

**THE AISI 1020 STEEL STRUCTURE EVOLUTION AND PROPERTIES UNDER
«ELION» NITRIDING IN LOW-PRESSURE GAS DISCHARGE PLASMA**

*Ilya Viktorovich Lopatin, Yuriy Halyafovich Akhmadeev *, Elizaveta Alekseevna Petrikova,
Maria Evgenievna Rygina, Yuriy Fedorovich Ivanov*

Institute of High Current Electronics, SB RAS, Akademichesky Avenue 2/3, Tomsk, 634055, Russia

* ahmadeev@opec.hcei.tsc.ru

ABSTRACT

The nitriding technique for steel AISI 1020 with electron plasma component sample heating has been developed. A nitriding regime for 500 μm thick hardened layer formation has been revealed. The steel surface layer microhardness increasing with an increasing in the nitriding temperature is shown that correlates with the relative content of the nitride phase. The maximum microhardness value in nitriding temperature range from 450 to 600 °C was fixed at a temperature of 520 °C in the near-surface layer at a depth of ≈ 10 μm. The steel wear resistance was established as depending on the nitrogen atoms concentration in the crystal lattice of α-Fe. The micropores in the steel surface layer nitrided at 520 °C is shown to contributes the material wear increasing under dry friction conditions.

KEYWORDS

Structural steel; gas discharge plasma; electron-ion method; nitriding; structure; properties.

**ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СТАЛИ СТ.20,
ПОДВЕРГНУТОЙ «ЭЛИОННОМУ» АЗОТИРОВАНИЮ В ПЛАЗМЕ
ГАЗОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

*Илья Викторович Лопатин, Юрий Халыфович Ахмадеев *, Елизавета Алексеевна Петрикова,
Мария Евгеньевна Рыгина, Юрий Федорович Иванов*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

* ahmadeev@opec.hcei.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

Разработан метод и осуществлено азотирование стали Ст.20 в условиях нагрева образцов электронной компонентой плазмы. Выявлен режим азотирования, позволяющий формировать упрочненный слой толщиной до 500 мкм. Показано, что микротвердость поверхностного слоя стали увеличивается с ростом температуры азотирования и коррелирует с относительным со-

держанием нитридной фазы. Обнаружено, что в диапазоне температур азотирования от 450 до 600 °С максимальное значение микротвердости фиксируется при температуре 520 °С в приповерхностном слое на глубине ≈ 10 мкм. Установлено, что износостойкость стали определяется концентрацией атомов азота в кристаллической решетке α -Fe. Показано, что формирование микропор в поверхностном слое стали, азотированной при 520 °С, способствует повышению износа материала в условиях сухого трения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Конструкционная сталь; плазма газового разряда; электронно-ионный метод; азотирование; структура; свойства.

Введение

Состояние и свойства поверхностного слоя материала изделий определяют в большинстве случаев их эксплуатационные характеристики. Многолетние исследования показывают возможность и востребованность модификации поверхности металлов и сплавов путем насыщения поверхностного слоя атомами газовых элементов, например, азота. Такая обработка называется азотированием [1–7]. Азотирование сопровождается формированием градиентной структуры в приповерхностном слое с изменением концентрации легирующих атомов по глубине [8–10], что позволяет значительно повысить твердость и износостойкость, коррозионную стойкость и электропроводность (и т.д.) поверхности. При этом, структура модифицированного слоя, его фазовый состав, прочностные и трибологические характеристики во многом определяются химическим и фазовым составом обрабатываемой стали. Например известно, что наличие в стали даже до 1% хрома влияет на фазовый состав поверхности и профиль распределения как азота, так и микротвердости по глубине [9], а при обработке нержавеющей аустенитных сталей, где концентрации легирующих элементов, таких как хром и никель, составляют десятки процентов, распределения азота и микротвердости по глубине становится немонокотным из-за затруднения проникновения атомов азота вглубь образца при интен-

сивном образовании нитридов легирующих элементов в приповерхностных слоях [2]. Таким образом, для понимания процессов диффузии азота интересным представляется изучение сталей, применяемых в промышленности, но не имеющих в своем составе нитридообразующих добавок. Помимо состава обрабатываемых сталей, важным фактором, влияющим на профиль и свойства модифицированных слоев, являются различные условия проведения процессов азотирования. В случае ионно-плазменного азотирования, когда азотирование происходит в присутствии азота в ионизированном состоянии [11–15], таким немаловажным фактором является интенсивность ионного воздействия на обрабатываемую поверхность в процессе азотирования, при этом, интенсивность ионного воздействия связана с температурой проведения процессов азотирования, которая, в свою очередь, также существенно влияет на формирование модифицированного слоя. Для снижения влияния фактора интенсивности ионного воздействия на формирование модифицированного слоя в [16, 17] было предложено использовать для подогрева обрабатываемых образцов электронной компоненты плазмы, реализуя элионный процесс обработки, который обеспечивает возможность изменения температуры обработки образцов без существенного изменения интенсивности их ионной бомбардировки.

Данная статья посвящена исследованию структуры и свойств стали марки Ст.20, не имеющей в своем составе значимого количества нитридообразующих легирующих элементов, подвергнутой элионному азотированию при одинаковых плотностях и энергиях ионов азота, но разной температуре обработки.

1. Материал и методика исследования

Азотирование проводилось в плазме несамоостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом, генерируемого источником собственной разработки [18, 19]. Особенностью системы питания разряда и смещения подложки была возможность использования электронной компоненты плазмы для подогрева образцов в промежутках между периодами их ионной очистки. Более подробно экспериментальная установка описана в [16, 17, 20].

