

УДК 669-1

UDC 669-1

05.00.00 Технические науки

Engineering

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К АБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ ИЗДЕЛИЙ СО СЛОИСТЫМИ КОМПОЗИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ¹**RESEARCH OF RESISTANCE OF PRODUCTS WITH COMPOSITE COATINGS LAYER FROM MATERIALS WITH SHAPE MEMORY EFFECT TO ABRASIVE WEAR**

Балаев Эйтибар Юсиф Оглы
Аспирант
E-mail: balaev1122@mail.ru

Balaev Etibar Yusif Ogli
Graduate student
E-mail: balaev1122@mail.ru

Бледнова Жесфина Михайловна,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой.
РИНЦ SPIN-код: 2616-8410
Researcher Author ID: [D-3243-2015](https://orcid.org/0000-0002-3243-2015)
SCOPUS Author ID [6602468603](https://orcid.org/0000-0002-6602-468603)
E-mail: blednova@mail.ru

Blednova Zhesfina Michailovna,
Dr.Sci.Tech., Professor, Head of Department
SPIN-code: 2616-8410
Researcher Author ID: [D-3243-2015](https://orcid.org/0000-0002-3243-2015)
SCOPUS Author ID [6602468603](https://orcid.org/0000-0002-6602-468603)
E-mail: blednova@mail.ru

Кудря Алик Асланович
Студент

Kudrya Alik Aslanovich
Student

Завгородняя Алина Александровна
Студент
Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия, ул. Московская, 2, кафедра ДИПМ

Zavgorodniaya Alina Aleksandrovna
Student
Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russian Federation, Moskovskaya, 2, Department Dynamics and strength machines

Приведены результаты исследования процесса абразивного изнашивания образцов, изготовленных из Стали 45, У10 и с нанесенным композиционным поверхностным слоем «никель – многокомпонентный материал с эффектом памяти формы (ЭПФ) на основе TiNi». Для испытаний выбран TiNiZr, который находится в мартенситном состоянии и TiNiHfCu, находящийся в аустенитном состоянии при температуре испытания. Формирование поверхностного слоя осуществлялось высокоскоростным газопламенным напылением (ВГН) в защитной атмосфере аргона. При испытании на износ в качестве абразива использовался порошок корунда Al₂O₃. Показано, что интенсивность изнашивания образцов с композиционным поверхностным слоем из многокомпонентных материалов с ЭПФ значительно снижается по сравнению с основой, что объясняется обратимыми фазовыми превращениями поверхностного слоя с ЭПФ. После осуществления дополнительной операции поверхностного пластического деформирования (ППД), значительно повышается стойкость слоистой композиции к абразивному

The article gives results of research of the process of abrasive wear of samples made of Steel 45, U10 and with applied composite surface layer "nickel-multicomponent material with shape memory effect (SME) based on TiNi". For the tests we have chosen TiNiZr, which is in the martensite state and TiNiHfCu, which is in the austenitic state at the test temperature. The formation of the surface layer was carried out by high-speed gas-flame deposition in a protective atmosphere of argon. In the wear test, Al₂O₃ corundum powder was used as an abrasive. It is shown that the wear rate of samples with a composite surface layer of multicomponent materials with an SME is significantly reduced in comparison with the base, which is explained by reversible phase transformations of the surface layer with an SME. After carrying out the additional surface plastic deformation operation (SPD), the resistance of the laminated composition to abrasion wear is greatly enhanced, due to the reinforcing effect of the SPD. It is recommended for products working in conditions of abrasive wear and high temperatures to use the complex technology of formation of the surface composition "steel-nickel-material with high-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 15-19-00202)

изнашиванию, благодаря упрочняющему эффекту ППД. Рекомендовано для изделий, работающих в условиях абразивного изнашивания и повышенных температур использовать комплексную технологию формирования поверхностной композиции «сталь – никель – материал с высокотемпературным ЭПФ», включающую подготовку поверхности основы и напыляемого материала, ВГН в защитной атмосфере аргона, с последующим ППД

Ключевые слова: ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ, АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС, КОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ, ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ГАЗОПЛАМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

temperature EPF", including preparation of the surface of the substrate and the deposited material, VGN in the protective atmosphere of argon, followed by SPD

Keywords: SHAPE MEMORY EFFECT, ABRASIVE WEAR, COMPOSITE SURFACE LAYER, HIGH-SPEED FLAME SPRAYING

Doi: 10.21515/1990-4665-128-041

Введение. Развитие современной промышленности связано с необходимостью создания перспективных износостойких композиционных материалов и новых методов их поверхностной обработки для тяжело нагруженных пар трения. Одним из наиболее опасных видов износа является абразивный [1-3]. Разрушение поверхности детали в результате абразивного износа происходит за счет взаимодействия с твердыми частицами, которые пластически и упруго деформируют поверхность деталей, а также царапают, скоблят и режут. Одним из видов абразивного износа является попадание свободных частиц в места сопряжения деталей, в результате чего частицы воспринимают нагрузку, передаваемую через пару сопряжения, и врезаются или вминаются в поверхность деталей. Процесс абразивного износа является необычайно сложным явлением и сопровождается часто ударно-капельным [4], эрозионно-коррозионным [5], кавитационным воздействием [6,7] и его характерной особенностью является быстрое развитие. В настоящее время известны различные способы борьбы с абразивным износом: технологические и эксплуатационные. Одним из перспективных направлений борьбы с абразивным износом является внедрение новых технологий инженерии поверхности, реализованных в условиях

комплексных высокоэнергетических воздействий: лазерных, плазменных, высокоскоростных газопламенных [8,9]. Такие технологии активно используются в различных областях: в авиастроении, энергомашиностроении, в производстве горнодобывающей, дорожно-строительной, сельскохозяйственной техники, где проблема абразивного износа стоит особенно остро.

