

УДК 621.785.532

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ИОННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО И МАРТЕНСИТНОГО КЛАССОВ С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Р. С. Есипов¹, Р. К. Исламгалиев², Ю. Г. Хусаинов³,
М. А. Никитина⁴, К. Н. Рамазанов⁵

¹esromles@mail.ru, ²rinatis@mail.ru, ³ulash990@mail.ru, ⁴nik.marina.al@gmail.com, ⁵ramazanovkn@gmail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 25.02.2018

Аннотация. Исследовано влияние ионного азотирования при различных температурах на механические свойства сталей аустенитного и мартенситного классов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Установлено, что средний размер зерна для стали аустенитного класса составил около 150 нм, а для стали мартенситного класса размер ферритной фазы составил около 120 нм и карбидной фазы 150 нм. Показано, что после ионного азотирования при температуре 450 °С наблюдается максимальная степень упрочнения поверхности для сталей с УМЗ структурой обоих классов. Микротвердость поверхности для стали аустенитного класса составила 700 кгс/мм², а толщина упрочненного слоя около 70 мкм. Для стали мартенситного класса поверхностная микротвердость составила 900 кгс/мм², а толщина упрочненного слоя 90–95 мкм.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация; ультрамелкозернистая структура; ионное азотирование стали; тлеющий разряд; микроструктура стали.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с развитием науки и техники возникает необходимость в получении конструкционных материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Одним из перспективных направлений повышения прочности конструкционных материалов является интенсивная пластическая деформация (ИПД). Структура материала после ИПД характеризуется как ультрамелкозернистая (УМЗ) с размером зерен от 300 до 100 нм [1–4].

Несмотря на высокие физико-механические свойства конструкционных сталей с УМЗ структурой, поверхность деталей, работающих в условиях контактных нагрузок, по-прежнему подвергается интенсивному износу. Поэтому, с целью по-

вышения трибологических характеристик, такие детали актуально подвергать поверхностной упрочняющей обработке. В настоящее время для повышения эксплуатационных характеристик поверхности деталей машиностроения широко применяется химико-термическая обработка (ХТО), в частности азотирование в тлеющем разряде (ионное азотирование) [5, 6]. Однако ионное азотирование конструкционных сталей осуществляют в области температур от 550 до 600 °С при длительной выдержке (до 36 ч).

Известно, что длительное воздействие высоких температур приводит к деградации структуры и к снижению физико-механических свойств материала, прошедшего ИПД [3, 4]. Следовательно, для предотвращения роста структурных состав-

ляющих и повышения эксплуатационных характеристик стали ионное азотирование необходимо осуществлять при низких температурах. Таким образом, целью работы является исследование влияния ионного азотирования на структуру и механические свойства поверхностного слоя конструкционных сталей 13X11H2B2MФ-Ш и 12X18H10T с УМЗ структурой, которые являются труднодеформируемыми [7–9].

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исследуемых материалов были выбраны конструкционные стали мартенситного 13X11H2B2MФ-Ш и аустенитного 12X18H10T классов в виде калиброванных прутков диаметром 20 мм. Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав материалов

Марка стали	Содержание хим. элементов, %
13X11H2B2MФ-Ш (ГОСТ 5949-75)	0,10–0,16 С; 10,5–12,0 Cr; 1,5–1,8 Ni; 0,18–0,30 V; 0,35–0,50 Mo; 1,60–2,0 W
12X18H10T (ГОСТ 7417-75)	≤0,12 С; 17–19 Cr; ≤2 Mn; 9–11 Ni; ≤0,035 P; ≤0,02 S; ≤0,8 Si; ≤0,8 Ti

Термообработку (закалка и отпуск) образцов сталей проводили в печи. Охлаждение материала после отпуска осуществляли вместе с печью.

УМЗ структуру материала получали методом интенсивной пластической деформации (ИПДК) [9]. Образцы в виде дисков диаметром 20 мм и толщиной 5 мм вырезались из прутков и подвергались ИПДК на установке СКРУДЖ-200 при давлении 6 ГПа, температуре 300 °С и количестве оборотов равным 10.

