

Научная статья
УДК 621.785.53:620.178.16.620.186
doi: 10.30987/2223-4608-2024-28-40

Прогнозирование и оценка триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин

Лидия Ивановна Куксенова¹, д.т.н.

Мария Сергеевна Алексеева², к.т.н.

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия

² НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ГНЦ РФ, Москва, Россия

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

² alekseeva_ma@list.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. На основе законов трибологии, триботехники и результатов экспериментальных исследований изменений структуры и свойств в зоне контактной трибодформации конструкционных сталей и сплавов разных структурных классов, подвергнутых азотированию, разработан подход к прогнозированию и комплексной оценке триботехнической эффективности азотирования конструкционных материалов и изделий из них. 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 меньшую склонность к охрупчиванию азотированного слоя вследствие снижения уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы. При этом предварительные виды обработки (термическая и деформационная) азотируемых сталей являются средством формирования структурно-фазового состояния поверхностного слоя, обладающего повышенными триботехническими характеристиками. Для азотированных сплавов на основе железа с разными кристаллическими решетками матрицы 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, плотность их распределения, микродеформация кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения рентгеновских линий структурных составляющих материала зоны деформации при трении, твердость азотированного слоя и ее изменения при трении. Эти экспериментальные результаты положены в основу предлагаемого метода оценки и прогнозирования триботехнической эффективности металлов. Его суть состоит в том, что на основе трибологического критерия, содержащего микро- и макроскопические характеристики материала зоны контактной деформации при трении, проводится выбор режимов обработки изделия для обеспечения допустимого уровня интенсивности изнашивания. Затем экспериментально с помощью метода поверхностной пластической деформации оценивается способность азотированного слоя, сформировавшегося в результате обработки по выбранному режиму, воспринимать поверхностную пластическую деформацию без разрушения, что служит обоснованием выбранного режима азотирования. Завершением оценки является определение величин предельной работоспособности азотированного материала в условиях трения и изнашивания (предельно допустимого давления, при котором пара работает устойчиво; критического давления, после которого пара неработоспособна, но возможна ее эксплуатация при кратковременных перегрузках; средней суммарной интенсивности изнашивания пары в целом). Совокупность выявленных параметров позволяет рекомендовать материал, его обработку и прогнозировать режимы эксплуатации и долговечность трибосопряжения.

Ключевые слова: конструкционные материалы, азотирование, структура, поверхностные слои, износостойкость, эксплуатационные свойства

Для цитирования: Куksenova Л.И., Алексеева М.С. Прогнозирование и оценка триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 28–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-28-40

Forecasting and assessment of tribotechnical efficiency of the nitration case of machine parts

Lidiya I. Kuksenova¹, D.Eng.
Maria S. Alekseeva², PhD Eng.

¹ A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS), Moscow, Russia

² RDE «Kurchatov Institute» – VIAM, SSC RF, Moscow, Russia

¹ lkukc@mail.ru

² alekseeva_ma@list.ru

Abstract. Following the laws of tribology and tribotechnics, also the results of experimental studies of reality of structure and properties change in the zone of contact tribodeformation of structural steels and alloys of different structural classes subjected to nitriding, an approach to forecasting and comprehensive assessment of the tribotechnical efficiency of nitriding of structural materials and products made of them has been developed. Analysis of the patterns of changes in the structure of the diffusion zone of nitriding steels: abnormal, martensitic and austenitic, and relative wear resistance tests, taking into account their composition and technological parameters of the treatment process, showed that maximum wear resistance was provided by a nitration coating containing hardening dispersed particles of incoherent nitrides, ensuring a lower liability to brittle behavior of the nitration case due to low level of matrix level microdeformation. At the same time, preliminary types of treatment (thermal treating and deformation processing) of nitriding steels contribute to structural and phase state of the surface layer, which has added tribological performance. For nitrided ferroalloys with different matrix lattices, the most significant characteristics of the structural state and properties of the surface layers affecting the level of surface fracture under friction have been found empirically: the particle size of nitrides of alloying elements, the distance between them, the density of their distribution, the matrix lattice microdeformation, the values of X-ray lines intrinsic broadening for structural components of the material in the friction deformation zone, the hardness of the nitration case and its changes under friction. These experimental results are taken as a principle of the proposed method for forecasting and assessment of metal tribotechnical efficiency. This principle of method is based on a tribological criterion containing micro- and macroscopic characteristics of the material in the zone of contact deformation under friction, the choice of fabricating methods for the product takes place to ensure an acceptable level of wear intensity. Then, by measurement, using surface large deformation method, the ability of the nitration case formed as a result of treatment according to the selected treatment schedule to perceive surface nondestructive plastic deformation is evaluated. It affords a basis for the selected nitriding treatment schedule. The completion of the assessment is the determination of the values of the maximum operability of the nitriding material under conditions of friction and wear (alarm pressure when a tribocouple operates steadily; critical pressure when it is inoperable, but its operation is possible with short-term overloads; the average total wear intensity of the couple combined). The totality of the identified parameters allows recommending the material, its working and predicting operating modes and durability of tribounit.

Keywords: structural materials, nitriding, structure, case, wear resistance, operational properties

For citation: Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Forecasting and assessment of tribotechnical efficiency of the nitration case of machine parts / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 28–40. doi: 10.30987/2223-4608-2024-28-40

Введение

Повышение надежности и долговечности деталей машин является одной из главных проблем современного машиностроения. Как показывает статистический анализ, большинство машин (85...90 %) выходят из строя не из-за поломки, а в результате износа поверхностей отдельных нагруженных деталей. Например, в автомобильной промышленности 60...70 % автомобильных двигателей поступает в ремонт из-за износа подшипников, валов, зубчатых передач, гильз цилиндров и

других пар трения. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость: для автомобилей в ~6,0 раз, для самолетов до 5,0 раз, для станков до 8,0 раз.

