

Научная статья  
УДК 621.785.53  
DOI: 10.34759/vst-2022-1-245-252

## ОЦЕНКА ТВЕРДОРАСТВОРНОГО УПРОЧНЕНИЯ АУСТЕНИТНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ АЗОТОМ

Лариса Георгиевна Петрова<sup>1</sup>, Ирина Станиславовна Белашова<sup>2</sup> ✉

<sup>1,2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

<sup>1</sup>petrova\_madi@mail.ru

<sup>2</sup>irina455@inbox.ru ✉

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам структурной теории прочности, в частности расчету влияния легирующих элементов в аустенитных сталях и сплавах на уровень твердорастворного упрочнения, которое является одним из основных механизмов упрочнения наряду с дислокационным упрочнением, зернограницным, субзерненным и дисперсионным. Прогнозирование уровня упрочнения в зависимости от основных упрочняющих факторов на основе расчетных моделей позволяет связать структуру материала с пределом текучести и вязкости разрушения как основными показателями конструкционной прочности изделия, а также максимально реализовывать основные механизмы упрочнения для разработки новых эффективных технологий создания материалов с заданными свойствами.

**Ключевые слова:** дислокации, упрочнение, твердый раствор, коэффициент активности азота, легирование, предел текучести

**Финансирование:** материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

**Для цитирования:** Петрова Л.Г., Белашова И.С. Оценка твердорастворного упрочнения аустенитных сплавов при легировании азотом // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 245-XX. DOI: 10.34759/vst-2022-1-245-252

Original article

## ASSESSMENT OF SOLID-SOLUTION HARDENING OF AUSTENITIC ALLOYS AT NITROGEN ALLOYING

Larisa G. Petrova<sup>1</sup>, Irina S. Belashova<sup>2</sup> ✉

<sup>1,2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),  
Moscow, Russia

<sup>1</sup>petrova\_madi@mail.ru

<sup>2</sup>irina455@inbox.ru ✉

© Петрова Л.Г., Белашова И.С., 2022

### Abstract

The article deals with the development of the structural theory of strength and design on its basis of various technological schemes for surface hardening of steels and alloys. The basic principles of dislocation theory are also presented here, according to which the resistance of real metals to plastic deformation being expressed by the strength characteristics (yield strength  $\sigma_t$  and tensile strength  $\sigma_v$ ), is higher, the lower the dislocation mobility is, i.e. the more barriers are in its path. On the other hand, the ductility and toughness of metals are being reduced herewith, leading to the brittle fracture as the result of the possible initiation and progressive development of a crack. Hardening of real metallic materials is being considered as the result of the dislocations interaction with a certain combination of several types of obstacles, or as a combined effect of several structural mechanisms, namely hardening by interstitial or substitutional atoms (solid solution hardening), hardening by grain and subgrain boundaries, hardening by dislocations, and hardening by dispersed particles. Contribution of these mechanisms to the overall hardening may vary greatly depending on the class, brand of metallic material, as well as on the technology employed. The approximation of linear additivity of various mechanisms is generally accepted and confirmed by the concurrence of calculated and experimental results for certain classes of steels.

This article adduces a calculation of the of the alloying elements impact in austenitic steels and alloys on the level of solid solution hardening, which is the predominant mechanism of structural strengthening in this class of austenitic steels while nitriding. It is worth noting that nitriding is one of the most widespread chemical-thermal treatment processes in mechanical engineering. The structural strengthening while formation solid solutions forming occurs due to the deceleration and blocking of dislocations by atoms of the dissolved element owing to the Cottrell atmospheres formation, which increase the stress required for dislocation glide, i.e., cause hardening. Hardening level prediction based on computational models allows associating the material structure with the yield strength and fracture toughness as the main indicators of the structural strength of a product, as well as maximally implementing the main of hardening mechanisms order to develop new effective technologies for creating materials with desired properties.

**Keywords:** dislocations, hardening, solid solution, nitrogen activity coefficient, alloying, yield strength

**Funding:** the material was prepared within the framework of scientific research under the project No. FFSM-2020-0011 (2019—1342), experimental studies were performed employing the equipment of the MADI collective use center.

