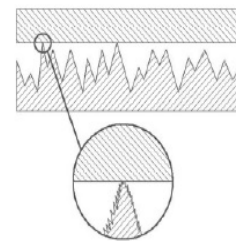


# Качество поверхностного слоя, контактное взаимодействие, трение и износ деталей машин



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №3 (141). С. 23-37.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 23-37.

Научная статья

УДК 621.785.53:620.178.16:620.186

doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-37

## Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя

Лидия Ивановна Куксенова<sup>1</sup>, д.т.н.,

Мария Сергеевна Алексеева<sup>2</sup>, к.т.н.,

Дмитрий Александрович Козлов<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1,3</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва, Россия

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, ГИЦ РФ, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> lkuc@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>2</sup> alekseeva\_ma@list.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

<sup>3</sup> koslov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Аннотация.** Приведены результаты структурных и трибологических исследований сталей и сплавов перлитного, мартенситного и аустенитного классов после разных видов предварительной обработки и режимов азотирования. Результаты трибологических испытаний и металлофизических исследований позволили оценить эффективность каждого из использованных методов обработки и выявить характеристики структурного состояния азотированного слоя, способствующие повышению эксплуатационных свойств сталей в условиях трения и износа. Разработан комплексный физико-механический критерий для оценки эффективности азотирования деталей узлов трения.

**Ключевые слова:** конструкционные материалы, стали и сплавы, азотирование, структура, поверхностные слои, износостойкость, эксплуатационные свойства

**Для цитирования:** Куксенова Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А. Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 3 (141). С. 23–37. doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-37

## Dependence of indicators of nitrited steels operational properties on the surface layer structural condition

Lidiya I. Kuksenova<sup>1</sup>, D. Eng.,

Maria S. Alekseeva<sup>2</sup>, Ph.D. Eng.,

Dmitry A. Kozlov<sup>3</sup>, Ph.D. Eng.

<sup>1,3</sup> Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences named after A.A. Blagonravov (IMASH RAS), Moscow, Russia

<sup>2</sup> RE "Kurchatov Institute" - VIAM, SSC RF, Moscow, Russia

<sup>1</sup> lkuc@mail.ru, <sup>2</sup> alekseeva\_ma@list.ru, <sup>3</sup> koslov74@mail.ru

**Abstract.** The results of structural and tribological studies of steels and alloys of pearlite, martensitic and austenitic classes using different types of pretreatment and nitriding modes are presented. The results of tribological tests and metallographic studies made it possible to evaluate the effectiveness of each of used treatment methods and to identify the characteristics of the structural state of the nitrided layer, contributing to an increase in the operational properties of steels in friction and wear conditions. A comprehensive physical and mechanical criterion has been developed to evaluate friction components nitriding efficiency.

**Keywords:** structural materials, steels and alloys, nitriding, structure, surface layers, wear resistance, operational properties

**For citation:** Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Kozlov D.A. Dependence of indicators of nitrited steels operational properties on the surface layer structural condition. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №3 (141). P. 23–37. doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-37

## Введение

В настоящее время для увеличения срока службы машин, оборудования и приборов, снижения их металлоемкости решается проблема улучшения эксплуатационных свойств конструкционных материалов на основе методов химико-термической обработки и разнообразных методов модифицирования поверхности изделий. Химико-термическая обработка рассматривается не просто как способ упрочнения приповерхностных слоев изделий из сталей и сплавов, но и как метод инженерии поверхности.

Предмет инженерии поверхности включает разработку теории научно обоснованных способов достижения таких механических и физико-химических свойств материала, которые обеспечивают надежность, долговечность и безопасность эксплуатации технических изделий, в частности, узлов трения.

Сопротивление изнашиванию металлических материалов является структурно-чувствительной характеристикой [1]. Исследования структуры и свойств поверхностных слоев металлических материалов показывают, насколько сложны и разнообразны поверхностные явления в условиях контактной деформации, когда поверхности взаимодействуют непосредственно между собой или через смазочную среду. В основе технологического обеспечения процесса формирования износостойкой структуры при химико-термической обработке лежат взаимосвязи между триботехническими характеристиками и исходной структурой стали, структурой, модифицированной при обработке, и структурой, полученной в зоне деформации при трении. Поэтому изучение структурно-фазовых превращений и деформации материала в тонком поверхностном слое при трении, которые определяются дислокационными и диффузионными механизмами в зоне контактной пластической деформации, способствует решению вопроса повышения износостойкости. В этой связи исследования структурных изменений при трении представляют

глубокий теоретический интерес и имеют важнейшее практическое значение [2, 3].

Азотирование является одной из эффективных и распространенных технологий упрочнения конструкционных сталей и сплавов, повышающей долговечность контактирующих под нагрузкой сопряжений. Промышленный технологический процесс азотирования прошел длительный путь развития. В настоящее время в технологии азотирования изучен ряд факторов управления процессом азотирования, изменение которых позволяет регулировать структурное состояние нитридного слоя и диффузионной зоны. Среди этих факторов, как правило, выделяют температуру и время азотирования, состав насыщающей среды и способы ее подачи, степень диссоциации аммиака, элементный состав стали, предварительные методы обработки, активизирующие процессы диффузионного насыщения [4 – 7].

Ниже представлены результаты исследований зависимости триботехнических параметров (твердости, износостойкости, контактной выносливости) от характеристик структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях изделий из конструкционных сталей разных классов после разных видов предварительной обработки и последующего азотирования с целью выявления условий формирования износостойкого структурного состояния, обеспечивающего надежность, долговечность и безопасность эксплуатации узлов трения.

## Методика проведения исследований

Исследовали стали и сплавы с разным типом решетки матрицы: на основе  $\alpha$ -Fe с объемно-центрированной кубической решеткой (ОЦК) – стали перлитного и мартенситного классов (40X, 38X2MЮА, ВКС-7, ВКС-10, модельные сплавы Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-Al, содержащие ~ 4,0 атомных процента (ат. %) легирующего элемента); на основе  $\gamma$ -Fe с гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК) – модельные сплавы, легированные Ni (29 ат. %), Cr, Al, Ti в количестве до 4,0 ат. % и аустенитная сталь 12X18H10T.

Применяли газовое азотирование в среде диссоциированного аммиака и азотирование в плещущем разряде (ионное азотирование).

В основу выбора средств экспериментального исследования положен трибологический метод оценки качества поверхностных микрообъемов образцов из металлических материалов. Он включает оценку микроскопических характеристик материала зоны контактной деформации (физического уширения рентгеновских линий, фазового состава, размера упрочняющих частиц и плотности их распределения) и макроскопическую характеристику пары трения в целом – износостойкость стали, связанную с уровнем поверхностного разрушения в условиях контактной деформации. Микроскопические критерии выявляют структурное состояние зоны деформации при трении, макроскопические – отражают механизм контактного взаимодействия, связанный с деформацией и разрушением поверхности, а в совокупности они характеризуют качество материала поверхностного слоя с позиций трибологии [8, 9].

