

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**

Межвузовский сборник научных трудов

Выпуск 15

Рецензируемое издание

Тверь 2022

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

Рецензенты: зав. кафедрой автомобильных дорог, оснований и фундаментов ТвТГУ, д-р техн. наук, профессор Гультаев В.И.; д-р физ.-мат. наук профессор кафедры общей физики ТвГУ Самсонов В.М.

Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 15 / под ред. В.В. Измайлова. Тверь: Тверской государственной технической университет, 2022. 128 с.

Включены статьи теоретического и прикладного характера, посвященные физическим, химическим, механическим процессам контактного взаимодействия твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. В сборник вошли доклады, представленные на Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное развитие машиностроения и энергетики России», которая состоялась в Тверском государственном техническом университете 18 января 2022 г. и была посвящена 100-летию вуза.

Предназначен для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов, студентов. Подготовлен на кафедре прикладной физики Тверского государственного технического университета. Электронная версия издания 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;
А.В. Мишина (отв. секретарь).

**Механика и физика процессов на поверхности
и в контакте твердых тел, деталей технологического
и энергетического оборудования**

Межвузовский сборник научных трудов

Выпуск 15

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Ю.А. Якушева

Подписано в печать 16.05.2022

Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 8

Тираж 50 экз.

Бумага писчая

Усл. печ. л. 7,44

Заказ № 32

Уч.-изд. л. 6,96

С – 31

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

© Тверской государственной
технической университет, 2022

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. Сложная многофакторная природа процессов контактного взаимодействия, трения и изнашивания требует сочетания различных научных и инженерных направлений исследований. Некоторые результаты таких комплексных исследований фундаментального и прикладного плана в области трибологии и смежных областях отражены в настоящем сборнике.

Во вторую часть сборника включены научные доклады, представленные на Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное развитие машиностроения и энергетики России» в 2022 г. В конференции приняли участие ученые и специалисты ведущих научных и учебных заведений России и Тверской области в частности, а также студенты и аспиранты, обучающиеся в ТвГТУ. Помимо традиционных вопросов по изучению процессов трения и изнашивания в современных технических устройствах, в статьях обсуждается тема усовершенствования высокопроизводительного инструментария, анализируется процедура разработки технологических процессов в системах автоматизированного проектирования с элементами искусственного интеллекта, а также рассматриваются инновационные подходы в разработке мер безопасности на машиностроительных предприятиях.

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.

ЧАСТЬ 1

УДК 621.892

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков, Я.А. Янишевский
Тверской государственной технической университет

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ МАСЕЛ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА

© Болотов А.Н., Новикова О.О.,
Новиков В.В., Янишевский Я.А., 2022

Исследована испаряемость магнитных масел, проведен комплексный термический анализ магнитных масел и жидкостей. Показано влияние антиокислительной присадки на физико-химические свойства масел при повышении температур. Обосновано, что деградация свойств магнитного масла при трении происходит за счет уменьшения магнитных свойств наполнителя, вызванного его окислением, потери магнитным маслом коллоидной стабильности и образования крупных агломератов из ферричастиц. Подтверждена относительно высокая коррозионная активность магнитных масел по отношению к материалам поверхностей трения, вызванная наличием в их составе большого количества молекул поверхностно-активных веществ для стабилизации коллоидной структуры и придания антифрикционных и противоизносных свойств. Установлено, что при трении в присутствии магнитного масла, кроме усталостного, адгезионного и слабого абразивного изнашивания, наблюдается также коррозионно-механическое изнашивание, величиной которого нельзя пренебречь.

Ключевые слова: магнитное масло, коррозия, деструкция, испаряемость, трение, износ.

SOME PHYSICO-CHEMICAL FEATURES MAGNETIC OILS AFFECTING THEIR LUBRICATING PROPERTIES

The evaporability of magnetic oils has been investigated and a comprehensive thermal analysis of magnetic oils and liquids has been carried out. The effect of an antioxidant additive on the physico-chemical properties of oils at elevated temperatures is shown. Justified that degradation of the properties of magnetic oil during friction occurs due to a decrease in the magnetic properties of the filler caused by its oxidation, loss of colloidal stability by magnetic oil and the formation of large agglomerates from ferroparticles. The relatively high corrosion activity of magnetic oils in relation to the materials of the friction surfaces was confirmed, caused by the presence in their composition of a large number of surfactant molecules to stabilize the colloidal structure and impart anti-friction and anti-wear properties. It has been established that during friction in the presence of magnetic oil, in addition to fatigue, adhesive and weak abrasive wear, corrosion-mechanical wear is also observed, the magnitude of which cannot be neglected.

Keywords: magnetic oil, corrosion, destruction, evaporation, friction, wear.

Повышение надежности и долговечности машин, приборов и технологического оборудования в значительной степени достигается усовершенствованием трибосопряжений входящих в их конструкцию. Эта задача может быть решена путем разработки новых конструкций трибоузлов и применением в них инновационных смазочных материалов. Одними из наиболее перспективных современных смазочных материалов в настоящее время являются наноструктурные магнитные масла [1–6]. Благодаря своим уникальным физическим и триботехническим свойствам они могут быть использованы в различных видах подшипников, в уплотнениях, направляющих скольжения оборудования широкого профиля, в том числе прецизионного [1, 7]. Потому задача по изучению смазочных магнитных масел и их применению в реальных триботехнических устройствах для обеспечения требуемого ресурса и эксплуатационных параметров всей конструкции в целом имеет большое практическое значение.

В предыдущих работах были показаны некоторые результаты исследования физико-химических свойств магнитных масел: коллоидной устойчивости диэфирных магнитных масел для подшипников скольжения, влияния магнитных дисперсных частиц и присадок на трибологические свойства масел, намагниченности и ее стабильности при термомеханических воздействиях [8–10]. Однако имеющихся данных недостаточно для прогнозирования ресурса работы проектируемого магнитного масла при сохранении им требуемых рабочих параметров. Для создания более информативного банка данных физико-химических и триботехнических свойств наноструктурных магнитных масел необходимо дополнительно оценить следующие его существенные характеристики: скорость потери массы за счет испарения; интенсивность старения, связанного с окислительными процессами; деструкцию магнитного масла в условиях трения; коррозионные свойства.

В связи с вышеизложенным цель работы заключалась в выявлении специфических физико-химических особенностей магнитных масел, которые влияют на его эксплуатационные свойства.

Испаряемость и термоокислительные свойства магнитных масел.

Испаряемость магнитного масла зависит от его химической структуры и связана с термоокислительными свойствами. Введение в масло значительного количества дисперсного оксида железа с большой удельной поверхностью, с одной стороны, улучшает его магнитные свойства: смазка лучше удерживается в зоне трения, улучшается охлаждение контакта; с другой стороны, его избыточное количество может оказывать каталитическое влияние на окисление, деструкцию и полимеризацию дисперсионной среды. Старение магнитных масел вследствие окисления в присутствии кислорода воздуха может существенно влиять на работоспособность реального узла трения, так как обычно его эксплуатация сопровождается выделением

значительного количества тепла, также каталитически увеличивающего интенсивность старения.

Испаряемость и термоокислительные свойства магнитных масел были исследованы в статическом и динамическом режимах. В статическом режиме фиксировали изменение массы образца магнитного масла в процессе испарения с открытой поверхности в условиях термостатирования. Толщина слоя образца магнитного масла была выбрана такой, чтобы уменьшить влияние постепенного изменения содержания компонентов вследствие его испарения. Исследование термоактивированных процессов в динамических условиях производилось на дериватографе.

Изучалась зависимость скорости изменения приведенной массы масла (в расчете на единицу открытой поверхности масла) от времени для различных смазочных композиций на основе диоктилсебацата (ДОС) при температуре 100 °С. Из полученных данных следует, что скорость испарения и других процессов, протекающих под воздействием температуры и кислорода воздуха в жидкости ДОС и магнитном масле, приготовленном на ее основе и не содержащем антиокислительной присадки, различается. На начальном этапе скорость изменения массы магнитного масла уменьшается и даже меняет знак, т.е. масса начинает нарастать. В это время масло интенсивно поглощает кислород и в нем преобладают реакции окисления и полимеризации с образованием низколетучих высокомолекулярных соединений, о чем свидетельствует возрастание вязкости. В дальнейшем скорость окисления уменьшается и наступает равновесие между скоростью испарения и увеличением плотности масла, скорость изменения массы стабилизируется.

В ДОС под действием температуры в присутствии кислорода воздуха возможны реакции полимеризации и деструкции. Реакции полимеризации протекают в основном по углеводородной цепи через образование активных кислородсодержащих соединений. Оксиды железа ускоряют поглощение кислорода углеводородом при 393 К, причем каталитическая активность двухвалентного оксида железа намного больше, чем трехвалентного. Каталитическое действие оксидов железа связано с активацией разложения пероксидов и пропорционально удельной поверхности дисперсной фазы. Высокое содержание в магнетите оксида железа (II) и значительная удельная поверхность частиц, не покрытая адсорбционным слоем, определяют снижение термоокислительной устойчивости магнитного масла, нарастание вязкости и потерю магнитной подвижности при работе в узле трения. При добавлении в магнитное масло присадки дифениламина 5 об.%, обладающей антиокислительным действием и блокирующей реакции полимеризации, более вероятными становятся реакции деструкции, сопровождающиеся образованием летучих продуктов. Основным катализатором процессов деструкции сложноэфирных групп оксидом железа является адсорбционная вода. Однако, как показывают результаты

эксперимента, выделение летучих продуктов при нагреве магнитных масел с ингибитором полимеризации незначительно выше, чем у ДОС, содержащего 5 об.% дифениламина. Отсюда можно сделать вывод, что при температуре 100 °С магнетит оказывает воздействие в основном на реакции полимеризации и слабо влияет на реакции деструкции.

Результаты исследований комплексного термического анализа магнитных масел и жидкостей показали, что магнетит снижает температуру начала окисления на 60 °С. Добавление антиокислительных присадок повышает температуру начала окисления и одновременно уменьшает активность процесса.

При температуре 150 °С общий характер процессов сохраняется, скорость испарения возрастает в 5–6 раз. Для магнитных жидкостей, содержащих присадки, скорость испарения снижается в течение длительного времени вследствие уменьшения количества легколетучих компонентов. Установлено, что вязкость жидкостей с присадками во время испытаний (250 ч) при температуре 150 °С увеличивалась незначительно, изменение намагниченности также было несущественным.

Длительные испытания магнитного масла на основе ДОС с присадкой 5 % дифениламина при температуре 150 °С показали, что влияние ингибитора снижается, что приводит к постепенному возрастанию вязкости масла и снижению его намагниченности. Учитывая это, для устойчивой работы узла трения с магнитным маслом при температуре выше 150 °С в масло нужно вводить другую антиокислительную присадку. В то же время заметим, что даже достигнутая предельная рабочая температура является сравнительно высокой. Такое магнитное масло, как СМ-1, получившее широкое распространение, работоспособно при температурах до 100 °С и имеет испаряемость лишь на 40–60 % меньше, хотя вязкость его больше в десятки раз из-за того, что для его изготовления используется низколетучая кремнийорганическая жидкость.

Деградация магнитного масла в процессе трения. В процессе эксплуатации магнитных масел на них воздействуют высокая температура, давление и сдвиговые напряжения в зоне трения, что приводит к изменению химического состава масел в результате деструкции молекул, их химического взаимодействия с поверхностью и атмосферным газом, а также ведет к потере магнитными частицами магнитных свойств. Важной задачей, которую нужно решить для обеспечения длительной надежной работы узлов трения, смазываемых магнитным маслом, является установление периода эффективного смазочного действия магнитного масла и выявление факторов, его определяющих. Под этим следует понимать время, в течение которого масло способно защищать поверхности от износа, снижать потери на трение, сохранять коллоидную структуру. В связи с этим был проведен долговременный эксперимент на установке для испытания материалов на трение и износ при граничной смазке магнитным маслом. Исследовалась

пара трения бронза ОЦС-4-4-2,5 – латунь Л63 при смазке маслом ММ-1, имеющим намагниченность 26 кА/м, плотность 1,3 г/см³. Это масло изготовлено на основе эфира пентаэритрита марки А-210, отличающегося высокой термической и окислительной стабильностью (в присутствии некоторых металлов, например железа, термическая стабильность эфира снижается). Для уменьшения времени испытаний исследовался небольшой объем ферримасла, равный 2 см³. Под действием неоднородного магнитного поля с градиентом около $12 \cdot 10^5$ А/м масло располагалось на дорожке трения в виде кольца. Испытания проводились при линейной скорости скольжения 0,15 м/с и давлении 3,2 МПа. Небольшая скорость скольжения, коэффициент взаимного перекрытия контактирующих поверхностей, стремящийся к нулю, позволили снизить объемную температуру масла до 30 °С и свести к минимуму влияние температурного фактора на структурную стабильность масла в течение испытаний.

Изучалась зависимость суммарного линейного износа пары трения (бронза – латунь) от времени испытаний. Цикл испытаний продолжался 140 ч. После окончания периода приработки интенсивность линейного износа в пределах ошибки измерений оставалась постоянной. Износ бронзового диска определяли с помощью профилографа, а пальчиковых образцов из латуни по изменению их высоты. Оказалось, что износ пальчиковых образцов из латуни примерно в 1,5 раза больше износа бронзового диска. После 110–120 ч испытаний момент трения и интенсивность износа начинают возрастать. Это свидетельствует о существенном ухудшении смазочной способности масла ММ-1 к концу испытаний.

Исследование магнитных свойств масла ММ-1 показало, что намагниченность насыщения после 140 ч испытаний значительно падает. Очевидно, снижение намагниченности происходит из-за потери частицами магнитных свойств после окисления и химического взаимодействия с молекулами стабилизатора. Одновременно, как было установлено, происходит образование агломератов ферричастиц, имеющих размер до 10^{-5} м и усиливающих абразивное действие масла. Коллоидная стабильность масла нарушается. Визуальными наблюдениями обнаруживается отделение немагнитной дисперсной среды (жидкости-основы) с дорожки трения и растекание по всей поверхности бронзового диска. Все это свидетельствует о том, что наиболее слабым звеном в структуре магнитных масел являются сольватные оболочки частиц.

Анализ топографии поверхности показал, что шероховатость дорожки трения бронзового диска к концу испытаний значительно увеличивается по сравнению с исходной. Визуальный осмотр поверхностей трения свидетельствует о том, что на последней стадии испытаний появляются ярко выраженные кольцевые риски.

Уменьшение магнитных свойств, потеря магнитным маслом коллоидной стабильности и образование агломерированных ферричастиц ухудшают формирование прочного смазочного слоя, разделяющего металлические поверхности, а также увеличивают вероятность схватывания и заедания; все больше проявляется адгезионно-абразивный износ (на кривой износа это отражается в увеличении скорости изнашивания пары трения к концу испытаний; увеличивается и момент трения).

Динамика структурных превращений в магнитном масле ММ-2 (изготовлено на основе полиэтилсилоксана ПЭС-4 и стабилизировано олеиновой кислотой) в процессе трения может быть оценена по изменению диэлектрических и магнитных свойств. Изучалось изменение диэлектрической проницаемости и намагниченности ММ-2 в процессе испытаний пары трения сталь ШХ-15 – сталь 40Х на шариковой машине трения МТШ-М при давлении 1,2 ГПа и скорости 1,5 м/с. Данные получены для сравнительно небольшого объема масла – 10 см³. Диэлектрическая проницаемость определялась на частоте 10³ Гц.

Скорость уменьшения намагниченности масла нарастает по мере работы узла трения; вязкость масла возрастает постепенно, однако не в результате отделения дисперсионной среды, а, вероятно, из-за происходящих в масле процессов полимеризации, активированных трением; коллоидная стабильность масла сохранялась до конца испытаний. Несколько неожиданным является значительный рост диэлектрической проницаемости масла. Это можно объяснить увеличением дипольного момента молекул и проводимости дисперсных частиц. Роль частиц вытекает из сравнения характера временной зависимости намагниченности и диэлектрической проницаемости, а также из того, что тангенс диэлектрических потерь увеличивается.

Дополнительно были выполнены спектроскопические исследования масла ММ-3 (масло изготовлено на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5 и стабилизировано олеиновой кислотой) в области инфракрасного излучения. Изучалось исходное масло, масло после трибоиспытаний и масло, выдержанное в термошкафу при 100 °С в течение 100 ч. В спектре поглощения трибо- и термообработанных масел появляются два новых пика поглощения в области обратных длин волн около 600 см⁻¹, причем в термообработанном масле пики более интенсивные. Поглощение в области 650–550 см⁻¹ обусловлено колебаниями связи Fe-O в кристаллической решетке частиц. Поэтому указанные изменения скорее всего вызывает окисление магнетита. Достоверно говорить о каких-либо других изменениях в молекулярной структуре масел, включая изменение количества полярных групп в молекулах, исходя из полученных спектрограмм, не представлялось возможным.

Смазочные свойства рассматриваемого масла ММ-4 в начале работы узла трения изменяются незначительно, но через 60–70 ч начинают

достаточно резко ухудшаться одновременно со снижением намагниченности. Поэтому в определенной мере влияние масла на трение ослабевает из-за того, что магнитные силы недостаточно эффективно подают масло с возрастающей вязкостью на дорожку трения. В то же время сказывается изменение молекулярного состава масла.

Для сравнения оценивалось время срабатывания масла ТАД-17, заправленного в узел трения в том же количестве. Срабатываемость масла ТАД-17 наступала на 10–15 ч раньше, чем масла ММ-3, при этом ухудшение свойств масла ТАД-17 происходило не так резко.

Влияние магнитного масла на коррозию поверхности трения. Химическое коррозионное воздействие масел на поверхность металла изучалось предложенным количественным методом [11, 12].

Вначале была проверена значимость температурных и деформационных воздействий на скорость коррозии. Исследовалось коррозионное воздействие трансмиссионного масла ТАД-17 на медь при окружающей температуре 100 °С. Диаметр медной проволочки составлял 0,075 мм, по ней пропускались знакопеременные импульсы тока прямоугольной формы с амплитудой 2,9 А и периодом 0,2 с, индукция магнитного поля составляла 0,035 Тл. Расчетное повышение температуры проволочки равнялось 230 К, максимальное растягивающее напряжение составляло 10^7 Па.

Однозначно показано, что именно переменные температурные и деформационные воздействия на металл приводят к существенному изменению скорости коррозии. На основании проведенных опытов была выявлена одна из неочевидных причин повышения скорости коррозии при деформации проволочки, которая заключается в том, что на поверхности образца благодаря колебательным движениям не происходило отложение смолоподобных веществ, препятствующих доступу к поверхности химически активных молекул масла. Аналогичный процесс наблюдается в процессе трения.

Заметим, что скорость коррозии меди в масле ТАД-17 в течение продолжительного времени почти не изменяется. Совершенно другая картина наблюдается в масле, содержащем в своем составе кремнийорганическую жидкость ПЭС-5 и стеариновую кислоту (10 об.%). Наблюдалось прогрессирующее увеличение скорости изменения сопротивления проволочек (коррозии). В некоторых экспериментах образцы неожиданно обрывались. Вероятно, проявление синергетического действия химически активных компонентов масла стимулирует образование в проволочке микротрещин и их развитие, т.е. наблюдается проявление эффекта Ребиндера. Возможно, этим же отчасти объясняются и низкие противозносные свойства кремнийорганических масел.

Исследовались коррозионные свойства магнитных масел на основе полиэтилсилоксановой кислоты (ПЭС-5, ПЭС-В-2) и хлорсилоксана (ХС-2-1), содержащих в качестве дисперсионной фазы магнетит и стаби-

лизированных жирной кислотой. Результаты оказались неожиданными: масла вызывали чрезвычайно малую коррозию медного образца. Так, например, относительное изменение сопротивления проволоочки в масле ММ-5 на основе ПЭС-5, стабилизированном стеариновой кислотой, составило за 100 ч менее 2 %, хотя по термодинамическим причинам магнитное масло всегда содержит некоторое количество свободных молекул поверхностно-активных веществ, которые, казалось бы, должны были вызвать более сильную коррозию.

Заметные коррозионные свойства у масла ММ-5 начали проявляться лишь после того, как в его состав дополнительно ввели около 10 % стеариновой кислоты. Можно предположить, что из-за высокой активности и большой величины интегральной поверхности дисперсных частиц в масле, молекулы ПАВ образуют достаточно устойчивые сольватные комплексы с частицами и в незначительном количестве находятся в неассоциированном состоянии.

В определенной мере это подтверждается тем, что масло ТАД-17 после введения в его состав около 1 % частиц магнетита, таких же, как в магнитном масле, почти перестает корродировать медную поверхность.

Было подтверждено, что увеличение скорости коррозии сопровождается снижением трения и износа. Это и понятно, поскольку от скорости коррозии зависит регенерация модифицированных поверхностных слоев, предохраняющих материалы от сильного адгезионного износа. Поэтому для достижения удовлетворительных смазочных свойств магнитных масел в их состав нужно вводить значительное количество присадки.

Таким образом, полученные в результате исследований данные позволяют сформировать более полную базу данных о триботехнических характеристиках синтезируемых наноструктурных магнитных масел, что даст возможность на стадии проектирования механической системы прогнозировать показатели работоспособности входящего в нее трибоузла и проводить действенные мероприятия по повышению ее долговечности, износостойкости, энергоэффективности.

Библиографический список

1. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1993. – 272 с. – Текст : непосредственный.
2. Bolotov, A.N. Role of magnetic field in friction of surfaces lubricated by magnetic oil / A.N. Bolotov, N.V. Lochagin, Yu.O. Mikhalev. – Текст : непосредственный // Soviet Journal of Friction and Wear. – 1988. – Vol. 9. – № 5. – P. 80-86.
3. Болотов, А.Н. Магнитное масло для узлов трения, работающих при граничной смазке / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – Текст : непосредственный // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 9. – С. 38-41.
4. Болотов, А.Н. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. –

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.150. – Текст : непосредственный // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – № 10. – С. 150-158.

5. Болотов, А.Н. Анализ работы трибосопряжений на основе керамических алмазосодержащих материалов / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – № 3. – С. 279-284.

6. Мищак, А. Трибологические свойства феррожидкости / А. Мищак. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2006. – Т. 27. – № 3. – С. 330-336.

7. Odenbach, S. Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications. Lecture Notes in Physics / S. Odenbach. – Springer-Verlag, 2002. – 253 p. – Текст : непосредственный.

8. Болотов, А.Н. Влияние присадок на триботехнические характеристики наноструктурных смазочных магнитных масел / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков. – Текст : непосредственный // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 9. – С. 43-47.

9. Болотов, А.Н. О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – DOI: 10.6060/tcct.2017604.5506. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 75-81.

10. Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, И.В. Горлов. – Текст : непосредственный // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2014. – Т. 4. – № 2 (20). – С. 15-17.

11. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1 / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Мардян. – Текст : непосредственный // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. Вып. 6. – Тверь: ТвГТУ, 2013. – С. 68-74.

12. Патент № 2760924С1 Российская Федерация, МПК G01R 33/12, G01N 27/72. Устройство и способ определения устойчивости и структурной стабильности магнитных жидкостей : № 2021105279 : заявл. 01.03.2021 : опубл. 01.12.2021 / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. – 10 с. – Текст : непосредственный.

УДК 621.891

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова
Тверской государственной технической университет

ВЫБОР ТОЛЩИНЫ КЕРАМИЧЕСКОГО СЛОЯ НА АЛЮМИНИИ И ЕГО СПЛАВАХ С УЧЕТОМ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ И РЕСУРСОВ НА ЕГО ПОЛУЧЕНИЕ

© Болотов А.Н., Новиков В.В.,
Новикова О.О., 2022

Представлены результаты исследования выбора толщины керамического слоя с учетом энергетических и ресурсных затрат, необходимых для его формирования на алюминии и его сплавах методом микродугового оксидирования. Для оценки

энергетических затрат использован такой параметр, как относительная энергоемкость покрытия. Проведен ориентировочный расчет стоимости формирования упрочненного слоя.

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

SELECTION OF THE CERAMIC LAYER THICKNESS ON ALUMINUM AND ITS ALLOYS TAKING INTO ACCOUNT THE ENERGY AND RESOURCES FOR ITS PRODUCTION

The results of the study of the choice of the thickness of the ceramic layer, taking into account the energy and resource costs necessary for its formation on aluminum and its alloys by the method of microarc oxidation, are presented. To assess the energy costs, the parameter relative energy intensity of the coating was used. An approximate calculation of the cost of forming a hardened layer has been carried out.

Keywords: microarc oxidation, ceramic coating, coating thickness, energy efficiency.

В многочисленных машинах и механизмах широкое применение находят детали из алюминия и его сплавов. Помимо чисто конструкционного использования, зачастую обусловленного требованием снижения веса изделия, детали из этих материалов 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 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). При применении данного метода в процессе формирования керамического покрытия на поверхности алюминия возникают микродуговые разряды, постепенно преобразующие основной материал детали в высокопрочный композит, основную часть которого составляет оксид алюминия. Данный метод выгодно отличается от традиционного оксидирования тем, что композиционное керамическое покрытие обладает высокой микротвердостью (порядка 10–20 ГПа), а также в десятки раз большей толщиной.

В связи с вышесказанным представляет интерес исследование энергетических и ресурсных затрат при создании на поверхности алюминия упрочненного композиционного слоя на основе корунда.

Цель исследования: обоснование выбора толщины керамического слоя с учетом энергетических и ресурсных затрат, необходимых для его формирования на алюминии и его сплавах методом МДО.

Оборудование и методика исследования. Нанесение композиционного керамического покрытия проводилось на деталях из алюминиевого сплава Д16 в гальванической ванне с водяной рубашкой охлаждения. Объем воды, прошедшей через нее, измерялся водяным счетчиком СВУ-15. Для создания равномерного распределения температуры электролита по объему ванны и его химического состава использовался воздушный барботаж, который обеспечивался лабораторным компрессором SICOLAB 025 mini. Импульсный ток, подававшийся на обрабатываемую деталь, через систему подводных проводов, формировался блоком питания, который оборудован амперметром. Блок питания был подключен к промышленной сети переменного тока напряжением синусоидальной формы с номинальным значением частоты 50 Гц и номинальными действующими значениями напряжений 380 В. Исследование проводилось на деталях из алюминиевого сплава Д16, которые имели форму цилиндра площадью 0,1 дм². Данная форма изделия выбрана для исключения экранирования каких-либо участков обрабатываемой детали от стенок гальванической ванны, являющейся противозлектродом. Для объективной оценки энергозатрат измерялась толщина полученного керамического слоя на поперечном шлифе обработанной детали в 10 точках. Выбор материала был обусловлен тем, что на поверхности при обработке сплава Д16 образуется композиционный материал, включающий в себя оксид меди, который имеет черный цвет, благодаря чему хорошо контрастирует с основой. Таким образом, при измерении толщины покрытия на поперечном шлифе разрезанной втулки четко видна граница раздела: основной материал – керамическое покрытие. В качестве электролита использовался раствор щелочи NaOH. Выбранная концентрация раствора (2 г/л), во-первых, обеспечивала практически равномерное распределение разности потенциала по поверхности изделия и, следовательно, равномерную толщину сформированного керамического слоя, а во-вторых, препятствовала возникновению мощных электрических дуговых разрядов, его разрушающих. Температура электролита при МДО поддерживалась в пределах 15–20 °С. В данном диапазоне температур формировалось композиционное керамическое покрытие с высокой микротвердостью порядка 10–20 ГПа [4]. Для отвода продуктов химической реакции использовалась вытяжная система, оборудованная вентилятором ERA PROFIT 4 86-383.