**For citation:** Petrova L.G., Belashova I.S. Assessment of solid-solution hardening of austenitic alloys at nitrogen alloying. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 245-252. DOI: 10.34759/vst-2022-1-245-252

---

---

### Введение

Для повышения эксплуатационной прочности изделий из сталей и сплавов используются упрочняющие технологии, которые обеспечивают формирование оптимальных структур для требуемого уровня надежности и долговечности конструкции.

В соответствии с традиционными представлениями, упрочнение сплавов вызвано торможением дислокаций на структурных препятствиях, к которым относятся посторонние атомы, дисперсные частицы, границы зерен и т.п. [1—3]. В связи с этим для упрочнения металлов и сплавов применяются широко известные способы воздействия на структуру: объемное или поверхностное

легирование (например, методами химико-термической обработки), увеличение плотности дислокаций путем наклепа, измельчение зерна и создание ячеистой субструктуры, выделение упрочняющих фаз (дисперсионное твердение) в результате фазовых превращений.

Таким образом, для повышения прочностных свойств сплавов необходима разработка упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование такого структурного состояния материала, при котором максимально реализуются основные принципы дислокационной теории упрочнения.

Одним из способов повышения прочности металлов согласно дислокационной теории явля-

ется *твердорастворное упрочнение*, происходящее при легировании. Его механизм обусловлен взаимодействием дислокаций с атомами легирующих элементов, которые создают искажения в решетке металла. Дислокации также могут оказаться заблокированными атомами растворенного элемента вследствие образования атмосфер [4, 5].

Кроме того, сопротивление пластическому течению может возрастать из-за увеличения силы трения поперечного скольжения дислокации при обходе растворенных атомов, а также уменьшения энергии дефектов упаковки при легировании. К элементам, снижающим энергию дефектов упаковки в  $\alpha$ -Fe, относятся кремний, фосфор, молибден, ванадий, кобальт, т.е. в большинстве своем элементы, стабилизирующие феррит. В  $\gamma$ -Fe (аустените) почти все легирующие элементы уменьшают энергию дефектов упаковки, кроме никеля и меди.

Известно, что атомы внедрения (например, углерод и азот) на два порядка эффективнее упрочняют твердый раствор, чем атомы замещения, так как обладают большей величиной параметра размерного несоответствия с большинством металлов. Преимущество азота для упрочнения аустенитных сталей заключается в достаточно высокой растворимости его в  $\gamma$ -железе; по сравнению с углеродом азот оказывает менее отрицательное влияние на межкристаллитную коррозию. Азот является  $\gamma$ -стабилизатором: он увеличивает устойчивость аустенита в хромоникелевых сталях, что снижает их склонность к образованию  $\delta$ -феррита [6–9].

Азот, как элемент, эффективно упрочняющий твердый раствор, активно используется для формирования азотосодержащих сталей металлургическими способами легирования [10–12]. Ограниченные возможности для введения азота через жидкую фазу вследствие его малой растворимости могут быть расширены применением поверхностного легирования готового изделия методами азотирования. Для предотвращения образования нитридных выделений в коррозионно-стойких хромоникелевых сталях применяются различные технологические варианты азотирования на твердый раствор [13–17].

При наличии в сплаве легирующих элементов из группы переходных металлов (Cr, Mo, W, V, Ti) растворимость азота в твердом железе значительно повышается, поэтому эффект твердорастворного упрочнения увеличивается для высоколегированных сталей.

Целью настоящего исследования является количественная оценка влияния легирующих элементов в аустенитных сталях и сплавах на уровень твердорастворного упрочнения азотом.

### Методика исследования

Для количественной оценки твердорастворного упрочнения использованы соотношения между приростом предела текучести упрочненного сплава и его индивидуальными параметрами. Согласно теории Мотта и Набарро [1], возникающее в решетке напряжение от растворенных атомов зависит от различий в размерах атомов растворителя и растворенного элемента и пропорционально концентрации растворенного элемента  $C_L$ .

