

Научная статья

УДК 621.891

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-100-111

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ НИТРИДАМИ

Н.В. Севостьянов¹, Е.С. Буданова¹, В.Д. Хватов¹, А.Н. Фомичев¹

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

Аннотация. Представлены результаты экспериментального определения коэффициента трения и степени износа металлических композиционных материалов с никелевой и медной матрицей, армированных нитридами, в парах трения с разными марками сталей в условиях варьирования нагрузки и скорости скольжения. Показано, что независимо от матрицы композиционные материалы с нитридным армированием обладают высоким коэффициентом трения. При низких значениях скорости скольжения и нагрузки преобладает адгезионный механизм трения, но с увеличением данных параметров повышается доля абразивного механизма трения. Дополнительно проанализированы структуры исследуемых металлических композиционных материалов.

Ключевые слова: коэффициент трения, износ, металлический композиционный материал, нитриды, трибология, антифрикционный

Для цитирования: Севостьянов Н.В., Буданова Е.С., Хватов В.Д., Фомичев А.Н. Триботехнические особенности металлических композиционных материалов, армированных нитридами // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-100-111.

Scientific article

TRIBOTECHNICAL FEATURES OF METAL COMPOSITE MATERIALS REINFORCED WITH NITRIDES

N.V. Sevostyanov¹, E.S. Budanova¹, V.D. Khvatov¹, A.N. Fomichev¹

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

Abstract. The paper presents the results of experimental determination of friction coefficient and wear rate of nitride-reinforced nickel and copper matrix CMs in friction pairs with different steel grades under varying load and sliding speed. It is shown that irrespective of the matrix material, nitride-reinforced MCMs have a high friction coefficient. At low sliding velocities and load, the adhesion mechanism of friction prevails, but with the increase of these parameters, the share of abrasion mechanism of friction increases. As an additional study, the structures of the investigated MCMs were analyzed.

Keywords: coefficient of friction, wear, metal composite material, nitrides, tribology, anti-friction

For citation: Sevostyanov N.V., Budanova E.S., Khvatov V.D., Fomichev A.N. Tribotechnical features of metal composite materials reinforced with nitrides. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-100-111.

Введение

В настоящее время особое внимание уделяется разработке новых материалов, которые можно эксплуатировать при экстремально низких или высоких значениях температур, контактных давлений, скоростей скольжения, механических напряжений. Наиболее перспективными являются металлические композиционные материалы (МКМ), армированные нитридными соединениями. Их можно отнести к материалам нового поколения [1], которые составляют основу для создания гражданской и специальной техники, конкурентоспособной на мировом рынке [2].

Ценность нитридов металлов заключается в комплексе свойств, таких как высокая твердость, химическая инертность, устойчивость к истиранию, что обуславливает возможность их широкого применения. Некоторые нитриды обладают высокой огнеупорностью (нитрид бора), диэлектрическими (нитрид алюминия) и полупроводниковыми свойствами, высокой химической устойчивостью в различных агрессивных средах [3]. Композиционные материалы с нитридным армированием системы Ni–TiC уже успешно используются в электронике, атомной промышленности, космической и авиационной технике, современном машиностроении и других отраслях. Материалы для авиационной промышленности обладают низкой плотностью, при этом прочность достигает высоких значений, что делает их уникальными.

В металлургическом производстве давно известна технология азотирования сталей, при которой поверхностный слой детали упрочняется за счет образования нитридов легирующих элементов (Cr, Mo, W). Модифицирование нитридами также применяется для упрочнения и повышения режущих свойств сталей. В работах [4, 5] показано, что повышение прочности спеченных азотсодержащих сталей с нитридным упрочнением обусловлено выделением из α -фазы тонкодисперсных равноосных нитридов титана или ниобия.

Помимо классических сплавов на основе железа, нитридами упрочняют другие материалы, например керамические. Так, модифицирование нитридом титана позволяет повысить триботехнические свойства керамического материала [6]. Нитриды титана тугоплавки, прочны и имеют высокую электропроводимость [7]. Нитриды могут применяться во многих сферах материаловедения. Так, в ядерной энергетике циркониевые сплавы активно используют в реакторах для раскисления и деазотизации. Нитридные соединения циркония также применяются в теплоизоляторах, в качестве абразивных материалов и др. [8].

Методики внедрения нитридов в матрицу различны и являются одним из определяющих факторов при формировании свойств конечного материала. В работе [9] оценены свойства абразивостойких наплавленных сплавов системы легирования Fe–Cr–Mo–Ni–Ti–C–W под влиянием ультрадисперсных частиц нитрида титана TiN. Выявлено, что образующаяся фаза (карбиды $(\text{Ti}_{0,91}\text{Mo}_{0,09})\text{C}_{0,92}$), для которой нитриды TiN становятся центрами кристаллизации, обладает высокой твердостью и стойкостью к коагуляции при нагреве. Это способствует повышению механических и эксплуатационных свойств наплавленного металла.