В качестве материала исследования была использована сталь 20 (аналог США – AISI 1020) элементного состава (вес.%) (0,17–0,24)C–(0,17–0,37)Si–(0,35–0,65)Mn–(до 0,25)Cr–(до 0,3)Ni–(до 0,3)Cu–(до 0,04)S–(до 0,035)P (остальное Fe). Образцы имели форму цилиндра размерами $\varnothing 25 \times 5$ мм, полированные с одной стороны. Азотирование стали осуществляли в плазме газового разряда при температурах 450, 520 и 600 °С в течение 2 ч при следующих параметрах: давление азота 0,6 Па; ток разряда генератора плазмы «ПИНК» 40 А; напряжение горения разряда генератора плазмы «ПИНК» 60 В; доля времени подрежима электронного нагрева деталей 15% (температура азотирования 450 °С), 25% (520 °С) и 39% (600 °С); напряжение смещения подложки в подрежиме ионной очистки поверхности образцов 300 В. Перед проведением процесса азо-

тирования производилась очистка поверхности образцов ионами азота с напряжением смещения 700 В в течение 10 минут. После проведения процесса образцы охлаждались в вакуумной камере до температуры ниже 100 °С при давлении не хуже 1×10^{-3} Па. Исследование фазового состава стали осуществляли методами рентгеноструктурного анализа. Структуру поверхности азотирования и элементный состав поверхностного слоя анализировали методами сканирующей электронной микроскопии. Дефектную субструктуру и фазовый состав поверхностного слоя толщиной до 50 мкм изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. С этой целью изготавливали фольги из пластинок, вырезанных в поперечном сечении объемного образца. Механические свойства стали характеризовали микротвердостью (нагрузка на индентор 0,5 и 1 Н). Трибологические свойства характеризовали параметром износа (величина, обратно пропорциональная износостойкости) и коэффициентом трения.

2. Результаты исследования и их обсуждение

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры поверхности образцов, формирующейся при азотировании. Обнаружено, что азотирование сопровождается формированием в поверхностном слое субмикроннокристаллической структуры, размеры кристаллитов которой увеличиваются от 60 нм (рис. 1, б) до 330 нм (рис. 1, е) при увеличении температуры азотирования от 450 до 600 °С. Следует отметить, что азотирование при 520 °С сопровождается формированием в поверхностном слое микропор, размеры которых 100–200 нм (рис. 1, з).

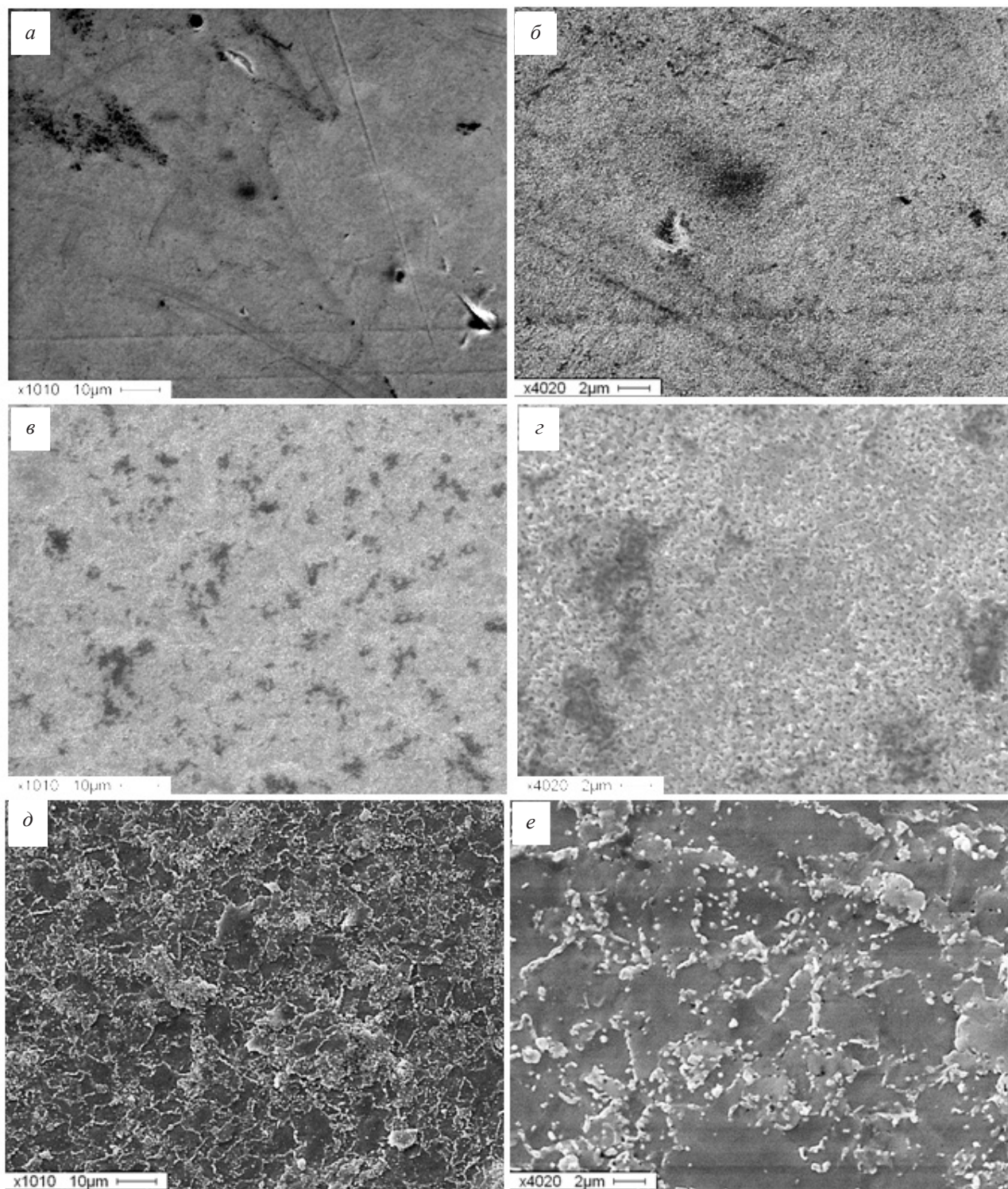


Рис. 1. Структура поверхности образцов стали 20, формирующаяся в результате азотирования при температуре 450 °C (а, б); 520 °C (в, г) и 600 °C (д, е); сканирующая электронная микроскопия

