

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Посвящается 95-летию со дня рождения
доктора технических наук, профессора
Николая Борисовича Демкина,
основателя Тверской научной школы
по механике и физике контактного взаимодействия,
первого научного редактора сборника*

Межвузовский сборник научных трудов

Выпуск 14

Рецензируемое издание

Тверь 2021

УДК 621.891
ББК 22.37:34.41:31.264-04(082)

Рецензенты: зав. кафедрой физики конденсированного состояния ТвГУ, д-р физ.-мат. наук, профессор Пастушенков Ю.Г.; зав. кафедрой автомобильных дорог, оснований и фундаментов ТвГТУ, д-р техн. наук, профессор Гультяев В.И.

Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов / под ред. В.В. Измайлова. Вып. 14. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. 108 с.

Включает в себя статьи теоретического и прикладного характера, посвященные физическим, химическим, механическим процессам контактного взаимодействия твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования.

Предназначен для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов, студентов.

Подготовлен на кафедре прикладной физики Тверского государственного технического университета.

Электронная версия сборника размещена в сети Интернет:
<http://physics.tstu.tver.ru/sbornik>

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук профессор А.Н. Болотов;

доктор техн. наук профессор Г.Б. Бурдо;

академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор И.Г. Горячева;

доктор техн. наук профессор В.В. Измайлов (отв. редактор);

доктор техн. наук профессор В.В. Мешков;

канд. техн. наук доцент В.В. Новиков;

канд. техн. наук доцент М.В. Новоселова;

доцент А.В. Мишина (отв. секретарь).

ПРЕДИСЛОВИЕ

Тематика сборника отражает результаты научных исследований сотрудников Тверского государственного технического университета, а также других образовательных и научных организаций в области механики и физики контактного взаимодействия деталей машин, трибологии, триботехники, триботехнического материаловедения, других смежных дисциплин. Представлены статьи теоретического и прикладного плана, предметом рассмотрения которых являются вопросы изучения поверхностных свойств материалов, процессов контактного взаимодействия, трения и изнашивания.

Результативность изучения многофакторных явлений, наблюдаемых при исследовании контактных взаимодействий, в большой степени зависит от согласованных усилий ученых и инженеров различных специальностей: физиков, химиков, механиков, материаловедов, математиков и др. Поэтому сборник включает широкий спектр статей фундаментального и прикладного плана, содержащих как результаты теоретических исследований, так и описание конкретных технических разработок.

Традиционно ряд статей посвящен описанию результатов моделирования процессов, возникающих в зоне контакта, с позиций механики деформируемого твердого тела. Также в публикациях уделено внимание материаловедческим аспектам обеспечения износостойкости узлов трения, рассмотрены конструкторские и технологические методы повышения надежности и эффективности оборудования при различных условиях эксплуатации, в том числе авторами сборника обсуждается вопрос разработки методики, позволяющей проводить предварительный анализ надежности технологических систем в машиностроении на этапе проектирования. Часть статей посвящена рассмотрению методики фрикционных испытаний и соответствующего испытательного оборудования.

Материалы сборника отражаются в информационных базах научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU и входят в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Публикуемые материалы предназначены для научных работников и специалистов в области проектирования и эксплуатации современного машиностроительного, энергетического, транспортного оборудования, а также для докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов машиностроительных, энергетических и приборостроительных специальностей.

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

© Горлов И.В., Полетаева Е.В.,
Болотов А.Н., 2021

В статье рассмотрена методика, позволяющая проводить предварительный анализ надежности технологических систем в машиностроении на этапе проектирования. Для разрабатываемых технологических систем необходимо производить предварительную оценку их надежности с использованием обобщенных статистических данных, полученных для аналогичных технологических машин.

Ключевые слова: технологические системы, надежность, прогнозирование, производительность, исследования.

ANALYSIS OF RELIABILITY OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS IN THE PROCESS OF DESIGN

The article describes a technique that allows for a preliminary analysis of the reliability of technological systems in mechanical engineering at the design stage. For the technological systems being developed, it is necessary to carry out a preliminary assessment of their reliability using generalized statistical data obtained for similar technological machines.

Keywords: technological systems, reliability, forecasting, productivity, research.

Введение

Для повышения эффективности машиностроительного производства многие предприятия вынуждены расширять номенклатуру выпускаемых изделий, что в большинстве случаев приводит к значительным изменениям в производственной системе (ПС). Для решения этой проблемы есть несколько путей адаптации существующей ПС к изменяющимся условиям производства. В случае многономенклатурного производства наиболее эффективным является использование группового способа изготовления деталей, что позволяет независимо от объема выпуска изделий использовать высокопроизводительное оборудование с числовым программным управлением, обладающее высокой гибкостью.

При организации производства по групповому принципу необходимо учитывать возможности имеющегося оборудования и потенциальные резервы его технологического ресурса. Для решения данной задачи проводится анализ конструкторско-технологических элементов деталей, входящих в группу, и выбираются возможные варианты технологических маршрутов их изготовления [1].

Далее на основе анализа возможных вариантов выбирается то или иное решение, которое в свою очередь опирается на технологические

возможности гибкой производственной системы (ГПС). Однако часто бывает так, что существующая ПС не отвечает каким-либо требованиям, поэтому необходимо ее совершенствование с точки зрения расширения технологических возможностей.

В общем случае при организации группового производства бывает выгодно использовать обрабатывающие центры с широкими технологическими возможностями, но большая стоимость такого оборудования и не всегда высокая производительность требуют обоснования принимаемого решения.

Еще одним путем решения данной проблемы является модернизация существующего оборудования за счет дополнительных средств технологического оснащения, что позволяет расширять технологические возможности оборудования при относительно невысоких затратах. При этом необходимо найти баланс между типовыми и оригинальными решениями.

При подготовке производства существует еще одна проблема – необходимость предварительной оценки надежности модернизированной ГПС. Оценить надежность ГПС на этапе подготовки производства достаточно сложно, так как ее структура может значительно измениться по сравнению с существующими аналогами.

При внедрении новых технологических решений в производство в рамках ГПС для определения потерь из-за возможных отказов необходимо использовать предварительную оценку их надежности, полученную на этапе проектирования. Такой подход позволит в процессе подготовки производства укрупненно учитывать потери на восстановление работоспособности оборудования при составлении планов-графиков ремонта и обслуживания техники.

Разработка рекомендаций по восстановлению работоспособности технологического оборудования затруднительна без использования опыта эксплуатации аналогичных ПС. Однако применение статистических данных по надежности для существующих ПС не всегда корректно из-за их отличия от проектируемых. В каких-то случаях такую проблему можно решить с помощью статистических данных по аналогам с учетом изменения количества элементов в проектируемых системах [2, 3], но в некоторых случаях невозможно учесть особенности эксплуатации проектируемого технологического оборудования.

Таким образом, при модернизации ПС требуется использование новых подходов для анализа их надежности на этапе проектирования. Для решения этой проблемы нужно структурно разложить существующую производственную систему на подсистемы, выполняющие определенное назначение, и получить для них статистические данные по надежности, а затем применять эту информацию для аналогичных подсистем проектируемой ПС с учетом ее особенностей.

Целью рассматриваемого исследования является отработка методики выявления предварительных параметров надежности для проектируемой ПС на основе анализа эксплуатационных данных аналогичных систем с разделением полученной информации по подсистемам, выполняющим определенное назначение, что позволит на стадии внедрения новых ГПС осуществлять предварительное прогнозирование изменения их технического состояния и его влияние на производительность производственной системы.

Анализ отказов по подсистемам определенного назначения

Анализ распределения отказов ПС показал, что отдельные подсистемы имеют аналогичное назначение, но различную величину потока отказов [3]. В большинстве случаев это связано с тем, что данные подсистемы используются на разных этапах технологического процесса. Следовательно, при выявлении параметров надежности проектируемой подсистемы это свойство должно обязательно учитываться. Таким образом, использование напрямую зависимостей для получения потока отказов подсистемы, который получается простым суммированием произведений количества однотипных элементов на поток их отказов, будет давать значительную погрешность. Решением данной проблемы может стать применение методики определения параметров надежности проектируемых ПС с разделением по подсистемам, имеющим определенное назначение.

Проведем анализ функционирования ПС на примере металлорежущего оборудования. Технологический процесс изготовления деталей состоит из четырех этапов: заготовительного производства, черновой обработки, получистовой и чистовой обработки. На некоторых этапах может использоваться однотипное оборудование, но условия его применения будут существенно отличаться. Например, токарные станки, представляющие собой подсистему ПС, могут использоваться как для выполнения токарных черновых, так и чистовых операций, но условия их эксплуатации будут кардинально отличаться. При этом на черновых операциях снимается до 70 % припуска на обработку, в результате станки, работающие на таких операциях, подвергаются значительно большим нагрузкам, чем станки, задействованные в чистовых операциях. Это приводит станки, используемые на черновых операциях, к повышенному износу и быстрой потере точности, соответственно, поток отказов таких станков будет более интенсивным. Кроме того, на надежность станков существенное влияние оказывает состояние заготовок (размеры, твердость и др.). При отклонении параметров заготовок от технических требований могут отказаться в первую очередь станки, используемые в начале технологического процесса, а до станков на следующем этапе такие заготовки уже не доходят. Таким образом, на первом этапе

технологического процесса заготовки, не соответствующие техническим требованиям, отбраковываются, и количество отказов, связанных с заготовками, на следующем этапе производства значительно сокращается.

Определение параметров надежности производственных систем на этапе проектирования

Для определения предварительных параметров надежности модернизируемых ПС требуется использовать эксплуатационные данные для аналогичных технологических машин с распределением информации по отдельным подсистемам, используемым в аналогичных условиях. В значительном количестве случаев эти данные доступны для технологического оборудования, применяемого на машиностроительных предприятиях. Определение параметров надежности с возможным разделением по подсистемам аналогичного назначения можно проводить с помощью двух основных вариантов: по среднему уровню надежности аналогичных подсистем и с помощью коэффициентного метода [4].

При использовании первого варианта для подсистем, выполняющих аналогичные функции, принимается $\lambda'_{ai} = \lambda'_{ni}$, где λ'_{ai} – интенсивность потока отказов для основных элементов, которые влияют на надежность i -й подсистемы ПС аналога; λ'_{ni} – интенсивность потока отказов для основных элементов, которые влияют на надежность i -й подсистемы проектируемой ПС. Следовательно, для ПС как сложных систем, состоящих из r подсистем, выполняющих определенные задачи, можно применять известные интенсивности потоков отказов λ'_{ai} для подсистем аналогов и с учетом количества N'_{ni} их элементов. Этот учет позволяет определить суммарный поток отказов проектируемой подсистемы

$$\lambda'_n = \sum_{i=1}^r N'_{ni} \lambda'_{ai}.$$

Наработку на отказ проектируемой подсистемы можно найти по выражению

$$T'_{nt} = \frac{1}{\lambda'_n}.$$

Используя второй вариант, параметры надежности проектируемой подсистемы можно определить с помощью коэффициентного метода с учетом результатов опытной эксплуатации подсистемы аналога. В этом случае определяется поправочный коэффициент

$$a = \frac{T'_{наф}}{T'_{на}},$$

где $T'_{на}$ – расчетная наработка на отказ аналогичной подсистемы; $T'_{наф}$ – опытная наработка на отказ аналогичной подсистемы.

$T'_{на}$ в большинстве случаев определяется на базе табличных данных для потока отказов λ'_{ai} отдельных подсистем N'_{ai} , выполняющих определенные функции:

$$T'_{на} = \left(\sum_{i=1}^r N'_{ai} \lambda'_{ai} \right)^{-1}.$$

Тогда наработка на отказ проектируемой подсистемы

$$T'_{ин} = aT'_{на}.$$

Представленные варианты определения параметров надежности проектируемых ПС достаточно просты, но в большинстве случаев позволяют провести предварительный анализ параметров эксплуатации проектируемых подсистем с достаточной точностью.

Заключение

Выбор конкретного варианта определения предварительных параметров надежности для подсистем, выполняющих определенные задачи, в процессе проектирования зависит от большого количества факторов, таких как достаточность статистических данных по эксплуатации подсистем-аналогов; наличие отвечающих требуемым задачам табличных данных по эксплуатации отдельных подсистем; качество процесса проектирования и др. Следовательно, в процессе проектирования необходимо обосновывать выбор конкретных методов расчетов параметров надежности, и в большинстве случаев подход к решению рассматриваемой проблемы будет индивидуальным. Причем для получения предварительных данных сначала могут использоваться доступные приближенные методы [5], которые чаще всего дают относительно грубые результаты, но далее при проведении эксплуатационных исследований с ростом объема статистических данных по отдельным подсистемам появляется возможность применения более точных методик, что обеспечит повышение качества прогнозирования изменения технического состояния ПС.

Разработка планов для проектируемого многономенклатурного машиностроительного производства сталкивается с существенными трудностями вследствие недостатка данных по эксплуатации отдельных подсистем. В таких случаях предприятия – изготовители технологического оборудования обязаны представлять эксплуатирующим организациям необходимые данные по их надежности, но использовать их следует с учетом реальных условий эксплуатации. На основе анализа полученных от производителей данных по надежности технологических машин можно с достаточной точностью определить необходимое количество конкретных видов оборудования, обеспечивающего выполнение плана производства с учетом параметров эксплуатации.

Библиографический список

1. Горлов И.В., Е.В. Полетаева, Н.А. Калинин Н.А. Групповая технология как основа автоматизации широкономенклатурного производства // Вестник Тверского государственного технического университета. 2016. № 1 (29). С. 59–65.
2. Синопальников В.А., Григорьев С.Н. Надежность и диагностика технологических систем: учебник. М.: Высшая школа, 2005. 343 с.
3. Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г. Надежность и диагностика технологических систем. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 304 с.
4. Сарвин А.А., Л.И. Абакулина Л.И., Готшалк О.А. Диагностика и надежность автоматизированных систем. СПб.: СЗТУ, 2003. 69 с.
5. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем: учебник для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 304 с.

УДК 621.892

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, А.В. Новиков, Я.А. Янишевский
Тверской государственный технический университет

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ЧАСТЬ 4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИСАДКИ И НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ НАНОМАСЕЛ

© Болотов А.Н., Новикова О.О.,
Новиков А.В., Янишевский Я.А., 2021

Изучено влияние добавок к дисперсионным средам магнитных масел на их антифрикционные и противоизносные свойства при граничном режиме трения. В качестве дисперсионных сред выбраны различные полиэтилсилоксаны и диэфиры карбоновых кислот. Выяснено, что фторсодержащая присадка улучшает смазочные свойства дисперсионных сред на основе диэфиров. Хорошие свойства показали растворы, содержащие присадку трикрезилфосфат за счет образования на поверхности трения защитных пленок содержащих фосфиды металлов. Наиболее эффективно улучшает смазочные свойства дисперсионных сред из полиэтилсилоксана присадка-стабилизатор 3Н2ТЭ благодаря тому, что образует на поверхности трения защитные пленки, содержащие хлориды металлов. Независимо от состава силоксановой дисперсионной среды присадка «Совол» хорошо снижает трение и износ при умеренных контактных давлениях.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитное масло, дисперсная фаза, стабилизатор, дисперсионная среда, трение, износ.

ENGINEERING PRINCIPLES OF MAGNETIC LUBRICANT SYNTHESIS. PART 4. PROMISING ADDITIVES AND FILLERS FOR IMPROVING THE ANTIFRICTION AND ANTIWEAR PROPERTIES OF NANO OILS

The influence of additives to dispersion media of magnetic oils on their antifriction and anti-wear properties under the boundary friction regime is studied. Various polyethylsiloxanes and carboxylic acid esters were selected as dispersion media. Improves the lubricating properties of dispersion media based on diesters fluorine-containing additive. Solutions containing the additive tricresyl phosphate showed good properties due to the formation of protective films containing metal phosphides on the friction surface. 3H2TE stabilizer additive most effectively improves the lubricating properties of polyethylsiloxane dispersion media due to the fact that it forms protective films containing metal chlorides on the friction surface. Regardless of the composition of the siloxane dispersion medium, «the Sovol» additive reduces friction and wear well at moderate contact pressures.

Keywords: magnetic fluid, magnetic oil, dispersed phase, stabilizer, dispersion medium, friction, wear.

Магнитные жидкости, относящиеся к классу гибридных наноматериалов, созданы более тридцати лет назад, но научный и практический интерес к ним остается высоким. Большое внимание уделяется проблемам применения магнитных жидкостей для смазывания триботехнических узлов, таких как подшипники качения и скольжения, контактные уплотнения, зубчатые передачи [1–3].

Принципиальной отличительной особенностью магнитных смазочных масел от других смазочных материалов является аномально высокая для жидкостей намагниченность насыщения, которая во многом обуславливает их уникальные триботехнические свойства. Наиболее востребованы магнитные смазочные масла в космической и авиационной технике, робототехнике и химическом машиностроении, для смазки трибоузлов, работающих при граничном или смешанном трении, смазываемых дискретно через значительные промежутки времени, причем ограниченным объемом масла [4–10]. Необоснованно считается, что область применения магнитных смазочных масел ограничивается экономическими причинами – достаточно высокой стоимостью масла, магнитной системы и т. д. Но это неверное суждение, поскольку для смазывания типового узла трения, как правило, требуется всего несколько кубических сантиметров магнитного масла, стоимость которого несоизмеримо меньше стоимости узла трения. Современные магнито-жесткие материалы, например на основе сплава «неодим – железо – бор», несущественно повышают стоимость трибоузла.

Представление о магнитных смазочных материалах (маслах) как об адаптированных к условиям граничного трения (например, с помощью выбора магнитных жидкостей с определенной дисперсионной средой) традиционных трехкомпонентных магнитных жидкостях является неверным. Именно потому, что в магнитожидкостных трибоузлах

пытались использовать имеющиеся в наличии магнитные жидкости, а не специально созданные магнитные смазочные масла, эти узлы не показали убедительных преимуществ и научный интерес к ним снизился. Стало понятно, что магнитные смазочные масла изначально должны синтезироваться с учетом специфических требований, предъявляемых к их составу, структуре и свойствам с опорой на обширный технологический опыт получения магнитных жидкостей [5, 6].

В первой части обзорной статьи [11] рассматривался трибологический анализ перспективных жидкостей для дисперсионной среды магнитных масел. Во второй части статьи [12] сформулированы основные требования к ПАВ-стабилизатору коллоидных частиц магнитных масел. Показан новый подход к выбору ПАВ-стабилизаторов коллоидной структуры масел с учетом их диэлектрических свойств и особенностей влияния на трение. Предложены ПАВ-стабилизаторы различной химической структуры для масел на основе диэфиров и некоторых кремнийорганических жидкостей. Третья часть статьи [13] посвящена описанию принципиальных подходов к получению магнитных смазочных композиций. Показаны особенности синтеза нанодисперсных масел на основе различных диэфиров карбоновых кислот и некоторых полиэтилсилоксанов. В ряде случаев предложены новые оригинальные подходы к получению наномасел.

В четвертой части статьи остановимся на результатах исследований, направленных на выбор наиболее перспективных присадок и наполнителей в магнитные масла для улучшения из триботехнических свойств в условиях граничного режима смазывания.

Методы и средства изучения триботехнических свойств магнитных масел. Исследования смазочных свойств магнитных масел при высоких контактных давлениях проводились на трехшариковой машине трения МТШ-М [14]. Для удержания магнитного масла на дорожке трения в оправку между шарами вставлены цилиндрические магниты, обращенные полярной поверхностью к плоскости контробразца. Магнитное масло собиралось и удерживалось неоднородным полем около полюса магнита. При вращении шаров масло увлекалось магнитом и намазывалось на дорожку трения. Нагрузка на шары создавалась весовым методом и изменялась дискретно от 20 до 100 Н. Момент трения фиксировался непрерывно, износ определялся дискретно по диаметру пятна износа на поверхности шаров. Для экспериментов были выбраны шаровые образцы диаметром 8 мм, выполненные из стали ШХ-15. Цилиндрический контробразец изготавливался из разных упрочненных сталей, поверхность трения которых полировалась до получения параметра шероховатости $Ra = 0,25-0,35$ мкм. Испытания проводили при скорости скольжения 0,24 м/с и начальном давлении на контакте 1,25 ГПа. Антифрикционные свойства масел оценивались по диаметру пятна износа

на поверхности шаров. В некоторых опытах преобладающим являлся износ плоской поверхности и тогда регистрировались размеры сечения дорожки трения с помощью профилографа. Конструкция установки предусматривает возможность создания магнитного поля в контактной зоне для удержания магнитного масла на дорожке трения.

Триботехнические испытания магнитных масел в области средних давлений проводились по схеме трения диск – палец на машине трения МТП. Рабочие параметры установки: скорость скольжения образца 0,06–0,75 м/с; давление на контакте 0,5–15 МПа; диаметр пальчикового образца 6 мм. Необходимый для испытаний объем магнитного масла 1–3 см³ наносится на диск. Под действием магнитных сил масло удерживается в виде половины тора прямо на дорожке трения.

Базовые режимы сравнительных триботехнических испытаний наноструктурных магнитных масел и их жидких компонентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Базовые режимы триботехнических испытаний

Машина трения	Материалы пары трения	Условия испытаний	
		Линейная скорость скольжения, м/с	Давление, МПа
МТП	Ст. 3 – бронза ОСЦ5-5-5	0,24	4,2
МТШ-М	Ст. ШХ15 – Ст. ШХ15	0,32	1 200 (начальное)

Выбор присадок и наполнителей к магнитным маслам на основе дизфиоров. Для улучшения смазочных свойств магнитных масел в их состав вводились специальные антифрикционные, противоизносные и противозадирные присадки и наполнители, содержание которых варьировалось в широких пределах. На этапе выбора добавок к магнитным маслам принималась во внимание их хорошая растворимость в дисперсионной среде.

Изучалось влияние на трение следующих присадок: хлорсодержащего бициклического эфира ЗН2ТЭ, фторированных аминов ЭО-1 и М-196, хлорсодержащего фторированного амина ЭО-2, металлоплакирующего медьсодержащего соединения МКФ-18, трикризилфосфата (ТКФ), металлоорганической ремонтно-восстановительной присадки СУРМ-ВК и органомолибденового модификатора трения Molyvan L. Для оценки трибоэффективности присадок и наполнителей их вводили в дисперсионную среду магнитных масел – диоктилсебагината (ДОС) и дибутилсебагината (ДБС).

Вводимые компоненты растворялись в дисперсионной среде магнитных масел в процессе интенсивного перемешивания в течение 30 мин. при 40–50 °С.

Одним из отличий магнитных масел от немагнитных является то, что оптимальное содержание присадки, снижающей трение и износ, в них значительно выше. В традиционных смазочных маслах содержание присадки редко превышает 5 масс. %, в то время как в магнитных маслах может достигать до 15–20 масс. %. Однако это не означает, что приблизительно столько же присадки находится в свободном состоянии и участвует в образовании граничных слоев на поверхностях трения. Например, исследовалось содержание в свободном состоянии присадки ЗН2ТЭ в магнитном масле на основе ДОС. Жидкая фаза масла была выделена путем сепарации магнитных частиц в высокоградиентном магнитном поле. Анализ химического состава жидкой фазы спектральным методом показал содержание в ней около 4 масс. % присадки, хотя в дисперсионной среде растворялось 10 масс. %. По-видимому, часть молекул присадки участвует в образовании полимолекулярных адсорбционных слоев на поверхности магнитных частиц.

Присадки, снижающие трение и износ, эффективны лишь в определенном диапазоне значений параметров трения, таких как скорость скольжения, давление на контакте и температура. Наполнители на основе мелкодисперсных пластичных металлов работоспособны в более широком диапазоне, но они имеют весьма низкую коллоидную устойчивость, а также могут значительно увеличить вязкость магнитных масел. С учетом этого был разработан наполнитель на основе мелкодисперсной меди.

Получение порошка осуществлялось посредством термического разложения медьорганического соединения. При добавлении сульфата меди к глицерину и последующем нагреве до 85 °С при постоянном перемешивании образовалось производное соединения глицерина $C_2H_5(OH)O_2Cu$ в виде вязкого зеленого раствора. Далее производились разбавление и нагрев до температуры 120 °С. В результате термического распада образовались углеводородный остаток и мелкодисперсная металлическая медь. После окончания разложения полученный медный осадок промывали и пептизировали по стандартной методике для получения устойчивой коллоидной системы. В качестве вещества-стабилизатора использовалась хлорсодержащая противозадирная присадка ЗН2ТЭ. Полученные медные частицы имели дендритную форму, дисперсность частиц 0,01–0,1 мкм.

Кроме того, изучалось влияние на процессы трения наполнителя Протект-100, содержащего дисперсные частицы тефлона.

Смазочные свойства растворов дисперсионных сред с присадками приведены в табл. 2 (исследуемые жидкости ДОС, указанные в табл. 2 и 3, взяты из разных партий).

Смазочные свойства растворов дисперсионных сред с ПАВ-стабилизаторами и присадками

Смазочная композиция	Машина трения МТП	
	f	$I_h, 10^{-9}$
ДОС	0,07	1,2
+5 масс. % 3Н2ТЭ	0,12	1,2
+1 масс. % МКФ-18	0,07	0,5
+3 масс. % Cu	0,08	0,7
ДБС	0,08	2,3
+10 масс. % ТКФ	0,09	1,5
+5 масс. % М-196	0,02	0,3

Наиболее эффективно улучшает смазочные свойства дисперсионных сред на основе диэфиров фторсодержащая присадка. Хорошие свойства показали растворы, содержащие присадку ТКФ, за счет образования на поверхности трения защитных пленок, содержащих фосфиды металлов, а также присадка МКФ-18, содержащая олеат меди. Незначительное улучшение противоизносных свойств наблюдалось после введения в ДОС дисперсной меди и тефлона.

В дальнейшем при составлении смазочных композиций на основе магнитных наножидкостей учитывалась агрегативная и седиментационная устойчивость магнитного коллоида с добавками.

Присадки к кремнийорганическим магнитным смазочным маслам. Изучалось влияние на трение и износ смазочных композиции на основе полиэтилсилоксана (ПЭС) и хлорэтилсилоксана (ХС) присадок ДФ-11, «Совол» и 2НЗТЭ.

Присадка ДФ-11 представляет собой 50%-й раствор диалкилдитиофосфата цинка в масле; получена на основе изобутилового спирта и 2-этилгексанола; улучшает антиокислительные, антикоррозионные и противоизносные свойства смазочных масел.

Присадка «Совол» – это смесь пента- и тетра-хлордифенилов, содержащая 40 % хлора. Она применяется в качестве противоизносной и противозадирной присадки.

Присадка-стабилизатор 3Н2ТЭ, содержащая хлорированный эфир пентадиена, улучшает противоизносные и противозадирные свойства масел.

Смазочные свойства растворов дисперсионных сред с присадками приведены в табл. 3.

Таблица 3

Влияние присадок на смазочные свойства дисперсионной среды

Смазочная композиция	Машина трения МТП ($P = 4,2$ МПа, $v = 0,32$ м/с)		Машина трения МТШ-М ($P = 1,25$ ГПа, $v = 0,24$ м/с)	
	f	$I_h, 10^{-9}$	f	$d, \text{мм}$
ПЭС-5	0,12	9,0	0,21	0,69
ПЭС-5 +5 масс. % ЗН2ТЭ	0,14	3,7	0,14	0,26
ПЭС-5 +5 масс. % ДФ-11	0,13	4,1	0,17	0,45
ПЭС-5 +5 масс. % Совол	0,11	3,4	0,16	0,62
ХС-2-1ВВ	0,06	0,5	0,18	0,68
ХС-2-1ВВ +5 масс. % «Совол»	0,05	0,39	0,12	0,72
ХС-2-1ВВ +5 масс. % ДФ-11	0,07	1,4	0,15	0,43

Наиболее эффективно улучшает смазочные свойства силоксановых дисперсионных сред присадка ЗН2ТЭ за счет образования на поверхности трения защитных пленок, содержащих хлориды металлов. Эта присадка одновременно хорошо стабилизирует коллоидную структуру магнитных масел. Благодаря присадке «Совол» хорошо снижаются, независимо от состава силоксановой дисперсионной среды, трение и износ при умеренных контактных давлениях. Присадка ДФ-11 оказалась эффективной только при растворении в жидкости ХС-2-1ВВ.

Таким образом, по результатам триботехнических испытаний проведен предварительный отбор присадок и наполнителей для улучшения смазочных свойств магнитных масел, которые хорошо совместимы с дисперсионной средой.

Фторсодержащие присадки наиболее значительно повышают смазочные свойства дисперсионных сред на основе диэфиров. Неплохие смазочные свойства обнаружены у растворов диэфиров, содержащих присадку ТКФ. Улучшения смазочных свойств дисперсионных сред на основе различных силоксанов удалось получить с помощью присадок ЗН2ТЭ и «Совол».

Библиографический список

1. Орлов Д.В., Ю.О. Михалев Ю.О., Мышкин Н.К. Магнитные жидкости в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.
2. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: ТГТУ, 2008. 124 с.

3. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Часть 2. Активное управление трением // Трение и износ. 2012. Т. 33. № 3. С. 275–283.
4. Uhlmann E. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002. № 11. P. 336–340.
5. Курапов П.А. Трение и работоспособность сопряжений в условиях использования микрогетерогенных смазочных композиций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2011. 39 с.
6. Болотов А.Н., Сутягин О.В., Васильев М.В. Критерий перехода к пластическим контактным деформациям в тяжело-нагруженных узлах трения деталей машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 1. С. 211–213.
7. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Магнитные масла триботехнического назначения // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2009. № 1. С. 5–9.
8. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 1988. 184 с.
9. Болотов А.Н., Г.С. Елисеева, Ю.О. Михалев. Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазанных магнитным маслом // Трение и износ. 1988. Т. 9. № 5. С. 870–878.
10. Байбуртский Ф.С. Магнитные жидкости: способы получения и области применения. URL: <http://magneticliquid.narod.ru/authority/008.htm> (дата обращения: 24.02.2021).
11. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Технологические основы синтеза магнитных смазочных материалов. Часть 1. Трибологический анализ перспективных жидкостей для дисперсионной среды магнитных масел // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 11. Тверь: ТвГТУ, 2018. С. 128–133.
12. Технологические основы синтеза магнитных смазочных материалов. Часть 2. Дисперсная фаза и ПАВ-стабилизатор магнитных масел / А.Н. Болотов [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 12. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 59–67.
13. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Технологические основы синтеза магнитных смазочных материалов. Часть 3. Особенности получения магнитных нанодисперсных масел // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 13. Тверь: ТвГТУ, 2020. С. 10–16.
14. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1 / А.Н. Болотов, [и др.] // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 6. Тверь: ТвГТУ, 2013. С. 68–74.
15. Смазочные материалы: антифрикционные и противозносные свойства. Методы испытаний: справочник / Р.М. Матвеевский [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ АЛЮМИНИЯ В УЗКИХ ОТВЕРСТИЯХ

© Новиков В.В., Новикова О.О.,
Горлов И.В., Янишевский Я.А., 2021

Представлены результаты исследования особенностей формирования твердого износостойкого керамического покрытия из оксида алюминия методом микродугового оксидирования на деталях из алюминия и его сплавах в узких отверстиях. Приведены рекомендации по технологическим режимам, а также составу электролита.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамическое покрытие, толщина покрытия.

FEATURES OF THE FORMATION OF THE COMPOSITE CERAMIC COATING ON ALUMINUM PARTS IN NARROW HOLES

The results of a study of the peculiarities of the formation of a hard wear-resistant ceramic coating of aluminum oxide by the method of micro-arc oxidation on parts made of aluminum and its alloys in narrow holes are presented. Recommendations are given for technological modes, as well as the composition of the electrolyte.

Keywords: microarc oxidation, ceramic coating, coating thickness.

Широкое применение в многочисленных машинах и механизмах нашли детали из алюминия и его сплавов. Помимо чисто конструкционного использования, зачастую обусловленного требованием снижения веса изделия, детали из этих материалов находят применение в узлах трения. Поверхность алюминия в естественных условиях всегда покрыта тонкой пленкой из оксида алюминия, которая в реальных условиях трения сразу подвергается разрушению, возникают частицы износа, которые приводят к катастрофическому разрушению материала трибосопряжения [1–3]. Вследствие этого для поддержания работоспособности узла трения его поверхности, если они изготовлены из алюминия и его сплавов, подвергают упрочнению различными методами оксидирования. Если воздействие на поверхность трения небольшое, то для создания на ней защитной пленки толщиной несколько десятков микрон достаточно обычных методов оксидирования. Если же есть вероятность абразивного износа, высоки требования к точности трибосопряжения, его работоспособности в течение длительного времени, то для кардинального упрочнения поверхности необходимо применять метод микродугового оксидирования (МДО). В результате данного способа в процессе формирования керамического покрытия на поверхности алюминия возникают микродуговые разряды, постепенно

преобразующие основной материал детали в высокопрочный композиционный материал, основную часть которого составляет оксид алюминия. Данный метод выгодно отличается от обычного оксидирования тем, что композиционное керамическое покрытие обладает высокой микротвердостью (порядка 10–20 ГПа), а также толщиной в десятки раз больше образующегося при традиционном оксидировании.