В настоящее время требования к современной технике усиливаются. Машины и оборудование становятся компактнее, мощнее, производительнее, при этом увеличиваются нагрузки на узлы и механизмы. Одновременно необходимо сохранить надежность и долговечность узлов машин. В связи с этим производители стали чаще применять композиционные материалы для изготовления нагруженных деталей [10]. Так, автопроизводители теперь широко используют композиционные материалы для изготовления подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания [11]. Немаловажными являются испытания на трение и износ подобных деталей, которые показывают стойкость материалов в различных условиях [12].

Сплавы на основе меди и никеля широко используются в сфере электрических проводников, корабле-, машино-, приборостроении и др. Никель и его сплавы являются хорошими конструкционными материалами, поэтому износостойкие покрытия на их основе представляют практический интерес. Чаще всего сплавы никеля содержат кобальт, который позволяет упрочнить поверхность изделий и повысить износостойкость, уменьшая износ сопряженных пар [13, 14]. Медные композиционные материалы обязательно легируются или армируются другими составляющими, так как медь в чистом виде имеет пониженные значения механических и триботехнических свойств. Например, МКМ Cu–Al₂O₃ обладает сочетанием высоких значений электропроводимости и механических свойств при высоких температурах [15].

Немаловажным при разработке и внедрении МКМ в производство является исследование их структуры. Структура предопределяет комплекс физико-механических свойств материала. Само же ее формирование зависит от физико-химических процессов между задействованными компонентами и их обработки. При обработке исходной порошковой смеси при механическом легировании происходят такие процессы, как пластическая деформация, накопление дефектов кристаллического строения, разрушение частиц, сварка осколков по ювенильным поверхностям, диффузия и взаимодействие между компонентами, вызывающие образование новых, как правило, наноразмерных фаз [16]. В связи с множеством процессов, которые влияют на исходное состояние порошков, конечная структура может отличаться от ожидаемого результата. Однако анализ структурных составляющих, в данном случае нитридов, помогает оценить не только их геометрические параметры (форму, размер), но и равномерность распределения. Для полноценной характеристики структуры получаемого композиционного материала необходимо определить следующие параметры [17]:

- связаны ли компоненты фаз между собой химически (для выявления двух разнородных фаз);
- частицами какого размера представлены элементы фаз;
- насколько прочно связаны между собой фазы.

В данной статье рассмотрены триботехнические особенности процесса трения МКМ на основе меди и никеля с нитридным армированием в условиях варьирования скоростей скольжения и нагрузок в паре трения с разными типами сталей, а также получены изображения структуры некоторых образцов с нитридным армированием. Цель работы – определение возможных областей применения в узлах трения МКМ, армированных нитридами металлов, по результатам исследования процесса трения при различной нагрузке и скорости скольжения.

Материалы и методы

В качестве матричной основы выбраны медь и никель как наиболее распространенные и технологичные металлы для МКМ. В качестве армирующих компонентов использовали доступные нитридные соединения: нитрид циркония (ZrN), нитрид алюминия (AlN), нитрид хрома (CrN) и нитрид титана (TiN). Образцы МКМ изготавливали методом порошковой технологии. Исходные порошки меди и никеля смешивали с порошками нитридов на валковой мельнице с использованием мелющих тел из стали до гомогенного состояния. Дальнейшее компактирование образцов осуществляли методом горячего прессования в вакууме. Полученные заготовки обрабатывали механически для устранения облоя, загрязнений и выравнивания поверхности. Из подготовленной заготовки получали образцы для испытаний в форме плоского диска Ø60 мм.

Трибологические испытания проводили по схеме «палец–диск» («торец стержня–поверхность диска») в условиях сухого трения скольжения. Коэффициент трения определяли при различном нагружении (нормальная нагрузка изменялась от 1 до 5 Н) и скорости скольжения (от 0,2 до 0,5 м/с). На рис. 1 приведены схема трения, внешний вид образца и трибомашина.

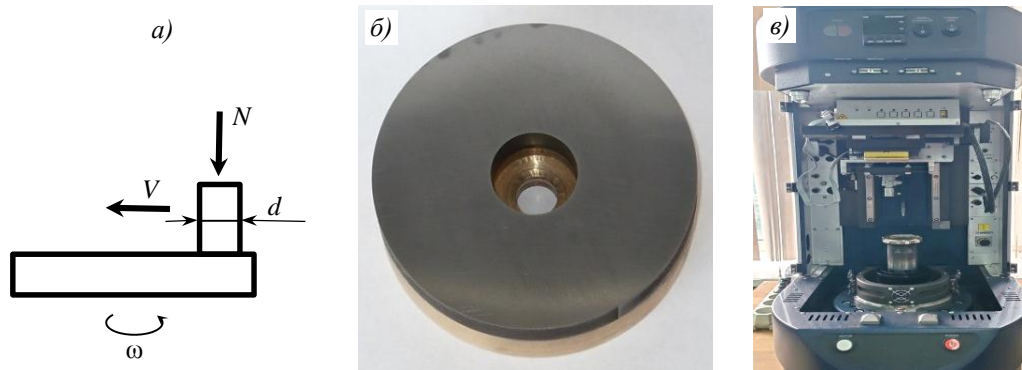


Рис. 1. Схема трения «палец–диск» (а), внешний вид образца металлического композиционного материала для испытаний на трение (б) и исследовательское оборудование (в). ω – угловая скорость вращения диска, d – диаметр стержня, N – нормальная сила нагрузки, V – радиальная скорость перемещения стержня