После очистки и подготовки поверхности образцы сталей подвергались ионному азотированию на установке ЭЛУ-5М (рис. 1) [6] в течение 6 ч при давлении 150 Па в среде трехкомпонентного рабочего газа (Ar, N₂, H₂) при температурах 450, 500 и 550 °С. Непосредственно перед диффузионным насыщением азотом в вакуумной камере проводили ионную очистку в течение

10 мин при давлении $P=10$ Па в среде чистого аргона Ar, температура поверхности при этом не превышала $T=250$ °С.

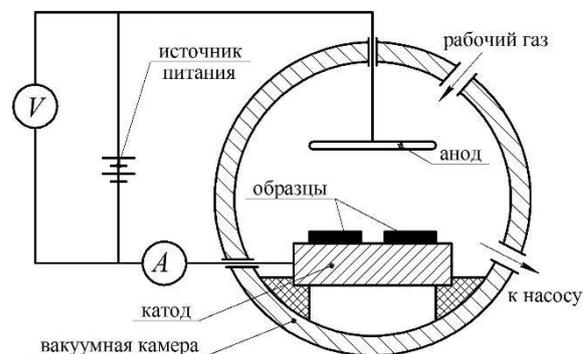


Рис. 1. Принципиальная схема ионного азотирования образцов на установке ЭЛУ-5М

Исследования микроструктуры сталей проводили на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEOL JEM-2100 с ускоряющим напряжением 200 кВ. Замеры микротвердости поверхности выполнялись на микротвердомере Struers Duramin-1/-2. Величина статической нагрузки, приложенной к алмазному индентору, в течение 10 с составляла 980,7 мН (100 г).

Качественный анализ структурно-фазового состава поверхности образцов после низкотемпературного ионного азотирования проводили на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV с фокусировкой гониометра по Бреггу–Брентано.

Дифрактометрические съемки проводили с шагом движения счетчика в 0,02 градуса для областей интенсивной рентгеновской дифракции и 0,1 градуса для областей фона.

Замер микротвердости по глубине образцов проводили на шлифе с углом скоса 6°, после чего выполнен пересчет полученных значений для получения распределения механических свойств в поперечном сечении.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Стандартной термической обработкой (ТО) стали 13X11H2B2MФ-Ш является закалка с 1050 °С и последующий отпуск при 600–700 °С, возникающая при этом неоднородность распределения карбидов по объему препятствует деформационной обработ-

ке. Поэтому с целью повышения однородности распределения карбидов по объему материала проводили ТО стали 13X11H2B2MФ-Ш, заключающуюся в закалке с 1050 °С и последующем отжиге при 800 °С в течение 1 ч.

На рис. 2 показаны изображения ПЭМ микроструктуры сталей мартенситного 13X11H2B2MФ-Ш и аустенитного 12X1H10Т классов в термообработанном состоянии и после ИПДК.

Структура стали мартенситного класса 13X11H2B2MФ-Ш после ТО представлена смесью крупных зерен фазы α -Fe с ОЦК решеткой (рис. 2, а, б), которая образовалась в результате распада мартенсита, и множеством мелких частиц – карбидов хрома $Cr_{23}C_6$ и вольфрама W_2C (рис. 2, б). При этом частицы карбида выделяются на границе фазы α -Fe и имеют вид вытянутых гранул (рис. 2, б). Частицы карбидов

указаны стрелками. Размер кристаллитов α -Fe имеет значение от 900 до 1200 нм, а карбидов 120-100±20 нм. Полученные данные позволяют утверждать, что структуру стали мартенситного класса 13X11H2B2MФ-Ш после закалки с 1050 °С и отпуска при 800 °С можно охарактеризовать как крупнозернистую (КЗ). Анализ светлопольного изображения ПЭМ образца стали 13X11H2B2MФ-Ш после ИПДК показал, что в процессе обработки формируется УМЗ структура материала, поскольку средний размер зерен α -Fe составил 160±20 нм (рис. 2, д, е), а частиц карбидов 100±20 нм (рис. 2, д, е) [10]. При этом частицы имеют более равноосную форму по сравнению с исходным состоянием (рис. 1, а). Кольцевой характер распределения рефлексов на электронограмме образцов после ИПДК (рис. 2, е, з) свидетельствует о высокоугловых разориентировках кристаллов.