Экспериментально показано, что упрочнение многих твердых растворов замещения в  $\alpha$ -железе, в том числе при образовании легированного аустенита, удовлетворительно описывается в приближении линейной зависимости напряжения течения  $\Delta\tau_{т.р}$  от концентрации легирующего элемента. Таким образом, для разбавленных твердых растворов, которыми являются большинство конструкционных сталей, для оценки возникающего напряжения в решетке  $\Delta\tau_{т.р}$  можно пользоваться выражением

$$\Delta\tau_{т.р} = G\delta_r^2 C_L, \quad (1)$$

где  $\delta_r$  – параметр размерного несоответствия, выраженный через атомные радиусы матричного металла  $r_M$  и растворенного элемента  $r_P$ :

$$\delta_r = \frac{r_P - r_M}{r_M}. \quad (2)$$

Прирост предела текучести легированного железа при твердорастворном упрочнении азотом пропорционален растворимости азота в сплаве  $C_N^L$  и может быть выражен формулой:

$$\Delta\sigma_{т.р}^N = k_N C_N^L, \quad (3)$$

где  $k_N$  – коэффициент твердорастворного упрочнения азотом.

Для определения растворимости азота в двойных сплавах Fe-ЛЭ (легирующий элемент) в зависимости от концентрации легирующих элементов можно воспользоваться коэффициентом ак-

тивности азота  $\gamma_L^N$ , который показывает, во сколько раз концентрация азота в легированном сплаве  $C_N^L$  больше, чем концентрация азота в чистом железе  $C_N^0$ .

Методика расчета учитывает, что некоторые легирующие элементы (V, Ti, Cr) при взаимодействии с азотом образуют нитриды, вследствие чего их концентрация в твердом растворе существенно уменьшается. Поправка на перераспределение азота между раствором и нитридными фазами дает выражение [17]

$$\Delta\sigma_{т.р.}^N = k_N C_N^L - k_L C_L (1 - \xi), \quad (4)$$

где  $C_L (1 - \xi)$  — концентрация легирующего элемента, связанного в нитриды;  $\xi$  — коэффициент перераспределения нитридообразующего элемента.

Для определения коэффициентов  $k_N$  в формуле (4) использовали выражение

$$k_N = AmGd_r^2, \quad (5)$$

где  $A \approx 0,04$  — коэффициент перевода из атомной концентрации азота в весовую;  $m = 3,1$  — ориентационный множитель Тейлора для гранцентрированной кубической решетки;  $G$  — модуль сдвига металла.

Предел текучести сплавов, упрочненных растворенным азотом, оценивается как

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_{т.р.}^N, \quad (6)$$

где  $\sigma_0$  — предел текучести сплава, не содержащего азот.

### Результаты и их обсуждение

Как следует из расчетов, наиболее сильно азот упрочняет твердый раствор в двойных сплавах Fe-V, Fe-Ti и Fe-Cr.

Азот эффективно упрочняет нержавеющие хромоникелевые стали: при повышении его концентрации от 0,25%N до 0,5%N происходит двукратное увеличение их предела текучести. Однако чтобы достичь такой концентрации азота в аустените, необходимо наличие в твердом растворе элементов, растворимость которых повышает растворимость азота.

Хром и никель оказывают существенное влияние на растворимость азота в аустенитных

сталях. Изменение растворимости азота в зависимости от концентрации легирующих элементов в двойных и тройных сплавах характеризуется коэффициентами активности азота  $\gamma_L^N$  [18—20].

Результаты расчета показывают, что параметр  $\lg \gamma_{Cr}^N$  линейно зависит от содержания хрома в сплавах на Ni- и Fe-Ni-основе. Полученные уравнения регрессии описывают расчетные зависимости с высокой достоверностью аппроксимации (рис. 1).

Например, при температуре 800 °С с увеличением содержания хрома в никелевой матрице от 25 до 40% растворимость азота увеличивается от 0,15 до 0,65% по массе.