Принципиальная схема участка МДО представлена на рисунке. От блока питания 1 через подводные провода 2 необходимый импульсный режим для формирования МДО-покрытия подавался на деталь 3, находящуюся в гальванической ванне с водяной рубашкой охлаждения 4. Перемешивание электролита осуществлялось сжатым воздухом через

барбатер 5, подаваемый компрессором 6. Удаление продуктов химической реакции производилось вытяжной системой 7. Для оценки затрат электроэнергии использовался такой параметр, как относительная энергоемкость покрытия: $\omega = W / V$, где W – суммарная энергия, затраченная при формировании композиционного керамического покрытия; V – объем композиционного керамического покрытия.

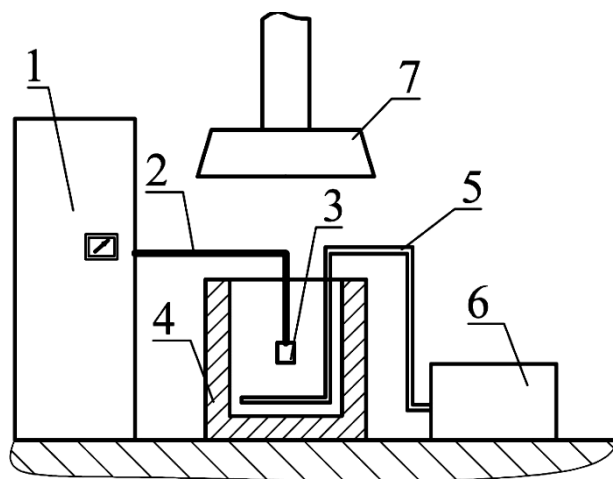


Схема участка МДО

Результаты исследования. В соответствии с имеющимся оборудованием общие энергетические и ресурсные расходы при МДО, без учета затрат на химические реактивы и воду для создания электролита, можно сгруппировать следующим образом:

1. Расход электроэнергии для создания микродуговых разрядов на поверхности обрабатываемой детали и формирования на ней композиционного керамического покрытия.

2. Расход электроэнергии при вспомогательных процессах (барботаже, работе вытяжной системы).

3. Объем воды, прошедшей через рубашку охлаждения.

Оценка расхода материальных ресурсов осуществлялась при толщине керамического покрытия до 95–105 мкм. Увеличение его толщины приводит к возникновению локальных дуговых разрядов, нарушающих изотропность упрочненного слоя, и потере им как физико-механических характеристик, так и адгезии к основному материалу. В совокупности это ведет к невозможности использования изделия по назначению. Импульсный блок питания позволяет создавать и поддерживать на обрабатываемой детали заданную плотность тока. Для стабильного протекания процесса МДО и исключения формирования на отдельных участках поверхности очагов электрохимической коррозии была выбрана плотность тока 10 А/дм² [5]. Затраты ресурсов на формирование композиционного керамического покрытия приведены в таблице.

Время обработки, ч	Средняя толщина керамического слоя, мм	Объем слоя V, мм ³	Расход электроэнергии при МДО W ₁ , кВт·ч	Расход электроэнергии на вспомогательные системы W ₂ , кВт·ч	Общий расход электроэнергии W, кВт·ч	Относительная энергоемкость покрытия ω, кВт·ч/мм ³	Расход воды на охлаждение V ₁ , м ³
0,5	0,015	0,15	0,19	0,062	0,252	1,680	0,202
1,0	0,026	0,26	0,38	0,124	0,504	1,938	0,403
1,5	0,038	0,38	0,57	0,186	0,756	1,989	0,605
2,0	0,049	0,49	0,76	0,248	1,008	2,057	0,806
2,5	0,061	0,61	0,95	0,310	1,260	2,065	1,008
3,0	0,076	0,76	1,14	0,372	1,880	2,473	1,206
3,5	0,087	0,87	1,33	0,434	2,200	2,529	1,410
4,0	0,097	0,97	1,52	0,496	2,490	2,567	1,612

Микродуговое оксидирование не проводилось дольше 4 ч из-за увеличения мощности разрядов, прожигающих сформированный керамический слой [5].

Ориентировочный расчет стоимости формирования упрочненного слоя площадью 1 дм² максимальной толщиной 0,1 мм в ценах 2022 г. показывает следующее: общая стоимость складывается из стоимости электроэнергии для МДО и воды, затрачиваемой на охлаждение, и составляет примерно 13 000 руб. (при цене 5 руб. за 1 кВт·ч). При этом не учитывается стоимость химических реагентов, необходимых для электролита, а также амортизация оборудования, используемого на участке МДО.

Заключение. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что при увеличении толщины композиционного керамического слоя относительная энергоемкость обработки увеличивается. Это требует ее оптимизации в соответствии с требованиями, предъявляемыми к износостойкости узла трения и ресурсу его работы для снижения материальных затрат и повышения энергоэффективности МДО.

Библиографический список

1. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование теория, технология, оборудование : монография / И.В. Суминов. – Москва : ЭКОМЕТ, 2005. – 352 с. – Текст : непосредственный.
2. Болотов, А.Н. Интенсификация формирования износостойкого керамического покрытия на алюминии и его сплавах / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков. – Текст : непосредственный // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2013. – № 1 (23). – С. 60-62.
3. Гордиенко, П.С. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов : монография / П.С. Гордиенко, В.А. Достовалов, А.В. Ефименко. – Владивосток : ДВФУ, 2013. – 522 с. – Текст : непосредственный.

4. Болотов, А.Н. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-4-30-37. – Текст : непосредственный // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2020. – № 4. – С. 30-37.

5. Болотов, А.Н. Особенности возникновения очагов локального повреждения керамического покрытия формируемого методом микродугового оксидирования / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – Текст : непосредственный // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. Вып. 14. – Тверь : ТвГТУ, 2021. – С. 38-43.

УДК 621.891

В.В. Новиков, О.О. Новикова, А.Н. Болотов
Тверской государственной технической университет

**ВЛИЯНИЕ НЕСКВОЗНОЙ ПЕРФОРАЦИИ
ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИЧЕСКОГО
МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ**

© Новиков В.В., Новикова О.О.,
Болотов А.Н., 2022

Исследовано влияние предварительной несквозной перфорации поверхности детали на характеристики керамического покрытия, полученного методом микродугового оксидирования. Рассмотрены различные геометрические варианты расположения отверстий и их влияние на процессы, происходящие при воздействии электрических разрядов на обрабатываемую поверхность. Установлено увеличение толщины керамического покрытия пропорционально глубине перфорации.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, несквозная перфорация, керамическое покрытие.

**INFLUENCE OF NON-SURFACE PERFORATION
OF A PART ON THE CHARACTERISTICS
OF A CERAMIC MICROARC OXIDATION COATING**

The influence of preliminary blind perforation of the surface of the part on the characteristics of the ceramic coating obtained by the method of microarc oxidation has been investigated. Various geometric options for the location of the holes and their effect on the processes occurring when electric discharges are applied to the surface to be treated are considered. An increase in the thickness of the ceramic coating was found in proportion to the depth of perforation.

Keywords: microarc oxidation, blind perforation, ceramic coating.

В настоящее время в качестве конструкционных материалов различных машин и механизмов используют алюминий и его сплавы. Помимо конструкционного применения, зачастую обусловленного требованием снижения веса изделия, детали из этих материалов достаточно часто 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. Возникающие частицы износа приводят к переходу от упругого контактного взаимодействия к пластическому и, как следствие, к катастрофическому разрушению материала трибосопряжения [1]. Для поддержания работоспособности узла трения его поверхности, если они изготовлены из алюминия и его сплавов, упрочняют 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 используют метод микродугового оксидирования (МДО). При его применении 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. Преимущества данного метода состоят в том, что композиционное керамическое покрытие характеризуется высокой микротвердостью (порядка 10–20 ГПа), а также в десятки раз превосходит по толщине покрытие, образующееся 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]. Технологический процесс его получения достаточно длителен по времени, при этом можно достичь толщины упрочненного слоя на поверхности изделия при ведении технологического процесса в обычном режиме до 0,9–1,1 мм. В реальных условиях работы трибосопряжения, особенно в жестком режиме абразивного износа, ресурс его работы зависит как от физико-механических свойств керамического покрытия, так и от его толщины. Увеличить ее можно различными способами. Одним из них является метод предварительной перфорации поверхности обрабатываемой детали на небольшую глубину [5]. Тем самым обеспечивается более глубокое проникновение электролита в поверхностный слой изделия, а микродуговые разряды возникают не только на внешней части детали, но и в сформированных отверстиях.

Цель исследования: изучение микротвердости и толщины керамического слоя, полученного методом МДО с предварительной перфорацией поверхности образца.

Используемые материалы, оборудование и методика исследования. Нанесение композиционного керамического покрытия проводилось на деталях из алюминиевого сплава Д16 в гальванической ванне с водяной рубашкой охлаждения. Для создания равномерного распределения температуры электролита по объему ванны и его однородного химического состава использовался воздушный барботаж, который обеспечивался лабораторным компрессором SICOLAB 025 mini. Импульсный ток, подававшийся на обрабатываемую деталь через систему подводных проводов, формировался блоком питания, подключенным к промышленной сети переменного тока напряжением синусоидальной формы с номинальным значением частоты 50 Гц и номинальными действующими значениями напряжений 380 В. Исследование проводилось на деталях из алюминиевого сплава Д16. В качестве электролита использовался раствор щелочи NaOH и жидкого стекла, а в качестве основы была взята вода. Концентрация щелочи была выбрана 2 г/л, так как при данном значении происходит практически равномерное распределение разности потенциала по поверхности изделия, что обеспечивает равномерную толщину сформированного керамического слоя при отсутствии разрушительных для него мощных электрических дуговых разрядов [6]. Выбранная концентрация жидкого стекла, а именно 6 г/л, позволяет формировать в созданных отверстиях слой оксида кремния с оксидом алюминия через заполнение их и служит определенным фактором ингибирования электрохимической коррозии. Температура электролита при МДО поддерживалась в пределах 15–20 °С. В данном диапазоне температур формируется композиционное керамическое покрытие с высокой микротвердостью (10–20 ГПа)[4]. Плотность тока поддерживалась равной 10 А/дм². Для отвода продуктов химической реакции использовалась вытяжная система, оборудованная вентилятором ERA PROFIT 4 86-383. Для предварительной перфорации поверхности образца использовался станок электроискровой прошивочный.

Результаты исследования. В начале обработки поверхность алюминия подвергается анодному растворению, происходит ее пассивация и 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 на создание химических соединений из элементов, содержащихся в электролите на поверхности обрабатываемого образца. В электролите всегда имеется небольшое количество химических элементов, препятствующих пассивации поверхности алюминия и образованию оксидной пленки, в результате чего при определенных

условиях могут возникнуть очаги электрохимической коррозии. Это влияет на выбор перфорации поверхности.

Размер и конфигурация отверстий обусловлены следующими факторами. При диаметре углублений менее 0,3 мм доступ электролита к его внутренней поверхности и, соответственно, отвод газов при МДО затруднен, что не позволяет существенно увеличить толщину керамического слоя. Если диаметр их больше 0,6 мм, то осаждаемый из состава электролита слой оксида кремния и оксид алюминия не заполняют полностью все отверстие, что приводит к воздушным разрывам в керамическом слое. Это может вызвать снижение несущей поверхности детали и, как следствие, потерю работоспособности изделия при его последующей эксплуатации. Нанесение углублений на поверхности изделия глубиной менее 0,7 мм не имеет особого практического смысла, так как не дает существенного прироста толщины керамического слоя. Если же их размер превышает 1,3 мм, то высока вероятность образования очагов электрохимической коррозии в толще керамического слоя на поверхности изделия, что снижает как адгезию покрытия к основному материалу изделия, так и его прочность.

Большую роль для формирования упрочненного покрытия играет взаимное расположение углублений на поверхности детали. При нанесении их на расстоянии более 0,6 мм друг от друга при МДО в полученных выступах останется слой основного материала – алюминия, и, следовательно, сформированный керамический слой будет неравномерным по толщине и неоднородным по химическому составу, что существенно влияет на его физико-механические свойства. При создании углублений на поверхности на расстоянии менее 0,3 мм от одного до другого при МДО будет значительно уменьшено содержание модификации оксида алюминия в керамическом слое, обладающей высокой микротвердостью (до 24 ГПа), за счет возрастания доли оксида кремния. Это существенно снижает физико-механические характеристики керамического слоя. С целью получения изотропного состава керамического слоя отверстия наносились в шахматном порядке. Для сравнения микротвердости и толщины керамического слоя одновременно с перфорированным образцом МДО выполнялось на образце без перфорации. Микродуговое оксидирование проводилось в течение 3,5 ч для того, чтобы исключить возникновение мощных микродуговых разрядов, которые могут разрушить керамический слой. Результаты представлены в таблице.

Установлено, что несквозная перфорация существенно увеличивает возможность формирования керамического слоя на образце с толщиной, пропорциональной глубине отверстий. Однако с учетом того, что они преимущественно заполняются оксидом кремния, микротвердость покрытия несколько снижается.

Влияние перфорации поверхности образца на характеристики
керамического покрытия

Геометрические размеры перфорации			Образец с перфорацией		Образец без перфорации	
Диаметр отверстия, мм	Глубина отверстия, мм	Расстояние между отверстиями, мм	Микротвердость, ГПа	Толщина, мм	Микротвердость, ГПа	Толщина, мм
0,3	0,5	0,3	15,9	0,51	17	0,11
	0,9		15,6	0,92		
	1,3		14,9	1,31		
	0,5	0,45	16,2	0,51		
	0,9		15,6	0,92		
	1,3		15,1	1,31		
	0,5	0,6	16,4	0,51		
	0,9		15,9	0,92		
	1,3		15,5	1,31		
0,45	0,5	0,3	16,1	0,52		
	0,9		15,6	0,93		
	1,3		15,1	1,32		
	0,5	0,45	16,3	0,52		
	0,9		15,4	0,93		
	1,3		15,0	1,32		
	0,5	0,6	16,5	0,52		
	0,9		16,1	0,93		
	1,3		15,7	1,32		
0,6	0,5	0,3	16,2	0,55		
	0,9		15,8	0,94		
	1,3		15,5	1,33		
	0,5	0,45	16,5	0,55		
	0,9		16,2	0,94		
	1,3		15,8	1,33		
	0,5	0,6	16,7	0,55		
	0,9		16,4	0,94		
	1,3		16,1	1,33		

Заключение. Несквозная перфорация детали перед МДО пропорционально увеличивает на поверхности толщину получаемого композиционного керамического слоя, состоящего из оксидов алюминия и кремния. Тем самым можно увеличить ресурс работы узла трения, несмотря на некоторое снижение физико-механических свойств керамического слоя.

Библиографический список

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

2. Болотов, А.Н. Синтез абразивных инструментов с алмазным керамическим покрытием для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – DOI: 10.31044/1994-6260-2020-0-4-30-37. – Текст : непосредственный // Все материалы. Энциклопедический справочник.– 2020. – № 4. – С. 30-37.

3. Болотов, А.Н. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-59-68. – Текст : непосредственный // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 59-68.

4. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование теория, технология, оборудование : монография / И.В. Суминов. – Москва : ЭКОМЕТ, 2005.– 352 с. – Текст : непосредственный.

5. Патент № 2581956 Российская Федерация, МПК C25B 11/06 (2006.01), C25D 11/16 (2006.01). Способ нанесения керамического покрытия на алюминий и его сплавы : № 2014154500/02 : заявл. 30.12.2014 : опубл. 20.04.2016 / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Рачишкин А.А. – 5 с. – Текст : непосредственный.

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

УДК 621.891

Д.А. Зоренко

Тверской государственный технический университет

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМАХ ИЗНАШИВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

© Зоренко Д.А., 2022

В статье представлен обзор современных представлений о механизмах изнашивания подвижных элементов узлов трения. Рассмотрены основные лабораторные и аналитические методики контроля и расчета интенсивности износа поверхностей трения деталей машин.

Ключевые слова: пара трения, износ, интенсивность линейного износа, коэффициент трения, поверхность трения, дорожка трения, профилограмма, параметры шероховатости поверхности.

MODERN IDEAS ABOUT THE MECHANISMS OF WEAR OF MOVABLE ELEMENTS OF FRICTION UNITS

The article presents an overview of modern concepts of the mechanism of wear of movable elements of friction units. The main laboratory and analytical methods for monitoring and calculating the intensity of wear of friction surfaces of machine parts are considered.

Keywords: friction pair, wear, linear wear intensity, coefficient of friction, friction surface, friction track, profilogram, surface roughness parameters.

Процесс изнашивания поверхностей при трении в подвижных соединениях элементов технических устройств очень распространен. Прогресс в области знаний об изнашивании подвижных деталей позволил в десятки раз увеличить срок службы существующих образцов техники по сравнению с устройствами первой половины двадцатого века. Современные знания позволяют существенно повысить мощность, плавность, комфорт, производительность, эффективность и ресурс технических устройств без частого и сложного технического обслуживания. Процесс изнашивания при трении был признан одним из самых значимых факторов, влияющих на работоспособность и долговечность технического устройства. Таким образом, контроль и прогнозирование величины износа крайне необходимы для создания передовых и высокоэффективных технических устройств и перспективных технологий.

В настоящее время существует большое количество терминов, используемых для описания процесса износа, и они не всегда четко дифференцированы. Это иногда делает понимание механизмов износа запутанным и трудным. Необходимо приложить достаточно большие усилия для достижения большей ясности в подходе к анализу механизмов изнашивания.

Износ чаще всего исследуют с точки зрения определенных видов контактного взаимодействия твердых поверхностей. На практике существует множество различных комбинаций контактов, а также большое разнообразие морфологии изношенных поверхностей при различных условиях эксплуатации. Кроме того, процесс износа сопровождается постоянным образованием свободных твердых частиц, которые иногда в результате химических взаимодействий с окружающей средой превращаются в твердые частицы абразива, активно воздействующие на контактирующие поверхности. В общем виде износ в таком виде контактов описывается как износ скольжения, износ качения, ударный износ, фреттинг-износ или шламовый износ. Все эти виды износа являются техническими и основаны на виде фрикционного контакта. Указанные механизмы изнашивания не являются общепринятыми с научной точки зрения, а описывают износ с точки зрения вида контактного взаимодействия, свойств материалов и параметров окружающей среды.

Обычно в качестве основных механизмов износа выделяют адгезионный, абразивный, усталостный, коррозионный, или фреттинг-износ и чистое истирание [1–3]. Эти механизмы принято условно разделять на три группы: адгезионного, деформационного и окислительного (химического) износа. Чаще всего при реальной работе технических устройств встречается комбинированный износ.

Существует три качественных способа контроля и определения величины износа. Первый основан на визуальном наблюдении признаков износа: выщербин, царапин, потертостей, отполированных участков на поверхностях трения. Второй способ связан с физическими механизмами, в результате действия которых с трущихся поверхностей удаляется материал и происходит их повреждение, т.е. появляются такие признаки, как адгезия, истирание, расслаивание, окислительные явления. Третий заключается в контроле прочих условий процесса трения: наличия или отсутствия смазочного материала в контакте, вида трения, удельного давления и температуры в месте контакта поверхностей. Все три способа полезны при создании новых технических устройств [9]. Наиболее часто используемыми количественными методами оценки износа являются взвешивание и измерение размеров изношенных поверхностей. Взвешивание часто может быть затруднено, если изношенные объемы невелики по сравнению с весом детали. Износ также может быть неравномерно распределен по поверхности трения, что делает измерение локальных повреждений более актуальным, чем контроль общей потери массы. В лабораторных условиях значительно проще непрерывно регистрировать величину износа, в то время как в реальных условиях это затруднено. Определение механизмов износа и повреждений поверхности является важной частью любой процедуры триботестирования и должно сопровождать процесс измерения значений износа и параметров трения. Поэтому изучение изношенных поверхностей (например, с помощью микроскопии или методов топографии поверхности) становится неотъемлемой частью процедуры качественной и количественной оценки величины износа [4].

Адгезионный износ представляет собой режим износа, возникающий, как правило, при контакте пластичных материалов. В случае пластичного контакта между поверхностями трения возникают адгезионные связи. Чаще всего это ведет к вырыванию объема материала поверхности трения. Молекулярная, или адгезионная, теория изнашивания наибольшее распространение получила в трудах W.B. Hardy и Б.В. Дерягина. W.B. Hardy отметил, что даже монослой смазки уменьшает трение, и это вызвало серьезные сомнения в правильности идеи о том, что трение происходит только из-за соударения неровностей. Гипотеза адгезии была лучшей альтернативой в 1930-х гг., хотя было неясно, какие химические вещества – поверхности или субстрата – принимали участие в процессе адгезии. Адгезионную теорию следует считать неполной, поскольку до сих пор она

не определяла реальные значения коэффициента трения. Согласно мнению, принятому в техническом сообществе, трение увеличивается, когда шероховатость поверхности превышает примерно 100 микродюймов, хотя надежных данных, подтверждающих это, недостаточно [4, 5]. Все металлы, контактировавшие друг с другом в вакууме и предварительно очищенные от оксидных пленок, образуют прочные соединения. При трении полиэтилена по чистому стеклу или металлу остается полимерный след в виде тонкой пленки, что указывает на адгезионную связь между полимерной пленкой и стеклом или металлом. При этом связь так же прочна, как когезионные связи внутри полимера. Это предмет текущих исследований в области материаловедения, направленных на более точное определение влияния адгезионной составляющей трения на износ поверхностей деталей машин [4].

В случае пластического контакта между острыми элементами микрогеометрии или частицами твердого материала и относительно мягкой поверхностью происходит внедрение твердых частиц в мягкую поверхность. При этом предполагается, что износ представляет собой процесс микрорезания твердыми элементами более мягкого материала (износ в этом случае называется абразивным). При этом учитывается профиль, а в идеале и топограмма контактирующих поверхностей, но не принимается во внимание адгезионная составляющая [6].

В случае контакта поверхностей в приработанном состоянии после повторных циклов трения образуется усталостное разрушение. Когда разрушение поверхности вызвано усталостью, возникающий в результате износ называется усталостным. Общий вывод состоит в том, что процессы износа обусловлены знакопеременными циклическими напряжениями и деформациями при трении, следовательно, поверхностные слои материала разрушаются при специфических условиях контактного взаимодействия. При этом повреждение сопряжения и разрушение материала при трении скольжения называют усталостью скольжения, а при трении качения – усталостью качения. Процесс эрозионного износа и разрушения при динамическом воздействии твердых частиц или капель жидкости на поверхность называется ударной микроусталостью или эрозионной усталостью [5].

Таким образом, основным процессом, возникающим при трении и приводящим к износу, является механическое взаимодействие поверхностей твердых тел при знакопеременной деформации сдвигом. Этот процесс сопровождается многими производными явлениями, имеющими механическую, физическую и химическую природу [4–6].

В случае контакта рабочих поверхностей пары трения с агрессивными средами происходит ускоренная трибохимическая реакция. При этом трибохимическая реакция в агрессивных средах сопровождается удалением материала детали (такой процесс называется коррозионным износом).

В воздухе наиболее агрессивным элементом является кислород, а трибохимический износ металлов на воздухе обычно называют окислительным износом. Усталостный и коррозионный износ может возникать как при пластическом, так и при упругом контактах. Удаление материала при адгезионном, абразивном или усталостном износе определяется деформацией и разрушением в области контакта, где виды разрушения являются усталостными, хрупкими или пластичными. Таким образом, этот вид износа обычно называют механическим износом. Удаление материала при коррозионном износе определяется скоростью нарастания поверхностной химической реакции за счет трения деформации, фрикционного нагрева, после чего следуют микроразрушение и последовательное удаление продуктов трибохимической реакции. Такой вид износа обычно называют химическим или трибохимическим износом. В некоторых случаях удаление материала определяется плавлением поверхности, вызванным фрикционным нагревом, или растрескиванием, вызванным термическими напряжениями. Эти виды износа принято называть термическим износом, где главными факторами являются фрикционный нагрев и местная высокая температура. Макроскопические классификации (с точки зрения механического, химического и термического износа) полезны для всестороннего понимания процесса износа, так как в эти три вида включены почти все модели износа.

Одним из важных механизмов износа является чистое истирание, которое представляет собой нарезание канавок твердыми частицами или твердыми неровностями на контрповерхности. Этот вид износа наиболее тщательно изучен. По сравнению с другими видами износа аналитические модели, разработанные для описания истирания, намного более надежны и точны, что облегчает интерпретацию результатов трибоиспытаний. При чистом истирании наблюдается линейная зависимость между объемом продуктов износа и путем трения (до тех пор, пока абразивный износ незначителен), что значительно упрощает анализ (в отличие от многих других вариантов скользящего контакта). Существенное уменьшение скорости износа происходит в случае, когда твердость образца превышает твердость абразивных частиц [5, 6].

Большое внимание исследователи уделяют процессам износа с точки зрения механизма удаления части материала с поверхности трения путем смещения или повреждения. Было замечено, что износ, связанный с потерей материала, обычно происходит за счет формирования и удаления частиц износа, а не за счет потери отдельных атомов. Как следствие, большинство теоретических обоснований механизмов износа построено вокруг таких понятий, как хрупкое разрушение, пластическая деформация, усталость и когезия, а также нарушение адгезии в сопряжениях. Существуют и примеры износа, при которых изнашиваемая поверхность теряет атомы. К таким примерам можно отнести износ электрических контактов,

сопровождающийся искрением. В этом случае материал может удаляться как результат дугового процесса, который обычно представляет собой поток удаляемых атомов. В современном машиностроении атомарный износ становится более важными в связи с расширением применения и эволюцией микроэлектромеханических устройств (MEMS). Вследствие чувствительности MEMS даже к очень незначительному износу, они могут стать причиной сокращения срока службы технической системы в целом [9].

Общей отправной точкой в анализе объема изношенного материала часто является закон Арчарда, который в современной науке обозначается как закон Рейе – Арчарда – Хрущева. Это уравнение износа, согласно которому объем износа w прямо пропорционален произведению нагрузки P в контакте на длину пути трения s и на безразмерный коэффициент износа K и обратно пропорционален твердости поверхности трения H наиболее мягкого изнашиваемого материала:

$$w = \frac{PsK}{H}.$$

Коэффициент износа является эмпирическим, определяется экспериментальным путем и зависит от качества контактирующих поверхностей, химического сродства материалов поверхностей и их твердостей [8].

Развивая теорию износа Рейе – Арчарда – Хрущева, можно предположить, что анизотропное трение вызывает анизотропный износ, т.е. объем удаляемой массы зависит от направления скольжения. Анизотропия процесса трения возникает в результате анизотропии шероховатости контактирующих поверхностей деталей машин, формирующейся в процессе механической обработки. Скорость анизотропного износа зависит от нормального давления, скорости скольжения и направления скольжения.