Во многих случаях узел трения работает по схеме вал – втулка, поэтому если обе детали спроектированы из алюминия и его сплавов, их поверхности должны быть упрочнены. Нанесение композиционного керамического покрытия методом МДО на вал и процессы, происходящие на обрабатываемой детали, подробно рассмотрены в работах [3–6]. Также исследованы физико-механические и триботехнические свойства композиционного керамического материала [7, 8]. В то же время нанесение упрочняющего покрытия на внутреннюю поверхность втулок изучено недостаточно, особенно в случае, если втулка длинная, а ее диаметр мал. Во многих случаях представляет интерес для прогнозирования работоспособности толщина упрочненного слоя.

Цель исследования – изучение условий, влияющих на толщину композиционного керамического покрытия на внутренних поверхностях длинных и узких втулок из алюминия и его сплавов.

Используемые материалы и методика исследования. Исследование проводилась на деталях из алюминиевого сплава Д16, которые представляли собой втулки длиной 50–200 мм с внутренним диаметром от 10 до 50 мм. Для объективной оценки условий МДО и возможности переноса результатов исследования на подобные детали других размеров было принято решение измерять толщину полученного керамического слоя в точках с относительной координатой ω , равной отношению внутреннего диаметра втулки к ее длине. Выбор материала был обусловлен тем, что на их поверхности при МДО образуется композиционный материал, включающий в себя дополнительно оксид меди, содержащийся в сплаве Д16, имеющий черный цвет. В результате при измерении толщины покрытия на поперечном шлифе разрезанной втулки четко видна граница раздела: основной материал – керамическое покрытие. В качестве электролита использовался раствор щелочи NaOH. Ее концентрация варьировалась от 1 до 2,5 г/л. Температура электролита при МДО поддерживалась в пределах 15–20 °С.

Результаты исследования. Анализируя особенности процессов, происходящих при МДО длинных и узких втулок, можно сказать следующее: оксидируемая поверхность находится внутри детали, следовательно, отсутствует прямой доступ электрического поля, что приводит к быстрому уменьшению его напряженности внутри отверстия. В процессе МДО образуются кислород и водород, которые необходимо незамедлительно удалять из зоны обработки, что в случае длинных и узких

отверстий быстро сделать затруднительно. Иначе они, образуя гремучую смесь, под действием микродуговых разрядов образуют локальные микровзрывы. Процесс нанесения композиционного керамического покрытия в общем виде представляет собой микрорасплавление под действием микродуговых разрядов алюминия, его окисление и охлаждение до твердого состояния. Для стабильного протекания этого необходимо, чтобы ко всей поверхности детали был свободный доступ электролита, который, кроме создания требуемого градиента электрического поля на поверхности обрабатываемой детали, выполнял функции ее интенсивного охлаждения и защиты от локального перегрева. Если эти условия не соблюдаются, то возникают мощные микровзрывы, разрушающие керамический слой и приводящие к его отслаиванию от материала подложки.

Для проведения эксперимента были выбраны алюминиевые трубки с отношениями длины втулки к внутреннему диаметру l/d , равными 0,5; 1; 2; 3. Концентрация щелочи NaOH 1,5 г/л, остальное – дистиллированная вода. Плотность тока 10 А/дм². Время эксперимента 3 ч. Результаты представлены на рис. 1.

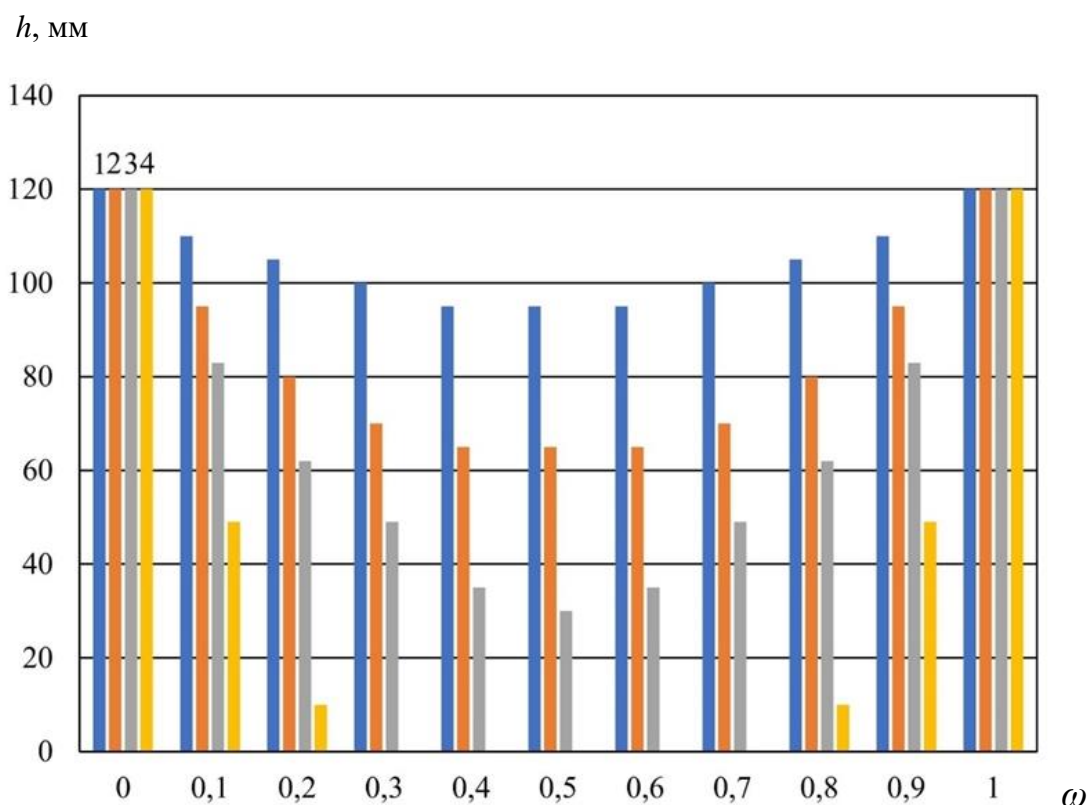


Рис. 1. Результаты измерения толщины керамического слоя в зависимости от относительной координаты: 1 – $l/d = 0,5$; 2 – $l/d = 1$; 3 – $l/d = 2$; 4 – $l/d = 3$

Из диаграммы видно, что распределение толщины покрытия зависит от относительной координаты. При малом отношении длины трубки к внутреннему диаметру, равному 0,5, толщина слоя меняется незначительно. В случае большего отношения длины трубки к внутреннему диаметру, равному 3, наблюдается резкое уменьшение толщины керамического слоя, а в средней части отверстия упрочненный слой практически отсутствует. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при стандартных условиях технологии МДО и концентрации NaOH 1 г/л можно успешно формировать композиционный керамический слой на внутренних поверхностях деталей, в которых отношение длины трубки к внутреннему диаметру не превышает 2. В остальных случаях для достижения более постоянного по поверхности обрабатываемого изделия градиента электрического поля нужно применять конструктивные изменения конфигурации электролитической ванны (например, ввести дополнительные противоэлектроды).

Поскольку распределение потенциала электрического поля по поверхности изделия существенно зависит от проводимости электролита, представляет интерес распределение толщины композиционного керамического материала на внутренних поверхностях отверстий в зависимости от содержания щелочи в электролите.

Для проведения эксперимента были выбраны алюминиевые трубки с отношением длины втулки к внутреннему диаметру l/d , равному 2. Концентрация щелочи NaOH 1; 1,5; 2; 2,5 г/л, остальное – дистиллированная вода. Плотность тока 10 А/дм². Время эксперимента 3 ч. Результаты представлены на рис. 2.

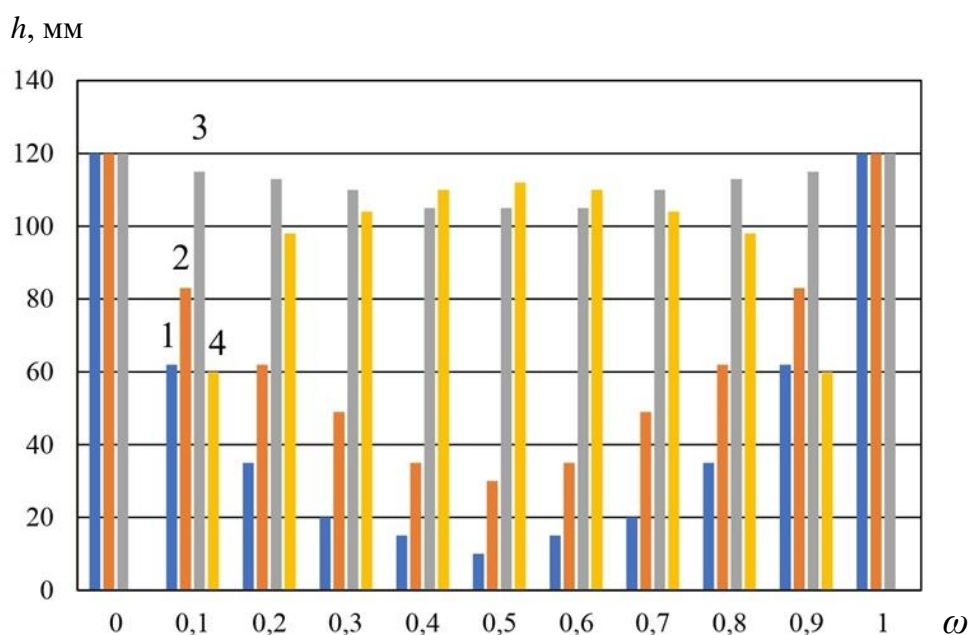


Рис. 2. Результаты измерения толщины керамического слоя в зависимости от относительной координаты при содержании щелочи:
1 – 1 г/л; 2 – 1,5 г/л; 3 – 2 г/л; 4 – 2,5 г/л

Как видно из результатов, содержание NaOH в электролите существенно влияет на его проводимость и тем самым на мощность микродуговых разрядов и распределение их по внутренней поверхности отверстия. Увеличение концентрации щелочи позволяет получить более равномерное покрытие по всей длине обрабатываемого отверстия. Однако если увеличить ее до 2,5 г/л, то происходит нарушение адгезии керамического слоя по краям. Происходит его скол из-за мощного энергетического воздействия на упроченный слой и основной материал. Высокая концентрация щелочи дополнительно подтравливает алюминий, и разрушение становится еще больше. Соответственно увеличивать концентрацию щелочи выше 2 г/л нецелесообразно.

Заключение. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что если необходимо сформировать композиционный керамический слой на внутренних отверстиях втулок без конструктивных изменений оборудования, то для получения равномерной его толщины рекомендуемая концентрация щелочи в электролите 2 г/л, а соотношение длины втулки к внутреннему диаметру не должно превышать 2.

Библиографический список

1. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование): монография / И.В. Суминов [и др.]. М.: ЭКОМЕТ, 2005. 352 с.
2. Болотов А.Н., Сутягин О.В., Васильев М.В. Критерий перехода к пластическим контактными деформациям в тяжело-нагруженных узлах трения деталей машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 1. С. 211–213.
3. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. № 10. С. 150–158. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.150.
4. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Интенсификация формирования износостойкого керамического покрытия на алюминии и его сплавах // Вестник Тверского государственного технического университета. 2013. № 1 (23). С. 60–62.
5. Гордиенко П.С., В.А. Достовалов В.А., Ефименко А.В. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов. Владивосток: ДВФУ, 2013. 522 с.
6. Микродуговое оксидирование в электролитах-суспензиях (обзор) / А.М. Борисов [и др.] // Электронная обработка материалов. 2016. № 1. С. 50–77.
7. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 4. С. 30–37.
8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Зависимость износа пары трения композиционный алмазосодержащий материал – керамика // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей техноло-гического и энергетического оборудования. Вып. 10. Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 153–157.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ БАЗОВОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛОВ

© Болотов А.Н., Новиков В.В.,
Новикова О.О., 2021

Изучены фрикционные свойства керамических алмазно-абразивных материалов, полученных по базовой и модифицированной энергоэффективной технологиям. Показано, что при практическом использовании абразивного инструмента, изготовленного по предложенным технологиям, алмазные керамические материалы, упрочненные порошком электрокорунда белого, будут иметь технико-экономическое преимущество.

Ключевые слова: абразивный керамический материал, микродуговое окисление, модификации оксида алюминия, трение, износ.

THE RESEARCH OF FRICTIONAL PROPERTIES OF THE BASE AND MODIFIED DIAMOND-ABRASIVE MATERIALS

The friction properties of ceramic diamond-abrasive materials obtained using basic and modified energy-efficient technologies are studied. It is shown that with the practical use of an abrasive tool made according to the proposed technologies, diamond ceramic materials reinforced with white electrocorundum powder will have a technical and economic advantage.

Keywords: abrasive ceramic material, micro-arc oxidation, aluminum oxide modifications, friction, wear.

Успешное применение известных алмазно-абразивных материалов в различных обрабатывающих отраслях обусловлено физико-механическими свойствами связующих матриц, в которые встраиваются зерна алмазов [1–4]. Композиционные материалы с керамическими матрицами востребованы в качестве инструментальных для абразивной обработки твердых материалов [4–7].

В результате проведенных исследований нами разработаны технологии получения алмазосодержащих материалов с керамической оксидной матрицей, обладающих качественно более высокими (по сравнению с известными) фрикционными характеристиками [6–9]. Согласно базовой технологии, материал формируется методом микродугового окисления (МДО) [6, 9] на поверхности спеченной алмазно-алюминиевой заготовки. Второй способ получения композиционного материала предполагает замену части алюминиевой пудры порошком белого корунда на стадии получения заготовки методом порошковой металлургии. Белый электрокорунд по химическому и физическому составу является наиболее однородным из видов оксида алюминия. В

процессе его производства чистая окись алюминия расплавляется в дуговой печи, в результате чего модификация γ - Al_2O_3 превращается в α - Al_2O_3 [10]. Модифицированная технология позволила значительно снизить затраты электроэнергии, расходуемой в процессе МДО при преобразовании алюминиевой матрицы в оксид алюминия Al_2O_3 [6, 7, 9].

Триботехнические характеристики сформированных многокомпонентных материалов изучены недостаточно.

Цель исследования – сравнительная оценка износостойкости и производительности шлифования базового и модифицированного алмазно-абразивных материалов.

Используемые материалы и оборудование. Испытывались образцы алмазосодержащих композиционных материалов, изготовленные по модифицированной и базовой технологиям. По модифицированной технологии изготовлены абразивные круги с объемной долей порошка Al_2O_3 в материале 17 %, что соответствует оптимальному составу по результатам предыдущих исследований [9]. В образцах варьировалась зернистость алмазов d и их концентрация K .

Фрикционные характеристики образцов исследовались на машине трения МТ-2, реализующей схему «палец – кольцо» [11]. Контробразцом являлась керамика $\text{BaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ твердостью 16 ГПа, смазочно-охлаждающей жидкостью в зоне трения была вода. В качестве параметра, характеризующего износостойкость материалов, при испытаниях в режиме абразивного инструмента выбран относительный расход алмазов J_a , определяемый как отношение массы алмазов, находившихся в изношенном алмазоносном слое, к массе изношенного материала контртела [12]. Производительность шлифования характеризует объемная режущая способность абразивного инструмента J_k .

Результаты сравнительных триботехнических испытаний базового и модифицированного материалов. С увеличением зернистости алмазов износостойкость кругов из алмазосодержащего керамического материала повышается в обоих случаях (рис. 1а). Предположительно, это вызвано увеличением твердости композиционного материала в целом. Износостойкость модифицированного образца, изготовленного по энергоэффективной технологии, несколько выше, что можно объяснить увеличением содержания в матрице α -модификации Al_2O_3 , достигнутым введением порошка белого корунда, имеющего наиболее высокую твердость в сравнении с другими модификациями. При трении алмазосодержащих керамических материалов твердость матрицы играет значительную роль, так как с ней контактируют выступающие неровности твердого керамического контробразца. Увеличение твердости матрицы способствует повышению ее сопротивления к абразивному изнашиванию твердыми продуктами износа контробразца и самого инструмента. Также уменьшается вероятность преждевременного выкрашивания режущих

алмазных зерен. В результате снижается величина относительного расхода алмаза и, соответственно, экономические затраты на абразивную обработку деталей инструментами, изготовленными по модифицированной технологии.

Зернистость алмазов в композиционных алмазосодержащих материалах является наиболее значимым фактором, определяющим интенсивность объемного износа контробразца (или объемную режущую способность будущего абразивного инструмента, изготовленного из предлагаемого материала) (рис. 1б). С увеличением зернистости алмазов в материалах, изготовленных по обоим технологиям, интенсивность объемного износа контробразца растет практически линейно в интервале 63/50–100/80. Это можно объяснить увеличением высоты выступания режущих зерен алмаза из материала матрицы и возрастанием процента активных режущих зерен, ранее не участвующих во фрикционном взаимодействии из-за неравномерного распределения зерен по высоте. При дальнейшем увеличении размера алмазов рост интенсивности объемного износа контробразца несколько замедляется, что вызвано различными факторами. Повышение зернистости ведет к изменению геометрических параметров частиц алмаза, а именно увеличению радиусов округления вершин и уменьшению остроты режущих кромок. Также при росте зернистости уменьшается общее число режущих алмазных зерен на единице рабочей поверхности алмазного инструмента.

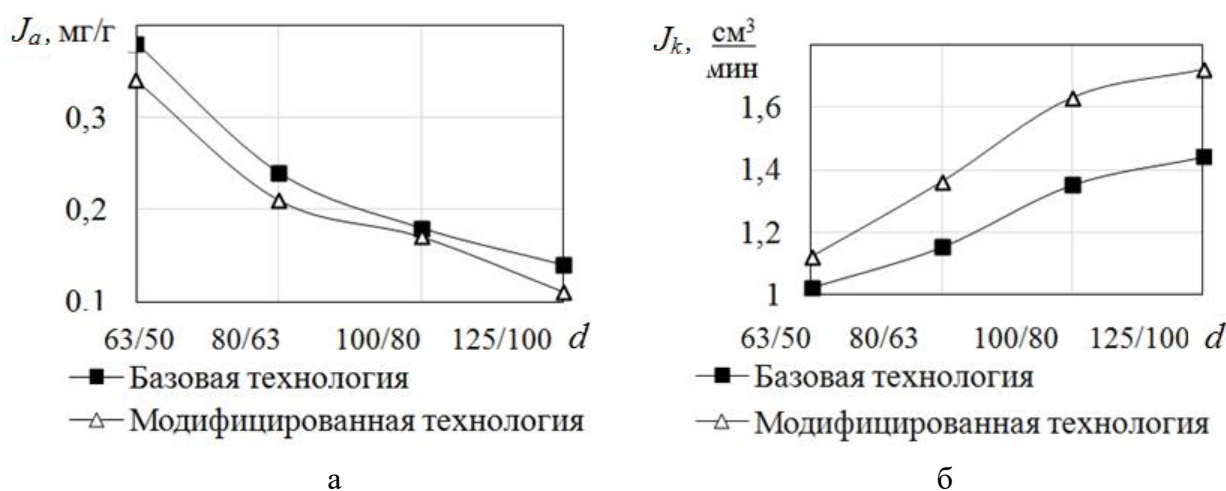


Рис. 1. Влияние зернистости алмазов в композиционных материалах:

а – на величину износа абразивных кругов;

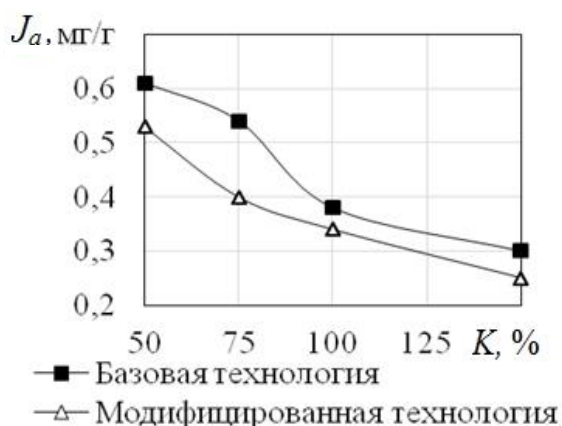
б – интенсивность объемного износа контробразца; $K = 100\%$

Алмазосодержащие керамические материалы, изготовленные по модифицированной технологии, показали несколько большую величину интенсивности объемного износа контробразца или объемную режущую способность по сравнению с традиционной технологией. Повышение

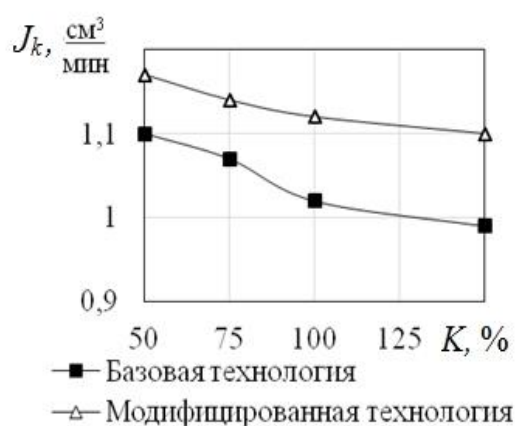
твердости матрицы в целом за счет увеличения в ее составе α -модификации Al_2O_3 способствует упругому деформированию при более значительном внедрении алмазов в обрабатываемый материал. Как было отмечено выше, более прочная связка лучше удерживает алмазные зерна, не позволяя им выкрашиваться до достижения значительного износа режущих поверхностей. Близкое приближение твердости матрицы к твердости алмазного зерна способствует их сопоставимой скорости изнашивания и реализации режима самозатачивания инструмента из модифицированного материала.

Увеличение концентрации алмазных зерен ведет к снижению износа обоих инструментальных материалов за счет увеличения общей твердости материала (рис. 2а). В случае использования композита, полученного по энергоэффективной технологии, износ инструмента ниже на 10–25 %.

Концентрация алмазов в материале не оказывает значительного влияния на интенсивность объемного износа контрообразца при фрикционном контакте с базовым и модифицированным абразивным материалом (рис. 2б). Можно предположить следующие процессы, протекающие в зоне трения: с увеличением концентрации алмазов растет число режущих зерен на рабочей поверхности инструмента и увеличивается количество выраженных следов абразивного износа на поверхности контрообразца. При этом нагрузка на каждый контакт-тирующий алмаз снижается и, следовательно, уменьшается глубина внедрения его в контрообразец. Это означает, что объем изношенного в единицу времени материала изменится незначительно: на 6–10 % во всем исследуемом диапазоне концентраций. Установлено, что триботехнические характеристики материала, изготовленного по модифицированной технологии, выше по сравнению с базовой технологией (рис. 2а, б).



а



б

Рис. 2. Влияния концентрации алмазов в композиционных материалах:
а – на величину износа абразивных кругов;
б – интенсивность объемного износа контрообразца; $d = 63/50$

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что оба исследуемых материала сочетают высокую объемную режущую способность с низкой величиной относительного расхода алмаза и функционируют в режиме самозатачивания в процессе эксплуатации. Абразивные инструменты из композиционных алмазно-керамических материалов могут эффективно применяться для обработки изделий из высокотвердых материалов.

Алмазные абразивные инструменты, изготовленные по модифицированной технологии с добавлением α -модификации Al_2O_3 , обладают более высокими функциональными свойствами в сравнении с материалом, полученным по базовой технологии. Эффект повышения твердости модифицированной оксидной матрицы достигается увеличением содержания порошка белого корунда, имеющего наиболее высокую твердость в сравнении с другими модификациями оксида алюминия в ее составе. При практическом использовании абразивного инструмента, изготовленного по предложенным технологиям, алмазные керамические материалы, упрочненные α -модификацией Al_2O_3 , будут иметь технико-экономическое преимущество.

Библиографический список

1. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные наноккомпозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
2. An experimental study on the precision abrasive machining process of hard and brittle materials with ultraviolet-resin bond diamond abrasive tools / L. Guo, X. Zhang, S. Chen, J. Hui // *Materials*. 2019. № 12 (1).
3. Principles of 3D modelling of the production and application of diamond composite materials / A.G. Mamalis [at al.] // *Nanotechnology Perceptions*. 2012. № 8 (2). P. 132–138.
4. Витязь П.А., Сенюць В.Т. Синтез и применение наноструктурных сверхтвердых материалов инструментального назначения // *Весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. 2015. № 3. С. 60–76.
5. Diamond and cBN hybrid and nanomodified cutting tools with enhanced performance: Development, testing and modelling / P. Loginov [at al.] // *Materials and Design*. 2015. № 88. P. 310–319.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2020. № 4. С. 30–37.
7. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.
8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.

9. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 2 (6). С. 5–13.

10. Производство абразивных материалов / А.С. Полубелова [и др.]. М.: Машиностроение, 1968. 180 с.

11. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Зависимость износа пары трения композиционный алмазосодержащий материал – керамика // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 10. Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 153–157.

12. ГОСТ 14706-78 Алмазы и инструменты алмазные. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200009427> (дата обращения: 19.01.2020).

УДК 622.331.002.5

А.Л. Яблонев, Д.М. Щербакова, А.И. Некрасова
Тверской государственной технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОДЕЛИ ПНЕВМОКОЛЕСНОГО ХОДА С ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖЬЮ

© Яблонев А.Л., Щербакова Д.М.,
Некрасова А.И., 2021

Использование пневматического колесного хода на торфяных залежах нарушенной структуры сопряжено с трудностями, связанными с частичной утерей проходимости техники. Поиск рациональных условий применения техники на пневмоколесном ходу возможно осуществить в лабораторных условиях с помощью моделирования контактного взаимодействия модели пневматического колесного хода с торфяной залежью.

Ключевые слова: модель пневмоколесного хода, торфяная залежь, нарушенная структура, сила сопротивления передвижению, сдваивание колес, тензометрирование.

RESEARCH OF CONTACT INTERACTION RUNWHEEL MODELS WITH A PEAT STOCK

The use of a pneumatic wheel drive on peat deposits of a disturbed structure is associated with difficulties associated with a partial loss of patency of equipment. The search for rational conditions for the use of equipment on pneumatic wheel travel can be carried out in laboratory conditions by simulating the contact interaction of a pneumatic wheel travel model with a peat deposit.

Keywords: model of pneumatic wheel running, peat deposit, disturbed structure, force of resistance to movement, doubling of wheels, strain gauge.

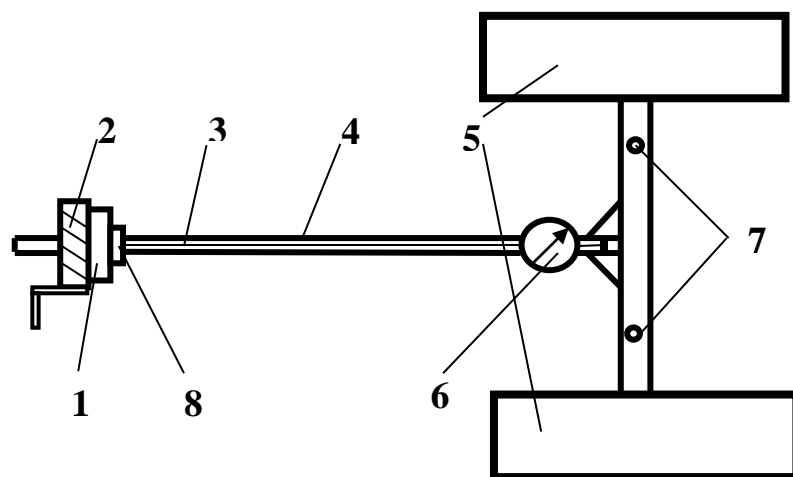
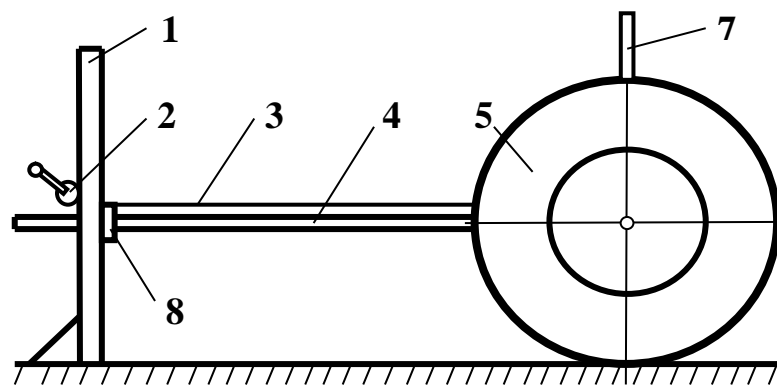
В настоящее время накоплен обширный статистический материал по прочностным и деформационным свойствам торфяных залежей как с нарушенной, так и с ненарушенной структурой [1]. В то же время исследований взаимодействия пневматических колес торфяных машин с залежами нарушенной структуры очень мало, и все они в основном (за исключением штамповых испытаний, которые все же нельзя целиком отнести к исследованиям взаимодействия колес с торфяной залежью) носят характер полевых экспериментов [2]. Но полевой эксперимент всегда сопряжен с организационно-техническими трудностями по изменению такого параметра, как влага залежи, что делает задачу в полевых условиях практически неразрешимой. По этой же причине в указанных условиях весьма трудно представить обоснование условий эффективного использования сдвоенных и строенных колес, хотя они широко применяются на практике, значительно увеличивают проходимость торфодобывающей техники.

Таким образом, существует необходимость изучения энергетического аспекта взаимодействия одинарного и сдвоенного пневматического колесного хода с торфяной залежью нарушенной структуры в лабораторных условиях, по условию минимизации одного из важнейших энергетических показателей колесных машин – силы сопротивления передвижению, которая зависит от влаги и плотности (прочности) залежи, нагрузки на колесо, давления воздуха в шинах и конструкции ходового устройства.

Для решения поставленных задач в лаборатории кафедры «Технологические машины» Тверского государственного технического университета была разработана и изготовлена лабораторная модель пневматического колесного хода и изучено ее взаимодействие с залежью нарушенной структуры (рис. 1а) [3].

Лабораторная модель пневматического колесного хода (рис. 1а) состоит из жестко закрепленной на полу стойки 1, смонтированной на ней лебедки 2 с тросом 3, рамы 4 с двумя пневматическими колесами 5, установленными на ступицах с подшипниками скольжения. Между тросом и рамой размещен динамометр 6 для измерения усилий при передвижении. На раме предусмотрены направляющие 7 для фиксации грузов. К стойке крепится капроновый корпус-подшипник 8 для обеспечения скольжения с незначительной силой трения. Модель смонтирована на канале с торфом нарушенной структуры (рис. 1б) [4].

Вес рамы $G_p = 110$ Н; вес каждого колеса $G_k = 130$ Н; набор грузов весом до $G_{гр\ max} = 2\ 320$ Н позволяет производить испытания в широком диапазоне. Давление воздуха в колесах поддерживается на уровне от $P_{w\ min} = 0,01$ МПа до $P_{w\ max} = 0,3$ МПа. С помощью специально изготовленных футорок в случае необходимости производится сдвигание колес (рис. 2).



а



б

Рис. 1. Модель пневматического колесного хода: а – лабораторная;
 б – смонтированная и находящаяся в лаборатории кафедры
 «Технологические машины и оборудование»



Рис. 2. Сдваивание колес модели пневмоколесного хода

При определении силы сопротивления передвижению (в зависимости от давления воздуха в шинах, веса груза и влаги торфа) выставляется необходимое давление воздуха в шинах, на раму устанавливается требуемый груз, с помощью лебедки производится перемещение рамы с колесами по направлению к жестко закрепленной стойке. Показания силы сопротивления передвижению фиксируются по динамометру. Затем рама с грузом возвращается в исходное положение и изменяются необходимые параметры (давление воздуха в шинах, вес груза, влага торфа) в зависимости от плана организации эксперимента. Для достоверности результатов опыта проводятся с пятикратной повторяемостью [5].

За последний год модель была оснащена системой цифрового тензометрирования, в которой место пружинного динамометра занял S-образный датчик. Аналоговый сигнал на датчик (входное напряжение) поступает с тензометрической станции-анализатора ZetLab, изменяется вследствие деформации датчика и вновь поступает на станцию-анализатор, где преобразуется в цифровой. Поступивший на тензостанцию сигнал может быть представлен в виде непрерывного графика или таблицы дискретных результатов. Встроенная в тензостанцию программа обработки сигнала позволяет быстро находить его статистические характеристики (математическое ожидание, дисперсию, среднее квадратичное отклонение, эксцесс и т. д.), при этом в случае необходимости можно ввести ограничение сигнала временными рамками.

Широкий спектр исследований, проведенный на модели пневматического околесного хода, позволил разработать методики определения условий эффективного перехода с одинарного на сдвоенный колесный ход, оценки влияния несовпадения колеи передних и задних колес, давления воздуха в колесах и вертикальной нагрузки на силу сопротивления

передвижению в условиях контакта с залежью верхового типа степенью разложения 20–25 % и влагой 52–92 % [6]. Все это касается ведомых (пассивных) колес.

Вместе с тем работы с моделью пневмоколесного хода не могут быть ограничены исследованиями только ведомых колес. Ведь сила сцепления ведущих колес с любым грунтом можно интерпретировать как сумму сил контактного трения и зацепления, обусловленную наличием выступов протектора. И ту, и другую составляющие можно весьма легко разработать на модели пневмоколесного хода в лаборатории кафедры «Технологические машины и оборудование» при наличии имеющегося оснащения и приборов контроля. В настоящее время ведутся работы в данном направлении.