Современное представление об эффективном управлении свойствами материалов основывается на возможности создания условий, которые могут радикально влиять на процессы самоорганизации структур. Высокоэнергетическое воздействие позволяет повысить скорости нагрева и охлаждения, что приводит к созданию максимально неравновесных структур, которые, при определенных условиях, могут обеспечить требуемый комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств. Управление структурообразованием материалов заданного состава, в условиях далеких от термодинамического равновесия, позволяет обеспечить требуемую стойкость изделия в экстремальных условиях при воздействии высоких контактных и динамических нагрузок, абразивного и ударно-абразивного износа.

Поиск материалов обладающих высокой стойкостью к абразивному износу является одним из важных условий обеспечивающих необходимые эксплуатационные свойства. Известно, что материалы, обладающие высокой твердостью, более устойчивы к абразивному износу. Это связано с тем, что чем выше твердость, тем меньше глубина врезания или смятия при воздействии частиц абразива. Взаимодействие частиц абразива с контактирующей поверхностью сопровождается поверхностным деформированием и вызывает наклёп, повышающий твердость внешних слоев, и, как следствие, повышающий стойкость к абразивному износу. Однако дальнейшее накопление дефектов типа царапин и трещин приводит к интенсивному разрушению поверхности детали [3,10,11].

Исследованиями установлена зависимость стойкости к абразивному износу и энергоемкости материала, определяемой как произведение предела прочности и относительного остаточного сужения [12,13]. Это позволяет сделать вывод о том, что абразивная износостойкость зависит от оптимального сочетания прочности и пластичности.

Перспективным направлением в разработке новых материалов триботехнического назначения является использование интеллектуальных, интерметаллидных, нанокристаллических и слоистых структур, к числу которых относятся и материалы с обратимой фазовой структурой, в частности, материалы с эффектом памяти формы (ЭПФ). Использование материалов с ЭПФ [14], для формирования поверхностных слоев или в составе слоистой структуры [15], обладающих многофункциональностью, может обеспечить эффективную реакцию трибоматериалов на активное воздействие внешних факторов [16], в том числе в условиях абразивного износа. Особые триботехнические свойства сплавов с ЭПФ на основе *TiNi* в сочетании с высокой демпфирующей способностью и сопротивлением коррозионно-эрозионным воздействиям определили сплав *TiNi* как «трибологический феномен», новый «трибо-материал» и «трибо-композит» [17,18]. Высокая износостойкость сплавов с ЭПФ объясняется не только повышенными значениями твердости, но и особыми функционально-механическими свойствами. На поверхности детали, изготовленной из материалов с ЭПФ, в результате деформирования частицей абразива при напряжении, превышающем предел упругости, происходит нелинейная пластическая деформация, которая у обычных материалов после снятия напряжения остается как остаточная и может накапливаться. В случае же материала с ЭПФ при превышении упругой деформации дальнейшая деформация нелинейная происходит за счет термоупругого мартенситного превращения (аустенитно-мартенситного), которая при снятии нагрузки полностью восстанавливается за счет обратного мартенситного

превращения (мартенситно-аустенитного), в этом случае имеет место явления псевдоупругости [10,14-16,19]. Поэтому накопление повреждений у материалов с ЭПФ происходит намного медленнее, чем у обычных материалов. Однако, изготовление деталей из материалов с ЭПФ экономически нецелесообразно. Поэтому перспективно использовать материалы с ЭПФ для формирования поверхностных слоев, устойчивых к данному типу разрушения. В качестве технологии выбрано высокоскоростное газопламенное напыление (ВГН) в защитной атмосфере аргона [15,20,21]. Поверхностные слои, сформированные ВГН в защитной среде, отличаются повышенной адгезионной прочностью (90 -100МПа) и низкой пористостью (менее 1%). В качестве материалов с ЭПФ для формирования поверхностных композиций в настоящем исследовании выбраны материалы на основе никелида титана TiNiZr, TiNiHfCu, которые при температуре испытания имеют различное структурно-фазовое состояние [22-24].

Целью работы является исследование деформационного поведения в условиях абразивного износа стальных образцов с композиционным поверхностным слоем из многокомпонентных материалов с ЭПФ на основе TiNi с существенно отличающимися температурами фазовых превращений.

Технологические особенности формирования поверхностной композиции, материалы и методы проведения исследований. Объектом исследования является композиция «сталь – переходный адгезионный слой – функциональный слой из материала с ЭПФ». В качестве основы использовалась широко распространенная в машиностроении Сталь 45, а в качестве переходного слоя - никель, обладающей неограниченной растворимостью с железом и химическим сродством с материалом переходного и функционального слоев, что обеспечивает повышенную адгезионную прочность. Для формирования функциональных слоев

использовались материалы с ЭПФ с существенно отличающимися температурами фазовых превращений: сплав $Ti_{33}Ni_{49}Zr_{18}$ (порошок ПН49Т33Ц18) обладает высокотемпературным эффектом памяти и при комнатной температуре находится в мартенситном состоянии; сплав $Ni_{44}Ti_{36}Hf_{15}Cu_5$ (ПН44Т36Гф15Д5) при нормальной температуре находится в мартенситном состоянии. Характеристики испытанных образцов и их структурно-фазовое состояние представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики и структурно-фазовое состояние образцов