S. Bahadur в 1978 г. представил 13 аналитических выражений для определения износа, полученных в период 1937–1974 гг. Ранние модели износа связывали объем продуктов износа только с твердостью контактирующих материалов. В 1995 г. К.С. Ludema обнаружил более 300 уравнений износа, опубликованных в период с 1955 по 1995 гг. Эти уравнения содержали большое количество независимых переменных. Для оценки износа в этих уравнениях использовалось 625 переменных. К.С. Ludema в 1995 г. выделил три основных группы уравнений износа: эмпирические; феноменологические; уравнения, основанные на механизмах разрушения материалов. К.С. Ludema в 1996 г. классифицировал переменные уравнений износа следующим образом: переменные из механики жидкости, переменные из механики твердого тела, переменные из материаловедения, переменные из химии. Несмотря на это, в настоящее время самым распространенным и признанным аналитическим инстру-

ментом количественной оценки износа является закон Рейе – Арчарда – Хрущева, представляющий собой удобную расчетную модель [7].

В представленной статье рассмотрены основные виды и механизмы износа, принятые современной наукой о трении. Проведен обзор адгезионного, абразивного, усталостного и трибохимического износа. В реальных условиях работы трибосопряжений, как правило, одновременно участвуют несколько видов, один из которых превалирует. В некоторых случаях во время работы узла в результате износа поверхностей трения основной вид износа является переменным. Кроме этого, износ зависит от различных параметров системы, таких как масса, форма, нагрузка, свойства материала, свойства окружающей среды и т.д. Следовательно, расчет и прогнозирование интенсивности износа можно считать многопараметрическими сложными задачами. Количественное прогнозирование износа все еще далеко от реализации. Существующие количественные модели ограничены топологией взаимодействующих поверхностей и зависят от свойств материала. Они часто требуют экспериментального определения эмпирических коэффициентов, которые могут быть установлены только в ходе самого испытания на износ и поэтому являются самореферентными. Следовательно, наиболее важной прикладной научной задачей выступает определение основного, преобладающего вида износа и его типичного механизма. Кроме этого, не менее важной задачей является поиск путей приведения процесса изнашивания деталей пары трения к одному виду за счет исключения остальных видов изнашивания.

Библиографический список

1. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с. – Текст : непосредственный.
2. Демкин, Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. – Москва : Наука, 1970. – 228 с. – Текст : непосредственный.
3. Review on tribological wear test rigs for various applications / Tarek Mhd Moataz Albawab, Umar Nirmal, Isa Halim [and etc.]. – Текст : непосредственный // *International Journal of Integrated Engineering*. – 2018. – Vol. 10. – № 8. – P. 202-217.
4. Ludema, K.C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology / K.C. Ludema. – Текст : непосредственный // *CRC Press LLCTJ 1075.L84*, 1996 – P. 20.
5. Sosnovskiy, L.A. Tribo-fatigue wear-fatigue damage and its prediction / L.A. Sosnovskiy / L.A. Sosnovskiy – Текст : непосредственный // *Foundations of Engineering Mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – P. 341.
6. Adachi, K. Wear mechanisms / K. Adachi, K. Kato. – Текст : непосредственный // *Modern Tribology. Handbook. Principles of Tribology*. – CRC Press. – 2000. – P. 275-300.
7. Zmitrowicz, A. Wear patterns and laws of wear – a review / A. Zmitrowicz. – Текст : непосредственный // *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. Warsaw. – 2006. – № 44. – P. 219-253.

8. Williams, J.A. Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach / J.A. Williams. – Текст : непосредственный // Wear. – 1999. – P. 225-229.

9. Bayer, R.G. Mechanical wear fundamentals and testing / R.G. Bayer. – Revised and Expanded. – New York: Marcel Dekker, 2004. – P. 395. – Текст : непосредственный.

УДК 621.315

В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, М.В. Новоселова
Тверской государственный технический университет

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЧАСТЬ 1

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф.,
Новоселова М.В., 2022

Приведено описание испытательного комплекса для исследования фрикционных и электрических характеристик материалов контактных пар скользящих слаботочных электрических контактов. Описана конструкция экспериментальной установки, моделирующей условия работы контактных пар *щетка – коллектор микродвигателей постоянного тока*, приведена методика исследования триботехнических свойств электроконтактных материалов для щеточно-коллекторного узла.

Ключевые слова: электроконтактные соединения, электроконтактные материалы, фрикционные характеристики.

THE SYSTEM OF EQUIPMENT FOR TESTING OF ELECTROFRICTIONAL CONNECTIONS PART 1

The description of the test system for studying the frictional and electrical characteristics of the materials of contact pairs of sliding low-current electrical contacts is given. The design of the experimental setup that simulates the operating conditions of brush-collector contact pairs of DC micromotors and a technique for studying the tribotechnical properties of electrical contact materials for the brush-collector assembly are described.

Keywords: electrical contact connections, electrical contact materials, friction characteristics.

Электрические контакты являются широко распространенной ответственной функциональной составляющей практически любого современного технического устройства. С точки зрения трибологии большинство электроконтактных соединений можно рассматривать как специфические триботехнические узлы, выполняющие, помимо всего прочего, функцию передачи электрического тока [1–3]. Номенклатура, условия эксплуатации, нормативные требования к подобным соединениям чрезвычайно широки, в

связи с чем часто возникает необходимость в разработке новых оригинальных и модернизации существующих стандартных методик и аппаратуры для триботехнических испытаний токопроводящих узлов трения. Описанию некоторых таких установок и экспериментальных методик посвящена данная публикация.

**Испытательный комплекс для исследования
фрикционных характеристик
скользящих слаботочных электрических контактов
и электроконтактных материалов**

Испытательный комплекс предназначен для испытаний скользящих электрических контактов в диапазоне слабых и средних токов. Он включает в себя двухпозиционный микротрибометр и пятипозиционный стенд для испытаний электрических контактов на трение, изнашивание и проводимость, а также необходимую измерительную и командно-исполнительную аппаратуру и источники питания.

В основу конструкции микротрибометра положена схема трения *сфера (пальчиковый образец со сферическим окончанием) – плоскость*. Сферический образец совершает возвратно-поступательное движение относительно плоского. Принципиальная схема установки изображена на рис. 1.

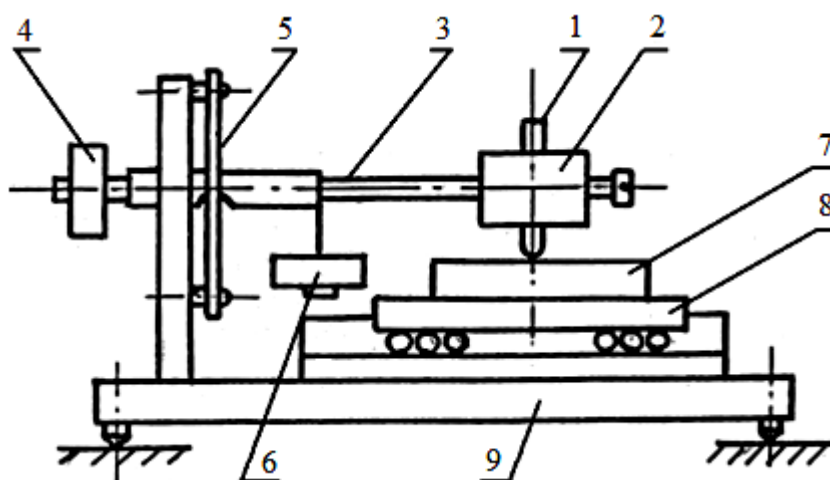


Рис. 1. Схема микротрибометра

Пальчиковый образец 1 устанавливается в держатель 2 на балке 3 и уравнивается противовесом 4. Балка с образцом опирается на тензобалку 5 через ножевой контакт. Нормальная нагрузка на контакт прикладывается с помощью гирь 6. Нижний образец 7 устанавливается на каретке 8, совершающей возвратно-поступательное движение в шариковых направляющих относительно станины 9. Каретка приводится в движение от реверсивного электродвигателя с редуктором через ременную передачу (на

схеме не показаны). На тензобалке с двух сторон наклеены тензодатчики для измерения силы трения.

Предусмотрены следующие режимы испытаний:

нормальная нагрузка $N = 0,2-1$ Н;

скорость скольжения верхнего образца $V = 0,6-12$ мм/с;

сила тока через контакт $I = 0,01-1$ А.

При необходимости схема трения *сфера – плоскость* может быть заменена на схему *плоскость – плоскость*. В этом случае верхний образец 10 изготавливается в виде таблетки диаметром 8–10 мм с конусообразной выемкой по оси (рис. 2, нумерация частей образца соответствует нумерации на рис. 1). Пальчиковый образец сферическим окончанием помещается в конусообразную выемку верхнего образца – таблетки, что обеспечивает ее самоустановку относительно нижнего плоского образца. На каретку может устанавливаться нагревательная камера для испытания скользящих контактов в диапазоне температур 20–150 °С.

На микротрибометре предусмотрено измерение эксплуатационных характеристик контакта: переходного электрического сопротивления, динамической нестабильности переходного сопротивления, коэффициента трения, динамической нестабильности коэффициента трения, линейной интенсивности изнашивания образцов.

Переходное сопротивление определяется как частное от деления переходного падения напряжения в контакте ΔU на силу тока через контакт I . Схема измерения переходного сопротивления приведена на рис. 3. Постоянный ток I подводится к верхнему (пальчиковому) образцу и к нижнему плоскому образцу от стабилизированного источника постоянного тока, падение напряжения измеряется микровольтметром постоянного тока или цифровым вольтметром.

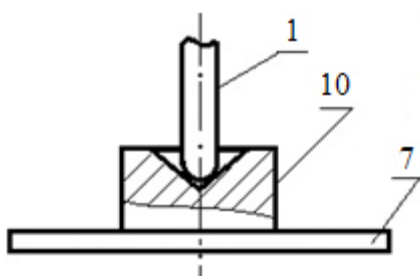


Рис. 2. Схема пары трения
плоскость – плоскость

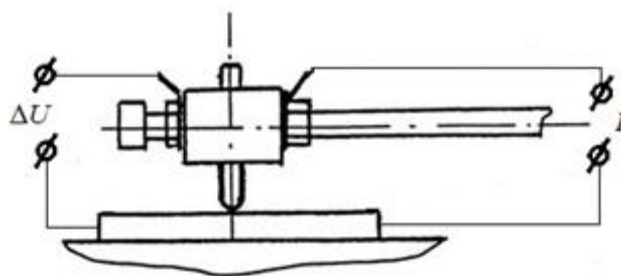


Рис. 3. Схема измерения
переходного сопротивления контакта

Падение напряжения на разомкнутых контактах при исследовании слаботочных контактов не превышало 20 мВ. При исследовании контактов, рассчитанных на коммутацию средних токов, такое ограничение не применялось. Для исключения влияния термо-ЭДС измерения переходного сопротивления проводили при двух противоположных

направлениях тока через контакт. Для контроля при величинах переходного сопротивления больше 1 мОм измерения выполнялись и на переменном токе частотой 400 Гц.

Динамическую нестабильность переходного сопротивления оценивали по формуле

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}}{\Delta U_{\text{cp}}}$$

Сила трения определялась с помощью тензобалок (см. рис. 1), на которые наклеены тензодатчики, образующие активный полумост, подключенный к тензоусилителю с выходом на регистрирующий прибор. В процессе перемещения верхнего сферического образца по нижнему плоскому непрерывно фиксировали динамику изменения силы трения. В соответствии с ГОСТ 27674-88 коэффициент трения определяли как частное от деления силы трения на нормальную нагрузку, задаваемую гирями.

Динамическую нестабильность коэффициента трения и силы трения находили аналогично динамической нестабильности переходного сопротивления:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta F_{\text{тр}}}{F_{\text{тр}}} = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\text{cp}}}$$

Линейную интенсивность изнашивания плоской контакт-детали определяли по глубине следа (канавки) износа. Глубина канавки износа h измерялась от средней линии неизношенной части шероховатой поверхности плоской контакт-детали по профилограмме, записанной на профилографе-профилометре. Линейную интенсивность изнашивания рассчитывали по формуле

$$I_{\text{лил}} = 0,75 \frac{h}{L_{\text{тр}}} = 0,75 \frac{h}{n_{\text{ц}} l_{\text{тр}}},$$

где $L_{\text{тр}}$ – путь трения; $n_{\text{ц}}$ – число проходов сферической контакт-детали по плоской; $l_{\text{тр}}$ – длина дорожки трения.

Линейную интенсивность изнашивания сферической контакт-детали определяли по измеренному под микроскопом диаметру пятна износа по формуле

$$I_{\text{исф}} = 0,1 \frac{d^2}{RL_{\text{тр}}} = 0,1 \frac{d^2}{Rn_{\text{ц}} l_{\text{тр}}},$$

где R – радиус закругления сферической контакт-детали.

Пятипозиционный стенд разработан на базе измерительного механизма быстродействующего самопишущего вольтметра. В основу положена схема трения *сфера (пальчиковый образец) – плоскость*. Принцип

действия основан на возвратно-поворотном перемещении тензобалок с закрепленными пальчиковыми образцами при воздействии на измерительную систему магнитного потока управления, создаваемого выходным током генератора сигналов специальной формы. Меняя частоту генератора, можно изменять скорость скольжения в испытываемом контакте.

Установка обеспечивает следующие режимы испытаний:

нормальная нагрузка $N = 0,05-0,20$ Н;

скорость скольжения верхнего образца $V = 0-400$ мм/с;

сила тока через контакт $0,01-1,00$ А.

Методика измерения электрических и фрикционных характеристик контакта аналогична тем, которые описаны выше для микротрибометра.

Установка для исследования фрикционных и электрических характеристик материалов щеточно-коллекторного узла

Установка предназначена для испытаний и выбора оптимального материала щеток для микроэлектродвигателей постоянного тока. Она обеспечивает следующие режимы испытаний:

плотность тока в контакте $j \leq 75$ А/см²;

частота вращения коллектора 1 000–10 000 об/мин;

линейная скорость скольжения в контакте $V = 0,1-9,0$ м/с;

номинальное давление в контакте $p_n \leq 200$ кПа.

Общий вид установки представлен на рис. 4а, а на рис. 4б показана конструкция непосредственно модели щеточно-коллекторного узла (одна и та же деталь на рис. 4а и 4б имеет один и тот же номер). Для исключения погрешностей при измерении малых моментов трения в контакте *щетка – коллектор* система измерения силы трения выполнена безопорной (т.е. без подшипников). Оси щеткодержателей расположены на линии действия силы трения. Установка позволяет измерять в динамике силу трения, переходное падение напряжения при известной силе тока, скорость вращения образца-коллектора, величины износа щетки и коллектора. Нормальная нагрузка задается гирями, что обеспечивает ее постоянство.

Установка включает в себя станину 10, привод 8, измерительную систему и систему тарировки (рис. 4а). Станина состоит из основания и двух стоек, в которых имеются отверстия диаметром 30 мм. В одной стойке винтом 2 крепится измерительная система, в другой – привод. Соосность отверстий обеспечена их совместным растачиванием в собранном виде. Привод – микродвигатель постоянного тока, на выходном валу которого через изолирующую втулку жестко закреплен короткозамкнутый коллектор 9. Биение коллектора устраняется проточкой его на токарном станке. При этом микродвигатель зажимается в патрон станка (неподвижный), а коллектор приводится во вращение микродвигателем.

Измерительная система установки состоит из двух щеток 14, закрепленных винтами на щеткодержателях 13. Щеткодержатели имеют возможность поворачиваться на осях 12, жестко зафиксированных на диске 6. На щеткодержателях закреплены тензобалки 7, упирающиеся в винты 11. Измерение силы трения производится трехлепестковой тензобалкой, состоящей из фланца 5, трех упругих элементов 4 и втулки 3, которая крепится в станине.

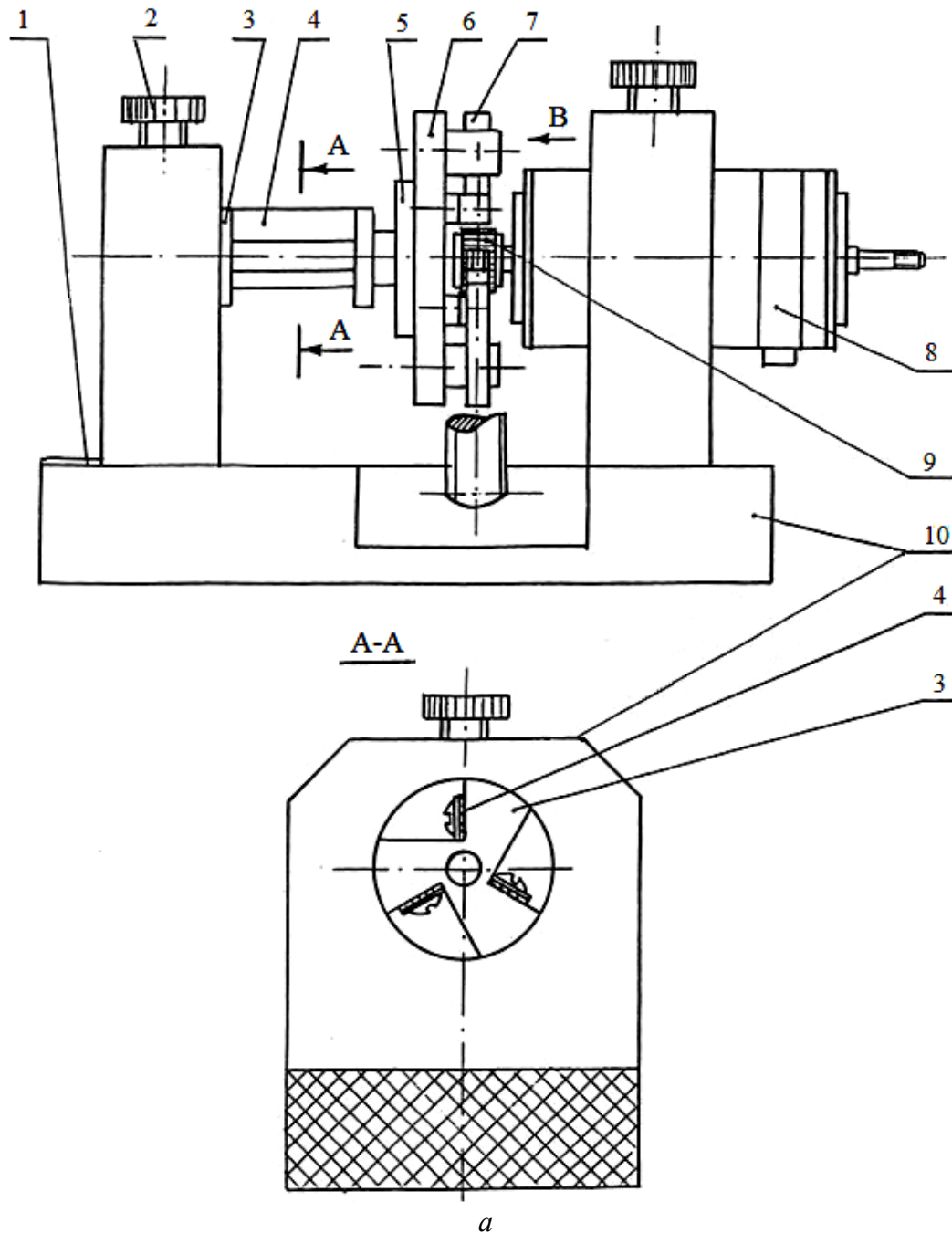


Рис. 4. Схема экспериментальной установки (а) и модели щеточно-коллекторного узла (б)

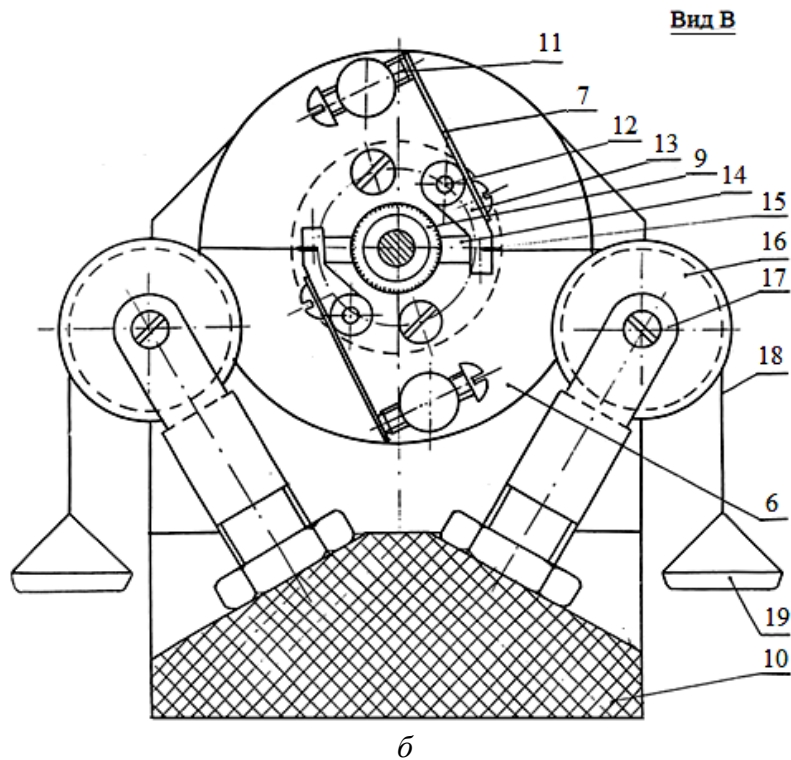


Рис. 4. Продолжение

Момент трения, создаваемый силами трения двух щеток о коллектор, измеряется с помощью тензобалок, расположенных под углом 120° друг к другу. На тензобалки с двух сторон наклеены проволочные тензодатчики, образующие активный полумост измерительной схемы. Сигнал рассогласования с тензодатчиков подается на тензоусилитель, выходной сигнал с которого поступает на регистрирующий прибор. При тарировке системы измерения к диску прикладывается известный вращающий момент, по которому определяется тарировочный коэффициент. Погрешность измерения момента трения не более 10 %.

Система нагружения служит для приложения нормальной нагрузки заданной величины к щеткам, которое осуществляется винтом через тензобалку, жестко зафиксированную на щеткодержателе. На тензобалке с двух сторон наклеены тензодатчики. При нагружении щетки винтом тензобалка изгибается и сигнал рассогласования с тензодатчиков подается на тензоусилитель, выходной сигнал с которого подается на регистрирующий прибор.

Для тарировки системы нагружения служат скобы 15; соединенная шарнирно со щеткодержателем гибкая нить 18, перекинутая через блок 16; регулируемая по высоте стойка 17 и грузы 19 (см. рис. 4б). Увеличивая массу грузов, фиксируют по амперметру момент размыкания электрической цепи *щетка – коллектор*. Таким образом, вес грузов равен усилию нажатия в контакте *щетка – коллектор*.

В конструкции предусмотрена возможность приложения нормальной нагрузки с помощью гири. Для этого тензобалки заменяются на плоскую пружину, один конец которой крепится к щеткодержателю, а к другому привязывается гибкая нить. Стойки регулируются по высоте так, чтобы нить проходила от пружины до блока горизонтально. На нить подвешиваются гири определенного веса.

Система измерения переходного падения напряжения служит для исследования электрических свойств щеточно-коллекторного узла (переходного сопротивления и его нестабильности). При испытаниях через контакт *щетка – коллектор* пропускается ток известной величины. Подвод тока осуществляется проводами, подпаянными к осям. Контактное падение напряжения снимается с верхней омедненной части щеток гибким проводом диаметром 0,15 мм и фиксируется быстродействующим милливольтметром. Погрешность в измерении переходного падения напряжения не более 20 %. Все монтажные провода измерительной системы установки (от тензодатчиков, токовые, потенциальные) проходят внутри фланца втулки и распаиваются на колодку 1 (см. рис. 4а).

Измерение величины линейного износа щетки осуществляли непосредственно под микроскопом от опорной риски, нанесенной на щетку перед испытанием. Измерение величины линейного износа коллектора определяли по профилограмме его рабочей поверхности как разность уровней средней линии шероховатости изношенного и неизношенного участков. Погрешность в измерении величины износа составляла не более 25 %.

Электрическая схема установки изображена на рис. 5. Микро-двигатель постоянного тока Д питается от источника постоянного напряжения 30 В. Переменный резистор R_1 служит для изменения скорости вращения двигателя. Сопротивление контакта *щетка – коллектор* определяется по величине контактного падения напряжения, измеряемого вольтметром, и величине силы тока через контакт, измеряемой амперметром и регулируемой переменным резистором R_2 .

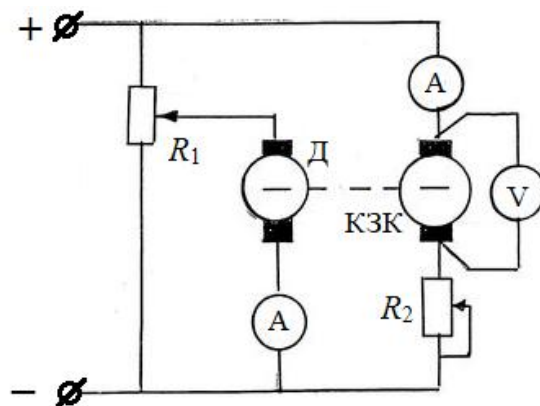


Рис. 5. Электрическая схема установки: КЗК – короткозамкнутый коллектор

Библиографический список

1. Electrical Contacts: Principles and Applications / Ed. by P.G. Slade. – CRC Press, 2014. – DOI: 10.1201/9780585139319. – Текст : непосредственный.
2. Мышкин, Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный : Интеллект, 2008. – 560 с. – Текст : непосредственный.
3. Braunovic, M. Electrical contacts: fundamentals, applications and technology / M. Braunovic, V.V. Konchits, N.K. Myshkin. – CRC Press, 2007. – 646 p. – Текст : непосредственный.

УДК 539.43: 537.311.4

В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, М.В. Новоселова
Тверской государственный технический университет

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЧАСТЬ 2

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф.,
Новоселова М.В., 2022

Продолжено описание конструкций оборудования и методик исследования триботехнических и коммутационных свойств электроконтактных материалов и электроконтактных соединений. Приведено описание конструкции экспериментальных установок для испытания электроконтактных устройств и электроконтактных материалов в режиме граничного трения в условиях высоких температур при атмосферном давлении и в высоком вакууме (до 10^{-4} Па). Установки позволяют исследовать влияние экстремальных условий эксплуатации электроконтактных соединений на процессы трения, изнашивания и контактной проводимости.

Ключевые слова: электрические контакты, трение, контактное сопротивление, температура.

THE SYSTEM OF EQUIPMENT FOR TESTING OF ELECTROFRICTIONAL CONNECTIONS PART 2

The description of equipment designs and research methods for tribotechnical and switching properties of electrical contact materials and electrical connections is continued. A description of the design of experimental installations for testing electrical contact devices and electrical contact materials in the boundary friction mode at high temperatures at atmospheric pressure and in high vacuum (up to 10^{-4} Pa) is given. The installations allow to study the influence of extreme operating conditions of electrical connections on the processes of friction, wear and contact conductivity.

Keywords: electrical contacts, friction, contact resistance, temperature.