В настоящее время триботехника и трибология развиваются стремительными темпами, которые определяются требованиями создания надежных, долговечных и экономичных машин, приборов, инструментов, технологического оборудования. Неслучайно известный ученый в области надежности машин А.С. Проников назвал

трибологию опорой проблемы надежности и качества машин [1]. При изготовлении узлов трения их надежность достигается применением качественных конструкционных и смазочных материалов, методов обработки, контроля, управления ходом технологического процесса изготовления и сборки, применением современных методов испытаний, доводки и других средств современного технологического уровня. Особое место среди перечисленных средств занимает обеспечение и оценка качества и свойств поверхностных слоев конструкционных материалов.

Технический прогресс отражает стремление конструкторов к использованию таких материалов, которые обеспечат повышение мощности оборудования, длительность эксплуатации без ремонта, живучесть конструкции, в частности создаваемого узла трения. В основу аналитической оценки работоспособности и долговечности узла трения чаще всего входят определяющие показатели механических свойств конструкционных материалов – предел прочности σ_b ; твердость HB; предел текучести σ_{02} ; относительное сужение ψ и относительное удлинение δ ; ударная вязкость (KCV); предел выносливости σ_{-1} ; сопротивление срезам $\tau_{ср}$ и др. [2].

Известно, что характеристики механических свойств конструкционных материалов зависят от их структурно-фазовых особенностей (типа структуры, ее способности к упрочнению при механической и термической обработке, разных условиях нагружения, разупрочнению при тепловом воздействии, фазовым превращениям). Поэтому в науке о трении и изнашивании одной из ведущих задач является разработка методов направленного, методически и научно обоснованного выбора конструкционного материала и способов воздействия на поверхностные слои деталей с позиций совокупности структурночувствительных свойств, управления поверхностной прочностью твердых тел. Сложность этой задачи состоит в том, что поверхностные микрообъемы контактирующих под нагрузкой и при взаимном перемещении твердых тел в условиях динамических воздействий, характерных для внешнего трения, легче, чем объемные слои, переходят в новое структурное состояние, постоянно корректируя механизм контактного взаимодействия. Закономерности структурных изменений в поверхностных слоях и механизм их контактного взаимодействия взаимосвязаны. В связи с этим разработка мероприятий,

направленных на повышение износостойкости трущихся сопряжений, предполагает углубление представлений о кинетике структурных, фазовых и диффузионных превращений, прочностных свойствах активных микрообъемов поверхности, а также разработку численных критериев качества поверхностного слоя, прогнозирования его работоспособности с позиций оптимального структурного состояния и соответствующих режимов поверхностной обработки, включая химико-термическую.

Для увеличения срока службы машин применяются разнообразные виды химико-термической обработки, которые рассматриваются не просто как способ модификации поверхностных слоев изделий из конструкционных материалов, но и как методы инженерии поверхности [3]. Азотирование служит распространенным способом поверхностной обработки. Принципиальным преимуществом азотирования для промышленности является незначительная деформация формы и размеров деталей. Изменения объема при азотировании невелики и могут быть учтены при изготовлении детали. Объемы шлифования, если оно требуется, малы. Особое место среди достоинств азотирования является обеспечение высокой противозадирной стойкости поверхностного слоя стали [4]. Отмеченные преимущества объясняют непрерывный рост масштабов применения азотирования для повышения долговечности нагруженных деталей машин.

Например, в последнее время усовершенствуются методы химико-термической обработки, в частности азотирования деталей авиационного назначения [5]. Предложен новый метод газового азотирования, позволяющий получать качественные диффузионные слои, отвечающие требованиям эксплуатации изделий авиационного назначения [6], а также стойкости режущего инструмента из стали Р6М5 [7].

В работе [8] приведены основы теории и практики азотирования. Отмечается, что важными технологическими параметрами, обеспечивающими достижение требуемых эксплуатационных характеристик изделий, являются состав и предварительная обработка стали, температура и длительность азотирования, степень диссоциации аммиака. При выборе стали используются чаще всего стандартные механические характеристики σ_b , HB, при этом увеличение твердости считается

основным средством повышения эффективности азотирования.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований изменений структуры и свойств в зоне контактной трибодетформации конструкционных сталей и сплавов разных структурных классов, подвергнутых азотированию, с целью разработки основ критериального трибологического контроля качества поверхностных слоев и прогнозирования их работоспособности в тяжело нагруженных узлах трения.

Материалы и методы исследования

Исследовали стали и сплавы перлитного и мартенситного классов (40X, 38X2МЮА, ВКС-7, модельные сплавы Fe-Cr, Fe-Mo, Fe-Al); аустенитную сталь 12X18Н10Т и модельные сплавы на основе γ -Fe, легированные Ni, Cr, Al, Ti. Элементный состав сплавов приведен в табл. 1.

Стали 40X, 38X2МЮА, ВКС-7 подвергали улучшению по стандартным режимам. Модельные сплавы перед азотированием отжигали при

900 °С 2,0 ч. После предварительной обработки исследуемые стали и сплавы подвергали газовому азотированию в среде диссоциированного аммиака и азотированию в тлеющем разряде (ионное азотирование).

