



УДК 621.785.532

DOI 10.17073/0368-0797-2024-3-318-324

Оригинальная статья
Original article

ДИФфуЗИЯ АЗОТА ПО ГРАНИЦАМ СЛОЕВ ПРИ АЗОТИРОВАНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К. Б. Поликевич¹, А. Л. Петелин^{1,2}, А. И. Плохих¹, Л. П. Фомина³

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

³ Производственный комплекс «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (Россия, 105118, Москва, пр. Буденного, 16, кор. 2)

✉ polikevich94@mail.ru

Аннотация. Диффузионные процессы играют ключевую роль в формировании структур новых материалов и технологических процессов упрочняющих термических обработок, так как именно благодаря диффузии происходит перераспределение вещества в твердых телах. Актуальной задачей является разработка технологичных и эффективных методов упрочнения материалов в целях повышения их эксплуатационных свойств. Возрастает потребность в усовершенствовании методов химико-термической обработки, что напрямую влияет на износостойкость рабочих поверхностей, а, следовательно, и на ресурс изделия. Приповерхностные объемы испытывают повышенные нагрузки, поэтому важной задачей является формирование высокопрочных слоев. Известно достаточно много методов поверхностного упрочнения, среди которых широкое применение получили цементация, азотирование, нитроцементация и др. Наиболее перспективным является азотирование, поскольку при этом происходит повышение твердости, прочности, предела усталости, жаростойкости. Однако при должных достоинствах азотирование имеет ряд недостатков, среди которых длительность выдержки и малая толщина диффузионных слоев. Поэтому разработка методик, позволяющих интенсифицировать рассматриваемый процесс, также является актуальной задачей. Традиционно, решение связано с интенсификацией технологического процесса путем повышения температуры азотирования, активации сред азотирования или непосредственно поверхности деталей. Все эти решения направлены на ускорение процессов диффузии как по объему зерна, так и по межзерненным границам, скорость по которым многократно превосходит скорость объемной диффузии. Учитывая это, эффективным может оказаться использование нового типа конструкционных металлических материалов с многослойным строением из сотен слоев с толщинами микронного и субмикронного диапазона, разделенными между собой большими угловыми границами. В работе приведены результаты металлографического исследования, показывающие влияние чередования слоев сталей в многослойных металлических материалах на глубину диффузии при проведении химико-термической обработки азотированием. Предложена модель ускоренного проникновения диффундирующего элемента по границам слоев.

Ключевые слова: многослойные материалы, химико-термическая обработка, азотирование, границы слоев, диффузия

Для цитирования: Поликевич К.Б., Петелин А.Л., Плохих А.И., Фомина Л.П. Диффузия азота по границам слоев при азотировании многослойных материалов. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(3):318–324. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-318-324>

NITROGEN DIFFUSION ALONG THE LAYER BOUNDARIES AFTER NITRIDING OF MULTILAYER MATERIALS

K. B. Polikevich¹, A. L. Petelin^{1,2}, A. I. Plokhikh¹, L. P. Fomina³

¹ Bauman Moscow State Technical University (5/1 Baumanskaya 2-ya Str., Moscow 105005, Russian Federation)

² National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

³ Industrial Complex “Salyut”, JSC “United Engine Corporation” (16/2 Budennogo Ave., Moscow 105118, Russian Federation)

✉ polikevich94@mail.ru

Abstract. Diffusion processes play a key role in formation of the structures of new materials and technological processes of strengthening heat treatments, since diffusion is the reason for redistribution of substances in solids. An urgent task is to develop technologically advanced and effective methods for strengthening materials in order to improve their performance properties. There is an increasing need to improve chemical heat treatment methods, which directly affects the wear resistance of working surfaces, and, consequently, the product service life. Near-surface volumes experience increased loads, so the formation of high-strength layers becomes an important task. Quite a few methods of surface hardening are known, among which carburization, nitriding, nitrocarburization and others are widely used. The most interesting is nitriding, since it increases hardness, strength, fatigue

limit, and heat resistance. However, despite the proper advantages, nitriding has a number of disadvantages, including the holding duration and small thickness of diffusion layers. The solution is related to intensification of the technological process by increasing the nitriding temperature, activating the nitriding media or directly the parts surface. All these solutions are aimed at accelerating diffusion processes, both in grain volume and along grain boundaries, the velocity along which is many times higher than the velocity of volumetric diffusion. It may be effective to use a new type of structural metal materials with a multilayer structure of hundreds of layers, with thicknesses in the micron and submicron ranges separated by large angular boundaries. The results of metallographic studies showed the effect of the steel layers interchange in the multilayer metal material on diffusion depth after chemical heat treatment. The authors proposed an accelerate diffusion model of diffusible element along the layer boundaries.