Электрические контакты как элементы электрических цепей характеризуются особенностями, которые во многих случаях делают их незаменимыми, – это малое контактное сопротивление в замкнутом состоянии и практически бесконечное в разомкнутом, большая коммутируемая мощность и относительно невысокая стоимость. Разнообразные по конструкции и условиям эксплуатации токопроводящие контактные соединения являются обязательными элементами энергетических установок, электротехнических устройств, систем автоматики, телемеханики и цифровой техники и в значительной степени определяют работоспособность этих сложных и ответственных технических систем в целом. На практике значительная часть токопроводящих узлов работает при повышенных или высоких температурах, и в современной технике их относительное количество постоянно возрастает в связи со стремительным развитием новых технологий и увеличением удельных энергетических нагрузок [1]. Температура сложным образом влияет на эксплуатационные характеристики контакта, особенно скользящего, работающего в условиях трения контакт-деталей. Влиянию температуры подвержены физико-механические свойства и фрикционные характеристики материалов контактов, процессы контактной ползучести, образования и разрушения поверхностных окисных пленок и адсорбированных слоев [2]. Несмотря на большое количество теоретических исследований и достигнутые в данной области успехи, применяемые методы расчета электрических контактных узлов при высоких температурах не всегда позволяют обеспечивать оптимальные эксплуатационные характеристики. В этой связи непосредственные экспериментальные исследования играют значительную роль при решении практических задач повышения надежности и эффективности работы электрических контактов.

В данной работе описаны конструкции специально разработанных экспериментальных установок, приборов и оборудования, которые применяются для испытания и исследования фрикционных электрических контактов и электроконтактных материалов, предназначенных для эксплуатации в условиях высоких температур, а также приводится краткое описание методики проведения испытаний.

Установка для исследования электроконтактных материалов на трение и изнашивание при высоких температурах. В качестве основных эксплуатационных параметров, определяющих качество скользящего электрического контакта, можно выделить переходное падение напряжения (переходное сопротивление), силу трения (коэффициент трения) и износ (износостойкость). Разнообразные возможности для их исследования в достаточно широком диапазоне механических и электрических нагрузок, скоростей и температур предоставляет установка на базе машины трения типа ГП (горизонтальная плоскость). Машина трения была модерни-

зирована для одновременного измерения и синхронной записи регистрирующим прибором значений силы трения и переходного электрического сопротивления в процессе трения скольжения исследуемых образцов. Это позволяет сопоставлять в динамике величины коэффициента трения и контактного электрического сопротивления.

Установка включает в себя узел нагружения образцов с ручным приводом, узел возвратно-поступательного перемещения образца с электроприводом, тензометрический силоизмерительный узел, систему нагрева, электросиловую и измерительную аппаратуру. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

Пара образцов из электроконтактных материалов взаимодействует по схеме торцевого трения по плоскости с коэффициентом взаимного перекрытия, стремящимся к нулю. Нижние образцы 18 исследуемой пары трения закрепляются с помощью зажимов и прокладок из диэлектрического материала в подвижной каретке 15 таким образом, чтобы их плоскость трения была горизонтальна, а сами образцы были электрически изолированы от корпуса машины трения. Каретка приводится в движение по горизонтальным направляющим через передачу «винт – гайка» от реверсивного электродвигателя постоянного тока 13 с тиристорным управлением 16, обеспечивающим плавное бесступенчатое регулирование скорости вращения приводного вала. Скорость вращения измеряется тахометром 14, регистрирующий прибор которого градуирован в единицах скорости линейного перемещения каретки.

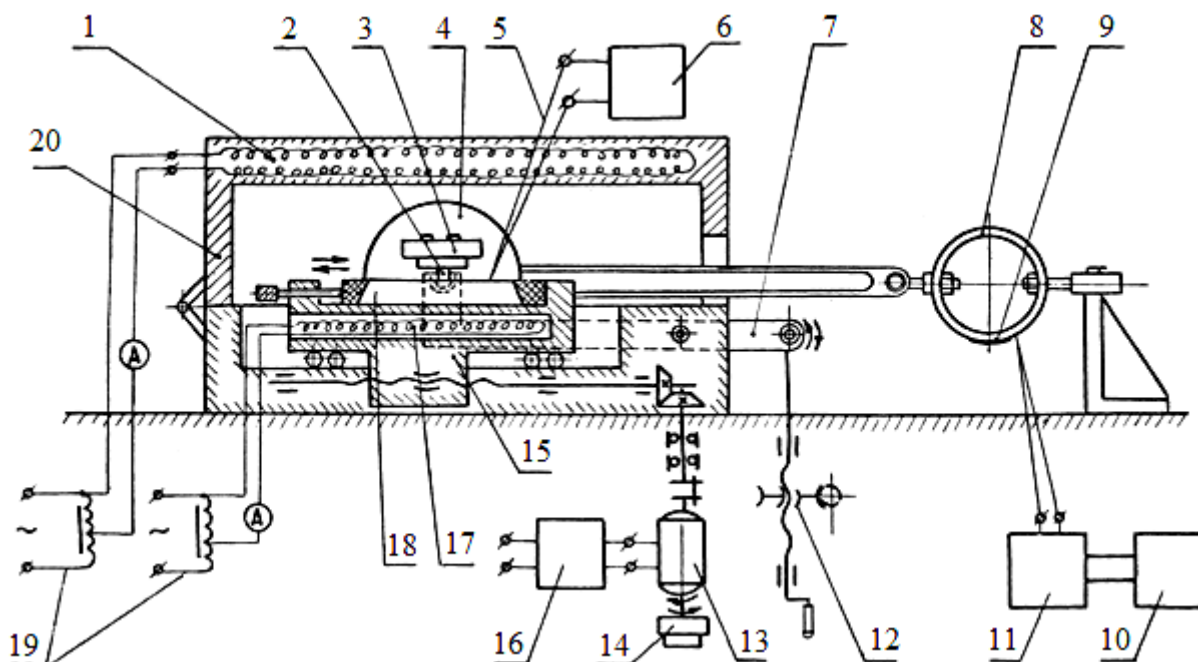


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования электроконтактных материалов при высоких температурах

Верхние образцы 2 исследуемой пары трения укрепляются в оправке 3 тензометрического силоизмерительного узла, который через две тяги соединен шарнирно с упругим кольцом 8, на поверхность которого были наклеены тензодатчики 9. Датчики включены по схеме, обеспечивающей компенсацию деформации кольца в результате термического расширения при нагреве. С диаметрально противоположной стороны тензометрическое кольцо закреплено на стойке, жестко связанной с корпусом машины трения. Деформация упругого элемента (кольца), пропорциональная возникающей в контакте силе трения, измеряется посредством тензодатчиков, сигнал от которых поступает на тензоусилитель 11, а затем на регистрирующий прибор – вольтметр 10. Контакт нагружается с помощью набора грузов 4, устанавливаемых на оси оправки силоизмерительного узла. Нормальная нагрузка на контакт прикладывается с помощью механизма нагружения 7 с червячной парой 12. Для этого оправку с верхним образцом и грузом плавно опускают вручную до полного контакта с нижним образцом.

Выбранная схема нагружения отличается тем, что в процессе трения она обеспечивает стабильную и надежную нормальную нагрузку на контакт, не зависящую от посторонних факторов, так что при дальнейшем расчете коэффициента трения погрешность задаваемой нормальной нагрузки можно считать ничтожно малой. Измерение силы трения тензометрическим методом с помощью сменных упругих элементов (колец) разной жесткости, расположенных между образцом и приводом горизонтального перемещения, имеет определенные недостатки. В процессе перемещения образца при сухом или граничном трении не удается обеспечить плавное скольжение. Наблюдается хорошо известное явление – скачки при трении, т.е. нелинейные автоколебания образца, характеризующиеся некоторой периодичностью. Эти колебания отражаются на диаграмме силы трения. Частота и амплитуда колебаний силы трения обусловлены не только коэффициентом трения и скоростью скольжения, но и конкретными параметрами установки (жесткостью тензометрического кольца и массой каретки с образцом), а значит, косвенно зависят и от нормальной нагрузки, так как последняя задается с помощью гирь, закрепленных на каретке. Анализ математической модели колебаний показывает, что в первом приближении – в предположении постоянной силы трения скольжения – наиболее близкое к истинному значение силы трения скольжения может быть определено по средней линии указанной диаграммы. Экспериментально, путем замены тензометрических колец, была изучена зависимость амплитуды колебаний силы трения от упругости тензометрического кольца и общей жесткости системы. В этих экспериментах наибольший размах колебаний достигал трети среднего

значения, однако не отмечалось явных изменений средних значений силы трения при изменении жесткости системы.

В реальных производственных условиях высокая температура электрического контакта может создаваться как воздействием внешних факторов, связанных с условиями эксплуатации узла, так и в результате фрикционного разогрева при трении или за счет выделения джоулева тепла при протекании электрического тока через контакт. Поэтому для всестороннего экспериментального исследования влияния температурного фактора на характеристики контакта важно поддерживать равномерную и стабильную объемную температуру в окружающем контакт-детали пространстве. Для этого необходимо обеспечивать эффективную систему распределенного нагрева и надежную термоизоляцию в зоне трения и контактирования. В данной установке образцы нагревали до заданной по условиям испытаний температуры электронагревателями, запитанными от автотрансформаторов 19. Один нагреватель 17 был смонтирован внутри каретки для равномерного разогрева нижнего образца и зоны контакта. Нагревательные элементы 1 второй цепи равномерно распределены в верхней и боковых стенках подъемного теплозащитного колпака 20 и защищены от окружающей среды толстым слоем теплоизолирующего материала. В процессе измерений колпак находится в опущенном состоянии и закрывает зону контакта. Требуемая объемная температура в зоне контакта измеряется и автоматически поддерживается в процессе испытаний с помощью потенциометра 6 с хромель-копелевыми термопарами 5 (см. рис. 1).

Контактное электрическое сопротивление измеряется по стандартной четырехпроводной схеме. Electroды, с которых снимается контактная разность потенциалов, зачеканиваются непосредственно вблизи контактной поверхности образцов. Через контакт пропускается постоянный электрический ток, стабильность значения силы тока в ходе измерений непрерывно контролируется с помощью амперметра. При сдвиге образцов регистрирующим прибором производится запись контактной разности потенциалов синхронно с записью силы трения. Для исключения влияния термо-ЭДС измерения контактного падения напряжения выполняются с помощью переключателя при двух направлениях тока через контакт. Для расчета контактного сопротивления принимается среднее значение результатов этих двух измерений.

Описанную установку можно использовать как для экспериментального исследования новых электроконтактных материалов, так и для формирования информационного банка данных – свойств электроконтактных материалов при различных режимах работы, определяемых интенсивностью нагрева, величиной нормального давления, плотностью тока и скоростью скольжения [3]. На описанной установке были, в частности, выполнены сравнительные экспериментальные исследования

фрикционных и коммутационных свойств целого ряда материалов для скользящих электрических контактов при режимах, близких к условиям эксплуатации реальных контактов в токопроводящих узлах большого класса электрических аппаратов [4] при температурах до 150 °С, скоростях скольжения от 0,1 до 1 мм/с и нормальных нагрузках на контакт, обеспечивающих номинальное давление в пределах от 0,1 до 10 МПа.

Установка для исследования электрических контактов при высоких температурах в вакууме. Воздействие высоких температур, существенно влияющих как на электрические, так и фрикционные характеристики контакта, проявляется, в частности, через процессы образования, роста и разрушения поверхностных пленок.

Разработка данной экспериментальной установки была обусловлена необходимостью экспериментально исследовать непосредственное влияние температуры на физико-механические и электрические характеристики контакта, максимально исключив влияние поверхностных окисных пленок на фрикционное взаимодействие и проводимость в контакте. Проведение измерений в вакууме позволяет с помощью предварительной тщательной очистки поверхностей контакт-деталей и последующего прокаливания их в вакууме при высокой температуре удалить как пленки окислов, так и в значительной степени адсорбированные на поверхности слои.

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

Схема включает основные узлы:
систему нагружения образцов,
узел крепления и реверсивного сдвига образцов,
нагреватель с экраном.

Устройство было смонтировано под колпаком в вакуумной камере, что в значительной степени определило требования к его конструкции: возможность создания высоких механических, температурных и электрических нагрузок на контакт образцов в сочетании с предельной компактностью прибора. Вакуумная система откачки установки состоит из форвакуумного вращательного двухступенчатого насоса пластинчато-роторного типа, снабженного газобалластным устройством, и трехступенчатого пароструйного насоса разгонного типа с водяным охлаждением пароструйного насоса. Для управления процессом откачки и измерения вакуума используют клапанную коробку с затвором и вакуумметр.

Пара образцов, образующих исследуемый электрический контакт, взаимодействует по схеме торцевого трения. На рис. 2 показан один из вариантов – для цилиндрических (кольцевых в плане) образцов контактной пары.

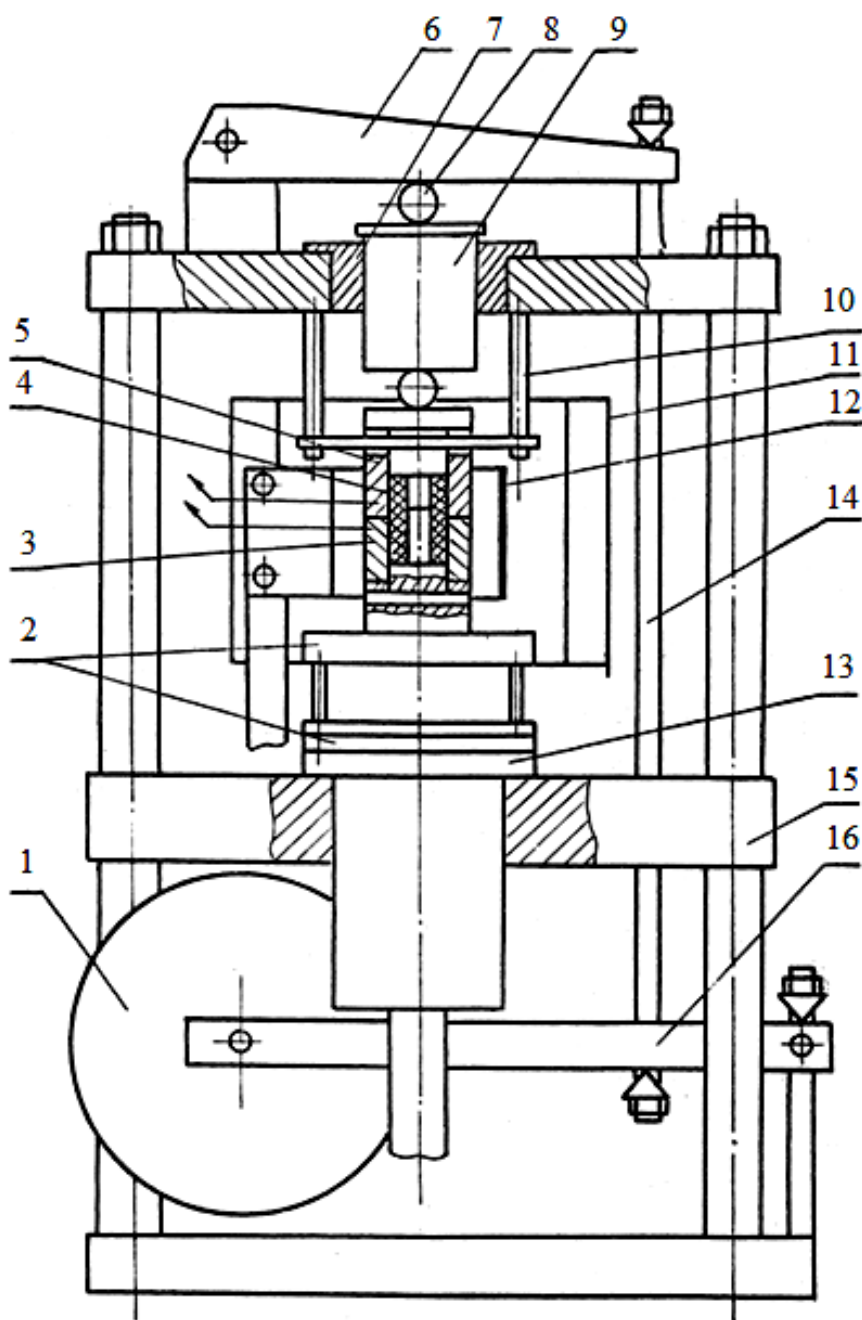


Рис. 2. Принципиальная схема установки для исследования электрических контактов при высоких температурах в вакууме

Нижний образец 3 закрепляется в обойме, которая посредством нескольких фланцев 2 соединена с осью подшипникового узла через набор керамических прокладок и втулок, обеспечивающих электрическую и тепловую изоляцию образца. Подшипниковый узел 13, состоящий из корпуса, упорного и двух радиальных подшипников, крепится на раме прибора 15. Ось узла приводится во вращение от редукторного реверсивного электродвигателя, установленного вне вакуумной камеры, через кривошипно-кулисный механизм и герметизированный ввод вращения (на рисунке не показаны). Верхний образец 5 устанавливается на

торцевую поверхность нижнего образца, центрируется с помощью керамической фиксирующей втулки 4. От вращения относительно вертикальной оси он удерживается стопором поводкового типа 10. Нормальная нагрузка на контакт обеспечивается с помощью сменного комплекта грузов 1. Нагрузку прикладывали через соединенные тягами 14 рычаги 6 и 16, шарики 8 и шток 9, свободно перемещающийся в направляющей втулке 7. Двухрычажная схема нагружения позволила уложиться в габариты, ограниченные размерами вакуумного колпака. Нагрев образцов производили нагревателем 12, выполненным в виде незамкнутого цилиндра из ниобиевой пластины, по которой пропускали электрический ток. Пластина нагревателя монтируется винтами на медных шинах, жестко зафиксированных на вакуумных тоководах. Для минимизации потерь за счет теплового излучения, обеспечения равномерности нагрева образцов и предотвращения перегрева подшипникового узла нагреватель и образцы окружены двойным теплозащитным экраном 11 из медных пластин, соединенным с рамой. Рама закреплена на плите вакуумной камеры, охлаждаемой проточной водой. Температуру образцов измеряли хромель-алюмелевыми термопарами, закрепленными на образцах вблизи контактной поверхности. С помощью термопар контролируется также температура узла крепления и сдвига образцов.

Контактное электрическое сопротивление измеряли по стандартной четырехпроводной схеме. Электроды, с которых снимали разность потенциалов при пропускании постоянного электрического тока через контакт, были зачеканены вблизи контактной поверхности образцов. Результаты измерений при сдвиге непрерывно фиксировались регистрирующим прибором – милливольтметром. Постоянство силы тока в процессе эксперимента непрерывно контролировали с помощью миллиамперметра. Для исключения влияния термо-ЭДС в ходе измерений меняли направление рабочего тока через контакт на противоположное при помощи переключателя в токовой цепи.

Рабочие характеристики прибора:

нормальная нагрузка на образцы 0,3–1,5 кН;

номинальное контактное давление 0,8–4 МПа;

рабочий ток нагревателя 50–100 А;

интервал рабочих температур 300–800 К;

предельный вакуум: при температуре 300 К $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па;
температуре 800 К $3 \cdot 10^{-3}$ Па;

сила тока через контакт до 10 А.

Описанная установка позволяет не только проводить исследования экспериментальных электроконтактных материалов и модельных образцов контактных устройств, но и испытывать соответствующие по габаритам реальные контактные узлы, в которых по условиям эксплуатации

скользящий электрический контакт осуществляется в вакууме, например, электроэнергетических устройств.

Испытания реальных контактных узлов в условиях, близких к фактическим условиям эксплуатации, особенно важны при ограниченных возможностях теоретического расчета характеристик контакта (например, при контактировании поверхностей сложной формы, полупроводниковых материалов, поверхностей с электропроводящими антифрикционными или износостойкими покрытиями, в том числе композиционными, многослойными или с градиентом физических свойств).

Библиографический список

1. Мышкин, Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный : Интеллект, 2008. – 560 с. – Текст : непосредственный.

2. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость : монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. – Тверь : ТГТУ, 2010. – 110 с. – Текст : непосредственный.

3. Гусев, А.Ф. Экспериментальное исследование трения и электропроводности медных контактов при повышенных температурах / А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. – Текст : непосредственный // Саморазвивающаяся среда технического университета: материалы Всероссийской научно-практической конференции (Тверь, 10 февраля 2017 г.). В 3 частях. Часть 2. – Тверь : ТвГТУ, 2017. – С. 8-13.

4. ГОСТ 403-73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов = Electrical apparatus for voltages up to 1000 V. Temperature rise limits of apparatus parts : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 6 апреля 1973 г. № 852 : дата введения : 1974-01-01 : переиздание октябрь 2003 г. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 6 с. – Текст : непосредственный.

УДК 621.315

В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, М.В. Новоселова
Тверской государственной технической университет

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОФРИКЦИОННЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЧАСТЬ 3

© Измайлов В.В., Гусев А.Ф.,
Новоселова М.В., 2022

Приведено описание установки для исследования электроэрозионной износостойкости электроконтактных материалов (ЭКМ). Установка предназначена для сравнительных испытаний образцов ЭКМ в условиях электроэрозионного изнашивания при двух режимах контактного напряжения: переменном – от сети частотой 50 Гц и действующим значением 220 В и постоянном – от емкостного накопителя энергии (конденсатора) емкостью 330 мкФ. Сделан вывод, что экспериментальные величины

удельной эрозии не противоречат теоретическим результатам и сопоставимы по порядку величины с литературными данными.

Ключевые слова: электроконтактные материалы, электроэрозионное изнашивание, сравнительные испытания.

THE SYSTEM OF EQUIPMENT FOR TESTING OF ELECTROFRICTIONAL CONNECTIONS PART 3

The description of the installation for the study of electroerosive wear resistance of electrical contact materials (ECM) is given. The installation is designed for comparative testing of ECM samples under conditions of electrical discharge wear at two modes of contact voltage: a. c. voltage – from a power network with a frequency of 50 Hz and an effective voltage of 220 V) and d. c. voltage – from a capacitive energy storage (capacitor) with a capacity of 330 μF . The experimental values of specific erosion do not contradict the theoretical results and are comparable in order of magnitude with the literature data.

Keywords: electrical contact materials, electrical discharge wear, comparative tests.

При рассмотрении проблемы обеспечения качества и надежности электроконтактных соединений важное место отводится оптимальному выбору материалов контакт-деталей. Несмотря на широкий ассортимент промышленных электроконтактных металлов и сплавов, активно ведутся разработки новых материалов с заданными свойствами. Одним из таких свойств, обязательных для материалов практически всех электроконтактных соединений (кроме сварных и паяных), является высокая электроэрозионная износостойкость.

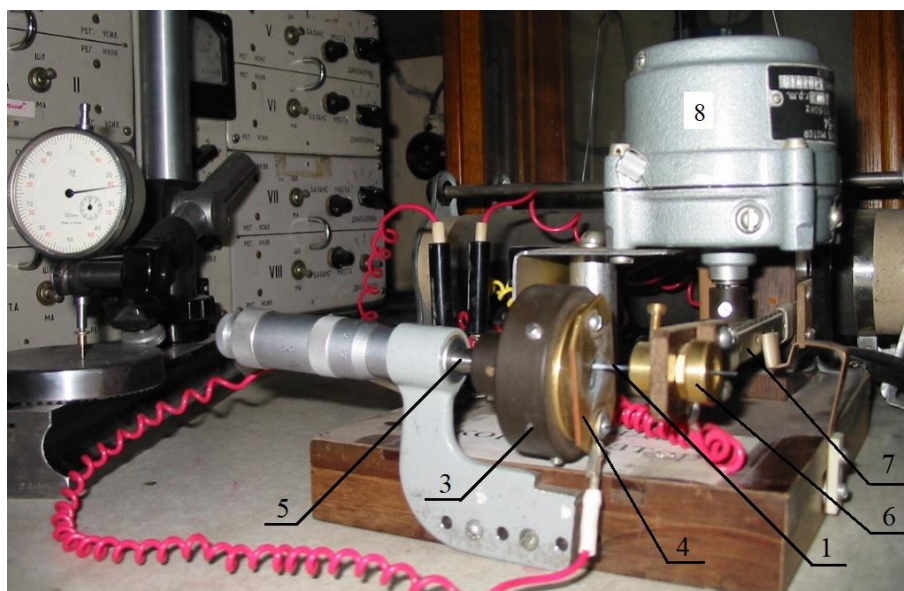
Интерес к изучению процессов электрической эрозии усилился в связи с появлением в 40–50-х гг. XX в. промышленных технологий электроэрозионной обработки материалов [1]. Естественно, что в большинстве публикаций на эту тему внимание уделялось и уделяется прежде всего технологическим аспектам электрической эрозии – режимам обработки, конструкции оборудования, его производительности и т.д. [2–4]. Вопросы влияния энергии электрического разряда на свойства материалов и методики испытаний на электроэрозионное изнашивание в научной литературе изучены в меньшей степени [5–7].

Перспективным направлением оценки качества электроконтактных материалов (ЭКМ) и изделий из них на стадии проектирования и изготовления опытных образцов является метод сравнительных испытаний, так как реализация образцов в общем случае проще, чем проведение определительных испытаний.

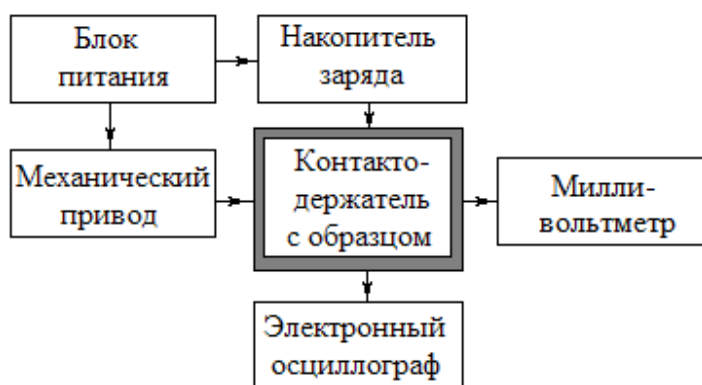
В данной статье приведено описание разработанных авторами экспериментальной установки и методики сравнительных испытаний ЭКМ в условиях электроэрозионного изнашивания [8].

Установка для исследования электроэрозионной износостойкости электроконтактных материалов

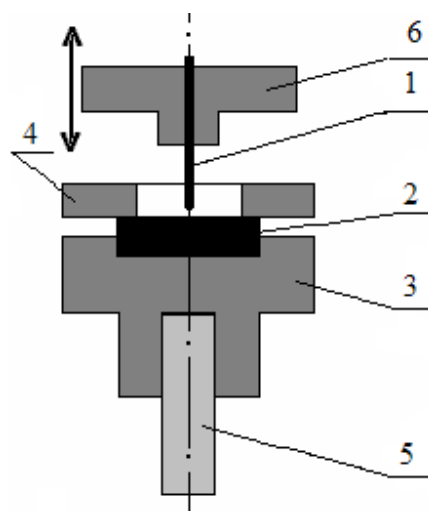
Для сравнительной оценки электроэрозионной износостойкости ЭКМ разработана особая установка (рис. 1). Цилиндрический вольфрамовый электрод 1 диаметром 1 мм периодически контактирует с образцом 2 из исследуемого ЭКМ, помещенным в латунную обойму 3. Образец фиксируется в обойме прижимной пластиной 4 с центральным отверстием, открывающим доступ электрода к образцу. Обойма закреплена на микрометрическом винте 5, с помощью которого можно регулировать как раствор контактов, так и усилие нажатия. Вольфрамовый электрод с помощью держателя 6 крепится к упругой балке 7, жестко прикрепленной к основанию установки.