Триботехнические испытания проводили по нескольким схемам: на стенде с возвратно-поступательным движением плоских сопрягаемых образцов при давлении $p = 10...40$ МПа и скорости скольжения $v = 0,19$ м/с; на стенде СМЦ-2 в условиях качения с проскальзыванием при $N = 500$ Н ($p = 348$ МПа) и $v = 0,96$ м/с; для схемы скольжения ролика по плоскости использовали машину трения Шкода-Савин при числе оборотов ролика 675 мин^{-1} и давлении 150 Н. В качестве смазочных сред применяли разные пластичные смазочные среды и индустриальные масла. Испытания характеризуются условиями тяжело нагруженного контакта. Определяли макроскопическую характеристику пары трения в целом – износостойкость сталей, связанную с уровнем поверхностного разрушения в условиях контактной трибодетформации.

1. Состав модельных сплавов

1. Composition of model alloys

Химический состав модельных сплавов, (ат, %)									
Модельные сплавы	C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Mn	S	P
Fe + 1%Cr	≤0,020	0,90	0,05	-	-	-	≤0,5	≤0,014	≤0,015
Fe + 2%Cr		2,10	0,05	-	-	-			
Fe + 3%Cr		2,80	0,05	-	-	-			
Fe + 4%Cr		3,90	0,05	-	-	-			
Fe + Mo		0,10	0,05	3,9	-	-			
Fe + Al		0,10	0,04	-	3,80	-			
Fe + 29%Ni	≤0,015	-	28,99	-	-	-	≤0,015		
Fe + 29%Ni + 1%Cr	≤0,025	0,91	28,66	-	-	-			
Fe + 29%Ni + 2%Cr		1,82	28,22	-	-	-			
Fe + 29%Ni + 4%Cr		3,66	25,85	-	-	-			
Fe + Ni + Cr		3,66	25,85	-	-	-			
Fe + Ni + Al		0,10	28,70	-	1,91	-			
Fe + Ni + Ti		0,10	27,72	-	-	3,37			
Fe + Ni + Cr + Al + Ti	≤0,020	1,30	28,00	-	0,70	1,60			

Кроме того, исследовали конструкционные стали: 38X2МЮА (ГОСТ 4543-71), 40X (ГОСТ 8479-70), ВКС-7, 12X18Н10Т (ГОСТ 5949-75).

Для оценки структурного состояния поверхностных слоев применяли

металлографический, рентгеноструктурный и электронно-микроскопический методы, с помощью которых оценивали микроскопические характеристики материала зоны контактной деформации: физическое уширение рентгеновских линий, фазовый состав, характеристики субструктуры

матрицы и нитридов, размеры упрочняющих частиц, плотность их распределения, критическую плотность дислокаций, запас деформационной способности.

Рассмотрим особенности структурных превращений в зоне контактной деформации стальных азотированных пар трения, которые составили основу для разработки способа оценки и прогнозирования работоспособности азотированных слоев при трении.

Фазовый состав поверхностного слоя по нормали от свободной поверхности для сталей перлитного класса характеризуется следующими составляющими: оксиды Fe_3O_4 ; ϵ -фаза ($Fe_{2-3}N$); смесь ($\epsilon+\gamma'$)-фаз ($Fe_{2-3}N$ и Fe_4N) в виде чередующихся пластинчатых образований; γ' -фаза (Fe_4N) с

тонкими прослойками ϵ -фазы; α -Fe с дисперсными включениями нитридов легирующих элементов. С практической точки зрения поверхностный слой представляет собой две основные составляющие: нитридный слой (соединения железа с азотом) и диффузионную зону (матрицу с распределенными включениями нитридов легирующих элементов). Износ сталей зависит от фазового состава. Экспериментально установлено, что область установившегося режима трения азотированной стали характеризуется двумя уровнями высокой износостойкости: $0,5 \cdot 10^{-10}$ и $0,5 \cdot 10^{-9}$ (табл. 2). Заметим, что износ неазотированной стали для тех же условий испытаний составляет величину $I_h \approx 10^{-8}$.

2. Структура и износ азотированной стали 38X2MЮА

2. Structure and wear of nitriding steel 38X2MYA

Расстояние от поверхности, мкм	Фазовый состав	Интенсивность изнашивания I_h ($P = 10$ МПа)	Положение на кривой изнашивания
0...5,0	Оксиды железа	$10^{-8} \dots 10^{-9}$	Приработка
5,0...20	ϵ -фаза ($Fe_{2-3}N$)	$0,5 \cdot 10^{-10}$	Первый уровень низкого износа
20...25	$\epsilon+\gamma'$ ($Fe_{2-3}N + Fe_4N$)	$0,4 \cdot 10^{-9}$	Переход ко второму уровню низкого износа
> 25	Диффузионная зона (α -Fe + нитриды)	$0,5 \cdot 10^{-9}$	Второй уровень низкого износа

На временном отрезке пути трения, соответствующем периоду приработки, происходит преимущественное разрушение слоя оксидов железа; зона повышенной износостойкости (уровень предельно низкого износа) состоит из ϵ -фазы в наноструктурном состоянии. Область перехода во вторую зону высокой износостойкости, характеризуется ростом отношения объемных долей фаз γ'/ϵ . В зоне второго уровня высокой износостойкости деформационные процессы локализуются в диффузионном слое (α -Fe + специальные нитриды). Результаты рентгеноструктурного анализа зоны поверхностной пластической деформации стали при трении показали, что переход материала в неработоспособное состояние характеризуется высоким значением физического уширения рентгеновских линий α -Fe ($\beta_{(hkl)}$), свидетельствующем о накоплении предельной плотности дефектов кристаллической решетки, приводящей к разрушению

поверхности трения. Заметим, что величина $\beta_{(hkl)}$ связана с плотностью дислокаций ρ соотношением $\rho = A[\beta_{(hkl)}]^2$, здесь A – не зависящая от $\beta_{(hkl)}$ размерная постоянная, $[A] = (\text{см} \cdot \text{рад})^{-2}$.