Контртело представляет собой стержень (палец) $\varnothing 6,35$ мм и высотой 20 мм. В качестве материалов контртел использовали стали, применяемые в подшипниках: 95X18, ВНС-65Ш и ШХ15. Дисковые образцы устанавливали на вращающийся привод. Палец закрепляли к датчику силы, регистрирующему нормальную силу нагрузки и горизонтальную силу трения, возникающую при движении образца. Каждый цикл испытаний проводили по одной дорожке трения без радиального перемещения пальца [18]. Показателями процесса фрикционного взаимодействия в измерительной системе прибора являются коэффициент трения и накопленный за время испытания суммарный износ пары трения.

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

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний МКМ с армированием фазами нитридов в паре трения со сталями приведены в табл. 1. Независимо от металла матрицы и состава армирующей фазы композиционные материалы в паре трения со сталями обладают высоким коэффициентом трения. Такие значения коэффициента трения указывают на высокое сродство железных сплавов к нитридам, что вызвано сильным адгезионным взаимодействием трущихся поверхностей. После испытаний на дорожках трения наблюдали задиры в результате возникновения процессов микрорезания. Высокие значения коэффициента трения и образование задиры свидетельствуют о смешанном адгезионно-абразивном механизме трения.

Исследовано влияние различных нагрузок на контакт трения при разной скорости скольжения. При небольших нагрузках и скоростях скольжения процессы трения протекают в основном по адгезионному механизму, в результате чего наблюдаются высокие значения коэффициентов трения. С увеличением нагрузки и скорости скольжения повышается доля абразивного механизма трения, что является причиной снижения коэффициента трения.

**Коэффициент трения металлических композиционных материалов (МКМ)
в паре трения со сталями**

Материал	Нагрузка, Н	Коэффициенты трения МКМ в паре трения со сталью					
		95X18		ШХ15		ВНС-65Ш	
		при скорости скольжения, м/с					
		0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
Cu-AlN	1	0,92	0,96	0,43	0,91	0,65	0,80
	2	0,94	0,93	0,42	0,92	0,61	0,63
	3	0,88	0,61	0,48	0,75	0,47	0,67
	4	0,69	0,61	0,43	0,76	0,42	0,67
	5	0,51	0,65	0,40	0,79	0,44	0,46
Cu-ZrN	1	0,91	0,75	0,48	0,56	0,96	0,95
	2	0,70	0,76	0,52	0,53	0,85	0,49
	3	0,67	0,78	0,46	0,70	0,63	0,47
Cu-CrN	1	0,61	0,67	0,55	0,65	0,62	0,68
	2	0,68	0,75	0,56	0,95	0,76	0,75
	3	0,69	0,84	0,53	0,92	0,93	0,91
Cu-TiN	1	0,90	0,95	0,96	0,98	0,80	0,93
	2	0,80	0,83	0,90	0,90	0,84	0,97
	3	0,60	0,57	0,61	0,56	0,86	0,75
Ni-TiN	1	0,91	0,94	0,84	0,97	0,92	0,90
	2	0,95	0,97	0,92	0,89	0,85	0,89
	3	0,94	0,92	0,91	0,87	0,87	0,74
Ni-ZrN	1	0,94	0,95	0,78	0,71	0,92	0,84
	2	0,65	0,86	0,60	0,67	0,84	0,84
	3	0,79	0,56	0,66	0,61	0,86	0,85
	5	0,75	0,54	0,76	0,63	0,83	0,69
Ni-CrN	2	0,60	0,83	0,90	0,98	0,83	0,88
	3	0,52	0,80	0,83	0,93	0,70	0,90
	4	0,62	0,86	0,74	0,89	0,72	0,86
	5	0,66	0,63	0,63	0,76	0,80	0,77

В табл. 2 приведены результаты суммарного износа пары трения МКМ со сталями. Самый большой износ зафиксирован для пар трения с МКМ, армированными TiN, независимо от металла матрицы. Можно отметить, что износ МКМ, армированных TiN, с увеличением нагрузки и скорости скольжения уменьшается.