а



б



в

Рис. 1. Установка для исследования электроэрозионного износа ЭКМ: реальный вид (*а*); блок-схема (*б*); схема рабочего узла (*в*)

Вольфрамовый электрод играет роль эталонного зонда и используется в экспериментах как постоянный элемент контактной пары. Вольфрам выбран в качестве материала зонда по причине его высокой электроэрозионной износостойкости и высокой твердости. Эталонным материалом для сравнительных испытаний на электроэрозионную износостойкость служит электротехническая медь как типичный ЭКМ широкого спектра применения.

К исследуемому контакту прикладывается коммутируемое напряжение от источника питания. В зависимости от поставленных задач используется либо переменное напряжение от сети частотой 50 Гц с действующим значением 220 В и амплитудным значением 311 В либо постоянное напряжение от емкостного накопителя энергии (конденсатора) (рис. 2). Параметры емкостного накопителя энергии: емкость 330 мкФ, максимальный коммутируемый заряд за одну коммутацию 66 мКл.

Применение емкостного накопителя позволяет широко и довольно просто варьировать режимы разряда: энергию, напряжение и т.д. Полученные результаты можно распространить на разряды с другими источниками энергии [9].

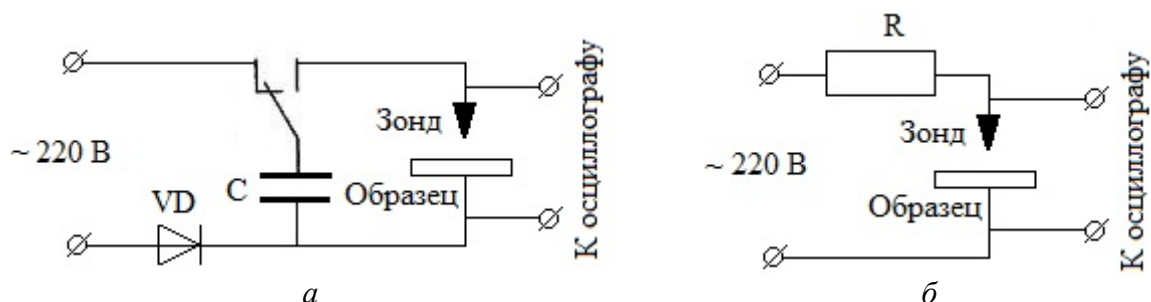


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема установки: питание от емкостного накопителя (а); сети переменного тока (б)

Установка позволяет менять расположение рабочего узла в пространстве. При этом возможны два направления движения вольфрамового электрода – горизонтальное и вертикальное. При вертикальном направлении движения электрода возможны два варианта его расположения относительно исследуемого образца: сверху или снизу.

Поскольку экспериментальные результаты, полученные различными авторами, свидетельствуют о влиянии полярности электрода на процесс его электроэрозионного изнашивания, в установке предусмотрена возможность испытаний при двух полярностях электрода из исследуемого материала: образец – анод и образец – катод.

Частота коммутаций составляла 20 циклов в минуту. Замыкание и размыкание контакта осуществлялись с помощью кулачка, контактирующего с упругой балкой и приводимого во вращение электродвигателем 8 (см. рис. 1).

Раствор контактов 7 мм, скорость замыкания (размыкания) примерно 30 мм/с. При горизонтальном движении электрода усилие нажатия на контакт создавалось упругой деформацией балки и регулировалось микрометрическим винтом. При вертикальном движении электрода усилие нажатия создавалось разновесами, помещенными сверху на держатель (см. рис. 1б, в).

Для гашения вибрации контактов использовался специальный фрикционный демпфер, гасящий энергию колебаний за счет трения.

Проводимость контакта контролировалась быстродействующим милливольтметром (или осциллографом). Типичная картина изменения контактного напряжения во времени представлена на рис. 3. Видно, что со временем среднее сопротивление контакта увеличивается. Это может быть связано как с падением усилия нажатия вследствие износа электродов, так и с деградационными процессами на поверхности контакта (окислением и т.п.).

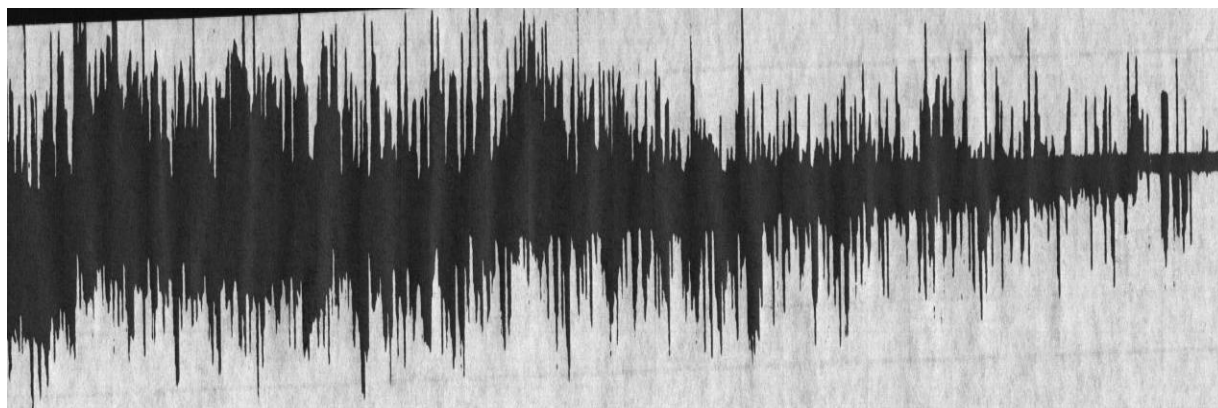


Рис. 3. Изменение контактного падения напряжения во времени

При многократных коммутационных циклах рабочая поверхность исследуемого образца претерпевает разрушения. Лунка на образцах имеет вид цилиндрического канала с диаметром, примерно равным диаметру вольфрамового электрода. После испытаний измеряли линейный износ (глубину лунки на образце) индикатором часового типа с точностью 0,01 мм и диаметр кратера с помощью оптического микроскопа.

На рис. 4 представлены можно увидеть следы воздействия импульсного разряда – лунки на образцах. На снимках весьма заметны следы выбросов расплавленного металла. Наиболее четкие очертания имеют лунки на молибденовом образце. На медных образцах значительная часть расплавленного и затем застывшего металла остается внутри и на периферии лунки. Однако и на молибденовых образцах по краям лунки образуются характерные наплывы застывшего металла, что наглядно подтверждает профилограмма поверхности лунки (рис. 5).

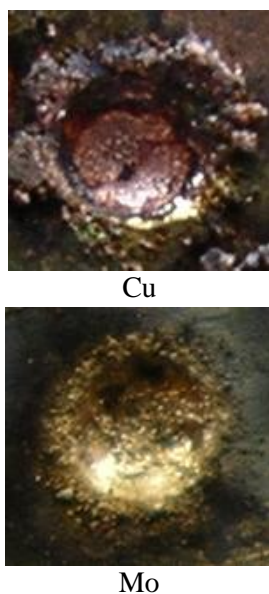


Рис. 4. Фотографии лунок

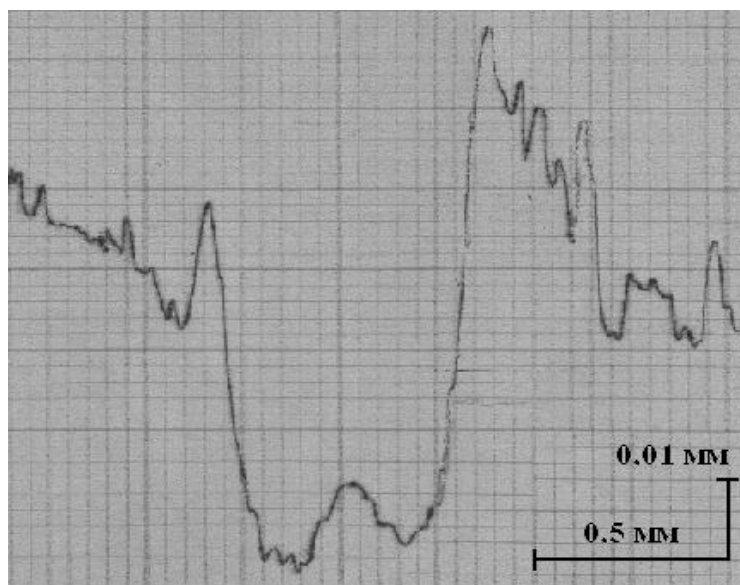


Рис. 5. Профиль лунки на образце из молибдена

В качестве характеристики износостойкости нами принята величина удельной эрозии $\omega = V/q$ (отношение объема удаленного в результате эрозии материала V к величине прошедшего через контакт электрического заряда q).

Для оценки достоверности результатов испытаний на электроэрозионную износостойкость на описанной выше установке было проведено сравнение полученных экспериментально значений удельной эрозии с известными из литературы теоретическими и экспериментальными данными. Для этого использовались образцы, изготовленные из медного, вольфрамового и молибденового порошка.

Для теоретической оценки величины удельного износа воспользуемся представлениями работы [10]:

$$\omega = \frac{\beta U_э}{2,5 Q_V},$$

где ω – объемный удельный износ; β – безразмерный коэффициент ($\beta \leq 1$); $U_э$ – приэлектродное падение напряжения; Q_V – количество энергии, необходимое для нагревания и испарения единицы объема материала.

Расчетная зависимость для величины Q_V имеет вид

$$Q_V = Q_{V1} + Q_{V2} = \frac{W_1 + W_2}{V} = \frac{m [c_{тв}(T_{пл} - T_0) + L_{пл} + c_{ж}(T_{исп} - T_{пл}) + L_{исп}]}{V} = \\ = \rho [c_{тв}(T_{пл} - T_0) + L_{пл} + c_{ж}(T_{исп} - T_{пл}) + L_{исп}],$$

где W_1 – энергия, затраченная на нагревание и плавление материала; W_2 – энергия, затраченная на нагревание и испарение расплавленного

материала; V , m и ρ – объем, масса и плотность материала соответственно; $c_{\text{тв}}$ и $c_{\text{ж}}$ – удельные теплоемкости материала в твердом и жидком состоянии соответственно; $T_{\text{пл}}$ и $T_{\text{исп}}$ – температура плавления и испарения материала соответственно; T_0 – рабочая температура контакт-детали; $L_{\text{пл}}$ и $L_{\text{исп}}$ – удельная теплота плавления и испарения материала соответственно.

Соответствующие теплофизические характеристики материалов взяты из литературных источников, величина приэлектродного падения напряжения принята $U_3 \sim 8$ В на основании данных работы [10].

Рассчитанные таким образом величины Q_v , Дж/м³, для исследованных материалов составляют:

- для меди – $5,5 \cdot 10^{10}$;
- вольфрама – $9,6 \cdot 10^{10}$;
- молибдена – $7,8 \cdot 10^{10}$.

Сравнение рассчитанных (при $\beta = 1$) и экспериментально определенных значений удельного износа приведено в таблице. Сопоставление величин удельного износа свидетельствует о непротиворечивости теоретических и экспериментальных результатов, полученных на описанной установке.

Величины удельной эрозии

Материал	$\omega, 10^{-10} \text{ м}^3/\text{Кл}$	
	Расчет	Эксперимент
Медь	0,58	0,22
Вольфрам	0,33	0,13
Молибден	0,41	0,22

Величины удельной эрозии, представленные в таблице, сопоставимы по порядку величины с приводимыми в классических работах по электроэрозионным явлениям величинами удельной эрозии [10, 11]. Для большинства типичных ЭКМ, в том числе перечисленных в таблице, в аналогичных условиях величины удельной эрозии находятся в пределах от нескольких сотых до нескольких десятых долей, см³/кКл.

Библиографический список

1. Ставицкий, Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов / Б.И. Ставицкий. – Харьков : ЦентрИнформ, 2013. – 104 с. – Текст : непосредственный.
2. Абляз, Т.Р. Современные подходы к технологии электроэрозионной обработки материалов : учебное пособие / Т.Р. Абляз, А.М. Ханов, О.Г. Хурматуллин. – Пермь : ПНИПУ, 2012. – 121 с. – Текст : непосредственный.
3. Елисеев, Ю.С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю.С. Елисеев, Б.П. Саушкин ; под редакцией Б.П. Саушкина. – Москва : МГТУ им. Э. Баумана, 2010. – 437 с. – Текст : непосредственный.
4. Технология электроэрозионной обработки : учебное пособие / Т.Р. Абляз, А.М. Ханов, С.А. Оглезнева [и др.]. Пермь : ПНИПУ, 2017. 99 с. – Текст : непосредственный.
5. Химухин, С.Н. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии : монография / С.Н. Химухин, Хосен Ри, Э.Х. Ри. – Хабаровск : ТОГУ, 2015. – 127 с. – Текст : непосредственный.
6. Плошкин, В.В. Структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях сталей при электроэрозионной обработке : специальность 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Плошкин В.В. – Москва, 2006. – 281 с. – Текст : непосредственный.
7. Пугачевский, М.А. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях Cu, Ni, Mo под действием однократных электрических разрядов : специальность 01.04.07 Физика конденсированного состояния : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Пугачевский М.А. – Хабаровск, 2006. – 135 с. – Текст : непосредственный.
8. Патент № 2265862 Российская Федерация, МПК G01R 31/333(2006.01). Способ оценки электроэрозионной износостойкости материалов для электрических контактов : № 2004110321/28 : заявл. 05.04.2004 : опубл. 10.12.2005 / Измайлов В.В., Новоселова М.В. – 6 с. – Текст : непосредственный.
9. Намитоков, К.К. Электроэрозионные явления / К.К. Намитоков. – Москва : Энергия, 1978. – 456 с. – Текст : непосредственный.
10. Holm, R. Electric contacts / R. Holm. – Berlin-Heidelberg, New York : Springer Verlag, 1967. – 484 p. – Текст : непосредственный.
11. Электрическая эрозия высоковольтных контактов и электродов / Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин, Н.А. Ведешенков, М.А. Жаворонков. – Москва : Энергия, 1978. – 256 с. – Текст : непосредственный.

ЧАСТЬ 2

Доклады

Всероссийской научно-технической конференции
«Инновационное развитие машиностроения и энергетики России»,
посвященной 100-летию Тверского государственного
технического университета
(г. Тверь, 18 января 2022 г.)

Доклады печатаются по рекомендации оргкомитета конференции
и решению редколлегии сборника

В.В. Мешков
Тверской государственной технической университет

О МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ИЗНОСА ПОЛИМЕРНОГО ПОРШНЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПЛЕНОК ПЕРЕНОСА

© Мешков В.В., 2022

Методом численного моделирования описано изменение тангенциальных напряжений и износа в поверхностном и подповерхностных слоях полимерного поршня при возвратно-поступательном скольжении в зависимости от металла втулки. Показано, что учет влияния пленок переноса позволяет определить величину износа, близкую к экспериментальным значениям.

Ключевые слова: полимерный поршень, металлическая втулка, моделирование, тангенциальные напряжения, износ, пленки переноса.

ON MODELING STRESS-STRAIN STATE AND POLYMER PISTON WEAR TAKING INTO ACCOUNT TRANSFER FILMS

The numerical simulation method describes the change in tangential stresses and wear in the surface and subsurface layers of a polymer piston during reciprocating sliding depending on the metal of the sleeve. It is shown that taking into account the influence of transfer films makes it possible to determine the amount of wear close to the experimental values.

Keywords: polymer piston, metal sleeve, modeling, tangential stresses, wear, transfer films.

Одним из узлов трения перспективного технологического оборудования является сопряжение *полимерный поршень – втулка*. При скольжении поршня из композитного материала в металлической втулке в его поверхностном слое возникает напряженно-деформированное состояние (НДС), приводящее к износу оборудования.

Эффективным путем оценки долговечности сопряжения *поршень – втулка* и технологического оборудования в целом является прогнозирование влияния состояния контактных поверхностей сопряжения трения на НДС и износ поверхностных слоев поршня, которое может быть оценено численным методом в упругопластической постановке [1]. Однако при этом, как правило, не учитывается влияние пленок переноса, образующихся на поверхности втулки при трении в ней поршня.

Цель данной работы – оценка методом конечных разностей влияния металла втулки и пленок переноса на НДС и износа полимерного поршня при возвратно-поступательном движении в металлической втулке.

Постановка задачи и исходные параметры для расчета. Торцевая поверхность цилиндрического поршня циклически подвергается механи-

ческому воздействию. Состояние поршня из полимерного материала в упругопластической постановке подчиняется условиям теории пластического течения с изотропным линейным упрочнением (с учетом корректировки девиатора напряжений) [1,2].

Начальные и граничные условия определялись аналогично тому, как это описано в работе [2]. Для расчета износа использовался критерий $J_2 < W_{кр}$, согласно которому износ W происходит, если второй инвариант девиатора напряжений J_2 равен или превышает критическое значение $W_{кр} = Y_k^2 / 3$. Квазиизотропная структура материала поршня учитывалась комплексным параметром $Y_k = f(Y, E, \nu, \epsilon_d)$, где Y – динамический предел текучести материала поршня; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона, ϵ_d – скорость деформации. Расчет Y_k производился на основе правила смесей, а затем результат сравнивался с экспериментальными данными, полученными при квазистатических испытаниях.

Температурное поле поршня определялось предварительно и независимо от напряженного состояния тела решением двумерного квазилинейного уравнения теплопроводности. Эффективные физико-механические и теплофизические характеристики находили с помощью метода аппроксимации Фойгта [3]. Оценка напряжений в поверхностном слое поршня выполнялась в программной среде ANSYS.

Влияние пленок переноса на НДС и износ учитывались в случае, когда экспериментально подтверждалось покрытие пленками переноса более 30 % рабочей поверхности поршня. В этом случае, в первом приближении, расчет НДС и износа полимерного поршня осуществлялся по схеме, предполагающей скольжение полимерного поршня по полимерному покрытию на жестком металлическом основании.

В качестве объекта исследования был выбран полимерный поршень (диаметр 30 мм, длина 45 мм), совершающий возвратно-поступательное движение с частотой 5 с^{-1} в диапазоне циклов $N = 500\text{--}3\,000$ при давлении $P = 8 \text{ МПа}$ в металлической втулке (путь трения за 1 цикл составляет 110 мм). В качестве материала втулки были выбраны закаленная сталь ХВГ и бронза ОЦС 5-5-5, в качестве материала поршня – композит на основе полифениленсульфида и коллоидного графита с содержанием 5 об. %.

Обсуждение результатов исследования. Расчетная величина тангенциальных напряжений τ_{rz} в поверхностном и подповерхностных слоях поршня изменяется в зависимости от количества циклов и металла втулки (рис. 1).

Установлено, что с увеличением количества циклов в диапазоне 500–3 000 напряжения в поршне монотонно возрастают: для поршня во втулке из стали ХВГ до 707 кПа, а во втулке из бронзы ОЦС 5-5-5 до 515 кПа, т.е. на 27 % меньше, чем во втулке из стали ХВГ. Напряжения уменьшаются с увеличением глубины слоев: максимальные величины регистрируются на глубине 0,05 мм, а затем с увеличением глубины слоев снижаются.

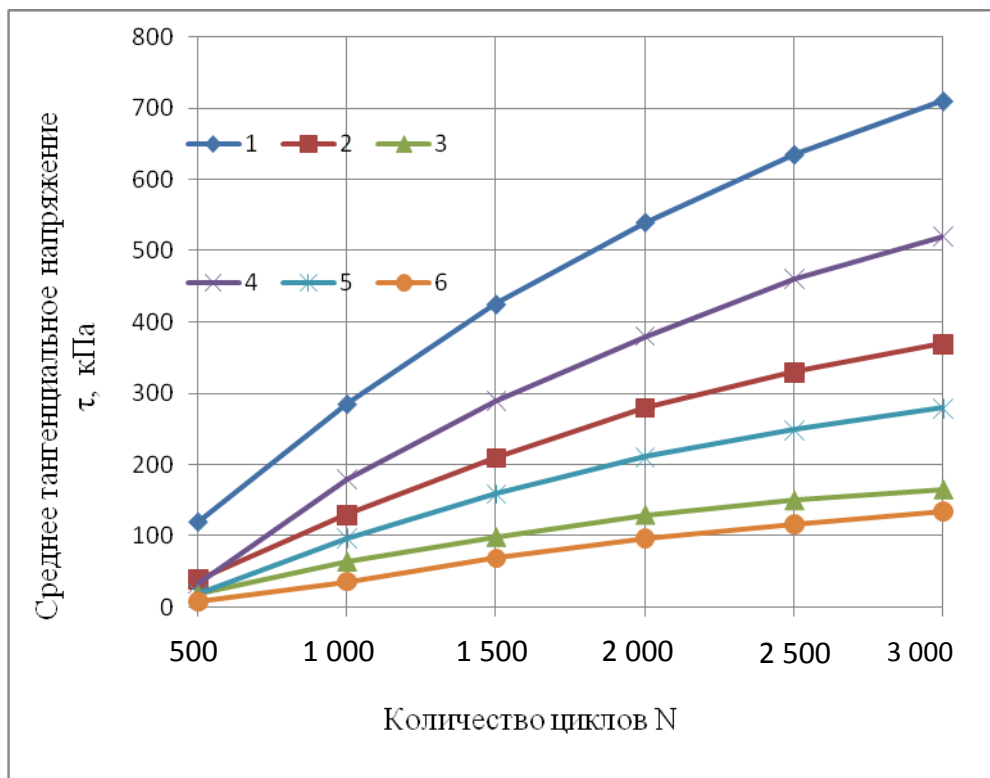


Рис. 1. Расчетные зависимости среднего тангенциального напряжения τ_{tz} , кПа, в поверхностном и подповерхностных слоях полимерного поршня в зависимости от количества циклов N во втулке из стали ХВГ(1–3) и бронзы ОЦС 5-5-5 (4–6) на глубине: $h = 0,05$ мм (1, 4); $h = 0,1$ мм (2, 5); $h = 0,2$ мм (3, 6)

Расчет показал, что при скольжении полимерного поршня во втулке из бронзы ОЦС 5-5-5 (без учета слоев переноса на втулке) его максимальный износ на 30 % меньше, чем во втулке из стали ХВГ (для 3 000 циклов) (табл. 1). Вероятно, это обусловлено различиями в прочностных и деформационных свойствах металлов втулки и связанными с этим особенностями процесса образования пленок переноса.

Таблица 1

Расчетная величина износа W_p боковой поверхности поршня (без учета/с учетом влияния пленок переноса), мм

Материал втулки	Количество циклов N					
	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
Сталь ХВГ	–	0,05/0,03	0,12/0,08	0,16/0,12	0,24/0,15	0,29/0,19
Бронза ОЦС 5-5-5	–	0,03/0,02	0,07/0,05	0,11/0,08	0,16/0,11	0,2/0,15

Экспериментально установлено, что максимальный износ полимерного поршня во втулке из стали ХВГ на 30–35 % больше, чем во втулке из бронзы ОЦС 5-5-5 (табл. 2).

Экспериментальная величина износа $W_{и}$ боковой поверхности поршня, мм

Материал втулки	Количество циклов N					
	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
Сталь ХВГ	–	0,25	0,055	0,093	0,12	0,15
Бронза ОЦС 5-5-5	–	0,022	0,049	0,071	0,1	0,13

Возможной причиной различия измеренной величины износа поршня (в зависимости от материала втулки) могут быть различия в величине площади пленок переноса. На внутренней поверхности втулки из стали ХВГ после 2 000–2 5 000 циклов образуются в основном пятна небольшого размера, суммарная величина площади которых не превышает 30–35 % от рабочей площади втулки. В тоже время на внутренней поверхности втулки из бронзы ОЦС 5-5-5 общая площадь образующихся уже после 1 500 циклов пленок достигает 45–55 % от рабочей площади втулки и затем (после 2 000–2 500 циклов) возрастает до 6–65 %.

Так как общая площадь пленок переноса на втулке из бронзы ОЦС 5-5-5 существенно больше, чем на втулке из стали ХВГ, то и количество коллоидного графита, содержащегося в них, больше. Это, в свою очередь, стабилизирует фрикционное взаимодействие в сопряжении и снижает износ при скольжении поршня во втулке из бронзы ОЦС 5-5-5.

Расчетные величины износа без учета и с учетом пленок переноса существенно различаются (см. табл. 1). Эти различия за 3 000 циклов достигают 34 % для поршня во втулке из стали ХВГ и 25 % для поршня во втулке из бронзы ОЦС 5-5-5. Величины износа, рассчитанные с учетом пленок переноса, наиболее близки к экспериментальным данным (см. табл. 2), и различия между ними составляют 21 и 13 % для поршня во втулках из стали ХВГ и бронзы ОЦС 5-5-5 соответственно.

Расчет средних тангенциальных напряжений в поверхностном и подповерхностных слоях поршня при скольжении во втулке из бронзы ОЦС 5-5-5 показал, что при учете перенесенных слоев их максимальная величина снижается на 39 %: с 520 до 315 кПа (см. рис. 1; рис. 2).

Основное снижение напряжений в поршне наблюдается в слое 0,05 мм после 1 500 циклов, когда по результатам экспериментальной оценки общая площадь перенесенных на втулку слоев превышает 45–55 % от рабочей поверхности втулки.

Снижение величины расчетных значений средних напряжений в поверхностном и подповерхностных слоях полимерного поршня при скольжении во втулке из бронзы ОЦС 5-5-5 с учетом пленки переноса коррелирует с расчетной величиной его износа и близко к измеренной величине износа.

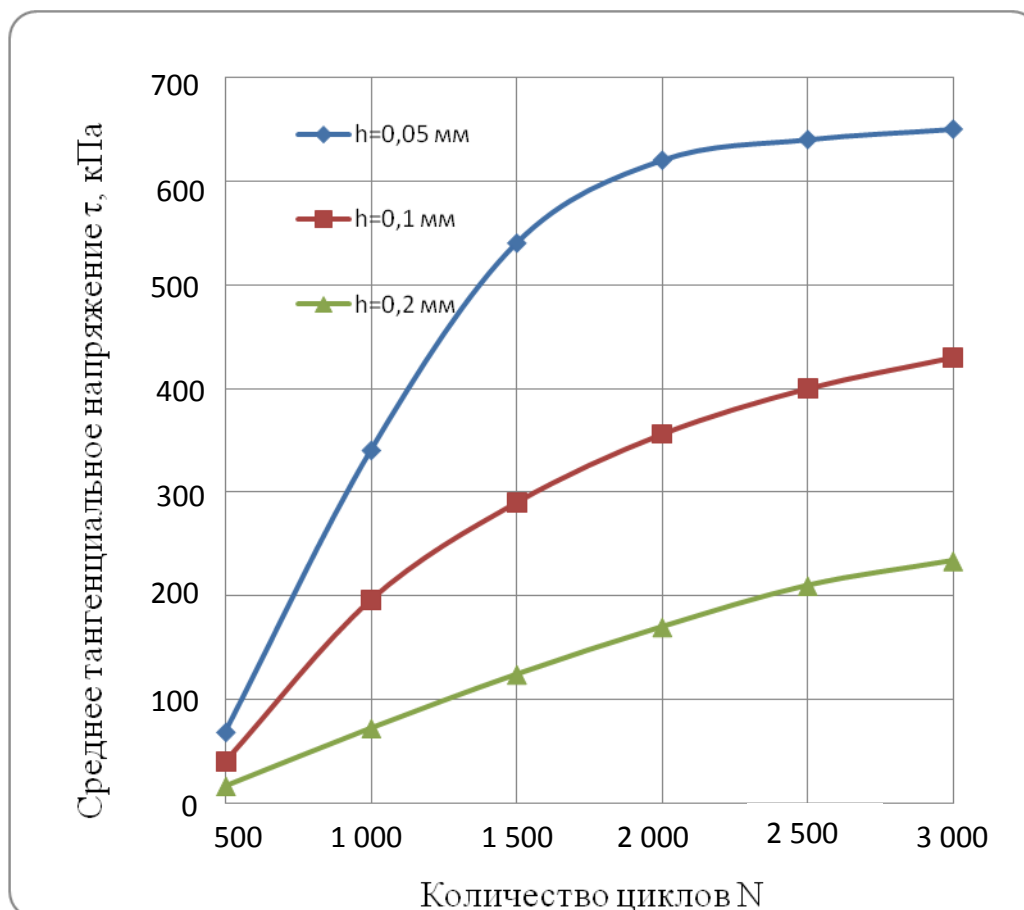


Рис. 2. Расчетные (с учетом влияния перенесенных слоев) зависимости среднего тангенциального напряжения τ_{tz} , кПа, в поверхностном и подповерхностных слоях полимерного поршня на глубине h , в зависимости от количества циклов N во втулке из бронзы ОЦС 5-5-5

С увеличением числа циклов в условиях возвратно-поступательного движения по одному следу, вероятно, возрастает роль адгезионного взаимодействия поверхностного слоя полимера поршня со слоем фрикционного переноса на металлической втулке. Возможно, большая адгезионная способность полимерного связующего поршня к бронзе приводит к формированию на втулке больших по площади пленок переноса, содержащих коллоидный графит, перераспределению тангенциальных напряжений путем перемещения их в перенесенную пленку и последующей локализации. Это ведет к снижению напряжений в поверхностном слое поршня и, соответственно, уменьшению его износа.