Если механизм формирования нитридов железа и их уровень износостойкости очевидны, то механизм образования и роль специальных нитридов в диффузионной зоне с позиций трибологии длительное время носит дискуссионный характер [9]. На основе проведенного нами комплекса экспериментальных исследований материалов, указанных в табл. 1, установлены три основных типа упрочняющей фазы азотированного слоя в сталях перлитного, мартенситного и аустенитного классов. При низких температурах азотирования (~ 500 °C) формируются тонкие, однослойные зародыши, полностью когерентные с решеткой матрицы; при более высоких температурах (~ 540 °C) образуются полукogerентные выделения; при

температурах $\sim 560 \dots 620$ °C наблюдаются нитриды с нарушенной когерентностью. В сталях перлитного и аустенитного классов преимущественным является гомогенное зарождение нитридных частиц, в сталях мартенситного класса (например, ВКС-7) – гетерогенное (при низких температурах азотирования $500 \dots 520$ °C одновременно присутствуют когерентные зародыши нитридной фазы размером в несколько нанометров и некогерентные, образующиеся на дефектах кристаллического строения, размером $10 \dots 15$ нм). При комплексном легировании нитридообразующими элементами сталей перлитного, мартенситного и аустенитного классов уменьшается размер нитридов, что связано с изменением коэффициентов диффузии легирующих элементов и азота.

Важную роль в износостойкости азотированных сталей играет микродеформация кристаллической решетки фаз α - и γ -Fe. Исследования [9]

показали, что максимальная микродеформация кристаллической решетки твердого раствора (матрицы) в сталях перлитного и мартенситного классов достигается при образовании когерентных зародышей нитридов; в сталях мартенситного класса величина микродеформации в $1,5 - 2,0$ раза меньше, чем в сталях перлитного класса после всех исследованных режимов азотирования вследствие образования некогерентных нитридных частиц на дефектах строения. В сталях аустенитного класса (12X18H10T и модельные сплавы) максимальная величина микродеформации наблюдается при образовании нитридов с частично нарушенной когерентностью.

Экспериментальные результаты, представленные на рис.1, иллюстрируют связь между макро- и микроскопическими характеристиками азотированного слоя.

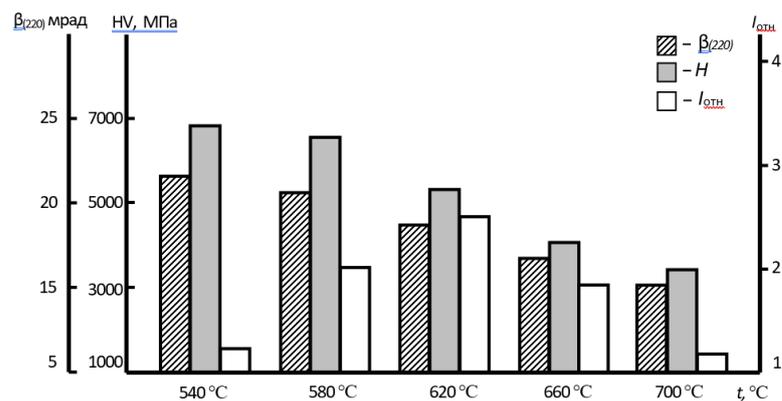


Рис. 1. Влияние температуры азотирования на микротвердость HV, физическое уширение рентгеновских линий α -фазы $\beta_{(220)}$ и относительную износостойкость $I_{отн}$ сплава Fe + 1%Cr

Fig. 1. Influence of nitriding temperature on the microhardness of HV, intrinsic broadening of X-ray lines of α -phase $\beta_{(220)}$ and relative wear resistance of the I_{rel} alloy Fe + 1%Cr

Для сплавов с матрицей феррита характерной особенностью является то, что с повышением температуры азотирования происходит снижение физического уширения рентгеновских линий $\beta_{(220)}$ (следовательно, плотности дислокаций в поверхностном слое) и твердости. Износостойкость растет и имеет максимальное значение при температуре азотирования 620 °C. Аналогичные исследования сплава Fe + 4%Cr показали, что увеличение концентрации хрома до $4,0$ % при сохранении типа кристаллической решетки матрицы не приводит к изменению закономерностей связи $\beta_{(hkl)}$, $I_{отн}$ и HV; отличаются лишь численные значения, в

частности, износостойкость повышается на 20 % и ее максимум соответствует температуре 660 °C.

Электронномикроскопические исследования этих сплавов показали, что при температуре азотирования 540 °C размер нитридов в сплаве с 1% Cr составляет $\sim 1,5$ нм, в сплаве с 4% Cr – $\sim 3,0 \dots 5,0$ нм. Повышение температуры азотирования до $620 \dots 660$ °C приводит к увеличению размера нитридов в сплаве с 1% Cr до $8,0 \dots 10$ нм, а в сплаве с 4% Cr – до $11 \dots 12$ нм. При увеличении размера нитридов уменьшается плотность их распределения и возрастает расстояние между ними, что создает условия для изменения характера движения дислокаций и

облегчения деформации при трении, обуславливая повышение износостойкости. Наибольшая износостойкость достигается при размере нитридов ~ 10 нм, расстояние между которыми составляет 10...15 нм [10].

Влияние типа кристаллической решетки матрицы отражено на рис. 2, где указаны значения твердости HV, физического уширения рентгеновской линии β_{222} , относительной износостойкости $I_{\text{отн}}$ модельных сплавов с ГЦК-решеткой основы.

