

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-88-98

ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОГО СПЛАВА НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ ПОСЛЕ БЕЗЭЛЕКТРОЛИЗНОГО БОРИРОВАНИЯ ПРИ ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Г.С. Севальнев¹, А.А. Красуля²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

Аннотация. Проведены исследования микроструктуры, фазового состава и стойкости чугуна марки Ni-Resist (Нирезист) к абразивному изнашиванию без обработки и после низкотемпературного безэлектролизного борирования. По результатам исследования установлено, что борирование с применением экспериментального состава позволило сформировать диффузионный слой с твердостью до 1800 HV 0,1 и позволит повысить абразивную стойкость при угле атаки 30 градусов, при этом увеличение угла атаки до 60 и 90 градусов приводит к снижению абразивной стойкости.

Ключевые слова: сплав на железной основе, коррозионностойкий чугун Ni-Resist (Нирезист), борирование, твердость, износостойкость, абразивная стойкость, угол атаки

Для цитирования: Севальнев Г.С., Красуля А.А. Исследование абразивного изнашивания высокоуглеродистого сплава на железной основе с повышенным содержанием никеля после безэлектролизного борирования при пониженной температуре // Труды ВИАМ. 2025. № 5 (147). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-88-98.

Scientific article

STUDY OF ABRASIVE WEAR OF HIGH-CARBON IRON-BASED ALLOY WITH INCREASED NICKEL CONTENT AFTER ELECTROLESS BORIDING AT LOW TEMPERATURE

G.S. Sevalnev¹, A.A. Krasulya²

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)», Moscow, Russia; bauman@bmstu.ru

Abstract. In the article the microstructure, phase composition and resistance of Ni-Resist cast iron to abrasive wear without treatment and after low-temperature electrolysis-free boriding were studied. The results of the study showed that boriding using the experimental composition made it possible to form a diffusion layer with a hardness of up to 1800 HV 0,1, to increase abrasive resistance at an attack angle of 30°, while increasing the attack angle to 60 and 90° has led to a decrease in abrasive resistance.

Keywords: iron-based alloy, corrosion-resistant cast iron Ni-Resist, boriding, hardness, wear resistance, abrasion resistance, angle of attack

For citation: Sevalnev G.S., Krasulya A.A. Study of abrasive wear of high-carbon iron-based alloy with increased nickel content after electroless boriding at low temperature. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-88-98.

Введение

Современное оборудование для нефтедобычи – одно из наиболее дорогостоящих из-за сложного комплекса эксплуатационных условий, возникающих в процессе его работы, в частности, для деталей рабочих органов электроцентробежных насосов. К таким условиям можно отнести коррозионное воздействие агрессивных сред при извлечении и перекачке нефтяного сырья, неравномерное распределение давления и возникновение кавитации в рабочем пространстве, а также эрозионное воздействие твердых частиц на поверхности рабочего колеса и направляющего аппарата [1–3].

С точки зрения эффективности применения, а также ввиду высокого комплекса механических и триботехнических характеристик для подобного рода задач широкое применение нашли комплексно-легированные коррозионностойкие стали аустенитного и аустенито-мартенситного классов [4–9]. Однако ввиду необходимости работы в экстремальных условиях при контакте с коррозионно-агрессивными средами, кавитации, а также в условиях дефицита смазки, детали из данных сталей преждевременно разрушаются, что снижает ресурс узлов насосных агрегатов для нефтедобычи. Дополнительное ограничение накладывает также требование по высокой технологичности материала при изготовлении рабочих деталей центробежных насосов, таких как рабочие колеса и направляющие аппараты. Для их изготовления широко применяется чугун марки Ni-Resist (далее – Нирезист) в связи с его высокой коррозионной стойкостью в условиях агрессивных сред [3]. Высокая степень легированности, в особенности никелем, способствует образованию стабильной аустенитной структуры чугуна и вносит существенный вклад в устойчивость к коррозии и окислению.

Рабочие колеса и направляющие аппараты электроцентробежных насосов для нефтедобычи изготавливают из литого чугуна марки Нирезист и в большинстве случаев не подвергают последующему упрочнению путем термической или других видов обработки. Низкие значения твердости чугуна (180–260 HV1) и необходимость постоянной работы в условиях абразивного изнашивания в среде продуктов нефтеперекачки и агрессивных сред активно снижают ресурс конечного изделия, даже несмотря на формирование свободного графита, приводящего к повышению антифрикционных характеристик. Для повышения износо- и коррозионной стойкости детали из чугуна марки Нирезист (тип 1) предлагается подвергать ее химико-термической обработке – борированию, обеспечивающему повышение износо- и абразивостойкости, а также стойкости к коррозионно-агрессивным средам [10]. В зависимости от требований к поверхности и толщине диффузионного слоя для насыщения поверхности бором можно использовать как низкотемпературную, так и высокотемпературную обработку [10–13].