Для повышения достоверности результатов необходимо экспериментально определить параметры пленок: различия в толщине и сплошности с учетом миграции участков пленки в рабочей зоне втулки с изменением параметров нагружения, в частности количества циклов. Это позволит обосновать выбор исходных и граничных условий и рассчитать НДС в пленке переноса.

Заключение

Численное моделирование НДС фрикционного взаимодействия полимерного поршня в металлической втулке позволило оценить тангенциальные напряжения в поверхностном и подповерхностных слоях поршня в зависимости от металла втулки и количества циклов. Установлено, что учет пленок переноса существенно влияет на величину тангенциальных напряжений в поршне. Величина износа поршня, рассчитанная с учетом перенесенных слоев, наиболее близка к экспериментальным данным. Таким образом, учет влияния перенесенных слоев в полной мере отражает реальный процесс фрикционного взаимодействия поршня в металлической втулке.

Библиографический список

1. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – Москва : Мир, 1986. – 318 с. – Текст : непосредственный.
2. Мешков, В.В. Исследование влияния трения на напряженно-деформированное состояние поршня аксиально-поршневого насоса / В.В. Мешков, Т.В. Семенова, Т.В. Корочкина. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 1999. – Т. 21. – № 3. – С. 291-294.
3. Кравчук, А.С. Механика полимерных и композиционных материалов / А.С. Кравчук, В.П. Майборода, Ю.С. Уржумцев. – Москва : Наука, 1985. – 304 с. – Текст : непосредственный.

УДК 678:621.891

М.В. Бойко, А.А. Бичеров, А.М. Ананко, Т.Г. Бойко
Ростовский государственный университет путей сообщений

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЭПОКСИДНО-ДИАНОВЫХ КОМПОЗИТОВ АРМИРОВАНИЕМ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ОКСИДОВ-ГИДРОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

© Бойко М.В., Бичеров А.А.,
Ананко А.М., Бойко Т.Г., 2022

Разработан метод синтеза армирующих добавок для композитов на основе смолы ЭД-20. Армирование полимерной матрицы ксерогелями железа и марганца позволило добиться увеличения микротвердости, модуля упругости и износостойкости композита. При трении таких композитов наблюдали на металле образование вторичных поверхностных структур островковой природы, вытянутых по направлению взаимного перемещения тел.

Ключевые слова: эпоксидно-диановые композиты, ксерогели, армирование, трибологические свойства, вторичные поверхностные структуры.

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF EPOXY-DIANE COMPOSITES BY ULTRAFINE PARTICLES OF TRANSITION METAL OXIDE-HYDROXIDES REINFORCEMENT

A method for the synthesis of reinforcing additives for composites based on epoxy resin has been developed. Reinforcement of the polymer matrix with iron and manganese xerogels made it possible to increase the microhardness, elasticity modulus, and wear resistance of the composite. During the friction of such composites, the formation of secondary surface structures of an island nature, elongated in the direction of mutual movement of the bodies, was observed on the metal.

Keywords: epoxy-diane composites, xerogels, reinforcement, tribological properties, secondary surface structures.

Актуальность улучшения физико-механических и трибологических свойств полимерных материалов обусловлена возрастающими требованиями к изготавливаемым из них изделиям антифрикционного и фрикционного назначения. Обычно рекомендации по повышению износостойкости композитов ориентированы на улучшение их структуры путем введения в состав разного рода модификаторов. Последние исследования показали, что армирующие добавки способны улучшать не только механические, но и трибологические свойства композиционных материалов. При модифицировании фенилона наноразмерными добавками шпинелей железа, марганца, магния и хрома наблюдали рост прочности и износостойкости композиционного материала, при этом модуль упругости и коэффициенты трения оставались такими же, как у исходного полимера [1]. Повышение трибологических характеристик композитов обусловлено образованием на трибоконтате фрикционной пленки за счет специфического взаимодействия ультрадисперсных частиц шпинелей с поверхностью трения [2]. Это позволило осуществить регулирование изнашивания поверхности трибосопряжения [1].

Шпинели – обширный класс неорганических природных минералов, которые представляют из себя смешанные оксиды металлов, находящихся в степенях окисления +2 и +3. Их эффективность в композиционных материалах резко возрастает с увеличением степени помола [1]. Получение высокодисперсных систем возможно не только при измельчении механическим способом, но и при укрупнении частиц (от атомов и ионов к наноразмерным частицам) методами коллоидной химии.

Целью работы являлась разработка метода получения армирующих добавок для композиционных полимерных материалов триботехнического назначения и исследование пленок переноса, образующихся в металло-полимерном трибосопряжении.

Для получения наночастиц шпинелей нами использовалась золь-гель технология. Сущность метода заключается в образовании твердых частиц из ионов, находящихся в растворе. Во время роста частиц истинные

растворы реагентов превращаются в коллоидные – гели. Такие системы теряют текучесть по причине возникновения в них внутренних структур.

Ксерогели получают как результат окислительно-восстановительной реакции между перманганатом калия и сульфатом железа (II). Наиболее стабильные ксерогели образуются при смешивании 0,5 М растворов реагентов в эквивалентных соотношениях при температуре 40 ± 5 °С.

Для изучения влияния стабилизаторов на размер частиц и дисперсию распределения частиц по размерам, при получении ксерогелей железомарганец в раствор сульфата железа (II) вводили растворы высокомолекулярных поверхностно-активных соединений – катионных, анионных и нейтральных водорастворимых полимеров. Установлено, что использование для стабилизации ксерогелей катионных поверхностно-активных веществ позволяет добиться уменьшения среднего размера частиц до 25–75 нм.

Одним из способов введения и диспергирования неорганических наполнителей является их предварительная функционализация гидроксильрованием [3]. Это обеспечивает снижение агрегации частиц наполнителей за счет сильного межфазного взаимодействия их частиц с эпоксидно-диановой матрицей. Модифицирование поверхности армирующих наполнителей обеспечивает смачивание поверхности таких частиц молекулами эпоксидно-диановой смолы. Режим созревания и сушки гелей подобран нами таким образом, чтобы обеспечить наличие на их поверхности ковалентно связанных гидроксильных групп.

Эпоксидно-диановая смола ЭД-20 обладает высокой вязкостью при комнатной температуре, поэтому введение модифицирующих добавок сопряжено с трудностями и обычно сопровождается агрегацией частиц наполнителей. При повышении температуры происходит существенное снижение вязкости полимерной матрицы, поэтому перед введением модифицирующих компонентов смолу нагревали до 45 ± 5 °С. Синтезированные армирующие наполнители вводили непосредственно в эпоксидно-диановую матрицу. Перемешивание осуществляли вручную и с использованием лабораторных перемешивающих устройств: лабораторной магнитной мешалки с подогревом (ES-6120); лабораторного миксера (Heidolph RZR 2041); смесителя (SILVERSON L5M-A); ультразвуковой ванны (ПБС-5735-05). Анализ однородности полученных материалов выполняли после их отверждения по дисперсии механических свойств композита в разных участках полимерного образца. Установлено, что наилучшее смешивание компонентов происходит при использовании лабораторного миксера Heidolph RZR 2041.

Диспергирование наполнителей в эпоксидно-диановой матрице имеет решающее значение для получения функциональных материалов. В связи с тем, что армирование должно быть осуществлено по всему объему композиционного материала, одной из задач исследования был подбор

условий, обеспечивающих равномерное распределение частиц ксерогелей в объеме полимерной матрицы.

В литературе предложены различные методы диспергирования, например обработка эпоксидной смолы, содержащей модификатор и ацетон, ультразвуком при перемешивании [3]; диспергирование в растворителе с последующим вакуумированием [4]. Описаны методы смешивания при помощи ультразвукового гомогенизатора, шаровой мельницы, двухшнекового экструдера [5].

Нами было изучено влияние ультразвука на равномерность распределения армирующих добавок в эпоксидно-диановой смоле. После введения в полимерную матрицу ксерогелей и перемешивания лабораторным миксером полученные смеси подвергали ультразвуковой обработке для деагломерации наполнителей. Продолжительность обработки составляла 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мин. Затем в полученную смесь добавляли отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА), еще раз перемешивали миксером, помещали в пресс-форму, вакуумировали и отверждали. Полученные цилиндрические образцы композитов диаметром 10 мм и высотой 40 мм были распилены на отрезном станке на таблетки толщиной 5 мм. Анализ однородности распределения армирующих добавок проводили по дисперсии механических свойств в разных участках отвержденных композитов.

Установлено, что 20 мин ультразвуковой обработки достаточно для деагломерации и равномерного распределения частиц ксерогелей в полимерной матрице. Дальнейшее увеличение продолжительности воздействия ультразвука практически не влияло на величину дисперсии механических свойств композитов.

На основе экспериментальных данных установлено, что оптимальное содержание армирующих добавок ксерогеля оксидов-гидроксидов железа и марганца, при котором эпоксидно-диановой композит обладает наилучшими механическими и трибологическими свойствами, составляет 5 % по массе. При больших концентрациях армирующего компонента возрастает дисперсия механических свойств и увеличивается интенсивность изнашивания. Модифицирование эпоксидно-диановой матрицы 5 % ксерогеля оксидов-гидроксидов железа и марганца приводит к увеличению на 10 % микротвердости и на 3 % приведенного модуля упругости, повышает сопротивление материала упругим и пластическим деформациям, существенно (на 80 %) снижает интенсивность изнашивания.

При трении немодифицированного эпоксидно-дианового композита по стальному контртелу образование вторичных поверхностных структур методами ИК-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения и растровой электронной микроскопии (РЭМ) не наблюдалось. Модифицирование смолы ЭД-20 армирующими добавками приводило к появлению на поверхности трибосопряжения пленок переноса

органической природы. В ИК-спектрах наблюдались полосы колебаний связей С=О (1 730–1 640 см⁻¹), связей С-С ароматических соединений (1 570–1 475 см⁻¹), связей С-О в фенолах (1 120 см⁻¹), симметрических валентных колебаний связей С-О-С (1 010 см⁻¹), деформационных колебаний групп СН₂ и СН₃ (822 см⁻¹) (рис. 1).

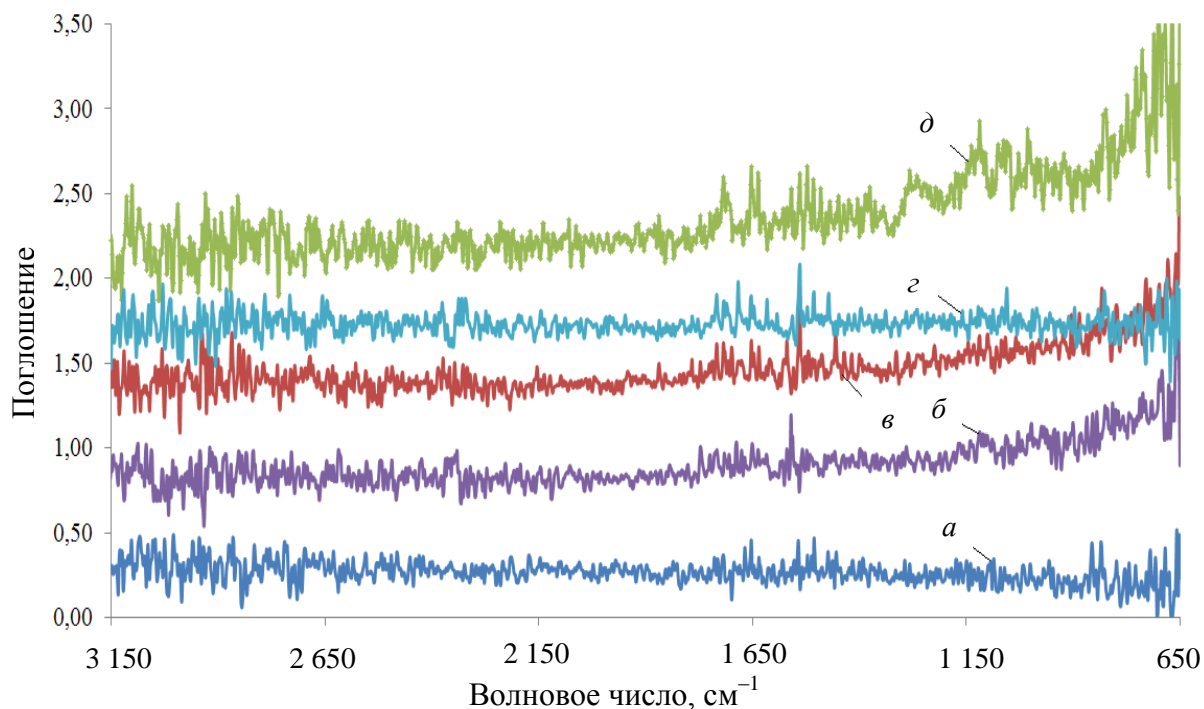


Рис. 1. ИК-спектры металлической поверхности после трибоконтакта с модифицированным композитом через 15 (а), 30 (б), 45 (в), 60 (г), 75 мин (д) трения

Данные ИК-спектроскопии свидетельствуют об участии в образовании вторичных поверхностных структур фрагментов молекул эпоксидно-диановой смолы. Наличие в спектрах полос колебаний связей С=О указывает на протекание в зоне трибоконтакта окислительных процессов [6–8]. Из рис. 1 видно, что появление вторичных поверхностных структур происходит уже через 30 мин испытаний. Увеличение интенсивности полос поглощения групп в спектрах на рис. 1 происходит в первые 75 мин трения и свидетельствует о росте пленки переноса. Дальнейшее увеличение продолжительности испытаний не влияет на ИК-спектр поверхности трибосопряжения.

Наличие вторичных поверхностных структур островковой природы, вытянутых по направлению трения, при исследовании поверхностей трибосопряжения, сформированных при трении модифицированного ксерогелем композита, отчетливо идентифицируется при помощи РЭМ (рис. 2).

Пленка переноса имеет органическую природу, что подтверждается высоким содержанием углерода, обнаруженным в результате элементного анализа (рис. 3).

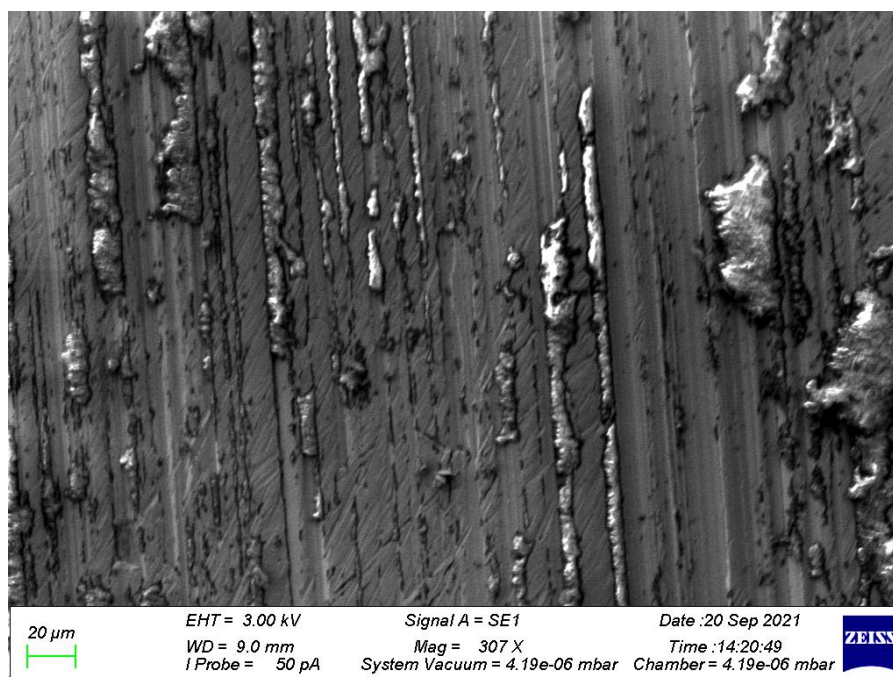


Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности трения, сформированной после трибоконтакта с модифицированным композитом

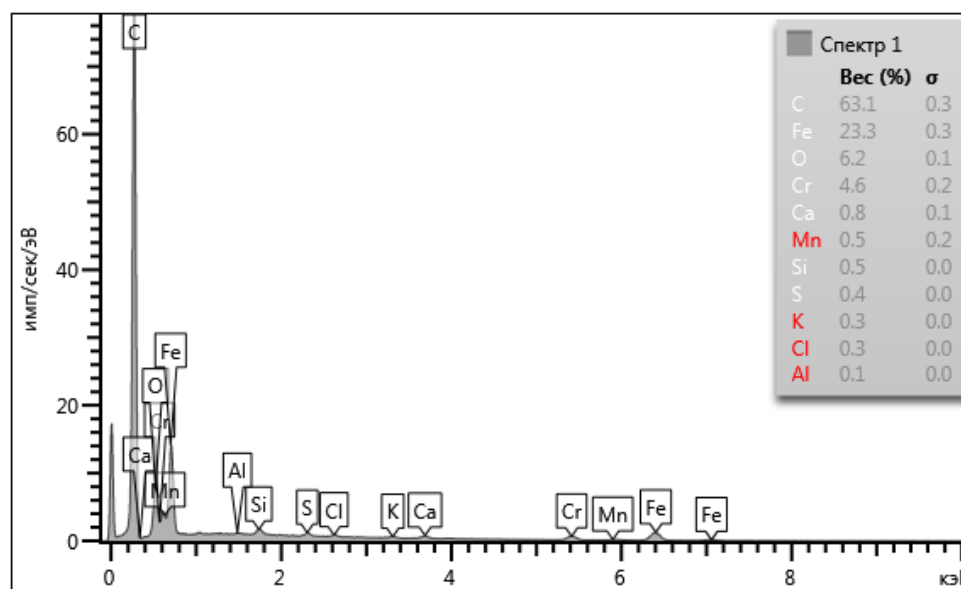


Рис. 3. Результаты элементного анализа вторичных поверхностных структур, сформированных на металле при трении модифицированным композитом

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00288, <https://rscf.ru/project/21-19-00288/>.

Библиографический список

1. Kolesnikov, I.V. Frictional transfer and the self-organization phenomenon in the friction / I.V. Kolesnikov, D.S. Manturov. – Текст : непосредственный // Journal of Physics : Conf. Series. – 2017. – Vol. 857. – P. 197–200.
2. Myasnikova, N.A. The formation and functioning of surface nanostructures at tribocontact / N.A. Myasnikova, A.V. Sidashov, P.V. Myasnikov. – Текст : непосредственный // Mater. Sci. Forum. – 2016. – Vol. 870. – P. 303-308.
3. Tribological properties of epoxy-based self-lubricating composite coating enhanced by 2D/2D h-BN/MoS₂ hybrid / B. Chen, M. Zhang, X. Li, Z. Dong, Y. Jia, C. Li. – Текст : непосредственный // Progress in Organic Coatings. – 2020. – Vol. 147. – P. 105767.
4. Brostow, W. Modified epoxy coatings on mild steel: Tribology and surface energy / W. Brostow, M. Dutta, P. Rusek. – Текст : непосредственный // European Polymer Journal. – 2010. – Vol. 46. – Iss. 11. – P. 2181-2189.
5. Baig, M.M.A. Epoxy epoxy compositen epoxy hybrid composite coatings for tribological applications – A review / M.M.A. Baig, M. Abdul Samad. – Текст : непосредственный // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – P. 179.
6. Влияние давления на протекание химических реакций в зоне непосредственного фрикционного контакта в системах с избирательным переносом / С.Б. Булгаревич, М.В. Бойко, В.А. Фейзова, Е.Е. Акимова. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2011. – Т. 32. – № 3. – С. 207-213.
7. Акимова, Е.Е. Термодинамика несамопроизвольных химических реакций, инициируемых трением / Е.Е. Акимова, С.Б. Булгаревич, М.В. Бойко. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2006. – № 3 (23). – С. 107-112.
8. Механоактивация трибохимических процессов / С.Б. Булгаревич, М.В. Бойко, В.А. Фейзова, Е.Н. Тарасова. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4 (44). – С. 178-189.

УДК 621.726

С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, М.Ш. Мигранов,
А.М. Мигранов, С.Р. Шехтман
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Уфимский государственный авиационный технический университет

ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР ПРИ АДАПТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

© Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш.,
Мигранов А.М., Шехтман С.Р., 2022

В работе проведен термодинамический анализ образования вторичных структур при трении, позволяющий обосновать повышение эффективности лезвийной обработки резанием металлов путем образования защитных вторичных структур на поверхности режущего инструмента.

Ключевые слова: композиционные покрытия, физическое осаждение покрытий, химическое осаждение покрытий, термодинамика, трибосистема, адаптация, самоорганизация, вторичные структуры.

FORMATION OF SECONDARY STRUCTURES DURING ADAPTATION UNDER FRICTION CONDITIONS

In work the thermodynamic analysis of formation of secondary structures at friction, allowing to prove increase of efficiency of blade metal cutting processing by formation of protective secondary structures on a surface of the cutting tool is lead.

Keywords: composite coatings, physical deposition of coatings, chemical deposition of coatings, thermodynamics, tribosystem, adaptation, self-organization, secondary structures.

Введение

В настоящее время на основании многочисленных теоретико-экспериментальных исследований накоплен большой объем знаний, позволяющий использовать термодинамические модели для описания процессов трения и изнашивания [1–9]. Трущиеся пары рассматриваются в таких моделях как открытая система, обменивающаяся энергией и веществом с окружающей средой. Уменьшение и стабилизация характеристик трения связаны с формированием вторичных структур. При образовании вторичных структур система трения концентрирует все виды взаимодействия в тонких поверхностных слоях. Вторичные структуры выполняют защитные функции, ограничивая распространение взаимодействий внутри трущегося тела. В процессе трения в них сконцентрировано более 90 % всей энергии системы. С точки зрения термодинамики вторичные структуры представляют собой устойчивую зону с повышенным уровнем внутренней энергии.

Рассмотрено применение явления самоорганизации для разработки износостойких и антифрикционных материалов. Приведены конкретные примеры использования явления самоорганизации и создания диссипативных структур для формирования триботехнических материалов с повышенной износостойкостью для токосъемных материалов и антифрикционных материалов подшипников [2, 6–8].

В работах [7, 8, 10–15] показана взаимосвязь между процессом трения (изнашивания) и адаптивной реакцией режущего инструмента с покрытием на внешнее температурно-силовое воздействие при лезвийной обработке резанием. Обработка металлов резанием рассматривается как неравновесный процесс адаптации при трении (образование наноразмерных трибопленок) с физико-химическими и механическими изменениями, протекающими в микроскопическом масштабе в контактной зоне. В результате исследований в этом направлении достигнуты значительные успехи в управлении износом при обработке различных труднообрабатываемых материалов режущим инструментом с многослойным композиционным покрытием. Такие покрытия можно разделить на две категории:

повышающие адаптивную реакцию на наноуровне за счет обеспечения самосмазывающихся и теплозащитных свойств;

обеспечивающие адаптивную реакцию на микроуровне за счет частичного отслаивания слоя покрытия.

В качестве примера адаптации износостойкого покрытия авторами получены интересные результаты при черновой обработке некоторых титановых сплавов, обладающих уникальными физико-механическими свойствами. Испытываемые титановые сплавы характеризуются хорошей обрабатываемостью инструментом без покрытия, низкой теплопроводностью, сохранением прочностных характеристик при высоких температурах в зоне резания и т.д. Проведенные экспериментальные исследования режущего инструмента с ФОП-покрытиями TiAlN, CrN и без покрытия показали, что по износостойкости нитрид хрома превосходит другие материалы в 2–2,3 раза благодаря смазывающим и экранирующим эффектам самоадаптивной пленки, образующейся в виде оксида хрома.

В условиях интенсивного на рост ообразования при резании необходимо рассматривать интегративный подход к проектированию покрытия.

В качестве примера представлены боридные покрытия, которые могут снизить интенсивность образования наростов за счет генерации различных трибопленок с защитными и смазывающими свойствами. Покрытия из высокоэнтропийных сплавов также могут производить адаптивную реакцию в двух масштабах: наноразмерном за счет образования нескольких полезных трибопленок и одновременно на микроуровне, обеспечивая диссипацию энергии внутри слоя покрытия. Оба этих процесса протекают совместно, чтобы уменьшить повреждение поверхности, как только нарост отделяется от поверхности инструмента.

Энергетическое описание трения и изнашивания

Значительный интерес вызывает энергетическое описание трения и изнашивания. Рассмотрим систему, состоящую из одного трущегося тела и источника энергии в зоне трения. Будем считать, что источник энергии не имеет массы, следовательно, не обладает энтропией. В системе будем учитывать изменение энтропии, связанное с одним телом [8].

Энтропия трущегося тела (S) может изменяться за счет перехода тепла из источника в тело, механической работы над трущимся телом, присоединения химических веществ со своей энтропией и других процессов, т.е. за счет внешних воздействий – потока энтропии (dS_1). Энтропия тела может также меняться за счет производства энтропии при распространении тепла и других потоков по телу и прохождения физико-химических процессов в теле (dS_2). Часть потока энтропии, обусловленная теплообменом с источником, приводит к повышению S , так как тепло переходит из источника с повышенной температурой в тело, температура которого ниже. Химические вещества присоединяются к телу со своей энтропией и, адсорбируясь на его поверхности, уменьшают разность

химических потенциалов среды и тела, повышая энтропию. Производство энтропии, согласно второму закону термодинамики, положительно ($dS_i > 0$). Таким образом, перечисленные эффекты приводят к повышению энтропии тела. Однако при прохождении процессов самоорганизации S тела должна снижаться (при одинаковом уровне энергии). Энтропия тела может уменьшаться в результате изнашивания, что компенсирует и превышает ее рост за счет производства S и положительной части потока S . Если считать, что приработка состоит в появлении устойчивых вторичных структур, то вполне естественно, что она сопровождается обычно высокой интенсивностью изнашивания.