Fig. 1. The scanning electron microscopy image of AISI 1020 steel samples surface structure formed as a result of nitriding at a temperature of 450 °C (a, б), 520 °C (в, г) and 600 °C (д, е)

Элементный состав поверхностного слоя изучали методами микрорентгено-спектрального анализа. Установлено (метод «по площадям»), что концентрация азота в поверхностном слое стали изменяется немонотонным образом, достигая минимального значения, равного 13,5 ат.%, при температуре азотирования 520 °С (рис. 2).

Элементный анализ отдельно взятых кристаллитов позволил выявить неоднород-

ность распределения атомов азота в пределах отдельно взятого образца. Анализ представленных на рис. 3 результатов показывает, что в поверхностном слое стали присутствуют кристаллиты, обогащенные и обедненные азотом (табл. 1). При этом концентрация азота в участках светлого контраста (рис. 3, обозначено на (а) значком «+» и цифрой 1) выше, по сравнению с участками темного контраста (рис. 3, обозначено на (а) значком «+» и цифрой 2).

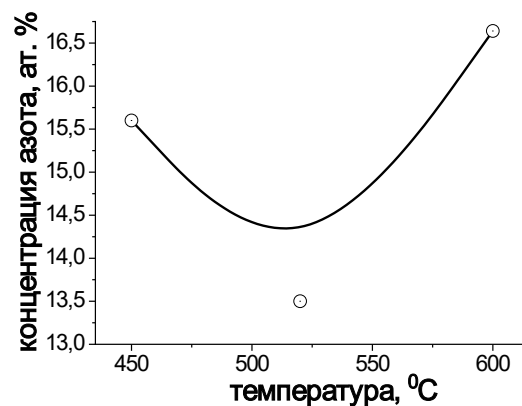


Рис. 2. Зависимость от температуры азотирования концентрации азота в поверхностном слое стали 20

Fig. 2. The dependence of nitrogen concentration in AISI 1020 steel surface layer on nitriding temperature

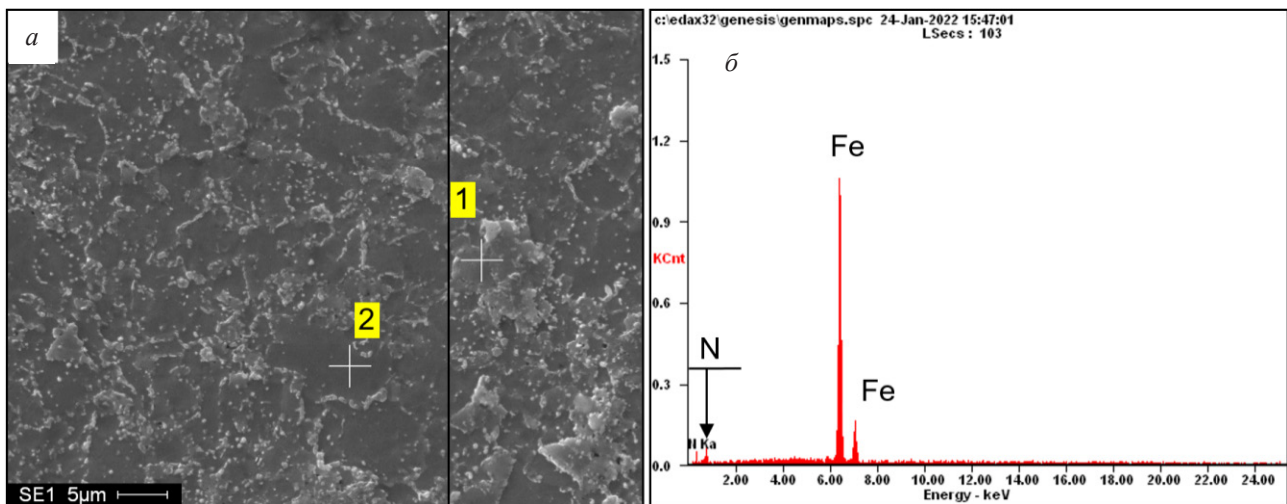


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца стали 20, азотированной при температуре 600 °С (а); (б) энергетические спектры, полученные с участка, обозначенного на (а) значком «+» и цифрой 1

Fig. 3. Electron microscopic image of the AISI 1020 steel sample surface structure after nitriding at a temperature of 600 °С (а); (б) energy spectra obtained from the area indicated in (а) by the «+» sign and the number 1