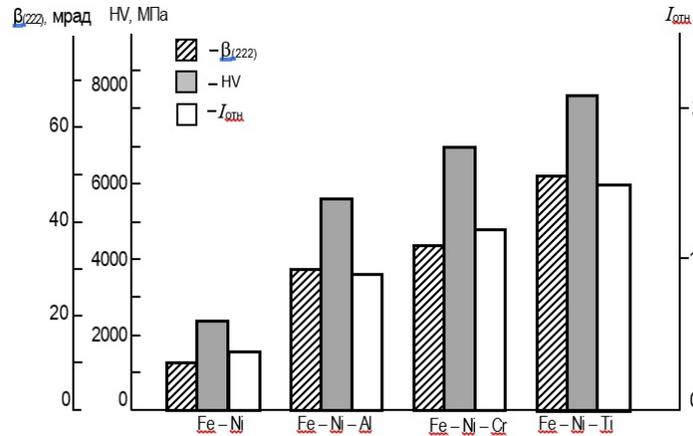


Рис. 2. Влияние типа нитридообразующего элемента на твердость HV, физическое уширение рентгеновских линий γ -фазы $\beta_{(222)}$ и износостойкость $I_{\text{отн}}$ азотированного слоя $t_n = 540$ °C

Fig. 2. Influence of the type of nitride-forming element on the hardness of HV, intrinsic broadening of X-ray lines of γ -phases $\beta_{(222)}$ and wear resistance I_{rel} of the nitrided layer $t_n = 540$ °C

Все анализируемые макро- и микроскопические характеристики поверхностного слоя сплавов растут в последовательности: Fe-Ni; Fe-Ni-Al; Fe-Ni-Cr; Fe-Ni-Ti и свидетельствуют о влиянии типа легирующего элемента. Электронно-микроскопические исследования показали, что особенности формирования азотированного слоя с разными нитридообразующими элементами связаны с образованием нестабильных зародышей для нитридных фаз, когерентных матрице, изменением их размера и состава, частичным нарушением когерентности по мере повышения температуры азотирования. Стадии формирования структуры азотированного слоя обусловлены разной природой легирующих элементов, а твердость и износостойкость определяются особенностями дислокационной структуры и механизмов движения дислокаций в зависимости от связи решеток матрицы и нитридов (механизм перерезания или огибания частиц дислокациями).

Максимальные упрочнение при азотировании и износостойкость достигаются на стадии, предшествующей образованию

некогерентных частиц. При этом для распространенного диапазона температур азотирования 500...660 °C установлено, что мероприятия, способствующие повышению твердости азотированного слоя аустенитных сталей, позволяют создавать более износостойкие поверхностные слои.

В [11] представлены данные по изменению характеристик поверхностного слоя при трении, связанные с предварительной обработкой азотированной стали. Показано, что температура предварительного отпуска стали и условия нагрева образцов при азотировании оказывают существенное влияние на триботехнические характеристики. Это воздействие является следствием высокой чувствительности структурного состояния к температуре обработки как слоя нитридов железа Fe_{2-3}N , так и диффузионной зоны.

Более того, предварительная термическая обработка азотируемых сталей является фактором управления структурой и свойствами азотированного слоя за счет направленного воздействия на процесс образования нитридных частиц заданного размера и

плотности их распределения, а также свойств и структуры слоя нитридов железа, непосредственно прилегающего к свободной поверхности. Поверхностная пластическая деформация, осуществляемая после предварительной термической обработки, приводит к снижению уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы и повышению эксплуатационных свойств азотированной стали (в два раза повышается контактная долговечность). Следовательно, если температура отпуска стали влияет на соотношение когерентных, полукogerентных и некогерентных нитридных частиц в диффузионной зоне при азотировании, то предварительная поверхностная пластическая деформация корректирует их соотношение в направлении увеличения доли некогерентных выделений, в совокупности способствуя созданию более работоспособного поверхностного слоя в условиях контактной деформации, трения и изнашивания.

Таким образом, для разных температур азотирования и предварительной обработки сплавов на основе железа экспериментальные триботехнические и металлофизические исследования выявили совокупность наиболее значимых характеристик структурного состояния, влияющих на работоспособность поверхностных слоев при трении. К ним относятся размер частиц нитридов легирующих элементов и расстояние между ними, плотность распределения упрочняющих частиц, микродеформация кристаллической решетки твердого раствора на основе железа, значения физического уширения рентгеновских линий матрицы зоны контактной трибодеформации (характеризующей степень деформации стали и плотность дислокаций), твердость азотированного слоя и ее изменения при деформации, показатель запаса пластичности (деформационной способности). Поэтому необходимы такие подходы к оценке триботехнической эффективности азотирования сталей и прогнозированию работоспособности поверхностного слоя в условиях трибоконтактной деформации, которые основываются на комплексе характеристик структурного состояния поверхностного слоя и механических свойств (например, твердости).

На основе накопленного экспериментального материала авторами разработан экспериментальный способ прогнозирования и оценки триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин. Его применение состоит из трех этапов. На первом этапе выбирается режим азотирования на основе трибологического критерия качества азотированной стали [12]. В такой же последовательности устанавливается режим цементации [13].