Износ в парах трения с МКМ, армированными нитридом циркония, являющегося своего рода аналогом нитрида титана, был меньше по сравнению с TiN, но оставался высоким. Аналогично с увеличением нагрузки и скорости скольжения износ уменьшался. При определенных нагрузках, например 4 Н, наблюдался критический характер трения, что приводило к высоким значениям коэффициента трения и появлению сильных борозд на дорожке трения. По этой причине исследования при таких нагрузках прекращали в самом начале.

Таблица 2

**Суммарный износ металлических композиционных материалов (МКМ)
в паре трения со сталями**

Материал	Нагрузка, Н	Суммарный износ, мм, МКМ в паре трения со сталью					
		95X18		ШХ15		ВНС-65Ш	
		при скорости скольжения, м/с					
		0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
Cu–AlN	1	0,005	0,014	0,017	0,017	0,004	0,015
	2	0,004	0,013	0,016	0,011	0,006	0,014
	3	0,005	0,012	0,018	0,013	0,014	0,035
	4	0,006	0,017	0,016	0,013	0,018	0,035
	5	0,007	0,019	0,023	0,016	0,020	0,035
Cu–ZrN	1	0,026	0,036	0,033	0,040	0,023	0,022
	2	0,014	0,018	0,040	0,008	0,025	0,020
	3	0,012	0,009	0,012	0,005	0,017	0,015
Cu–CrN	1	0,005	0,010	0,003	0,010	0,014	0,011
	2	0,009	0,013	0,005	0,010	0,010	0,008
	3	0,012	0,016	0,011	0,009	0,008	0,006
Cu–TiN	1	0,036	0,038	0,038	0,020	0,049	0,029
	2	0,010	0,019	0,011	0,020	0,028	0,029
	3	0,007	0,013	0,008	0,005	0,017	0,031
Ni–TiN	1	0,042	0,027	0,029	0,031	0,029	0,026
	2	0,017	0,015	0,016	0,014	0,014	0,010
	3	0,005	0,005	0,010	0,008	0,009	0,010
Ni–ZrN	1	0,010	0,007	0,021	0,011	0,022	0,012
	2	0,012	0,004	0,005	0,008	0,003	0,008
	3	0,008	0,003	0,004	0,007	0,004	0,008
	5	0,006	0,008	0,003	0,004	0,003	0,009
Ni–CrN	2	0,009	0,005	0,003	0,007	0,003	0,007
	3	0,005	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005
	4	0,006	0,009	0,005	0,005	0,005	0,006
	5	0,004	0,012	0,003	0,004	0,007	0,011

Пары трения МКМ с AlN показали средние значения износа, что может быть результатом некорректных испытаний. Скольжение пар трения протекало нестабильно, рывками. Испытания на износ МКМ, армированных AlN, проведены только для медной матрицы. Для никелевой матрицы получены очень высокие значения коэффициентов трения, движение происходило рывками с проскальзыванием, в связи с чем проведение испытаний было затруднено.

Пары трения сталей с МКМ, армированных CrN, продемонстрировали наименьший износ среди исследованных материалов. При этом образцы с медной матрицей имеют больший износ по сравнению с никелевой, что можно объяснить более высокими уровнями механических свойств никеля.

Таким образом, все исследованные пары трения МКМ со сталями показали высокие значения коэффициента трения, не отвечающие требованиям для применения в узлах скольжения машин.

На рис. 2 приведен типичный график изменения коэффициента трения МКМ, армированного нитридами, в паре со сталями. Среднее значение коэффициента трения стабильно в течение всего процесса испытания. Однако дребезг имеет значительную амплитуду (до 0,4). Снижение среднего коэффициента трения при повышении скорости скольжения и нагрузки можно связать с увеличением продолжительности фазы проскальзывания в момент дребезга.

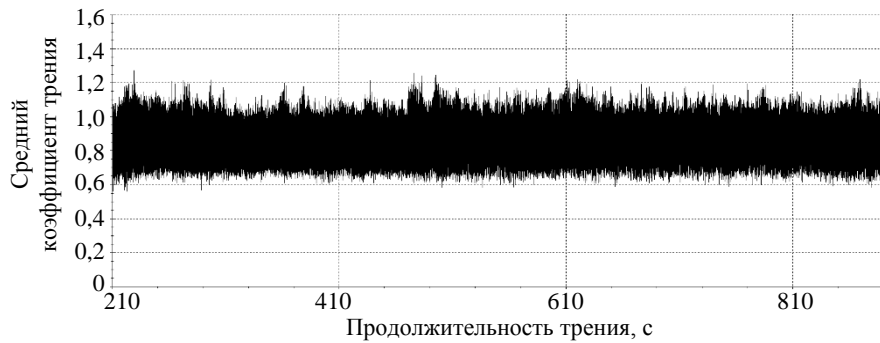


Рис. 2. Изменение среднего коэффициента трения металлических композиционных материалов на никелевой основе, армированных нитридами

Характер дорожек после испытаний неоднородный, иногда появляются задиры. Такой результат можно объяснить смешанным (адгезионно-абразивным) механизмом износа поверхностного слоя при трении, вследствие которого зарождаются, образуются и отделяются частицы исследуемого материала в зоне контакта [19–21]. Многочисленные экспериментальные сведения подтверждают протекание интенсивных химических превращений на поверхности контакта. Эти превращения инициируются значительными напряжениями сдвига, развиваемыми в верхних слоях на поверхностях при относительном скольжении твердых тел [22]. Однако в МКМ на основе меди и никеля с нитридным армированием не наблюдали резкого снижения коэффициента трения (табл. 1), что свидетельствует об отсутствии протекания химических реакций с образованием поверхностных пленок.