Одно из основных требований, которое предъявляется к материалам для деталей электроцентробежных насосов, – низкая магнитная проницаемость. При высоких температурах химико-термической и термической обработок (>900 °С) в структуре чугуна марки Нирезист увеличивается объемная доля магнитной мартенситной фазы, что негативно отражается на эксплуатации в условиях агрессивных сред [14]. Учитывая данный факт, предлагается проводить процесс борирования при температуре 700 °С, когда стабильность аустенитной структуры сохраняется без полиморфного превращения и перекристаллизации, ввиду чего исключается протекание мартенситного превращения. Следует отметить, что одним из наиболее подверженных износу абразивными частицами участков рабочего колеса и направляющего аппарата являются лопасти, которые

в зависимости от конфигурации расположены под разными углами к центральному диаметру детали, что накладывает дополнительные ограничения по применению технологий упрочнения методом жидкостного электролизного борирования.

Известно, что технология борирования обеспечивает высокую поверхностную твердость, за счет чего она достаточно эффективна при поверхностном абразивном износе [10, 11]. Однако при абразивном износе в потоке агрессивной среды данная технология может не обеспечить требуемого эффекта, так как этот вид износа имеет сложный характер, представляющий собой сочетание как поверхностного абразивного износа, так и ударного абразивного воздействия частиц, находящихся в потоке. В условиях такого износа уровень динамического воздействия и макрорельеф поверхности трения в первую очередь определяются ориентацией газоабразивного потока к этой поверхности, или так называемым углом атаки, т. е. углом наклона вектора скорости абразивной частицы к поверхности [15].

При внедрении абразивной частицы в поверхностный слой в условиях удара происходит деформирование приконтактной зоны, вследствие чего в этом слое возникает неоднородное напряженно-деформированное поле с переменной границей [16]. Поэтому цель данной работы – анализ исследования абразивной стойкости при разных углах атаки боридных слоев на образцах из чугуна Нирезист (тип 1) после жидкостного борирования при пониженной температуре.

Материалы и методы

В качестве материала для исследования использовали образцы из чугуна марки Нирезист (тип 1) диаметром $\varnothing 50$ и толщиной 5 мм. Усредненный химический состав материала образцов следующий [14]:

Элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Fe
Содержание элементов, % (по массе)	2,5	2,1	1,0	1,9	15,0	6,5	Остальное

Борирование проводили при температуре 700 °С с выдержкой 10 ч в экспериментальном расплаве на основе тетрафторбората калия и оксида бора с добавкой борсодержащих компонентов (карбид бора и т. п.) с высокой концентрацией борсодержащего вещества.

Металлографический анализ структуры чугуна марки Нирезист после упрочняющей термической обработки проводили на оптическом инвертированном микроскопе при увеличении $\times 1000$.

Исследование распределения микротвердости осуществляли по толщине борированного слоя и в сердцевине образцов по методу Виккерса при нагрузке 0,988 Н (100 г) в соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Для оценки толщины диффузионного слоя использовали метод аппроксимации твердости поверхности и сердцевины, который позволил достаточно точно определить этот параметр.

Рентгеновскую съемку для определения фазового состава борированного слоя выполняли на дифрактометре с вертикально расположенным гониометром высокого разрешения модульной конструкции в $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении. Дифрактограммы расшифровывали с применением встроенного программного обеспечения по общепринятым методикам.

Испытания на абразивную износостойкость проводили на экспериментальном стенде, согласно ASTM G76-13 [17–19]. Конструктивные особенности стенда

обеспечивают проведение исследований влияния различных параметров взаимодействия абразивных частиц, находящихся в воздушно-абразивном потоке, таких как угол атаки (от 15 до 90 градусов), скорость соударения (до 300 ± 5 м/с) и концентрация частиц (до 500 г/м^3), а также температура рабочей поверхности образца (до $600 \text{ }^\circ\text{C}$). Схема стенда показана на рис. 1.