Библиографический список

1. Амарян Л.С. Прочность и деформируемость торфяных грунтов. М.: Недра, 1969. 192 с.
2. Справочник по торфу / А.В. Лазарев [и др.]. М.: Недра, 1982. 760 с.
3. Лабораторная модель пневмоколесного хода: пат. 2011104941/2 Рос. Федерация. № 105430 / Яблонев А.Л., Ионкин К.Н.; заявл. 10.02.2011; опубл. 10.06.2011, Бюл. 16. 2 с.
4. Яблонев А.Л. Определение силы сопротивления передвижению пневматического колесного хода по неуплотненной торфяной залежи нарушенной структуры // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 9. С. 41–44.
5. Яблонев А.Л. Модель пневматического колесного хода для исследования его взаимодействия с торфяной залежью // Горное, нефтяное, геологическое и геоэкологическое образование в XXI веке: материалы V Международной конференции, Грозный, 10–16 октября 2010 г. / отв. ред.: А.Е. Воробьев, Т.В. Чекушина. М.: РУДН, 2010. С. 180–181.
6. Яблонев А.Л. Эффективное применение сдвоенного пневматического колесного хода на торфяной залежи нарушенной структуры // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 5. С. 54–56.

УДК 622.331.002.5

А.Л. Яблонев, А.М. Гусева, Н.М. Жуков
Тверской государственной технической университет

СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ НА ИЗГИБ ФОРМОВАННОЙ ТОРФЯНОЙ ПРОДУКЦИИ

© Яблонев А.Л., Гусева А.М.,
Жуков Н.М., 2021

Одним из самых важных показателей качества кускового торфа является его прочность на изгиб. В статье описывается конструкция механического стенда для контроля прочности кускового торфа и отработка методики его применения на

практике. В отличие от ранее известных рассмотренный в работе стенд обладает большей чувствительностью, меньшей металлоемкостью и себестоимостью.

Ключевые слова: стенд, кусковой торф, прочность на изгиб, цифровой динамометр, максимальный изгибающий момент, механический привод.

STAND FOR DETERMINING THE BENDING STRENGTH OF MOLDED PEAT PRODUCTS

One of the most important indicators of the quality of sod peat is its flexural strength. The article describes the design of a mechanical stand for controlling the strength of sod peat and the development of a technique for its application in practice. In contrast to the previously known ones, the stand considered in the work has a higher sensitivity, lower metal consumption and cost.

Keywords: stand, sod peat, bending strength, digital dynamometer, maximum bending moment, mechanical drive.

Достижение высокого качества кускового торфа связано с систематическим контролем получаемой продукции и внесением своевременных изменений в производственные режимы фрезформовочных и стилочных машин [1] для исключения потерь торфа [2].

Качество торфа, обуславливающее сохраняемость, оценивается прочностью. На сегодняшний день известно два способа оценки качества формованной торфяной продукции:

определение механической прочности кускового торфа или брикета путем испытания во вращающемся барабане по крошимости кусков (относительная механическая прочность);

испытание формованного торфа на изгиб на гидропрессе [3, 4].

Учитывая то обстоятельство, что большинство операций по производству кускового торфа после его формования (ворочка, валкование, переукладка валков, уборка) связано с изгибными деформациями куска, представляется логичным, что испытания на изгиб являются более информативными. Но использование гидравлического пресса не позволяет исключить из испытаний на прочность динамические нагрузки, неизбежно возникающие в случае его ручного привода, и регулировать скорость движения штока гидроцилиндра (для предотвращения удара) в случае его привода от гидростанции. Кроме того, оценка разрушающей нагрузки по давлению жидкости в системе обладает элементом инерционности, что также не способствует точному нахождению параметров.

С целью минимизации вышеуказанных факторов и обеспечения возможности оперативного контроля качества продукции разработана конструкция стенда для испытания образцов на прочность с ручным ступенчатым механическим приводом, преобразующим вращательное движение штурвала в поступательное конического наконечника (рис. 1, 2).

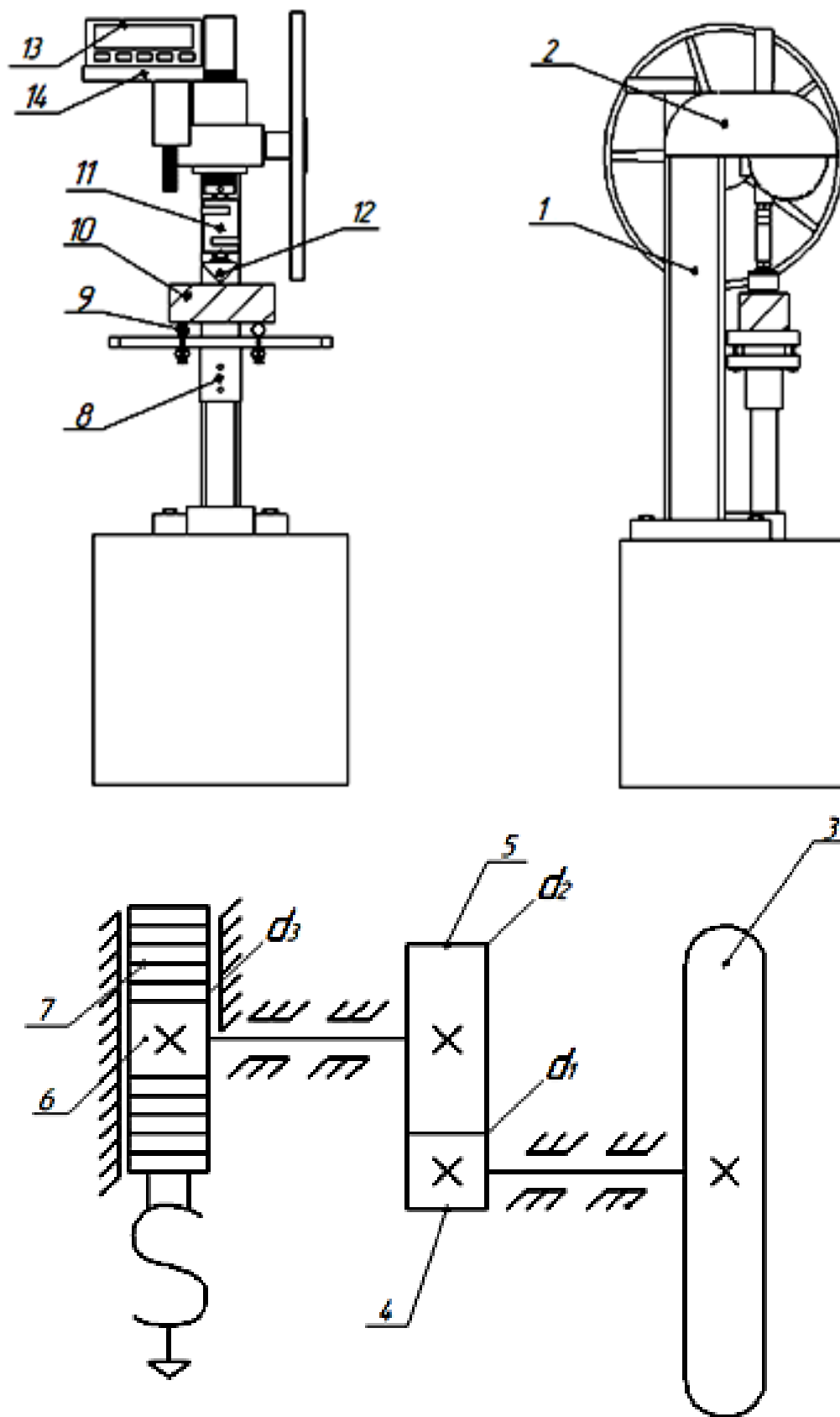


Рис. 1. Устройство и кинематическая схема стенда для контроля изгибной прочности формованной торфяной продукции



Рис. 2. Испытание на изгибную прочность образцов кускового торфа

Стенд для измерения разрушающей нагрузки включает станину 1, кожух 2, закрывающий механический привод, включающий штурвал 3 диаметром 430 мм, соединенный через шестерню 4, зубчатое колесо 5, и шестерню 6 с вертикально расположенной зубчатой рейкой 7, столик 8 с установочными опорами 9 для крепления испытываемого образца 10, а также узел измерения разрушающей нагрузки. Последний выполнен в виде тензометрической S-образной скобы 11 с коническим наконечником 12 и закреплен на зубчатой рейке. Тензометрическая скоба соединена с цифровым динамометром ДОУ-3-1И 13, установленным на столике 14 и имеющим верхний предел измерений 1 кН (см. рис. 1).

Стенд работает следующим образом. Испытываемый образец брикета или кускового торфа располагают на установочные опоры столика и вращают штурвал, приводящий в движение механический привод, в результате которого перемещается зубчатая рейка с установленной на ней тензометрической скобой и коническим наконечником. В результате конический наконечник внедряется в испытываемый образец и происходит деформирование тензометрической скобы. При этом электрический сигнал поступает от тензометрической скобы в цифровой динамометр по кабелю. Цифровой динамометр 13 работает в двух режимах: дискретной фиксации нагрузки и фиксации максимального усилия (см. рис. 1). При ином варианте цифровой динамометр запоминает максимальную нагрузку, действующую на конический наконечник при разрушении образца, и отражает ее на цифровом дисплее [5].

Конструкция механического привода с многоступенчатым зубчатым зацеплением позволяет обеспечить плавное создание разрушающей нагрузки с коэффициентом усиления до 500, в результате чего снижается необходимость приложения больших усилий к штурвалу. Таким образом,

при ручном воздействии на обечайку штурвала с силой 10 Н разрушающая нагрузка, создаваемая устройством, составляет около 5 000 Н.

Выполнение установочных опор регулирующимися позволяет проводить испытания образцов различной формы и размеров, длиной испытываемой части от 75 до 300 мм, а шириной и высотой от 1 до 130 мм. Выполнение поверхности базирующих установочных опор и конического наконечника в виде поверхностей с радиусом постоянной кривизны предотвращает развитие трещин в образце, снижает риск скалывания и развития трещин, а следовательно, повышает качество результатов.

Силовая схема создания нагрузки стендом и эпюра изгибающих моментов представлены на рис. 3.

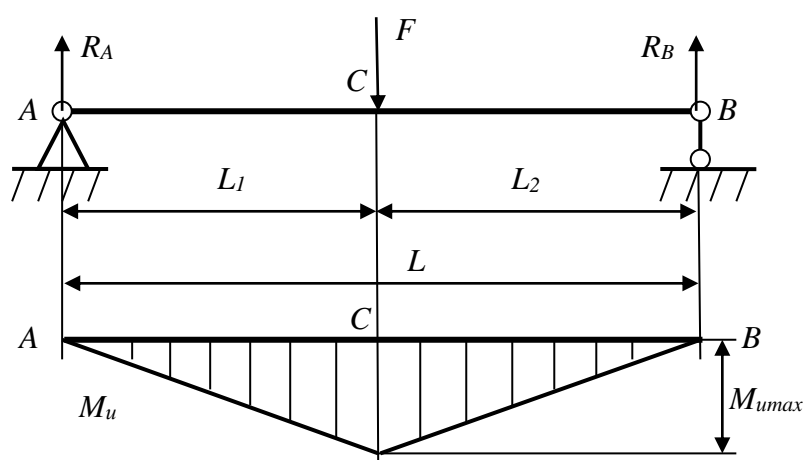


Рис. 3. Силовая схема создания нагрузки и эпюра изгибающих моментов

Приложенная в центре испытываемого на изгиб образца нагрузка F , Н, вызывает равные реакции установочных опор при условии равенства расстояний L_1 и L_2 , м:

$$R_A = R_B = \frac{1}{2}F. \quad (1)$$

Изгибающий момент, Н·м, действующий по всей длине образца, имеет максимальное значение в точке С (точке приложения нагрузки) и определяется по формуле

$$M_{\text{imax}} = R_A \frac{L}{2} = \frac{1}{2}F \frac{L}{2} = \frac{FL}{4}. \quad (2)$$

Прочность образца на изгиб, Па, в наиболее нагруженной точке может быть определена как отношение максимального изгибающего момента, действующего в сечении, к моменту сопротивления образца изгибу W_x , м³:

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{M_{\text{imax}}}{W_x}. \quad (3)$$

Зная, что момент сопротивления круглого образца определяется по зависимости

$$W_{\text{хкр}} = \frac{\pi d^3}{32}, \quad (4)$$

где d – наружный диаметр образца, м, а момент сопротивления прямоугольного образца – по зависимости

$$W_{\text{хпр}} = \frac{bh^2}{6}, \quad (5)$$

где b и h – ширина и высота сечения образца, м, соответственно [6], можно получить конечные формулы для вычисления изгибающих напряжений $\sigma_{\text{икр}}$ и $\sigma_{\text{ипр}}$ соответственно для круглых и прямоугольных образцов формованного торфа с учетом зависимостей (2), (3):

$$\sigma_{\text{икр}} = \frac{8FL}{\pi d^3}; \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{ипр}} = \frac{1,5FL}{bh^2}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) при испытании образцов на изгиб учитывают и расстояние между установочными опорами (L), и форму сечения кускового торфа или брикета.

Таким образом, для испытания образцов формованной торфяной продукции на прочность с помощью описанного выше стенда следует измерить геометрические характеристики сечения испытываемого образца; выставить необходимое расстояние между установочными опорами; включить цифровой динамометр, дав ему прогреться в течение 10 мин, обнулить показания и перевести в режим фиксации максимального значения разрушающей нагрузки; поместить на установочные опоры стенда испытываемый образец; штурвалом подвести конический наконечник стенда к образцу; медленно вращая штурвал, довести нагрузку до максимального значения, при которой образец разрушается; занести в журнал наблюдений зафиксированное на цифровом динамометре значение максимальной нагрузки F ; определить по формуле (6) или (7) прочность образца; эксперимент повторить 5–6 раз на однотипных образцах для достижения корректности результатов [7].

С целью определения рациональных режимов работы формующих устройств фрезформовочных машин был проведен эксперимент по оценке энергоемкости формования предварительно диспергированного верхового торфа степенью разложения 25–30 % со средним содержанием влаги, находящимся в диапазоне 82–84 %, на различных режимах с помощью лабораторного шнекового прессы [8].

После формования на различных режимах куски торфа были разложены в специальные кюветы и подвергнуты сушке в мягком режиме ($t = 17–21$ С) на протяжении 25 сут. до достижения среднего равновесного содержания влаги $w = 23,12$ %. Затем была определена прочность кусков на разработанном стенде с использованием зависимости (6) путем разрушения образцов. Полученные в ходе обработки данных логарифмические кривые

плотности от частоты вращения шнека при формировании оказались близкими по форме к кривым, описывающим зависимость плотности от частоты вращения шнека, что подтвердило существовавшее на начальном этапе исследования предположение о линейной зависимости между плотностью и прочностью [9].

Полученные результаты по оценке прочности кускового торфа согласуются с известными данными [4], но достигнуты с меньшими затратами, поскольку при испытании применялось ручное механическое оборудование. При этом закругленные края испытательного узла станда обеспечивали при испытаниях разрушение при «чистом» изгибе, а не изгибе со скалыванием через образование трещин. Последнее является чрезвычайно важным обстоятельством, так как позволяет создавать режимы нагружения, близкие к существующим в реальных условиях [10].

Проектирование и использование фрезформовочных и стилочных машин в рациональных режимах позволит снизить потери торфа при реализации технологии его добычи и уменьшить удельные энергозатраты с сохранением прочности куска.

Библиографический список

1. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля // О.С. Мисников, В.А. Беляков, О.В. Шамбер. Тверь: ТГТУ, 2008. 160 с.
2. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9. № 12. P. 89525.
3. Семенский, Е.П. Технический анализ торфа. М.: Недра, 1966. 232 с.
4. Справочник по торфу / А.В. Лазарев [и др.]. М.: Недра, 1982. 760 с.
5. Устройство для создания и измерения разрушающей нагрузки: пат. № 2696070 Рос. Федерация: G01L 5/00 (2006.01), G01N 3/20 (2006.01) / Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М. Заявка № 2018143458; заявл. 07.12.2018; опубл. 30.07.2019, Бюл. № 22. 7 с.
6. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1988. 367 с.
7. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение прочности на изгиб формованной торфяной продукции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 3. С. 47–55.
8. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Методика и оборудование для испытания на прочность кускового торфа // Горное оборудование и электромеханика. 2018. № 6. С. 26–33. DOI: 10.26730/1816-4528-2018-6-26-33.
9. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Механическое оборудование для испытания на прочность кускового торфа // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 2–3 апреля 2020 г. Екатеринбург: УГТУ, 2020. С. 84–87.
10. Булышко М.Г., Иванов В.Н., Сарматов М.И. Брикетирование торфа. М.: Госэнергоиздат, 1962. 303 с.

**ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОЧАГОВ
ЛОКАЛЬНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ
ФОРМИРУЕМОГО МЕТОДОМ
МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**

© Болотов А.Н., Новиков В.В.,
Новикова О.О., 2021

Исследованы причины возникновения очагов локального повреждения при формировании твердого износостойкого керамического покрытия из оксида алюминия методом микродугового оксидирования на деталях из алюминия и его сплавов. Изучены причины возникновения электрохимической коррозии, а также дуговых разрядов, приводящих к разрушению сплошности покрытия. Приведены рекомендации по устранению причин их возникновения, а также составу электролита.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, электрохимическая коррозия, дуговые разряды, керамическое покрытие.

**FEATURES OF LOCAL FOCUSES DAMAGE
TO CERAMIC COATING FORMED BY THE METHOD OF MICROARC OXIDATION**

The reasons for the occurrence of foci of local damage during the formation of a hard wear-resistant ceramic coating made of aluminum oxide by the method of micro-arc oxidation on parts made of aluminum and its alloys are investigated. The reasons for the occurrence of electrochemical corrosion, as well as arc discharges, leading to the destruction of the continuity of the coating, have been investigated. Recommendations are given for eliminating the causes of their occurrence, as well as the composition of the electrolyte.

Keywords: microarc oxidation, electrochemical corrosion, arc discharges, coating thickness.

В настоящее время в качестве конструкционных материалов различных машин и механизмов используется алюминий и его сплавы. Помимо конструкционного применения, зачастую обусловленного требованием снижения веса изделия, детали из этих материалов достаточно часто используются в узлах трения. Поверхность алюминия в естественных условиях всегда покрыта тонкой пленкой из оксида алюминия, которая в реальных условиях трения сразу подвергается разрушению, возникают частицы износа, которые приводят к переходу от упругого контактного взаимодействия к пластическому и, как следствие, к катастрофическому разрушению материала трибосопряжения [1]. Вследствие этого для поддержания работоспособности узла трения его поверхности, если они изготовлены из алюминия и его сплавов, подвергают упрочнению различными методами оксидирования. Если воздействие на поверхность трения небольшое, то для создания на ней

защитной пленки толщиной несколько десятков микрон достаточно обычных методов оксидирования. Если же есть вероятность абразивного износа, высоки требования к точности трибосопряжения, его работоспособности в течение длительного времени, то для кардинального упрочнения поверхности необходимо применять метод микродугового оксидирования (МДО).

В результате использования МДО в процессе формирования керамического покрытия на поверхности алюминия возникают микродуговые разряды, постепенно преобразующие основной материал детали в высокопрочный композиционный материал, основную часть которого составляет оксид алюминия. Данный метод выгодно отличается от обычного оксидирования тем, что композиционное керамическое покрытие обладает высокой микротвердостью порядка 10–20 ГПа, а также толщиной в десятки раз больше образующегося при традиционном оксидировании. Наиболее часто используют при МДО электролиты с небольшим содержанием щелочи с жидким стеклом.

Процессы, происходящие при формировании композиционного керамического покрытия изучены в работах [2–4]. Однако в этих исследованиях мало отражены побочно возникающие факторы, вызывающие локальные очаги электрохимической коррозии на поверхности детали или мощные дуговые разряды, что приводит к нарушению сплошности высокопрочного керамического слоя и тем самым невозможности ее использования в качестве сопрягаемой детали в трибосопряжениях. На рис. 1 показана поверхность без очагов электрохимической коррозии и с ней.

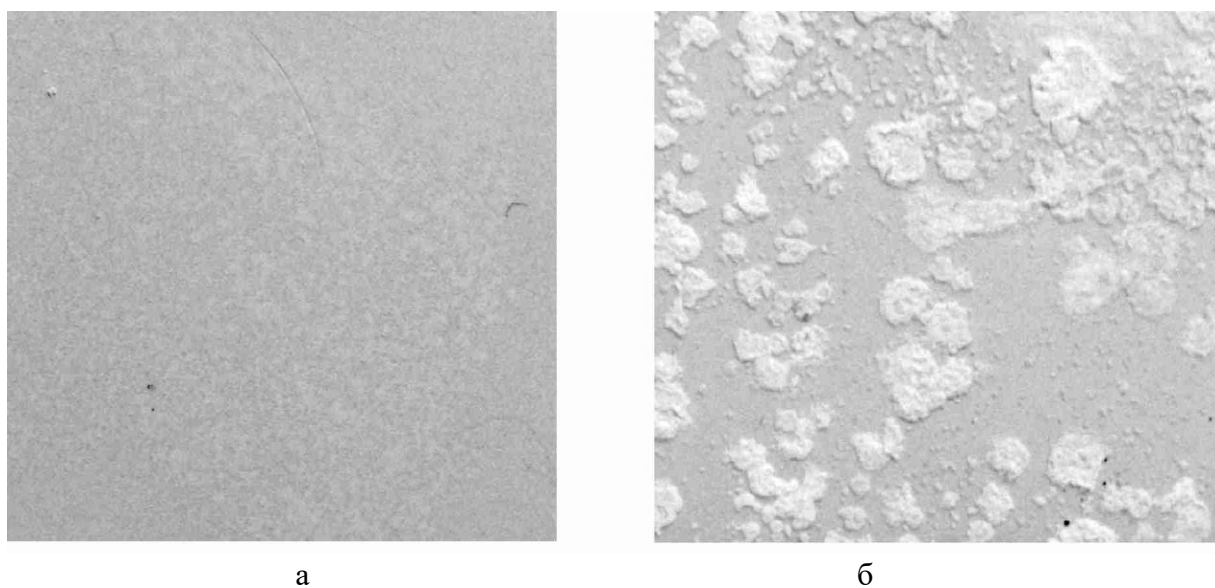


Рис. 1. Поверхность деталей: а – без электрохимической коррозии; б – с электрохимической коррозией

Цель исследования – изучение условий, влияющих на факторы, вызывающие локальные очаги повреждения керамического слоя, вызванные возникновением электрохимической коррозии на поверхности детали при МДО или мощными дуговыми разрядами.

Используемые материалы и методика исследования. Исследование проводилось на деталях из алюминиевого сплава Д16. В качестве электролита использовался раствор щелочи NaOH и жидкого стекла, в качестве основы – водопроводная вода. Концентрация щелочи, исходя из ранее проведенных исследований, для получения более равномерного покрытия была выбрана 2 г/л [5]. Концентрация жидкого стекла варьировалась от 0 до 10 г/л. Концентрацию жидкого стекла более 10 г/л использовать нецелесообразно, так как в этом случае в композиционном керамическом слое при МДО, наряду с оксидом алюминия, формируется большое количество оксида кремния, что существенно снижает физико-механические и триботехнические свойства упрочненного слоя [6]. Плотность тока 10 А/дм². Температура электролита поддерживалась в пределах 15–20 °С. Время МДО 30 мин. Для оценки вероятности возникновения очагов электрохимической коррозии использовалась относительная площадь повреждения μ , равная отношению площади повреждения керамического слоя, возникшей за установленное время на поверхности детали, к ее общей площади.

Результаты исследования. В начале обработки поверхность алюминия подвергается анодному растворению, происходит ее пассивация, а также имеет место постепенный рост оксидной пленки. Так как эта пленка обладает диэлектрическими свойствами, разность потенциалов по обе ее стороны вызывает электрический пробой, выделяется энергия, которая идет на окисление основного материала, а также создание химических соединений из элементов, содержащихся в электролите. В случае возникновения химических элементов, препятствующих пассивации поверхности алюминия и образованию оксидной пленки, появляются очаги электрохимической коррозии. В то же время при длительном воздействии разрядов на поверхность детали керамический слой становится достаточно толстым и микродуговые разряды переходят в дуговые с расплавлением основного материала, нарушением адгезии керамический слой – основа. Соответственно, в обоих случаях происходит возникновение локальных очагов разрушения композиционного керамического материала. Дополнительным отрицательным фактором является то, что происходят, помимо разрушения керамического слоя, разрушение основного материала на глубину до 1 мм и потеря его формы. В результате деталь восстановлению не подлежит и ее невозможно использовать в узлах трения. Как установлено, содержание жидкого стекла в электролите существенно влияет на относительную площадь повреждения μ (таблица).

Результаты исследования

Параметр	Содержание жидкого стекла в электролите, г/л										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
μ	0,92	0,78	0,53	0,34	0,16	0	0	0	0,1	0,15	0,18

Однако представленные результаты отражают уже фактически полученную поверхность в конце установленного периода времени обработки. Сама деталь, когда идет процесс микродугового оксидирования, скрыта под толстым слоем электролита, который используется обычно многократно. В результате в нем с течением времени образуется мелкодисперсная смесь оксидов различных химических элементов, его прозрачность теряется полностью. Следовательно, наблюдать, какой керамический слой образуется (с повреждениями или нет), невозможно. Таким образом, необходимо прогнозировать появление поврежденных участков иным методом.

Так как на поврежденных участках не образуется толстый керамический слой, они имеют более низкое сопротивление. Поэтому можно прогнозировать появление локальных сколов по напряжению на обрабатываемой детали в некоторый конкретный момент времени. Изменение напряжения, в зависимости от различных режимов обработки, показано на рис. 2.

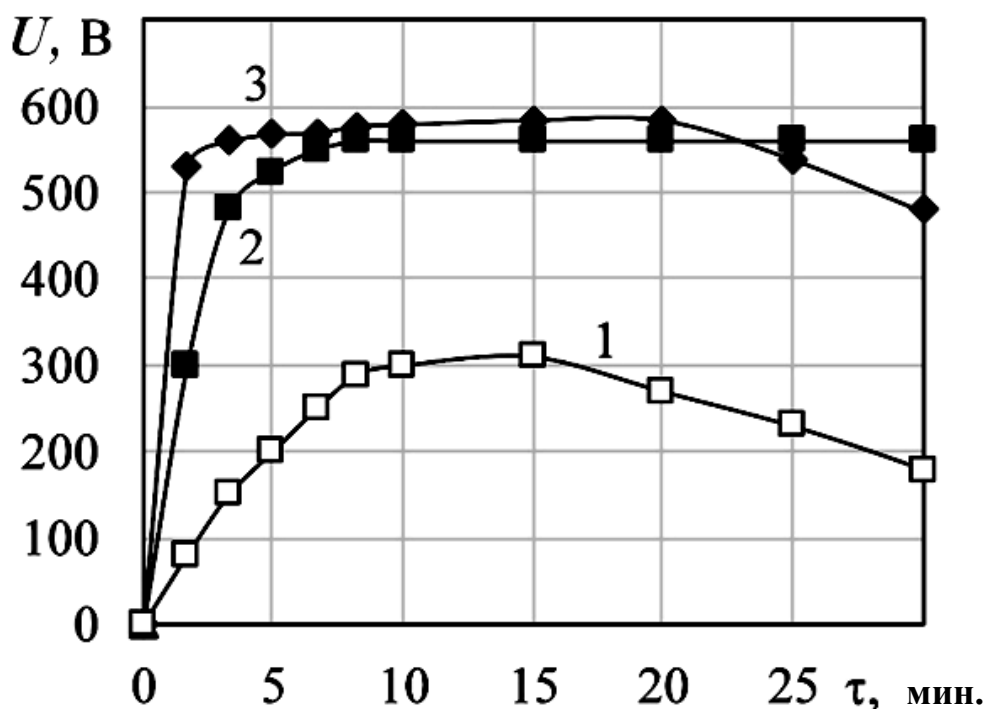


Рис. 2. Зависимость напряжения на обрабатываемой детали от времени при содержании жидкого стекла: 1 – 2 г/л; 2 – 6 г/л; 3 – 10 г/л

Если взять электролит с содержанием жидкого стекла 2 г/л, то по истечении 30 мин. микродугового оксидирования более 50 % площади обрабатываемой детали повреждено электрохимической коррозией. При этом на графике 1 (см. рис. 2) в течение времени обработки сначала наблюдается неуверенный рост напряжения на обрабатываемой детали, затем снижение. Это можно объяснить одновременным образованием на поверхности как участков с керамическим покрытием (увеличивающих сопротивление и соответственно напряжение), так и участков с коррозией. Площадь поврежденных участков в процессе обработки увеличивается, поэтому сначала напряжение достаточно медленно растет, достигает максимума (в данном случае это около 300 В), затем постепенно уменьшается.

При микродуговом оксидировании детали в электролите с содержанием жидкого стекла 6 г/л поврежденных участков нет. При этом можно наблюдать существенно иное изменение напряжения на обрабатываемой детали, что отражено на графике 2 (см. рис. 2). За достаточно короткий промежуток времени напряжение линейно увеличивается. При этом пропорционально уменьшается сила тока. На следующем этапе микродугового оксидирования рост напряжения практически прекращается до окончания времени обработки. По-видимому, в данном случае образующийся композиционный керамический слой имеет одинаковую толщину по всей поверхности.

Если содержание жидкого стекла увеличить до 10 г/л, то характер протекания микродугового оксидирования также меняется. Это можно наблюдать на графике 3 (см. рис. 2). Наблюдается еще более быстрое линейное увеличение напряжения, что можно объяснить высокой концентрацией жидкого стекла в электролите, способствующей быстрой пассивации основного материала, а также интенсивному росту толщины оксидной пленки. На втором этапе напряжение на обрабатываемой детали остается практически постоянным. В конце времени обработки напряжение начинает несколько снижаться. Это объясняется возникновением локальных очагов разрушения композиционного керамического материала площадью около 18 % от всей поверхности на последнем этапе микродугового оксидирования мощными дуговыми разрядами.

Заключение. Задача устранения локальных повреждений при микродуговом оксидировании имеет многофакторное решение. Во-первых, это снижение примесей в электролите, что не всегда по технологическим причинам можно осуществить. Во-вторых, установлено, что концентрацию жидкого стекла в электролите при МДО оптимально поддерживать в пределах 5–7 г/л. Очевидно, что по изменению напряжения на обрабатываемой детали можно прогнозировать появление локальных очагов повреждения композиционного керамического покрытия на

поверхности деталей из алюминия и его сплавов и по возможности это предотвращать.

Библиографический список

1. Болотов А.Н., Сутягин О.В., Васильев М.В. Критерий перехода к пластическим контактными деформациям в тяжело-нагруженных узлах трения деталей машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 1. С. 211–213.

2. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 4. С. 30–37.

3. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.

4. Микродуговое оксидирование теория, технология, оборудование: монография / И.В. Суминов [и др.]. М.: ЭКОМЕТ, 2005. 352 с.

5. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 2 (6). С. 5–13.

6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Зависимость износа пары трения композиционный алмазосодержащий материал – керамика // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей техно-логического и энергетического оборудования. Вып. 10. Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 153–157.

УДК 621.891

М.М. Матлин, В.А. Казанкин, Е.Н. Казанкина
Волгоградский государственный технический университет

РАСЧЕТ СБЛИЖЕНИЯ В КОНТАКТЕ ЕДИНИЧНОЙ МИКРОНЕРОВНОСТИ, МОДЕЛИРУЕМОЙ КОНУСОМ, ПРИ ПОВТОРНОМ ВНЕДРЕНИИ¹

© Матлин М.М., Казанкин В.А.,
Казанкина Е.Н., 2021

В работе приведена зависимость для определения сближения единичного микровыступа конической формы с поверхностью детали при повторном внедрении. Показано, что при многократном повторном внедрении конического индентора

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00049 и при поддержке РФФИ и Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340002, а также в рамках конкурса МК-2021 (грант № МК-84.2021.4).

величина упругого сближения остается постоянной и практически равной упругому сближению при первом нагружении при соответствующей нагрузке.

Ключевые слова: конический микровыступ, контактная нагрузка, повторное внедрение, упругое сближение.

CALCULATION OF THE CONVERGENCE IN CONTACT OF SINGLE MICROASPERITY SIMULATED BY CONE UPON RE-INDENTATION

The paper presents the relationship for determining the convergence of a single microasperity of a conical shape with the surface of the part upon re-indentation. It was shown that with repeated re-indentation of a conical indenter, the value of the elastic convergence remains constant and almost equal to the elastic convergence during the first loading at the corresponding load.

Keywords: conical microasperity, contact load, re-indentation, elastic convergence.

Как известно из [1], характер взаимодействия микровыступов поверхностей оказывает значительное влияние на жесткость стыков, электропроводность электрических контактов, их тепловую проводимость и процессы трения и изнашивания. При первом приложении нагрузки часть выступов деформируется упруго, а наиболее высокие выступы – упругопластически или пластически, в результате чего микрогеометрия контактирующих поверхностей меняется, соответственно, изменяются их деформационные свойства. При повторном приложении нагрузки (без взаимного сдвига поверхностей) уже все выступы будут деформироваться упруго и свойства контакта изменятся. Для моделирования шероховатой поверхности используют микровыступы различной формы: сферы, конусы, цилиндры и др. [2]. Наиболее часто применяют сферическую модель микровыступов. В то же время, чтобы при моделировании шероховатой поверхности наиболее полно отразить реальные закономерности контакта, используют и иные формы микровыступов. При этом известно, что угол при вершине конического микровыступа оказывает значительное влияние на величину контактных нагрузок. Процессы, протекающие при первом упругопластическом внедрении конического индентора, описаны в работе [3] применительно к определению твердости. Однако закономерности повторного контактного взаимодействия конического индентора с контртелом изучены значительно меньше, чем сферического.