В сплавах системы Fe-Ni-Cr-N зависимость коэффициента активности от содержания никеля близка к параболической (в диапазоне концентраций 20—40%Ni) (рис. 2). Так, при температуре 1000 °С повышение концентрации никеля с 20%Ni до 30%Ni снижает растворимость азота в сплаве, содержащем 35%Cr, с 0,57%N до 0,32%N (по массе).

Определены коэффициенты твердорастворного упрочнения азотом для расчета предела текучести по выражению (3):  $k_N = 1650$  для сплавов на никелевой основе и  $k_N = 1820$  для сплавов на железоникелевой основе. Результаты расчета твердорастворного упрочнения азотом для аустенитной стали типа 18%Cr/10%Ni приведены на рис. 3. Оценочные параметры упрочнения удовлетворительно коррелируют со значениями пределов текучести азотосодержащих и азотированных аустенитных сталей подобного классического состава при небольших концентрациях азота (до 0,2—0,25%N). Зависимость предела текучести от содержания азота при более высоких его концентрациях больше отвечает соотношению  $\Delta\sigma_T \sim C_N^{1/2}$  (показано пунктиром на рис. 3).

### Выводы

1. Предложенная методика количественной оценки влияния легирующих элементов на прирост предела текучести аустенитных сталей и сплавов, легированных азотом, позволяет прогнозировать уровень твердорастворного упрочнения и регулировать содержание элементов в сплаве (например, хрома и никеля) для получения заданного уровня прочности.

2. Согласно расчету, в аустенитных сплавах на никелевой и железоникелевой основе повышение