При трении снижение энтропии тела может происходить не только в результате не только износа, т.е. потери вещества, но превращений, происходящих в поверхностных слоях. При образовании вторичных структур возможно повышение или понижение энтропии вторичных структур по сравнению с энтропией веществ, вступающих во взаимодействие (материалы контртел, составляющие смазки, атмосферы и т.д.) [2, 3, 7, 8].

Рассмотрим оба варианта. В начальный момент образования вторичных структур изменение энтропии трущегося тела (ΔS) будет состоять из следующих составляющих:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_i + \Delta S_2 + \Delta S_3 - |\Delta S_4|, \quad (1)$$

где ΔS_1 – поток энтропии без учета массообмена; ΔS_i – производство энтропии без учета превращений в поверхностных слоях; ΔS_2 – изменение энтропии за счет присоединения веществ со своей энтропией; ΔS_3 – изменение энтропии за счет превращений в поверхностных слоях; ΔS_4 – изменение энтропии, связанное с изнашиванием, т.е. с отводом вещества.

Из предыдущих рассуждений следует, что $\Delta S_1 > 0$. Согласно второму закону термодинамики, $\Delta S_i > 0$. Вещества присоединяются к телу со своей энтропией, поэтому $\Delta S_2 > 0$.

Величина ΔS_3 может быть как отрицательной, так и положительной. Например, при образовании твердых растворов до насыщения или стехиометрических химических соединений, соответствующих равновесным диаграммам состояний, $\Delta S_3 > 0$. При образовании структурных и фазовых составляющих, отсутствующих на диаграммах состояний или прохождения химических реакций с отрицательным химическим сродством, $\Delta S_3 < 0$.

Сумма ΔS_2 и ΔS_i составляет общее производство энтропии, поэтому при отрицательном значении ΔS_3 выполняется условие

$$\Delta S_i - |\Delta S_3| > 0. \quad (2)$$

Величина ΔS_4 , по-видимому, всегда отрицательна, так как уносящиеся при изнашивании вещества исчезают из системы со своей энтропией. Поэтому в соотношении (1) при $|\Delta S_4|$ стоит знак «минус».

Если считать, что при приработке происходит рост вторичных структур, то процесс изнашивания можно представить в виде следующей схемы. На трущейся поверхности оседают компоненты среды и контртела. Взаимодействуя друг с другом и с материалом трущегося тела, они образуют вторичные структуры, которые изнашиваются. Из условия роста вторичных структур следует, что изнашивается лишь их часть μ ($\mu < 1$). В соответствии с этой схемой

$$\Delta S_4 = \mu \Delta S_3 + \mu \Delta S_2 + \mu \Delta S_5, \quad (3)$$

где ΔS_5 – изменение энтропии тела за счет износа его материала-основы.

Рассмотрим случай, когда

$$\Delta S_3 > 0. \quad (4)$$

Тогда с учетом соотношения (3) выражение (1) примет вид

$$\begin{aligned} \Delta S &= \Delta S_1 + \Delta S_i + \Delta S_2 + |\Delta S_3| - \mu |\Delta S_3| - \mu \Delta S_2 - \mu \Delta S_5 = \\ &= \Delta S_1 + \Delta S_i + (1 - \mu) |\Delta S_3| + (1 - \mu) \Delta S_2 - \mu \Delta S_5. \end{aligned} \quad (5)$$

Единственный отрицательный член в правой части уравнения (5) – это последний; он в основном и определяет износ трущегося тела.

Предполагая, что существует определенная величина снижения энтропии для реализации процесса самоорганизации [5, 7, 8] (в данном случае – образование вторичных структур), из выражения (5) следует, что для прохождения самоорганизации необходим повышенный износ.

Рассмотрим случай, когда

$$\Delta S_3 < 0. \quad (6)$$

Тогда соотношение (1) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta S &= \Delta S_1 + \Delta S_i + \Delta S_2 - |\Delta S_3| + \mu |\Delta S_3| - \mu \Delta S_2 - \mu \Delta S_5 = \\ &= \Delta S_1 + \Delta S - (1 - \mu) |\Delta S_3| + (1 - \mu) \Delta S_2 - \mu \Delta S_5. \end{aligned} \quad (7)$$

В правой части соотношения (7) два отрицательных члена: один связан с износом ($\mu \Delta S_5$), другой – с химическими превращениями в поверхностных слоях ($(1 - \mu) |\Delta S_3|$). Поэтому та же определенная величина снижения энтропии, что и в выражении (5), будет достигнута при более низком износе трущихся тел. Отсюда следует вывод о том, что интенсивность изнашивания неравновесных вторичных структур при прочих равных условиях будет меньше, чем равновесных.

Необходимо отметить, что в соотношениях (1–7) ΔS_3 входит как часть производства энтропии, поэтому, несмотря на знак «минус» перед $|\Delta S_3|$ в

выражении (7), разность параметров энтропии должна быть положительной, т.е.

$$\Delta S_i - (1 - \mu)|\Delta S_3| > 0 \quad (8)$$

Это означает невозможность компенсации прироста энтропии только ее снижением при неравновесных превращениях в поверхностных слоях. То же самое можно сказать и об изменении структуры при пластической деформации. В процессе пластической деформации при трении происходит образование фрагментированной структуры [8]. Напряжения при фрагментации дислокации, а следовательно, и энергия деформации локализуются по границам фрагментов, внутри фрагментов структура практически бездефектная [7]. Такая неравномерность распределения энергии деформации способствует снижению энтропии трущегося тела. Однако это снижение S является частью производства энтропии, которое в целом должно быть положительным. Поэтому при образовании и росте вторичных структур необходим износ трущегося тела.

В стационарном состоянии вторичные структуры и процессы, происходящие в них, стабилизируются. Количество перешедших во вторичные структуры веществ из окружающей среды и трущихся тел должно равняться количеству веществ, ушедших в процессе изнашивания, т.е. в стационарном состоянии $\mu = 1$.

Продифференцировав изменение энтропии в соотношениях (5) и (7), получим скорость изменения энтропии (в дальнейшем для упрощения символ Δ будем пропускать).

При условии (4)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_l}{dt} + \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_3}{dt}(1 - \mu) + \frac{dS_2}{dt}(1 - \mu) - \mu \frac{dS_5}{dt}. \quad (9)$$

При условии (6)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_l}{dt} + \frac{dS_i}{dt} - \frac{dS_3}{dt}(1 - \mu) + \frac{dS_2}{dt}(1 - \mu) - \mu \frac{dS_5}{dt}. \quad (10)$$

В стационарном состоянии уравнения (9) и (10) будут выглядеть одинаково:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_l}{dt} + \frac{dS_i}{dt} - \frac{dS_5}{dt} = 0. \quad (11)$$

В соотношении (11) первые два члена правой части положительные. Последний член, характеризующий износ материала-основы трущегося тела, отрицательный. Таким образом, в стационарном состоянии для его поддержания обязательно будет существовать износ материала-основы.

Из выражения (11) следует, что чем меньше производство энтропии при неизменном потоке энтропии, тем меньше будет интенсивность изнашивания материала-основы, в том числе в стационарном состоянии. Неравновесные процессы, протекающие со снижением энтропии и учитываемые в производстве энтропии, при прочих равных условиях уменьшают производство энтропии по сравнению с прохождением равновесных процессов. Соответственно, прохождение неравновесных процессов способствует снижению интенсивности изнашивания материала-основы трущегося тела.

Ю.Л. Климонтович [17] обобщил теорему Пригожина о минимальном производстве энтропии на процессы самоорганизации. В его формулировке она звучит следующим образом: «Производство энтропии в новом устойчивом состоянии, возникшем после очередного неравновесного фазового перехода, меньше производства энтропии старого, но продолженного в неустойчивую область состояния системы». Приведенная формулировка и выражение (11) подтверждают вывод о том, что при прочих равных условиях интенсивность изнашивания неравновесных вторичных структур меньше, чем равновесных в устойчивом стационарном состоянии.

Заключение

В целом по результатам теоретико-экспериментальных исследований на основе методов неравновесной термодинамики и теории самоорганизации установлены явления, позволяющие осуществлять выбор и применение износостойких инструментальных материалов и покрытий, в частности, неравновесные процессы, проходящие со снижением энтропии на поверхностях трения, приводят к снижению интенсивности изнашивания; с уменьшением производства энтропии интенсивность изнашивания инструмента уменьшается (экранирующий эффект); процесс самоорганизации на поверхностях трения обуславливает снижение интенсивности изнашивания.

Библиографический список

1. Пригожин, И. Современная термодинамика / И. Пригожин, Д. Кондипуди. – Москва : Мир, 2002. – 461 с. – Текст : непосредственный.
2. Семенов, Б.И. Диссипативные процессы и структурные изменения материала диска в трибосистеме алюмоматричный композит – контртело / А.Б. Семенов, Е.В. Игнатова. – Текст : непосредственный // Технология металлов. – 2006. – № 3. – С. 26-33.
3. Бершадский, Л.И. Структурная термодинамика трибосистем / Л.И. Бершадский. – Киев : Знание, 1990. – 253 с. – Текст : непосредственный.
4. Исаев, С.И. Термодинамика : учебник для вузов / С.И. Исаев. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 416 с. – Текст : непосредственный.

5. Кабалдин, Ю.Г. Самоорганизация и нелинейная динамика в процессах трения и изнашивания инструмента / Ю.Г. Кабалдин. – Комсомольск-на-Амуре : КнАГТУ, 2003. – 236 с. – Текст : непосредственный.
6. Булгаревич, С.Б. Термодинамические характеристики несамопроизвольных химических реакций, инициируемых трением / С.Б. Булгаревич. – Текст : непосредственный // Сборник трудов 3-го Международного семинара «Контактное взаимодействие и сухое трение». – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 60-67.
7. Мигранов, М.Ш. Пути повышения эффективности механической обработки резанием / М.Ш. Мигранов, Л.Ш. Шустер. – Текст : непосредственный // Технология машиностроения. – 2004. – № 5. – С. 19.
8. Гершман, И.С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих контактов : специальность 05.02.01 Материаловедение (машиностроение), 05.02.04 Трение и износ в машинах : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гершман И.С. – Москва, 2006. – 234 с. – Текст : непосредственный.
9. Мигранов, М.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении / М.Ш. Мигранов, Л.Ш. Шустер. – Москва : Машиностроение, 2005. – 202 с. – Текст : непосредственный.
10. Пригожин, И. Введение в термодинамику необратимых процессов / И. Пригожин. – Москва : Иностранная литература, 1960. – 127 с. – Текст : непосредственный.
11. Vereschaka, A.S. The study wear resistance of the modified surface of the cutting tool / A.S. Vereschaka, A.A. Vereschaka, M.S. Migranov. – Текст : непосредственный // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 548-549. – P. 417-421.
12. Мигранов, М.Ш. Исследование изнашивания инструментальных материалов и покрытия с позиции термодинамики и самоорганизации / М.Ш. Мигранов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 65-70.
13. Кузин, В.В. Влияние покрытия TiC на напряженно-деформированное состояние пластины из высокоплотной нитридной керамики в условиях нестационарной термоупругости / В.В. Кузин, С.Н. Григорьев, М.А. Волосова. – Текст : непосредственный // Новые огнеупоры. – 2013. – № 9. – С. 52-57.
14. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов в камере, облучаемой быстрыми электронами / А.С. Метель, С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник, В.В. Прудников. – Текст : непосредственный // Физика плазмы. – 2011. – Т. 37. – № 7. – С. 674-683.
15. Improving the efficiency of the cutting tool made of ceramic when machining hardened steel by applying nano-dispersed multi-layered coatings / A.S. Vereschaka, S.N. Grigoriev, E.S. Sotova [et al.]. – Текст : непосредственный // Key Engineering Materials. – 2014. – Vol. 581. – P. 68-73.
16. Structure and mechanical properties of W–Se–C/diamond-like carbon and W–Se/diamond-like carbon bi-layer coatings prepared by pulsed laser deposition / V.Yu. Fominski, S.N. Grigoriev, J.P. Celis [et al.]. – Текст : непосредственный // Thin Solid Films. – 2012. – Vol. 520. – № 21. – P. 6476-6483.
17. Климонтович, Ю.Л. Введение в физику открытых систем / Ю.Л. Климонтович. – Москва : Янус-К, 2002. – 164 с. – Текст : непосредственный.

18.

УДК 621.726

С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, М.Ш. Мигранов, А.М. Мигранов
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Уфимский государственный авиационный технический университет

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АДАПТАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

© Григорьев С.Н., Волосова М.А.,
Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., 2022

Проведен термодинамический анализ образования вторичных структур при трении, позволяющий обосновать повышение эффективности лезвийной обработки резанием металлов путем образования защитных вторичных структур на поверхности режущего инструмента.

Ключевые слова: композиционные покрытия, физическое осаждение покрытий, химическое осаждение покрытий, термодинамика, трибосистема, адаптация, самоорганизация, вторичные структуры.

THERMODYNAMIC DESCRIPTION OF FRICTION SURFACE ADAPTATION IN BLADE MACHINING

In work the thermodynamic analysis of formation of secondary structures at friction, allowing to prove increase of efficiency of blade metal cutting processing by formation of protective secondary structures on a surface of the cutting tool is spent.

Keywords: composite coatings, physical deposition of coatings, chemical deposition of coatings, thermodynamics, tribosystem, adaptation, self-organization, secondary structures.

Введение. Известно [1–7], что основные явления при трении концентрируются в тонком приповерхностном слое. Представляют научный и практический интерес термодинамические аспекты состояния этого слоя и связь изнашивания с этим состоянием. В работе [5] убедительно показано, что любую трибосистему следует рассматривать как открытую неравновесную термодинамическую систему. В работах [5, 6, 8–12] сформулирован принцип вторичной диссипативной гетерогенности, согласно которому в процессе трения происходит явление структурной приспособляемости (адаптации) контактирующих материалов, когда все виды взаимодействия тел локализуются в тонкопленочном объекте – вторичных структурах (ВС). В соответствии с этим принципом ВС необходимы для рассеяния энергии при ее переходе из зоны трения в трущиеся тела, причем, рассеяние энергии должно происходить с наименьшей скоростью прироста энтропии. Вторичные структуры выполняют защитные функции, ограничивая распространение взаимодействия внутри трущихся тел и снижая интенсивность этого взаимодействия, поэтому их появление соответствует принципу Ле Шателье [5, 7].

Экспериментально-аналитическое исследование. Как известно, изменение энтропии любой термодинамической системы определяется по формуле [3, 5]

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (1)$$

где $d_e S$ – изменение энтропии, обусловленное обменом веществом и энергией с внешней средой; $d_i S$ – изменение энтропии, обусловленное необратимыми процессами внутри системы.

В стационарном состоянии изменение энтропии по времени равно нулю, т.е.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} + \frac{d_e S}{dt} = 0, \quad (2)$$

и при этом $\frac{d_i S}{dt} > 0$. Тогда

$$\frac{d_e S}{dt} < 0, \quad (3)$$

где $\frac{d_e S}{dt}$ – поток энтропии; $\frac{d_i S}{dt}$ – производство энтропии.

В данном исследовании при разработке принципов рационального выбора и применения износостойких инструментальных материалов рассмотрена трибосистема «инструмент – обрабатываемый материал», во вторичных структурах которой проходят следующие основные термодинамические потоки: поток тепла, поток вещества, поток физико-химических превращений и поток дополнительных воздействий (применение смазочно-охлаждающих жидкостей, нестационарность режимов резания и т.п.). Эта система представлена в виде трущегося тела и источников энергии в зоне трения. Принято, что источники энергии не имеют массы и поэтому не обладают энтропией. Рассмотрено производство энтропии одного из контактирующих тел – режущего инструмента – при резании металлов [8–12].

Предположим, что в ВС трущихся поверхностей инструмента проходят только два термодинамических потока: поток тепла и поток вещества. Полагаем, что за время взаимодействия не успевает пройти обмен теплом системы, состоящей из трущегося тела и источника тепла (зоны трения), со средой и поток энтропии $\frac{d_e S}{dt}$ в уравнении (2) связан только с износом. Принимаем, что в стационарном состоянии величина интенсивности изнашивания режущего инструмента связана с потоком вещества m_e , который обуславливается градиентом концентрации вещества.

И только при износе (удалении насыщенных слоев) возможно продолжение потока вещества, так как снова появляется градиент его концентрации. Тогда производство энтропии ВС в рассматриваемой системе (без учета взаимосвязи потоков между собой) составит

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_q}{dt} + \frac{dS_m}{dt}. \quad (4)$$

Здесь $\frac{dS_q}{dt}$ – часть производства энтропии, связанная с тепловым потоком:

$$\frac{dS_q}{dt} = J_q \cdot X_q, \quad (5)$$

где J_q – поток тепла; $X_q = (\text{grad}T) / T^2$ – термодинамическая сила, вызывающая поток тепла (T – температура); по закону переноса теплоты Био – Фурье $J_q = -\lambda \cdot \text{grad}T$ (λ – теплопроводность).

Принимаем, что лишь некоторая часть (X) механической энергии трения рассеивается потоком тепла, т.е.

$$J_q = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X (X < 1), \quad (6)$$

где f_m – коэффициент трения; p_r – удельная нормальная нагрузка; V – скорость резания-скольжения.

Тогда после соответствующих подстановок и преобразований выражение (5) примет вид

$$\frac{dS_q}{dt} = \frac{(f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2}. \quad (7)$$

Изменение энтропии потока вещества в ВС определяется из уравнения

$$\frac{dS_m}{dt} = J_m \cdot X_m, \quad (8)$$

где J_m – поток переноса вещества; X_m – термодинамическая сила, вызывающая поток вещества; $X_m = (\text{grad}C) / T$ (C – концентрация вещества).

По закону переноса вещества Фика $J_m = m_e - D \cdot \text{grad}C$ (D – коэффициент диффузии). Принимаем, что некоторая часть (Y) общего производства энтропии при трении расходуется на формирование потока вещества, т.е.

$$J_m = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y (Y < 1). \quad (9)$$

Тогда выражение (7) примет вид

$$\frac{dS_m}{dt} = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \frac{m_e}{D \cdot T}. \quad (10)$$

После подстановки соотношений (8), (10) в формулу (4) получим

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{(f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2} + f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \frac{m_e}{D \cdot T}. \quad (11)$$

Согласно универсальному критерию эволюции И. Пригожина [7], при эволюции термодинамической системы часть изменения производства энтропии, связанная с изменением термодинамических сил, будет отрицательной. Невозможно однозначно утверждать, какой знак будет у части изменения производства энтропии, связанной с изменением термодинамических потоков. Однако в [7] приведена следующая теорема: если производство энтропии системы уменьшается при изменении термодинамических потоков и сил, то производство энтропии достигает минимума в стационарном состоянии и далее не меняется. На основании этой теоремы в работах [3, 5] предполагается, что в стационарном состоянии производство энтропии в трибосистеме может не меняться в некоторых пределах изменения параметров трения. Подобную устойчивость трибосистема может приобрести только после потери термодинамической устойчивости и образования диссипативных структур.

Дифференцируя выражение (11) по скорости резания V (скорости скольжения) как независимой переменной рассматриваемой трибологической системы и приравнивая результат к нулю, получим условие устойчивости производства энтропии в стационарном состоянии этой системы:

$$\frac{2 \cdot f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X}{\lambda_{cp} \cdot T} - \left| Y \frac{m_e}{D_{cp}} \right| = 0. \quad (12)$$

Знак перед вторым членом принят отрицательным из условия (2). Это связано с тем, что из условия аддитивности он пропорционален интенсивности изнашивания материала трущегося тела, а частицы износа удаляются из трибосистемы со своим содержанием энтропии.

Из выражения (12) можно определить поток вещества:

$$m_e = \frac{2 \cdot f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X \cdot D_{cp}}{\lambda_{cp} \cdot T \cdot Y}. \quad (13)$$

В выражении (13) введены средние значения теплопроводности λ_{cp} и коэффициента диффузии D_{cp} во вторичных структурах в предположении независимости их от скорости резания.

Линейная интенсивность изнашивания J_h и поток вещества m_e могут быть связаны соотношением

$$J_h = \frac{k \cdot m_e}{\rho \cdot V}, \quad (14)$$

где k – коэффициент пропорциональности; ρ – плотность вещества изношенных частиц.

Известно [3], что коэффициент трения на задней поверхности режущих инструментов в основном определяется адгезионной составляющей коэффициента трения [9] и рассчитывается по формуле

$$f_m = \frac{\tau_{nn}}{p_{rn}}, \quad (15)$$

где τ_{nn} – прочность адгезионных связей на срез; p_{rn} – предельное нормальное напряжение на пластическом контакте.

Именно такой контакт имеет место на задней поверхности режущих инструментов, т.е. в выражении (13) $p_r = p_{rn}$. Тогда соотношение (15) можно представить в виде

$$J_h = \frac{2 \cdot X \cdot k}{Y} \cdot \frac{\tau_{nn} \cdot D_{cp}}{\lambda_{cp} \cdot T \cdot \rho}. \quad (16)$$

Из уравнения (16) видно, что интенсивность изнашивания инструментов по задней поверхности в значительной мере определяется температурными зависимостями $\tau_{nn}(T)$. Данная формула является аналитическим выражением интенсивности изнашивания режущих инструментов, которое получено из условия устойчивости стационарного состояния с минимальным производством энтропии на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемый материал».

Из выражения (16) следует, что в условиях, когда влияние физико-химических превращений в ВС фрикционного контакта является несущественным и его можно не принимать во внимание, концентрация вещества составит

$$C = \frac{J_h \cdot T}{\tau_{nn}} = \frac{2 \cdot X \cdot k}{Y} \cdot \frac{D_{cp}}{\lambda_{cp} \cdot \rho}. \quad (17)$$

Величина C , согласно формуле (17), не должна изменяться с повышением температуры T .

В табл. 1–3 представлены результаты экспериментальных исследований и значения величины C , вычисленные по этим результатам, в зависимости от температуры резания, изменяющейся за счет корректировки скорости резания.

Таблица 1

Точение сплава ХН70ВМТЮБ резцом ВК6М
(скорость резания $V = 15–65$ м/мин; глубина $t = 0,5$ мм;
подача $S = 0,08$ мм/об)

Температура резания T , К	τ_{nn} , МПа	$J_h \cdot 10^7$	$C \cdot 10^7$
873	620	1,1	1,55
923	540	0,9	1,54
973	500	0,8	1,55
1 073	380	2	5,6
1 173	220	4	21,3

Таблица 2

Фрезерование стали 30ХГСА (HRCэ 35–38)
однозубой торцевой фрезой Т15К6 (скорость резания $V = 40–120$ м/мин;
глубина $t = 0,5$ мм; подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/об)

Температура резания T , К	τ_{nn} , МПа	$J_h \cdot 10^5$	$C \cdot 10^5$
923	600	1,0	1,54
993	350	0,53	1,51
1 023	300	0,45	1,53
1 053	280	1,0	3,76
1 093	210	1,32	6,9

Таблица 3

Точение сплава ХН70ВМТЮБ резцом Р18Ф2К8М
(скорость резания $V = 3–10$ м/мин; глубина $t = 0,5$ мм; подача $S = 0,12$ мм/об)

Температура резания T , К	τ_{nn} , МПа	$J_h \cdot 10^7$	$C \cdot 10^7$
593	780	1,1	0,84
693	740	0,9	0,84
763	640	0,7	0,83
783	620	1,8	2,27
813	600	4,8	6,5

Из приведенных данных видно, что для каждого состояния трибосистемы «инструмент – обрабатываемый материал» повышение температуры T в исследованном диапазоне до некоторой величины, обозначенной как характерная $T_{\text{хар}}$, практически не влияет на величину S . Эта температура в работе А.Д. Макарова названа оптимальной температурой резания, так как интенсивность изнашивания режущего инструмента при ней минимальна. Это, во-первых, свидетельствует о том, что до $T_{\text{хар}}$ физико-химические превращения на фрикционном контакте не могут играть определяющей роли в формировании потока вещества и изнашивании инструмента (возможно, в связи с тем, что именно до этой температуры рассматриваемые превращения практически отсутствуют). Во-вторых, соответствие интенсивности изнашивания режущих инструментов (по меньшей мере до температур $T_{\text{хар}}$) выражению (16) показывает, что состояние ВС на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемый материал» может рассматриваться как стационарное с минимальным производством энтропии, устойчивое по отношению к изменению скорости (температуры) резания. В-третьих, при температурах $T_{\text{хар}}$ и выше, очевидно, устанавливаются новые связи между элементами системы (поток вещества и температурой), которые можно объяснить появлением новой структуры, способствующей упорядочению системы [2–10].

Такие результаты получены для существенно различных условий резания металлов:

для точения и фрезерования;

твердосплавных и быстрорежущих инструментальных материалов;

жаропрочных сплавов и конструкционных сталей как обрабатываемых материалов.

В работе [8] показано, что если механическая энергия трения является единственным источником изменения производства энтропии, то термодинамическая система не теряет устойчивости, а следовательно, в ней не происходит самоорганизация. Для возможности прохождения самоорганизации и образования диссипативных структур необходимо более одного независимого источника диссипации энергии. Диссипативными структурами могут быть несамопроизвольные химические реакции, инициируемые трением [3, 5]. Следовательно, при температурах резания $T_{\text{хар}}$ и выше на фрикционном контакте могут появиться новые источники диссипации энергии – несамопроизвольные химические реакции с отрицательным производством энтропии, инициируемые трением. Тогда производство энтропии ВС в трибосистеме с учетом физико-химических превращений будет рассчитываться как

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{dS_q}{dt} + \frac{dS_\phi}{dt} . \quad (18)$$

Здесь поток энтропии за счет физико-химических превращений в ВС, согласно И. Пригожину [7], находится из выражения

$$\frac{dS_\phi}{dt} = J_x \cdot X_x, \quad (19)$$

где J_x – скорость химических реакций; X_x – термодинамическая сила, вызывающая химические реакции; $X_x = A / T$ (A – химическое сродство).

Согласно [9] вблизи термодинамического равновесия скорость химической реакции и химическое сродство связаны соотношением

$$V_x = L_{11} \cdot R \cdot T \cdot \left(\exp \frac{A}{R \cdot T} - 1 \right), \quad (20)$$

где L_{11} – коэффициент сопряженных взаимодействий; R – газовая постоянная.

Разложив $\left(\exp \frac{A}{R \cdot T} \right)$ в ряд и отбросив члены второй и последующих степеней малости, получим

$$V_x \approx L_{11} \cdot A. \quad (21)$$

Принято, что некоторая часть (Z) механической энергии трения расходуется на физико-химические превращения в ВС, т.е.

$$J_x = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Z (Z = 1 - X - Y). \quad (22)$$

Тогда уравнение (18) примет вид

$$\frac{dS_\phi}{dt} = f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Z \frac{V_x}{L_{11} \cdot T} \quad (23)$$

После подстановки выражений (11) и (23) в соотношение (18) получим

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2} - \left| f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \frac{m_e}{D \cdot T} \right| \pm \left| f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Z \frac{V_x}{L_{11} \cdot T} \right| \quad (24)$$

Если во вторичных структурах трибосистемы «инструмент – обрабатываемый материал» проходят в общем случае термодинамические потоки тепла, вещества, физико-химических превращений и дополнительных воздействий, то изменение производства ВС со временем составит

$$\frac{dS}{dt} = \frac{(f_m \cdot p_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2} - \left| f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Y \frac{m_e}{D \cdot T} \right| \pm \left| f_m \cdot p_r \cdot V \cdot Z \frac{V_x}{L_{11} \cdot T} \right| + J_g \cdot X_g, \quad (25)$$

где J_g – поток дополнительных воздействий; X_g – термодинамическая сила, вызывающая поток дополнительных воздействий.