В работе [4] приведена аналитическая зависимость для определения упругого сближения в контакте конического индентора с поверхностью полупространства при чисто упругой деформации в контакте:

$$\alpha_y = \sqrt{0,5 \cdot \pi \cdot F \cdot \operatorname{ctg} \varphi \cdot \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}}, \quad (1)$$

где F – контактная нагрузка; 2φ – угол при вершине конического штампа; E_2 и μ_2 – модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона материала полупространства соответственно.

В работе [5] формула (1) получила экспериментальное подтверждение для упругой составляющей сближения в контакте при упругопластическом внедрении конического индентора. В то же время в формуле (1) не учитываются упругие свойства материала конического индентора. Кроме того, возможность использования (1) для определения упругого сближения при многократных повторных нагружениях нуждается в дополнительном исследовании.

При повторном приложении контактной нагрузки конус с углом у вершины 2φ взаимодействует уже не с плоской поверхностью детали, а с поверхностью остаточного отпечатка конической формы, с углом при вершине $2\varphi_0$. Упругое сближение α_y в этом случае также может быть вычислено по формуле (1), в которой вместо угла 2φ при вершине конического индентора необходимо использовать приведенный угол $2\varphi_{\text{пр}}$ [3], который находят с учетом угла $2\varphi_0$ при вершине поверхности восстановленного отпечатка, образовавшегося под действием наибольшей контактной нагрузки F_{max} при первом нагружении. Приведенный угол $2\varphi_{\text{пр}}$ определяют по формуле

$$\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_{\text{пр}}} = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} - \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_0}. \quad (2)$$

Угол при вершине остаточного отпечатка $2\varphi_0$ найдем, рассматрив схему силового упругопластического контакта конического индентора с плоской поверхностью детали (рис. 1) при следующих допущениях:

- 1) поверхность восстановленного отпечатка на поверхности детали имеет коническую форму с углом при вершине $2\varphi_0$;
- 2) боковые площади конусов ABC и EFD практически одинаковы.

Приемлемость последнего допущения очевидна, поскольку фактическая площадь контакта конического микровыступа практически совпадает с площадью его сечения: для конического микровыступа при сближении, составляющем 0,05 от диаметра остаточного отпечатка d_0 , эта разница равна 0,5 %, а при сближении порядка $0,2d_0$ (что обычно является максимальным при контактных взаимодействиях) – 7,7 %.

С учетом формулы (2), а также упругих свойств материала конического индентора формула (1) примет вид

$$\alpha_y = \sqrt{0,5 \cdot \pi^2 \cdot F \cdot \operatorname{ctg} \varphi_{\text{пр}} \cdot (k_1 + k_2)}, \quad (5)$$

где $k_{1,2} = \frac{1 - \mu_{1,2}^2}{\pi \cdot E_{1,2}}$ (E_1 и μ_1 – модуль нормальной упругости и коэффициент

Пуассона материала конического индентора соответственно).

По своему физическому смыслу угол $2\varphi_{\text{пр}}$ соответствует углу при вершине такого конуса, при силовом упругопластическом контакте которого с плоской поверхностью детали упругая часть полного сближения оказывается той же, что и в условиях чисто упругого контактного взаимодействия этого конуса с плоской поверхностью детали.

Отметим, что глубину h остаточного отпечатка можно определить из формулы (4) как разность ($\alpha - \alpha_y$); можно также использовать эмпирические формулы. Например, для конуса с углом при вершине $2\varphi = 136^\circ$ выражение имеет вид

$$h \approx \frac{12}{\text{HV} + 1000} \cdot \sqrt{F},$$

где HV – твердость материала детали по Виккерсу.

Формула (5) для определения упругого сближения при повторном нагружении была подвергнута экспериментальной проверке.

В эксперименте в качестве индентора применяли конусы из твердого сплава с углом при вершине $2\varphi = 136^\circ$. Нагружение проводили с помощью прессы Бринелля ТШ-2; время выдержки под нагрузкой составляло 30 с; для измерения полного сближения, а также его упругой и остаточной составляющих использовали прибор для измерения контактных деформаций (снабженный индикатором часового типа с ценой деления 1 мкм), конструкция которого аналогична описанной в работе [2]. Повторное нагружение проводили без относительного сдвига контактирующих тел до нагрузки, не превосходящей максимальную первоначальную. Каждый опыт повторяли 4–5 раз.

В качестве деталей использовали плитки, изготовленные из сталей различной твердости и ряда цветных металлов и сплавов (табл. 1).

Материалы и твердость испытанных деталей

Номер детали	Материал детали	Твердость по Виккерсу, HV, МПа
1	АРМКО-железо	1 090
2	Сталь 20	1 900
3	Сталь 20ХН3А	3 660
4	Сталь 40Х	4 280
5	Сталь ШХ15	8 005
6	Медь М2	470
7	Дюралюмин Д16	1 315
8	Латунь Л63	1 510
9	Титан ВТ6	3 415

Предварительно исследовали характер изменения угла φ_0 при вершине остаточного отпечатка в зависимости от уровня контактной нагрузки F и упругих свойств (E_2 и μ_2) материала детали при первом нагружении. В качестве иллюстрации в табл. 2 приведен фрагмент полученных результатов; там же приведен расчет по формуле (5) величины упругого сближения α_y при первом нагружении.

Как видно из табл. 2, при существенном изменении контактной нагрузки F (например, для АРМКО-железа в 16 раз) угол φ_0 при вершине остаточного отпечатка практически не изменяется. При этом очевидно (как следует из формулы (3)), что и отношение α/h полного сближения в контакте к глубине остаточного отпечатка также остается практически постоянным. Аналогичные результаты получены и для других материалов, указанных в табл. 1. Эти результаты показаны на рис. 2, из которого видно, что при неизменных значениях угла 2φ при вершине конического индентора и величин упругих постоянных E_2 и μ_2 материала детали значение угла $2\varphi_0$ при вершине остаточного отпечатка однозначно определяется твердостью материала детали. Из рис. 2 следует, что для сталей с твердостью в диапазоне HV1090–HV8005 эта зависимость может быть описана формулой

$$\varphi_0 = 0,583 \cdot 10^{-3} \cdot HV + 68,3. \quad (6)$$

Отметим также, что погрешность расчетного определения значений упругого сближения α_y при первом нагружении (табл. 2) вполне укладывается в неточности измерения полного сближения α и глубины h остаточного отпечатка.

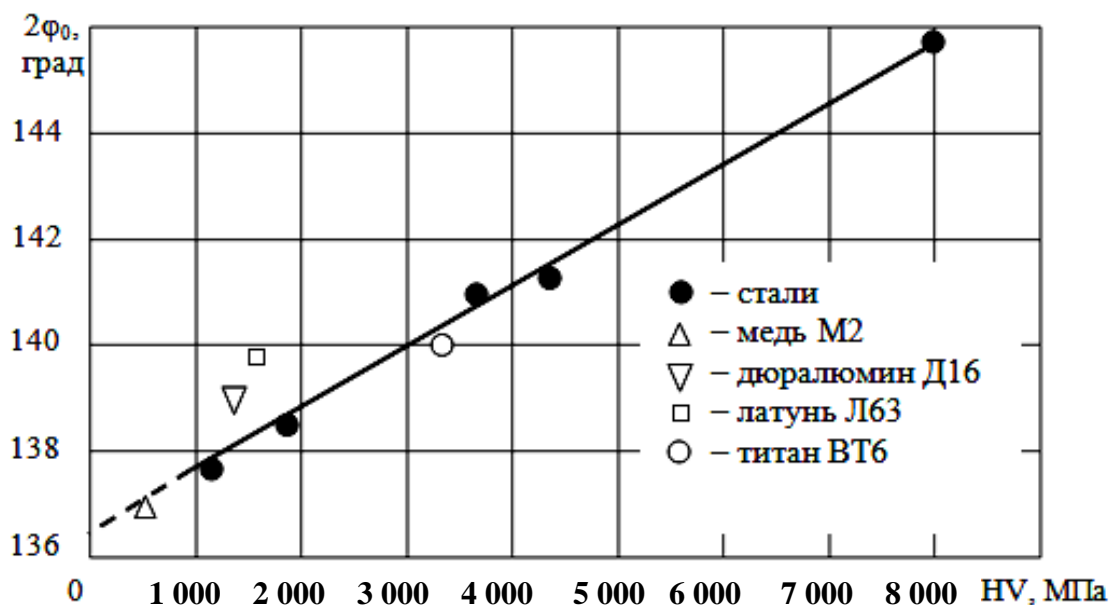


Рис. 2. График зависимости угла $2\varphi_0$ при вершине остаточного отпечатка после снятия нагрузки с индентора из твердого сплава (угол при вершине $2\varphi = 136^\circ$) от твердости по Виккерсу HV материала детали:
 значки – экспериментальные данные для материалов, приведенных в табл. 1;
 линия – расчет по формуле (6)

Описанные результаты имеют принципиальное значение для расчетного определения упругого сближения при повторных нагружениях конической микронеровности (индентора). Поскольку, как показано выше, угол $2\varphi_0$ при вершине остаточного отпечатка (при неизменных величинах угла 2φ при вершине конического индентора и упругих постоянных E_2 и μ_2 материала детали) зависит только от уровня твердости материала детали, то и значение приведенного угла $2\varphi_{пр}$ для данного материала при указанных условиях также постоянно (см. формулу (2)) и однозначно определяется твердостью материала детали. Следовательно, при повторном нагружении величину сближения в контакте можно находить по формуле (5). Это положение было подвергнуто экспериментальной проверке по описанной выше методике. В исследовании использовали материалы деталей, указанные в табл. 1. В табл. 3 приведены результаты определения сближений при повторных нагружениях при $F = 4\ 905$ Н для образца из АРМКО-железа после первого нагружения при $F = 9\ 810$ Н. Там же приведен расчет по формуле (5) величины упругого сближения α_y ; при расчете α_y принимали угол φ_0 остаточного отпечатка равным $68,86^\circ$, то есть соответствующим наибольшей нагрузке $F = 9\ 810$ Н. В табл. 4 приведены аналогичные результаты при повторных нагружениях при $F = 9\ 810$ Н для образца из АРМКО-железа после первого нагружения при той же нагрузке ($F = 9\ 810$ Н).

Таблица 2

Результаты определения угла φ_0 при вершине остаточного отпечатка и расчета величины упругого сближения α_y при первом нагружении

Контактная нагрузка F , Н	Экспериментальные данные, мкм			φ_0 , град. (расчет по формуле (3))	α_y , мкм (расчет по формуле (5))
	α	h	α_y		
Медь М2, HV470					
613	225	218	7,0	68,55	7,8
817	269	261	8,0	68,55	9,0
1 634	404	392	12,0	68,55	12,7
2 453	511	498	13,0	68,55	15,5
АРМКО-железо, HV1090					
613	130	123	7,0	68,85	8,4
817	154	146	8,0	68,83	9,7
1 634	231	219	12,0	68,83	13,7
2 453	291	277	14,0	68,78	16,7
3 270	340	324	16,0	68,77	19,3
4 088	386	365	20,0	68,83	21,6
4 905	423	401	22,0	68,83	23,7
6 539	492	467	25,0	68,82	27,4
8 175	551	524	27,0	68,80	30,6
9 810	608	575	33,0	68,86	33,5

Как видно из табл. 3 и 4, при повторных нагружениях величины полного сближения в контакте значительно меньше (для АРМКО-железа с твердостью HV1090 более чем в 10 раз) по сравнению с первым нагружением при одинаковых нагрузках. Этот результат соответствует данным, приведенным в работе [1] для повторного нагружения шероховатых поверхностей деталей, поскольку при этом полное сближение во многом определяется величиной упругой контактной деформации α_y . При многократных повторных нагружениях (после десятого нагружения) остаточная деформация h в контакте несколько возрастает: при нагрузке $F = 4\,905$ Н (табл. 4) – на 0,52 %, а при наибольшей нагрузке $F = 9\,810$ Н – на 3,8 % по сравнению с глубиной остаточного отпечатка, достигнутой при первом нагружении под действием контактной нагрузки $F = 9\,810$ Н. Видно, что к десятому нагружению прирост глубины остаточного отпечатка практически прекращается. Экспериментальные значения упругого сближения α_y при всех повторных нагружениях постоянны и практически равны значениям при первом нагружении при соответствующих нагрузках. Значения α_y , вычисленные по формуле (5), отличаются от экспериментальных: для повторной нагрузки $F = 4\,905$ Н – на 6 %, а для повторной нагрузки $F = 9\,810$ Н – на 1,5 %. Аналогичные результаты получены и для других материалов деталей, указанных в табл. 1.

Таблица 3

Результаты экспериментального определения сближений в контакте при многократных повторных нагружениях образца из АРМКО-железа при $F = 4\ 905\ \text{Н}$ после первого нагружения ($F = 9\ 810\ \text{Н}$) и расчета величины упругого сближения α_y

Номер нагружения	Экспериментальные данные, мкм			α_y , мкм (расчет по формуле (5))
	α	h	α_y	
2	24	1	23	24,4
3	25	2	23	24,4
4	25	2	23	24,4
5	25	2	23	24,4
6	26	3	23	24,4
7	26	3	23	24,4
8	26	3	23	24,4
9	26	3	23	24,4
10	26	3	23	24,4

Таблица 4

Результаты экспериментального определения сближений в контакте многократных при повторных нагружениях образца из АРМКО-железа при $F = 9\ 810\ \text{Н}$ после первого нагружения ($F = 9\ 810\ \text{Н}$) и расчета величины упругого сближения α_y

Номер нагружения	Экспериментальные данные, мкм			α_y , мкм (расчет по формуле (5))
	α	h	α_y	
2	40	7	33	33,5
3	43	10	33	33,5
4	46	13	33	33,5
5	48	15	33	33,5
6	50	17	33	33,5
7	51	18	33	33,5
8	53	20	33	33,5
9	54	21	33	33,5
10	55	22	33	33,5

Таким образом, установлена и экспериментально подтверждена аналитическая зависимость для определения упругого сближения при многократных повторных нагружениях конического индентора (микронеровности) в условиях статического приложения контактной нагрузки.

Показано, что при многократных повторных нагружениях конического индентора величина упругого сближения остается постоянной и практически равной упругому сближению при первом нагружении при соответствующей нагрузке.

Библиографический список

1. Демкин Н.Б. Свойства контакта шероховатых поверхностей при повторном приложении нагрузки // Механика и физика фрикционного контакта и граничных слоев: межвузовский сборник научных трудов. Тверь: ТГТУ, 2004. С. 4–7.
2. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
3. Способ определения твердости материалов: пат. 1649377 Рос. Федерация. № 4412925/28 / Славский Ю.И., Матлин М.М., Жуленев Е.П.; заявл. 19.04.1988; опубл. 15.05.1991, Бюл. 18.
4. Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости. М.: Гостехиздат, 1955. 491 с.
5. Определение модуля Юнга по диаграмме вдавливания индентора / С.И. Булычев [и др.] // Заводская лаборатория. 1975. № 9. С. 1137–1140.

УДК 621.891

Д.А. Зоренко
Тверской государственной технической университет

ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УЗЛОВ ТРЕНИЯ С ПОКРЫТИЯМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ

© Зоренко Д.А., 2021

В статье представлены результаты применения покрытий, полученных методом микродугового оксидирования и содержащих частицы твердых смазочных материалов, на деталях из цветных вентильных металлов, входящих в состав узлов трения машин. Рассмотрена технология нанесения самосмазывающихся покрытий. Представлен механизм работы этих покрытий.

Ключевые слова: самосмазывающиеся МДО-покрытия, вентильные металлы, твердые смазочные материалы, линейная интенсивность изнашивания, электролит, коэффициент трения скольжения.

INFLUENCE OF FINE-DISPERSED PARTICLES OF SOLID LUBRICANT ON THE WEAR RESISTANCE OF FRICTION UNITS WITH COATINGS OBTAINED BY MICROARC OXIDATION

The article presents the results of the application of coatings, obtained by microarc oxidation and contained particles of solid lubricants, on parts made of non-ferrous valve metals that are part of the friction units of machines. The technology of applying self-lubricating coatings is considered. The mechanism of operation of these coatings is presented.

Keywords: self-lubricating coatings, microarc oxidation, valve metals, solid lubricants, linear wear intensity, electrolyte, sliding friction coefficient.

В современной промышленности существует большое количество узлов трения, основными конструкционными материалами которых являются цветные сплавы на основе алюминия и титана. Зачастую они эксплуатируются в условиях трения без смазочного материала. Невозможность использовать смазочные материалы в таких узлах продиктована технологическими требованиями (к чистоте поверхностей, высокими рабочими температурами и т. д.). Большинство традиционных способов повышения износостойкости, таких как хромирование, химическое оксидирование, нанесение керамических покрытий, не удовлетворяют современным требованиям по ряду технологических, экономических и эксплуатационных причин. Одним из перспективных материалов износостойких покрытий является керамика, а особенно оксидная керамика, получаемая методом микродугового оксидирования [1]. Антифрикционные керамические покрытия, полученные анодно-искровым способом на контактирующих поверхностях, выгодно отличаются от других покрытий относительной простотой, дешевизной, возможностью получения покрытия на поверхностях сложной формы, а главное – хорошими механическими, триботехническими, теплотехническими свойствами получаемого покрытия (высокой твердости, высокой адгезии к металлу подложки вызванной полным срастанием покрытия с покрываемым металлом, а также теплостойкостью, износостойкостью и др.). Основным недостатком полученных таким методом покрытий – высокий коэффициент трения [2].

Синтез покрытий с заданными свойствами на металлах анодированием или плазменным осаждением имеет большое практическое значение. Однако указанные выше и другие традиционные методы формирования покрытий на вентильных металлах не удовлетворяют всему многообразию требований современной техники (по износостойкости, твердости, адгезии с металлом-подложкой, дешевизне и простоте получения). В связи с этим возникает необходимость развития новых или малоизученных методик управляемого синтеза неорганических покрытий на металлах. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов в электролитах – один из таких методов. Особенность его в том, что в одном процессе на металлическом аноде синтезируется материал, компонентами которого являются составляющие металла и электролита и производится обработка образующейся пленки электрическими разрядами [3, 4].

В Тверском государственном техническом университете на кафедре прикладной физики были проведены эксперименты по нанесению покрытий микродуговым оксидированием на поверхности трения деталей из алюминиевых и титановых сплавов. Образующиеся покрытия в процессе нанесения модифицировались внедрением в их состав мелкодисперсных порошков твердых смазочных материалов, таких как графит С и дисульфид молибдена MoS_2 . Получение износостойкого композиционного

самосмазывающегося покрытия на основе оксида алюминия и мелкодисперсного порошка дисульфида молибдена достигается путем правильного подбора концентрации компонентов электролита и токовых режимов нанесения покрытия. Состав предложенного электролита:

щелочь NaOH 1 г;

жидкое стекло 11 г;

дисульфид молибдена (размером частиц 2–10 мкм) 45 г;

глицерин 30 г на 1 л дистиллированной воды.

Алюминиевую деталь подвергают дуговому окислению в течение 1,5–2 ч. Получение покрытия с частицами графита технологически отличается. Графит является токопроводящим материалом, поэтому стандартное нанесение покрытия не представляется возможным, так как не происходит важной стадии пассивации поверхности. При подаче напряжения на ванну и покрываемую деталь частицы графита, устремляясь к покрываемой детали аноду, налипают на чистую, еще не успевшую покрыться диэлектрической мономолекулярной трехмерной оксидной пленкой поверхность покрываемой детали. Из-за способности проводить электрический ток эти частицы образуют точки безразрядной утечки тока. В результате этого поверхность образца вместо диэлектрических свойств приобретает свойства проводника и беспрепятственное течение тока не дает процессу выйти в режим пробоя диэлектрической пленки. Эта проблема была решена с помощью разделения процесса нанесения на два этапа. Сначала наносилось тонкое (5–10 мкм) покрытие в электролите без частиц графита. После чего покрываемый образец помещался в электролит с повышенным содержанием жидкого стекла и мелкодисперсным (2–10 мкм) порошком графита, процесс продолжался до получения покрытия заданной толщины. В образованном таким образом покрытии частицы дисперсной фазы отсутствуют в слое, прилегающем к покрываемой поверхности алюминия.

В работе было исследовано четыре принципиально разных электролита для получения износостойких МДО-покрытий на титановых сплавах. Наиболее удачным из них оказался электролит на основе ортофосфорной и серной кислот. Процесс образования покрытия на этом электролите характеризуется хорошей воспроизводимостью и высокой скоростью: процесс продолжался 5–10 мин.

Для полученных покрытий были проведены триботехнические испытания на машине трения МТШ-М без смазочного материала. Схема трения: шар – плоскость. Для снижения температурного воздействия была принята линейная скорость скольжения, равная 0,52 м/с. Эксперименты проводились при комнатной температуре. Полный износ покрытия контролировался по скачкообразному изменению коэффициента трения, что дало возможность определить интенсивность линейного износа. В

результате испытаний были получены следующие триботехнические характеристики покрытий:

1. Для покрытия на алюминиевом сплаве с частицами дисульфида молибдена:

коэффициент трения скольжения: 0,07–0,11;

линейная интенсивность изнашивания: $5 \cdot 10^{-9} \pm 15 \%$.

2. Для покрытия на алюминиевом сплаве с частицами графита:

коэффициент трения скольжения: 0,1–0,16;

линейная интенсивность изнашивания: $7 \cdot 10^{-9} \pm 15 \%$;

3. Для покрытий без частиц твердого смазочного материала:

коэффициент трения скольжения: 0,11–0,25;

линейная интенсивность изнашивания: $15 \cdot 10^{-9} \pm 15 \%$.

4. Для покрытия на титановом сплаве:

коэффициент трения скольжения: 0,06–0,1.

линейная интенсивность изнашивания: $2 \cdot 10^{-9} \pm 15 \%$.

Полученные покрытия имеют ряд достоинств:

хорошо удерживают смазочный материал, так как имеют открытую и закрытую пористость;

не схватываются с ответными непокрытыми элементами пары трения;

характеризуются быстротой, простотой и дешевизной получения;

имеют хорошие триботехнические свойства.

В ходе триботехнических испытаний самосмазывающихся покрытий контролировалась линейная интенсивность изнашивания ответной детали без покрытия, в результате чего было определено, что полученные композиционные покрытия гораздо менее интенсивно изнашивают непокрытые ответные детали. В этом исследовании в качестве непокрытой детали применялся плоский образец из стали ХВГ, закаленный до 52–58 HRC. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в процессе изнашивания частицы твердой смазки распределяются по поверхностям как покрытой детали, так и ответной (непокрытой), при этом образуют защитные смазочные пленки на поверхностях трения и тем самым повышают триботехнические свойства пары трения. Выявленное свойство является несомненным преимуществом перед известными анодно-искровыми покрытиями.

Исходя из перечисленных выше достоинств, можно предложить применение полученных покрытий для процессов статического трения в целях предотвращения схватывания, а также в процессах как «сухого», так и граничного трения. Проведенная работа подтверждает технико-экономическую целесообразность использования данного покрытия в узлах машин, требующих повышения твердости и износостойкости сопряженных, трущихся поверхностей деталей в сочетании с повышенными требованиями к коррозионной стойкости и массе узла.

Библиографический список

1. Баковец В.В., Поляков О.В., Долговесова И.П. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. Новосибирск: Наука, 1991. 152 с.
2. Демкин Н.Б. Физические основы трения и износа машин: учеб. пособие. Калинин: КГУ, 1981. 115 с.
3. Федоров В.А. Разработка основ применения легких сплавов в качестве материалов триботехнического назначения за счет формирования поверхностного керамического слоя: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. М., 1993. 303 с.
4. Великосельская Н.Д. Повышение долговечности деталей узлов трения подводного нефтепромыслового оборудования посредством поверхностного упрочнения методом микродугового оксидирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. М., 1989. 190 с.

УДК 621.891:519.28

П.Н. Хопин
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ ОСНОВЫ

© Хопин П.Н., 2021

В результате анализа литературных данных получены термодкорреляционные зависимости ресурса и коэффициента трения от температуры нагрева пар трения с твердо-смазочными покрытиями (ТСП) на основе MoS_2 диффузионного типа М801 и на основе NbS_2 М810, позволяющие производить оценку указанных параметров при нагреве до 800 °С в условиях вакуума.

Ключевые слова: термовакуумные испытания, твердосмазочные покрытия диффузионного типа, термодкорреляционные зависимости.

EVALUATION OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF SOLID LUBRICATING COVERINGS OBTAINED BY CHEMICAL-THERMAL TREATMENT OF THE SUBSTRATE

As a result of the processing of the literature data, the thermocorrelation dependences of the resource and the coefficient of friction on the heating temperature of friction pairs with SLC based on M801 diffusion type MoS_2 and M810 based on NbS_2 were obtained, which make it possible to evaluate these parameters when heated to 800 °C under vacuum conditions.

Keywords: thermal vacuum tests, diffusion-type solid lubricating coverings, thermocorrelation dependences.

Для узлов трения, автономно функционирующих в условиях повышенной и пониженной температуры, как для нормальной атмосферы, так и для вакуума широко используются твердосмазочные покрытия (ТСП) на основе MoS_2 , графита, политетрафторэтилена и других наполнителей. Применяются различные методы нанесения и обработки основы: суспензионное, магнетронное нанесение, химико-термическая обработка основы и др.

Учитывая ограничения по термостойкости пар трения с ТСП суспензионного типа для условий вакуума значениями температур $T = 500^\circ\text{C}$ [1] для самых термостойких связующих типа К-55 и силиката натрия, целесообразно провести анализ указанных зависимостей для ТСП без связующих, полученных химико-термической обработкой основы.

До настоящего времени отсутствовали термокорреляционные зависимости ресурса от температуры типа $\tau = f(T)$ для фрикционных сопряжений с ТСП на основе MoS_2 и NbS_2 , полученные сульфидированием соответственно молибденовой М801 и ниобиевой основы М810, что являлось целью данной работы.

Материалы и методы исследования. В статье [2] приведены результаты высокотемпературных вакуумных исследований материала М801 (димолита), полученного высокотемпературным сульфидированием молибденовой основы ($\text{ТСП}_{\text{ХТО-MoS}_2}$), материала М810, полученного аналогичной обработкой ниобиевой основы ($\text{ТСП}_{\text{ХТО-NbS}_2}$) и ТСП суспензионного нанесения ВНИИ НП 229 ($\text{MoS}_2 + \text{силикат натрия}$) в паре с молибденом.

Трибологические испытания проводились на установке ВВТ-1 по схеме «вращающийся вал – втулка». Вал из исследуемого материала изготавливался диаметром 10 мм. Втулка для испытаний М801 изготавливалась из молибдена, для вала из М810 – из ниобия. Толщина покрытий δ составляла 40–50 мкм, толщина ТСП ВНИИ НП 229 – 10–12 мкм.

Условия испытаний были следующими: разряжение в рабочей камере $p = 2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., скорость скольжения $V = 0,265$ м/с, температуры образцов могла изменяться от 20 до 1 000 °С. Нагрузка в опытах составляла 26 кГс, что соответствовало контактному давлению $P = 16 \text{ кГ/см}^2 = 1,57 \text{ МПа}$. При большей нагрузке даже в опытах без нагрева покрытие разрушалось (наблюдалось резкое возрастание $f_{\text{тр}}$).

Для указанных выше условий испытаний расчетная частота вращения составила $n = 500$ об/мин.

С учетом полученной ранее автором зависимости $T_{\text{тр}} = f(P, V)$ имеем формулу для условий вакуума [1]:

$$T_{\text{тр}} = 3,31 + 291,64 \cdot V + 0,643 \cdot P - 282,19 \cdot V^2, \quad (1)$$

где V измеряется в м/с, P – в МПа, $T_{\text{тр}}$ – в °С.

Значение контактной температуры трения с учетом пересчета температуры за счет выхода значений P и V за исследуемые при получении зависимости (1) диапазоны ($\Delta P = 61\text{--}121$ МПа, $\Delta V = 0,087\text{--}0,504$ м/с) составило $T_{\text{тр}} = 22,7$ °С, что является несущественным для температур экспериментов до 1 000 °С.

Результаты для ТСП М801. После пересчета пути трения в значение ресурса пары с ТСП_{ХТО-МоS₂} для условий длительных испытаний были получены опытные данные (табл. 1).

Таблица 1

Результаты длительных трибовакуумных испытаний пары трения М801 х Мо по схеме «вал – втулка» [2]

Температура испытаний T , °С	Путь трения L , км	Ресурс τ , мин.	$f_{\text{тр}}$
20	40	2 548	0,07
200	35	2 230	0,07
400	40	2 548	0,06
600	75	4 777	0,04
800	25	1 600	0,035

На основе данных табл. 1 был построен график зависимости ресурса ТСП_{ХТО-МоS₂} от температуры T при трибоиспытаниях в вакууме (рис. 1).

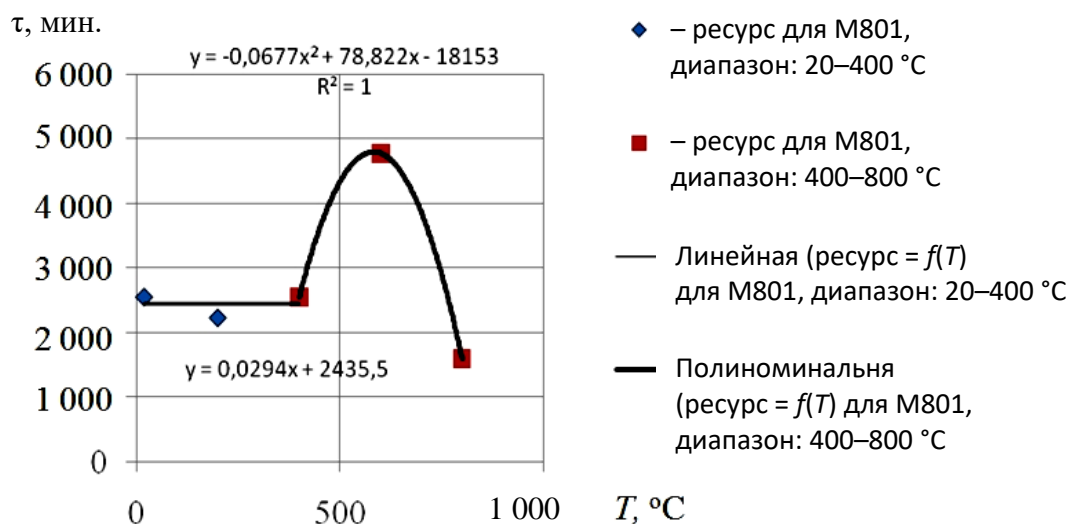


Рис. 1. Термокорееляционная зависимость ресурса τ ТСП_{ХТО-МоS₂} в паре с молибденом от температуры T при трибоиспытаниях в вакууме $p = 2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. по схеме «вал – втулка»

Представленная на рис. 1 зависимость $\tau = f(T)$ адекватно описывалась двумя уравнениями:

- 1) для диапазона температур $\Delta T = 20\text{--}400$ °С зависимостью $\tau = 0,0294 \cdot T + 2\,436$;

2) для диапазона температур $\Delta T = 400\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ полиномом

$$\tau = -0,0677 \cdot T^2 + 78,8 \cdot T - 18\ 150.$$

Анализ представленной на рис. 1 зависимости показывает, что пара трения «димолит М801 х молибден» работоспособна в условиях вакуума до температуры $800\text{ }^\circ\text{C}$ и обеспечивает при этом ресурс не менее $\tau = 1\ 600$ мин. при коэффициенте трения $f_{\text{тр}} = 0,035\text{--}0,07$. Максимальный ресурс для указанного ТСП наблюдался при $T = 600\text{ }^\circ\text{C}$ и составил $\tau = 4\ 777$ мин.

Результаты для ТСП М810. Рассчитанные на основе экспериментальных данных работы [2] значения ресурса пары с ТСП_{ХТО-NbS₂} для условий длительных испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты длительных трибовакuumных испытаний пары трения М810 х Nb по схеме «вал – втулка» [2]

Температура испытаний T , $^\circ\text{C}$	Путь трения L , км	Ресурс τ , мин.	$f_{\text{тр}}$
20	40	2 550	0,06
200	35	2 230	0,07
400	45	2 870	0,07
600	55	3 503	0,05
800	30	1 911	0,04

На основе данных табл. 2 был построен график зависимости ресурса ТСП_{ХТО-NbS₂} от температуры T при испытаниях в вакууме (рис. 2).