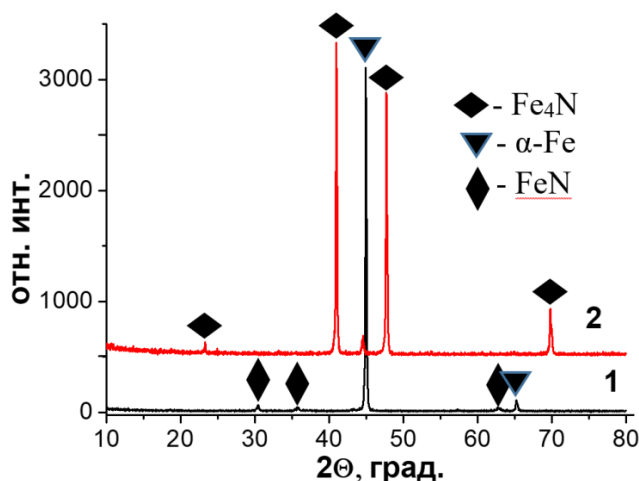
Таблица 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа участков 1 и 2, указанных на рис. 3, а**Table 1.** The results of X-ray microspectral analysis of sections 1 and 2 indicated in Fig. 3, a

Место анализа / Place of analysis	N, ат.% / N, atomic %	Fe, ат.% / Fe, atomic %
1	14,7	85,3
2	10,2	89,8

Методами рентгенофазового анализа выявлено существенное преобразование фазового состава поверхностного слоя стали в процессе азотирования (рис. 4 и 5). Так, если после азотирования при температурах 450 °С в поверхностном слое стали основной фазой является твердый раствор на основе α -Fe (97 масс.%) (рис. 4, рентгенограмма 1, рис. 5, а), то после азотирования при температурах 520 и 600 °С основной фазой поверхностного слоя стали является нитрид железа состава Fe_4N (рис. 4, рентгенограмма 2).

Одновременно с изменением фазового состава поверхностного слоя стали фиксиру-

ется изменение параметра кристаллической решетки α -Fe. Представленные на рис. 5, б результаты свидетельствуют о том, что параметр кристаллической решетки α -Fe изменяется немонотонно и достигает максимального значения при температуре азотирования 520 °С. Представленные на рис. 6 результаты свидетельствуют о том, что между параметром кристаллической решетки α -Fe и концентрацией азота в стали наблюдается слабо выраженная корреляция, не позволяющая однозначно связать изменение параметра кристаллической решетки стали и концентрацию азота в материале.

**Рис. 4.** Фрагменты рентгенограмм образцов стали 20, подвергнутых азотированию при температуре 450 °С (1) и 600 °С (2)**Fig. 4.** The X-ray diffraction patterns fragments of AISI 1020 steel samples after nitriding at temperatures of 450 °С (1) and 600 °С (2)

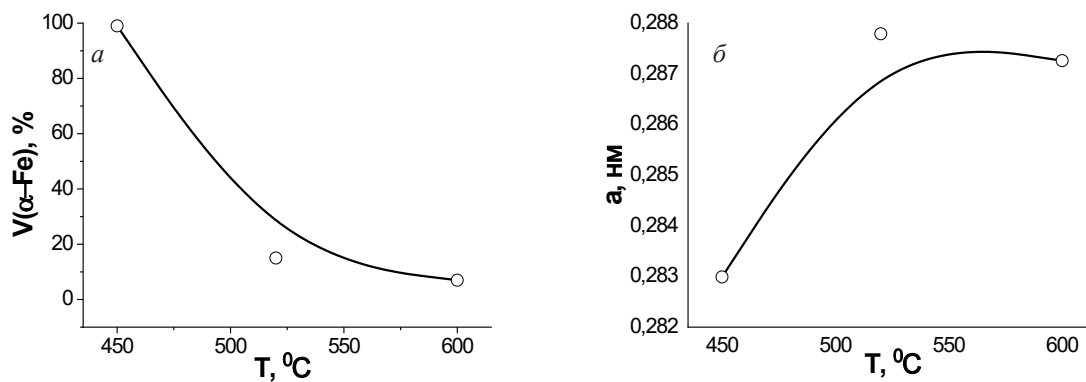


Рис. 5. Зависимость относительного содержания α -Fe (*a*) и параметра кристаллической решетки α -Fe (*b*) от температуры азотирования Ст.20

Fig. 5. The relative content of α -Fe dependence (*a*) and the α -Fe crystal lattice parameter (*b*) on the AISI 1020 steel nitriding temperature

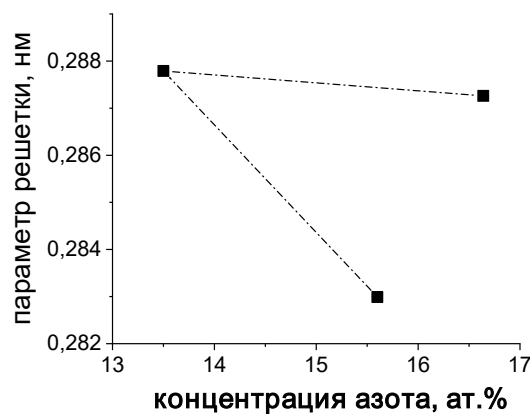


Рис. 6. Поле корреляций, связывающее параметр кристаллической решетки α -Fe и концентрацию атомов азота в материале Ст.20

Fig. 6. The correlation field relating the crystal lattice parameter α -Fe and the concentration of nitrogen atoms in the AISI 1020 steel

Дефектную субструктуру и фазовый состав стали после азотирования исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что сталь в исходном состоянии (состояние перед азотированием) имеет феррито-перлитную структуру (рис. 7).

После азотирования при температурах 520 и 600 °С в поверхностном слое толщи-

ной 20–30 мкм формируется структура пластинчатого типа, характерное изображение которой приведено на рис. 8. Микродифракционный анализ (рис. 8, б) показал, что пластинки образованы нитридом железа Fe_4N и твердого раствора на основе α -Fe. Пластинки данного состава параллельны друг другу и расположены чередующимся образом (рис. 8, в).