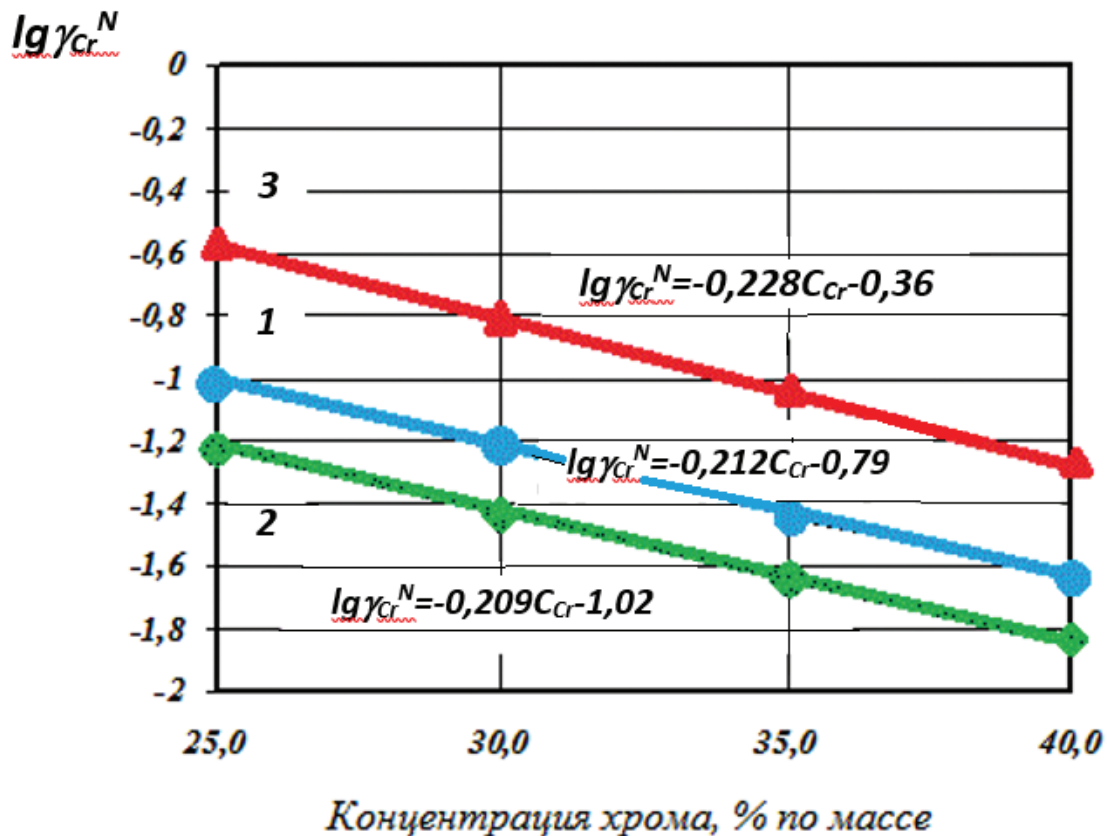


Рис. 1. Расчетные зависимости коэффициентов активности азота в аустените от концентрации хрома: 1 – сплав Fe-25%Ni-Cr,  $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 – сплав Ni-Cr,  $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 – сплав Ni-Cr,  $t = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$

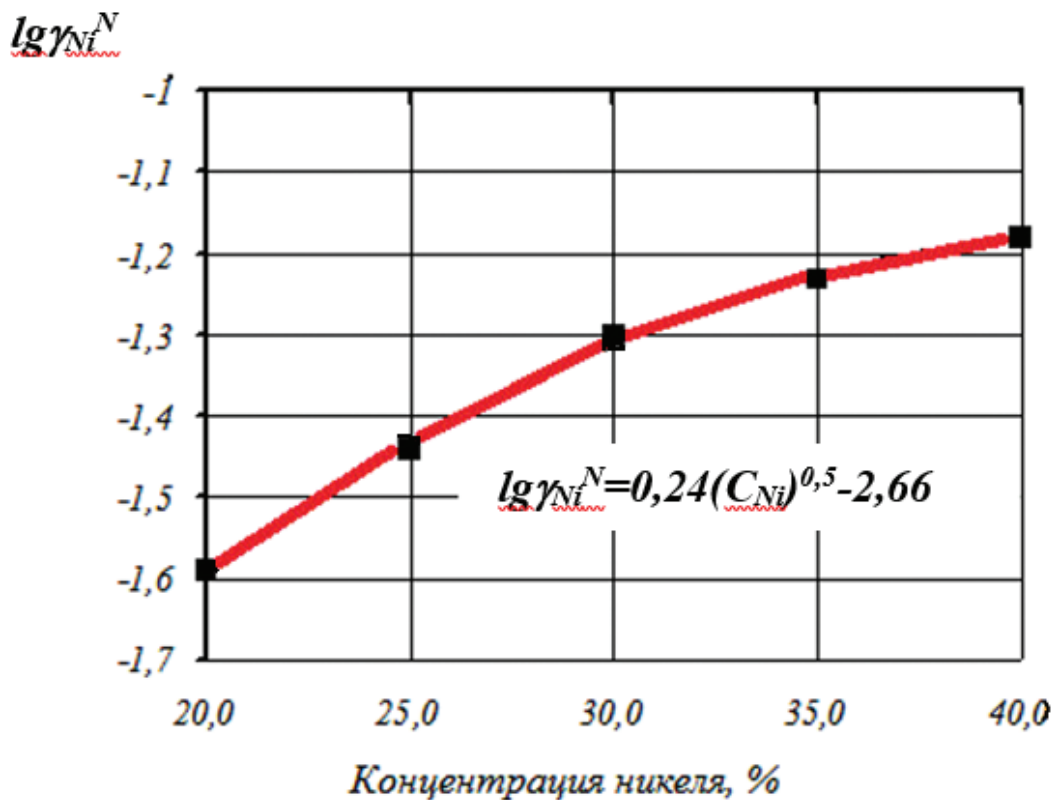


Рис. 2. Зависимость коэффициента активности азота от концентрации никеля в сталях Fe-Ni-35%Cr при  $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$