Оценку триботехнических свойств проводили по нескольким схемам испытаний: на стенде с возвратно-поступательным движением плоских сопрягаемых образцов при давлении  $p = 10 \dots 40$  МПа и скорости скольжения  $v = 0,19$  м/с в пластичных смазочных материалах; на стенде СМЦ-2 в условиях качения с проскальзыванием при  $N = 500$  Н ( $p = 348$  МПа)

и  $v = 0,96$  м/с в масле И-20А; для схемы скольжения ролика по плоскости использовали машину трения Шкода-Савин при числе оборотов ролика  $675 \text{ мин}^{-1}$  и давлении 150 Н; испытания на контактную усталость проводили на двухпозиционном стенде Ш-17, моделирующем качение с проскальзыванием с имитацией работы азотированного слоя зубчатых колес при скорости качения 25,47 м/с в масле И-20А; оценку контактной долговечности азотированной стали проводили на машине МКВ-К на роликах по схеме точечного контакта.

Для оценки структурного состояния поверхностных слоев применяли металлографический, рентгеноструктурный и электронно-микроскопический методы, с помощью которых оценивали фазовый состав, характеристики субструктуры матрицы и нитридов, размеры упрочняющих частиц, плотность их распределения, критическую плотность дислокаций, запас деформационной способности.

### Результаты исследований и обсуждение

Рассмотрим влияние легирующих элементов на комплекс микроскопических параметров и макроскопических характеристик азотированных сплавов. Результаты оценки физического уширения рентгеновских линий  $\beta_{(220)}$ , твердости HV и относительной износостойкости  $I_{\text{отн}}$  модельных сплавов представлены в табл. 1.

### 1. Характеристики сплавов, азотированных при 540 °С

Материал	Физическое уширение линий $\beta_{(220)}$ , мрад	Твердость HV, МПа	Относительная износостойкость, $I_{\text{отн}}$
Fe	10	1250	0,2
Fe + 4 % Mo	24	5300	1,2
Fe + 4 % Al	37	9400	2,2
Fe + 4 % Cr	27	7250	1,8
Fe + 3 % Cr	27	7200	1,5
Fe + 2 % Cr	26	7000	1,0
Fe + 1 % Cr	25	6250	0,5

Из представленных данных следует, что для сплавов с решеткой  $\alpha$ -Fe, легированных разными элементами (Mo, Cr, Al) и азотированных при одинаковой температуре (540 °C), наблюдается прямая корреляция между твердостью диффузионной зоны и износостойкостью: чем выше твердость, тем выше относительная износостойкость сплава.

Рентгеноструктурные исследования субструктурных характеристик показали, что при увеличении твердости и износостойкости возрастает и физическое уширение (220)  $\alpha$ -фазы  $\beta_{(220)}$ . При увеличении концентрации легирующего элемента, например Cr от 1,0 до

4,0 %,  $\beta_{(220)}$  резко возрастает до концентрации Cr 1,0...2,0 %, а далее практически остается на том же уровне, аналогично изменяется твердость, а износостойкость возрастает в 3,6 раза (см. табл. 1). Последнее указывает не только на роль степени легирования сплава, но и косвенно на роль температуры азотирования. Следует заметить, что подобное влияние количества нитридов Cr на износостойкость нами было установлено для нержавеющей стали 12X18H10T [2].

Изменение  $\beta_{(220)}$ , HV и  $I_{отн}$  в сплаве Fe + 4,0 % Cr зависимости от температуры азотирования иллюстрирует рис. 1.

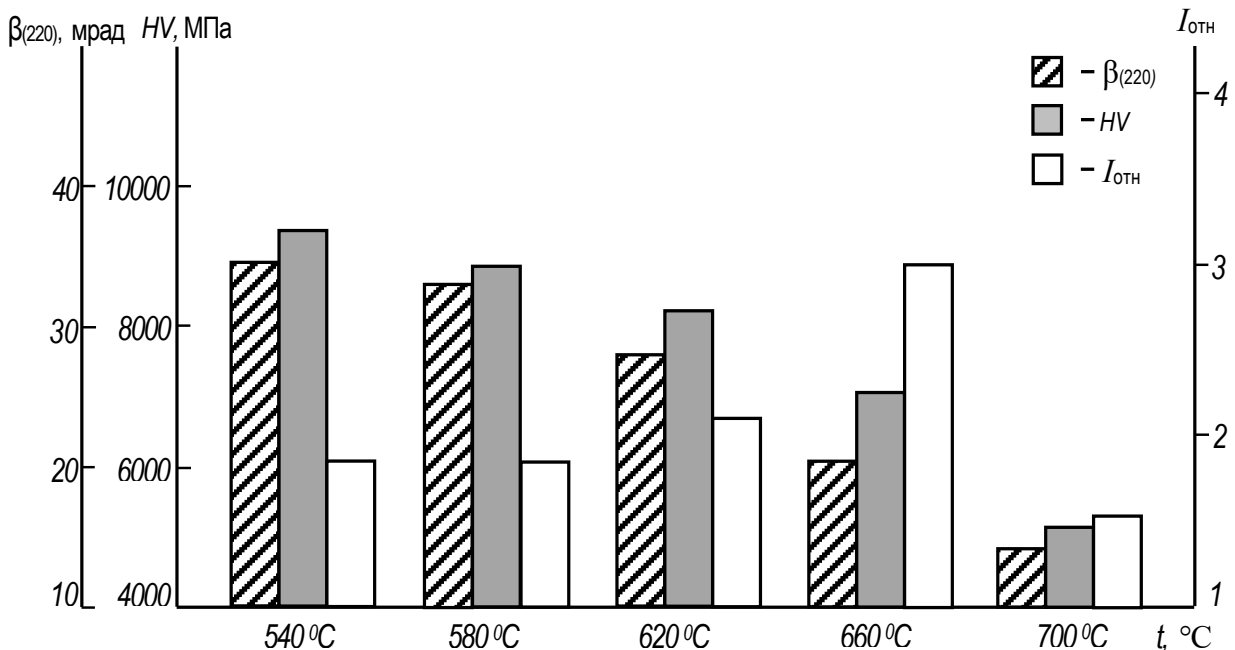


Рис. 1. Влияние температуры азотирования на микротвердость HV, физическое уширение рентгеновских линий  $\alpha$ -фазы  $\beta_{(220)}$  и относительную износостойкость  $I_{отн}$  сплава Fe + 4,0 % Cr

При увеличении температуры азотирования наблюдается монотонное снижение физического уширения  $\beta_{(220)}$  (связанное со снижением уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы) и, соответственно, микротвердости сплава. Износостойкость при этом имеет максимум при температуре азотирования 660 °C и составляет  $I_{отн} \approx 3$ . Заметим, что для сплава с 1,0 % Cr максимум износостойкости соответствует температуре 620 °C,  $I_{отн} \approx 2,1$ .

Результаты электронномикроскопических исследований сплавов с 1,0 % и 4,0 % Cr (с матрицей  $\alpha$ -Fe), показали особенности микроскопической картины сплавов с разным количеством хрома в зависимости от температуры азотирования. С повышением температуры азотирования в сплавах происходит увеличение размера частиц нитридной фазы ( $\delta$ ) и уменьшение плотности их распределения (увеличение  $L$ ) (рис. 2).