Материал образцов	Диаметр, мм	Масса, г	T, °C	Микротвердость, ГПа	Фазовое состояние
Сталь 45	50,39	145,735	20	1,9-2,1	
У10	50,24	158,943	20	5,7-6,5	
Сталь 45 –Ni– $Ti_{33}Ni_{49}Zr_{18}$	50,53	154,176	20	2,1-2,9 9,5-12,3	мартенсит аустенит
Сталь 45–Ni– $Ni_{44}Ti_{36}Hf_{15}Cu_5$	51,12	155,214	20	9,5-11,9	аустенит
Сталь 45–Ni– $Ni_{44}Ti_{36}Hf_{15}Cu_5$ +ППД ($Ni_{44}Ti_{36}Hf_{15}Cu_5$)	50,87	155,663	20	9,5-11,9 11,7-14,2.	аустенит аустенит

Технология формирования композиции включает несколько этапов: подготовку основы и наносимого материала, ВГН переходного и функционального слоев, последующую термическая (ТО) и термомеханическая обработка (ТМО) для обеспечения функциональных свойств материала с ЭПФ. Структурная схема технологического процесса формирования композиции приведена на рисунке 1.

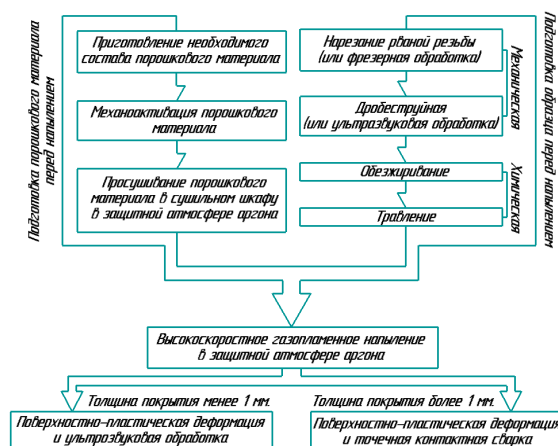


Рисунок 1. Схема поэтапного формирования слоистой поверхностной композиции из материалов с ЭПФ

Подготовка образцов представляла собой комплексную механическую обработку, включающую нарезание рваной резьбы с последующей дробеструйной обработкой, и химическую обработку, состоящую из обезжиривания поверхности спиртом и травления смеси соляной и азотной кислот.

Важным этапом подготовки порошкового материала является механическая активация (МА), обеспечивающая необходимый гранулометрический состав, энергетическое состояние и реакционную способность и стимулирующая формирование наносостояния при ВГН [6]. Механоактивация осуществлялась в модернизированной шаровой мельнице Гефест-2 АГО-2У (патент № 164078), в которой механическое воздействие производится серией последовательных механических импульсов (ударов), передающих обрабатываемому материалу порции механической энергии, которая выделяется при ВГН, стимулируя процесс наноструктурирования [7].

ВГН осуществлялось на модернизированной установке GLC-720 (Патент 2502829) в защитной атмосфере аргона [8]. Комплексная ТМО производилась для придания поверхностному слою псевдоупругих свойств или свойств памяти формы и для повышения адгезионной прочности. Комплексная обработка назначается в зависимости от толщины композиционного слоя. Для покрытий толщиной до 1 мм проводится комплексная обработка, состоящая из ППД и ультразвуковой обработки (УЗО) по следующим режимам: сила прижатия деформирующего элемента составляет 50-3000 Н, упрочняющего элемента составляет 100-1000 Н, расстояние между деформирующим и упрочняющим элементами составляет 10-30 мм, линейная скорость перемещения пятна деформации элементов $50-100 \cdot 10^{-3}$ м/с при продольной подаче 0,08-0,12 мм/об с частотой ультразвуковых колебаний упрочняющего элемента 18-22 кГц. Для покрытий толщиной свыше 1 мм проводится комплексная обработка, состоящая из ППД и

контактной точечной сварки по следующим режимам: ППД осуществляется в радиальном направлении с усилием 50-3000 Н, скорость перемещения пятна деформации $50-100 \cdot 10^{-3}$ м/с, продольная подача 0,08-0,12 мм/об, с одновременным пропусканием через зону контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью импульсного электрического тока силой 2-5 кА, напряжением 2-3 В, длительностью импульсов 0,08-0,2 с и частотой импульсов 0,16-0,4 Гц.

Исследование влияния деформационного поведения образцов (стальных и с композиционным поверхностным слоем из сплавов с ЭПФ) в условиях абразивного износа осуществлялось на модернизированной испытательной машины трения СМТ-2070, снабженной специальной камерой для абразива. На рисунке 2 приведена схема устройства для проведения испытания на абразивное изнашивание. Устройство, состоящее из двух дисков равного диаметра, вращающихся в противоположном направлении, расположено в специальной камере.