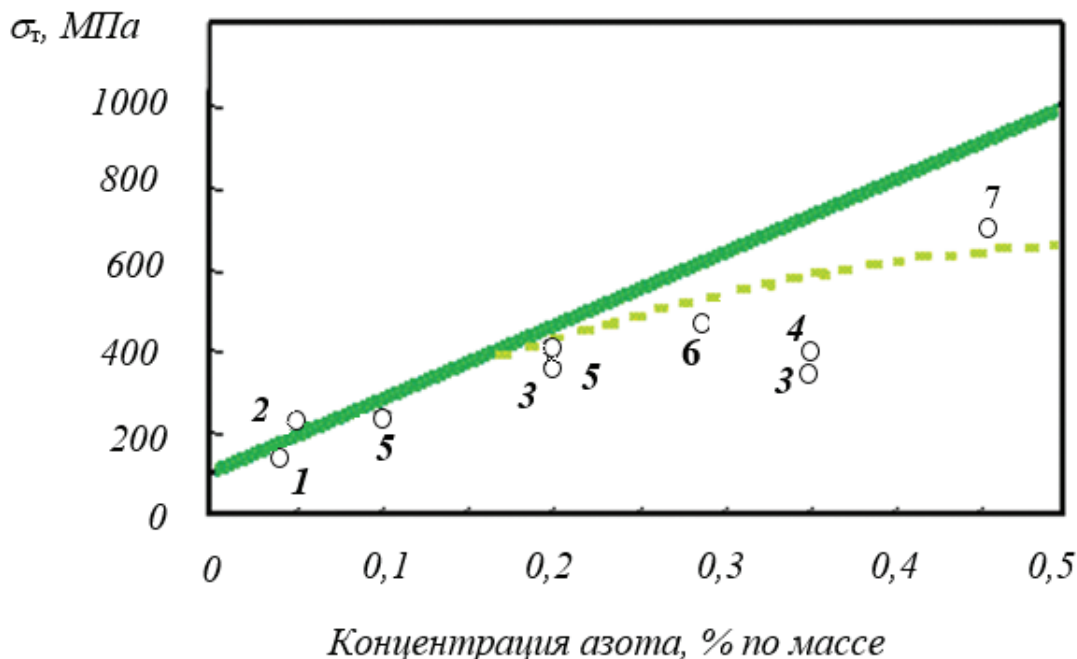


Рис. 3. Сравнение расчетных значений твердорастворного упрочнения азотом Fe-Cr-Ni-аустенита с данными по пределу текучести некоторых промышленных сталей: 1 – 04X18H10; 2 – AISI 304; 3 – AISI 304+N; 4 – AISI 316+N; 5 – AISI 347+N; 6 – 08X18H8+N; 7 – 08X18H10+ азотирование

содержания хрома увеличивает уровень твердорастворного упрочнения азотом вследствие повышения его растворимости. Повышение концентрации никеля, вызывая уменьшение растворимости азота в железе, наоборот, снижает уровень упрочнения азотом твердого раствора.