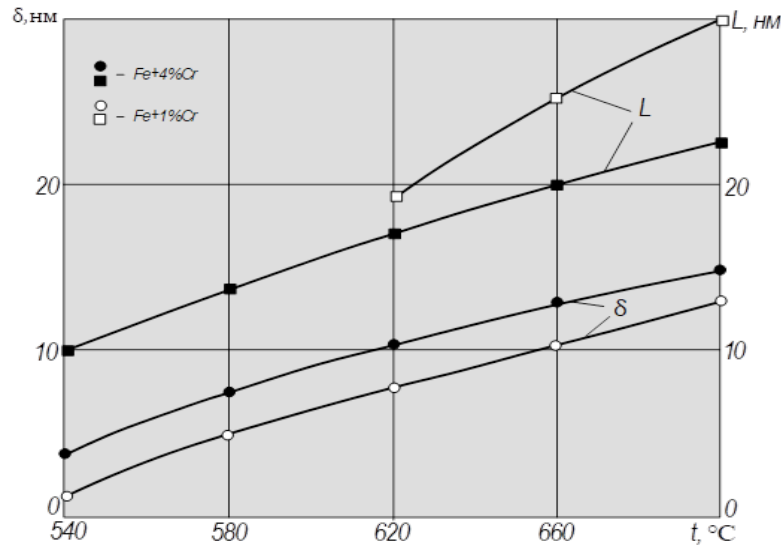


Рис. 2. Зависимость размера нитридов  $\delta$  и расстояния между ними  $L$  от температуры азотирования сплавов Fe + 1,0 % Cr и Fe + 4,0 % Cr

При температуре азотирования 540 °C в сплаве Fe + 4,0 % Cr образуются нитриды размером ~ 4 нм, в то время как в сплаве Fe + 1,0 % Cr их размер составляет ~ 1,5 нм. Увеличение температуры до 620...660 °C приводит к увеличению размеров нитридов в сплаве Fe + 1,0 % Cr до 8...10 нм, а в сплаве Fe + 4,0 % Cr – до 11...12 нм. Максимальная износостойкость для исследуемых сплавов наблюдается при формировании

нитридов легирующих элементов со средним размером частиц ~ 10 нм и расстоянием между ними ~ 10...15 нм. Аналогичные закономерности наблюдались также для перлитной стали 38X2MЮА.

В исследованных сплавах с решеткой  $\gamma$ -матрицы наблюдается другая закономерность взаимосвязи между структурой, твердостью и износостойкостью (рис. 3).

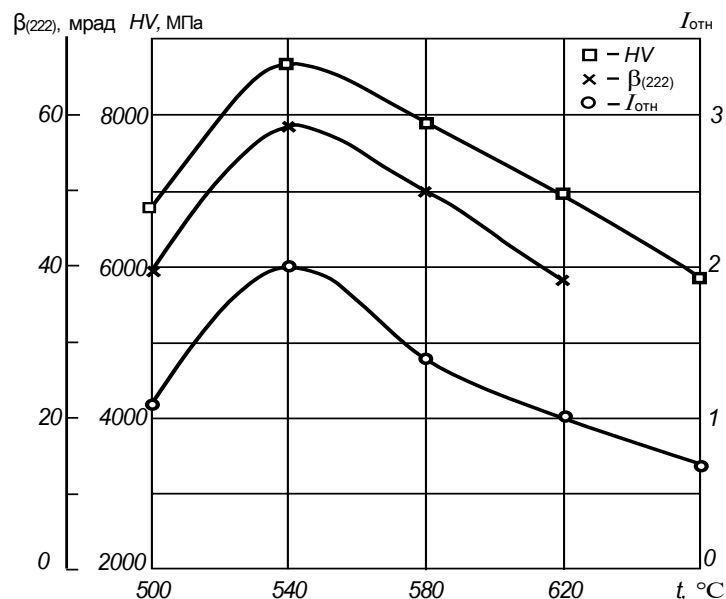


Рис. 3. Влияние температуры азотирования на физическое уширение интерференционной линии  $\gamma$ -фазы  $\beta(222)$ , твердость  $HV$  и износостойкость  $I_{отн}$  азотированного слоя комплекснолегированного аустенитного сплава Fe + 29 % Ni + 4,0 % (Cr-Al-Ti)

Исследование влияния температуры азотирования на физическое уширение, твердость и износостойкость азотированного слоя проводили на модельном комплекснолегированном сплаве с  $\gamma$ -основой Fe + 29 % Ni + 4,0 % (Cr-Al-Ti), который азотировали в интервале температур 500...660 °С. Показано, что  $\beta_{(222)}$ , HV и  $I_{отн}$  изменяются по кривой с максимумом, который наблюдается для всех исследуемых характеристик при температуре 540 °С, и составляет  $\beta_{(222)} = 57$  мрад, 8700 HV,  $I_{отн} \approx 2,0$ .

Таким образом, для сплавов аустенитного класса (на основе матрицы с ГЦК решеткой) во всем традиционно применяемом диапазоне температуры азотирования наблюдается единая закономерность изменения параметров  $\beta_{(222)}$ , HV,

$I_{отн}$  (синхронный рост или понижение) (см. рис. 3), в отличие от сплавов с матрицей, имеющей ОЦК решетку ( $\alpha$ -Fe). В последнем случае при повышении температуры азотирования до 660 °С снижаются  $\beta_{(220)}$  и HV, а  $I_{отн}$  растет (см. рис. 1).

Влияние типа нитридообразующего элемента (Cr, Al, Ti) на взаимосвязь характеристик структуры и износостойкости диффузионных слоев сплавов с аустенитной матрицей (Fe + 29 % Ni), азотированных при температуре 540 °С, показано на рис. 4. Видно, что все исследуемые параметры, характеризующие свойства сплавов, зависят от типа легирующего элемента.

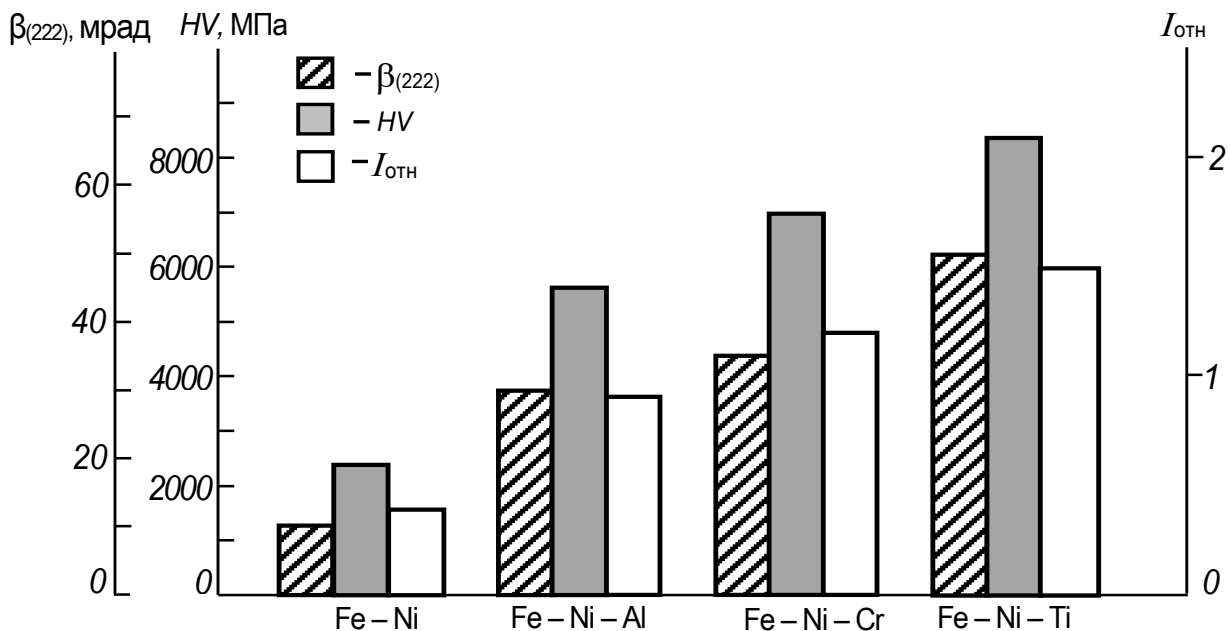


Рис. 4. Влияние состава сплава на физическое уширение интерференционной линии  $\gamma$ -фазы  $\beta_{(222)}$ , твердость HV и износостойкость  $I_{отн}$  азотированного сплава