Keywords: multilayer metal materials, chemical heat treatment, nitriding, layer boundaries, diffusion

For citation: Polikevich K.B., Petelin A.L., Plokhikh A.I., Fomina L.P. Nitrogen diffusion along the layer boundaries after nitriding of multilayer materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3):318–324. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-318-324>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известны различные механические обработки дерева, производимые с помощью фрезерования. Основным узлом фрезера является фреза. Существует достаточно большое количество фрез различных конструкций и геометрий, однако в каждом случае фрезы должны обладать высокими прочностью и износостойкостью, чего возможно достичь при проведении химико-термической обработки [1]. Применение многослойных материалов после азотирования для изготовления фрез за счет значительно упрочненного слоя может позволить повысить стойкость инструмента, сохранить его геометрию, увеличить срок эксплуатации, а также увеличить производительность обработки. Пример такой фрезы представлен на рис. 1.

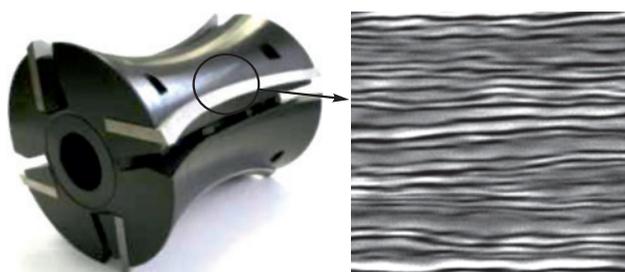


Рис. 1. Схема фрезы из многослойного материала

Fig. 1. Layout of a cutter from a multilayer material

Помимо этого, многослойные материалы возможно применять для изготовления зубчатых колес, которые также работают в условиях износа (рис. 2).

Получение такой структуры возможно в том случае, если в исходной композиции участвуют стали, имеющие различное кристаллическое строение [2 – 4]. Применение разработанного экспериментального технологического маршрута (рис. 3) позволяет получать листовые заготовки толщиной от 2 до 10 мм [5].

Микроструктура материала имеет многослойное ламинарное строение со слоями толщиной от 100 до 0,8 мкм. При этом слои имеют кристаллографическую разориентировку от 15 до 20°, что соответствует большееугловым границам зерен в исходных сталях (рис. 4) [6; 7].