Кроме того, изменения коэффициента трения и износа МКМ на основе никеля и меди можно обосновать с помощью ранее полученных результатов исследования структур никелевых и медных сплавов после испытаний на трение. Рассчитаны остаточные напряжения в поверхностных слоях материалов, которые превышали предел прочности при растяжении [23]. Напряжения, возникающие в процессе трения, могут быть больше напряжений в условиях статического или динамического деформирования.

Исследованы структуры МКМ на основе никелевой матрицы с нитридным армированием. На рис. 3 приведены исходные оптические изображения структур. Цветовая гамма никелевой металлической матрицы и нитридов искажена из-за применения фильтров и поляризаторов, предназначенных для контрастирования фаз и устранения блеска. Следует отметить, что использованы порошки с исходной дисперсностью F1200, однако в процессе механического легирования дисперсность менялась под действием размольных тел. В процессе спекания также могут наблюдаться рекристаллизация и коагуляция, приводящая к увеличению частиц армирующей фазы.

В структуре МКМ системы Ni–TiN присутствуют крупные конгломераты нитридной фазы, равномерно распределенные на поверхности. Общее соотношение доли матрицы и нитридной фазы не соответствует составу. Заниженная доля нитридной фазы на поверхности является результатом выкрашивания армирующего компонента в процессе подготовки, имеющего слабую связь с матрицей. По данным работы [24],

нитрид титана имеет низкую смачиваемость никелем (угол смачивания составляет 113 градусов), в результате чего он удерживается в никелевой матрице в основном механически. Слабое взаимодействие TiN с Ni также приводит к коагуляции нитридной фазы в процессе спекания.

Угол смачивания никелем нитрида циркония составляет 90 градусов (средняя величина) [24]. Нитридная фаза равномерно распределяется на поверхности МКМ, присутствуют мелкие конгломераты. Площадь нитридной фазы значительно меньше объемной концентрации, что свидетельствует о выкрашивании в процессе подготовки поверхности из-за слабого взаимодействия с никелевой матрицей. В связи с лучшим взаимодействием ZrN с никелевой матрицей по сравнению с TiN частицы нитрида менее склонны к коагуляции и образуют гораздо более мелкие конгломераты. Однако общая площадь нитридной фазы ZrN на поверхности меньше, чем площадь фазы TiN. Это объясняется тем, что одинарные частицы и мелкие конгломераты гораздо легче и быстрее выкрашиваются, чем крупные образования.

Нитрид хрома равномерно распределяется на поверхности МКМ системы Ni–CrN (рис. 3, в). Конгломераты отсутствуют, доля нитридной фазы соответствует объемному составу. По данным работы [24], угол смачивания никелем нитрида хрома составляет 0 градусов, т. е. происходит абсолютное смачивание. При таком угле смачивания между матрицей и армирующей фазой устанавливается прочная связь.

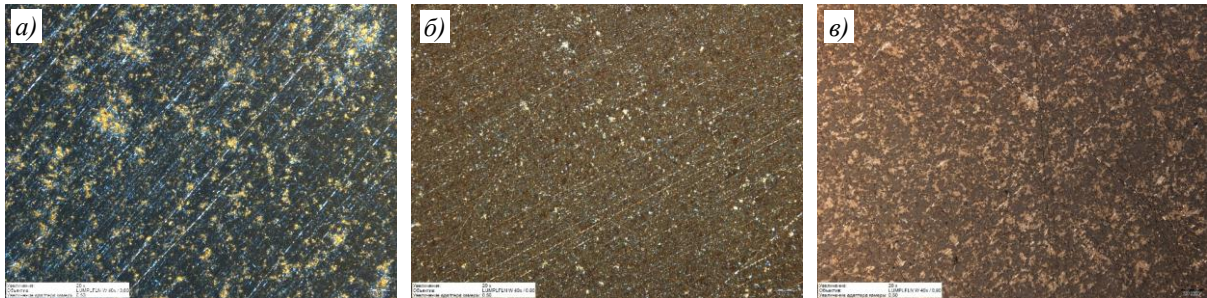


Рис. 3. Структуры металлических композиционных материалов на никелевой основе, армированных TiN (а), ZrN (б) и CrN (в)

Полученные изображения структур обработаны с помощью компьютерной бинаризирующей программы. Бинаризацию проводили по полю яркости по выделенным ключевым структурным элементам с определением порога яркости. Бинаризированные изображения структур приведены на рис. 4.