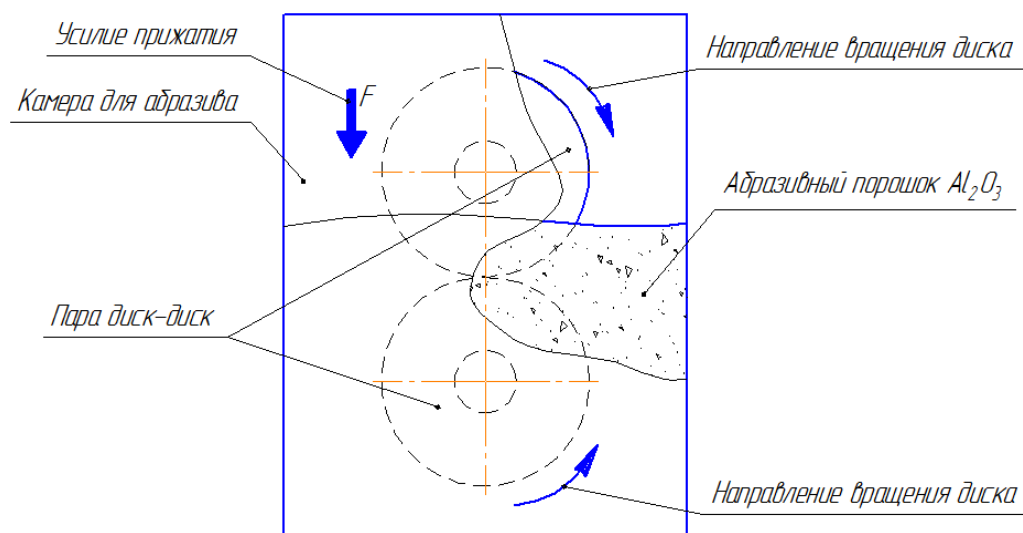


Рисунок 2. Схема устройства для проведения испытания на абразивный износ на базе испытательной машины трения СМТ-2070 с камерой для абразива

Камера заполняется порошком абразива до уровня, превышающего плоскости сопряжения дисков на 15 мм, что обеспечивало постоянное

попадание частиц порошка в зону контакта двух образцов. Частота вращения и усилие прижатия регулируются. Данный эксперимент может имитировать работу зубчатой пары или валков дробильных установок. Из схемы видно, что в месте контакта образцы испытывают трение качения, абразивный износ и трение скольжения, так как при существующих допусках, в пределах которых размеры образцов могут отклоняться от номинальных, при равной частоте вращения поверхность одного образца будет проскальзывать по поверхности другого.

В качестве абразива использовался оксид алюминия Al_2O_3 (корунд) с твердостью 25 ГПа [1]. Гранулометрический состав порошка исследовали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-7500F (рис. 3). Средний размер частиц порошка Al_2O_3 составляет 120-180 мкм.

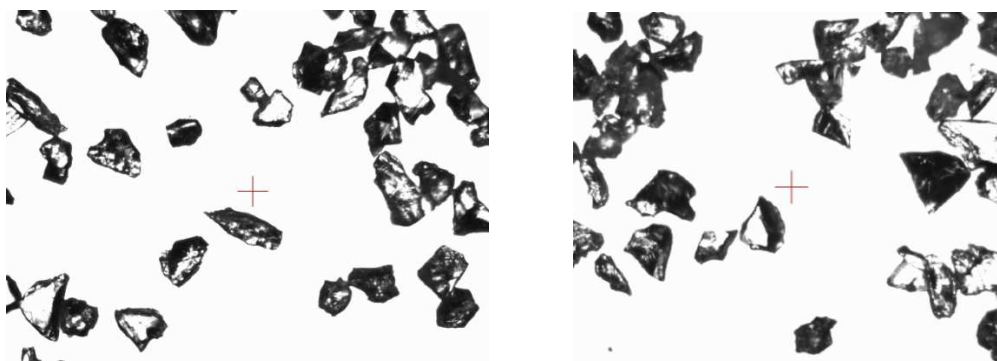


Рисунок 3. Частицы порошка оксида алюминия $Al_2O_3 \times 10$

Частота вращения пары составляла 300 об/мин. усилия прижатия 250Н. Продолжительность испытаний 2 часа с промежуточным измерением каждые 15 минут. Динамику зарождения и развития поверхностных повреждений наблюдали при помощи портативного микроскопа Бриннеля, с 25-50 кратным увеличением, снабженного шкалой измерений, позволяющей измерять линейные размеры поверхностных повреждений. Массовый износ дисков определяли весовым способом (весы DEMCOM DL») с точностью измерения 0,001г. Измерение диаметров дисков проводились микрометром с погрешностью до 0,005мм. Для более объективной оценки влияния состава, структурно-фазового

состояния и технологии нанесения покрытий на шероховатость поверхности образцы подвергали шлифовке, что обеспечило одинаковую исходную шероховатость, составившую $R_z=3,2$. Исследование шероховатости осуществлялось на профилографе - профилометре АБРИС-ПМ7. Интенсивность изнашивания определялась по ГОСТ 27674-88.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. В процессе испытаний на абразивный износ отслеживалось зарождение и накопление повреждений в поверхностных слоях. На рисунке 4 представлена картина накопления повреждений по времени для исследованных материалов, где более насыщенные цвета соответствуют большей глубине повреждения.

Так, на образце из Стали 45 с первых минут на поверхности появляются повреждения в виде вмятин, вырывав, срезов и царапин. На рисунке 4 зоны с повреждениями равным размерам частиц Al_2O_3 повреждениями выделены, синим цветом, а для зон выделенных красным цветом характерны повреждения превышающие размеры частиц. Следует отметить, что такое очаговое накопление повреждений (дефектов) при указанных режимах испытания наблюдается первые 100-120 минут, а затем разность глубины дефектов уменьшается и интенсивное изнашивание наблюдается по всей поверхности образца. Аналогичные испытания на абразивный износ инструментальной стали У10 показали снижение интенсивности накопления дефектов и их глубины по сравнению со сталью 45. Интенсивность изнашивания снижается примерно на 30%, как видно из диаграммы интенсивности износа на рисунке 5, что подтверждается другими источниками информации [1-7].