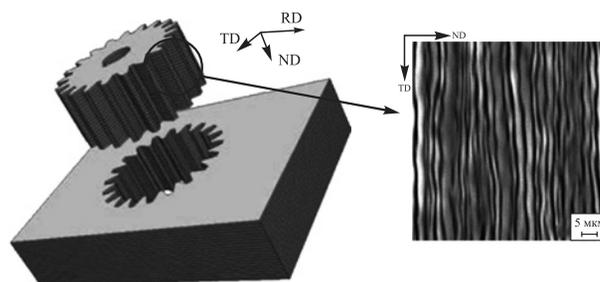


Рис. 2. Схема изготовления зубчатого колеса из многослойного материала

Fig. 2. Scheme of manufacturing a gear wheel from a multilayer material

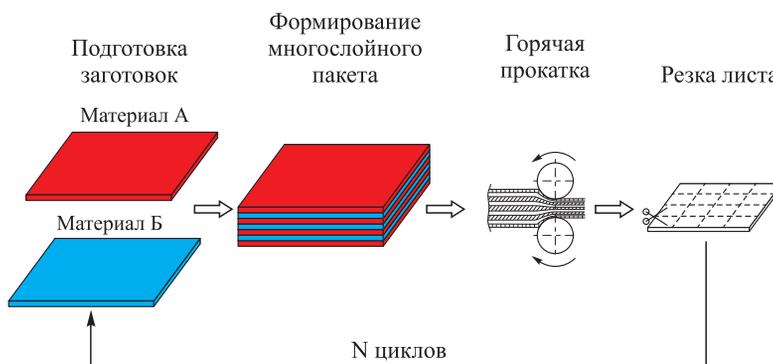


Рис. 3. Схема технологического маршрута

Fig. 3. Scheme of technological route

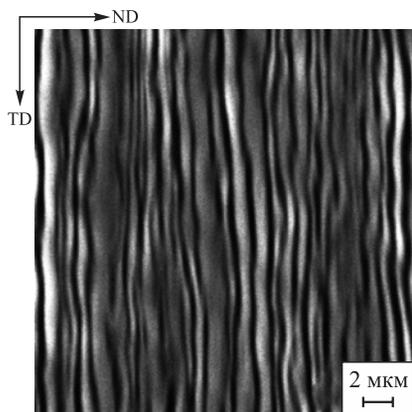


Рис. 4. Типичная микроструктура поперечного сечения многослойного материала (композиция из сталей 08X18H10 и 40X13)

Fig. 4. Typical microstructure of cross section of a multilayer material (composition based on steels AISI420 and AISI304)

В работах [8; 9] показано, что при соответствующем выборе сталей, входящих в состав исходной композитной заготовки, многослойное строение сохраняется вплоть до температуры 1000 °С, что соответствует температуре горячей пакетной прокатки. При этом поперечное сечение листовых заготовок имеет структурную ориентировку, готовую для проведения химико-термической обработки (рис. 5).

Предварительная оценка азотирования многослойной композиции, состоящая из сталей 08X18H10 и 08X18, показала, что глубина азотирования в многослойном материале больше, чем его глубина в трудно азотируемой стали 08X18H10. Причиной увеличения толщины азотированного слоя в многослойных материалах может являться ускоренная диффузия азота по границам слоев с последующим насыщением объемов слоев от их границ, как от источников диффундирующего элемента [10].

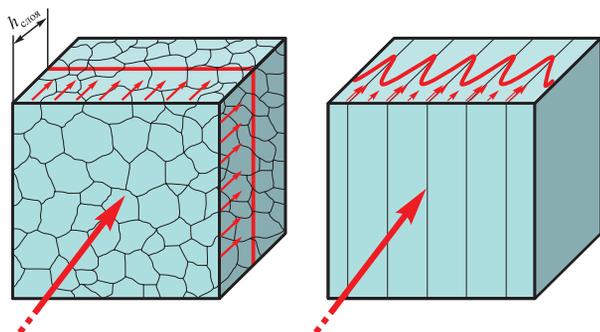


Рис. 5. Схема полиэдрического и ламинарного строения конструктивных металлических материалов с указанием диффузионных профилей. Стрелками указано направление потока диффузанта

Fig. 5. Scheme of polyhedral and lamellar structure of structural metallic materials indicating diffusion profiles. Arrows indicate the direction of diffuser flow

Для детального изучения полученного эффекта использовались модельные композиции многослойных материалов, содержащие стали различных составов (марок). Для азотирования были выбраны следующие объекты исследования: композиции, состоящие из сталей 08кп и 08X18H10, и стали У8 и 08X18H10. После проведения горячей пакетной прокатки получены образцы толщиной 10 мм с количеством слоев 100 при толщине единичного слоя 100 мкм.

Образцы данных композиций подвергались азотированию, причем поверхности азотирования во всех случаях были перпендикулярны направлениям прокатки, используемой для получения многослойных образцов. Азотирование проводилось в газовой атмосфере, содержащей продукты диссоциации аммиака на 20 – 40 %. Использовались два условия азотирования со следующими температурно-временными режимами: 540 °С в течение 45 ч и 580 °С в течение 25 ч. Для изучения строения (структуры) получаемых азотируемых слоев и определения их геометрических характеристик приготавливались шлифы, поверхности которых были перпендикулярны направлению прокатки и параллельны направлению диффузионного проникновения азота, которое происходило в процессе азотирования (рис. 6).

Общий вид образующихся в процессе азотирования диффузионных профилей для композиций 08X18H10 + 08кп (а) и 08X18H10 + У8 (б), полученных после азотирования при 540 °С в течение 45 ч, приведен на рис. 7.