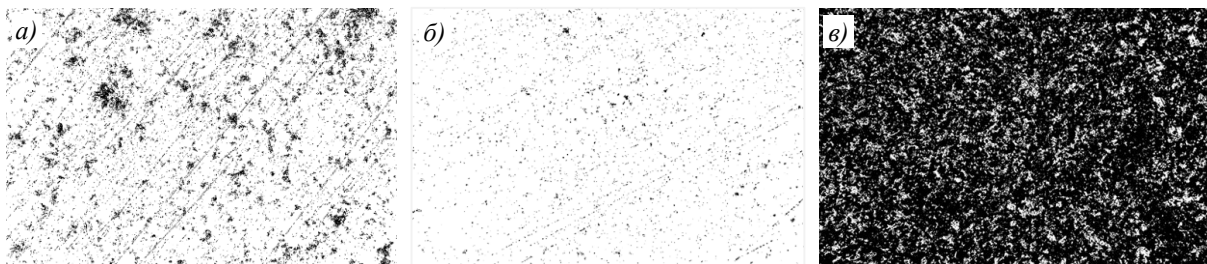


Рис. 4. Бинаризированные изображения структур металлических композиционных материалов на никелевой основе, армированных TiN (а), ZrN (б) и CrN (в)

При статистическом анализе структурных составляющих применен фильтр по площади объектов для воспроизводимости выборки и избавления от шумов, возникших при съемке. По полученным геометрическим данным объектов на изображениях построены гистограммы распределения нитридов в структуре МКМ (рис. 5).

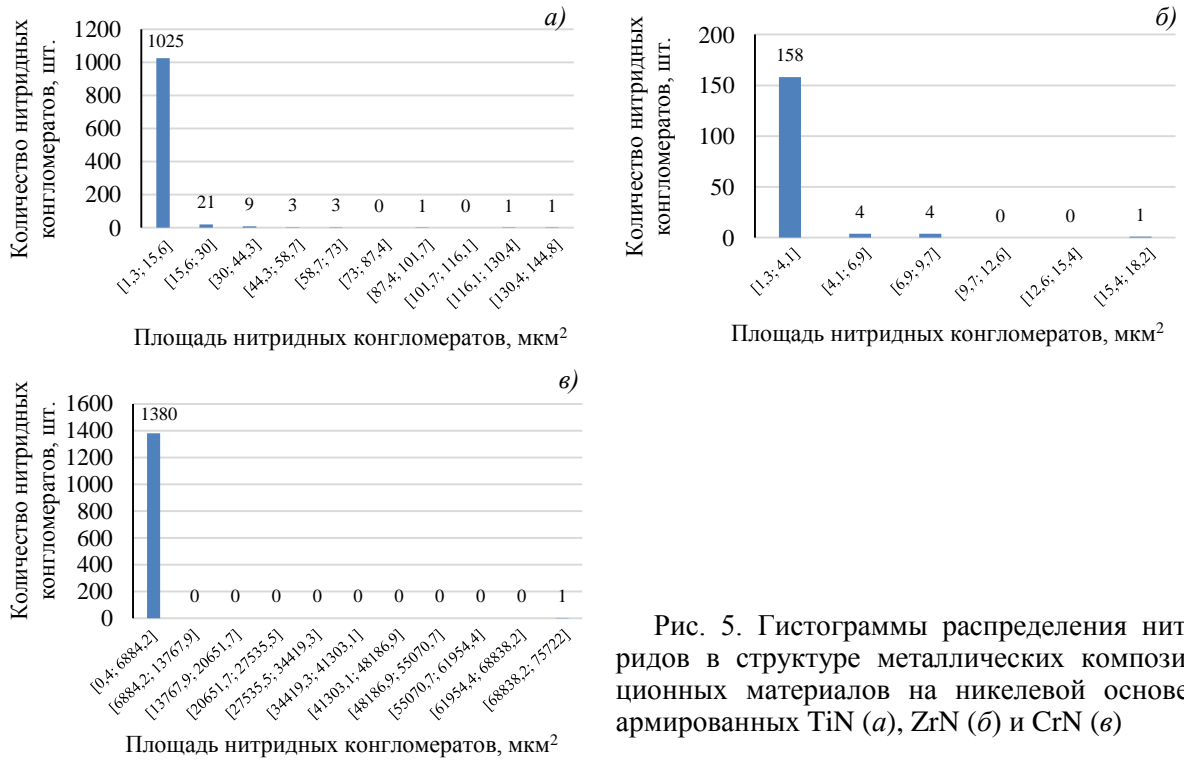


Рис. 5. Гистограммы распределения нитридов в структуре металлических композиционных материалов на никелевой основе, армированных TiN (а), ZrN (б) и CrN (в)

Все гистограммы имеют асимметричный вид, смещены влево. Коэффициенты асимметрии варьируются в пределах [3,43; 37,16]. Гистограмма МКМ системы Ni–CrN малоинформативна, так как нитриды хрома занимают большую часть площади поверхности. На бинаризованном изображении CrN представляет собой единый кластер и распознаются как один массивный объект. Мелкие объекты являются либо посторонним шумом, возникшим при съемке шлифа, либо представляют собой отдельные частицы нитридов хрома, расположенные отдельно от основного массива. Распределение нитридов в порошковых МКМ аналогично классическому распределению неметаллических включений в сталях и твердых сплавах на никелевой основе [25].