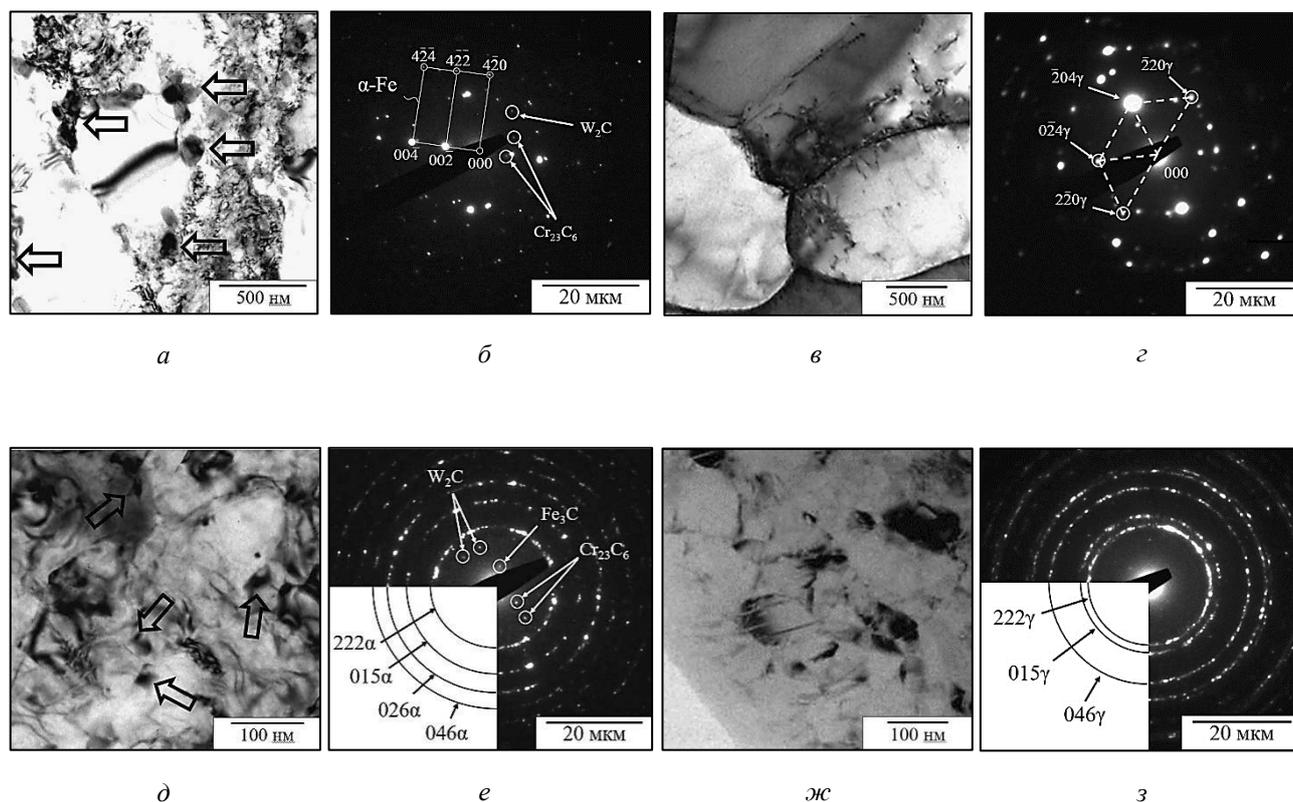


Рис. 2. Светлопольные изображения ПЭМ (а, в, д, ж) и электронограммы (б, г, е, з) микроструктуры стали мартенситного класса 13X11H2B2MФ-Ш (а, б, д, е) и аустенитного класса 12X18H10Т (в, г, ж, з) после закалки с 1050 °С и отпуска 800 °С, 1 ч (а, б, в, г) и после ИПДК 300°С, 6 ГПа, 10 об (д, е, ж, з)