#### Список источников

1. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. — М.: Машиностроение, 2003. — 384 с.
2. Фрост Х. Дж., Эшби М.Ф. Карты механизмов деформации для чистого железа, аустенитных коррозионно-стойких сталей и низколегированной углеродистой стали // Джаффи Р., Вилкокса Б.А. (ред) Проблемы разработки конструкционных сплавов: Сб. докладов X Коллоквиума по материаловедению ин-та Баттела (15-19 сентября 1975; Сизтл, штат Вашингтон, и Харрисон-Хот-Спрингс, Британская Колумбия): Пер. с англ. М.: Металлургия, 1980. С. 336.
3. Кристал М.А. Влияние дефектов кристаллической решетки и диффузии на особенности процессов, развивающихся при работе металлов и сплавов в области высоких температур // Структура и свойства жаропрочных металлических материалов: Сборник докладов 26 сессии по проблеме жаропрочности (01-30 апреля 1973; Москва). М.: Наука, 1973. С. 186-196.
4. Kanninen M.F. (ed) Inelastic Behavior of Solids. — New York: McGraw-Hill, 1970. — 743 p.
5. Levy N., Marcal P.V., Ostergren W.J., Rice J.R. Small scale yielding near a crack in plane strain: a finite element analysis // International Journal of Fracture Mechanics. 1971. Vol. 7. Pp. 143-156. DOI: 10.1007/BF00183802
6. Petrova L.G., Demin P.E., Aleksandrov V.A. Forming of chromium-nickel surface alloyed layer in steels by methods of thermo-chemical treatment // Thermal Processing in Motion 2018, including the 4th International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering in Automotive Applications (05–07 June 2018; Spartanburg, South Carolina, USA), pp. 179-184.
7. Bottoli F., Jellesen M.S., Christiansen T.L. et al. High temperature solution-nitriding and low-temperature nitriding of AISI 316: Effect on pitting potential and crevice corrosion performance // Applied Surface Science. 2018. Vol. 431. Pp. 24-31. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.06.094
8. Петрова Л.Г. Упрочнение аустенитных сталей и сплавов за счет формирования твердого раствора при азотировании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. №4. С. 9-17.
9. Belashova I.S., Bibikov P.S., Petrova L.G., Sergeeva A.S. New nitriding process of high-alloyed maraging steel for cryogenic operation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1064: 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012004
10. Петрова Л.Г., Демин П.Е., Сергеева А.С., Малахов А.Ю. Поверхностное легирование углеродистых сталей хромом, никелем и азотом методом химико-термической обработки // СТИН. 2021. № 3. С. 20-24.

11. Рамазанов К.Н., Ишмухаметов Д.З., Садкова Н.С. Ионное азотирование в неоднородной плазме тлеющего разряда // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15. № 3(43). С. 67-71.
12. Белашова И.С., Бибиков П.С., Прокофьев М.В. Особенности технологии азотирования высоколегированных коррозионно-стойких сталей авиационного назначения // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 206-215. DOI: 10.34759/vst-2021-2-206-215
13. Сычев В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики. – М.: МЭИ, 2010. – 250 с.
14. Костина М.В., Банных О.А., Блинов В.М., Дымов А.В., Березовская В.В. Влияние химического состава и термической обработки на коррозионные свойства высокоазотистых сплавов на основе железа, содержащих 15–24 % Cr // Металлы. 2001. № 3. С. 26–34.
15. Belashova I.S., Bibikov P.S., Orekhov A.A., Starovoi-tov E.I. Controlled thermogasocyclic nitriding processes // INCAS BULLETIN. 2021. Vol. 13, Special Issue, pp. 13–20. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.2
16. Петрова Л.Г., Сергеева А.С. Контроль фазового состава аустенитных сталей при поверхностном упрочнении методом высокотемпературного азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 6(108). С. 3-11. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-6-3-11
17. Бобылёв А.А., Белашова И.С., Кузьмин С.Д. Контактная задача о вдавлении в функционально-градиентное покрытие выпуклого штампа заданным усилием // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 3. С. 151-160.
18. Штремель М.А. Разрушение: Монография в 2 кн. – Кн. 1. Разрушение материала. – М.: Изд-во МИСиС, 2014. – 670 с.
19. Ляхтин Ю.М., Коган Я.Д., Булгач А.А. Влияние легирующих элементов на термодинамическую активность и растворимость азота в фазах азотированного слоя // Металловедение и термическая обработка металлов. 1982. № 4. С. 15-18.
20. Штремель М.А. Разрушение: Монография в 2 кн. – Кн. 2. Разрушение структур. – М.: Изд-во МИСиС, 2015. – 976 с.