Рассмотрим аналитическое выражение трибологического критерия качества азотированной стали. В его основу положены физические принципы критериальной оценки цементованной и азотированной сталей. Разработано выражение для обобщенного параметра азотированного поверхностного слоя, деформированного в условиях трения:

$$K_{аз} = \frac{\left[H_0 + k_1 \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{1,75} [DbA(\beta_{кр}^2 - \beta_0^2)]^2}{\left(k_2 + \frac{e}{8} C_y \right)^2},$$

где H_0 – твердость поверхностного слоя до испытаний; k_1 – экспериментальный коэффициент, определяемый из зависимости $HВ = f((\Delta d/d)^{1/2})$ для стали [14], где $\Delta d/d$ – микродеформация кристаллической решетки; D – средний размер блоков мозаики (оценка этой величины по значениям $\beta_{(110)}$ и $\beta_{(111)}$ показала, что в зоне поверхностной пластической деформации азотированного слоя при трении D в зависимости от условий азотирования изменяется в диапазоне от 15 до 140 нм); b – вектор Бюргерса; $A = 2,10^{16} \text{ см}^{-2}$ – коэффициент, зависящий от упругих свойств материала;

β_0 – физическое уширение линий hkl исследованных азотированных сталей до испытаний; $\beta_{кр}$ – значение физического уширения линий, соответствующее критическому значению плотности дислокаций при трибодеформации.

Для определения этой величины пара с азотированным образцом испытывалась на машине трения до формирования задира, о котором судили по резкому увеличению

коэффициента трения и появлению характерных повреждений поверхности. После этого зона поверхностной пластической деформации исследовалась рентгенографически послойно с помощью специально разработанного метода для трибологических исследований без разрушения поверхности и оценивалась величина физического уширения рентгеновских линий, соответствующая материалу тонкого приповерхностного микрообъема, в котором создаются условия для реализации предельной повреждаемости при трении; k_2 – отношение коэффициента, учитывающего форму дислокационных петель и их распределение по линейным размерам ($\approx 4,0 \dots 5,0$), к геометрическому множителю, учитывающему форму зерна ($\approx 0,785$); e – величина диаметра зоны сдвига; δ – размер частиц нитридов; C_y – концентрация нитридов в слое.

Последовательность действий при выборе режима химико-термической обработки состоит в следующем: в соответствии с требованием по уровню износостойкости $I_{отн}$ (или интенсивности изнашивания, класса износостойкости) и линейной связи $I_{отн} = f(K_{аз})$, рис. 3, определяется величина обобщенного структурного параметра $K_{аз}$ [11].

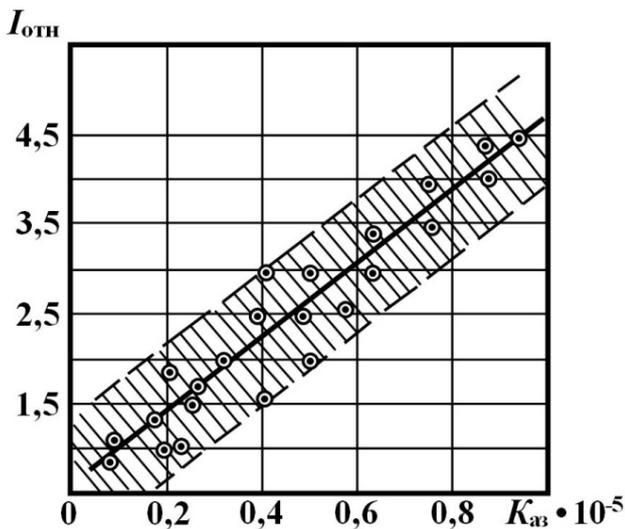


Рис. 3. Зависимость относительной износостойкости $I_{отн}$ от обобщенного параметра $K_{аз}$ азотируемых сталей и сплавов

Fig. 3. Dependence of the relative wear resistance I_{rel} on the generalized parameter K_n of nitriding steels and alloys

После этого, на основе значения $K_{аз}$ и структурных характеристик, систематизированным в [9], можно определить соответствующий размер частиц нитридов, расстояние между ними, микродеформацию кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения рентгеновских линий азотированного твердого раствора, твердость слоя, запас пластичности. Установленная в соответствии с требованиями уровня износа совокупность характеристик структуры и твердости соответствует конкретному режиму азотирования. При этом допускается некоторый температурный интервал азотирования с учетом легирующего состава стали.

Далее азотированные образцы или изделия проходят второй этап испытаний, а именно экспериментальное обоснование выбора режима азотирования. С этой целью применяется экспресс-метод, основанный на оценке способности поверхностного слоя, сформированного химико-термической обработкой, воспринимать пластическую деформацию без разрушения и упрочняться. Для реализации этого метода возможны любые способы поверхностного пластического деформирования. В качестве примера ниже приведены результаты применения гидродробеструйной обработки азотированной стали 38X2МЮА.

Результаты оценки приращения микротвердости ΔHV , физического уширения рентгеновских линий матрицы $\Delta\beta_{(220)}$ в результате гидродробеструйной обработки азотированной стали 38X2МЮА и ее износостойкости после азотирования приведены в табл. 3. Видно, что существует прямая связь между исследуемыми параметрами при изменении температуры азотирования, которая указывает на то, что способность к восприятию деформации и упрочнения поверхностного слоя обеспечивает повышение уровня работоспособности стали при трении. Наибольший триботехнический эффект будет соответствовать наибольшему увеличению ΔHV и $\Delta\beta_{(220)}$. Повышение макро- и микроскопических характеристик (см. табл. 3) позволяет не только обосновать выбранный режим обработки, но и при необходимости ввести соответствующие корректировки.