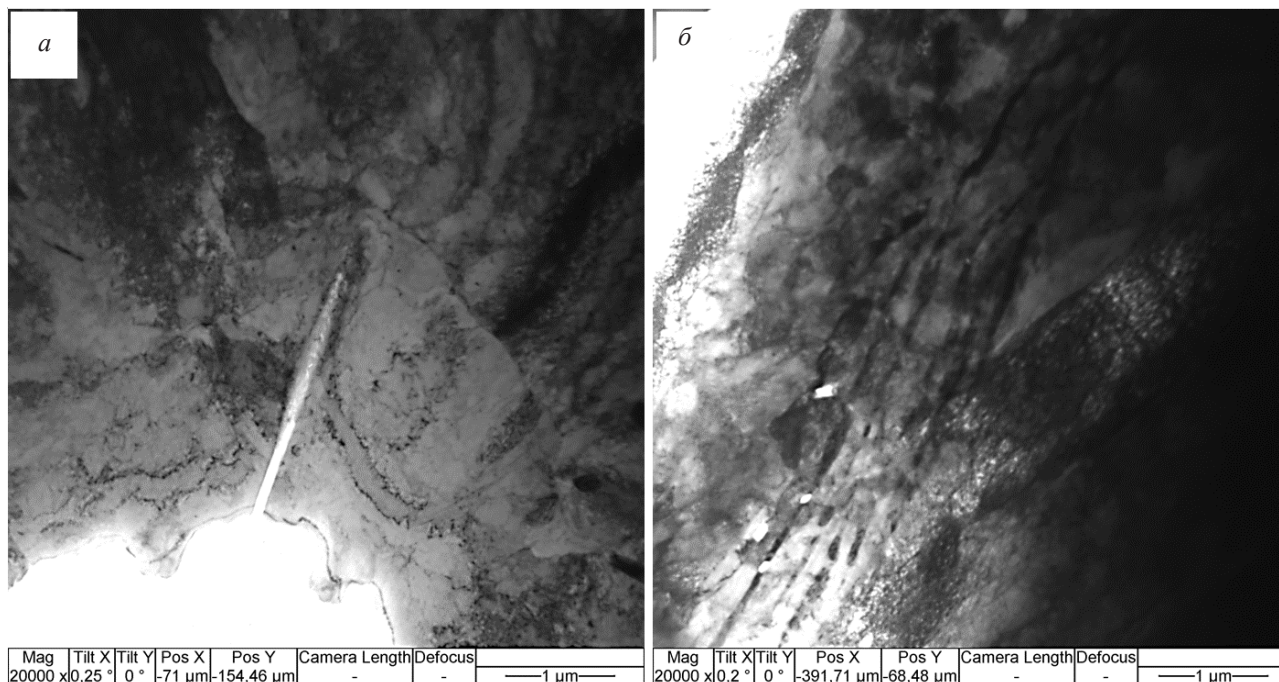


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 20 перед азотированием:
a – зерна феррита; *б* – прослойка перлита пластинчатой морфологии

Fig. 7. The AISI 1020 steel structure electron microscopic image before nitriding:
a – grains of ferrite; *б* – interlayer of pearlite of lamellar morphology

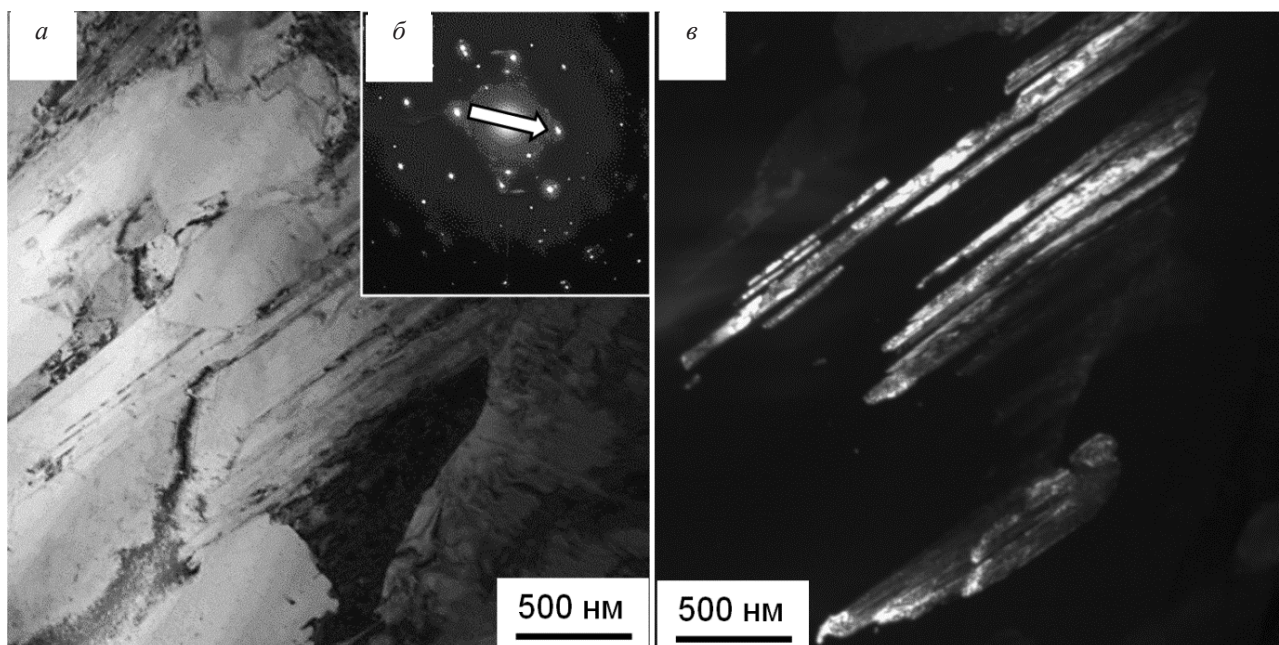


Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 20 после азотирования:
a – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле;
в – темное поле, полученное в рефлексах $[111]Fe_4N + [110]\alpha-Fe$