Заключения

Трибологические испытания МКМ на основе меди и никеля с нитридным армированием в паре трения со сталями показали высокие значения среднего коэффициента трения, что приводит к скольжению рывками. Данный параметр имеет высокую амплитуду колебания значений.

Исследования с варьированием скорости скольжения и нагрузки показали, что трение протекает по смешанному механизму. При низких скоростях скольжения и нагрузках преимущественно преобладает адгезионный характер трения. С увеличением нагрузки и скорости скольжения повышается доля абразивного механизма, что приводит к снижению коэффициента трения за счет скольжения при механическом разрушении контакта сопряженных поверхностей. Снижению среднего коэффициента трения также может способствовать увеличение продолжительности фазы проскальзывания.

Структуры МКМ с нитридным армированием визуально однородны. Однако анализ геометрических параметров подтвердил асимметричное распределение структурных составляющих. При этом коэффициент асимметрии варьируется в диапазоне [3,43; 37,16]. На некоторых изображениях обнаружены крупные конгломераты нитридов, образование которых можно объяснить отсутствием достаточного смачивания матрицы металлом.

Таким образом, композиционные материалы на основе меди и никеля с нитридным наполнением перспективны для разработки материалов различных фрикционных узлов, работающих при высоких температурах и нагрузках в условиях низких скоростей.

Список источников

1. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В. Металлокерамические композиционные материалы для подшипников скольжения (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Нитриды: методические указания для студентов механических специальностей / Сост.: А.Е. Иванцов, Г.А. Рожкова. Казань: КГТУ, 2006. 20 с.
4. Манегин Ю.В., Гуляев И.А., Колесникова О.Ю., Омельченко А.В. Порошковые стали и сплавы с нитридным упрочнением // Технология металлов. 2002. № 12. С. 5–12.
5. Кардонина Н.И., Колпакова А.С. Исследование фазового и структурного состава высокоазотистых порошков на основе железа // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2000. № 2. С. 15–18.
6. Комарова А.И., Витязь П.А., Комарова В.И. Повышение трибомеханических свойств МДО-покрытий путем их модифицирования нитридом титана // Сб. науч. тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения». М., 2016. С. 89–92.
7. Харина Г.В., Анахов С.В. Химические свойства конструкционных металлов и сплавов: учеб. пособие. Екатеринбург: РГППУ, 2019. 152 с.
8. Михайленко Я.И. Курс общей и неорганической химии. М.: Высшая школа, 1966. 664 с.
9. Артемьев А.А. Формирование структуры абразивостойких сплавов под влиянием ультрадисперсных частиц нитрида титана // Сб. тр. XIV Российской ежегодной конф. молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». М.: ИМЕТ РАН, 2017. С. 7–9.
10. Севостьянов Н.В., Бурковская Н.П. Современные аспекты развития триботехнического материаловедения тяжело нагруженных узлов сухого трения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89.
11. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В., Болсуновская Т.А., Ефимочкин И.Ю. Совершенствование материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91.
12. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Чуманов И.Р., Лещев Н.Е. Новый износостойкий сплав на кобальтовой основе: влияние кремния и углерода на структуру и триботехнические характеристики. Часть 1 // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-59-69.
13. Старунов А.В., Астахова М.Н., Балакай В.И. Новый композиционный материал на основе сплава никель-кобальт, содержащий в качестве легирующего компонента оксид кремния // Сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации»: в 4 т. Курск, 2015. Т. 4. С. 88–90.
14. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
15. Смирнов В.М., Шалунов Е.П. Свойства и структура композиционных металломатричных материалов на основе порошковой меди, получаемых реакционным механическим легированием // Сб. мат. VII Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ РАН, 2017. С. 437–439.
16. Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Федосенко А.С. Закономерности формирования структуры и фазового состава механически легированных композиционных порошковых материалов для газотермических способов напыления // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 1 (50). С. 36–47.

17. Черниговская М.А., Позднякова В.Г. О способе определения структуры полимерных композиционных материалов // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2022. № 9. С. 77–78.
18. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытания на трение и износ. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 152 с.
19. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М.: Машиностроение, 1986. 359 с.
20. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1987. 526 с.
21. Литвинов В.Н., Михин Н.М., Мышкин Н.К. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. М.: Наука, 1979. 187 с.
22. Белый А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
23. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.
24. Кислый П.С., Боднарчук Н.И., Боровикова М.С. и др. Керметы. Киев: Наукова думка, 1985. 272 с.
25. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Пережогин В.Ю., Ха Н.Н. Некоторые практические соображения, связанные с компьютерными процедурами обработки изображений в материаловедении // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2019. № 4 (50). С. 35–44.