При легировании аустенита титаном наблюдается более значительное уширение ( $\beta_{(222)} \approx 50$  мрад), чем при легировании хромом ( $\beta_{(222)} \approx 35$  мрад). Минимальное изменение физического уширения достигается в азотированном слое сплава, легированного алюминием ( $\beta_{(222)} \approx 30$  мрад). Такое влияние нитридообразующих элементов на структурное состояние матрицы в азотированном слое находится в соответствии с их воздействием на уровень твердости и износостойкости слоя, т.е. легирующие элементы, вызывающие

большее физическое уширение интерференционной линии  $\gamma$ -фазы  $\beta_{(222)}$ , обеспечивают более высокий уровень твердости и износостойкости в результате азотирования при 540 °С: для сплава с титаном HV = 8400 МПа,  $I_{отн} = 1,5$ ; для сплава с алюминием HV = 5600 МПа,  $I_{отн} = 0,9$ . Результаты электронномикроскопических и рентгеноструктурных исследований показали, что зависимости микро- и макроскопических показателей поверхностного слоя азотированной пары трения связаны с размером и плотностью

распределения упрочняющих частиц, а также уровнем микроискажений кристаллической решетки матрицы при фиксированных температурах азотирования.

На примере комплекснолегированного сплава, содержащего одновременно титан, хром, алюминий в количестве ~ 4,0 ат. %, азотированном при низких температурах (450 °C), электронномикроскопическим методом показано, что образуются зародыши нитридной фазы, когерентные матрице; размер когерентных зародышей и расстояние между ними предельно малы. Поэтому их триботехническая эффективность тоже мала вследствие высокого уровня микродеформации решетки матрицы. При температуре азотирования ~ 500 °C происходит частичное нарушение когерентности, размер упрочняющих частиц растет, однако при появлении полукogerентной границы упругие искажения матрицы не значительно уменьшаются, т. к. сохраняется высокая плотность дислокаций несоответствия, поэтому изменение износостойкости незначительное [2]. Дальнейшее повышение температуры азотирования вызывает формирование некогерентных границ, что приводит к снижению искажений на границе раздела частица-матрица, связанных с несоответствием решеток нитридной фазы и матрицы. Состав нитридных частиц на этой стадии соответствует составу равновесных нитридных фаз, и прочность самих частиц достигает максимального значения. Необходимо отметить, что в момент, предшествующий полному нарушению когерентности, плотность дислокаций несоответствия достигает максимального значения. В то же время состав и прочность нитридных частиц максимально приближаются к составу равновесных нитридных фаз. Тем не менее, происходит некоторое снижение твердости слоя, т. к. исчезает такой фактор упрочнения, как поля упругих искажений нитридных частиц.

Из вышеизложенного следует, что максимальное упрочнение при азотировании исследуемых аустенитных сплавов можно ожидать на стадии, предшествующей образованию некогерентных нитридных частиц. В сплавах Fe + 29 % Ni + 4,0 % (Cr-Al-Ti) такая стадия зафиксирована при азотировании 540 °C, когда образуются

мелкодисперсные комплексы нитридной фазы, только частично когерентные матрице. Максимальная износостойкость соответствует определенному размеру некогерентных (полукogerентных) нитридных частиц и высокому уровню упрочнения. С увеличением температуры азотирования твердость резко снижается, что вызывает снижение износостойкости аустенитных сплавов. Следовательно, для сталей с  $\gamma$ -матрицей также наблюдаются соответствия между физическим уширением, твердостью и износостойкостью азотированного слоя в широком диапазоне температур азотирования (500...660 °C), но закон соответствия отличается от сталей с  $\alpha$ -матрицей. Причиной этого является по-разному изменяющийся уровень микродеформации кристаллической решетки матрицы. Следовательно, все мероприятия, приводящие к увеличению твердости азотированного слоя аустенитных сталей (с  $\gamma$ -матрицей), одновременно позволяют создать более износостойкие поверхностные слои; для сталей с  $\alpha$ -матрицей повышение твердости не является условием повышения износостойкости в применяемом диапазоне температур азотирования.

Известно, что в условиях контактного взаимодействия основным процессом является упругопластическая деформация, которая приводит к изменению площади фактического контакта, развитию физического рельефа, оказывает влияние на тепловой режим работы зоны контакта, формирование сил трения и разрушение поверхности [10 – 12]. При нормальном изнашивании пластическая деформация активирует поверхностные слои, способствуя образованию вторичных структур, защищающих поверхность от разрушения; при повреждаемости она проявляет усиленное активирование поверхностных слоев металла, способствуя развитию схватывания. Основываясь на фундаментальных законах внешнего трения, можно полагать, что для азотированных сталей и сплавов характеристика способности поверхностного слоя воспринимать пластическую деформацию и подвергаться деформационному упрочнению может служить средством контроля и совершенствования режимов обработки деталей триботехнического назначения.

Ниже приведены результаты анализа деформационного упрочнения азотированного слоя сталей перлитного и мартенситного классов с когерентными и некогерентными нитридными частицами и вследствие этого с разным уровнем микродеформации кристаллической решетки матрицы ( $\alpha$ -твердого раствора

на основе железа). Деформационное упрочнение осуществляли гидродробеструйным методом. Способность к деформации и деформационному упрочнению оценивали по приращению физического уширения интерференционной линии (220) матрицы и микротвердости поверхностного слоя (рис. 5)