Анализ микроструктуры стали аустенитного класса 12X18H10T после закалки с 1050 °С и после ИПДК показал, что в исходном состоянии сталь имела КЗ структуру со средним размером зерен γ -Fe (рис. 2, *а*) около 2,5 мкм, последующая закалка при $T=1050$ °С, $\tau=1$ ч с охлаждением в воде привела к увеличению размера зерен до 4,5 мкм (рис. 2, *б*). Электронно-микроскопические исследования, проведенные на половине радиуса ИПДК образцов, показали, что ИПДК приводит к формированию однородной структуры со средним размером фрагментов 200 нм (рис. 2, *в*). Структура характеризовалась неравновесными границами с высокой плотностью зернограницных дислокаций. Равномерное распределение точечных рефлексов на электронограмме свидетельствовало о наличии большеугловых границ между структурными элементами (рис. 2, *г*). После ИПДК при температуре 300 °С в структуре прошли процессы деформационного двойникования (рис. 2, *д*).

После ИПДК сталей и последующей подготовки поверхности образцы подвергли ионному азотированию при температурах 450, 500 и 550 °С в течение 6 ч.

На рис. 3 приведены рентгенограммы, полученные с поверхности образцов, прошедших ИПДК и последующее низкотемпературное ионное азотирование при $T=450$ °С.

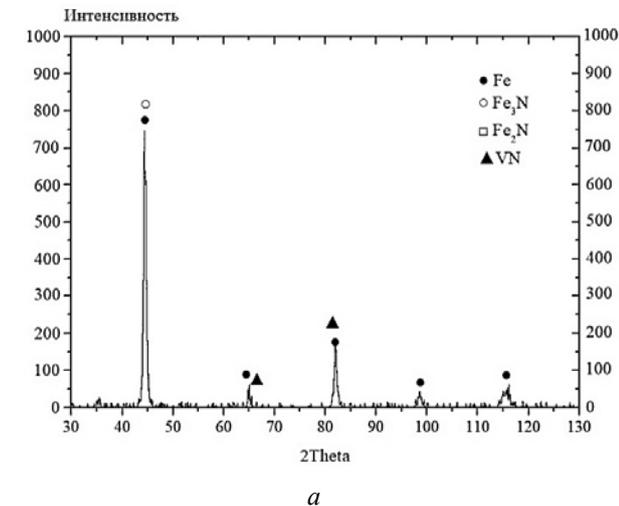
Исследования поверхности образцов с УМЗ структурой методом рентгеноструктурного анализа показали, что низкотемпературное ионное азотирование (до ~450 °С) приводит к формированию нитридов железа на поверхности стали аустенитного класса 12X18H10T нитридов ϵ -фазы (Fe_2N , Fe_3N) и легирующего элемента хрома CrN (рис. 3, *б*), а на стали мартенситного класса 13X11H2B2MФ-III нитридов ϵ -фазы и легирующих элементов Cr, V(N) (рис. 3, *а*). Поскольку обрабатываемая сталь имеет УМЗ структуру, то образующиеся фазы, предположительно, являются мелкодисперсными и выделяются в основном на границах зерен. Известно [11, 12], что во время ионного азотирования сталей с КЗ структурой в тлеющем разряде при температуре ниже 500 °С

формирование нитрида CrN не происходит. Однако как видно из рентгенограмм, показанных на рис. 2, *а*, *б*, при ионном азотировании сталей 12X18H10T и 13X11H2B2MФ-III с УМЗ структурой при температуре 450 °С регистрируются пики хрома CrN. Авторы настоящей работы предполагают, что это может быть связано с высокой концентрацией азота в поверхностном слое, которая обусловлена повышенной диффузией элементов. УМЗ структура с большим количеством кристаллических дефектов дислокациями способствует повышению общего коэффициента диффузии атомов хрома и азота и формированию нитрида CrN. Кроме этого, каналами диффузии могут также выступать двойники деформации, вызванные предварительной деформационной обработкой. Данные условия позволяют осуществлять азотирование при низких температурах. При этом происходит преимущественно гетерогенное зарождение нитридной фазы, поскольку нитриды образуются на границах зерен (тройных точках) или на местах скопления дислокаций [13].