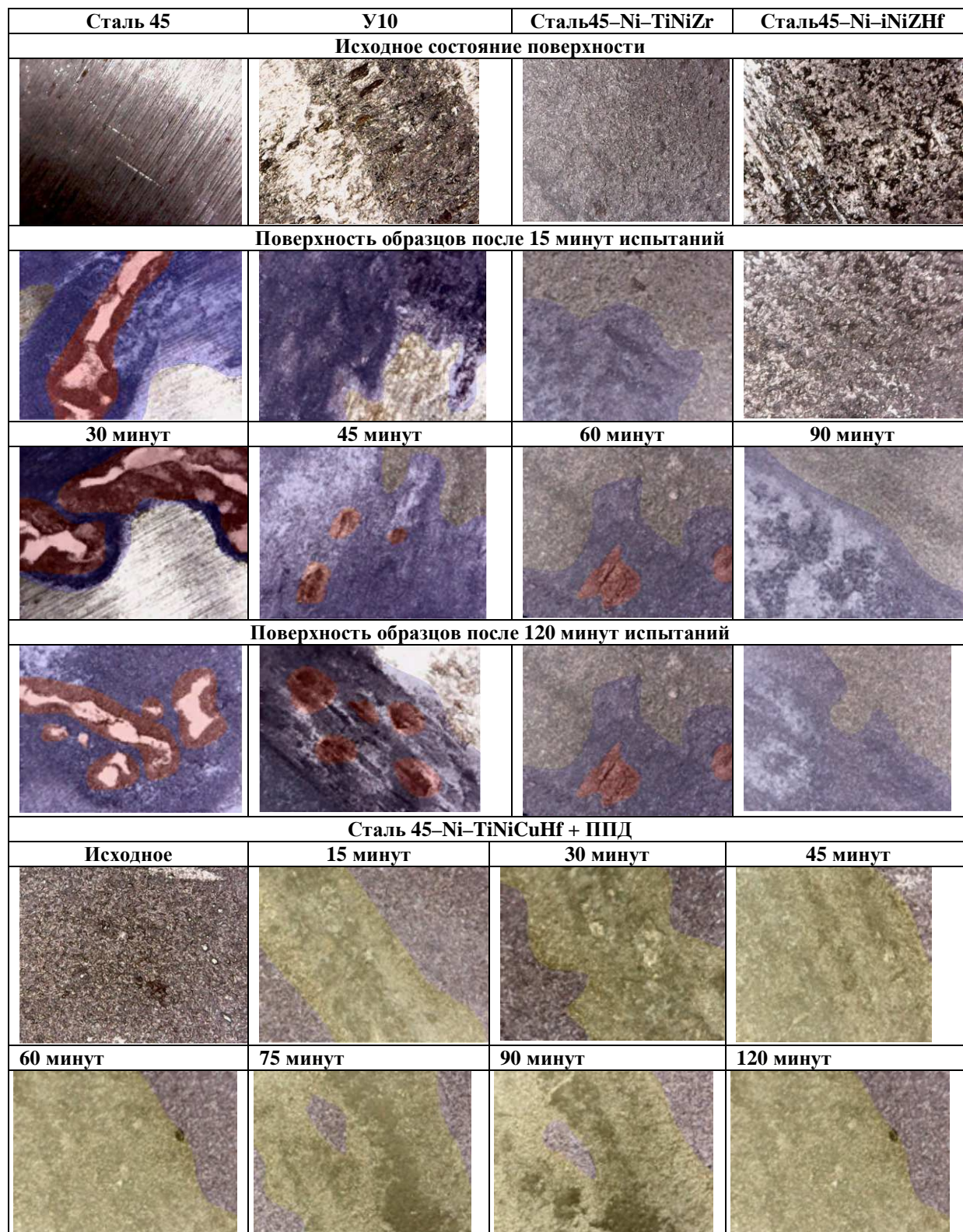


Рисунок 4. Накопление поверхностных повреждений образцов в процессе испытаний на абразивный износ

Исследование деформационного поведения образцов с композиционным поверхностным слоем «сталь 45 – Ni – TiNiZr» из

материала с высокотемпературным эффектом памяти формы ($M_f = 459\text{K}$, $M_s = 522\text{K}$, $A_s = 488\text{K}$, $A_f = 571\text{K}$) [22-23] в условиях абразивного износа, показали: появление глубоких повреждений обнаруживается значительно позже (после 60 минут испытаний); скорость накопления дефектов снижена по сравнению с материалами без покрытий; при твердости покрытия TiNiZr в мартенситном состоянии в два раза меньше твердости инструментальной стали У10, интенсивность износа оказывается в 2 раза меньше, чем стали У10 (рис. 5). Температура испытания (комнатная) соответствовала мартенситному состоянию материала покрытия TiNiZr.