References

1. Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V. Cermets for plain bearings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 26, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik RAN*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. *Nitrides: guidelines for students of mechanical specialties*. Comp. A.E. Ivantsov, G.A. Rozhkova. Kazan: KSTU, 2006, 20 p.
4. Manegin Yu.V., Gulyaev I.A., Kolesnikova O.Yu., Omelchenko A.V. Powder steels and alloys with nitride hardening. *Tekhnologiya metallov*, 2002, no. 12, pp. 5–12.
5. Kardonina N.I., Kolpakova A.S. Study of the phase and structural composition of high-nitrogen iron-based powders. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2000, no. 2, pp. 15–18.
6. Komarova A.I., Vityaz P.A., Komarova V.I. Improving the tribomechanical properties of MAO coatings by modifying them with titanium nitride. *VIII Int. scientific and technical. conf. «High technology at the current stage of mechanical engineering development»*. Moscow, 2016, pp. 89–92.
7. Kharina G.V., Anakhov S.V. *Chemical properties of structural metals and alloys: textbook*. Ekaterinburg: RSVPPU, 2019, 152 p.
8. Mikhailenko Ya.I. *Course of general and inorganic chemistry*. Moscow: Vysshaya shkola, 1966, 664 p.
9. Artemyev A.A. Formation of the structure of abrasion-resistant alloys under the influence of ultrafine titanium nitride particles. *XIV Rus. annual conference of young researchers and postgraduates «Physical chemistry and technology of inorganic materials»*. Moscow: IMET RAS, 2017, pp. 7–9.
10. Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. The effect of high concentrations of cobalt on the properties of magnets Pr–Dy–Fe–Co–B and Nd–Dy–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89.
11. Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V., Bolsunovskaya T.A., Efimochkin I.Yu. Improvement of materials for sliding bearings of internal combustion engines (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 1 (85), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91.

12. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Chumanov I.R., Leshchev N.E. New wear-resistant cobalt-based alloy: effect of silicon and carbon on structure and tribotechnical characteristics. Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-59-69.
13. Starunov A.V., Astakhova M.N., Balakai V.I. New composite material based on nickel-cobalt alloy containing silicon oxide as an alloying component. *XII Int. Sci.-prac. conf. «Modern instrumental systems, information technologies and innovations»*: in 4 vols. Kursk, 2015, vol. 4, pp. 88–90.
14. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
15. Smirnov V.M., Shalunov E.P. Properties and structure of composite metal matrix materials based on powder copper obtained by reactive mechanical alloying. *VII Int. Conf. «Deformation and destruction of materials and nanomaterials»*. Moscow: IMET RAS, 2017, pp. 437–439.
16. Lovshchenko F.G., Lovshchenko G.F., Fedosenko A.S. Regularities of formation of structure and phase composition of mechanically alloyed composite powder materials for gas-thermal spraying methods. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2016, no. 1 (50), pp. 36–47.
17. Chernigovskaya M.A., Pozdnyakova V.G. On the method for determining the structure of polymer composite materials. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress*, 2022, no. 9, pp. 77–78.
18. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Kolmakov A.G., Rybakova L.M. *Friction and Wear Test Methods*. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2001, 152 p.
19. Buckley D. *Surface Phenomena in Adhesion and Frictional Interaction*. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 359 p.
20. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Fundamentals of friction and wear calculations*. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 526 p.
21. Litvinov V.N., Mikhin N.M., Myshkin N.K. *Physicochemical Mechanics of Selective Transfer during Friction*. Moscow: Nauka, 1979, 187 p.
22. Bely A.V. *Structure and Methods of Formation of Wear-Resistant Surface Layers*. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 208 p.
23. Rybakova L.M., Kuksenova L.I. *Structure and Wear Resistance of Metal*. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 216 p.
24. Kislyi P.S., Bodnaruk N.I., Borovikova M.S. et al. *Cermets*. Kyiv: Naukova Dumka, 1985, 272 p.
25. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Perezhogin V.Yu., Ha N.N. Some practical considerations related to computer procedures for image processing in materials science. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, no. 4 (50), pp. 35–44.

Информация об авторах

Севостьянов Николай Владимирович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Буданова Екатерина Сергеевна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Хватов Виктор Дмитриевич, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомичев Александр Николаевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikolay V. Sevostyanov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ekaterina S. Budanova, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Victor D. Khvatov, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander N. Fomichev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.10.2024; получена после доработки 11.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.10.2024.
The article was submitted 04.10.2024; received in revised form 11.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 11.10.2024.