На микрофотографиях можно видеть концентрационный профиль диффундирующего азота в стали 08X18H10, который имеет большую глубину проникновения азота (и большой путь диффузии азота соответственно) по границам слоев многослойного материала. Внутри слоя компонента 08X18H10 для обоих случаев расстояние проникновения азота сокращается с увеличением расстояния от межслоевой границы. Наименьшая глубина проникновения азота составляет около 100 мкм от внешней поверхности образцов и находится посередине между слоями соседних компо-

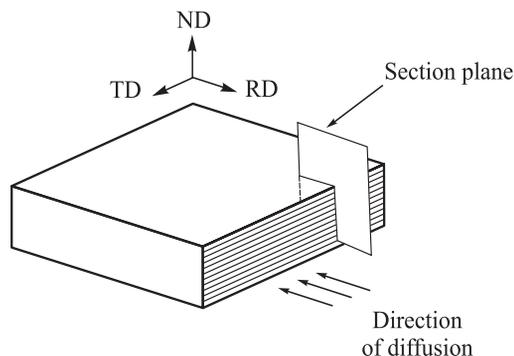


Рис. 6. Схема вырезки образцов для проведения металлографического анализа

Fig. 6. Scheme of sample cutting for metallographic analysis

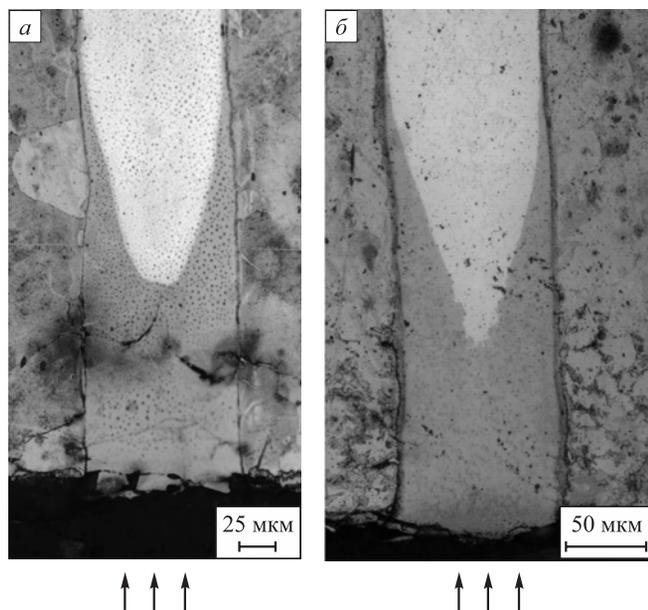


Рис. 7. Микроструктура азотированного слоя композиций 08X18H10 + 08кп (а) и 08X18H10 + У8 (б). Стрелками указано направление диффузионного потока азота

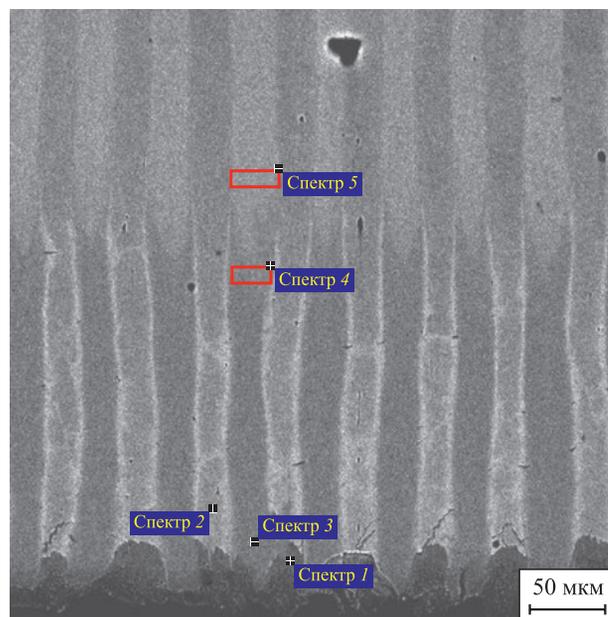
Fig. 7. Microstructure of nitrided layer of composition based on steels: AISI304 and 1008 (a), AISI304 and W108 (b). Arrows indicate the direction of nitrogen diffusion flow

нентов (посредине между слоями стали 08кп (а) и стали У8 (б)) внутри слоя стали 08X18H10. Это свидетельствует, что источником проникновения азота в объем стали 08X18H10 при азотировании является граница раздела слоев материала, диффузия по этим границам происходит с опережающей скоростью по сравнению со скоростью диффузии через слой стали 08X18H10 с внешней поверхности.