Fig. 8. The AISI 1020 steel structure electron microscopic image after nitriding:
a – bright field; *б* – microelectron diffraction pattern (the arrow indicates the reflection in which the dark field
 was obtained); *в* – dark field obtained in $[111]Fe_4N + [110]\alpha-Fe$ reflections

При удалении от поверхности азотирования на расстояние 15–20 мкм выявляется структура, представленная зернами феррита и зернами пластинчатого перлита. Отличие данной структуры от структуры исходного состояния стали 20 заключается в высоком уровне дефектности. А именно, ферритная составляющая структуры стали характеризуется высокой скалярной плотностью дислокаций ($\approx 7,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) (рис. 9, *а*). Зерна пластинчатого перлита фрагментированы, т.е. ферритная составляющая перлита разделена малоугловыми границами на отдельные участки (рис. 9, *б*). По мере удаления от по-

верхности азотирования уровень дефектности стали снижается.

Результаты, полученные при исследовании микротвердости азотированной стали, приведены на рис. 10. Отчетливо видно, что увеличение температуры азотирования сопровождается ростом микротвердости поверхностного слоя, достигая значения 8,9 ГПа при температуре азотирования 600 °С. Сопоставляя результаты, приведенные на рис. 5, *а* и рис. 10, можно отметить, что твердость поверхностного слоя стали увеличивается с ростом относительного содержания в материале нитридной фазы.

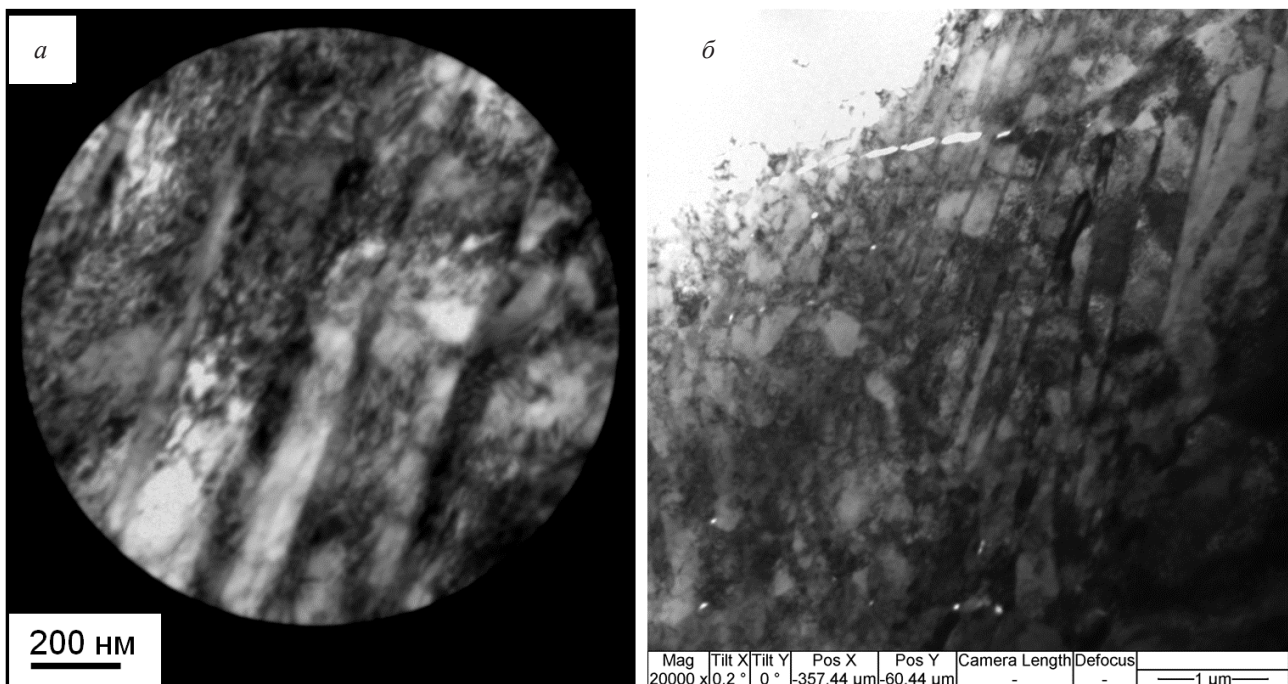


Рис. 9. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 20 после азотирования при температуре 520 °С

Fig. 9. The AISI 1020 steel structure electron microscopic image after nitriding at a temperature of 520 °С

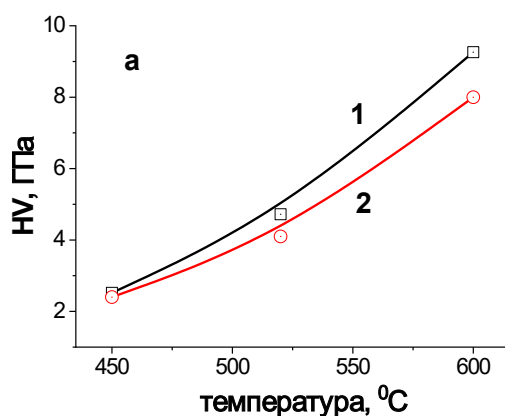


Рис. 10. Зависимость микротвердости поверхностного слоя стали 20 от температуры азотирования; нагрузка на индентор: 1 – 0,5 Н; 2 – 1 Н. Твердость стали 20 в исходном состоянии 1,9 ГПа

Fig. 10. The AISI 1020 steel surface layer microhardness dependence on the nitriding temperature; load on the indenter: 1 – 0.5 N; 2 – 1 N. The hardness of AISI 1020 steel in the initial state is 1.9 GPa

На рис. 11 приведены результаты исследования микротвердости стали 20 в зависимости от расстояния от поверхности азотирования. Отчетливо видно, что профиль микротвердости существенным образом зависит от температуры азотирования. При температурах 450 и 600 °С максимальное значение микротвердости фиксируется на поверхности азотирования (рис. 10); при температурах 520 °С – на глубине ≈ 10 мкм.