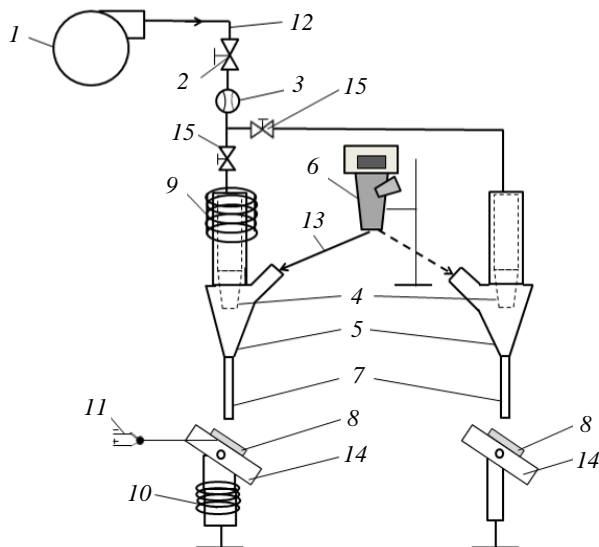


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – винтовой компрессор; 2 – фильтр; 3 – поплавковый ротаметр; 4 – разгонная трубка; 5 – камера смешения; 6 – дозатор частиц; 7 – стабилизирующая трубка; 8 – образец; 9 – спиральный нагревательный элемент; 10 – керамический нагреватель; 11 – термоэлектрический преобразователь; 12 – магистраль подачи воздуха; 13 – магистраль подачи твердых частиц; 14 – держатель образца; 15 – поворотная задвижка [17–19]

При абразивных испытаниях измеряли время экспозиции (t , с) и потерю массы образца (Δm , г) за время экспозиции t образца на стенде.

Испытания образцов проводили при следующих параметрах:

- скорость соударения воздушно-абразивного потока с поверхностью образца 170 м/с;
- углы атаки твердых частиц 30, 60 и 90 градусов;
- расход твердых частиц $5 \cdot 10^{-5}$ кг/с;
- твердые частицы – частицы электрокорунда Al_2O_3 в виде многоугольников неправильной формы со средним размером $250 \div 300$ мкм и микротвердостью $1500 \pm 50 \text{ HV } 0,1$;
- температура проведения испытаний $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Общая продолжительность экспозиции образцов на стенде составила 85 мин. Через 5 мин после начала эксперимента, а затем через каждые 10 мин образцы взвешивали и фотографировали в области, где происходило соударение твердых частиц с поверхностью образца (абразивный след).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Борирование при низких температурах ($700 \text{ }^\circ\text{C}$ и менее) обусловлено пониженной степенью коробления, отсутствием перерекристаллизации и возможным формированием

мартенсита закалки при охлаждении с температуры борирования. С другой стороны, при данных температурах скорость диффузии достаточно низкая, ввиду чего подобран состав для определения качественных диффузионных слоев. Микроструктура образца после борирования, последующего охлаждения в масле и низкого отпуска, представленная на рис. 2, состоит из аустенитной матрицы с достаточно равномерно распределенными выделениями пластинчатого графита и боридного слоя. Установлено, что после борирования при температуре 700 °С сформирован диффузионный слой толщиной от 40 до 50 мкм.

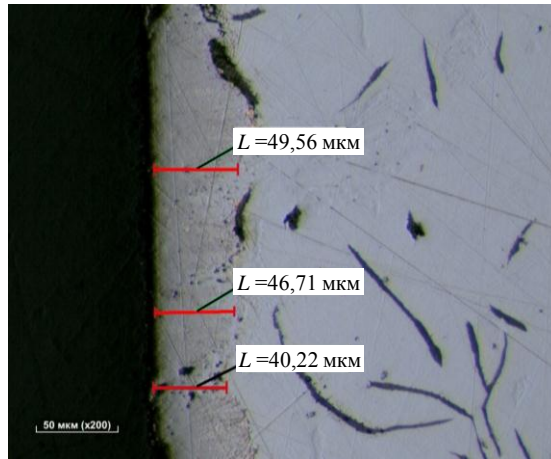


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) чугуна марки Нирезист после безэлектролизного борирования при температуре 700 °С в течение 10 ч (L – толщина диффузионного слоя)

По результатам металлографического анализа установлено, что в полученном боридном слое также присутствует пластинчатый графит. Переходная диффузионная зона не имеет ярко выраженной игольчатости, в то же время боридный слой не имеет сплошной четкой границы, как у коррозионноустойчивых сталей. В связи с этим исследовали распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя по пяти дорожкам с последующим усреднением значений.

Результаты исследования распределения микротвердости позволили подтвердить, что средняя толщина диффузионного слоя составляет ~ 45 мкм (рис. 3).

