementation and new ion-plasma nitriding AVINIT N, revealed the reasons for the significant advantage of ion-plasma nitriding over cementation. This provides a well-founded basis for the introduction of such promising reinforcement technology to increase the wear resistance of high-load components of aeronautical and other machinery components operating under rolling friction with slip.

**Keywords:** fatigue strength, strengthening of friction surfaces by cementation, reinforcement of friction surfaces by nitriding, ion-plasma nitriding, surface microstructure, microstructural features, phase features, AVINIT N hardening technology.