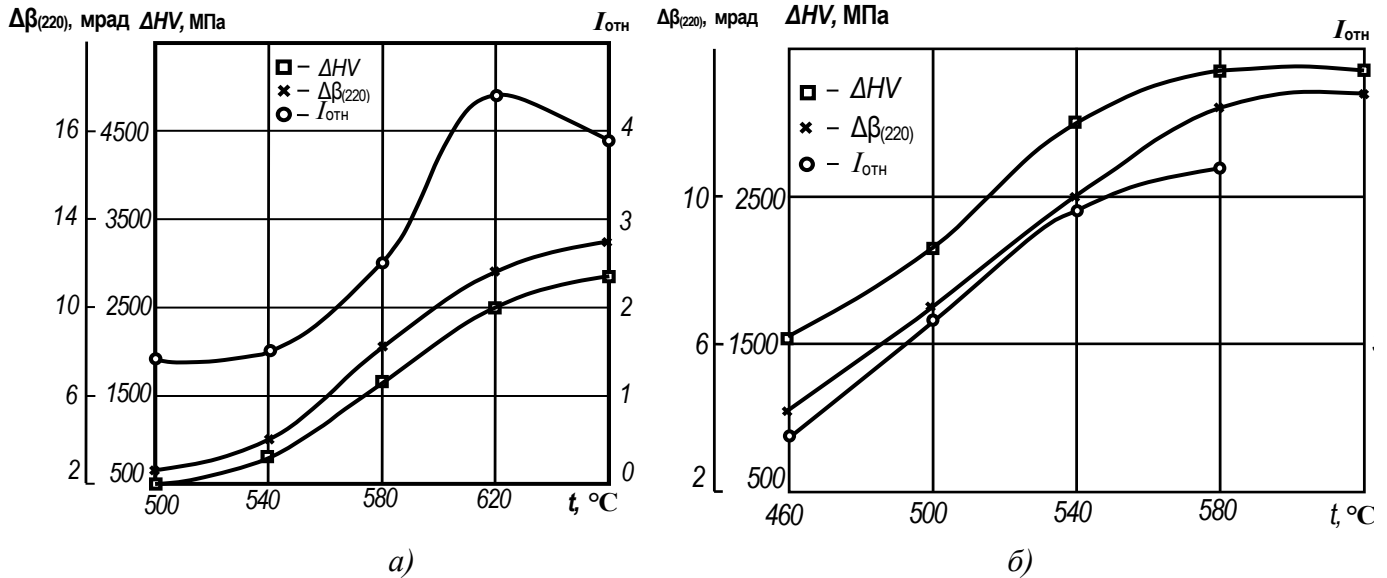


Рис. 5. Влияние поверхностной пластической деформации на прирост твердости  $\Delta HV$ , физического уширения  $\Delta \beta$  интерференционной линии (220)  $\alpha$ -фазы и износостойкость  $I_{отн}$  азотированных сталей:  
а – 38X2MЮА; б – ВКС-7

В стали 38X2MЮА, азотированной при низких температурах (500...540  $^{\circ}C$ ), обеспечивающих образование полностью когерентных зародышей нитридов и вызывающих максимальную микродеформацию кристаллической решетки матрицы, прирост микротвердости и физического уширения линии (220) после наклепа дробью минимален (см. рис. 5, а). Наклеп дробью этой же стали, азотированной при температуре 620  $^{\circ}C$ , при которой образуются нитридные выделения с нарушенной когерентностью, приводит к значительному приросту микротвердости ( $\Delta HV = 2500$ ) и физического уширения интерференционной линии (220) ( $\Delta \beta_{(220)} = 12$  мрад) (см. рис. 5, б); при этом относительная износостойкость стали соответствует максимальному значению 4,5.

В сталях мартенситного класса эффект деформационного упрочнения выше по сравнению со сталями перлитного класса после азотирования при одних и тех же температурах, что связано с образованием в этих сталях преимущественно некогерентных упрочняющих

нитридных частиц. Прирост микротвердости и физического уширения интерференционной линии (220)  $\alpha$ -фазы стали ВКС-7, азотированной при температуре 540  $^{\circ}C$ , составляет 3000 МПа и 10 мрад соответственно, в то время как для стали 38X2MЮА, азотированной при той же температуре – 750 МПа и 4 мрад соответственно. Следовательно, стали перлитного класса после азотирования имеют существенно больший запас деформационной способности (и, следовательно, более длительный период до разрушения поверхностного слоя в условиях контактной деформации), чем стали мартенситного класса. Этот фактор имеет важное значение для условий трения и поверхностного разрушения.

Из проведенных экспериментов следует, что существует закономерность между эффектом деформационного упрочнения азотированных сталей, степенью когерентности упрочняющей фазы стали и максимальной износостойкостью. В связи с этим материал, имеющий больший запас деформационной способности



(пластичности) будет иметь и большую способность сопротивляться изнашиванию. Поэтому при выборе температуры азотирования для достижения высоких триботехнических характеристик материалов пар трения скольжения необходимо в первую очередь рассматривать характеристики структурного состояния азотированного слоя, которые определяют способность материала упрочняться при деформации, т.е. в исходном до трения состоянии они должны иметь запас по эффекту деформационного упрочнения, который может определяться экспериментально по величине  $\beta_{(hkl)}$ .

Разрушение поверхностных слоев и отделение частиц износа обусловлены процессом накопления повреждаемости в приповерхностном деформированном микрообъеме до критического значения. С величиной критической повреждаемости связана критическая плотность дислокаций ( $\beta_{кр}$ ), которая может быть определена рентгеновским методом по

соотношению  $\rho = A\beta_{(hkl)}^2$ , где  $A$  – постоянный коэффициент, зависящий от упругих свойств материала, вектора Бюргерса и др., и для многих металлов и сплавов численно равен  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Из данных анализа  $\beta_{(hkl)}$  разных сталей, приведенного в табл. 2 следует, что плотность дислокаций матрицы ( $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Fe) по глубине слоев отличается более чем в 1,5 раза. Кроме того, критическое значение  $\beta_{(кр)}$  (т.е. значения, соответствующие появлению задиrow) исследуемых сталей отличаются в пределах точности эксперимента, и для тяжелых условий трения составляют величину  $\sim 60 \cdot 10^{-3}$  рад. Разность значения ( $\beta_{кр} - \beta_0$ ) является характеристикой запаса пластичности (деформационной способности при контактной деформации). Именно эта величина, существенно отличающаяся для сталей перлитного и аустенитного классов, определяет различие уровней их поверхностного разрушения при трении скольжения.

Таблица 2. Физическое уширение рентгеновских линий  $\beta_{(hkl)} \cdot 10^3$ , рад

Сталь	Глубина слоев, мкм								
	0,1	0,2	0,7	1,0	1,5	2,5	3,5	8,5	$\beta_{кр} - \beta_0$
38Х2МЮА до трения	35	–	–	35	–	35	35	35	$(60 - 25) = 35$
38Х2МЮА после трения	60	56	47	45	40	35	33	32	–
сплав с $\gamma$ -матрицей до трения	57	55	55	–	–	55	55	55	3 – 5

Таким образом, для разных температур азотирования сплавов на основе железа с ОЦК ( $\alpha$ -Fe) и ГЦК ( $\gamma$ -Fe) решетками экспериментально выявлены наиболее значимые характеристики структурного состояния, влияющие на износостойкость материала поверхностных слоев. К ним относятся размер частиц нитридов легирующих элементов (специальных нитридов) и расстояние между ними, плотность распределения упрочняющих частиц, микродеформация кристаллической решетки твердого раствора на основе железа, значения физического уширения рентгеновских линий (показатель запаса

пластичности и деформационной способности) азотированного твердого раствора и, следовательно, материала зоны контактной деформации, твердость азотированного слоя и ее изменения при деформации. Кроме того, проведенный нами комплекс экспериментальных исследований позволил сформулировать представления о структурном состоянии азотированного слоя в сталях перлитного, мартенситного и аустенитного классов, в основе которых лежит установленная совокупность характеристик структурного состояния, влияющая на износостойкость азотированных сталей [2].

В зависимости от химического состава, плотности дефектов строения матрицы и температурно-временных параметров азотирования в диффузионном слое образуются три типа нитридных выделений, отличающихся размерами, морфологией и взаимодействием с кристаллической решеткой матричной фазы. Первый – тонкие, однослойные зародыши нитридной фазы, полностью когерентные с решеткой матрицы: они возникают при низких температурах азотирования (~ 500 °С); второй – при более высоких температурах (~ 540 °С) – полуккогерентные выделения; третий – при температурах 560...620 °С – с нарушенной когерентностью.