3. Изменение микротвердости, физического уширения линий при поверхностной пластической деформации и износостойкости азотированной стали 38X2МЮА

3. Changes in microhardness, intrinsic broadening of lines under large surface deformation and wear resistance of 38X2MYA nitriding steel

Температура азотирования, °С	ΔHV , МПа	$\Delta\beta$, мрад	$I_{отн}$
500	500	2,5	1,5
540	550	4,0	1,7
580	1600	8,0	2,5
620	2500	11	4,5

Метод достаточно прост и не требует длительных испытаний. Его физическая сущность основана на том, что материал, имеющий большой запас пластичности, будет иметь и большую способность аккумулировать энергию деформации без разрушения, что обеспечивает его большую износостойкость в условиях контактной трибодеструкции.

После азотирования по выбранному режиму, его корректировки на основе экспресс-оценки способности поверхностного слоя воспринимать поверхностную пластическую деформацию, проводится завершающий этап аттестации азотированной пары трения. Его суть состоит в оценке диапазона работоспособности материалов контактирующей пары [15]. Экспериментально в условиях, наиболее приближенных к реальной эксплуатации, оценивают следующие параметры: предельно допустимое давление P_d , при котором испытываемые пары работают устойчиво, с наименьшими интенсивностями изнашивания обеих деталей (эта величина отражает несущую способность трибосопряжения); средняя суммарная интенсивность изнашивания всех пар данного сочетания материалов при всех давлениях, включая предельно допустимое $I_{h\Sigma} = I_{h1} + (l_{1подв} / l_{2неподв}) I_{h2}$ (эта величина отражает предельный износ материалов); критическое давление $P_{кр}$, при превышении которого пара неработоспособна,

наблюдаются срывы в катастрофический износ, задиры и заедания. Износостойкость пары трения в диапазоне давлений от P_d до $P_{кр}$ также неустойчива, однако давление $P_{кр}$ позволяет оценить работоспособность пары не только при рабочих нагрузках, но и при кратковременных перегрузках.

Для пары трения получают зависимости $I_h = f(P)$ и $f_{тр} = f(P)$, которые определяют диапазон работоспособности материалов пары и потери на трение и износ в этом диапазоне. Все полученные данные заносятся в так называемый паспорт пары трения, в котором обязательными триботехническими характеристиками являются износостойкость (интенсивность изнашивания I_{h1} , I_{h2} , $I_{h\Sigma}$), показатель фрикционности (коэффициент трения), несущая способность (предельно допустимое P_d и критическое давления $P_{кр}$ или стойкость к заеданию) (рис. 4).

Совокупность данных паспорта пары трения и зависимости интенсивности изнашивания от давления служат экспериментальной основой для инженерных расчетов долговечности пар трения. Заметим, что для ускорения выбора материала пары трения и условий обработки можно воспользоваться базой данных триботехнических характеристик пар трения [9], что позволит устранить повторения в исследовательских работах.

Паспорт пары трения	Сталь 20Х — сталь 38Х2МЮА	№ 40
Триботехнические свойства		
<p style="text-align: center;">Износостойкость</p>		<p style="text-align: center;">Фрикционность</p>
$I_{h1} = 0,81 \cdot 10^{-9}$; $I_{h2} = 1,26 \cdot 10^{-9}$; $I_{\Sigma \text{cp}} = 0,50 \cdot 10^{-9}$; $f_{\delta} = 0,1$		
Стойкость к заеданию: $p_{\delta} > 40 \text{ МПа}$ $p_{\text{кр}} > 40 \text{ МПа}$		
Материалы		
Деталь неподвижная (1) Сталь 20Х	Деталь подвижная (2) Сталь 38Х2МЮА	
Вид обработки поверхности		
Цементация, закалка 60...65 HRC	Газовое азотирование 60...65 HRC	
Вид смазочного материала – масло промышленное И-30А		
Условия работы		
Относительное движение – возвратно-поступательное		
Нагружение – постоянная прижимающая нагрузка		
Давление в контакте – до 40 МПа и выше		
Скорость скольжения – 0,1...0,2 м/с		
Температура в контакте – $\leq 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
Окружающая среда – воздух		
Эмпирические зависимости $I_h(p)$		
$I_{h1} = 0,16 \cdot 10^{-9} + 0,016 \cdot 10^{-9} p$; $I_{h2} = 0,59 \cdot 10^{-9} + 0,044 \cdot 10^{-9} p^{0,74}$		
Вероятностные характеристики – средние квадратические отклонения		
$\sigma_1 = 0,24 \cdot 10^{-9}$; $\sigma_2 = 0,3 \cdot 10^{-9}$		

Рис. 4. Пример паспорта пары трения

Fig. 4. Example of a friction couple passport

Совокупность данных паспорта пары трения и зависимости интенсивности изнашивания от давления служат экспериментальной основой для инженерных расчетов долговечности пар трения. Заметим, что для ускорения выбора материала пары трения и условий обработки можно воспользоваться базой данных триботехнических характеристик пар

трения [9], что позволит устранить повторения в исследовательских работах.

Заключение

Работоспособность изделий в эксплуатации определяется совокупностью характеристик механических свойств. В ряде мероприятий, обеспечивающих повышение ресурса работы машин, особое место занимают проблемы

износостойкости материалов. Одним из путей решения задач совершенствования эксплуатационных показателей являются способы направленного модифицирования изделий из конструкционных сталей, в частности азотирование.

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 меньшую склонность к охрупчиванию азотированного слоя вследствие снижения уровня микродеформации кристаллической решетки матрицы. При этом предварительные виды обработки (термическая и деформационная) азотируемых сталей являются средством формирования структурно-фазового состояния поверхностного слоя, обладающего повышенными триботехническими характеристиками.

Для азотированных сплавов на основе железа с разными кристаллическими решетками матрицы 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, плотность их распределения, микродеформация кристаллической решетки матрицы, значения физического уширения рентгеновских линий структурных составляющих материала зоны деформации при трении, твердость азотированного слоя и ее изменения при трении.