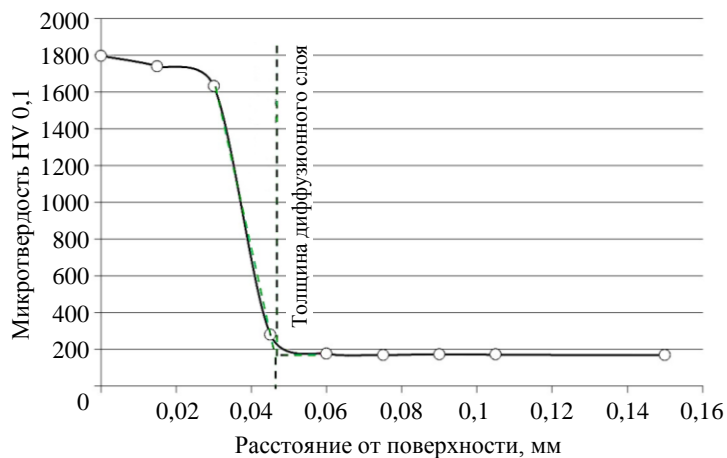


Рис. 3. Распределение микротвердости по толщине боридного слоя образцов чугуна марки Нирезист (тип 1)

Борированный диффузионный слой, сформированный на образцах из чугуна марки Нирезист после низкотемпературного безэлектролизного жидкостного борирования на данном составе, состоит из соединений FeB, Fe₂B и твердого раствора с гранцентрированной кубической решеткой (рис. 4).

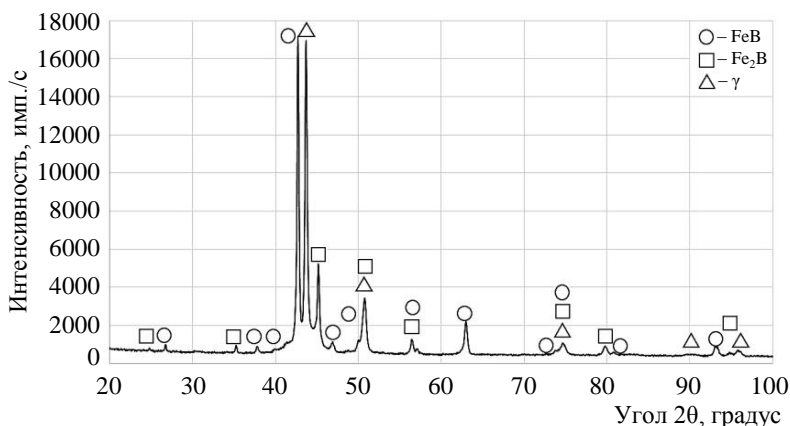


Рис. 4. Дифрактограмма диффузионного боридного слоя после безэлектролизного борирования при температуре 700 °С в течение 10 ч

Для подтверждения стойкости боридных слоев, полученных борированием при температуре 700 °С в расплаве на основе тетрафторбората калия и оксида бора, проведены испытания на абразивную износостойкость на экспериментальной установке в соответствии с ASTM G76-13. По результатам проведенных испытаний на абразивную износостойкость установлено, что зависимости изменения массы от продолжительности испытания образцов после борирования и без обработки имеют линейный характер (рис. 5).