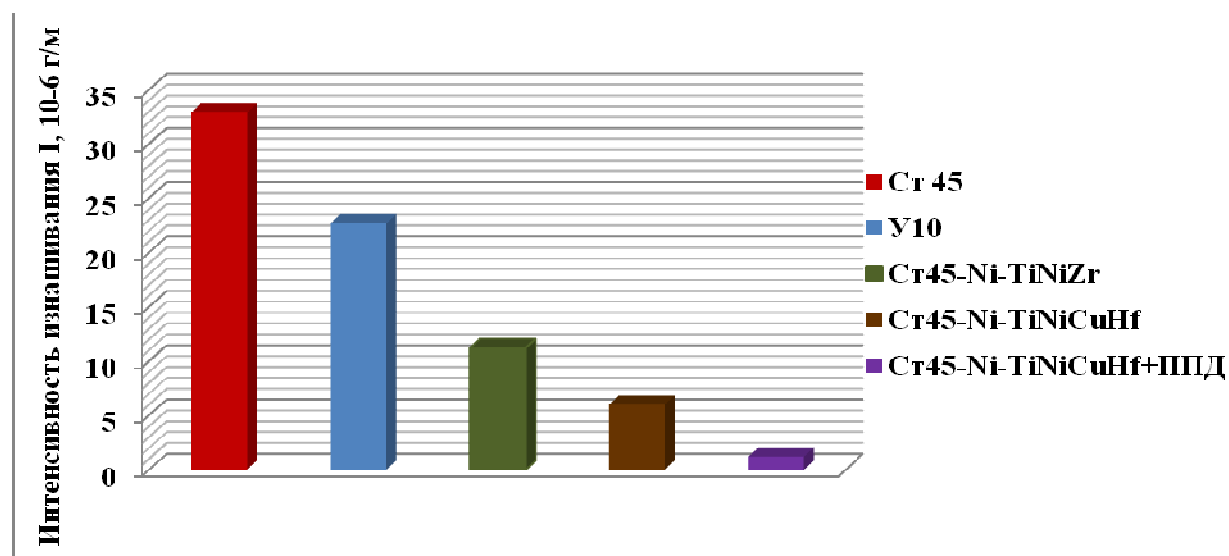


Рисунок 5. Интенсивность износа исследованных образцов

Для исследования влияния структурно-фазового состояния материалов с ЭПФ на интенсивность изнашивания при абразивном воздействии выполнены испытания образцов с функциональным поверхностным слоем «сталь 45–Ni–TiNiHfCu», который при комнатной температуре находится в аустенитном состоянии после формирования композиции и полного цикла обработки, включающего ТО и ТМО поверхностным РРД [24]. Анализ состояния поверхности композиции «сталь 45–Ni–TiNiHfCu» на различных этапах испытания (рис. 4) показал: замедление процесса образования поверхностных дефектов значительных размеров (после 90 минут испытания); снижение интенсивности

изнашивания на 50% по сравнению с покрытием «Ni–TiNiZr» в мартенситном состоянии и более чем в 6 раз по сравнению интенсивностью изнашивания материала основы.

Полный цикл обработки материалов с ЭПФ, включающий ТМО+ППД, сопровождается деформационным упрочнением - наклепом, повышением твердости, созданием неоднородного напряженно-деформированного состояния (НДС) и имеет основной целью формирование псевдоупругих свойств. Повышение твердости поверхностного слоя, с одной стороны, повышает сопротивление абразивному изнашиванию, а с другой – приводит к его охрупчиванию, и в совокупности с неоднородностью НДС приводит к образованию дефектов на ранней стадии испытаний типа сколов, выкрашиваний, что и показано на рисунке 4. Принято считать, что твердость материалов с ЭПФ не является определяющим фактором в повышении износостойкости, хотя существенно влияет на абразивный износ.

Материалы с ЭПФ, являясь материалами с обратимой фазовой структурой, обладают уникальной способностью фазовых превращений под действием нагрузки и температуры. При приложении нагрузки к изделию, находящемуся в аустенитном состоянии, происходит прямое аустенитно-мартенситное превращение, а при прекращении действия нагрузки происходит обратное мартенситно-аустенитное превращение. Механизм абразивного изнашивания сплава TiNi рассмотрен в работе [11]. Сплав TiNi имеет ограниченный температурный интервал фазовых превращений, как правило, не превышающий 373К. Для изделий, подвергающихся абразивному износу в условиях более высоких температур, экономически и технологически целесообразно использовать поверхностное модифицирование многокомпонентными материалами с ЭПФ TiNiZr, TiNiHf, обеспечивающими высокотемпературный ЭПФ. Наиболее эффективными способами повышения износостойкости и

долговечности изделий в условиях абразивного износа является формирование поверхностных слоистых функционально-градиентных композиций «основа - переходный слой – функциональный слой». В качестве переходного слоя в настоящем исследовании использовался никель, имеющий химическое сродство с материалам основы и функционального слоя, обеспечивающий надежную адгезию. Переходный слой никеля, обладающий более высокой пластичностью и вязкостью, является релаксационным и тормозит движение распространяющихся дефектов, замедляя процесс разрушения. Функциональный поверхностный слой из материалов с ЭПФ на основе TiNi обладает повышенным сопротивлением абразивному износу, оптимальной твердостью и способностью адаптироваться к условиям нагружения за счет проявления псевдоупругих свойств в процессе фазовых превращений.