В сталях перлитного и аустенитного классов преимущественным является гомогенное зарождение нитридных частиц, в сталях мартенситного класса – гетерогенное зарождение. В сталях мартенситного класса при низких температурах азотирования 500...520 °С одновременно присутствуют матричные когерентные зародыши нитридной фазы размером в несколько нанометров и некогерентные, образующиеся на дефектах кристаллического строения, размером 10...15 нм [2]. При этом комплексное легирование нитридообразующими элементами сталей уменьшает размер выделившихся в

азотированном слое частиц нитридов (что связано с изменением коэффициентов диффузии легирующих элементов и азота) и соответственно изменяет соотношение  $\beta_{(hkl)}$ , HV,  $I_{отн}$ . Формирование нитридов в стали при азотировании реализуется по двум механизмам: гомогенному – на сегрегациях легирующих элементов и гетерогенному – на дефектах кристаллического строения. Нитриды, образовавшиеся преимущественно на дефектах кристаллического строения, в меньшей степени искажают кристаллическую решетку матрицы, чем нитриды, выделившиеся на сегрегациях в твердом растворе [13]. В связи с этим есть основания предполагать позитивную роль поверхностной пластической деформации перед азотированием в повышении эксплуатационных характеристик стали.

С этих позиций рассмотрим некоторые структурночувствительные методы направленного воздействия на стали, способствующие формированию более износостойкого структурного состояния азотированного слоя.

Исследовали сталь ВКС-7 после закалки, высокого отпуска (традиционной термической обработки), дробеструйной обработки и последующего азотирования при 520 °С. Результаты исследований приведены в табл. 3.

### 3. Характеристики структуры и долговечность азотированной стали ВКС-7

Обработка	Ni <sub>з.о.</sub> , %	N, %	$\beta_{(hkl)}$ , мрад	N <sub>50</sub> , 10 <sup>-6</sup> , циклов
Азотирование	15	0,7	35	10,2
ППД + азотирование	30	0,5	30	21,6

Обозначения: Ni<sub>з.о.</sub> – содержание никеля в зернограницных областях; N – содержание азота; N<sub>50</sub> – долговечность, соответствующая 50 %-ной вероятности разрушения

Видно, что при введении поверхностной пластической деформации (ППД) в технологию обработки происходит увеличение содержания никеля в зернограницных областях азотированной зоны, снижение физического уширения рентгеновских линий матрицы и двукратное повышение контактной долговечности. Есть основания полагать, что

повышение контактной долговечности азотированных сталей, подвергнутых ППД, связано с двумя основными структурными факторами:

1 – при деформации поверхностного слоя повышается плотность дефектов решетки матрицы, которая увеличивает количество некогерентных нитридов при азотировании и

снижает уровень микродеформации кристаллической решетки матрицы;

2 – ППД, повышая количество дефектов, увеличивает диффузионную подвижность элементов, в том числе никеля, способствуя его более активному перемещению к границам зерен при азотировании, что вызывает уменьшение охрупчивающего влияния границ зерен азотированного слоя [2]. Таким образом, ППД перед азотированием приводит к созданию более работоспособного поверхностного слоя в условиях контактной деформации, трения и изнашивания.

Известно, что структурные изменения, вызванные ППД, распространяются на глубину  $\sim 0,1$  мм, что, как правило, меньше глубины залегания максимальных касательных напряжений при циклических контактных нагрузках, т.е. ППД не реализует максимально возможный эффект. Тем не менее, фиксируемая позитивная роль ППД выявляет подход к повышению качества поверхности азотируемой стали, основанный на совмещении предварительной термической и объемной деформационной обработок стали, которые изменяют структурное состояние не только поверхностных слоев стальных образцов, но и всего их объема для последующей активизации процесса структурообразования в азотированном слое.

Для исследования роли объемной пластической деформации испытывали стали ВСК-7 и ВКС-10, подвергнутые осадке до 80 % при температуре ниже рекристаллизации, с последующим ионно-плазменным азотированием.

Результаты оценки интенсивности изнашивания образцов из сталей ВКС-7 и ВКС-10 при испытаниях по схемам реверсивного скольжения и качения с проскальзыванием показали, что эти величины не превышают значений  $I_h = 0,5 \cdot 10^{-10}$  и  $1,5 \cdot 10^{-9}$  соответственно, что является показателем более высокой износостойкости по сравнению с обработкой без предварительной деформации [14].

Полученный массив данных испытаний материалов разного состава и в разных условиях трения позволил выявить аналитическую связь между микроскопическими характеристиками поверхностного слоя (структурой) и макроскопическими характеристиками пары трения (относительной износостойкостью азотированного слоя).

Для аналитического описания кинетики разрушения поверхностных слоев конструкционных цементованных сталей при трении в работе [15] были предложены основы методологии структурного подхода к оценке износа. Предложенный метод предполагает единство механизмов, контролирующих структурное состояние поверхностных слоев при контактной деформации и статических испытаниях на растяжение. Рассмотрим применение аналитического описания механизма разрушения поверхностей трения для разработки критерия оценки качества азотирования деталей триботехнического назначения.

Разработка критерия оценки качества азотирования основывалась на установленной совокупности характеристик твердости, фазового состава, количественных и качественных характеристик упрочняющих фаз, структурного состояния матрицы и триботехнического параметра (относительной износостойкости) для разных условий обработки и испытаний. При рассмотрении дислокационной природы накопления повреждаемости в условиях деформации двухфазного поликристаллического материала принималось во внимание, что усталостное изнашивание является наиболее распространенным и универсальным механизмом поверхностного разрушения при трении. Под действием знакопеременных касательных напряжений в деформируемом поверхностном слое происходит зарождение дислокаций, движение, генерация, и аннигиляция. При накоплении высокой плотности дислокаций на устойчивых барьерах возникают субмикротрещины. При увеличении касательных напряжений субмикротрещины растут до реализации условия Гриффитса, после чего происходит быстрое распространение микротрещин, что приводит к отделению частиц износа.

Применительно к азотированному диффузионному слою разработанное нами выражение для безразмерного комплексного физико-механического параметра имеет вид:

$$K_{аз} = \frac{\left[ H_0 + k_1 \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{1,75} [DbA(\beta_{кр}^2 - \beta_0^2)]^2}{\left( k_2 + \frac{e}{\delta} C_y \right)^2}, \quad (1)$$

где все величины, входящие в выражение, определялись экспериментально:  $H_0$  – твердость

стали до азотирования;  $\frac{\Delta d}{d}$  – микродеформация кристаллической решетки матрицы;  $D$  – средний размер блоков мозаики;  $b$  – вектор Бюргерса;  $e$  – размер зоны сдвига при деформации;  $\delta$  – размер частиц упрочняющей фазы;  $C_y$  – концентрация частиц упрочняющей фазы, где  $C_y = \pi\delta^2/L^2$ , где  $L$  – расстояние между частицами, определяемое методом просвечивающей электронной микроскопии;  $k_1, k_2$  – постоянные, отражающие изменение твердости сталей и

геометрические характеристики дислокационных петель соответственно.