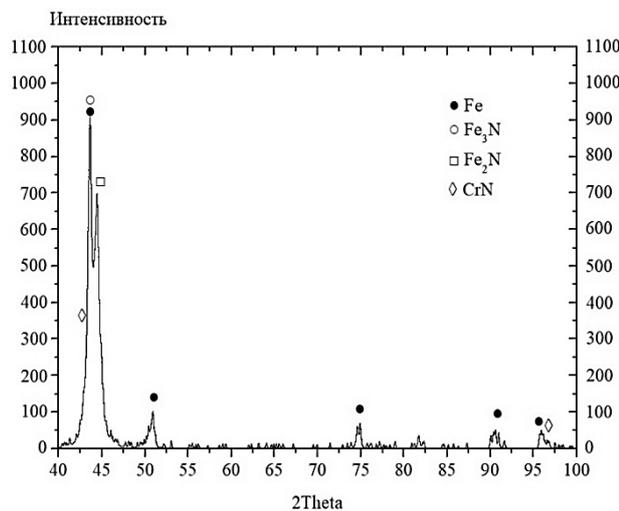
Для определения толщины упрочненного слоя были проведены замеры микротвердости по глубине образцов сталей, прошедших ИПДК и последующее ионное азотирование при различных температурах. Полученные в результате измерений распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя показаны на рис. 4.

Анализ результатов измерений микротвердости по глубине поверхностного слоя стали 13X11H2B2MФ-III с УМЗ структурой (рис. 4, *а*) показал, что образец, подвергнутый азотированию при низкой температуре (450 °С), имеет поверхностную микротвердость ~900 кгс/мм² и толщину упрочненного слоя 90–95 мкм. При этом механические свойства основы материала не изменились, что свидетельствует о сохранении заданной УМЗ структуры стали 13X11H2B2MФ-III при температуре азотирования 450 °С и выдержке в течение 6 ч. Образец, подвернутый обработке при 500 °С, имеет поверхностную твердость 950 кгс/мм² и толщину модифицированного слоя около 95 мкм. Максимальный прирост микротвердости – в 2 раза (1050 кгс/мм²) происходит на образце, под-

вергнутому азотированию при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом микротвердость основы составляет 570 кгс/мм^2 , что ниже исходного значения (660 кгс/мм^2), а толщина упрочненного слоя составляет $\sim 80\text{ мкм}$.