Заключение. Исследования деформационного поведения образцов с композиционным поверхностным слоем из многокомпонентных материалов с ЭПФ, сформированным в условиях высокоэнергетических воздействий при абразивном изнашивании показали значительное снижение интенсивности изнашивания в зависимости от химического состава, структурно-фазового состояния, технологии формирования и режимов эксплуатации. Экспериментально подтверждено снижение интенсивности изнашивания образцов с композиционным поверхностным слоем: «Ni-TiNiZr», находящемся в мартенситном состоянии, в 3 раза; «Ni – TiNiHfCu», находящемся в аустенитном состоянии в 6 раз; а после полного цикла обработки включающего последующее ППД в 30 раз. В основе повышения износостойкости поверхностной композиции из материалов с ЭПФ в условиях абразивного изнашивания лежит эффект псевдоупругости и способности материалов с ЭПФ адаптироваться в процессе фазовых превращений. При эксплуатации изделий в условиях повышенных температур и абразивных воздействий рекомендуется

использовать поверхностную композицию «сталь – переходный слой Ni – слой с высокотемпературным ЭПФ» с последующим ППД, обеспечивающим оптимальную твердость и проявление псевдоупругих свойств при прямых и обратных мартенситных превращениях.

Литература

1. Хрущов М.М. Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. Г Наука, 1970г. 252 с.
2. Добровольский А.Г. Абразивная износостойкость материалов – К.: Техника, 1989. 128 с.
3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с
4. Варавка В.Н., Кудряков О.В., Рыженков А.В., Качалин Г.В., Зилова О.С. Применение нанокompозитных покрытий для защиты энергетического оборудования от каплеударной эрозии //Теплоэнергетика, 2014,№11, С.29–35.
5. Guilemany J.M., Cinca N., Dosta S., Benedetti A.V. Corrosion behaviour of thermal sprayed nitinol coatings Corrosion Science 51 (2009) 171–180.
6. Wu S.K., Lin H.C., Yeh C.H. A comparison of the cavitation erosion resistance of TiNi alloys, SUS304 stainless steel and Ni-based self-fluxing alloy. Wear 244 (2000) 85–93.
7. Дмитренко Д.В. Бледнова Ж.М., Балаев Э.Ю. Кавитационная стойкость изделий с композитным поверхностным слоем из материалов с ЭПФ. Тр. между. конф. «Живучесть и конструкционное материаловедение» «ЖивКом-2016».М.: ИМАШ РАН,2016. С.232-235.
8. Половинкин В.Н Наноинженерия поверхностей изделий машиностроения. 2010, Электронный ресурс. www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=2730
9. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. инск: Беларус. навука, 2011. — 357 с.
10. Потекаев А.И., Хохлов В.А., Галсанов С.В., Шулепов И.А. Исследование усталостного износа материалов с памятью формы. Известия Томского политехнического университета. 2014. Т.324. №2. – с. 90-95.
- 11 Потекаев А.И., Хохлов В.А., Галсанов С.В. Природа и механизмы абразивного изнашивания материалов с памятью формы на примере никелид титана Известия Томского политехнического университета. 2012. Т.321 №2 стр. 107-111.
12. Машков, Ю.К., Полещенко К.Н., Поворознюк С.Н. Трение и модифицирование материалов трибосистем – М.: Наука, 2000. 280 с.
13. Костецкий, Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. К.: Техника, 1976. 296 с.
14. Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Чаевский М.И. Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы– Краснодар: Издательский дом-Юг –2009.– 354 с.
15. Бледнова Ж.М., Русинов П.О., Балаев Э.Ю.О. Повышение эксплуатационных свойств изделий формированием поверхностных композиций из материалов с ЭПФ с градиентом свойств и температур фазовых превращений. Современные наукоёмкие технологии. – 2016. - № 9-3. С. 378-384.
16. Кульков С.Н., Рудай В.В. Микроструктура композиционного материала TiC-TiNi с микроградиентной структурно-неустойчивой матрицей // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. №5/2. С. 167-169.

17. Li D.Y., Liu D.Y. The mechanism responsible for high wear resistance of Pseudo-elastic TiNi alloy - a novel tribo-material // *J. Wear.* 1999. Vol. 225-229. P. 777-283.
18. Li D.Y. Development of novel tribo-composites with TiNi shape memory alloy matrix // *Wear.* 2003. V. 255. P. 617–628.
19. Пушин В.Г. Сплавы никелида титана с памятью формы. Часть 1. Структура, фазовые превращения и свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 2006- 414 с.
20. Rusinov P.O., Blednova Zh.M. Hardware-Technological Features of Layered Surface Composition Made of Shape Memory Materials in a Single Vacuum Cycle. *Key Engineering Materials*, 2017, Vol. 723, pp 497-502. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.723.497.
21. Бледнова Ж.М., Русинов П.О., Безмогорычная М.Е. Влияние гранулометрического состава, энергетического состояния и реакционной способности напыляемого материала на формирование наносостояния поверхностных слоев из материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №07(121). С. 484 – 498. Doi: 10.21515/1990-4665-121-021
22. Rusinov P.O., Blednova Zh.M. Structural and technological patterns of formation of surface nanostructured layers TiNiZr by high-speed flame spraying. *Advanced Materials and Structural Engineering.* Francis Group, London, 2016 p.21-24.
23. Русинов П.О., Бледнова Ж.М. Влияние циркония на структуру и свойства сплава на основе TiNi. Научный журнал КубГАУ, №121(07), 2016 года. Электронный ресурс. <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/20.pdf> Doi: 10.21515/1990-4665-121-020
24. Rusinov P.O., Blednova Zh.M. Formation of nanostructured Ti-Ni-Hf-Cu coatings by high-speed flame spraying of mechanically activated powders. *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering.* Taylor & Francis Group, London, 2016, p. 195-198.