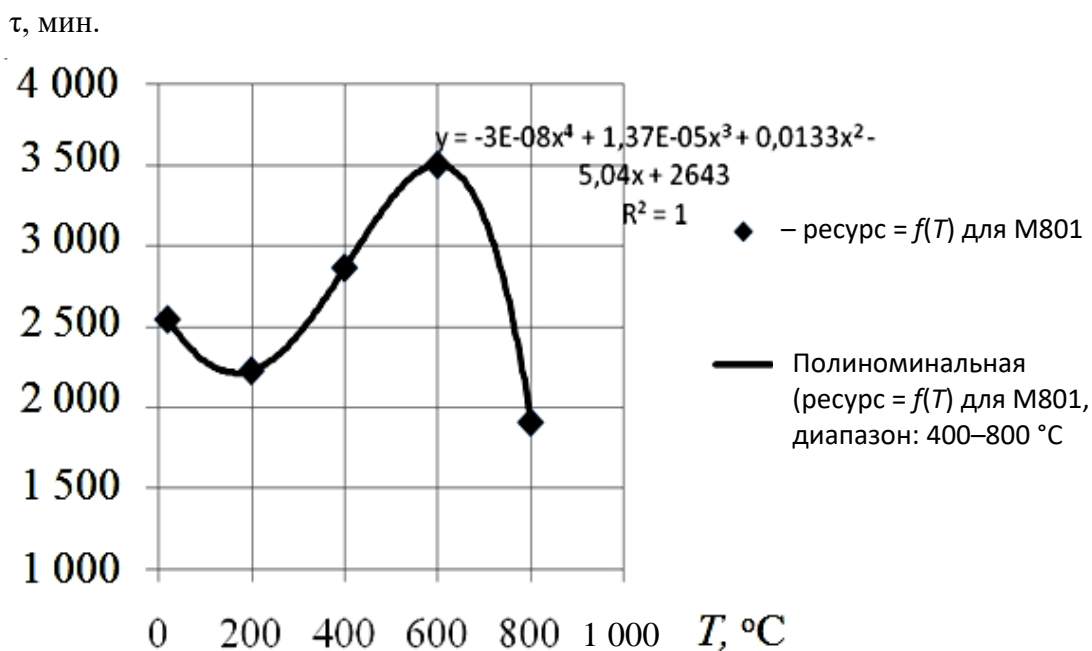


Рис. 2. Термокорреляционная зависимость ресурса τ пары трения из ТСП_{ХТО-NbS₂} в паре с ниобием от температуры T при трибоиспытаниях в вакууме $p = 2 \cdot 10^{-7}\text{--}2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. по схеме «вал – втулка»

Представленная на рис. 2 зависимость $\tau = f(T)$ адекватно описывается выражением

$$\tau = -3 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 + 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0,0133 \cdot T^2 - 5,04 \cdot T + 2\,643.$$

Анализ представленной на рис. 2 зависимости показывает, что пара трения «М810 х ниобий» работоспособна в условиях вакуума до температуры 800 °С и обеспечивает при этом ресурс не менее $\tau = 1\,911$ мин. при коэффициенте трения $f_{\text{тр}} = 0,04\text{--}0,07$. Максимальный ресурс для указанного ТСП наблюдался при $T = 600$ °С и составлял $\tau = 3\,503$ мин.

В результате обработки экспериментальных зависимостей антифрикционных характеристик от температуры нагрева в вакууме рассматриваемых пар в сравнении с ТСП ВНИИ НП 229 [2] и ТСП ВНИИ НП 212 (MoS₂ с мочевино-формальдегидной смолой) (данные автора [3]) получены зависимости, представленные на рис. 3.

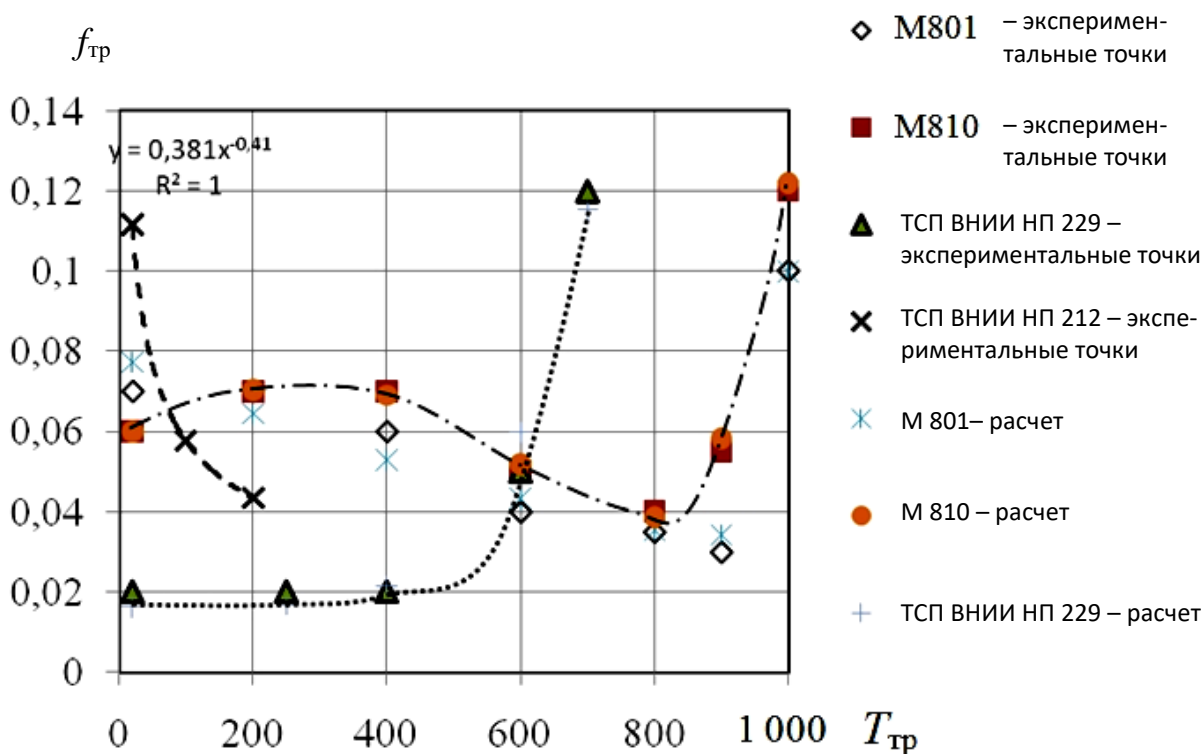


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения установившегося режима от температуры нагрева $f_{\text{тр}} = f(T)$ для дисульфидмолибденовых покрытий различных типов применительно к условиям вакуума: — — — — M801; — · — · — — M810; — — — — — ТСП ВНИИ НП 212 (зависимость построена с использованием зависимости $f_{\text{тр}}$ от поверхностной температуры трения; после наработки в условиях космоса $f_{\text{тр}}$ снизился до 0,03 [3]); ····· — ТСП ВНИИ НП 229

Анализ представленных на рис. 3 данных выявил, что антифрикционные характеристики диффузионных ТСП на установившихся режимах трения до температур 600 °С несколько превышают аналогичные характеристики для ТСП со связующими. С возрастанием температур

нагрева до предельных значений 800 °С коэффициент трения диффузионных ТСП М801 и М810 падает до значений $f_{\text{тр}} = 0,03\text{--}0,04$.

В результате аппроксимации графиков $f_{\text{тр}} = f(T)$ с использованием программы MATLAB применительно к рассматриваемым ТСП для условий вакуума были получены следующие зависимости:

для М801 $f_{\text{тр}} = 7,37 \cdot 10^{-17} \cdot \exp(0,0345 \cdot T) + 0,0778 \cdot \exp(-0,001 \cdot T)$ (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9502$);

М810 $f_{\text{тр}} = 1,28 \cdot 10^{-15} \cdot T^5 - 1,97 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 + 1,035 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 3,95 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 0,000114 \cdot T + 0,0578$ (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9971$);

ТСП ВНИИ НП 229 $f_{\text{тр}} = 6,824 \cdot 10^{-17} \cdot T^{5,329} + 0,01634$ (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9807$);

ТСП ВНИИ НП 212 (для диапазона $T_{\text{тр}} = 12\text{--}144$ °С) [3] $f_{\text{тр}} = 0,381 \cdot T^{-0,41}$.

Заключение. В результате проведенных исследований определены термодинамические зависимости ресурса и коэффициента установившегося трения от температуры нагрева пар трения с ТСП, полученными химико-термической обработкой основы, «димолит М801 х молибден», «М810 х ниобий» и ТСП ВНИИ НП 229, которые позволяют на этапе проектного расчета оценить ресурс и антифрикционные характеристики указанных фрикционных сопряжений с ТСП при нагреве до 800 °С в условиях вакуума. Предельное контактное давление P при трибоиспытаниях для рассматриваемых ТСП при скорости скольжения $V = 0,265$ м/с составило 1,57 МПа. На предельных температурах испытаний $T = 800$ °С ресурс ТСП_{ХТО-МоS₂} составил $\tau = 1\ 600$ мин, для ТСП_{ХТО-NbS₂} – $\tau = 1\ 911$ мин. Максимальный ресурс наблюдался при $T = 600$ °С и составил $\tau = 4\ 777$ мин. и $\tau = 3\ 503$ мин. соответственно. Коэффициент трения $f_{\text{тр}}$ при вакуумных трибоиспытаниях изменялся в диапазоне 0,035–0,07.

Библиографический список

1. Хопин П.Н. Оценка антифрикционных характеристик пар трения с твердосмазочными покрытиями для различных условий функционирования // Трение и износ. Т. 36. № 5. С. 491–498.
2. Ермаков А.Т., Матвеевский Р.М. Исследование работоспособности некоторых твердых смазочных покрытий при трении в вакууме и высоких температурах // Твердые смазочные покрытия: сборник. М.: Наука, 1977. С. 70–74.
3. Хопин П.Н. Анализ испытаний пар трения с твердосмазочными покрытиями в наземно-космических условиях и прогнозирование трибологических характеристик // Трение и износ. Т. 39. № 2. С. 175–183.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

© Афанасьева Л.Е., Измайлов В.В.,
Новоселова М.В., 2021

Исследованы параметры шероховатости поверхности образцов из нержавеющей стали, полученной по технологии селективного лазерного плавления. Показано, что образцы с наименьшим значением высотных характеристик микрогеометрии поверхности обладают наибольшей плотностью.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, нержавеющая сталь, шероховатость поверхности.

SURFACE ROUGHNESS OF STAINLESS STEEL SAMPLES, OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY

The parameters of the surface roughness of stainless steel samples obtained by the technology of selective laser melting are investigated. It is shown that the samples with the lowest values of the height characteristics of the surface microgeometry have the highest density.

Keywords: additive technologies, selective laser melting, stainless steel, surface roughness.

Одной из перспективных технологий получения деталей с заданными поверхностными свойствами является селективное лазерное плавление (СЛП), основанное на избирательном плавлении слоя порошка, нанесенного на подложку [1–3]. В процессе СЛП происходит перекристаллизация порошкового материала в условиях сверхбыстрых скоростей охлаждения из жидкой фазы ($\sim 10^5$ °C/c). Одной из важных характеристик качества поверхности, от которой зависят ее основные эксплуатационные характеристики, является микро топография.

Цель работы – экспериментальное исследование закономерностей формирования микрорельефа поверхности образцов нержавеющей стали, полученных по технологии СЛП.

Материалы и методы. Для изготовления образцов использовали порошок марки CL20ES, по химическому составу близкий к нержавеющей хромо-никель-молибденовой стали аустенитного класса марки 03X17H14M3 (ГОСТ 5632-2014). Порошок используется для аддитивного производства кислото- и коррозионно-стойких прототипов единичных и мелкосерийных изделий в машиностроении, автомобильной промышленности и других отраслях. Средний размер частиц порошка около 30 мкм.

По технологии СЛП на установке M2 cusing компании Concept Laser были получены образцы размером 30×30×6 мм. Для синтеза изделий использовали оптоволоконный лазер с диодной накачкой, мощностью 400 Вт, длиной волны 1,07 мкм. Режимы синтеза: мощность 200 Вт, скорость сканирования лазерного пучка 0,8 м/с. Положение фокальной точки лазерного излучения f изменяли от -4 до $+5$ мм. За нулевую отметку принимали верхний уровень насыпанного порошка. При этом диаметр пятна в фокусе составлял 50 мкм. При отрицательных значениях положения фокальной точки сканирование слоя порошка происходило сходящимся пучком (рис. 1а), при положительных – расходящимся (рис. 1б).

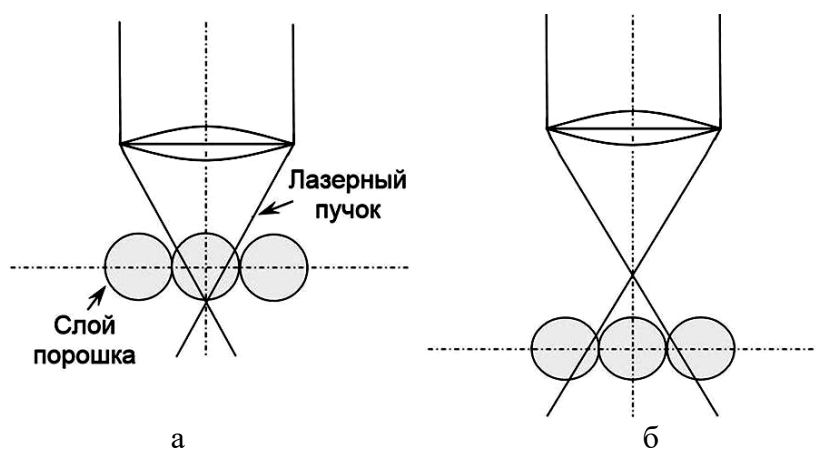


Рис. 1. Схемы обработки: а – плавление порошка сходящимся пучком; б – расходящимся пучком

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 25281-82 (ASTM B962-08).

Измерение шероховатости исследуемых поверхностей выполняли с помощью профилографа-профилометра. Обработкой профилограмм определяли стандартные параметры профиля поверхности (ГОСТ Р ИСО 4287-2014): максимальную высоту профиля Rz , максимальную высоту пика профиля Rp , среднее арифметическое отклонение профиля Ra , среднюю ширину элементов профиля RSm . Для более полной характеристики рельефа поверхности дополнительно устанавливали ряд нестандартных параметров, влияющих на эксплуатационные характеристики поверхности: относительную опорную длину профиля на уровне средней линии tm , параметр степенной аппроксимации опорной кривой v и средний радиус кривизны выступа профиля r_m . Еще один нестандартный параметр, который решено было использовать для характеристики рельефа исследованных поверхностей, – это высота неровностей профиля по 10 точкам (бывший параметр Rz). Его не следует путать с современным стандартным параметром Rz , определение которого дано выше. Поэтому

далее будем обозначать высоту неровностей профиля по 10 точкам как R_{10z} . Этот параметр много лет широко использовался для характеристики качества поверхности после самых различных методов технологической обработки поверхностей, по нему имеется обширный экспериментальный и справочный материал. Для сопоставления параметров исследуемых поверхностей с типичными параметрами шероховатости после различных методов обработки было решено применять параметр R_{10z} в данном исследовании.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены примеры профилограмм исследованных поверхностей, записанных в направлении, перпендикулярном движению лазерного пучка. Числовые величины характеристик микрогеометрии приведены в таблице. Поверхность образцов, полученных сканированием расходящимся лазерным пучком с положением фокальной точки +2 и +5 мм, имеет значение параметра Rz более 80 мкм. Характеристики микрогеометрии для этих поверхностей в статье не представлены.

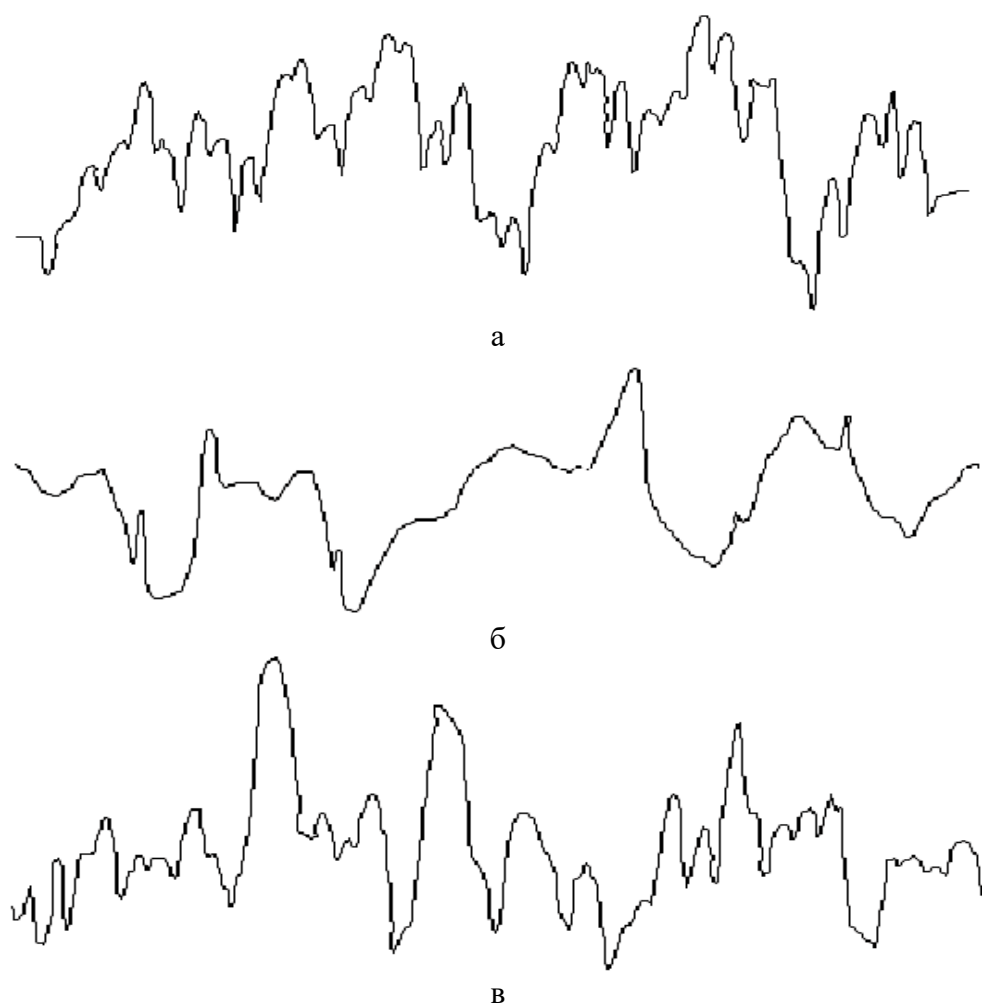


Рис. 2. Изображения профилограмм поверхности образцов:
а – $f = -4$ мм; б – $f = -2$ мм; в – $f = 0$ мм

Характеристики микрогеометрии поверхностей

Параметры профиля поверхности	Положение фокальной точки, мм					
	-4	-2	0	+1	+2	+5
Rz , мкм	69	48	66	66	> 80	> 80
Rp мкм	23	26	32	36	–	–
Ra , мкм	10,1	6,6	8,8	11,4	–	–
R_{10z} , мкм	48,0	33,7	43,2	38,6	–	–
RSm , мм	0,24	0,69	0,31	0,41	–	–
tm	0,48	0,46	0,40	0,42	–	–
v	1,2	2,6	1,9	1,6	–	–
r_m , мм	0,18	0,98	0,11	0,16	–	–

Из анализа данных, приведенных в таблице, можно сделать выводы.

1. Отношение шага неровностей профиля исследованных поверхностей к высоте этих неровностей Rz/RSm лежит в диапазоне 3–14. Отклонения поверхности от правильной геометрической формы с таким соотношением шаговых и высотных параметров принято относить к шероховатости.

2. Соотношение высотных параметров $R_{10z}/Ra \approx 4,5$ характерно для случайного профиля с распределением высот выступов, близким к нормальному. Соотношение параметров $Rz/Rp \approx 2,2$ говорит о том, что профиль поверхности почти симметричен относительно средней линии, преобладание выступов или впадин профиля не выражено.

3. Высотные параметры шероховатости исследованных образцов сравнимы с типичной шероховатостью поверхностей послековки, литья, штамповки. Такие поверхности, как правило, подвергаются последующей чистовой обработке для снижения шероховатости. Из механических способов обработки сопоставимую шероховатость формируют, например, строгание или цилиндрическое фрезерование [4], которые также в основном используются для черновой обработки поверхностей.

Значения параметра v , характеризующие распределение материала по высоте шероховатого слоя и шаговые параметры шероховатости RSm и tm , также соответствуют типичным значениям для поверхностей после механической обработки строганием или фрезерованием [4].

4. Поверхность образца, полученная при сканировании сходящимся лазерным пучком при положении фокальной точки –2 мм, обладает наименьшими высотными характеристиками шероховатости. Этому образцу соответствуют наибольшие значения среднего радиуса кривизны выступа и среднего шага неровностей профиля, что благоприятно сказывается на характере контактирования поверхностей: увеличивается фактическая площадь контакта и контактная жесткость, уменьшаются фактические давления на поверхностях деталей. Этот образец имеет более высокую плотность при сравнении с остальными (рис. 3).

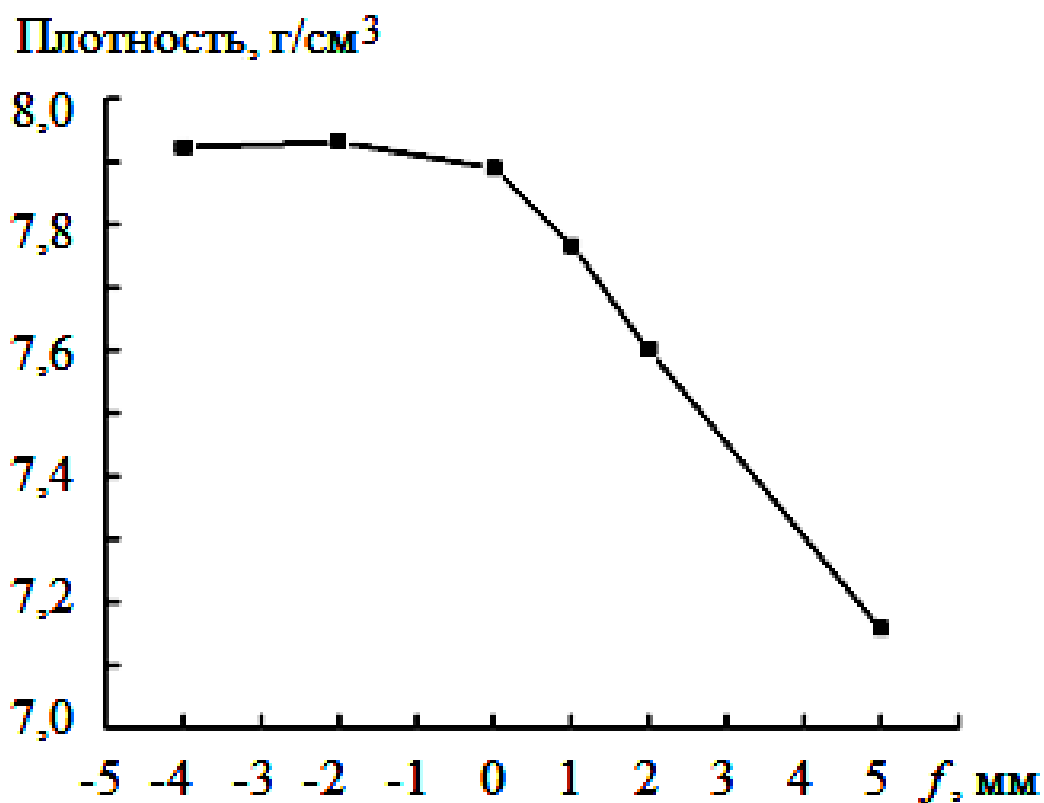


Рис. 3. Зависимость плотности образцов от положения фокальной точки

Заключение. При послойном синтезе изделий по технологии селективного лазерного плавления шероховатость поверхности каждого слоя играет важную роль в получении качественного бездефектного изделия. Результаты проведенных исследований показали, что в случае когда поверхность сканирования лазерным пучком обладает наилучшим сочетанием высотных, шаговых и интегральных параметров микрогеометрии, формируется материал с высокими значениями плотности. Ухудшение параметров микрогеометрии поверхностей слоев неизбежно ведет к возникновению дефектов, снижению плотности материала.

Библиографический список

1. Selective laser melting of iron-based powder / J.P. Kruth [at al.] // Journal of Materials Processing Technology. 2004. V. 149. № 1. P. 616–622.
2. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel / K. Guan [at al.] // Materials & Design. 2013. V. 50. P. 581–586.
3. Микроморфология поверхности и структура нержавеющей стали, полученной селективным лазерным плавлением / Л.Е. Афанасьева [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 11. С. 41–47.
4. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев: Наукова думка, 1984. 272 с.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКОЙ НАПЛАВКИ

© Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю., 2021

В статье дан обзор имеющихся на рынке проволок для износостойкой наплавки. Приводятся марки и состав наплавленного металла. Марки проволок сгруппированы по структуре наплавленного металла.

Ключевые слова: износостойкость, наплавка, наплавочная проволока.

MATERIALS FOR WEAR-RESISTANT SURFACING

The article provides an overview of wires for wear-resistant surfacing, which are available on the market. The grades and composition of the deposited metal are cited. Wire grades are grouped according to the structure of the deposited metal.

Keywords: wear resistance, surfacing, surfacing wire.

Сегодня в промышленности используются дисковые ножи, пилы, вырубные штампы и другие виды инструментов, которые применяются для резки листовых металлов, абразивной ленты, а также различных неметаллических листовых материалов. Для выполнения своей функции инструмент должен обладать высокой твердостью и износостойкостью, которые достигаются путем использования материалов, обеспечивающих получение мартенситной структуры металла режущей части инструмента. Наиболее рациональный метод изготовления режущего инструмента – наплавка рабочей части материалами, обеспечивающими высокую износостойкость и твердость. Для многих видов инструмента существенным является теплостойкость рабочей части.

Еще одна важная область применения наплавки – получение слоев с повышенной износостойкостью при изготовлении деталей машин и рабочих органов дорожной и строительной техники, подвергаемых абразивному воздействию.

Целью работы является обзор имеющихся на рынке проволочных наплавочных материалов для автоматической и полуавтоматической наплавки в среде защитного газа, обеспечивающих высокую износостойкость рабочих частей изделий.

Представленные на рынке наплавочные проволоки наиболее эффективно можно классифицировать по структуре и свойствам наплавленного металла. Как правило, в группы по структуре будут входить проволоки со схожим химическим составом.

Перлитно-сорбитная структура

Наплавочный материал данного типа содержит небольшое количество углерода, хрома, молибдена, ванадия и других легирующих элементов и обеспечивает образование преимущественно перлитной или сорбитной структуры наплавленного слоя после наплавки и охлаждения. Примеры наплавочных материалов данной группы от производителя Carbo Weld приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Наплавочные материалы Carbo Weld,
обеспечивающие получение перлитно-сорбитной структуры

Торговая марка	Состав, %				Твердость наплавленного металла
	C	Si	Mn	Cr	
CARBO F-300	0,1	0,5	2,0	1,5	300 HB
CARBO F-350	0,15	0,5	2,0	2,5	350 HB

При твердости HB 300–400 наплавленный слой не обладает достаточной износостойкостью и используется для восстановления первоначальных размеров изношенных деталей или в качестве подслоя, на который в последующем наносят слой более твердого, износостойкого металла. Перлитная структура наплавленного слоя подвергается некоторому упрочнению после термической обработки – закалки. Структура сорбита в наплавленном слое после закалки ТВЧ может применяться для упрочнения деталей ходовой части специальной техники.

Мартенситная структура

К этой группе относятся наплавочные материалы, обеспечивающие образование мартенсита в наплавленном слое. Мартенсит является закалочной структурой, которая обладает высокой твердостью и стойкостью к абразивному изнашиванию. Хрупкость мартенсита обуславливает склонность наплавленного слоя к образованию трещин, а также к возможности отделения наплавленного слоя от основного металла или подложки при ударных или динамических нагрузках.

Структуру мартенсита в наплавленном слое обеспечивают наплавочные материалы с различным химическим составом, которые можно подразделить:

- на низколегированные,
- боросодержащие,
- аустенитно-мартенситные,
- хромистые мартенситные материалы [2].

Низколегированный мартенситный материал содержит малое количество легирующих элементов, кроме углерода и хрома (табл. 2). Твердость наплавленного слоя повышается по мере увеличения

содержания мартенсита в структуре. При повышении тепловложения в процессе наплавки и снижении скорости последующего охлаждения твердость наплавленного металла уменьшается. В случае многослойной наплавки первоначально нанесенные слои подвергаются отпуску и вследствие этого теряют требуемую твердость. При содержании в наплавленном материале, помимо углерода и хрома, других карбидообразующих элементов (молибдена, ванадия, вольфрама и др.) происходит вторичное твердение наплавленного металла за счет образования двойных карбидов. Явление вторичного твердения используют в процессе изготовления инструмента для горячей деформации металла.

Таблица 2

Низколегированные мартенситные наплавочные материалы ESAB [3]

Торговая марка	Состав, %				Твердость наплавленного металла
	C	Mn	Si	Cr	
OK Tubrodur 30 O M	0,1	1,41	0,43	2,94	30 HRC
OK Tubrodur 35 G M	0,21	1,40	1,10	1,47	35 HRC
OK Tubrodur 35 O M	0,14	1,10	0,28	1,04	
OK Tubrodur 40 O M	0,14	1,59	0,62	4,64	40 HRC
OK Tubrodur 40 S M	0,15	1,14	0,51	4,07	
OK Tubrodur 58 O/G M	0,42	1,22	0,31	4,89	60 HRC
OK Tubrodur 58 S M	0,45	1,61	0,68	5,2	

Для обеспечения трещиностойкости наплавленного материала при наплавке средне- и высокоуглеродистых сталей необходимо наносить подслоем повышенной вязкости. Материалы с относительно невысокой твердостью и повышенной вязкостью могут применяться для упрочнения деталей, работающих в условиях трения под воздействием ударно-динамических нагрузок. Низколегированные мартенситные наплавочные материалы применяются для восстановления изношенных поверхностей инструмента, работающего в условиях интенсивного трения «металл – металл», при абразивном износе и умеренных ударных нагрузках.

Боросодержащие мартенситные материалы создают высокую твердость наплавленного слоя. Структура данного материала содержит высокоуглеродистый мартенсит, а также карбиды и бориды по границам кристаллов и обеспечивает высокую стойкость к абразивному износу и задиранию. Однако применение указанных материалов в условиях динамических нагрузок зачастую приводит к отрыву наплавленного металла от основного. При высоком содержании карбидов и боридов происходит процесс самоупрочнения наплавленного металла. Примеры наплавочных материалов, имеющих боросодержащую мартенситную структуру, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Боросодержащие мартенситные наплавочные материалы Carbo Weld

Торговая марка	Состав, %						Твердость наплавленного металла
	C	Si	Mn	Cr	Nb	B	
Carbo F-68	5,0	0,8	–	38,0	–	2,0	67 HRC
Carbo F-69	5,2	0,8	–	32,5	5,5	1,5	64-67 HRC
Carbo F-733	2,5	0,9	1,8	13	5	2	68 HRC
Carbo F-78	5,5	1,3	–	16	6,5	1,0	67 HRC

Аустенитно-мартенситные материалы обеспечивают относительно низкую твердость наплавленного слоя и высокую вязкость. В сравнении с мартенситными материалами такая структура гарантирует противозадирную стойкость, но уступает по устойчивости к абразивному изнашиванию. При многослойной наплавке твердость последующих слоев уступает твердости первого слоя вследствие уменьшения степени разбавления их металлом подслоя и повышения содержания в них остаточного аустенита. При температуре отпуска 500–600 °С данный материал испытывает вторичное твердение. Это явление используют для упрочнения деталей, работающих при высоких температурах.

Хромистые мартенситные материалы содержат 13 % хрома и после процесса наплавки имеют преимущественно мартенситную структуру (табл. 4). От количества углерода, содержащегося в наплавочном материале данного типа, зависят свойства наплавленного слоя и, соответственно, область их применения. Так, материалы с пониженным содержанием углерода после наплавки обеспечивают получение слоя с повышенными жаропрочными и коррозионно-стойкими свойствами. Наплавленный металл с высоким содержанием углерода обладает высокой износостойкостью и широко применяется для износостойкой наплавки изделий из инструментальных сталей.

Таблица 4

Хромистые мартенситные наплавочные материалы ESAB

Торговая марка	Состав, %								Структура наплавленного металла
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Nb	
OK Tubrodur 13Cr G	0,15	1,14	0,31	12,53	2,23	1,4	0,23	0,23	Хромистая высоколегированная коррозионно-стойкая мартенситная сталь

Аустенитно-высокомарганцовистая структура

Данный тип материала включает в себя высокомарганцовистые аустенитные и высокомарганцовистые хромистые аустенитные материалы (табл. 5 и 6).