Экспериментальные значения относительной износостойкости каждого из исследуемых сталей и сплавов и соответствующие значения совокупности структурночувствительных характеристик, объединенных в величину  $K_{аз}$ , для условий трения скольжения от величины укладываются в единую линейную зависимость (рис. 6).

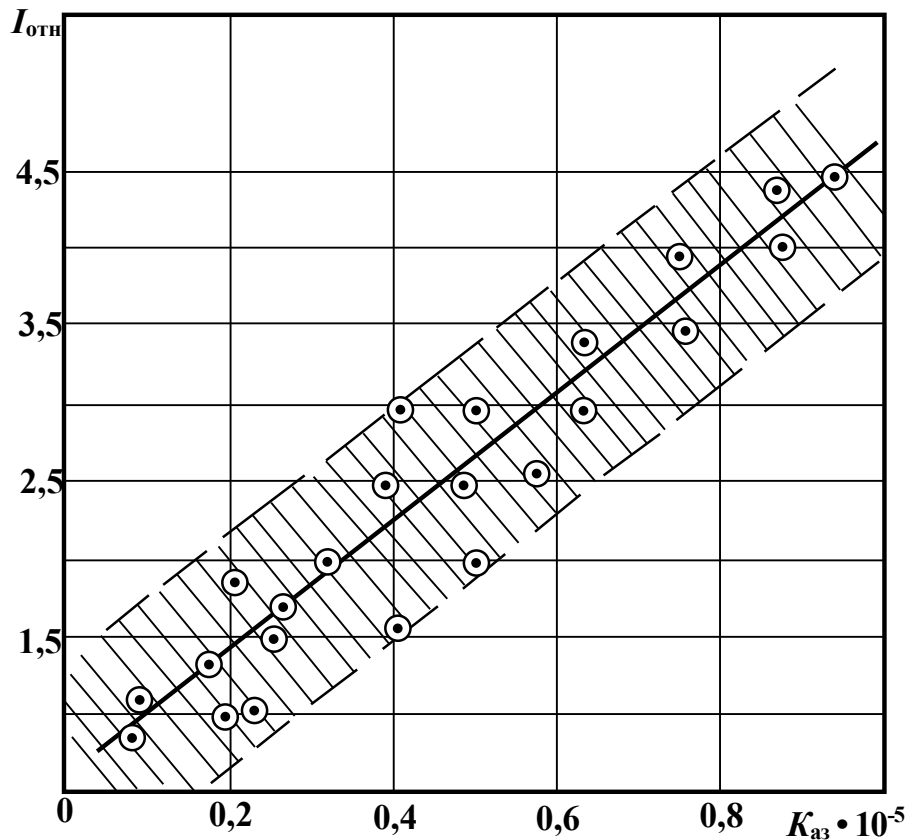


Рис. 6. Зависимость относительной износостойкости ( $I_{отн}$ ) от физико-механического параметра ( $K_{аз}$ ) азотированных сталей и сплавов

Отклонения значений  $I_{отн}$  от средней величины являются допустимыми для триботехнических испытаний и вызваны тем, что в процессе нагрева образцов до температуры азотирования возникают неоднородности ее распределения на разных расстояниях от поверхности. Поэтому могут образовываться разные структуры, соответствующие той температуре, которая достигается в каждом конкретном слое. В результате создается некоторая неоднородность структуры по толщине слоя, приводящая к изменению работоспособности

азотированной поверхности [16]. Тем не менее, проверка значимости коэффициента парной корреляции между относительной износостойкостью и коэффициентом  $K_{аз}$  по  $t$ -критерию дала положительный результат. Следует подчеркнуть, что значения  $K_{аз}$  и  $I_{отн}$ , соответствующие разным сплавам и разным условиям азотирования и укладывающиеся в единую линейную зависимость, указывают на высокую чувствительность разработанного комплексного физико-механического параметра к триботехнической характеристике, характеризующей

величину изменения уровня поверхностного разрушения азотированной стали в условиях контактной деформации. Экспериментальные исследования показали, что установленная зависимость  $I_{отн} = f(K_{аз})$  является инвариантной, поэтому она может служить расчетно-экспериментальным инструментом для оптимизации технологического процесса азотирования деталей триботехнического назначения.

Описанные выше результаты свидетельствуют, что азотированный поверхностный слой стали триботехнического назначения должен обладать противоречивым сочетанием свойств: высокой пластичностью и устойчивой к деформации плотностью дислокаций, не превышающей критический уровень. Экспериментальные исследования показали, что подобным сочетанием свойств обладает поверхностный слой, получаемый по специальной технологии азотирования, режимы которой назначены с учетом указанных выше структурночувствительных факторов. Впервые показано, что основу создания износостойкой структуры слоя, прилегающего к свободной поверхности, составляет фазовая перекристаллизация  $\epsilon \leftrightarrow \gamma' \leftrightarrow \alpha$  в азотированном слое, движущей силой которой служит изменение по ходу процесса азотного потенциала газовой среды. Механизм перекристаллизации вызывает образование зародышей кристаллов новой фазы внутри имеющейся (старой) фазы [17].

В условиях циклического изменения значения азотного потенциала развивается многократная фазовая перекристаллизация, и на поверхности детали формируется наноструктурированный нитридный слой. Важно, что наноструктурированный слой формируется непосредственно на поверхности упрочняемой детали по ходу процесса азотирования. В этом проявляется заметное преимущество фазовой перекристаллизации в качестве способа интенсивного измельчения зерна, формирования некогерентных нитридов и повышения износостойкости материалов узлов трения скольжения.

### Заключение

Долговечность и надежность машин не определяется какой-либо одной характеристикой механических свойств, поэтому необходимо улучшать комплекс свойств: показатели прочности и пластичности, твердости,

усталости. В ряде мероприятий, обеспечивающих повышение ресурса работы машин, особое место занимают проблемы износостойкости материалов, из которых они изготовлены. Одним из путей решения этих задач на современном уровне развития материаловедения являются способы направленного модифицирования изделий из конструкционных сталей, в частности применения методов химико-термической обработки.

Анализ закономерностей изменения структуры диффузионной зоны азотированных сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов и относительной износостойкости в зависимости от их состава и технологических параметров процесса обработки показал, что максимальной износостойкостью обладает азотированный слой, содержащий упрочняющие дисперсные частицы некогерентных нитридов, что обеспечивает снижение уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы и меньшую склонность стали к охрупчиванию.

Для азотированных сплавов на основе железа с ОЦК и ГЦК решетками экспериментально установлены наиболее значимые характеристики структурного состояния и свойств поверхностных слоев, влияющих на уровень поверхностного разрушения при трении: размер частиц нитридов легирующих элементов, расстояние между ними, микродеформация кристаллической решетки твердого раствора, значения физического уширения рентгеновских линий структурных составляющих материала зоны деформации при трении, твердость азотированного слоя и ее изменения при трении. На основе обобщения совокупности микроскопических и макроскопических характеристик пары трения разработан комплексный физико-механический параметр, учитывающий характеристики структуры и свойств как азотированного поверхностного слоя, так и зоны поверхностной пластической деформации при трении. Разработанное соотношение рекомендуется для оптимизации технологического процесса азотирования с позиций трибологии и оценки качества модифицированного при азотировании слоя.