Проникновение азота в слои сталей 08кп и У8 на этой глубине от поверхности азотирования не обнаруживалось. Это доказывают результаты электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа. Объемная диффузия азота в сталях 08кп и У8 практически не происходит вследствие низкой растворимости азота в α-железе (не более 0,1 мас. %), которая является основным путем диффузионного распространения азота в ферритной фазе [11]. Второй причиной, тормозящей движение азота в стали 08кп, является образовавшаяся поверхностная нитридная корка, состоящая из нитридов (Fe₂N), что также доказывают результаты электронной микроскопии (рис. 8).

Таким образом, можно считать, что процесс азотирования в многослойных материалах данного типа происходит путем опережающего распространения азота по границам слоев [12; 13].

Можно предположить, что параллельно с этим происходит миграция атомов азота внутрь стали 08X18H10 перпендикулярно к межслойной границе, которую можно рассматривать как протяженный источник диффузии азота. Поскольку данная сталь является



Спектр	Содержание, мас. %					
	N	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	4,53	0	0,63	0,42	94,42	0
2	0	0	0,63	0,46	98,68	0,24
3	4,62	0,57	18,20	1,73	67,43	7,45
4	4,24	0,44	17,48	1,74	68,61	7,49
5	0	0,57	18,10	1,67	72,09	7,57

Рис. 8. Результаты качественного МРС анализа диффузионного слоя композиции У8 + 08X18H10

Fig. 8. Results of qualitative MRS analysis of the diffusion layer of composition based on steels W108 and AISI304

сталью аустенитного класса и растворимость азота в аустените (γ-железе) составляет около 2,8 мас. %, то диффузионное насыщение слоев 08X18H10 азотом возможно. Согласно литературным данным [14], коэффициент диффузии азота в γ-железе при температурах 500 – 600 °С определяется уравнением

$$D_{\gamma} = 4,6 \cdot 10^{-5} \exp\left(-\frac{108\,474}{RT}\right), \text{ м}^2/\text{с}. \quad (1)$$

Для определения диффузионной проницаемости границ слоев многослойного материала воспользуемся моделью Фишера для расчета диффузии по границам зерен в металлических образцах [15 – 18]. Согласно этой модели, произведение коэффициента диффузии D_b по границе зерен (границам слоев в данном случае) на толщину собственно границы δ , т. е. значение $s\delta D_b$, можно рассчитать по формуле [19]

$$s\delta D_b = (\pi t)^{1/2} D_{\gamma}^{3/2} \text{ctg}^2\theta, \quad (2)$$

где θ – угол при вершине концентрационного профиля компонента (рис. 7), который переходит в объем фазы

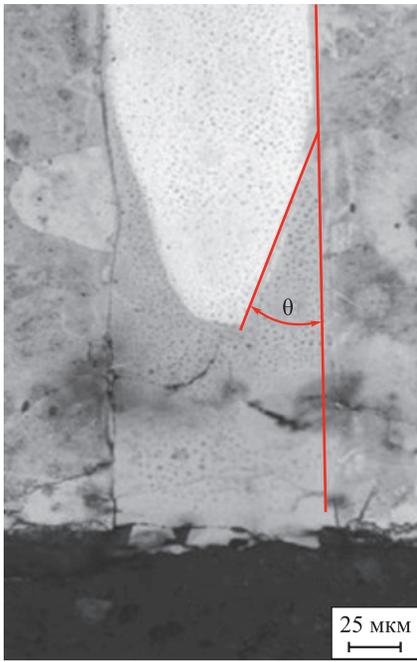


Рис. 9. Концентрационный угол θ для определения диффузионной проницаемости слоевых границ в многослойном материале

Fig. 9. Concentration angle θ for determining the diffusion coefficient in a multilayer material

(слоя) из границы зерна (слоя); s – коэффициент обогащения границы атомами диффундирующего компонента, который можно оценить по зависимости, предложенной в работе [20]:

$$sx_0 = 6,2 \pm 4,5, \quad (3)$$

где x_0 – объемная концентрация примеси в мольных долях.

Если считать, что обогащение границ слоев в основном определяется ферритной фазой, так как в соответствии с фазовой диаграммой Fe–N концентрация азота в ней наименьшая, то, согласно формуле (3), можно принять величину обогащения слоевых границ $s = 5 \cdot 10^3$.