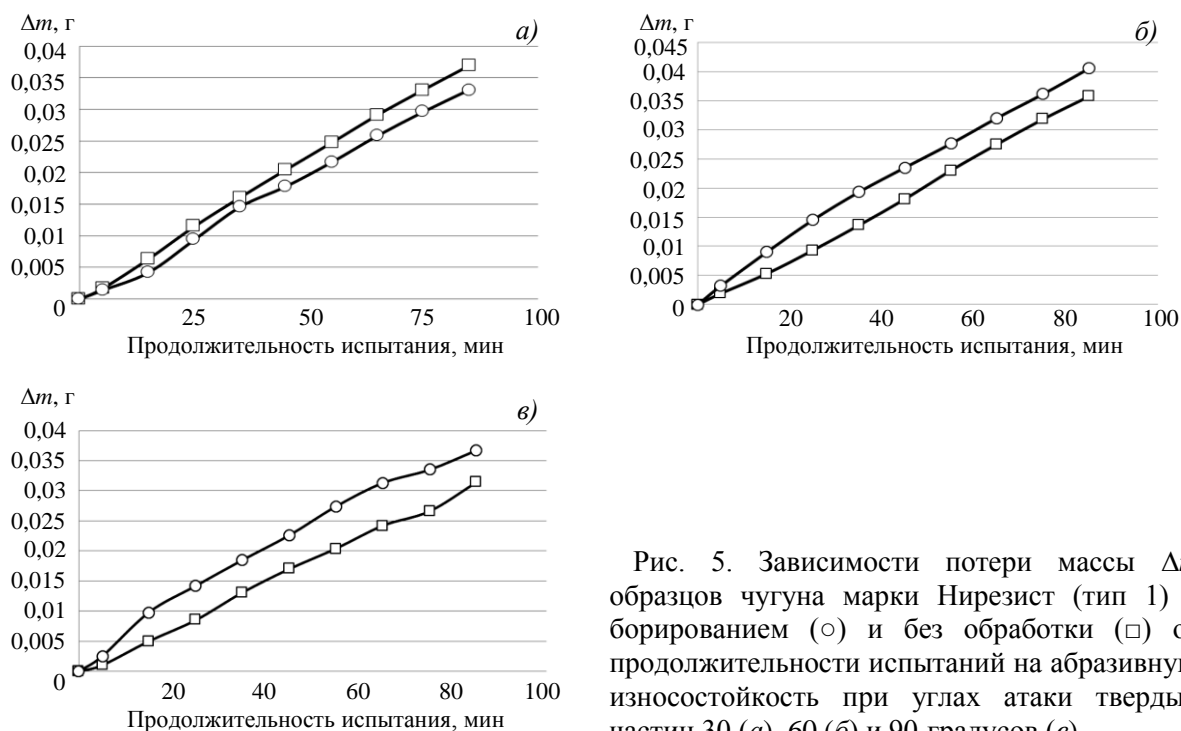


Рис. 5. Зависимости потери массы Δm образцов чугуна марки Нирезист (тип 1) с борированием (○) и без обработки (□) от продолжительности испытаний на абразивную износостойкость при углах атаки твердых частиц 30 (а), 60 (б) и 90 градусов (в)

При угле атаки абразивных частиц ~30 градусов боридные слои показывают повышенную износостойкость по сравнению с образцом без борирования (рис. 5, а). Однако такая тенденция изменяется на образцах после испытаний при больших углах атаки (60 и 90 градусов) (рис. 4, б и в).

Анализ полученных результатов по потере массы за время испытания в течение 85 мин показал, что увеличение угла атаки с 30 до 90 градусов для образцов без обработки приводит к уменьшению изменения массы (рис. 6). Однако для образцов с борированием формируется совершенно иная зависимость – наименьшей стойкостью обладают образцы после испытания при угле атаки 60 градусов.

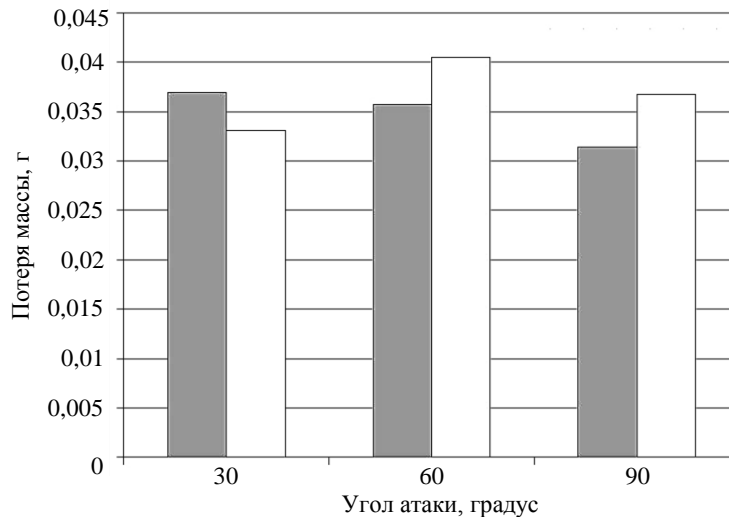


Рис. 6. Зависимость потери массы от угла атаки для образцов из чугуна марки Нирезист после борирования (□) и без обработки (■) при продолжительности испытания в течение 85 мин

Оценивая полученные результаты испытаний на абразивную износостойкость, можно сделать вывод, что при увеличении угла атаки из-за высокой хрупкости и низкой трещиностойкости боридных слоев, обладающих небольшим запасом пластичности при ударном воздействии, формируются микротрещины, приводящие к выкрашиванию локальных зон и отслаиванию частиц из этих слоев, в то время как на образце без борирования матрица подвержена поверхностной пластической деформации. Так, в зоне падения частиц при угле атаки 30 градусов в большей степени реализуется механизм скольжения частиц без значительной передачи энергии удара боридному слою. Увеличение угла атаки до 60 градусов способствует увеличению потери массы на 22,5 % – с 0,033 до 0,041 г, при этом увеличение угла атаки до 90 градусов привело к увеличению потери массы только на 11 % – до 0,037 г.