Таблица 5

Аустенитно-высокомарганцовистые наплавочные материалы ESAB

Торговая марка	Состав, %				Структура наплавленного металла
	C	Mn	Si	Ni	
OK Tubrodur 13Mn O/G	0,85	11,78	0,63	2,95	Высокомарганцовистая аустенитная сталь
OK Tubrodur 15CrMn O/G	0,3	13,5	0,5	1,75	Мартенситно-аустенитная марганцовистая сталь
OK Tubrodur 200 O D	0,026	5,12	0,48	8,7	Хромо-никелевая марганцовистая высоколегированная аустенитная сталь

Таблица 6

Аустенитно-высокомарганцовистые наплавочные материалы Carbo Weld

Торговая марка	Состав, %						Твердость наплавленного металла (после холодного упрочнения)
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	
Carbo F-200	0,06	0,4	6,5	19	8,5	–	340 HB
Carbo F-210	0,3	0,4	13,0	–	3,0	–	420 HB
Carbo F-240	1,0	0,4	14,0	4,0	0,6	–	
Carbo F-250	0,4	0,4	16,0	14,0	1,2	0,6	500 HB
Carbo F-4370	0,06	0,4	6,5	19	8,5	–	340 HB

Высокомарганцовистые аустенитные материалы содержат около 1,2 % углерода и 13 % марганца. После процедуры закалки с охлаждением в воде данный наплавочный материал обеспечивает образование аустенитной структуры, обладающей повышенной вязкостью и пластичностью. При нанесении слоя данного материала на низколегированную сталь возрастает вероятность увеличения твердости в зоне сплавления, растрескивания и отрыва наплавленного материала от основного вследствие разности коэффициентов линейного расширения наплавляемого и основного материала. Возможность сильного механического упрочнения в процессе наклепа определяет применение данных наплавочных материалов для деталей, работающих в условиях интенсивных ударно-динамических нагрузок, например бульдозерных зубьев, роликов дробильных установок, корпусов и конусов роторных дробилок.

Высокомарганцовистые хромистые аустенитные материалы содержат следующие элементы:

- 0,3 % углерода;
- 16 % марганца;
- 16 % хрома;
- около 1 % никеля.

Такой материал обеспечивает стабильное образование мартенситной структуры наплавленного слоя даже при наплавке на низкоуглеродистую сталь. Способность сохранения твердости HV 150–350 при высокой температуре позволяет применять данные наплавочные материалы для износостойкой наплавки инструмента для горячей резки, деталей, работающих под ударной нагрузкой в условиях высокой температуры.

Высокохромистые материалы на основе железа

Материал такого рода имеет структуру, состоящую из матрицы аустенита и мелкодисперсного карбида. В этой матрице располагаются игольчатые частицы карбида хрома, придающие наплавленному металлу высокую износостойкость (табл. 7). Твердость наплавленного материала не зависит ни от температуры нагрева металла в процессе наплавки, ни от скорости охлаждения после наплавки. При этом чувствительность наплавленного металла к образованию трещин требует проведения предварительного подогрева наплавливаемых изделий выше 300 °С и последующей термообработки непосредственно после наплавки. Также для предотвращения растрескивания применяется многослойная наплавка или наплавка подслоя из аустенитной стали. Материалы этой группы используют для износостойкой наплавки деталей, подвергающихся интенсивному абразивному износу твердыми частицами.

Таблица 7

Высокохромистые материалы на основе железа ESAB

Торговая марка	Состав, %				Структура наплавленного металла
	C	Mn	Si	Cr	
OK Tubrodur 55 O A	3,6	0,88	0,53	22,5	Аустенитная матрица с карбидами хрома

Быстрорежущие стали

Для изготовления рабочих частей режущего и штампового инструмента наиболее пригодной является наплавочная проволока ESAB OK Tubrodur 53 G M, которая обеспечивает получение наплавленного слоя со свойствами быстрорежущей стали. В состав данной газозащитной металлопорошковой проволоки входят 0,33 % углерода, 1,14 % марганца, 1,76 % хрома, 0,44 % молибдена, 0,4 % ванадия, 2,03 % кобальта и 8,17 % вольфрама. Вольфрам в составе быстрорежущей проволоки является основным легирующим элементом и обеспечивает сохранение твердости наплавленного металла. Добавление ванадия улучшает износостойкость инструмента, а содержание кобальта дополнительно повышает теплостойкость до 650 °С и вторичную твердость до 70 HRC. Применяется быстрорежущая проволока для наплавки рабочих поверхностей лезвий, ножиц, вырубных штампов для резки холодного и горячего металла, а также для горячей объемной штамповки. Наплавленный металл обладает

высокой стойкостью к абразивному износу, трению металл о металл и воздействию высоких температур.

Твердый сплав

Карбид вольфрама обеспечивает высокую стойкость к абразивному изнашиванию, а вязкая матрица связывает твердые частицы. Наплавленный металл состоит из эвтектики $W_2C + WC$, превышающей по твердости большинство других карбидов [4]. Карбид вольфрама как наплавочный материал используют для износостойкой наплавки различного режущего инструмента, а также изделий, подвергающихся интенсивному абразивному износу под действием умеренных нагрузок. Примеры наплавочных материалов на основе карбида вольфрама приведены в табл. 8 и 9.

Таблица 8

Наплавочные материалы на основе карбида вольфрама ESAB

Торговая марка	Описание
Stoody 130	Наплавленный металл содержит частицы карбида вольфрама, что обеспечивает высокую стойкость к абразивному износу
Stoody 140	Наплавленный металл содержит твердые частицы карбида вольфрама в никель-хромовой бор матрицу. Обеспечивает высокую прочность и стойкость к коррозии
Stoody 155 FC	Наплавленный металл содержит твердые частицы карбида вольфрама в никелево-кремниевой бор матрице. За счет сниженного содержания карбида вольфрама обеспечивается высокая вязкость наплавленного материала. Используется для многослойной наплавки
Stoody 160	Наплавленный металл содержит твердые частицы карбида вольфрама в никелево-кремниевой бор матрице. Обеспечивает высокую прочность и стойкость к коррозии, эрозии мелкими твердыми частицами

Таблица 9

Наплавочные материалы на основе карбида вольфрама Carbo Weld

Carbo Weld	Состав, %		Твердость наплавленного металла, HV	
	Fe-Matrix	WSC	Fe-Matrix	WSC
Carbo F-Durit	40	60	66	2360
	NiSiB-Matrix	WSC	NiSiB-Matrix	WSC
Carbo F-Durit Ni	45	55	450-480	2360

Стеллит

Стеллит представляет собой сплав на основе кобальта и хрома, который при температуре 800–900 °С имеет область структурных превращений α - β , протекающих с низкой скоростью и позволяющих

получать высокостабильные сплавы при повышенных температурах. Данный материал содержит 0,5–3% углерода, 40–60 % кобальта, 25–33 % хрома и 3–17 % вольфрама. При повышении содержания углерода в сплаве возрастает твердость, снижается пластичность и зернистость эвтектики. Стеллит обладает высокой жаропрочностью, износо- и коррозионно-стойкостью и применяется при упрочнении ножей, деталей двигателей внутреннего сгорания и других изделий, работающих в условиях высокотемпературного нагрева. Примеры наплавочных материалов на основе кобальта приведены в табл. 10.

Таблица 10

Наплавочные материалы на основе кобальта Carbo Weld

Carbo Weld	Состав, %							Твердость наплавленного металла
	C	Si	Mn	Cr	Co	W	Fe	
Carbo F-S 1	2,4	0,7	0,4	30,0	Basis	11,0	<3,0	55 HRC
Carbo F-S 6	1,1	1,0	0,6	28,0	Basis	4,5	<5	42 HRC
Carbo F-S 6 L	0,8	0,9	0,6	28,0	Basis	4,5	<3	39 HRC
Carbo F-S 6 H	1,1	1,0	0,6	28,0	Basis	4,5	<5	42 HRC
Carbo F-S 12	1,4	0,8	0,1	29,0	Basis	8,0	<2,5	47 HRC
Carbo F-S 21	0,3	0,9	1,0	28,0	Basis	–	3,0	30 HRC
Carbo F-S 25	0,1	0,9	1,0	20,0	Basis	15,0	3,0	285 HB

Заключение

Наплавка проволочными материалами обеспечивает высокую производительность изготовления различных инструментов и позволяет получать наплавленный металл с необходимыми структурой и свойствами под конкретные условия работы инструмента [5]. Например, для изготовления режущего и штампового инструмента, работающего в условиях интенсивного трения и при высоких температурах, наиболее пригодным является использование в качестве наплавочной проволоки материала, обеспечивающего получение наплавленного слоя со свойствами быстрорежущей стали.

Для повышения стойкости рабочей поверхности инструмента к абразивному износу при условиях низкого воздействия ударных нагрузок рекомендуется применять материалы, образующие мартенситную структуру наплавленного металла. Добавление в состав мартенситных наплавочных материалов хрома при низком содержании углерода обеспечивает высокую жаропрочность и коррозионную стойкость, при этом увеличение количества углерода значительно повышает износо-стойкость наплавленного металла и применяется для упрочнения изделий из инструментальных сталей.

Изделия, работающие в условиях интенсивных ударно-динамических нагрузок, рекомендуется наплавлять материалами, имеющими аустенитно-высокомарганцовистую структуру. Для обеспечения работоспособности деталей, испытывающих ударные нагрузки при высоких температурах, используются высокомарганцовистые хромистые аустенитные материалы.

Наплавочные материалы, образующие твердый сплав в наплавленном металле, применяют для износостойкой наплавки различного режущего инструмента, а также изделий, подвергающихся интенсивному абразивному износу под действием умеренных нагрузок. Для обеспечения сочетания жаропрочности, высокой износо- и коррозионностойкости наиболее эффективным будет применение наплавочных материалов, представляющих собой сплав на основе кобальта и хрома – стеллит.

Библиографический список

1. Carbo Weld [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://carbo-weld.ru/> (дата обращения: 24.02.2021).
2. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление / пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
3. Esab [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.esab.ru/ru/ru/index.cfm> (дата обращения: 24.02.2021).
4. Жудра А.П. Наплавочные материалы на основе карбидов вольфрама // Автоматическая сварка. 2014. № 6-7. С. 69–74.
5. Коротков В.А. Ремонтная сварка и наплавка: учеб.-метод. пособие. М.: Директ-Медиа, 2014. 57 с.

УДК 621.315

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова
Тверской государственной технической университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2021

Исследованы основные характеристики композиционных электроконтактных материалов, полученных пропиткой пористой матрицы из тугоплавких металлов легкоплавким сплавом. Матрица изготовлялась методами порошковой металлургии из порошков вольфрама и молибдена. Легкоплавкий компонент представляет собой эвтектический сплав состава GaInSnZn. Показано, что пропитка легкоплавким наполнителем снижает удельное электросопротивление и повышает электроэрозионную износостойкость материала.

Ключевые слова: электроконтактный материал, тугоплавкая матрица, легкоплавкий наполнитель, удельное электросопротивление, электроэрозионная износостойкость.

RESEARCH OF ELECTRIC CONTACT CHARACTERISTICS OF COMPOSITE LIQUID-METAL MATERIALS

The main characteristics of composite electrocontact materials obtained by impregnating a porous matrix of high-melting metals with a low-melting alloy are investigated. The matrix was manufactured by powder metallurgy methods from tungsten and molybdenum powders. The low-melting component is GaInSnZn eutectic alloy. It is shown that impregnation with a low-melting filler reduces the electrical resistivity and increases the electroerosive wear resistance of the material.

Keywords: electrical contact material, high-melting matrix, low-melting filler, electrical resistivity, electroerosive wear resistance.

Электрические контакты различного назначения – неотъемлемые элементы практически любой электрической цепи. Их надежность является залогом безотказной работы многих сложных и ответственных технических систем, поэтому обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик электроконтактных соединений – одна из важнейших проблем энергетического машино- и приборостроения.

Есть несколько способов решения проблемы надежности электроконтактных соединений, одним из которых является использование материалов с оптимальными свойствами. В этом плане перспективными представляются композиционные материалы, получаемые методами порошковой металлургии. Требуемые электроконтактные свойства таких материалов достигаются за счет использования матрицы, обеспечивающей например, необходимые механические свойства, и функциональных наполнителей. В зависимости от назначения контактного соединения (скользящие, разрывные контакты и т. д.) функциональный наполнитель может обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения, высокую механическую и электроэрозионную износостойкость, высокую электропроводность, низкую свариваемость и т. п.

В качестве функциональных наполнителей во многих случаях хорошо зарекомендовали себя жидкометаллические сплавы на основе легкоплавких металлов – галлия Ga, индия In, олова Sn, свинца Pb, цинка Zn. Композиционный материал в этом случае получают пропиткой пористой матрицы жидкометаллическим сплавом.

Цель данной работы – исследование влияния жидкометаллического наполнителя на электроконтактные характеристики композиционного жидкометаллического материала.

Материалы и методы. Известен критерий электроэрозионной стойкости материалов [1] Pa , который можно записать в виде

$$Pa = T_{\text{пл}} \sqrt{\lambda c \gamma},$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления; λ – теплопроводность; c – удельная теплоемкость; γ – плотность.

По этому критерию вне конкуренции по электроэрозионной износостойкости оказывается вольфрам ($Pa \approx 65,4 \text{ МДж/с}^{0,5}\text{м}^2$), за ним идет молибден ($Pa \approx 42,6 \text{ МДж/с}^{0,5}\text{м}^2$), ему немного уступает медь ($Pa \approx 41,4 \text{ МДж/с}^{0,5}\text{м}^2$) [1]. На основании приведенных величин критерия Pa для изготовления пористой матрицы исследуемых электроконтактных материалов были выбраны порошковые вольфрам и молибден.

В качестве функционального наполнителя использовали эвтектический сплав из четырех компонентов GaInSnZn с температурой плавления $3 \text{ }^\circ\text{C}$ и удельным сопротивлением $34 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Образцы исследуемых материалов изготавливались из порошков тугоплавких металлов (вольфрама W или молибдена Mo) прессованием с последующим спеканием в виде таблеток диаметром 14 мм и толщиной 3–4 мм. После прессования и спекания таблетки пропитывали легкоплавким наполнителем. Некоторые технологические параметры изготовления образцов исследованных материалов приведены в таблице.

Технологические параметры изготовления образцов

Параметр	Вольфрам	Молибден
Давление прессования, МПа	152–645	197–669
Температура спекания, $^\circ\text{C}$	1 180 ($\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$)	1 050 ($\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
Время спекания, мин	60	
Температура пропитки, $^\circ\text{C}$	1 000 ($\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$)	
Время пропитки, мин	60	
Среда спекания, пропитки	Вакуум ($10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$)	

Испытания на электроэрозионное изнашивание проводили на установке, описанной в патенте [2]. Там же описана методика испытаний. В качестве контробразца использовали вольфрамовый зонд диаметром 1 мм. Для гашения вибрации контактов используется специальный фрикционный демпфер, гасящий энергию колебаний за счет трения. Нагрузка на контакт вольфрамового зонда с образцом равнялась 0,5 Н и прикладывалась с помощью разновесов.

Результаты и их обсуждение. Одной из основных характеристик электроконтактного материала, как и всякого электротехнического материала, является его удельное сопротивление. На рис. 1 представлены зависимости удельного сопротивления композиционных материалов на основе молибдена и вольфрама от пористости твердометаллической фазы (эту пористость после пропитки заполняет жидкометаллический наполнитель).

Пропитка пористой матрицы жидкометаллическим наполнителем существенно уменьшает удельное сопротивление материала – примерно в 1,5–2 раза (в зависимости от пористости). Рис. 2 иллюстрирует влияние пропитки на удельное электросопротивление композиционного материала на примере вольфрамовой матрицы.

Сравнение электроэрозионной износостойкости исследованных образцов представлено на рис. 3. Износостойкость вольфрамовых образцов ожидаемо оказалась несколько выше, чем молибденовых. Пропитка жидкометаллическим наполнителем немного увеличила износостойкость образцов с молибденовой матрицей, при этом износостойкость образцов с вольфрамовой матрицей практически не изменилась.

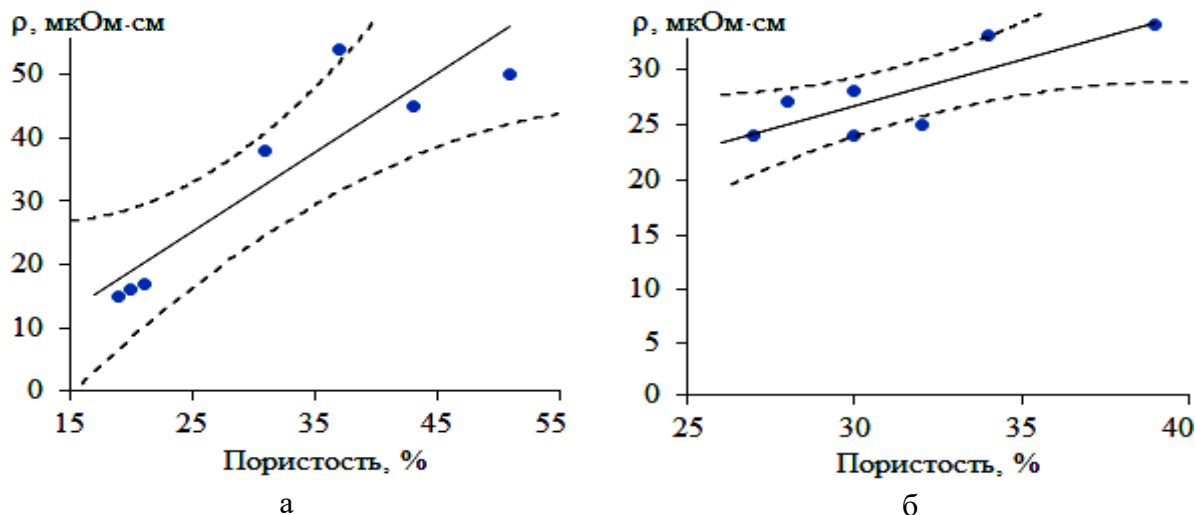


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления композиционного жидкометаллического материала от пористости твердой фазы:
 а – молибденовая матрица; б – вольфрамовая матрица;
 точки – экспериментальные результаты;
 сплошная линия – корреляционные зависимости;
 пунктир – границы доверительного интервала

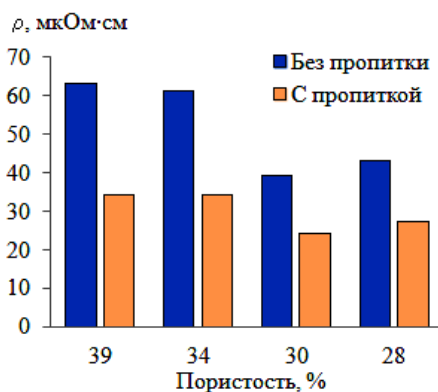


Рис. 2. Влияние пропитки на удельное сопротивление образцов с вольфрамовой матрицей

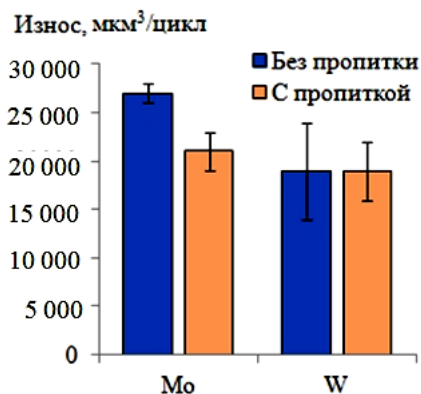


Рис. 3. Электроэрозионный износ жидкометаллических материалов: Мо и W – материалы матрицы

Заключение. Предварительные исследования показали, что жидкометаллический наполнитель существенно снижает удельное сопротивление композиционного электроконтактного материала, полученного пропиткой пористой матрицы из тугоплавкого металла легкоплавким

сплавом. Электроэрозионная износостойкость повышается в результате пропитки у исследованных образцов из молибдена и практически не изменяется у образцов из вольфрама. Полученные результаты не следует рассматривать как окончательные. Исследования следует продолжить в свете как поиска оптимального состава электроконтактного материала, так и оптимизации технологических режимов его изготовления.

Библиографический список

1. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г.В. Буткевич [и др.] М.: Энергия, 1978. 256 с.
2. Способ оценки электроэрозионной износостойкости материалов для электрических контактов: пат. 2265862 Рос. Федерация. № 2004110321/28 / Измайлов В.В., Новоселова М.В.; заявл. 05.04.2004; опубл. 10.12.2005, Бюл. 34. 6 с.

УДК 531

П.А. Яконовский¹, Т.Б. Яконовская²

¹ООО «МИКС», филиал TGT «Oil and Gas Services»

²Тверской государственный технический университет

ПРОБЛЕМЫ ФРИКЦИОННОГО ИЗНОСА МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБ ОБСАДНЫХ КОЛОНН

© Яконовский П.А., Яконовская Т.Б., 2021

Проведены исследования работоспособности рессорных мультисенсорных геофизических приборов в трубах обсадных колонн. Представлены сравнительные результаты фрикционного износа рессорной части геофизических приборов из бронзы БрБ2 и титана VT-20. Рассмотрены варианты взаимодействия рессор с трубой в среде бурового раствора на водной основе и в воздушной среде.

Ключевые слова: фрикционный износ, рессоры, мультисенсорные геофизические приборы, скважина, бронза БрБ2, титан VT-20.

PROBLEMS OF FRICTIONAL WEAR OF MULTISENSOR GEOPHYSICAL INSTRUMENTS FOR CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF CASING COLUMN PIPES

The research of the operability of spring multisensor geophysical instruments in the casing pipes has been carried out. Comparative results of frictional wear of the spring part of geophysical instruments made of bronze BrB2 and Titan VT-20 are presented. Variants of interaction of springs with a pipe in a water-based mud and in an air environment are considered.

Keywords: frictional wear, springs, multisensor geophysical instruments, well, BrB2 bronze, VT-20 titanium.

Проблема изучения технического состояния скважин в значительной степени определяется возможностями используемых для этой цели геофизических приборов и технологий. Для повышения информативности и разрешающей способности измерений ведущими зарубежными компаниями в настоящее время разрабатываются и совершенствуются мультисенсорные приборы с большим количеством радиально расположенных датчиков. Такая аппаратура обеспечивает обнаружение мелких дефектов, включая идентификацию отдельных перфорационных отверстий и других нарушений аналогичных размеров, выявление радиальных неоднородностей цементного камня и каналов, влияющих на герметичность заколонного пространства и т. д.

Наиболее предпочтительны приборы компании Sondex (рис. 1) для изучения технического состояния скважин и выявления дефектов в обсадных трубах. Общим в конструкции мультисенсорных приборов является то, что система измерительных элементов (датчиков) расположена на рессорах для прижима к внутренней поверхности труб обсадных колонн.

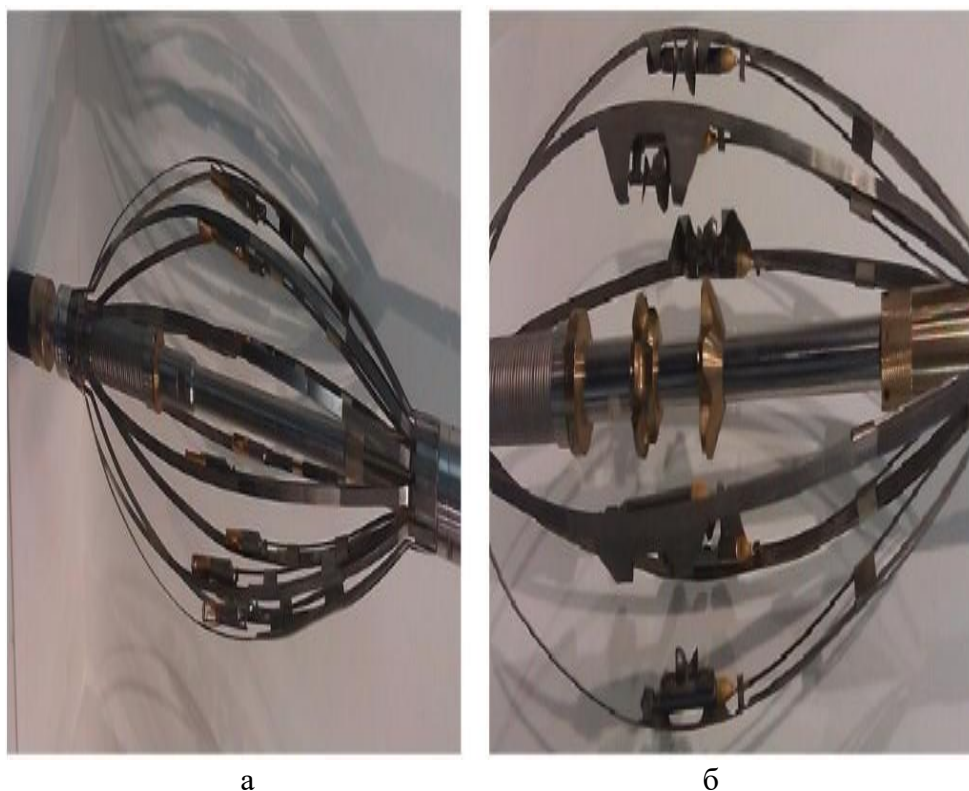


Рис. 1. Приборы Sondex: а – скважинный влагомер; б – скважинный расходомер

Очень часто рессорная конструкция дополнительно снабжена рычажным устройством, которое обеспечивает дополнительное прижимное усилие и, как следствие, максимально близкое расположение датчиков к внутренней поверхности обсадных труб, а также выполнение

условия параллельности осей датчиков и исследуемых труб, что важно в приборах (магнитно-импульсной дефектоскопии и расходомерах). При эксплуатации приборов между рессорами и внутренней поверхностью обсадной трубы возникает сила трения – скольжения, по характеру фрикционного взаимодействия трение является граничным, так как в области контакта содержатся парафиновые отложения, оксидные пленки, буровой раствор на водной или нефтяной основе. При этом наиболее изнашиваемый узел приборов – рессоры, поломка которых приводит к аварийным ситуациям в скважине. Работа по созданию мультисенсорного магнитно-импульсного дефектоскопа [1] выполнена в ООО «МИКС» (компания-резидент технопарка «Сколково»). Прибор представляет собой систему измерительных элементов (датчиков), расположенных на рессорах (рис. 2).

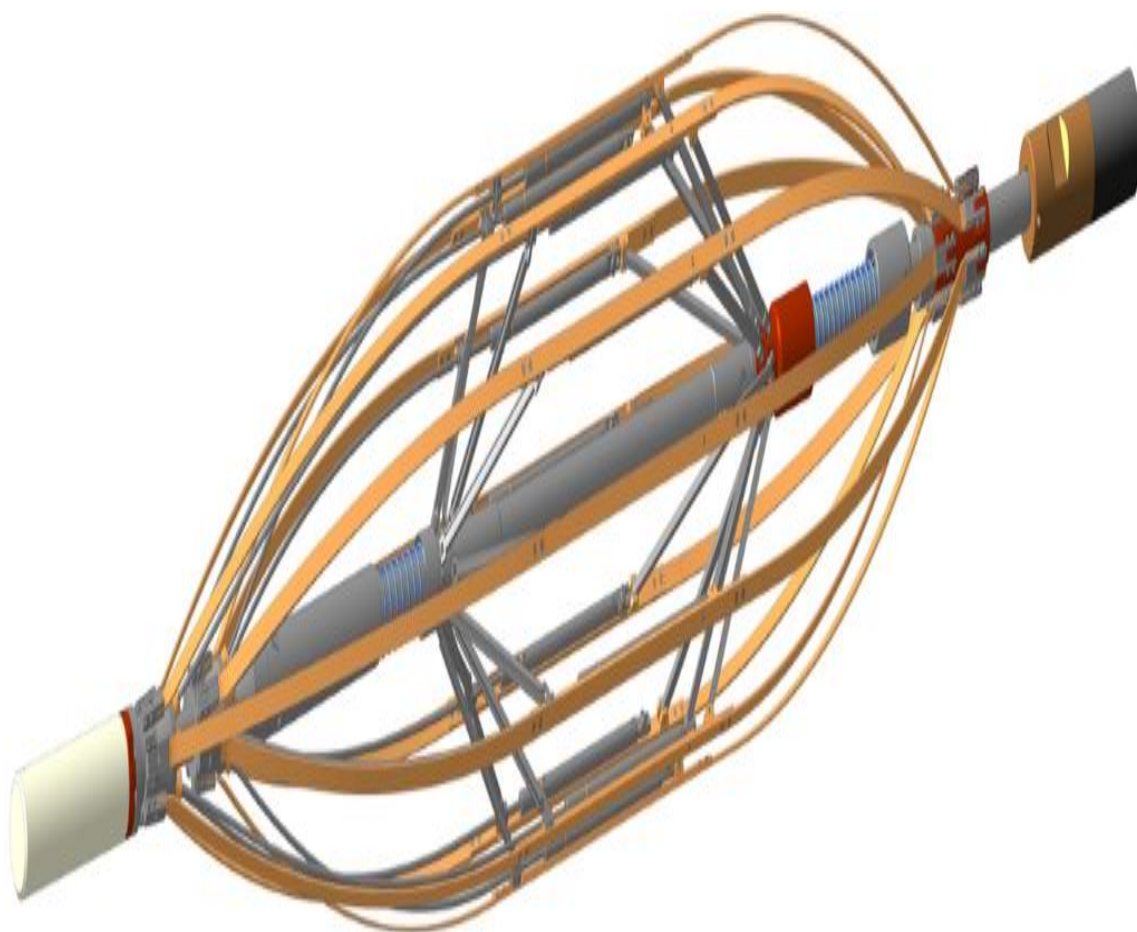


Рис. 2. Мультисенсорный магнитно-импульсный дефектоскоп рессорного типа

В качестве материала рессор использованы титан ВТ-20 в состоянии поставки и бериллиевая бронза БрБ2, подвергнутая закалке при температуре 800 °С и последующему старению при температуре 315 °С в течение 4 ч.

Выбор материала обусловлен высокими прочностными и упругими свойствами в сочетании с низкой магнитной проницаемостью. Последнее требование является важным для аппаратурной реализации данного геофизического метода исследований. Также выбор материала обусловлен и успешным опытом эксплуатации устройства [2] в сложных геологических условиях, в скважинах с высоким содержанием сероводорода, однако взаимодействовали детали из бериллиевой бронзы БрБ2 и титана ВТ-20 не с металлической колонной, а с боковыми стенками необсаженного ствола скважины. В табл. 1 представлены основные параметры рессор.

Таблица 1

Параметры рессор

Материал	Модуль упругости E, ГПа	Предел прочности σ_b , МПа	Плотность, г/см ³	Магнитная проницаемость μ
Бронза БрБ2 (термообработка: закалка старение)	130	900	8,2	$\leq 1,01$
Титан ВТ-20	112	1 050	4,45	$\leq 1,01$

Исследования износа рессор прибора проводились в испытательной скважине при постоянной скорости 50 мм/с, материал контртела (обсадной трубы) – сталь 40ХГМА. Можно условно принять, что испытания осуществлялись по схеме «диск – палец», при этом скважина была заполнена буровым раствором на водной основе, усилие прижатия рессоры к стенке обсадной трубы 25 Н. Рабочая часть рессоры представляла собой прямоугольную пластину, толщина которой 2 мм, ширина 10 мм, длина 100 мм. Оценка интенсивности изнашивания проводилась по потере массы рабочей части рессоры за одну и ту же длину проходки прибора в скважине. В табл. 2 представлены результаты сравнительного исследования износа рессор, в табл. 3 – результаты исследования износа рессор из бронзы БрБ2 в обсадной трубе.

Таблица 2

Результаты сравнительного исследования износа рессор из бронзы БрБ2 и титана ВТ-20

Материал	Длина проходки в скважине, км	Масса рабочей части рессоры, г		
		Исходная	После трения	Δm
Бериллиевая бронза БрБ2	5	16,4	15,7	0,7
	10		14,3	2,1
	15		12,2	4,2
Титан ВТ-20	5	8,9	7,4	1,5
	10		5,6	3,3
	15		3,6	5,3

Результаты исследования износа рессор из бронзы БрБ2
в обсадной трубе (воздушная среда)

Длина проходки в скважине, км	Масса рабочей части рессоры, г		
	Исходная	После трения	Δm
5	16,4	15,5	0,9
10		14,0	2,4
15		11,5	4,9

В процессе испытаний рессоры из титана ВТ-20 показали неудовлетворительный результат: потеря массы составила более 50 %; потеря работоспособности прибора наступила после 10 км проходки в скважине. Рессоры из бронзы БрБ2 обеспечили ресурс проходки прибора в скважине, заявляемый зарубежными аналогами. Другое испытание проводилось без бурового раствора (в воздушной среде), и только с рессорами из бронзы БрБ2 (рис. 3, 4) прочие условия испытаний соответствуют предыдущему эксперименту.



Рис. 3. Исследование износа рессор прибора в воздушной среде



Рис. 4. Схема взаимодействия рессор с обсадной трубой

Анализируя результаты экспериментов взаимодействия рессор прибора с обсадной трубой в воздушной среде, можно сделать вывод, что износ рессор сопоставим с результатами в испытательной скважине, где имеется буровой раствор на водной основе. Механизм износа бронзы БрБ2 в воздушной среде носит характер адгезионного, изнашивание образца происходит путем отделения крупных частиц износа в результате адгезионного взаимодействия с контртелом, присутствие в структуре состаренной бронзы твердых частиц снижает сопротивление деформационному упрочнению в процессе изнашивания [3, 4].

Для повышения износостойкости и увеличения ресурса работы прибора предполагается рассмотреть способы модификации поверхности рессор методами электроискрового легирования. Для понимания причин и процессов фрикционного [5] износа предусмотрено проведение триботехнических испытаний рессор на триботестере и металлографическое исследование с помощью конфокальной микроскопии.