Разработан экспериментально-аналитический способ прогнозирования и оценки триботехнической эффективности азотированного слоя деталей машин, основанный на совокупности выявленных микро- и макроскопических характеристик пары трения в целом. Его суть состоит в том, что на основе трибологического критерия, содержащего наиболее значимые характеристики материала зоны контактной трибодформации, проводится выбор режимов обработки изделия для обеспечения допустимого

уровня поверхностного разрушения. С помощью метода поверхностной пластической деформации оценивается способность азотированного слоя, сформировавшегося в результате обработки по выбранному режиму, воспринимать поверхностную пластическую деформацию без разрушения, что является обоснованием конкретного режима азотирования. Завершением оценки служит определение величин предельной работоспособности азотированного материала в условиях трения и изнашивания (предельно допустимого давления, при котором пара работает устойчиво; критического давления, после которого пара неработоспособна, но возможна ее эксплуатация при кратковременных перегрузках; средней суммарной интенсивности изнашивания пары в целом, коэффициента трения). Совокупность выявленных параметров позволяет рекомендовать материал, его обработку и прогнозировать режимы эксплуатации и ресурс работоспособности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Проников А.С.** Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 559 с.
2. **Сорокин Г.М., Малышев В.Н., Куракин И.Б.** Трибология сталей и сплавов. М.: ИЦ РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. 383 с.
3. **Суллов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
4. **Куксенова Л.И., Симонов В.Н., Алексеева М.С., Пахомова С.А., Козлов Д.А.** Исследование трения, износа и противозадирной стойкости тяжело нагруженных азотированных сопряжений // Трение и износ. 2021. № 3. С. 319–328.
5. **Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С.** Совершенствование технологий химико-термической обработки для поверхностного упрочнения высоколегированных сталей авиационного назначения // Научное исследование в машиностроении. 2022. № 8. С. 3–11.
6. **Прокофьев М.В., Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С.** Влияние стадийного азотирования на строение и свойства мартенситной стали 13X11H2B2MФ // Научное исследование в машиностроении. 2021. № 12. С. 12–19.
7. **Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е.** Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Научное исследование в машиностроении. 2022. № 1. С. 3–10.
8. **Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.И., Бемер З.** Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
9. **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.

10. Березина Е.В., Мичугина М.С., Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. Влияние технологии азотирования на структуру и износостойкость стали // Деформация и разрушение. 2008. № 2. С. 44–50.

11. Куксенова Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А. Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 3. С. 23–37.

12. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г., Алексеева М.С. Физические основы критериальной оценки технологии азотирования деталей узлов трения // МТМ. 2012. № 12. С. 39–47.

13. 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.

14. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.

15. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. 237 с.

REFERENCES

1. Pronikov A.S. Parametric reliability of machines. M.: Publishing House of the Bauman. Moscow State Technical University, 2002. 559 p.

2. Sorokin G.M., Malyshev V.N., Kurakin I.B. Tribology of steels and alloys. M.: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, RC, 2013, 383 p.

3. Suslov A.G. The Quality of surface layer of machine parts, Moscow: Mechanical Engineering, 2000, 320 p.

4. Kuksenova L.I., Simonov V.N., Alekseeva M.S., Pakhomova S.A., Kozlov D.A. Research of friction, wear and seizure resistance of extra high loaded nitrided couples // Friction and wear, 2021, no. 3, pp. 319–328.

5. Petrova L.G., Belashova I.S., Bibikov P.S. Improvement of chemical and thermal treatment technologies for surface hardening of high-alloy steels for aviation purposes // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8, pp. 3–11.

6. Prokofiev M.V., Petrova L.G., Belashova I.S., Bibikov P.S. The effect of radial nitrogenization on the structure and properties of martensitic steel 13X11N2V2MF // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 12, pp. 12–19.

7. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Vdovin V.M., Demin P.E. Increasing the durability of high-speed steel tools when nitriding with controlled nitrogen potential // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 1, pp. 3–10.

8. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.I., Boehmer Z. Theory and technology of nitriding. Moscow: Metallurgiya, 1991, 320 p.

9. Gerasimov S.A., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Ospennikova O.G., Alexeeva M.S., Gromov V.I. Surface engineering and operational properties of nitriding structural steels / ed. by E.N. Kablova. Moscow: VIAM, 2019, 600 p.

10. Berezina E.V., Michugina M.S., Lapteva V.G., Kuksenova L.I. Nitriding technology effect on the structure and wear resistance of steel // Deformation and destruction, 2008, no. 2, pp. 44–50.

11. Kuksenova L.I., Alekseeva M.S., Kozlov D.A. Dependence of performance properties of nitriding steels on the structural state of the surface coat // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023, no. 3, pp. 23–37.

12. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Lapteva V.G., Alekseeva M.S. Physical foundations of criterial assessment of nitriding technology for parts of friction units // МТМ, 2012, no. 12, pp. 39–47.

13. Dроздов Ю.Н., Рыбакова Л.М., Литвинов И.П., Павлик Б.Б., Сидоров С.А. Кинетика разрушения конструкционных сталей при трении // Трение и износ, vol. 10(5), 1982, pp. 773–778.

14. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. Москва: Машиностроение, 1982. 212 с.

15. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Lapteva V.G. Wear resistance of structural materials. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2011. 237 p.

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 20.12.2023; одобрена после рецензирования 09.01.2024; принята к публикации 29.01.2024

The article was submitted 20.12.2023; approved after reviewing 09.01.2024; accepted for publication 29.01.2024