При угле атаки 90 градусов из-за высокого модуля упругости диффузионного слоя (>400 ГПа [20]) происходит упругое соударение частиц с поверхностью с постепенным продавливанием поверхности и накоплением дефектов в переходной зоне. Вследствие низкой трещиностойкости борированных слоев, накопление поверхностных и подповерхностных дефектов из-за соударения частиц с поверхностью приводит к формированию микротрещин и выкрашиванию частиц с диффузионного слоя. Предположительно, угол атаки 60 градусов приводит к преобладанию тангенциальных изгибающих напряжений и формированию неравномерного напряженно-деформированного состояния в переходной зоне, в результате чего локализация напряжений сжатия и растяжения в различных участках диффузионного слоя способствует ускоренному отслаиванию частиц боридного слоя с поверхности.

Как отмечалось ранее, боридные слои обладают малым запасом пластичности [11], поэтому выдерживают воздействие абразивных частиц при углах атаки до 40–50 градусов. Однако с увеличением угла атаки до 60–90 градусов вертикальная составляющая силы удара частиц достигает значений, при которых происходит хрупкий излом выступов микронеровностей и последующее выкрашивание диффузионного слоя. Иная тенденция наблюдается на более пластичном материале подложки – чугуне.

Подложка диффузионного слоя – чугун марки Нирезист (тип 1) – достаточно пластичный материал, имеющий низкую твердость (180–260 HV 0,1), поэтому в целом интенсивность изнашивания больше, чем у высокотвердого, но хрупкого боридного слоя. С ростом угла атаки абразивных частиц до 30 градусов потеря массы при абразивном изнашивании больше на 12 %, чем у борированного слоя. При этом увеличение угла атаки до 60 и 90 градусов приводит к тому, что абразивная стойкость борированного слоя становится ниже, чем у обычного чугуна, в результате чего потеря массы чугуна меньше на 13,5 и 17 % соответственно. Это связано с тем, что увеличение угла атаки приводит к еще большему увеличению вертикальной составляющей силы удара частиц и у пластичных материалов вызывает эффект деформационного упрочнения поверхности, аналогичный наклепу, что приведет к снижению интенсивности воздушно-абразивного изнашивания по мере увеличения угла атаки до 90 градусов.

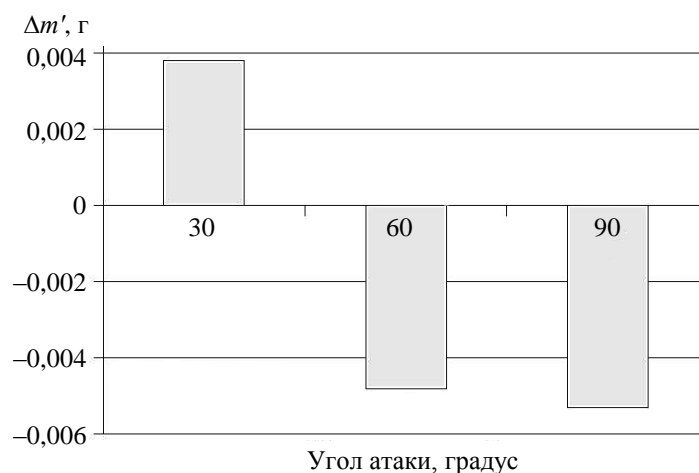


Рис. 7. Разность изменения масс $\Delta m'$ после абразивного изнашивания образцов без обработки и с борированием чугуна марки Нирезист

Оценка сравнительного изменения массы $\Delta m'$ ($\Delta m' = \Delta m_1 - \Delta m_2$, где Δm_1 , Δm_2 – изменение массы при абразивном изнашивании чугуна Нирезист без обработки и после борирования соответственно) показывает (рис. 7), что снижение абразивной интенсивности изнашивания достигается только при угле атаки 30 градусов. Дальнейшее увеличение угла атаки до 60 и 90 градусов вследствие малой пластичности и трещиностойкости борированных слоев приводит к снижению стойкости при абразивном изнашивании, по сравнению с чугуном без обработки.

Заключения

Проведение низкотемпературного безэлектролизного борирования в экспериментальном расплаве на основе тетрафторбората калия и оксида бора с добавкой борсодержащих компонентов за 10 ч технологического процесса позволяет сформировать диффузионные слои с классическим фазовым составом (FeB + Fe₂B) толщиной не менее 40 мкм с твердостью поверхности 1800 HV 0,1 на образцах из чугуна марки Нирезист.