Библиографический список

1. Method and device for multi-sensor electromagnetic defectoscopy of well casings: pat. US9983173 / Artur Mihailovich Aslanyan A.M., Davydov D.A., Arbuzov A.A., Pestov A.N., Klimochkin A.V., Yakonovskiy P.A., Dolomanov V.S.
2. Зонд для электрического каротажа: пат. 2352962 Рос. Федерация / Шпынев В.М., Яконовский П.А., Яконовская Т.Б.; заявл. 03.12.2007, опубл. 20.04.2009
3. Влияние микроструктуры на износостойкость бериллиевой бронзы / О.В. Сизова [и др.] // Международный междисциплинарный симпозиум «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций»:

тезисы докладов International Workshop, Международной конференции и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания Института химии нефти. Томск: ТГУ, 2019. С. 127–128.

4. Коршунов Л.Г., Корзников А.В., Черненко Н.Л. Влияние интенсивности пластической деформации и температуры старения на упрочнение, структуру и износостойкость бериллиевой бронзы // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 111. № 4. С. 413–420.

5. Болотов А.Н. Механизм фрикционного разрушения поверхностей в магнитном поле // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 2 (6). С. 14–20.

УДК 621.891

О.В. Сутягин¹, А.А. Рачишкин², Д.А. Груздков²

¹Научно-инновационный центр
эксплуатационной надежности механических систем
²Тверской государственной технической университет

УСТАНОВКА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ТС-2

© Сутягин О.В., Рачишкин А.А.,
Груздков Д.А., 2021

В статье рассматриваются виды лабораторных триботехнических испытаний, общий регламент их проведения и анализируемые результаты. Описывается зарубежное испытательное оборудование, для которого разработан аналог.

Ключевые слова: режимы испытаний, испытательное оборудование, разработка триботестера ТС-2.

LABORATORY BENCH FOR TRIBOTECHNICAL TESTS TS-2

The article describes the types of laboratory tribotechnical tests, general regulations for experimentation, processed results and existing test equipment. Everything mentioned was used to develop and build a laboratory bench performing identical tests and providing identical results.

Keywords: test modes, testing equipment, development of the tribotester.

Фрикционные характеристики материалов, смазок, твердосмазочных и износостойких покрытий чаще всего оценивают на стадии их лабораторных испытаний. От натуральных или эксплуатационных лабораторные триботехнические испытания отличаются идеализацией условий их проведения, точной регистрацией значений исследуемых величин, а также поддержанием в процессе экспериментов стабильных параметров режимов испытаний и окружающей среды. В результате получают данные по

коэффициенту трения, износу, ресурсу моделей трибосопряжений и их зависимостям от материалов и размеров образцов, формы и морфологии их поверхностей, режимов проведения испытаний и параметров окружающей среды. Актуальность лабораторных триботехнических испытаний подтверждается значительным количеством регламентирующих их методических рекомендаций и применяемого оборудования [1, 2].

Лабораторные триботехнические испытания можно разделить на три типа.

Первый – это сравнительные испытания, которые позволяют при идентичных методиках, образцах и оборудовании сравнивать характеристики триботехнических материалов. Данный тип испытаний также используется при технологическом контроле материалов, смазок и покрытий триботехнического назначения.

Второй – моделирующие испытания, которые в лабораторных условиях имитируют характер трения и износа, имеющий место при реальной эксплуатации. Этот тип испытаний позволяет установить критерии, которые являются основой для расчетов на трение и износ различных деталей [3].

Третий тип – это специализированные испытания, которые проводятся для экспериментального исследования каких-либо частных процессов, происходящих на фрикционном контакте (например, исследования молекулярной составляющей силы трения, температуры поверхностей при трении и т. д.).

Подчеркнем, что получаемые результаты зависят не только от применяемых схем трения [2], но и от конструкций используемых при этом триботестеров.

Моделирующие испытания имеют ряд специфических особенностей, накладывающих дополнительные требования как на технические характеристики применяемых триботестеров, так и на методику их проведения. Важно, чтобы в конструкции триботестера была предусмотрена компенсация перекосов образцов, возникающих из-за действующих нагрузок, неточностей его изготовления и сборки. При специальных требованиях прибор должен создавать повышенные контактные давления и условия проведения испытаний в широком диапазоне температур и в различных средах.

Сформулируем основные задачи проведения лабораторных моделирующих испытаний трибосопряжений: определение ресурса, несущей способности, температурной стойкости, установление оптимального скоростного режима эксплуатации, ускоренные испытания.

Ручное управление процессом испытаний снижает точность экспериментальных результатов и повышает трудозатраты на проведение исследований. Это определило потребность в компьютерном управлении

режимами испытаний и обработке регистрируемых значений измеряемых величин. Решение этой комплексной проблемы определяется не только разработкой алгоритмов работы компонентов триботестера, но и принятыми проектными решениями.

Одним из широко применяемых при моделирующих испытаниях тестеров является триботестер LFW-1 компании Falex [4]. Он используется при испытаниях жидких и пластичных смазок, твердосмазочных покрытий, триботехнических материалов, износостойких покрытий, смазочно-охлаждающих жидкостей в условиях трения скольжения. При его использовании могут проводиться испытания по шести стандартам ASTM. Возможны реализации схем трения:

- 1) «блок – кольцо»;
- 2) «цилиндр – кольцо»;
- 3) «колодка – кольцо»;
- 4) «сфера – кольцо».

Движение при испытаниях может быть однонаправленным, реверсивным и возвратно-качательным. Температура испытаний может задаваться в зависимости от температуры окружающей среды до 250 °С, нормальная нагрузка – до 590 кг. Максимально измеряемая сила трения достигает 114 кг. В качестве испытательных сред могут использоваться жидкости, жидкие взвеси, сухой атмосферный воздух, а также влажная атмосфера и режим герметичной камеры, реализующий легкий вакуум или избыточное давление. Имеются многочисленные опции. Для контроля и управления параметрами испытаний предлагается многофункциональное программное обеспечение. Основным недостатком данного прибора является высокая цена.

Для удешевления конструкции был разработан и изготовлен триботестер ТС-2 (рис. 1). Данная установка, несмотря на существенное отличие от LFW-1, в примененных технических решениях способна реализовать требования стандартов [5, 6].

В триботестере ТС-2 используется кольцевой образец, имеющий геометрические размеры, параметры микрогеометрии, материал и механические свойства, определенные в вышеперечисленных стандартах ASTM. Образец закреплен на шпинделе, имеющем прецизионные подшипники качения и приводящимся во вращение шаговым двигателем FL110STH201-8004B, управляемым с помощью контроллера OSM 88 RA. Также привод включает в себя оптический датчик, обеспечивающий контроль частоты вращения шпинделя и подсчет общего числа циклов при испытаниях. Управление приводом обеспечивает однонаправленное и реверсивное вращение, а также возвратно-вращательное движение кольцевого образца в широком диапазоне скоростей.

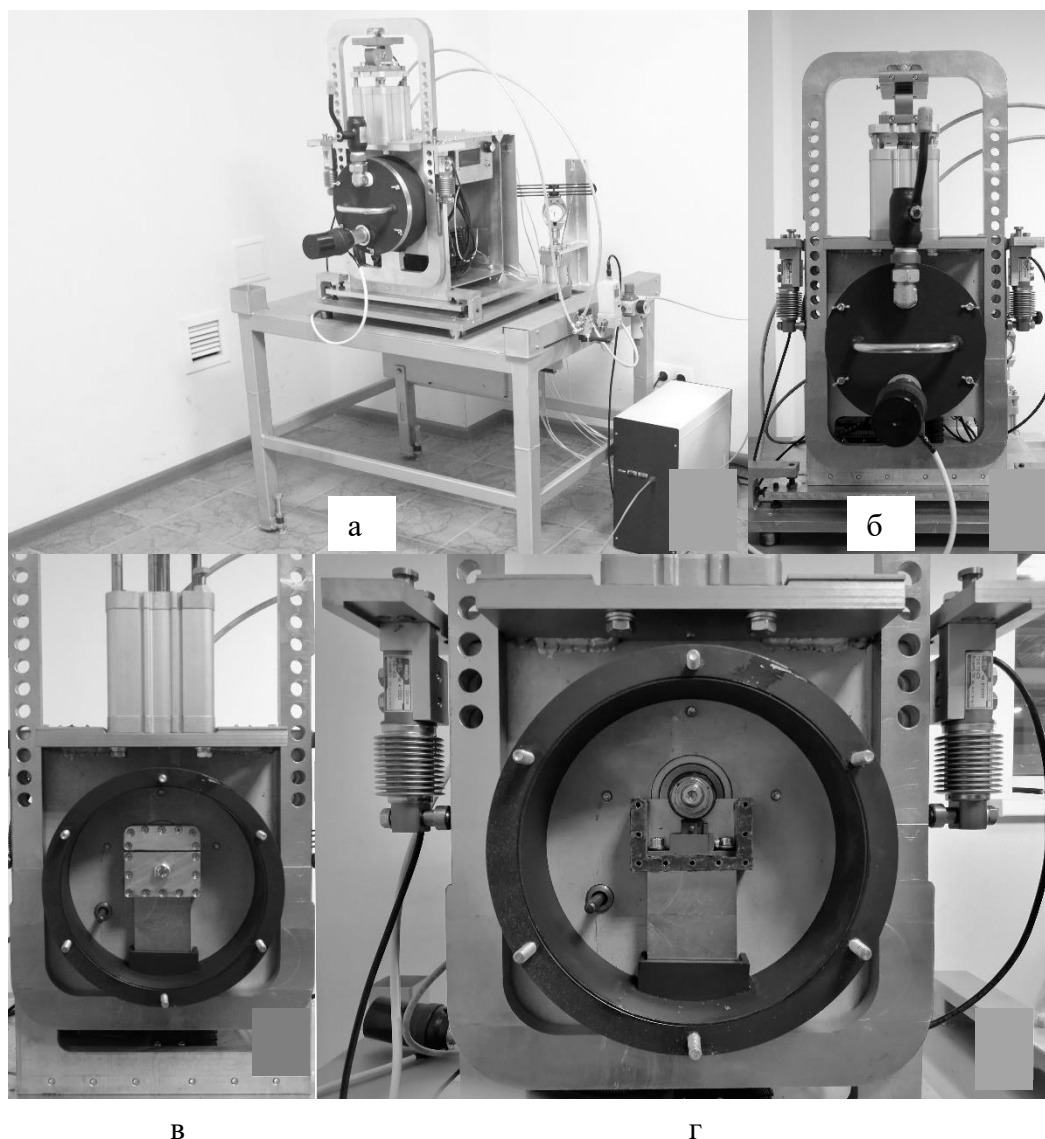


Рис. 1. Триботестер ТС-2:
 а – общий вид на комплекс ТС-2; б – триботехнический модуль с теплообменником;
 в – ванночка для испытательных сред; г – вид на образцы

Контробразец – блок – также имеет геометрические размеры, параметры микрогеометрии, материал и механические свойства, определенные этими стандартами ASTM. Создание нормальной нагрузки обеспечивается пневмоцилиндром модели 32R, с параллельными цилиндрическими направляющими, производства Camozzi Spa, а регулировка и поддержание давления – с помощью прецизионного электронного регулятора давления серии PRE, также выпускаемого Camozzi Spa. Для измерения нормальной нагрузки применен тензодатчик С2Н с наибольшим пределом измерения (500 кг) и классом точности С3, а для измерения сил трения – тензодатчики Т2 с наибольшим пределом измерения 100 кг, имеющие также класс точности С3 (производитель – весоизмерительная компания «Тензо-М»). Преобразование и обработка

сигналов с тензодатчиков осуществляются с помощью метрологической системы и программного обеспечения компании ZETLAB. Контробразец и кольцевой образец могут размещаться в ванночке для испытательных сред. В качестве этих сред могут использоваться масла, смазки, нефтепродукты, абразивные и агрессивные растворы. Кроме того, триботестер имеет теплообменник, в который может подаваться разогретый воздух или испаренный из жидкой фазы азот. Контроль температуры обеспечивается платиновым термометром сопротивления ТПТ-1 с последующей обработкой сигнала с помощью метрологической системы и программного обеспечения компании ZETLAB. Конструкция и технология изготовления деталей триботестера ТС-2 обеспечивает высокую точность ее сборки, минимальные биения и компенсацию перекосов образцов. Разработан комплект приспособлений и методика поверки измерительных систем ТС-2.

Для управления режимами испытаний и температурой окружающей среды применительно к использованным и описанным компонентам триботестера был реализован следующий алгоритм (рис. 2):

1. Определение ресурса. В процессе испытаний измеряется число циклов n_{turn} , при которых коэффициент трения не превышает допустимого значения.

2. Нахождение несущей способности. В процессе испытаний ступенчато увеличивается нагрузка – N . При этом на каждой ступени нагружения N_{step} триботестер совершает заданное количество циклов n_{turn} фрикционного взаимодействия. Степень нагружения, на которой коэффициент трения $f_{тр}$ при испытаниях превышает допустимое значение Val , определяет несущую способность модели трибосопряжения.

3. Определение температурной стойкости. В процессе испытаний ступенчато увеличивается температура окружающей среды T . При этом на каждой ступени увеличения температуры триботестер совершает заданное количество циклов n_{turn} фрикционного взаимодействия. Степень T_{step} увеличения температуры, на которой коэффициент трения при испытаниях превышает допустимое значение, определяет температурную стойкость.

4. Расчет оптимального скоростного режима эксплуатации. В процессе испытаний ступенчато (V_{step}) увеличивается относительная скорость перемещения поверхностей образцов V , при этом на каждой ступени триботестер совершает заданное количество циклов n_{turn} фрикционного взаимодействия. На основании анализа зависимости коэффициента трения от скорости даются рекомендации об оптимальном скоростном режиме эксплуатации трибоматериалов, нагрузке и температуре.

5. Ускоренные испытания. В процессе измеряется число циклов n_{turn} , при которых коэффициент трения не превышает допустимого значения при форсированных значениях режимов и параметров окружающей среды.

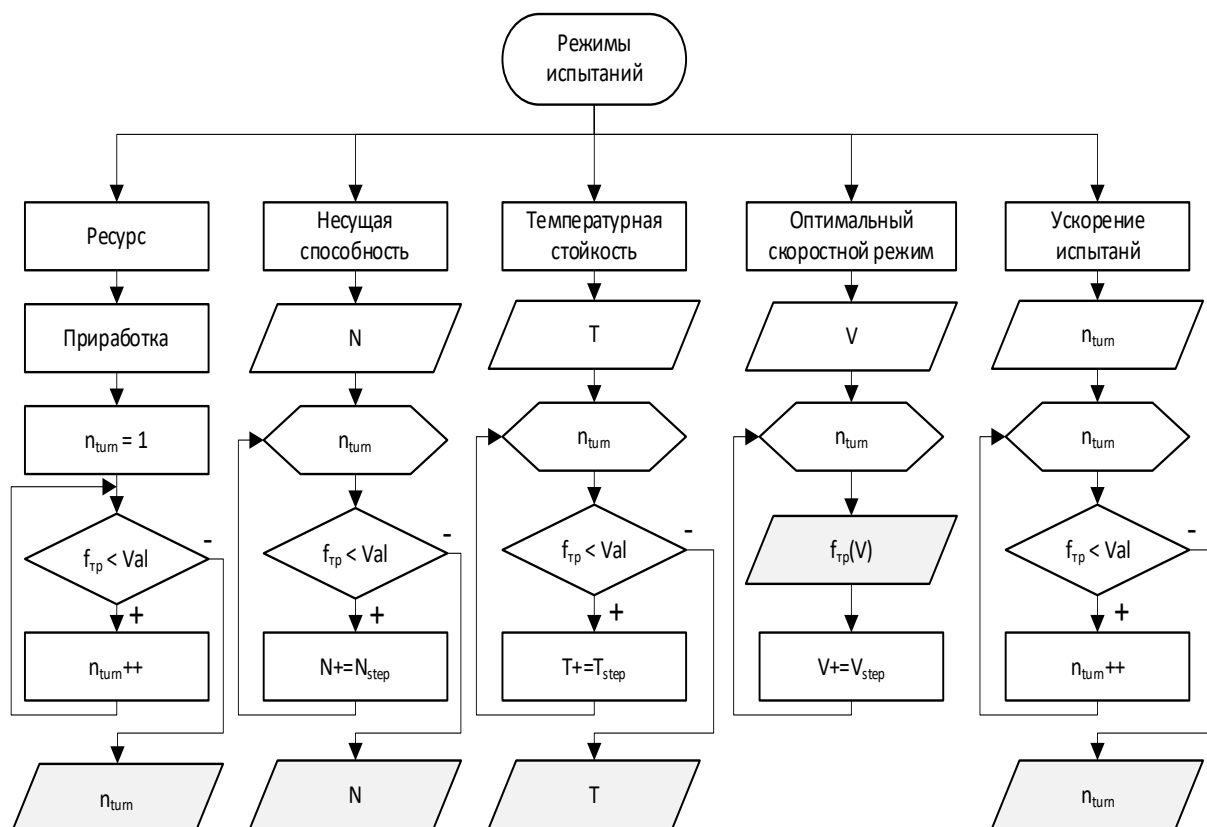


Рис. 2. Схема режимов испытаний

Совместно с ООО «Тверская механическая компания» изготовлен опытный образец триботестера ТС-2, прошедший лабораторные испытания.

Библиографический список

1. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.
2. Методы испытаний на трение и износ: справочное издание / Л.И. Куксенкова [и др.]. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 152 с.
3. Крагельский, И.В. Трение и износ. М.: МАШГИЗ, 1962. 383 с.
4. Falex Corporation [Electronic resource] – Access mode: <http://www.falex.com> (accessed date: 06.12.2020).
5. ASTM-D2714. Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine.
6. ASTM-G77. Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test.
7. Р 50-54-107-88. Методы оценки триботехнических свойств материалов и покрытий в вакууме: рекомендации. / И.В. Крагельский [и др.]. М.: Госстандарт СССР; ВНИИНМАШ, 1989. 33 с.

**ИЗМЕРЕНИЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СВЧ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ:
ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ
ПЕНОКЕРАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА**

© Князьков Р.А., Мишин А.Д.,
Мишина А.В., 2021

Представлено описание разработанного высокотемпературного квазиоптического СВЧ измерительного стенда. Продемонстрирована возможность измерения с его помощью радиофизических свойств композитных материалов на примере пенокерамического фильтра. Приведены результаты СВЧ-измерений диэлектрической проницаемости и коэффициента пропускания исследуемого материала в диапазоне от 6 до 16 ГГц при температуре от комнатной до 1 100 °С. Продемонстрирован бесконтактный метод оценки загрязнения и износа пенокерамического фильтра, а также нарушения его структуры в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: СВЧ-измерения, температурная зависимость, материальные параметры, диагностика износостойкости.

**QUASI-OPTICAL STUDY OF TEMPERATURE DEPENDENCE
OF MICROWAVE PERMITTIVITY: APPLICATION
FOR CONTACTLESS ANALYSIS**

A measurement system to study the temperature dependence of microwave properties of materials by a quasi-optical approach is presented. The effective permittivity of a foam ceramic filter is measured at various temperatures, from 30 to 1 100°C, in the frequency range of 6–16 GHz. A non-contact method for assessing the degree of pollution and degradation of a structure of a ceramic foam filter is demonstrated.

Keywords: microwave measurements, temperature dependence, material parameters, durability evaluation.

Из существующих экспериментальных методов исследования СВЧ-свойств материалов квазиоптический метод (или метод измерения в свободном пространстве) обладает рядом преимуществ, к которым можно отнести бесконтактный способ измерения, широкополосность в СВЧ-диапазоне, а также возможность нагрева образца до высоких температур в процессе СВЧ-измерения. Впервые подобный метод измерений при высоких температурах был предложен и реализован в работе [1]. Разработанный в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН высокотемпературный квазиоптический СВЧ-измерительный стенд (ВТ СВЧ-стенд) позволяет проводить измерения в СВЧ-диапазоне от 6 до 20 ГГц и при температурах нагрева исследуемого образца до 1 300 °С.

С помощью стенда проводятся измерения S-параметров листового образца (СВЧ-коэффициентов пропускания и отражения образца), и для некоторых материалов по результатам этих измерений возможно рассчитать методом Николсона – Росса [2] их эффективные материальные параметры, такие как диэлектрическую проницаемость при различных температурах нагрева и ее частотную дисперсию в измеряемом СВЧ-диапазоне.

Принципиальная схема ВТ СВЧ-стенда приведена на рис. 1. Стенд состоит из двух прямоугольных рупорных антенн, подключенных к векторному анализатору цепей при помощи фазостабильных коаксиальных кабелей. Для проведения измерений листовый образец помещается в радиопрозрачную печь, теплоизолированную от окружающего пространства. Размер внутреннего рабочего объема печи составляет 30×30 см по горизонтали и 7 см по вертикали (высота). Нагрев в рабочем объеме печи происходит в воздухе, что говорит о возможном протекании окислительных процессов при температурных измерениях. Нагревательные элементы (ТЭНы) расположены в виде спиралей по внутреннему периметру боковых стенок печи во избежание экранирования металлом радиопрозрачных элементов печи для проведения СВЧ-измерений. Температура образца в печи определяется по показаниям двух термопар, одна из которых расположена над центральной областью образца и предназначены для измерения температуры на его поверхности, а другая термопара – вблизи ТЭНов и служит для оценки неоднородности нагрева образца в печи. Для минимизации вносимых погрешностей в измеряемые величины термопары ориентированы в печи перпендикулярно вектору электрического поля падающей электромагнитной волны.

Более подробно устройство стенда, описание процесса измерений и обработки полученных сигналов отображены в работах [3, 4].

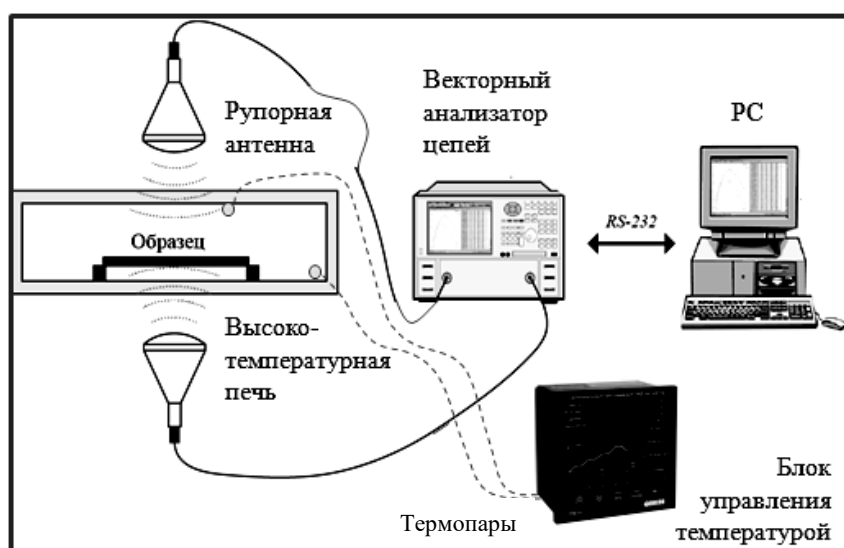


Рис. 1. Принципиальная схема разработанного стенда для измерения СВЧ-свойств материалов при высоких температурах нагрева

С помощью разработанного стенда можно проводить исследования радиофизических свойств разнообразных материалов, в том числе образцов из композитов. Примером подобного материала является промышленный пенокерамический фильтр, на примере которого продемонстрировано измерение зависимости коэффициента пропускания исследуемого образца от частоты в СВЧ-диапазоне от 6 до 16 ГГц при разных температурах нагрева (вплоть до 1 100 °С).

Объектом измерения являлся пенокерамический фильтр размером 10×10×2 см. Данные фильтры широко применяются при фильтрации расплавов металлов в процессе их промышленного литья. Технология их изготовления заключается в создании заготовки из пористого материала для последующей пропитки керамической пастообразной суспензией, которая затвердевает и образует пористую структуру в результате сушки и спекания заготовки [5]. Другим методом изготовления данных фильтров является приготовление суспензии из порошка кремния и сажи с добавлением порообразователя – вспененного полистирола, с последующей сушкой и инициацией реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [6]. Фотография исследуемого образца приведена на рис. 2.

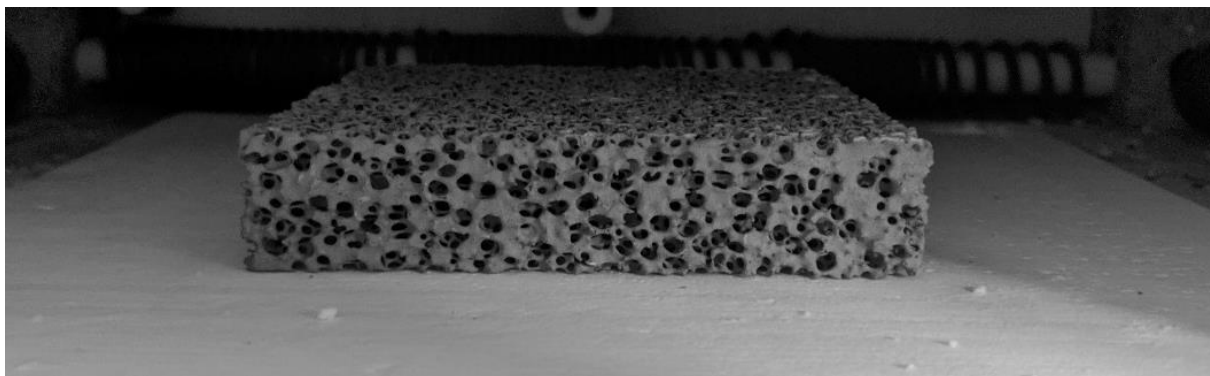


Рис. 2. Исследуемый образец пенокерамического фильтра в высокотемпературной печи перед началом измерений

Полученные результаты измерений частотной зависимости коэффициента пропускания исследуемого образца в СВЧ-диапазоне при температурах нагрева 30, 400, 700, 900 и 1 100 °С представлены на рис. 3.

Как видно из графика, по мере увеличения частоты наблюдается практически монотонное для всех измеренных температур уменьшение коэффициента пропускания образца. Значения коэффициента пропускания при 6 ГГц составляют –1,1 дБ и выше, а при 16 ГГц значения коэффициента пропускания находятся в диапазоне от –12,7 дБ (при 1 100°С) до –9 дБ (при 400 °С). Наблюдается немонотонная температурная зависимость коэффициента пропускания, характерная для

полупроводниковых материалов на основе SiC и выраженная в изменении радиофизических свойств SiC вблизи температуры 400 °С.

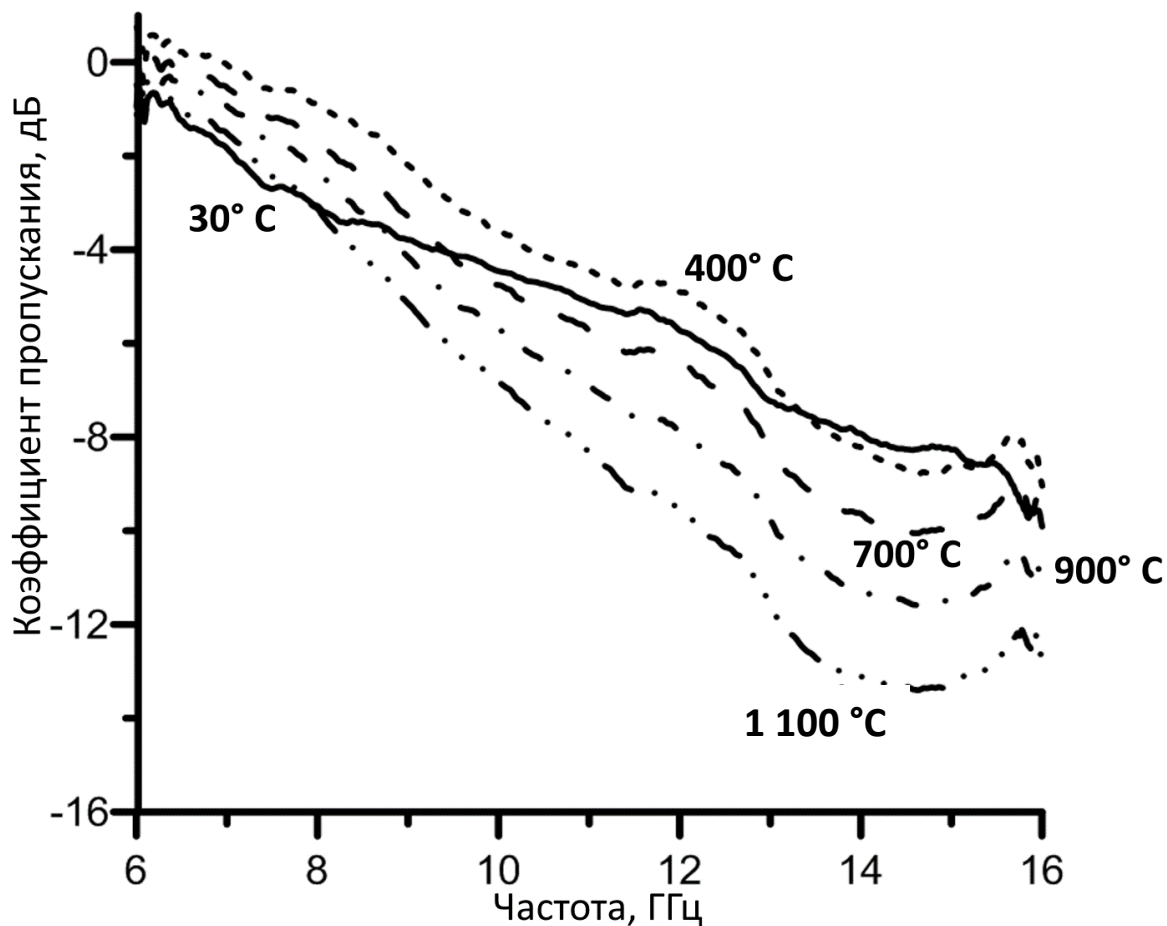


Рис. 3. Измеренная частотная зависимость коэффициента пропускания образца пеннокерамического фильтра при различных температурах

Описанные выше особенности температурной зависимости SiC около 400 °С приводят к тому, что наблюдаемая для исследуемого образца общая тенденция к падению коэффициента пропускания с ростом температуры нарушается в области соответствующих низких температур вследствие проявления вышеуказанного температурного эффекта. При дальнейшем повышении температуры уровень значений коэффициента пропускания постепенно снижается. Наибольшие различия в значениях коэффициента пропускания образца, вызванные изменением температуры, наблюдаются в области высоких частот. В области низких частот различия выражены менее заметно.

Из приведенного на рис. 4 графика можно заключить, что в процессе нагрева и остывания образец не был подвержен необратимым температурным изменениям. Изменения частотной зависимости коэффициента пропускания от температуры являются обратимыми и представляют собой температурную зависимость СВЧ-свойств материала

на основе SiC, из которого изготовлен исследуемый образец. Наблюдаемое незначительное расхождение измеренных данных при одинаковых температурах вызвано погрешностью измерений. Примеры результатов подобных измерений с их анализом были ранее опубликованы в работах [7, 8] для различных композитных материалов, в том числе со сложной внутренней структурой.