References

1. Hrushhov M.M. Babichev M.A. *Abrazivnoe iznashivanie.* G Nauka, 1970g. 252 s.
2. Dobrovolskij A.G. *Abrazivnaja iznosostojkost' materialov*– K.: Tehnika, 1989. 128 s.
3. Garkunov D.N. *Tribotekhnika.* – M.: Mashinostroenie, 1985. – 424 s.
4. Varavka V.N., Kudrjakov O.V., Ryzhenkov A.V., Kachalin G.V., Zilova O.S. *Primenenie nanokompozitnyh pokrytij dlja zashhity jenergeticheskogo oborudovanija ot kapleudarnoj jerozii* // *Teplojenergetika*, 2014, №11, S.29–35.
5. Guilemany J.M., Cinca N., Dosta S., Benedetti A.V. Corrosion behaviour of thermal sprayed nitinol coatings *Corrosion Science* 51 (2009) 171–180.
6. Wu S.K., Lin H.C., Yeh C.H. A comparison of the cavitation erosion resistance of TiNi alloys, SUS304 stainless steel and Ni-based self-fluxing alloy. *Wear* 244 (2000) 85–93.
7. Dmitrenko D.V. Blednova Zh.M., Balaeв Je.Ju. Kavitacionnaja stojkost' izdelij s kompozitnym poverhnostnym sloem iz materialov s JePF. *Tr. mezhd. konf. «Zhivuchest' i konstrukcionnoe materialovedenie» «ZhivKom-2016».* M.: IMASh RAN, 2016. S.232-235.
8. Polovinkin V.N. *Nanoinzhenerija poverhnostej izdelij mashinostroenija.* 2010, *Jelektronnyj resurs.* www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=2730
9. Il'jushhenko A.F., Shevcov A.I., Okovityj V.A. *Processy formirovanija gazotermicheskikh pokrytij i ih modelirovanie.* insk: Belarus. navuka, 2011. — 357 s.
10. Potekaev A.I., Hohlov V.A., Galsanov S.V., Shulepov I.A. *Issledovanie ustalostnogo iznosa materialov s pamjat'ju formy.* *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta.* 2014. T.324. №2. – s. 90-95.

11. Potekaev A.I., Hohlov V.A., Galsanov S.V. Priroda i mehanizmy abrazivnogo iznashivaniya materialov s pamjat'ju formy na primere nikelid titana Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2012. T.321 №2 str. 107-111.

12. Mashkov, Ju.K., Poleshenko K.N., Povoroznjuk S.N. Trenie i modificirovanie materialov tribosistem – M.: Nauka, 2000. 280 s.

13. Kosteckij, B.I., Nosovskij I.G., Karaulov A.K. i dr. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii. K.: Tehnika, 1976. 296 s.

14. Blednova Zh.M., Mahutov N.A., Chaevskij M.I. Poverhnostnoe modificirovanie materialami s jeffektom pamjati formy– Krasnodar: Izdatel'skij dom-Jug –2009.– 354 s.

15. Blednova Zh.M., Rusinov P.O., Balaev Je.Ju.O. Povysenie jekspluatacionnyh svojstv izdelij formirovaniem poverhnostnyh kompozicij iz materialov s JePF s gradientom svojstv i temperatur fazovyh prevrashhenij. Sovremennye naukojomkie tehnologii. – 2016. - № 9-3. S. 378-384.

16. Kul'kov S.N., Rudaj V.V. Mikrostruktura kompozicionnogo materiala TiC-TiNi s mikrogradientnoj strukturno-neustojchivoj matricej // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika. 2012. №5/2. S. 167-169.

17. Li D.Y., Liu D.Y. The mechanism responsible for high wear resistance of Pseudo-elastic TiNi alloy - a novel tribo-material // J. Wear. 1999. Vol. 225-229. P. 777-283.

18. Li D.Y. Development of novel tribo-composites with TiNi shape memory alloy matrix // Wear. 2003. V. 255. P. 617–628.

19. Pushin V.G. Splavy nikelida titana s pamjat'ju formy. Chast' 1. Struktura, fazovye prevrashhenija i svojstva. Ekaterinburg: UrO RAN, 2006- 414 s.

20. Rusinov P.O., Blednova Zh.M. Hardware-Technological Features of Layered Surface Composition Made of Shape Memory Materials in a Single Vacuum Cycle. Key Engineering Materials, 2017, Vol. 723, pp 497-502. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.723.497.

21. Blednova Zh.M., Rusinov P.O., Bezmogorychnaja M.E. Vlijanie granulometricheskogo sostava, jenergeticheskogo sostojanija i reakcionnoj sposobnosti napyljaemogo materiala na formirovanie nanosostojanija poverhnostnyh sloev iz materialov s jeffektom pamjati formy (JePF) // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2016. – №07(121). S. 484 – 498. Doi: 10.21515/1990-4665-121-021

22. Rusinov P.O., Blednova Zh.M. Structural and technological patterns of formation of surface nanostructured layers TiNiZr by high-speed flame spraying. Advanced Materials and Structural Engineering. Francis Group, London, 2016 p.21-24.

23. Rusinov P.O., Blednova Zh.M. Vlijanie cirkonija na strukturu i svojstva splava na osnove TiNi. Nauchnyj zhurnal KubGAU, No121(07), 2016 goda. Jelektronnyj resurs. <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/20.pdf> Doi: 10.21515/1990-4665-121-020

24. Rusinov P.O., Blednova Zh.M. Formation of nanostructured Ti-Ni-Hf-Cu coatings by high-speed flame spraying of mechanically activated powders. Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering. Taylor & Francis Group, London, 2016, p. 195-198.