По всей видимости, такой результат обусловлен формированием микропористой структуры в поверхностном слое стали при азотировании при температуре 520 °С (рис. 1, в, з). Наибольшая толщина упрочненного слоя (до 500 мкм) достигается после азотирования при 520 °С. Образцы, азотированные при данной температуре, характеризуются плавным снижением микротвердости с увеличением расстояния от поверхности обработки.

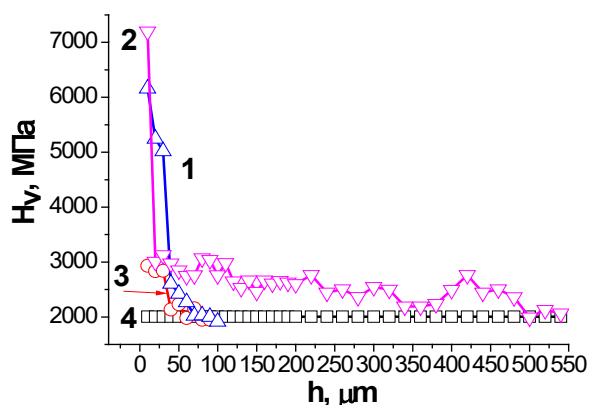


Рис. 11. Профили микротвердости образцов стали 20, подвергнутой азотированию при температурах 600 °С (кривая 1), 520 °С (кривая 2) и 450 °С (кривая 3); кривая 4 – сталь 20 в исходном состоянии

Fig. 11. The AISI 1020 steel samples microhardness profiles after nitriding at temperatures of 600 °С (curve 1), 520 °С (curve 2), and 450 °С (curve 3); curve 4 – the AISI 1020 steel in the initial state

Результаты трибологических испытаний стали 20, подвергнутой азотированию, приведены на рис. 12. Отчетливо видно, что и параметр износа (рис. 12, *a*) и коэффициент трения (рис. 12, *b*) изменяются немонотонным образом, а именно, азотирование при температуре 520 °С приводит к формированию поверхностного слоя, имеющего наи-

больший параметр износа и наименьший коэффициент трения. Сопоставляя результаты, приведенные на рис. 2 и 12, можно отметить явное подобие в изменении с увеличением температуры азотирования относительного содержания азота в поверхностном слое стали и параметра износа, что подтверждается результатом, приведенным на рис. 13.

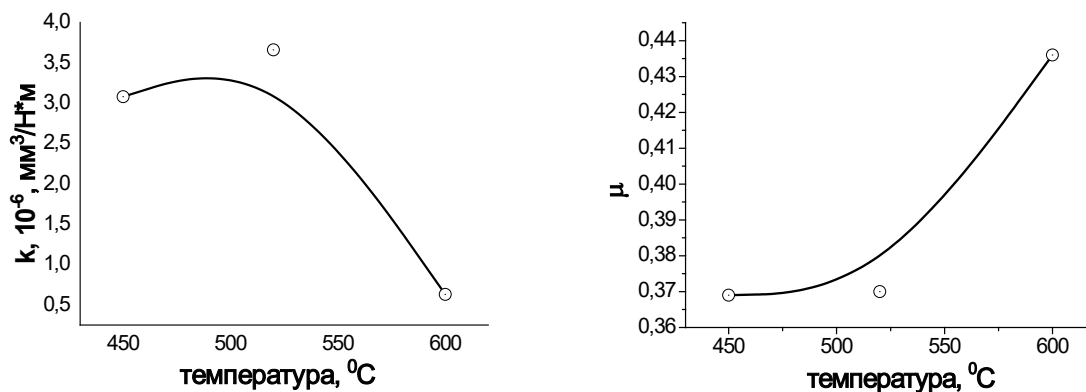


Рис. 12. Зависимость параметра износа (*a*) и коэффициента трения (*b*) поверхностного слоя стали 20 от температуры азотирования. Параметр износа стали 20 в исходном состоянии $3,0 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н · м; коэффициент трения 0,39

Fig. 12. The AISI 1020 steel surface layer dependences of wear parameter (*a*) and friction coefficient (*b*) on the nitriding temperature. The wear parameter of AISI 1020 steel in the initial state is $3,0 \cdot 10^{-6}$ mm³/N · m; friction coefficient 0.39

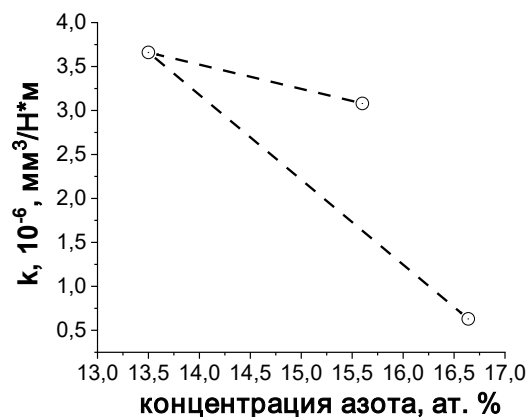


Рис. 13. Корреляционная зависимость, связывающая параметр износа с концентрацией азота в поверхностном слое Ст.20

Fig. 13. Correlation between the wear parameter and the nitrogen concentration in the AISI 1020 steel surface layer

Принимая во внимание результаты, полученные при исследовании структуры, формирующейся на поверхности азотирования (рис. 1), можно предположить, что сравнительно низкие значения износостойкости стали, наблюдающиеся при азотировании при температуре 520 °С, обусловлены, в первую очередь, наличием микропор, способствующих охрупчиванию материала.