Следует отметить, что формула (2) пригодна для описания диффузии вдоль границы слоя в том случае, когда диффузионный отвод компонента (в данном случае – азота) от границы в объем является односторонним – объемная диффузия происходит только в сторону слоев стали 08X18H10. Диффузия азота в сторону слоев стали 08кп (рис. 10, а) и в сторону слоев стали У8 (рис. 10, б), как это следует из экспериментальных данных, не происходит.

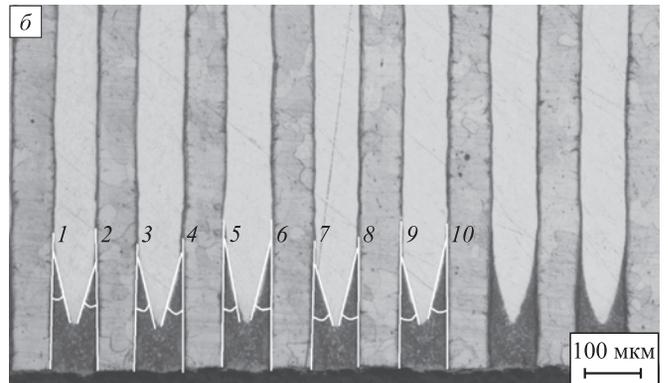
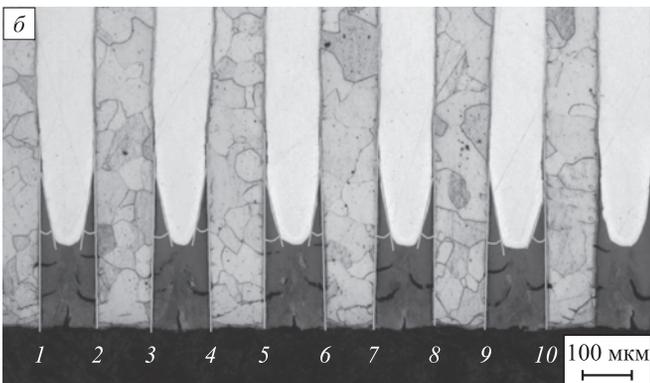
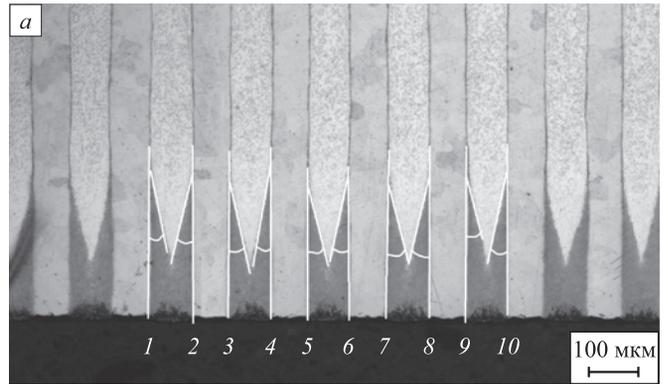
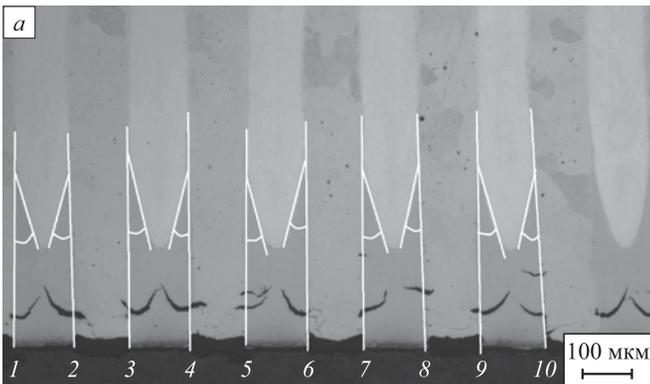


Рис. 10. Определение углов θ для расчета произведения δD_b для композиции 08кп + 08X18H10 после азотирования при 540 °С, 45 ч (а); 580 °С, 25 ч (б)

Fig. 10. Determination of the angles θ for calculating the product of δ and D_b for the composition based on steels 1008 and AISI304 after nitriding: $t = 540$ °С, 45 h (а); $t = 580$ °С, 25 h (б)

Рис. 11. Определение углов θ для расчета произведения δD_b для композиции У8 + 08X18H10 после азотирования при 540 °С, 45 ч (а); 580 °С, 25 ч (б)