## References

1. Prikhod'ko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. *Metallofizicheskie osnovy razrabotki uprochnyayushchikh tekhnologii* (Metal-physical foundations of the reinforcing technologies development), Moscow, Mashinostroenie, 2003, 384 p.
2. Jaffee R.I., Wilcox B.A. (eds) *Fundamental aspects of structural alloy design. Proceedings of the tenth Battelle Colloquium in the Materials Sciences (15-19 September 1975; Seattle, Washington and Harrison Hot Springs, B.C., Battelle Institute Materials Science Colloquia)*. Springer, 1975, p. 336.
3. Krishtal M.A. *Sbornik докладov 26 Sessii po probleme zharoprochnosti "Struktura i svoistva zharoprochnykh metallicheskih materialov" (01-30 April 1973; Moscow)*, Moscow, Nauka, 1973, pp. 186-196.
4. Kanninen M.F. (ed) *Inelastic Behavior of Solids*. New York, McGraw-Hill, 1970, 743 p.
5. Levy N., Marcal P.V., Ostergren W.J., Rice J.R. Small scale yielding near a crack in plane strain: a finite element analysis. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1971, vol. 7, pp. 143-156. DOI: 10.1007/BF00183802
6. Petrova L.G., Demin P.E., Aleksandrov V.A. Forming of chromium-nickel surface alloyed layer in steels by methods of thermo-chemical treatment. *Thermal Processing in Motion 2018, including the 4<sup>th</sup> International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering in Automotive Applications (05-07 June 2018; Spartanburg, South Carolina, USA)*, pp. 179-184.
7. Bottoli F., Jellesen M.S., Christiansen T.L. et al. High temperature solution-nitriding and low-temperature nitriding of AISI 316: Effect on pitting potential and crevice corrosion performance. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 431, pp. 24-31. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.06.094
8. Petrova L.G. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2007, no. 4, pp. 9-17.
9. Belashova I.S., Bibikov P.S., Petrova L.G., Sergeeva A.S. New nitriding process of high-alloyed maraging steel for cryogenic operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1064, 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012004
10. Petrova L.G., Demin P.E., Sergeeva A.S., Malakhov A.Yu. *STIN*, 2021, no. 3, pp. 20-24.
11. Ramazanov K.N., Ishmukhmetov D.Z., Sadkova N.S. *Vestnik UGATU*, 2011, vol. 15, no. 3(43), pp. 67-71
12. Bibikov P.S., Belashova I.S., Prokof'ev M.V. Nitridation technology specifics of high-alloy corrosion-resistant steels of aviation purposes. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 2, pp. 206-215. DOI: 10.34759/vst-2021-2-206-215
13. Sychev V.V. *Differentsial'nye uravneniya termodinamiki* (Differential equations of thermodynamics), Moscow, MEI, 2010, 250 p.
14. Kostina M.V., Bannykh O.A., Blinov V.M., Dymov A.V., Berезовская V.V. *Metally*, 2001, no. 3, pp. 26–34.
15. Belashova I.S., Bibikov P.S., Orekhov A.A., Starovoi-tov E.I. Controlled thermogasocyclic nitriding processes. *INCAS BULLETIN*, 2021, vol. 13, Special Issue, pp. 13–20. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.2
16. Petrova L.G., Sergeeva A.S. Phase structure control in austenite steels during surface strengthening by high-temperature nitride hardening. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2020, no. 6(108), pp. 3-11. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-6-3-11
17. Bobylov A.A., Belashova I.S., Kuzmin S.D. The contact problem of indentation of a functionally graded

- coating by a convex punch under a predefined load. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 151-160.
18. Shtremel' M.A. *Razrushenie: monografiya v 2 kn. Kn. 1. Razrushenie materiala* (Destruction: monograph in two books. Book 1. Destruction of the material), Moscow, MISiS, 2014, 670 p.
19. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Bulgach A.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1982, no. 4, pp. 15-18.
20. Shtremel' M.A. *Razrushenie: monografiya v 2 kn. Kn. 2. Razrushenie struktur* (Destruction: monograph in 2 books. Book 2. Destruction of the structures), Moscow, MISiS, 2015, 976 p.

Статья поступила в редакцию 20.02.2022; одобрена после рецензирования 24.02.2022; принята к публикации 24.02.2022.

The article was submitted on 20.02.2022; approved after reviewing on 24.02.2022; accepted for publication on 24.02.2022.

---

---

Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*  
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 18.01.2022. Подписано в печать 16.03.2022.  
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 29,29. Уч.-изд. л. 31,50. Тираж 105 экз. Заказ 157/1039.  
Цена договорная.

Издательство МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993  
Типография Издательства МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993