а

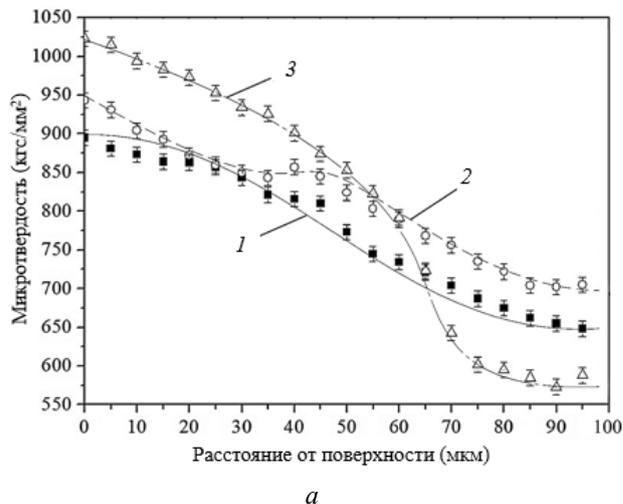


б

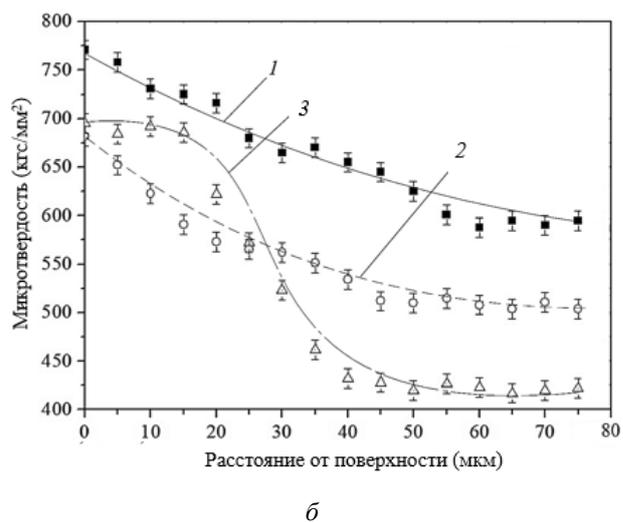
Рис. 3. Рентгенограммы с поверхности образцов стали 13X11N2B2MФ-III (а) и 12X18N10T (б) после ИПДК и последующего низкотемпературного ионного азотирования при $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ результатов измерений механических свойств поверхностного слоя стали 12X18N10T с УМЗ структурой (рис. 4, б) показал, что максимальный прирост микротвердости – около 22% (770 кгс/мм^2), наблюдается на образце, подвергнутому низкотемпературному ионному азотированию (нагрев не более $450\text{ }^{\circ}\text{C}$). В результате повышения температуры обработки до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит снижение микротвердости поверхности до $610\text{--}615\text{ кгс/мм}^2$, а при температуре азотирования $550\text{ }^{\circ}\text{C}$

микротвердость меньше исходного значения до ИПДК – $545\text{--}560\text{ кгс/мм}^2$. При этом характер кривой распределения микротвердости схож с распределением твердости на сталях с КЗ структурой.



а



б

Рис. 4. Распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя образцов стали 13X11N2B2MФ-III (а) и 12X18N10T (б) с УМЗ структурой после азотирования при различных температурах в течение 6 ч: 1 – $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$

Приведенные выше данные позволяют сделать вывод о том, что низкотемпературное азотирование сталей 12X18N10T и 13X11N2B2MФ-III с УМЗ структурой при температуре $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 ч позволяет получать упрочненные слои в 1,3–2 раза больше по сравнению обработкой в тлеющем разряде при температуре $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ при том же времени процесса. При этом обеспечивается плавный переход от поверхностной микротвердости к микротвер-

дости сердцевин у образцов, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках азотированного слоя. Повышение температуры приводит к деградации структуры основы материала и росту размера зерна. При этом снижается объемная доля границ зерен, которые являются каналами диффузии азота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования влияния ионного азотирования на структуру и механические свойства поверхностного слоя конструкционных сталей 13X11H2B2MФ-Ш и 12X18H10Т с УМЗ структурой получены следующие выводы:

1. ИПДК позволяет получить УМЗ структуру в стали 13X11H2B2MФ-Ш со средним размером зерна α -Fe 160 ± 20 нм и частиц карбидов 100 ± 20 нм. Применение метода ИПДК для 12X18H10Т приводит к измельчению зерен γ -Fe до 200 нм.

2. Низкотемпературное ионное азотирование (до ~ 450 °С) приводит к формированию нитридов железа на поверхности стали аустенитного класса 12X18H10Т нитридов ϵ -фазы (Fe₂N, Fe₃N) и легирующего элемента хрома CrN (см. рис. 3, б), а на стали мартенситного класса 13X11H2B2MФ-Ш нитридов ϵ -фазы и легирующих элементов Cr, V(N).

3. Низкотемпературное ионное азотирование (при $T=450$ °С, 6 ч) позволяет эффективно повысить микротвердость поверхности на 25 % для стали 13X11H2B2MФ-Ш и на 22 % для стали 12X18H10Т с УМЗ структурой.