Fig. 11. Determination of the angles θ for calculating the product of δ and D_b for the composition based on steels W108 and AISI304 after nitriding: $t = 540$ °С, 45 h (а); $t = 580$ °С, 25 h (б)

Коэффициенты диффузии азота по границам слоев D_b , м²/с

Nitrogen diffusion coefficients along the layer boundaries D_b , м²/с

Композиция	Режим азотирования	
	540 °С, 45 ч	580 °С, 25 ч
08кп + 08X18Н10	1,9·10 ⁻⁸	8,1·10 ⁻⁸
У8 + 08X18Н10	4,3·10 ⁻⁸	15,9·10 ⁻⁸

Определение значений углов θ , необходимых для расчета величины коэффициента диффузии D_b по границам слоев, проводилось с помощью анализа микрофотографий шлифов сечений многослойных образцов обеих композиций после азотирования при двух используемых режимах обработки.

Для композиции 08кп + 08X18Н10 способ измерения этих углов представлен на рис. 8, а для режима 540 °С, 45 ч и на рис. 10, б для режима 580 °С, 25 ч. Для композиции У8 + 08X18Н10 аналогичная процедура показана на рис. 11.

В таблице приведены значения коэффициентов диффузии атомов азота по границам слоев для многослойных композиций 08кп + 08X18Н10 и У8 + 08X18Н10, полученные при анализе экспериментальных данных в ходе исследования процессов азотирования образцов данных материалов. В расчете принято, что толщина слоевых границ δ составляет 10⁻⁹ м.

Выводы

Экспериментальное изучение процессов азотирования образцов многослойных металлических материалов с чередованием слоев двух различных марок сталей показало, что основным механизмом процесса является массоперенос (диффузия) атомов азота по границам слоев материала.

Анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании поперечных сечений поверхностных слоев двух композиций многослойных материалов после проведения азотирования по двум режимам, позволил получить оценочные значения коэффициентов диффузии азота D_b по слоевым границам. Значения D_b оказались в 10⁴ раз более высокими, чем коэффициенты объемной диффузии азота в стали 08X18Н10 при этих же условиях.

Проведенное исследование показало, что увеличение глубины азотирования в обеих многослойных композициях связано с ускоренным диффузионным проникновением атомов азота по границам слоев многослойных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лахтин Я.М., Коган Я.Д., Шпис Г.И., Бемер З. Теория и технология азотирования. Москва: Металлургия; 1991:320.

2. Huang B., Ishihara K.N., Shingu P.H. Preparation of high strength bulk nano-scale Fe/Cu multilayers by repeated pressing-rolling. *Materials Science Letters*. 2001;20:1669–1670. <https://doi.org/10.1023/A:1012465117652>

3. Yoshioka T., Yasuda M., Miyamura H., Kikuchi S., Tokumitsu K. Structure of Fe-Ag super-laminates fabricated by repeated rolling and mechanically alloyed Fe-Ag powder. *Materials Science Forum*. 2002;386–388:503–508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.386-388.503>

4. Saito Y., Utsunomiya H., Tsuji N., Sakai T. Novel ultra-high straining process for bulk materials development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia*. 1999;47(2):579–583. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00365-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6)

5. Torizuka S. Present trend of the development of ultrafine-grained steels and its technology transfer. *Materia Japan*. 2006;45(6):438–443.

6. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Shinkarev A.S., Mironova M.O. Multilayer steel composition rolling peculiarities. *Blanking Productions in Mechanical Engineering*. 2013;(8):39–42.

7. Колесников А.Г., Плохих А.И., Комисарчук Ю.С., Михальцевич И.Ю. Исследование особенностей формирования субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки. *MuTOM*. 2010;(6):44–49.

Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Komisarchuk Yu.S., Mikhail'tsevich I.Yu. A study of special features of formation of submicro- and nanosize structure in multilayer materials by the method of hot rolling. *MuTOM*. 2010;(6):44–49.

8. Табачикова Т.И., Плохих А.И., Яковлев И.Л., Клюева С.Ю. Структура и свойства многослойного материала на основе сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки. *Физика металлов и металловедение*. 2013;114(7):633–646.

Tabatchikova T.I., Plokhikh A.I., Yakovlev I.L., Klyueva S.Yu. Structure and properties of a steel-based multilayer material produced by hot pack rolling. *The Physics of Metals and Metallography*. 2013;114(7):580–592.