При испытании на стойкость к абразивному изнашиванию изменение массы образцов в зависимости от продолжительности испытания как для образцов после борирования, так и для образцов без обработки носит линейный характер.

На всем протяжении испытания для угла атаки 30 градусов образцы после борирования обладали меньшей потерей массы вследствие высокой твердости и реализации механизма скольжения о твердую поверхность. Увеличение угла атаки до 90 градусов приводит к снижению абразивной износостойкости из-за увеличения вертикальной составляющей силы удара, которая вследствие высокого модуля упругости и низкой трещиностойкости борированных слоев приводит к выкрашиванию частиц с поверхности. Наиболее опасным является угол атаки 60 градусов, так как в результате соударения в переходной зоне могут возникать изгибающие локализирующие напряжения и напряжения сжатия в различных областях диффузионного слоя, приводящие к ускоренному накоплению дефектов и отслаиванию боридного покрытия.

С ростом угла атаки абразивных частиц до 30 градусов потеря массы у чугуна без обработки при абразивном изнашивании больше на 12 %, чем у борированного слоя. При этом увеличение угла атаки до 60 и 90 градусов приводит к тому, что абразивная стойкость борированного слоя становится меньше, чем у обычного чугуна, в результате чего потеря массы чугуна ниже на 13,5 и 17 % соответственно.

По результатам исследований на абразивную износостойкость установлено, что боридный диффузионный слой эффективно работает при угле атаки не более 30 градусов.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность кандидатам технических наук А.Ф. Медникову и А.Б. Тхабисимову за помощь в проведении исследований образцов на абразивную стойкость, а также кандидату технических наук К.О. Базалеевой за проведение рентгенофазового анализа и расшифровку дифрактограмм.

Список источников

1. Островский В.Г. Надежность энергоэффективного оборудования «Новомет» при повышенном содержании механических примесей // Инженерная практика. 2011. № 5. С. 58–61.
2. Агеев Ш.Р., Савельев К.В. Как работает открытая ступень: эксплуатация механизированных скважин в осложненных условиях // Инженерная практика. 2014. № 2. С. 20–23.
3. Якимов С.Б., Шпортко А.А. О влиянии концентрации абразивных частиц на наработку электроцентробежных насосов с рабочими ступенями из материала Нирезист тип 1 на месторождениях ОАО «НК «Роснефть» // Территория Нефтегаз. 2016. № 3. С. 84–99.
4. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
5. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
6. Банных И.О., Ашмарин А.А., Бецофен С.Я. и др. Оптимизация химического состава и параметров термомеханической обработки трип сталей на основе новых методов рентгеновской тензометрии, текстурного и фазового анализов // Металлы. 2022. № 6. С. 66–72.
7. Blinov V.M., Lukin E.I., Blinov E.V. et al. Tensile Fracture of Austenitic Corrosion-Resistant Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content and Various Vanadium Contents // Russian Metallurgy (Metally). 2021. Vol. 2021. Is. 10. P. 1265–1269. DOI: 10.1134/S0036029521100062.

8. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
9. Вознесенская Н.М., Тоньшева О.А., Елисеев Э.А. Современные конструкционные стали криогенного назначения и влияние некоторых легирующих элементов на их свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-3-14.
10. Цих С.Г., Красуля А.А., Помельникова А.С., Филимонов А.В. Низкотемпературное жидкостное борирование чугуна Нирезист // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. № 10. С. 468–472.
11. Krukovich M.G., Prusakov V.A., Sizov I.G. Plasticity as the Key to the Durability of Boronized Lays // Springer series of Material Sciences. Plasticity of Boronized Layers. 2016. Vol. 237. P. 65–80.
12. Бурнышев И.Н., Валиахметова О.М., Мутагарова С.А. К вопросу борирования сталей // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2007. № 4. С. 124–127.
13. Чернов Я.Б., Филатов Е.С., Каримов К.Р., Чебыкин В.В. Гальвано-термодиффузионное борирование сталей // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 5 (31). С. 300–303.
14. Covert R., Morrison J., Roehrig K. Properties and Applications of Ni-Resist and Ductile Ni-Resist Alloys. Toronto: Nickel Development Institute, 1998. 38 p.
15. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
16. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Шрейбер Г.К. Ударно-абразивный износ буровых долот. М.: Недра, 1975. 167 с.
17. Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б. Результаты исследований абразивной стойкости стали 15X11МФ при повышенных температурах // Гидравлические и теплотехнические системы и агрегаты: сб. материалов и докл. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. Москва: Мир науки, 2023. С. 161–166.
18. Рыженков А.В., Медников А.Ф., Григорьев С.В. и др. Результаты натуральных исследований коррозионной и абразивной стойкости ионно-плазменного покрытия, сформированного на образцах трубных поверхностей нагрева биотопливного котла // Теплоэнергетика. 2023. № 10. С. 34–44.
19. Tkhabisimov A., Mednikov A., Zilova O. Studies of the Solid Particle Erosion Resistance of 30 L Steel with Different Types of Surface Modification // Metals. 2023. Vol. 13. No. 12. P. 1978. DOI: 10.3390/met13121978.
20. Способ определения модуля упругости поверхностно-модифицированного слоя металлического образца: пат. ВУ21660С1; заявл. 31.08.15; опубл. 30.04.17.