4. Наибольшая толщина упрочненного слоя для сталей с УМЗ структурой достигается при низкотемпературном ионном азотировании. Так, для стали 13X11H2B2MФ-Ш толщина модифицированного слоя составляет 90–95 мкм, а для стали 12X18H10Т – 70–80 мкм.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра коллективного пользования «Нанотех» – Наноструктурные материалы и высокие технологии, УГАТУ, за предоставленное оборудование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Винтовая** экструзия – процесс накопления деформаций / Я. Е. Бейгельзимер и др. Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. 87 с. [Ya. E. Beigel'zimer, et. al., *Screw extrusion - the process of accumulating deformations*, (in Russian). Donetsk: Firma TEAN, 2003.]
2. **Андриевский Р. А., Рагуля А. В.** Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2005. 192 с. [R. A. Andrievsky, A. V. Ragula, *Nanostructured materials*, (in Russian). Moscow: Academia, 2005.]
3. **Валиев Р. З.** Создание объемных наноструктурных материалов методами интенсивной пластической деформации для инновационных применений в технике и медицине // Физика и техника высоких давлений. 2008. № 4. С. 12. [R. Z. Valiev, "Creation of bulk nanostructured materials by methods of intense plastic deformation for ion innovative applications in engineering and medicine", (in Russian), in *Fizika i tehnika vusokih davlenii*, no. 4, p. 12, 2008.]
4. **Валиев Р. З., Александров И. В.** Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с. [R. Z. Valiev, I. V. Alexandrov, *Bulk nanostructured metallic materials: production, structure and properties*, (in Russian). Moscow: ICC "Akademkniga", 2007.]
5. **Теория** и технология азотирования / Ю. М. Лахтин и др. М.: Металлургия, 1991. 320 с. [Yu. M. Lahtin, et. al., *Theory and nitriding technology*, (in Russian). Moscow: Metallurgiyi, 1991.]
6. **Моделирование** процесса локального ионного азотирования с эффектом полого катода на примере детали «зубчатое колесо» / В. В. Будилов и др. // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 15, № 2 (68). С. 3–8. [V. V. Budilov, et. al., "Modeling the process of local ion nitriding with the effect of a hollow cathode using the example of a gear wheel component", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 15, no. 2 (68), pp. 3-8, 2015.]
7. **The microstructure** and mechanical properties of T91 steel processed by ECAP at room temperature / Z. Q. Fan, et. al. // Journal of Nuclear Materials. 2013. V. 434. P. 417–421. [Z. Q. Fan, et. al., "The microstructure and mechanical properties of T91 steel processed by ECAP at room temperature", (in English), in *Journal of Nuclear Materials*, vol. 434, pp. 417-421, 2013.]
8. **Enhancement** of mechanical properties of heat-resistant martensitic steel processed by equal channel angular pressing / G. Yang, et. al. // Materials Science and Engineering A. 2009. V. 515. P. 199–206. [G. Yang, et. al., "Enhancement of mechanical properties of heat-resistant martensitic steel processed by equal channel angular pressing", (in English), in *Materials Science and Engineering A*, vol. 515, pp. 199–206, 2009.]
9. **Закирова А. А., Зарипова Р. Г., Семенов В. И.** Структура и механические свойства углеродистых сталей, полученных методом интенсивной пластической деформации кручением // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 2 (29). С. 123–130. [A. A. Zakirova, R. G. Zaripova, V. I. Semenov, "Structure and mechanical properties of carbon steels, obtained by the method of intensive plastic deformation by torsion", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 11, no. 2 (29), pp. 123–130, 2008.]
10. **Effect** of grain refinement on mechanical properties of martensitic steel / R. K. Islamgaliev et. al. // IOP Conference

Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 194, 012025. [R. K. Islamgaliev, et. al., "Effect of grain refinement on mechanical properties of mar-tensitic steel", (in English), in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 194, 012025.]

11. **Study** on the fatigue properties of plasma nitriding S45C with a pre-ultrasonic nanocrystal surface modification process / Bo Wu, et. al. // *Surface and Coatings Technology*. 2013. V. 216. P. 191–198. [Bo Wu, et. al., "Study on the fatigue properties of plasma nitriding S45C with a pre-ultrasonic nanocrystal surface modification process", (in English), in *Surface and Coatings Technology*, vol. 216, pp. 191–198.]

12. **Klug H. P., Alexander L. E.** X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials. Wiley: New York, 1974. 661 p. [H. P. Klug, L. E. Alexander, *X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials*, (in English). Wiley: New York, 1974.]

13. **Nitriding Iron at Lower Temperatures** / W. P. Tong, et. al. // *Science*. 2003. V. 299. P. 686–688. [W. P. Tong, et. al., "Nitriding Iron at Lower Temperatures", (in English), in *Science*, vol. 299, pp. 686–688.]

ОБ АВТОРАХ

ЕСИПОВ Роман Сергеевич, асп. каф. ТМ. Института АТМ УГАТУ. Дипл. инж.-технолог (УГАТУ, 2018). Готовит дис. О низкотемпературном ионном азотировании сталей аустенитного и мартенситного классов с ультрамелкозернистой структурой.