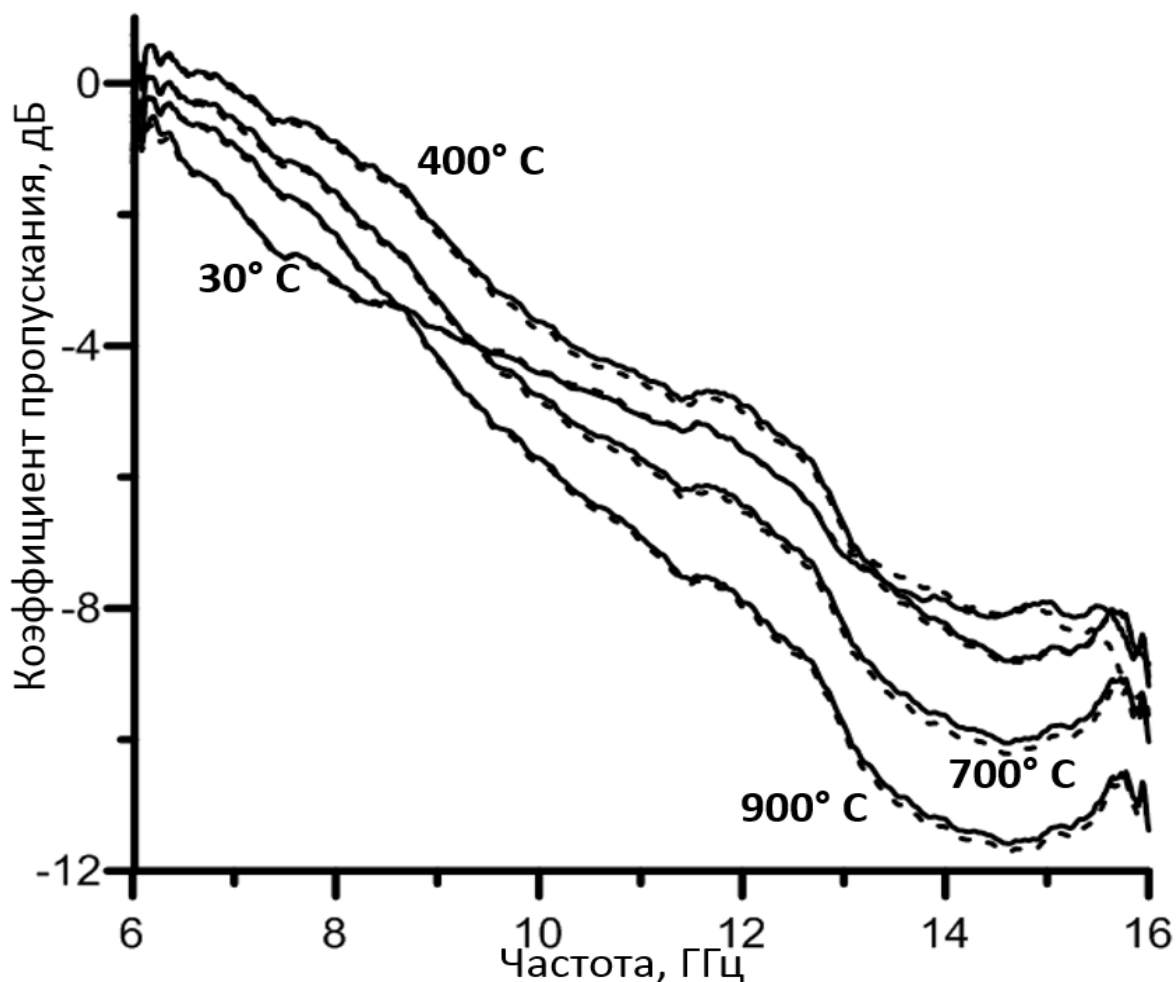
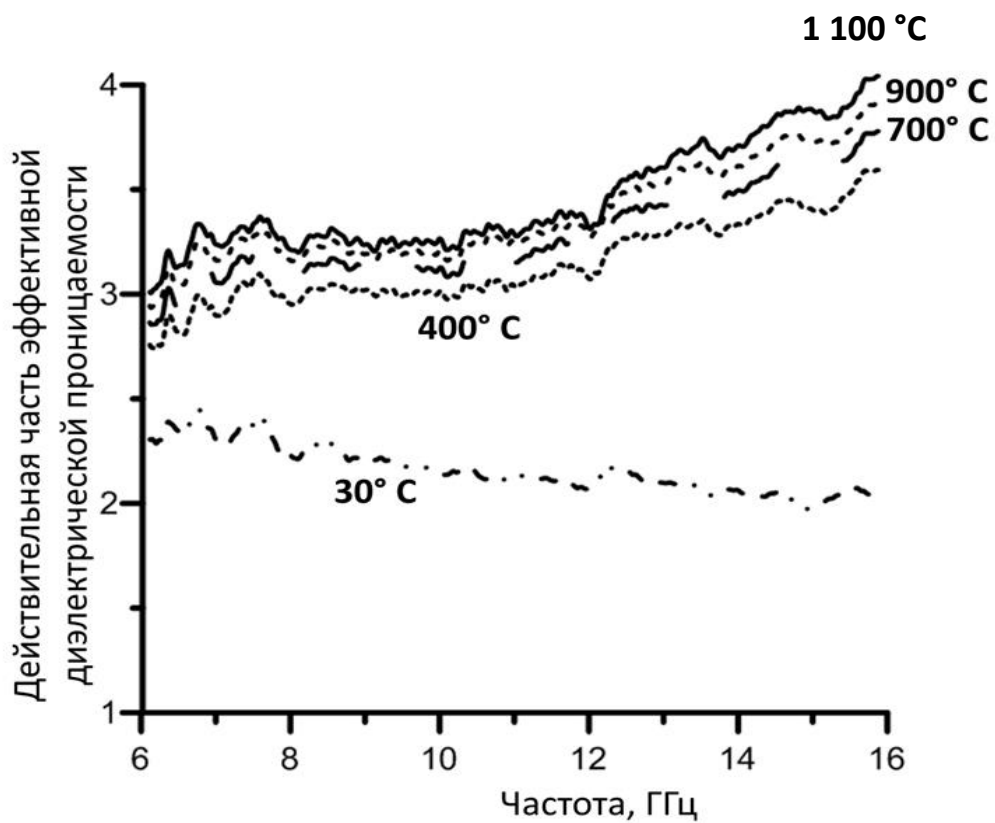
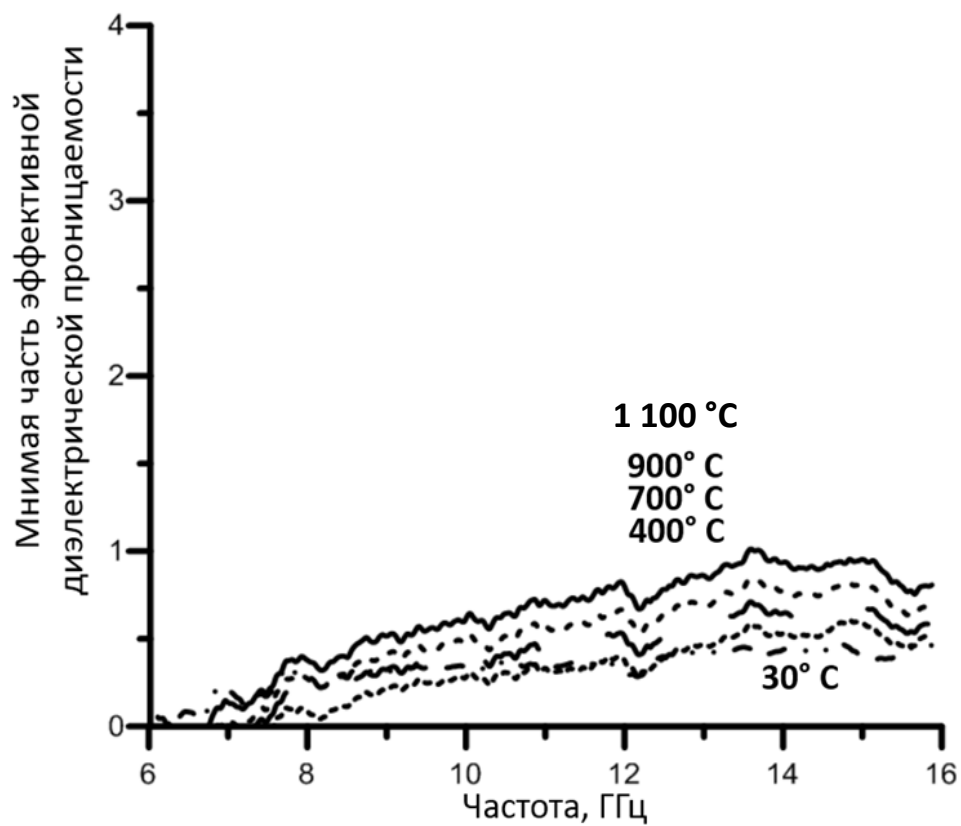


Рис. 4. Измеренные частотные зависимости коэффициента пропускания образца пенокерамического фильтра при различных температурах: сплошные кривые – при нагреве; пунктирные – остывании

По полученным комплексным значениям частотных зависимостей коэффициента пропускания исследуемого при различных температурах пенокерамического фильтра были рассчитаны соответствующие частотные зависимости эффективной диэлектрической проницаемости для исследуемого образца. Результаты расчетов частотных зависимостей вещественной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости исследуемого пенокерамического фильтра при различных температурах нагрева (30, 400, 700, 900 и 1 100 °С) приведены на рис. 5.



а



б

Рис. 5. Рассчитанная частотная зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей эффективной диэлектрической проницаемости образца пенокерамического фильтра при различных температурах нагрева

Величина действительной части эффективной диэлектрической проницаемости монотонно растет с повышением температуры, соответственно, на частоте 10 ГГц от 2,1 при 30 °С до 3 при 400 °С, до 3,3 при 1 100 °С. Мнимая часть в низкочастотной области немонотонно изменяется с температурой, что может быть связано с изменениями во внутренней структуре образца. Мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости значительно меньше вещественной во всем измеренном частотном диапазоне и тоже увеличивается: с ростом температуры на частоте 14 ГГц она составляет около 0,4 при 30 °С, около 0,5 при 400 °С и около 0,9 при 1 100 °С. Потери увеличиваются с ростом температур преимущественно в высокочастотной области измеряемого СВЧ-диапазона. С повышением температуры также заметнее проявляется зависимость частей диэлектрической проницаемости от частоты. Результаты приведенных расчетов находятся в соответствии с известными научными данными, например, для композитных и структурированных материалов на основе SiC, представленных в работах [9,10].

Далее представлена проверка возможности проведения с помощью ВТ СВЧ-стенда радиофизических измерений пенокерамического фильтра для оценки степени износа и загрязнения фильтра посторонними веществами и предметами, а также нарушения целостности структуры. Для этого сначала была оценена анизотропия свойств в плоскости образца. Анизотропия свойств образца проявляется в отличии коэффициентов пропускания при повороте образца. Влияние анизотропии представлено на рис. 6. Результат исследования, а именно сравнение СВЧ-дисперсии коэффициента пропускания исследуемого образца при углах поворота 0° и 90° в плоскости образца, приведен на рис. 6.

На графике наблюдается заметная анизотропия радиофизических свойств исследуемого образца, которая выражается в отклонении кривой частотной дисперсии коэффициента пропускания образца при его повороте в плоскости на 90° (пунктирная кривая) по сравнению с аналогичной кривой для угла поворота образца на 0°. Наблюдаемая анизотропия в плоскости образца проявляется сильнее в области высоких частот, увеличиваясь с разницы в 0,5 дБ на частоте 6 ГГц до разницы значений в 1,4 дБ на частоте 16 ГГц. Вероятнее всего, это связано с особенностями устройства внутренней структуры образца. На примере выявленной анизотропии показана возможность контроля радиофизическим методом изменений во внутренней структуре исследуемого образца.

Для проведения оценки степени износа фильтра и его загрязнения посторонними веществами и предметами были использованы песчано-бетонная крошка и различный металлический мусор, которые помещались соответственно внутрь образца и на его поверхность для имитации загрязнения фильтра в процессе его эксплуатации в промышленном литье

металлических расплавов. Фотография загрязненного образца приведена на рис. 7.

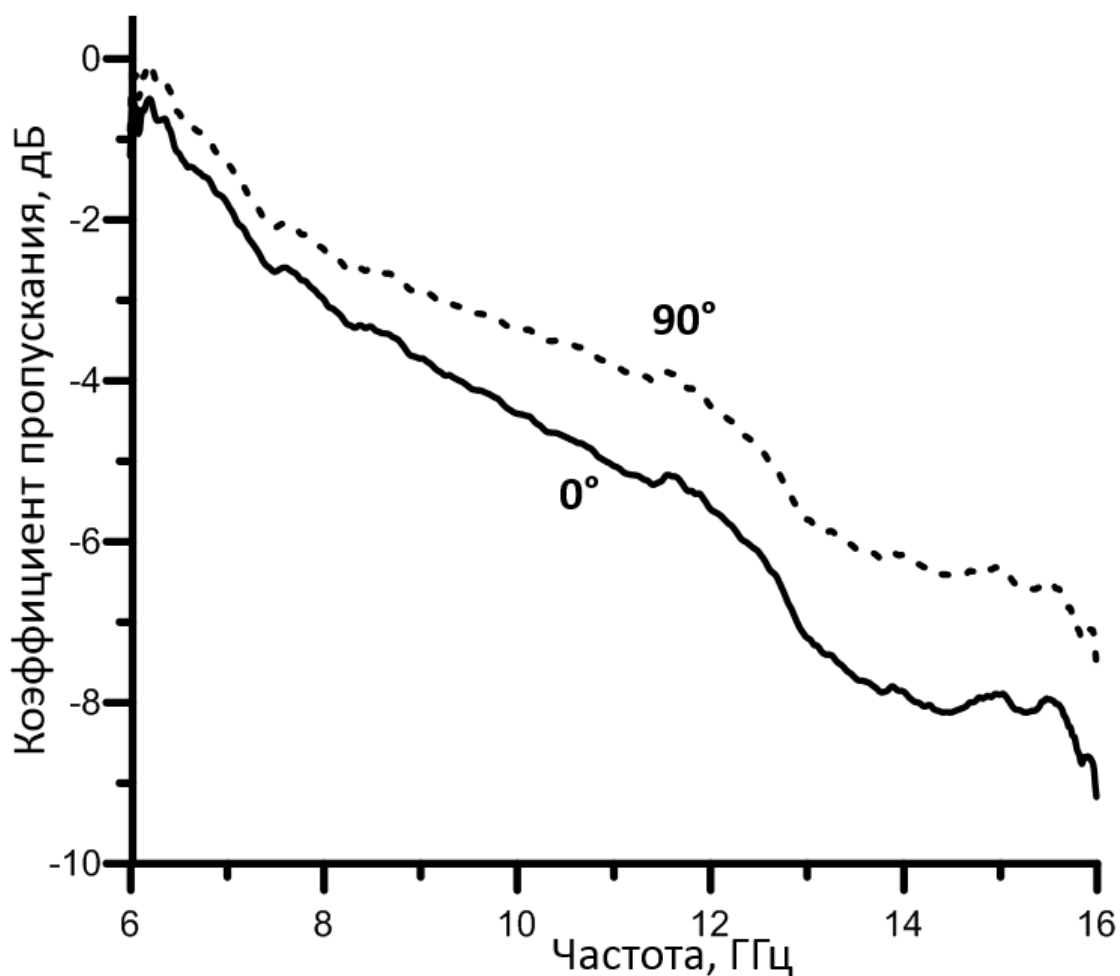


Рис. 6. Частотная зависимость СВЧ-коэффициента пропускания образца пенокерамического фильтра, измеренного при комнатной температуре: сплошная кривая – начальное положение образца; пунктирная кривая – поворот образца на 90° в плоскости образца относительно его начального положения



Рис. 7. Загрязненный пенокерамический фильтр

Сравнительные результаты СВЧ-измерений чистого фильтра и его загрязненной имитации представлены на рис. 8 в виде двух кривых частотной зависимости коэффициента пропускания исследуемого образца в СВЧ-диапазоне при комнатной температуре. Наблюдается заметное ухудшение коэффициента пропускания пенокерамического фильтра в измеряемом СВЧ-диапазоне, составившее снижение от 1,1 до 1,4 дБ для загрязненного фильтра (средние значения в сравнении с его чистым состоянием).

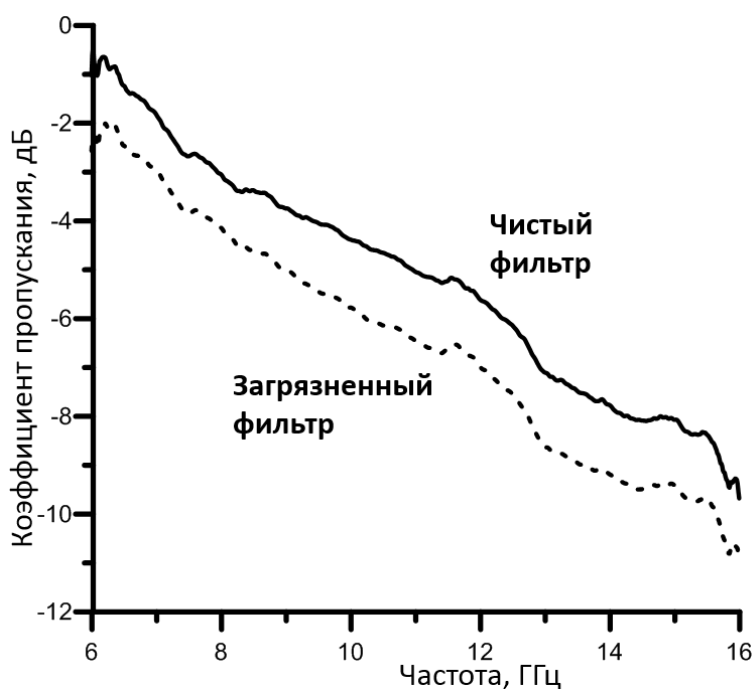


Рис. 8. Измеренная частотная зависимость коэффициента пропускания пенокерамического фильтра: сплошная кривая – чистый фильтр; пунктирная кривая – загрязненный фильтр с металлическим мусором на его поверхности

Проведенные измерения демонстрируют возможность оценивать бесконтактным радиофизическим методом степень загрязнения пенокерамического фильтра и его износа в процессе эксплуатации. Изменения внутренней структуры пенокерамического фильтра, в том числе уменьшение пористости за счет внешних загрязнений, можно определять по изменению эффективной диэлектрической проницаемости фильтра, виду температурной зависимости коэффициента пропускания при фиксированной частоте или изменению вида частотной зависимости коэффициента пропускания при заданной температуре. Возможность измерения анизотропии образцов дает дополнительные возможности контроля свойств изготавливаемых фильтров. Дополнительно установка позволяет оценивать термостойкость и температурную стабильность пенокерамических фильтров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-52-53020.

Библиографический список

1. Free-space, broadband measurements of high-temperature, complex dielectric properties at microwave frequencies / V.V. Varadan [at al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1991. Vol. 40. No. 5. Pp. 842–846.
2. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques // IEEE Trans. Instr. Meas. 1970. V. 19. No. 4. Pp. 377–382.
3. Experimental Study of the Insulator-to-Metal Phase Transition in VO₂ Thin Films in the Microwave Range / D.P. Lelyuk [at al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10, No. 4. Pp. 775–780.
4. Мишина А.В., Мишин А.Д. Метод фильтрации сигналов с переотражением в оптической спектроскопии // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 7. Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 264–267.
5. Способ изготовления пористых структур: пат. 99126325/02 Рос. Федерация. № 2174894 / Леушин И.О. [и др.]; заявл. 15.12.1999; опубл. 20.10.2001. 5 с.
6. Process for producing a porous ceramic and porous ceramic composite structure utilizing combustion synthesis: pat. No. 5279737A USA / Sekhar J.A., Bhaduri S.B.; 18.01.1994.
7. Creation of Broadband Radio-Absorbing Structures Based on Frequency-Selective Gratings with Distributed Losses / O.S. Tarasova [at al.] // AIP Conference Proceedings 2015. 2018. 020101 (PTI-2018), P.020101-1–020101-5.
8. Thermally Tunable Frequency-Selective Surface Based on VO₂ Thin Film / V.I. Polozov [at al.] // Phys. Status Solidi A. 2020. 217: 2000452.
9. High-temperature dielectric and microwave absorption properties of Si₃N₄–SiC/SiO₂ composite ceramics / Mian Li [at al.] // J Mater Sci. 2015. Vol. 50. Pp. 1478–1487.
10. Silicon carbide powders: Temperature-dependent dielectric properties and enhanced microwave absorption at gigahertz range / Hui-Jing Yang [at al.] // Solid State Communications. 2013. Vol. 163. Pp. 1–6.

УДК 66.095.7

Л.В. Козырева, О.В. Фадеев
Тверской государственный технический университет

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЯХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© Козырева Л.В., Фадеев О.В., 2021

В статье приводятся результаты научно-исследовательской работы по созданию износостойкого хромового покрытия CVD-методом гексакарбонила хрома. Получены покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами, что доказывает эффективность применяемых подходов, способствует увеличению износостойкости прецизионных деталей гидравлических систем и увеличению ресурса техники.

Ключевые слова: CVD-метод, металлоорганические соединения, износостойкое хромовое покрытие, прецизионные детали гидравлических систем.

PRODUCTION OF WEAR-RESISTANT CHROME COATING ON PRECISION PARTS OF HYDRAULIC SYSTEMS

This article describes the results of scientific and research investigation to develop a wear-resistant chrome coating by the *CVD*-method of chromium hexacarbonyl. This confirms the efficiency of the approaches used in this case which increases the wear resistance of precision parts of hydraulic systems and increases the service life of machines

Keywords: *CVD*-method, metal-organic compounds, wear-resistant chrome coating, precision parts of hydraulic systems

При восстановлении и упрочнении деталей машин и оборудования, в том числе в условиях ремонтного производства, применяются такие способы, как перекомплектовка, электролитическое хромирование и железнение, плазменное напыление, диффузионная металлизация, пластическое деформирование и ряд других [1–4].

В работах [1, 5] для упрочнения деталей пар трения узлов гидропривода (штоков и гильз гидроцилиндров, золотников и корпусов гидрораспределителей; плунжеры и распределительных шайб аксиально-поршневых насосов, поршней и золотников объемного гидропривода) предлагается применять *CVD*-метод (*Chemical Vapor Deposition* – «химическое газофазное осаждение»), посредством которого на поверхности деталей создаются функциональные покрытия за счет термической диссоциации карбонильных металлоорганических соединений переходных металлов.

Особый прикладной интерес вызывает получение износостойкого хромового покрытия при использовании в качестве исходного соединения *CVD*-метода гексакарбонила хрома $Cr(CO)_6$. Данное химическое соединение обладает необходимым для *CVD*-метода сочетанием физико-химических и технологических свойств, в том числе высокой летучестью и легкостью термической диссоциации при относительно низких температурах, стабильностью (в парообразном состоянии не разлагается ниже рабочих температур термораспада, установленных в конкретном процессе химического газофазного осаждения), возможностью создания высокой концентрации паров для достижения оптимальной скорости роста получаемой структуры, отсутствием агрессивности по отношению к подложке и технологической аппаратуре [5].

Процесс поддается автоматизации при использовании установки для нанесения покрытий, общая схема которой представлена на рис. 1. Последовательность осуществления металлизации включает следующие стадии: исходное металлоорганическое соединение (МОС) – гексакарбонил хрома – помещается в сублиматор и переводится в парообразное состояние. Далее парогазовая смесь (пары гексакарбонила хрома в среде несущего газа – монооксида углерода) подается в реакционную камеру, где разлагается на металл, осаждаемый на нагретую поверхность подложки, и побочные продукты химических реакций

процесса, которые по завершении производственного цикла откачиваются из реакционной камеры вакуум-насосом.

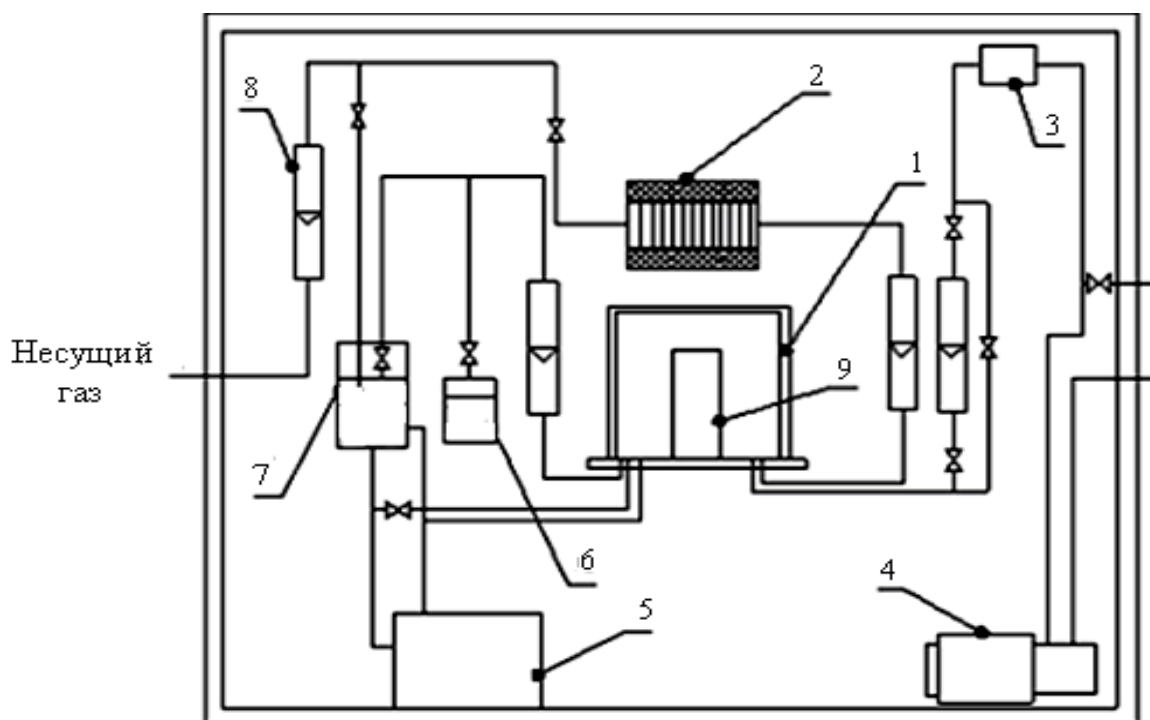


Рис. 1. Схема установки для металлизации деталей CVD-методом:
 1 – реакционная камера; 2 – сублиматор; 3 – фильтр; 4 – вакуум-насос;
 5 – термостат; 6, 7 – емкости с МОС; 8 – расходомер;
 9 – нагреватель

Нормы технологического режима установки:
 температура в реакционной камере – до 600 °С;
 подача парогазовой смеси – до 30 л/ч;
 максимальная потребляемая мощность – 4 кВт.

Особенностью CVD-метода МОС является механизм образования покрытий. Металлизируемая поверхность подложки находится в окружении парогазовой смеси металлоорганического соединения, молекулы постоянно перемещаются во всех направлениях в объеме реакционной камеры, что позволяет им приближаться и вступать в контакт со всеми частями и участками подложки, имеющими температуру разложения исходного соединения, поэтому металлизация CVD-методом применима для подложек сложной конфигурации [1]. В общем виде реализация процесса представлена на рис. 2.

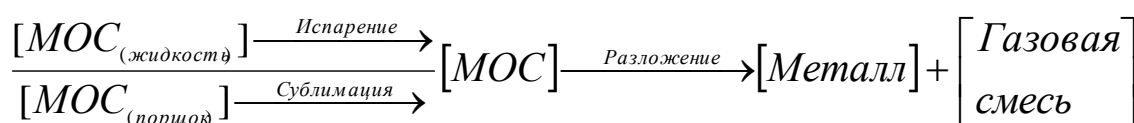


Рис. 2. Схема CVD-метода металлизации с использованием МОС

При получении хромовых покрытий *CVD*-методом в реакционной камере установки для нанесения металлических покрытий протекают реакции термической диссоциации исходных соединений (гексакарбонила хрома в среде монооксида углерода) с последующим химическим газофазным осаждением МОС и формированием металлического покрытия на поверхности подложки. Перечень реакций, протекающих в объеме реакционной камеры установки для нанесения металлических покрытий, представлен в таблице.

Реакции химического газофазного осаждения гексакарбонила хрома

№ п/п	Стадия процесса	Химические реакции
1	Образование хрома из $\text{Cr}(\text{CO})_6$ и взаимодействие хрома с CO	$\text{Cr}(\text{CO})_6 = \text{Cr} + 6\text{CO}$
		$\text{CO} \leftrightarrow 0,5\text{CO}_2 + 0,5\text{C}$
		$2\text{Cr} + 3\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C}$
		$11\text{Cr} + 6\text{CO} \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$
		$13\text{Cr} + 6\text{CO} \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$
2	Взаимодействие хрома с CO_2	$3\text{Cr} + 4\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2 + 2\text{CO}_2$
		$4\text{Cr} + 3\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{C}$
3	Взаимодействие оксидов и карбидов хрома с CO	$17\text{Cr} + 6\text{CO}_2 \leftrightarrow 4\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cr}_3\text{C}_2$
		$\text{CrO}_2 + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{Cr} + 2\text{CO}_2$

Оксиды и карбиды хрома могут формироваться как продукты неполного термического разложения исходного реагента в ходе реализации побочных реакций между твердой и парообразной фазами. Если концентрация оксидов и карбидов хрома в реакционной камере становится критически высокой, то, если встраивается в покрытие, данные химические соединения могут вызывать формирование нежелательных дефектов [5, 6].

Оптимизация качественного и количественного состава примесей в разных слоях покрытия осуществляется за счет варьирования технологических режимов ведения процесса: температуры подложки и давления в реакционной камере установки для металлизации, соотношения реагентов.

Процесс активного образования хромовых покрытий *CVD*-методом начинается при нагреве подложки до $300\text{ }^\circ\text{C}$, при этом максимальная скорость роста покрытия наблюдается в интервале температур $300\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$.

Максимальная микротвердость покрытий ($18\text{--}19\text{ ГПа}$) получена металлизацией при температуре подложки $300\text{--}310\text{ }^\circ\text{C}$. С повышением температуры микротвердость монотонно снижается; при нагреве подложки до $800\text{ }^\circ\text{C}$ микротвердость покрытия составляет не более 12 ГПа [8].

Максимальная прочность сцепления покрытия с подложкой наблюдается в области низких температур (300–400 °С) и составляет 80–120 МПа. С повышением температуры прочность сцепления резко снижается, что связано с разложением МОС в объеме реакционной камеры, которое приводит к загрязнению подложки и покрытия высокодисперсным хромовым порошком [7].

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность получения упрочняющих хромовых покрытий *CVD*-методом с минимальными отличиями по толщине на поверхностях деталей сложной формы. Для этого были проведены измерения толщины хромового покрытия, полученного *CVD*-методом МОС на поверхности золотника гидрораспределителя Р-80 (разница по толщине покрытия составила не более 5 %), что позволяет минимизировать или полностью исключить финальную механическую обработку.

Библиографический список

1. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Технологическое оснащение процесса получения металлических покрытий *CVD*-методом металлоорганических соединений // Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина. 2018. № 6 (88). С. 40–44.
2. Chemical vapor deposition of IR-based coatings: chemistry, processes and applications / V.Y. Vasiliev [at al.] // RSC Advances. 2015. Vol. 5. No. 41. Pp. 32034–32063.
3. Korotkov V.A. Wear resistance of carbon steel with different types of hardening // Journal of Friction and Wear. 2015. Vol. 36. No. 2. Pp. 149–152.
4. Carr G.E., Conde R.H. Tribology of hard coating alloys deposited by thermal methods: applications to industrial components // Surface and coatings technology. 2008. Vol. 203. № 5–7. Pp. 685–690.
5. Kozyreva L.V., Kozyrev V.V., Chupyatov N.N. Chemical vapor deposition of wear-resistant iron-nickel coating onto precision parts of hydraulic systems // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Vol. 9. No. 5. Pp. 985–989.
6. Li W.M. Recent developments of atomic layer deposition processes for metallization // Chemical Vapor Deposition. 2013. Vol. 19. No. 4-6. Pp. 82–103.
7. Способ нанесения хромового покрытия на прецизионные детали из низколегированных конструкционных сталей: пат. 2732038 Рос. Федерация. № 202010084 / Козырева Л.В., Образцова А.А., Козырев В.В., Чупятов Н.Н.; заявл. 09.01.2020; опубл. 10.09.2020, Бюл. 25. 6 с.
8. Козырева Л.В. Обеспечение экологической безопасности при организации малых инновационных предприятий технического сервиса: монография. Тверь: ТвГТУ, 2019. 160 с.

СОДЕРЖАНИЕ

И.В. Горлов, Е.В. Полетаева, А.Н. Болотов Анализ надежности технологических систем в процессе проектирования	4
А.Н. Болотов, О.О. Новикова, А.В. Новиков, Я.А. Янишевский Технологические основы синтеза магнитных смазочных материалов. Часть 4. Перспективные присадки и наполнители для улучшения антифрикционных и противозносных свойств наномасел	9
В.В. Новиков, О.О. Новикова, И.В. Горлов, Я.А. Янишевский Особенности формирования композиционного керамического покрытия на деталях из алюминия в узких отверстиях	17
А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова Исследование фрикционных свойств базового и модифицированного алмазно-абразивного материалов	22
А.Л. Яблонев, Д.М. Щербакова, А.И. Некрасова Исследование контактного взаимодействия модели пневмоколесного хода с торфяной залежью	27

А.Л. Яблонев, А.М. Гусева, Н.М. Жуков Стенд для определения прочности на изгиб формованной торфяной продукции	31
А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова Особенности возникновения очагов локального повреждения керамического покрытия формируемого методом микродугового оксидирования	38
М.М. Матлин, В.А. Казанкин, Е.Н. Казанкина Расчет сближения в контакте единичной микронеровности, моделируемой конусом, при повторном внедрении	43
Д.А. Зоренко Влияние мелкодисперсных частиц твердого смазочного материала на износостойкость узлов трения с покрытиями, полученными микродуговым оксидированием	52
П.Н. Хопин Оценка триботехнических характеристик твердосмазочных покрытий, полученных химико-термической обработкой основы	56
Л.Е. Афанасьева, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова Шероховатость поверхности образцов нержавеющей стали, полученных по технологии селективного лазерного плавления	62

Д.Д. Какорин, А.Ю. Лаврентьев Материалы для износостойкой наплавки	67
В.В. Измайлов, М.В. Новоселова Исследование электроконтактных характеристик композиционных жидкометаллических материалов	75
П.А. Яконовский, Т.Б. Яконовская Проблемы фрикционного износа мультисенсорных геофизических приборов для контроля технического состояния труб обсадных колонн	79
О.В. Сутягин, А.А. Рачишкин, Д.А. Груздков Установка для лабораторных триботехнических испытаний ТС-2	85
Р.А. Князьков, А.Д. Мишин, А.В. Мишина Измерение квазиоптическим методом температурной зависимости СВЧ-диэлектрической проницаемости материалов: применение для бесконтактного анализа состояния пенокерамического фильтра	91
Л.В. Козырева, О.В. Фадеев Получение износостойкого хромового покрытия на прецизионных деталях гидравлических систем	100

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Межвузовский сборник научных трудов
Выпуск 14

Редактор Я.А. Петрова
Корректор Ю.А. Якушева

Подписано в печать

Формат 60×84/16

Физ. печ. л.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л.

Заказ №

Бумага писчая

Уч.-изд. л.

С –

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22