References

1. Ostrovsky V.G. Reliability of energy-efficient equipment «Novomet» with an increased content of mechanical impurities. *Inzhenernaya praktika*, 2011, no. 5, pp. 58–61.
2. Ageev Sh.R., Savelyev K.V. How the open stage works: operation of mechanized wells in complicated conditions. *Inzhenernaya praktika*, 2014, no. 2, pp. 20–23.
3. Yakimov S.B., Shportko A.A. On the influence of the concentration of abrasive particles on the service life of electric centrifugal pumps with working stages made of Ni-resist type 1 material at the fields of OJSC NK Rosneft. *Territoriya Neftegaz*, 2016, no. 3, pp. 84–99.
4. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
5. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.

6. Bannykh I.O., Ashmarin A.A., Betzofen S.Ya. et al. Optimization of chemical composition and parameters of thermomechanical processing of TRIP steels based on new methods of X-ray tensiometry, texture and phase analysis. *Metally*, 2022, no. 6, pp. 66–72.
7. Blinov V.M., Lukin E.I., Blinov E.V. et al. Tensile Fracture of Austenitic Corrosion-Resistant Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content and Various Vanadium Contents. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 2021, is. 10, pp. 1265–1269. DOI: 10.1134/S0036029521100062.
8. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
9. Voznesenskaya N.M., Tonysheva O.A., Eliseev E.A. Modern structural steels of cryogenic purpose and influence of some alloying elements on their properties (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 24, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-3-14.
10. Tsikh S.G., Krasulya A.A., Pomelnikova A.S., Filimonov A.V. Low-temperature liquid boriding of Ni-resist cast iron. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2020, no. 10, pp. 468–472.
11. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. Plasticity as the Key to the Durability of Boronized Lays. *Springer series of Material Sciences. Plasticity of Boronized Layers*, 2016, vol. 237, pp. 65–80.
12. Burnyshev I.N., Valiakhmetova O.M., Mutagarova S.A. On the issue of boriding of steels. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 4, pp. 124–127.
13. Chernov Ya.B., Filatov E.S., Karimov K.R., Chebykin V.V. Galvanic-thermodiffusion boriding of steels. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, no. 5 (31), pp. 300–303.
14. Covert R., Morrison J., Roehrig K. *Properties and Applications of Ni-Resist and Ductile Ni-Resist Alloys*. Toronto: Nickel Development Institute, 1998, 38 p.
15. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolnikov M.G. *Abrasive wear*. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 224 p.
16. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Shreiber G.K. *Shock-abrasive wear of drill bits*. Moscow: Nedra, 1975, 167 p.
17. Mednikov A.F., Tkhabisimov A.B. Results of studies of abrasive resistance of 15Kh11MF steel at elevated temperatures. *Hydraulic and heat engineering systems and units: reports XXVII Int. scientific-technical conf.* Moscow: Mir nauki, 2023, pp. 161–166.
18. Ryzhenkov A.V., Mednikov A.F., Grigoriev S.V. et al. Results of field studies of corrosion and abrasive resistance of ion-plasma coating formed on samples of tubular heating surfaces of a biofuel boiler. *Teploenergetika*, 2023, no. 10, pp. 34–44.
19. Tkhabisimov A., Mednikov A., Zilova O. Studies of the Solid Particle Erosion Resistance of 30 L Steel with Different Types of Surface Modification. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 12, p. 1978. DOI: 10.3390/met13121978.
20. *Method for determining the modulus of elasticity of a surface-modified layer of a metal sample*: pat. BY21660C1; appl. 31.08.15; publ. 30.04.17.

Информация об авторах

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Красуля Анастасия Андреевна, ассистент кафедры, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anastasia A. Krasulya, Assistant of Chair, Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.01.2025.

The article was submitted 26.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 13.01.2025.