ИСЛАМГАЛИЕВ Ринат Кадыханович, проф. каф. МиФМ института АТМ УГАТУ. Физик, препод. (БГУ, 1980). Д-р физ.-мат. наук по специальности «Физика конденсированного состояния» (ИФМК, 1999). Иссл. ультрамелкозернистых материалов и их свойств, полученных методами интенсивной пластической деформацией.

ХУСАИНОВ Юлдаш Гамирович, доц. каф. технол. машиностроения. Дипл. инженер-технолог (УГАТУ, 2012). Канд. техн. наук по спец. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» (2015). Иссл. структурно-фазовые превращения и свойства поверхностных слоев сталей при ионном азотировании в тлеющем разряде.

НИКИТИНА Марина Александровна, дипл. инж.-технолог (УГАТУ, 2005) по специальности «Реновация средств и объектов материального производства», мл. науч. сотр. НИИ ФПМ. Иссл. в обл. ультрамелкозернистых сталей и сплавов на основе TiAl, полученных методами интенсивной пластической деформации.

РАМАЗАНОВ Камиль Нуруллаевич, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инженер-технолог производств. (УГАТУ, 2004). Д-р техн. наук по специальности «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» (2016). Иссл. структурно-фазовые превращения и свойства поверхностных слоев сталей при ионном азотировании в тлеющем разряде низкого давления.

METADATA

Title: Low-temperature ion nitriding of structure highly alloyed austenitic and martensitic steels with ultrafine-grained structure.

Authors: R. S. Esipov¹, R. K. Islamgaliev², Yu. G. Khusainov³, M. A. Nikitina⁴, K. N. Ramazanov⁵

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹esromles@mail.ru, ²rinatis@mail.ru, ³ulash990@mail.ru, ⁴nik.marina.al@gmail.com, ⁵ramazanovkn@gmail.com.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 2 (84), pp. 26-32, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In this work, the effect of ionic nitriding at various temperatures on the mechanical properties of austenitic and martensitic steel grades with ultra-fine-grained (UFG) structure is investigated. It was established that the average grain size for austenitic steel was about 150 nm, and for martensite steel, the ferritic phase was about 120 nm and the carbide phase was 150 nm. It is shown that after ion nitriding at a temperature of 450°C, the maximum degree of surface hardening is observed for steels with a UFG structure of both classes. Surface microhardness for austenitic steel was 700 kgf/mm², and the thickness of the hardened layer was about 70 μm. For steel of martensitic class, the surface microhardness was 900 kgf/mm², and the thickness of the hardened layer was 90-95 μm.

Key words: severe plastic deformation; ultrafine-grained structure; ion nitriding of steel; glow discharge; steel microstructure.

About authors:

ESIPOV, Roman Sergeevich, Post. Student, Dept. of Mechanical engineering. Master of Mechanical engineering (UGATU, 2018).

KHUSAINOV, Yuldash Gamirovich, Senior Prof., Dept. of Mechanical engineering. Dipl. Process engineer (Ufa State Aviation Technical Univ., 2012). PhD (MGU, 2015).

ISLAMGALIEV, Rinat Kadyhanovich, Professor of the Department of Material Science and Physics of Metals of Ufa State Aviation Technical University. Physicist, lecturer (Bashkir State University, 1980), Doctor's Degree in Physics and Mathematics in the specialty "Physics of Condensed Matter" Institute of Physics of Molecules and Crystals, 1999). Research on ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation, and their properties.

NIKITINA, Marina Aleksandrovna, Dipl. Engineer (UGATU, 2005) in «Renovation of the means and facilities of material production», Junior Researcher at IPAM USATU. Research in the field of ultrafine-grained TiAl-based steels and alloys produced by severe plastic deformation.

RAMAZANOV, Kamil Nurulayevich, Professor of the Dept. of Mechanical engineering. Dipl. Process engineer (Ufa State Aviation Technical Univ., 2004). PhD (ISPMS, 2009), Dr. of Tech. Sci. (ISPMS, 2016).