Показано, что предварительная обработка азотируемых сталей является средством формирования структурно-фазового состояния

поверхностного слоя, обладающего повышенными триботехническими характеристиками. Температура предварительного отпуска стали влияет на соотношение когерентных, полуккогерентных и некогерентных нитридных частиц в диффузионной зоне при азотировании, предварительная пластическая деформация корректирует их соотношение в направлении увеличения доли некогерентных выделений, способствуя тем самым созданию более работоспособного в условиях контактной деформации и изнашивания поверхностного слоя.

Установлено, что пластическая деформация, осуществляемая после термической обработки, приводит к существенному повышению эксплуатационных свойств (в два раза повышается контактная долговечность). Связано это с тем, что в результате деформации повышается плотность дефектов структуры, что обуславливает увеличение диффузионной подвижности легирующих элементов при азотировании, уменьшению доли матричных когерентных выделений и, соответственно, снижению уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.Г. Поверхностная прочность металлов при трении / Под общ. ред. Б.И. Костецкого. Киев: Техника, 1976. 292 с.
2. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Оспенникова О.Г., Алексеева М.С., Громов В.И. Инженерия поверхности и эксплуатационные свойства азотированных конструкционных сталей / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2019. 600 с.
3. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
4. Есипов Р.С., Абдуллин Р.А., Хусайнов Ю.Г., Николаев А.А. Ионное азотирование высоколегированных конструкционных сталей с ультрамелкодисперсной структурой при различных температурах. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 10. С. 102–107.
5. Прокофьев М.В., Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С. Влияние стадийного азотирования на строение и свойства мартенситной стали 13X11H2B2MФ // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 12–19.
6. Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. № 1 (127). С. 3–10.

7. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Фахуртдинов Р.С., Алексеева М.С., Данилов В.Д., Смирнов А.Е., Громов В.И. Повышение характеристик механических свойств теплостойких сталей методом активации процесса азотирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. №2. С. 90–95.

8. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Physical criteria of wear resistance of metal materials in surface-active lubricating media // Proc. The Conference on Tribology "Friction, Lubrication and Wear – 50 years on". London. IME, 1987. P. 419–426.

9. Савенко В.И., Щукин Е.Д. О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. 1987. № 4. С. 581–589.

10. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. Новосибирск: НЭТИ, 1991. 64 с.

11. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

12. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 188. 240 с.

13. Мичугина М.С. Разработка структурного состояния азотированного слоя конструкционных сталей, ответственного за их износостойкость / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ (Государственный технический университет), 2008. 16 с.

14. Куксенова Л.И., Алексеева М.С. Влияние предварительной обработки конструкционных азотированных сталей на их триботехнические характеристики // МиТОМ. 2023. № 1. С. 10–15.

15. Дроздов Ю.Н., Рыбакова Л.М., Литвинов И.П., Павлик Б.Б., Сидоров С.А. Кинетика разрушения конструкционных сталей при трении // Трение и износ. 1989. № 5. С. 773–778.

16. Куксенова Л.И., Мичугина М.С. Влияние условий нагрева при азотировании на структуру и износостойкость поверхностных слоев на стали 38X2MЮА // МиТОМ. 2008. № 2 (632). С. 29–34.

17. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Крапошин В.С., Лисоцкий И.В., Березина Е.В., Лаптева В.Г. Влияние нанокристаллической фазы нитридов железа на износостойкость азотированной стали 38X2MЮА // Матер. всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием «Машиностроительные технологии». М.: ИМАШ РАН, 2010, С. 216–218.

## REFERENCES

1. Kostetsky B.I., Nosovsky I.G., Karaulov A.G. Poverhnostnaya prochnost' metallov pri trenii [Surface strength of metals under friction]. Under the general editorship of B.I. Kostetsky. Kiev: Technika, 1976, 292 p. (in Russian).
2. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Oспенnikova O.G., Alekseeva M.S., Gromov V.I. Surface engineering and operational properties of nitrided structural steels. Under the general editorship of E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2019. 600 p.
3. Zinchenko V.M. Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoy obrabotki [Gear

surface engineering by thermal-chemical treatment methods]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2001. 303 p. (in Russian).

4. Esipov R.S., Abdullin R.A., Khusainov Yu.G., Nikolaev A.A. Ion nitriding of high-alloy structural steels having ultrafine structure at different temperatures. Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies, 2021, no. 10. pp. 102–107.

5. Prokofiev M.V., Petrova L.G., Belashova I.S., Bibikov P.S. The effect of stadial nitrogenization on the structure and properties of martensitic steel 13X11N2V2MF. Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, vol. 2021, no. 12(126), pp. 12-19. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-12-12-19.

6. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Vdovin V.M., Demin P.E. Improvement of operation lifetime of high-speed steel tools when nitriding with controlled nitrogen potential. Science-intensive technologies in machine-building, 2022, no. 1 (127), pp. 3–10.

7. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Fakhurtdinov R.S., Alekseeva M.S., Danilov V.D., Smirnov A.E., Gromov V.I. Improvement of mechanical properties of heat-resistant steels by activation of the nitriding process. Problems of machine building and machine reliability, 2014, no. 2, pp. 90–95.

8. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. Physical criteria of wear resistance of metal materials in surface-active lubricating media // Proc. The Conference on Tribology “Friction, Lubrication and Wear – 50 years on”. London. IME, 1987. P. 419–426.

9. Savchenko V.I., Shchukin E.D. On the relationship between phenomenological and structural criteria for the operation of friction units. Trenie i iznos, 1987, no. 4, pp. 581–589. (in Russian).

10. Tushinsky L.I., Poteryaev Yu.P. Problems of materials science in tribology. Novosibirsk: NETI, 1991. 64 p.

11. Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 320 p.

12. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. Pov-erkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin [Surface layer and service properties of machine parts] Moscow: Mashinostroenie, 188, 240 p. (in Russian).

13. Michugina M.S. Razrabotka strukturnogo sostoyaniya azotirovannogo sloya konstruktsionnih staley, otvetstvennogo za ih iznosostoykost' dis.kand. techn. nauk [Development of the structural state of the nitrided layer of structural steels responsible for their wear resistance. Ph.D. Extended Abstract of Thesis] Moscow: MAI (State Technical University), 2008, 16 p. (in Russian).

14. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. The influence of rough machining of structural nitrided steels on their tribotechnical characteristics. MiTOM, 2023, no. 1, pp. 10–15.

15. Drozdov Yu.N., Rybakova L.M., Litvinov I.P., Pavlik B.B., Sidorov S.A. Kinetics of fracture steel destruction under friction. Friction and wear, 1989, no. 5. pp. 773–778.

16. Kuksenova L.I., Michugina M.S. Influence of oxidation conditions on the structure and wear resistance of layers on steel 38Kh2MYuA. MiTOM. 2008. no. 2 (632). pp. 29–34.

17. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Kraposhin V.S., Lisotsky I.V., Berezina E.V., Lapteva V.G. Influence of the nanocrystalline phase of iron nitrides on the wear-resistant bone of nitrided steel 38Kh2MYuA. Ma-ter. All-Russian Scientific and Technical. conf. with international participation "Machine-building technologies". M.: IMASH RAN, 2010, p. 216–218.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.01.2023; одобрена после рецензирования 30.01.2023; принята к публикации 03.02.2023.

The article was submitted 24.01.2023; approved after reviewing 30.01.2023; assepted for publication 03.02.2023.