Заключение

В элионном режиме, обеспечивающем эффективный подогрев обрабатываемых образцов электронной компонентой плазмы, осуществлено азотирование образцов стали 20. Установлено (метод микрорентгеноспектрального анализа), что концентрация азота в поверхностном слое стали изменяется немонотонным образом, достигая минимального значения, равного 13,5 ат.%, при температуре азотирования 520 °С. Показано, что после азотирования стали при температурах 520 и 600 °С основной фазой (85 и 93 масс.%) поверхностного слоя образцов является нитрид железа состава Fe_4N , при меньшей температуре основной фазой (97 масс.%) является твердый раствор на основе α -железа. Обнаружено, что микротвердость поверхностного слоя стали увеличивается с ростом температуры азотирования и коррелированным образом зависит от относительного содержания нитридной фазы. Показано, что максимальное значение микротвердости при температурах азотирования 450 и 600 °С фиксируется на поверхности азотирования; при температуре 520 °С – в подповерхностном слое на глубине ≈ 10 мкм. Наибольшая толщина упрочненного слоя (до 500 мкм) достигается после азотирования при 520 °С. Установлено, что образцы стали, азотированные при 520 °С, характеризуются сравнительно высокими значениями износа, что обусловлено, в первую очередь, наличием микропор, способствующих охрупчиванию материала.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00111.

The reported study was supported by RFBR and ROSATOM, project number 20-21-00111.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, [и др.]. М.: МГТУ им. Баумана, 1999. 400 с.
2. Берлин Е. В., Коваль Н. Н., Сейдман Л. А. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей. М.: Техносфера, 2012. 464 с.
3. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / под общ. ред. Н. Н. Коваля и Ю. Ф. Иванова. Томск: НТЛ, 2016. 304 с.
4. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н. Н. Коваля и Ю. Ф. Иванова. Томск: НТЛ, 2016. 312 с.
5. Mirhosseini S. S., Mahboubi F. Effect of plasma nitriding on tribological properties of nickel-boron-nanodiamond electroless coatings // Surface and Coatings Technology. 2022. V. 435. Article number 128216. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128216.
6. A novel plasma nitriding process utilising HIPIMS discharge for enhanced tribological and barrier properties of medical grade alloy surfaces / P. Hovsepian et al. // Materials Letters. 2022. V. 313. Article number 131782. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131782.
7. Combined plasma treatment of AISI-1045 steel by hastelloy deposition and plasma nitriding / M. Naeem et al. // Journal of Building Engineering. 2022. V. 47. Article number 103882. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103882.
8. Budilov V. V., Agzamov R. D., Ramazanov K. N. Ion nitriding in glow discharge with hollow cathode effect // Metal Science and Heat Treatment. 2007. V. 49 (7–8). P. 358–361. DOI: 10.1007/s11041-007-0065-y.
9. Low-energy high-current plasma immersion implantation of nitrogen ions in plasma of non-self-sustained arc discharge with thermionic and hollow cathodes / N. N. Koval. et al. // Surface and Coatings Technology. 2018. V. 34. P. 152–158. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.064.
10. AISI 5140 steel nitriding in a plasma of a non-self-sustaining arc discharge with a thermionic cathode

under the pulse action of ions / I. V. Lopatin et al. // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1115, Iss. 3. Article number 032042. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032042.

11. Synthesis of plasma-nitrided Cr coatings on HT9 steel for advanced chemical barrier property in a nuclear cladding application / Sunghwan Yeo et al. // Applied Surface Science. 2022. V. 579. Article number 152133. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.152133.

12. The influence of the plasma-nitriding temperature on the microstructure evolution and surface properties of additive-manufactured 18Ni300 maraging steel / M. Godec et al. // Surface and Coatings Technology. 2022. V. 433. Article number 128089. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.128089.

13. Meletis E. I. Intensified plasma-assisted processing: science and engineering // Surface and Coatings Technology. 2002. V. 149, Iss. 2–3. P. 95–113. DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01441-4.

14. Wei R., Benn C. R., Cooper C. V. High Intensity Plasma Ion Nitriding of AerMet 100 Martensitic Steel // Plasma Process. Polym. 2007. V. 4, Iss. 1. P. 700–706. DOI: 10.1002/ppap.200731801.

15. Азотирование конструкционных сталей в газовых разрядах низкого давления / П. М. Щанин

[и др.] // Физика и Химия обработки материалов. 2001. № 3. С. 16–19.

16. Electron-ion-plasma modification of carbon steel / Y. H. Akhmadeev et al. // High Temperature Material Processes. 2021. V. 25 (1). P. 47–55. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2021038031.

17. Elion method of nitriding of high-chromium stainless steel: Structure and properties / Y. Ivanov et al. // Conference: 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). 2020. P. 783–787. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241927.

18. Lopatin I. V., Akhmadeev Yu. H., Koval N. N. Effect of thermionic cathode heating current self-magnetic field on gaseous plasma generator characteristics // Review of Scientific Instruments. 2015. V. 86, Iss. 10. Article number 103301. DOI: 10.1063/1.4932543.

19. Plasma generation in the arc discharge with a thermionic cathode in current stabilization conditions / I. V. Lopatin et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1393. Article number 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012046.

20. Arc discharges operation in elion mode / I. V. Lopatin et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2064, No. 1. Article number 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012029.