9. Арюлин С.Б., Халипов И.В. Получение многослойных композиционных материалов методом горячей прокатки. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013;(7):31–35.

Aryulin S.B., Khalipov I.V. Preparation of multilayer composite materials by hot rolling. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroyeni*. 2013;(7):31–35.

10. Плохих А.И. О возможности применения многослойных металлических материалов для деталей машин упрочняемых ХТО. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2013;(6(109)):13–17.

Plokhikh A.I. On the possibility of using metallic materials for machine parts hardened by chemical heat treatment. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013;(6(109)):13–17.

11. Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. Москва: Металлургия; 1986:224.

12. Polikevich K.B., Plokhikh A.I. Study of the process of nitriding in multilayer materials based on steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;683:012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/683/1/012048>

13. Petelin A.L., Plokhikh A.I., Novikov A.A. The model of the layer boundary diffusion in multilayer materials. *Defect and Diffusion Forum*. 2015;363:142–147.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.363.142>
14. Федоров А.А. Диффузия азота в нержавеющей стали. Технические науки в России и за рубежом: *Материалы III Международной научной конференции (Москва, июль 2014 г.)*. Москва: Буки-Веди; 2014:85–88. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/90/5561/> (дата обращения: 07.10.2024).
15. Бокштейн Б.С., Копецкий Ч.В., Швиндлерман Л.С. Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. Москва: Металлургия; 1986:224.
16. Boksteyn B.S., Nikolskiy G.S., Smirnov A.N. Grain boundary segregation of antimony in alloys of the cooper-antimony system. *The Physics of Metals and Metallography*. 1995;72:142–146.
17. Bokstein B.S., Straumal B.B. Diffusion in materials science and technology. In: *Diffusive Spreading in Nature, Technology and Society*. Springer, Cham; 2018:261–275.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-67798-9_13
18. Kaur I., Mishin Y., Gust W. Fundamentals of Grain and Interphase Boundary Diffusion. 3rd ed. John Wiley & Sons; 1995:536.
19. Mishin Y., Herzig Chr. Grain boundary diffusion: recent progress and future research. *Materials Science and Engineering: A*. 1999;260(1–2):55–71.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)00978-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)00978-2)
20. Hondros E.D., Seah M.P. Segregation to interfaces. *International Metals Reviews*. 1977;22(1):262–301.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Ксения Борисовна Поликевич, старший преподаватель кафедры «Материаловедение», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
E-mail: polikevich94@mail.ru

Александр Львович Петелин, д.ф.-м.н., профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; профессор кафедры физической химии, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: alexander-petelin@yandex.ru

Андрей Иванович Плохих, к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
E-mail: plokhikh@bmstu.ru

Людмила Петровна Фомина, к.т.н., доцент, Производственный комплекс «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация»
E-mail: fominalp@yandex.ru

Kseniya B. Polikevich, Senior Lecturer of the Chair “Materials Science”, Bauman Moscow State Technical University
E-mail: polikevich94@mail.ru

Aleksandr L. Petelin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Bauman Moscow State Technical University; Prof. of the Chair of Physical Chemistry, National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: alexander-petelin@yandex.ru

Andrei I. Plokhikh, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Materials Science”, Bauman Moscow State Technical University
E-mail: plokhikh@bmstu.ru

Lyudmila P. Fomina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Industrial Complex “Salyut”, JSC “United Engine Corporation”
E-mail: fominalp@yandex.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

К. Б. Поликевич – анализ литературы, подбор и подготовка объектов исследования.

А. Л. Петелин – разработка математической модели и определение коэффициентов диффузии для рассматриваемых объектов исследования.

А. И. Плохих – постановка проблемы, разработка концепции исследования.

Л. П. Фомина – проведение технологического процесса азотирования на исследуемых композициях.

K. B. Polikevich – literary review, selection and preparation of the research objects.

A. L. Petelin – development of a mathematical model and determination of diffusion coefficients for the research objects.

A. I. Plokhikh – statement of the problem, development of the research concept.

L. P. Fomina – carrying out the technological process of nitriding on the studied compositions.

Поступила в редакцию 30.06.2023
После доработки 04.02.2024
Принята к публикации 28.03.2024

Received 30.06.2023
Revised 04.02.2024
Accepted 28.03.2023