Конкретизация величин J_g и X_g зависит от вида применяемых дополнительных воздействий. Это составляющая производства энтропии в общем случае не зависит от характеристик трения на фрикционном контакте. Поэтому для прогнозируемой адаптации поверхностей трения и снижения интенсивности изнашивания необходимо применять инструментальные материалы и износостойкие покрытия, содержащие химические элементы и соединения, способные в определенных условиях вступать в химическое взаимодействие с обрабатываемым материалом и окружающей средой, создавать неравновесные ВС с отрицательным производством энтропии. Подобное предположение для трибосистем впервые было высказано Л.И. Бершадским, теоретически этот вывод обоснован в работе [5]. Описанному применению должны способствовать дополнительные воздействия на зону резания (применение смазочно-охлаждающих жидкостей, нестационарность элементов режима резания и т.п.).

Заключение

Таким образом, представленные экспериментальные результаты подтвердили прохождение самоорганизации при температурах резания $T_{хар}$ и выше и образование на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемый материал» неравновесных диссипативных структур.

Следует, однако, иметь в виду, что в данной работе представлено первое приближение термодинамического подхода к оценке изнашивания инструмента: без рассмотрения условий потери устойчивости и возможных взаимодействий различных процессов друг с другом.

На основании выражения (25) предложены принципы рационального выбора и применения инструментальных материалов:

интенсивность изнашивания режущего инструмента снижается с уменьшением производства энтропии в зоне трения, зависящей от уровня триботехнических характеристик;

неравновесные процессы, связанные с физико-химическими превращениями в ВС и проходящие со снижением энтропии на поверхностях трения, могут привести к уменьшению интенсивности изнашивания режущего инструмента (экранирующий эффект);

дополнительные источники производства энтропии (охлаждение, нагрев, подача кислорода, переменность элементов режима резания и др.)

должны способствовать протеканию неравновесных процессов образования ВС на фрикционном контакте «инструмент – обрабатываемая деталь».

Библиографический список

1. Кабалдин, Ю.Г. Самоорганизация в процессах трения и смазки при резании / Ю.Г. Кабалдин. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2003. – № 10. – С. 53-59.
2. Якубов, Ф.Я. Энергетика процесса самоорганизации при трении и изнашивании / Ф.Я. Якубов, В.А. Ким. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов «Высокие технологии в машиностроении». Вып. 1. – Харьков: НТУ, 2001. – С. 84-92.
3. Мигранов, М.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении / М.Ш. Мигранов, Л.Ш. Шустер. – Москва: Машиностроение, 2005. – 202 с. – Текст : непосредственный.
4. Семенов, Б.И. Диссипативные процессы и структурные изменения материала диска в трибосистеме алюмоматричный композит – контртело / А.Б. Семенов, Е.В. Игнатова. – Текст : непосредственный // Технология металлов. – 2006. – № 3. – С. 26-34.
5. Бершадский, Л.И. Структурная термодинамика трибосистем / Л.И. Бершадский. – Киев : Знание, 1990. – 253 с. – Текст : непосредственный.
6. Сивцев, Н.С. Самоорганизация контактного трения и точность обработки при дорновании / Н.С. Сивцев. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 57-61.
7. Пригожин, И. Современная термодинамика / И. Пригожин, Д. Кондипуди. – Москва : Мир, 2002. – 461 с. – Текст : непосредственный.
8. Булгаревич, С.Б. Термодинамические характеристики несамопроизвольных химических реакций, инициируемых трением / С.Б. Булгаревич. – Текст : непосредственный // Сборник трудов 3-го Международного семинара «Контактное взаимодействие и сухое трение». – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 60-67.
9. Гершман, И.С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих контактов : специальность 05.02.01 Материаловедение (машиностроение), 05.02.04 Трение и износ в машинах : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гершман И.С. – Москва, 2006. – 234 с. – Текст : непосредственный.
10. Migranov, M.S. Tribological properties of multilayer coatings for cutting tool / M.S. Migranov, A.M. Migranov, S.M. Minigaleev, S.R. Shehtman. – Текст : непосредственный // Journal of Friction and Wear. – 2018. – Vol. 39. – № 3. – P. 245-250.
11. Structure and mechanical properties of W–Se–C/diamond-like carbon and W–Se/diamond-like carbon bi-layer coatings prepared by pulsed laser deposition / V. Yu. Fominiski, S.N. Grigoriev, J.P. Celis [et al.]. – Текст : непосредственный // Thin Solid Films. – 2012. – Vol. 520. – № 21. – P. 6476-6483.
12. Physical characteristics, structure and stress state of vacuum-arc tin coating, deposition on the substrate when applying. high-voltage pulse during the deposition / O.V. Sobol', A.A. Andreev, S.N. Grigoriev [et al.]. – Текст : непосредственный // Problems of Atomic Science and Technology. – 2011. – № 4. – P. 174-177.

Г.Б. Бурдо, А.Н. Болотов
Тверской государственной технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕДУР ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

© Бурдо Г.Б., Болотов А.Н., 2022

Показаны процедуры разработки технологических процессов в системах автоматизированного проектирования с элементами искусственного интеллекта. Проектирование технологических процессов предложено выполнять по методу декомпозиции на четырех уровнях проектирования: укрупненная схема технологического процесса, маршрутная технология, операционная технология, режимы резания. На каждом уровне декомпозиции проектирование реализуется четырьмя процедурами: синтеза, моделирования, анализа и корректировки технологического решения. Показаны алгоритмы определения возможных корректирующих мероприятий.

Ключевые слова: технологический процесс, многоуровневая декомпозиция, синтез, моделирование, анализ, корректировка.

RESEARCH OF TECHNOLOGY DESIGN PROCEDURES IN COMPUTER-AIDED DESIGN AND PROCESS CONTROL SYSTEMS

The procedures for the development of technological processes in computer-aided design systems with elements of artificial intelligence are shown. It is proposed to carry out the design of technological processes using the decomposition method at four levels of design: an enlarged scheme of the technological process, route technology, operational technology, cutting modes. At each level of decomposition, design is implemented by the procedures synthesis of a technological solution, modeling of a technological solution, analysis of a technological solution, correction of a technological solution. Algorithms for determining possible corrective measures are shown.

Keywords: technological process, multilevel decomposition, synthesis, modeling, analysis, correction.

Введение. Одним из принципов, полагаемых в основу при создании систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП), является наличие элементов искусственного интеллекта (ИИ) в процедурах поиска решений [1]. Это требование исходит из необходимости высокой формализации процесса технологического проектирования (ТПП) (с целью перевода части функций, связанных с решением творческих задач, в автоматический или диалоговый режим) и снижения трудоемкости расчетов. Реализация подхода весьма важна для условий многономенклатурного единичного и мелкосерийного производств, в которых длительность технологической подготовки производства зачастую составляет

значительную часть от периода заказа (интервал времени от момента заключения договора до поставки продукции). Поэтому придание САПР ТП способностей генерировать и оценивать решения является достаточно актуальной проблемой.

Функция процесса проектирования. Для сохранения смыслового содержания ПТП и возможности оценки его хода пользователем САПР процедуры разработки технологий должны соответствовать обычной логике принятия проектировщиком решений, основанной на подходе «анализ – синтез». Учитывая, что формальные процедуры ведения ПТП в САПР ТП характеризуются более четкими определенностью и чередованием этапов, каждый из них целесообразно представить последовательностью «синтез – моделирование – анализ – корректировка» («с – м – а – к»). Вопросы синтеза технологических процессов достаточно широко освещены в исследованиях, выполненных под руководством докторов технических наук, профессоров Г.К. Горанского, Н.М. Капустина, И.П. Норенкова, В.Д. Цветкова [2, 3], и ряде работ, выполненных представителями других научных школ. Однако системное представление предложенных нами или аналогичных процедур отсутствует. Этот факт и предопределил настоящую работу. Основные недостатки процедур синтеза технологий – малая степень формальности процесса принятия решений и отсутствие учета динамики производственной ситуации. Выходом из данной ситуации является реализация идеи комплексной САПР ТП – АСУ ТП и представление каждой из них и в совокупности в виде структурных моделей. Также необходимо разработать системный подход к ПТП, основанный на реализации его в виде процедур преобразования информации и моделей самого проектируемого объекта (ТП) на разных уровнях иерархии.

Учитывая тот факт, что в силу преемственности процедуры поиска решений в пространстве состояний объекта должны соответствовать функциям ТП и его элементам, запишем общую функцию процедуры синтеза:

$$F_0: C_n \rightarrow C_k,$$

где C_n – информационное состояние, соответствующее заготовке; C_k – пространство поиска решений (состояния), соответствующее готовой детали.

Задача состоит в определении промежуточных состояний C_i пространства поиска решений и функции их получения. Такими состояниями могут быть укрупненная схема (УС), маршрутная технология (МТ), операционная технология (ОП), режимы решения (РР) и управляющие программы (УП) для станков с ЧПУ:

$$F_0: C_n C \rightarrow C_{ус} \rightarrow C_m \rightarrow C_{оп} \rightarrow C_{чпу} \equiv C_k.$$

Декомпозиция общей функции ПТП должна производиться в соответствии с иерархией ТП, что обеспечивает возможность критериальной оценки принятых решений.

Общая функция ПТП может быть декомпозирована на подфункции уровней:

$$F_0: \{F_{ус}, F_M, F_{оп}, F_{чпу}\}.$$

Каждая отдельная подфункция F_i может быть представлена в виде функций, описывающих элементы процесса (подзадачи) каждого i -го уровня иерархии:

$$F^i \rightarrow \{\phi_1^i; \phi_2^i; \dots, \phi_j^i, \dots, \phi_m^i\},$$

где ϕ_j^i – функция j подзадачи i -го уровня.

Таким образом может быть получен граф функций ПТП $\Gamma(\phi, \beta)$, где вершинам ϕ соответствуют функции отдельных элементов ϕ_j^i , а дугам β – отношения принадлежности. Данный метод известен в теории ИИ как сведение задач к подзадачам. Функции процесса проектирования F^i i -го уровня определяют правила преобразования пространства поиска решений $(i-1)$ -го уровня (C^{i-1}) в i -й (C^i) . Каждому пространству поиска решений (C^i) соответствует набор параметров $Z^i = \{Z_j^i\}: C^i \rightarrow Z^i, Z^i = \{Z_j^i\}$ – множество j -х структурных элементов i -го уровня иерархии. Необходимо отметить и динамичный (зависящий от времени t) характер функции $F^i = F^i(t)$.

Учитывая необходимость обучения системы, можно записать

$$F^i(t): Z^{i-1} \times \Delta R(t) \rightarrow Z^i,$$

где $\Delta R(t)$ – накопленный и обобщенный на настоящий момент опыт проектирования.

Каждому пространству поиска решений, помимо параметров, соответствует и ряд структур ТП, поэтому еще одно назначение функции F^i – построение возможных структур технологического решения на i -м уровне (функциональной S_ϕ , временной S_B и пространственной S_Π):

$$F_1^i(t): Z^{i-1} \times \Delta R(t) \times TC \rightarrow S_\phi(C^i, \phi),$$

$$F_2^i(t): Z^{i-1} \times \Delta R(t) \times TC \times S_\phi \rightarrow S_B(\phi, \omega),$$

$$F_3^i(t): Z^{i-1} \times \Delta R(t) \times TC \times S_\phi \times S_B \rightarrow S_\Pi(L, N),$$

где TC – текущее состояние в производственных подразделениях (на время t); $\phi = \{\phi_j^i\}$; $\omega = \{\omega_j^i\}$ – временные связи между множеством

функциями множества ϕ ; L = множество элементов технологической системы; N – размерные связи между ними.

Состав моделей, используемых в процедуре «с – м – а – к», должен отражать (имитировать) протекание ТП, что позволяет назвать второй этап имитационным моделированием (ИМ).

Имитационные модели технологического процесса. Основными задачами разработки ТП являются обеспечение достаточного резерва точности, определенного уровня производительности и минимизация затрат при определенных технических ограничениях (или, например, длительности цикла изготовления). Поэтому представляется целесообразным на каждом уровне ПТП выполнять ИМ одного и того же набора характеристик ТП, а этап «анализ» выполнять, руководствуясь критериями, вытекающими из глобальной целевой функции ТП. Набор имитационных моделей (ИМД), используемых на уровнях ПТП, должен позволять:

оценивать ожидаемую точность обработки отдельных поверхностей и детали в целом;

рассчитывать ориентировочные времена и себестоимость обработки отдельных поверхностей и детали в целом;

определять производительность обработки и циклы изготовления партий деталей.

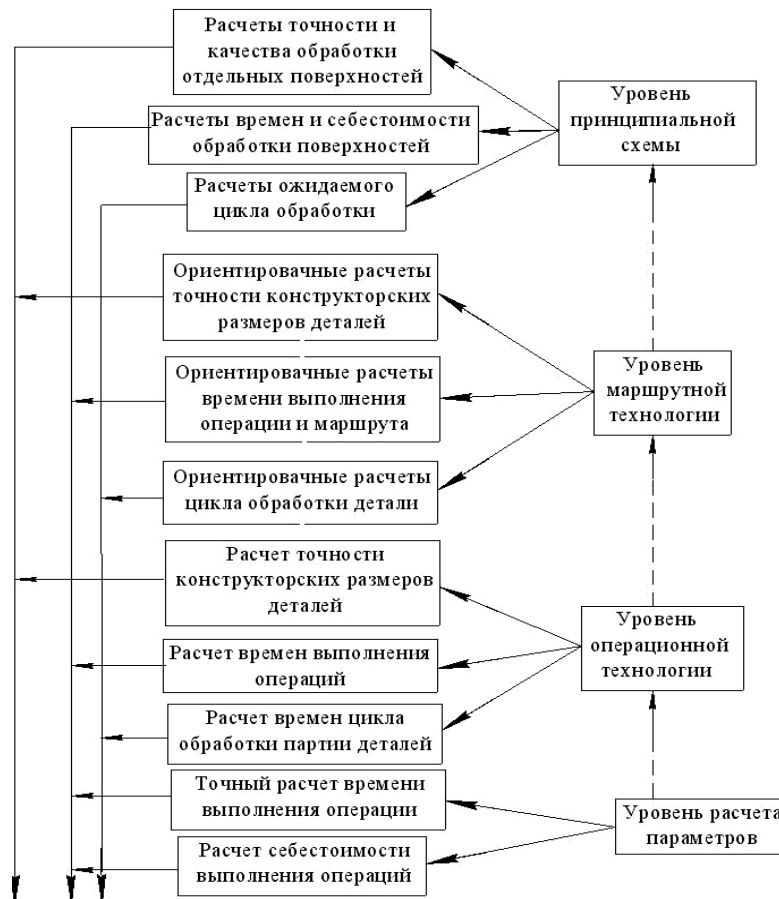
Системное единство моделей дает возможность находить зависимости (корреляцию) между значениями параметров, полученных моделями разной точности, и более четко прогнозировать достижения желаемого результата уже на первых уровнях ПТП, т.е. осуществлять самообучение (рисунок).

На уровне УС весьма полезным следует признать оценку точности маршрутов обработки отдельных поверхностей. Точность должна оцениваться с позиции размеров и взаимного расположения поверхностей относительно технологической базы. Для этой цели могут использоваться методики, предложенные в указанных выше работах и разработанные на кафедре «Технология машиностроения» ТГТУ [3].

Смысл ИМ на этом уровне:

$$\forall (\{МОП_{ji}\} \subset ПОВ_i; i = \overline{1, m}) \rightarrow (\{МОП_{ji}\}; j = \overline{1, k}; k \leq m); (ПР_{ji} - ТП_i \leq \Delta ТП) \vee (ПВ_{ji} - ТВР_i \leq \Delta ТВР)$$

, где $\{МОП_{ji}\}$ – множество j -х маршрутов обработки i -х поверхностей $\{ПОВ_i\}$; $ПР_{ji}, ПВ_{ji}$ – погрешности размера и взаимного расположения, обеспечиваемые j -м маршрутом обработки i -й поверхности; $ТП_i, ТВР_i$ – допуски размера и взаимного расположения поверхностей; $\Delta ТП, \Delta ТВР$ – допускаемое различие в параметрах.



Система имитационных моделей

В приведенной выше записи объединены процедуры ИМ и анализа. Следует отметить, что на уровне УС в алгоритмах, реализующих данную модель, могут использоваться некоторые ориентировочно назначенные параметры. Подвергшиеся анализу решения и удовлетворяющие ему в дальнейшем оцениваются критериально. На этом же уровне по укрупненным нормативам может быть произведен расчет времен на выполнение переходов обработки каждой поверхности и их себестоимости, цикла механической обработки на основании статистических длительностей операций:

$$T_{ц} = (N_{ЭТ} - 1) \cdot t_{ПЭ} + t_{шт. ср} \cdot N_{ЭТ} \cdot K + (N_{ЭТ} \cdot K - N_{ЭТ} - 1)t_{по},$$

где $N_{ЭТ}$ – число этапов обработки детали; $t_{ПЭ}$ – средний перерыв времени между окончанием предыдущего и началом нового этапа; $t_{шт. ср}$ – среднее штучно-калькуляционное время выполнения операции для определенного типа деталей; K – среднее число операций в этапе для данного типа деталей; $t_{по}$ – среднее время ожидания следующей операции.

На следующем уровне (МТ), когда известны последовательность операций, базирование и состав переходов в операции, моделью является функциональный граф, описывающий последовательность смены техноло-

гических баз и связи между поверхностями, которые подлежат обработке от этих баз, и граф размерных связей технологического маршрута:

$$\forall (\{TM_{ij}\} \subset D_i; i = \overline{1, e}; j = \overline{1, m}) \rightarrow (\{TM_{ij}\}, j = \overline{1, k}; k \leq m; \\ (TP_{ic} - TP_{ic} \leq \Delta TP) \vee (TBП_{icj} - TBП_{ic} \leq \Delta TB), \{P_{ci}\} \subset D_i; c = \overline{1, p},$$

где $\{TM_{ij}\}$ – множество маршрутов обработки детали D_i ; $TBП_{icj}$, $TBП_{ic}$ – точность c -го размера и взаимного расположения i -й поверхностей при j -м маршруте ее обработки; TP_{ic} , $TBП_{icj}$ – допуск размера и взаимного расположения c -й поверхности i -й детали; $\{P_{ci}\}$; ΔTP , ΔTB – допускаемые различия в параметрах.

По графу функциональной структуры технологического процесса укрупненно может быть подсчитано штучное и штучно-калькуляционное время выполнения операции $T_{шт. l}$ и $T_{шт. к. l}$:

$$\{ПЕР_{kl}\} \times \{Z_k\} \times ОБ_l \times CY_e \times \{PP_k\} \times КХД \rightarrow T_{шт. l}(T_{шт. к. l}),$$

где $\{ПЕР_{kl}\}$ – множество переходов операции l ; $\{Z_k\}$ – множество параметров k -го перехода; $ОБ_l$ – оборудование, применяемое в операции; CY_e – схема установки детали в операции; $\{PP_k\}$ – параметры режимов резания для k -го перехода; $КХД$ – множество конструкторских характеристик детали.

Затраты времени на выполнение различных маршрутов анализируются. Зная временные затраты на операции, можно оценить и их себестоимость, а также время цикла.

На уровне ОП становятся известными графы временной и пространственной структуры ТП. Следовательно, в ИМД должны быть включены расчеты, связанные с более корректным определением точности ТП (на предыдущем уровне не была понята последовательность выполнения переходов в операции, что вызывало некую неопределенность в расчетах и построение алгоритмов по худшему сценарию), уточнением схем наладок по графу пространственной структуры, затрат времени на операцию, однако элемент неопределенности остается в связи с отсутствием расчетных данных по режимам резания. Следовательно, ИМ может быть подвергнута и последовательность выполнения переходов с определением длительности выполнения операций, уточнен цикл обработки партии деталей.

На последнем уровне имитируется процесс резания на станочном оборудовании в соответствии с техническими ограничениями, вносимыми технологической системой. Таким образом становятся известными все системные характеристики и параметры ТП, что позволяет точно рассчитать временные и стоимостные затраты на его выполнение.

Анализ вариантов технологического процесса. Операция «анализ вариантов» напрямую следует из состава имитационных моделей и зачастую не отделяется от моделирования. При анализе полученные при ИМ структуры ТП исследуются на соответствие заданным технико-экономическим ограничениям.

Цель анализа на всех уровнях – установление связи структур и параметров ТП с такими его показателями, как точность, трудоемкость, себестоимость; при этом на последних двух уровнях точность анализа достаточно высока. Главное достоинство метода ИМ и анализа – отсеечение явно нецелесообразных вариантов на ранних этапах проектирования, что позволит трактовать его как одну из составляющих элемента ИИ.

Можно указать [4] три основные задачи, решаемые при анализе: сравнение полученных результатов с допустимыми и определение отклонений;

выявление причин отклонений;

установление взаимосвязи отдельных показателей.

Этих задач явно недостаточно, поэтому необходимо указать еще одну, наиболее важную с позиций ИИ: нахождение взаимосвязи между критериями и решениями на различных уровнях, родственными по смыслу, накопление и обобщение опыта. Рассчитанные точность и параметры качества обработки отдельных поверхностей в последующем могут использоваться как типовые проектные решения (ТР) при выборе маршрута обработки поверхности (первый уровень):

$$\left(\text{МОП}_{ik} = \langle \text{ПЕР}_{ji} \rangle_k \right) \times \text{ХП}_i \times \text{ТХ} \rightarrow \text{ТП}_{ik} \wedge \text{КП}_{ik};$$

$$\text{Тх} \times \{ \text{МОП}_{ik} \} \times \text{ХП}_i \times (\{ \text{ТП}_{ik} \} \wedge \{ \text{КП}_{ik} \}) \times \text{Р} \rightarrow \text{ТР} \equiv \text{МОП}_i,$$

если $\forall [(m, l \subset k, m \neq 1)(\text{ТП}_{il} - \text{ТП}_{im} < \Delta \text{ТП}) \wedge (\text{КП}_{il} - \text{КП}_{im} < \Delta \text{КП})]$,

где МОП_{ik} – маршрут обработки i -й поверхности, полученный методами k -го синтеза, $k = 1, 2, \dots, l, \dots, m, \dots, P$; ТХ – характеристики технологической системы; ПЕР_{ji} – j -й переход j -й поверхности, описываемый системными характеристиками; $\text{ТП}_i, \text{КП}_i$ – точность и качество i -й поверхности соответственно; ХП_i – конструкторские характеристики i -й поверхности; p – частота повторений решений (рекомендуется брать не менее 3–5); МОП_i – типовые решения по маршрутам обработки i -й поверхности; $\Delta \text{ТП}, \Delta \text{ТВ}$ – допускаемая разница в значениях параметров точности и качества поверхностей.

Время и себестоимость обработки поверхностей связаны с параметрами перехода, размерами поверхностей, видом применяемого оборудования и инструмента, строгими аналитическими зависимостями, поэтому впоследствии могут использоваться как типовые нормы на обработку поверхности. Цикл обработки подсчитывается достаточно

приближенно, поэтому используется при анализе как дополнительный фактор при равноценности предыдущих.

На уровне М с помощью имитационного моделирования накапливаются укрупненные нормативы времени $НВ$ на выполнение операций:

$$\begin{aligned} ОП_{ik} &= \{ПЕР_{jik}\} \times ХД \times ОБ_i \times n_i \times \{РИ_i\} \rightarrow T_{шт. ik}; \\ \{ОП_{ik}\} \times ХД \times \{ОБ_i\} \times n_{ik} \times P \times \{РН_i\} &\rightarrow НВ \equiv T_{шт. i}, \\ \text{если } \forall [(m, l \subset k, m \neq 1)(T_{шт. im} - T_{шт. il} < \Delta T_{шт})], \end{aligned}$$

где $ОП_{ik}$ – k -й синтезированный вариант i -й операции на оборудовании $ОБ_i$ ($k = 1, 2, \dots, l, p$); $ХД$ – характеристики определенного типа деталей; n_{ik} – число переходов в i -й операции; $T_{шт}$ – штучное время выполнения i -й операции, полученной k -м методом синтеза; $\Delta T_{шт}$ – допустимая разница времен однотипных операции; $\{РИ_i\}$ – режущий инструмент, используемый в i -й операции; $T_{шт. il}$ – типовая норма времени.

Анализ величин, полученных по формуле, позволил получить зависимость, определяющую более простую связь:

$$ОП_c \times ХД \times n_c \times \{ОБ_c\} \times \{РН_c\} \rightarrow T_{шт. c},$$

где $\{ОБ_c\}$ – множество станков одного типа C ; $T_{шт. c}$ – значения времен на операцию.

Расчет цикла обработки детали на этом уровне уточняет выполненный ранее, при этом используются не статистические времена операций, а полученные расчетом. При анализе соотношения времен выполнения операций и длительности общего цикла можно увидеть объем непроизводительных потерь времени, а также найти связь между циклами обработки $T_{ц1ik}$ и $T_{ц2ik}$, определенными на первом и втором уровнях:

$$\{T_{ц1ik}\} \times \{T_{ц2ik}\} \times P \times ХД_i \times \{n_{ik}\} \times \{O_{ik}\} \times \{Э_{ik}\} \times \{ОБ_{ik}\} \rightarrow T_{ц1ik}/T_{ц2ik},$$

где $\{n_{ik}\}$ – множество переходов обработки деталей i -го типа на k -м варианте синтеза ($k = 1, 2, \dots, p$); $ХД_i$ – характеристики i -го типа детали; $\{Э_{ik}\}, \{O_{ik}\}$ – множество этапов и операций обработки i -го типа на k -м варианте синтеза; $\{ОБ_{ik}\}$ – множество типов оборудования, используемого в маршруте.

На уровне ОП расчет точности конструкторских размеров и времен проводится с учетом временной структуры операций и позволяет выявить возможные причины отклонений, дать оценку по трудоемкостям. По зависимостям, аналогичным последней, можно найти соотношения между циклами обработки на втором и третьем уровнях. Процедура, приведенная

ниже, позволяет определить и соотношения между штучными временами обработки деталей ($T_{шт2ik}$ и $T_{шт3ik}$) i -го типа с характеристиками $XД_i$:

$$\{OB_{ik}\} \times \{T_{шт2ik}\} \times \{T_{шт3ik}\} \times P \times XД_i \times \{n_{ik}\} \rightarrow T_{шт2ik}/T_{шт3ik}$$

Учитывая большую точность расчетов, на этом уровне можно говорить и об исследовании цикла обработки партии деталей, запускаемых в изготовлении.

На четвертом уровне расчет параметров режимов резания позволяет уточнить данные по времени выполнения операции, ее себестоимости и производительности. Точность обработки на данном этапе не анализируется, так как она будет являться ограничением в модели расчета режимов резания. Цикл обработки партии детали принципиально может быть получен, однако учитывая статистический характер времен ожидания, существенного уточнения получено не будет.

Оценка и корректировка вариантов технологии. Операция оценки вариантов напрямую связана с работой системы критериальных оценок, которая рассматривается отдельно. Кратко укажем, что на первых уровнях ПТП наиболее весомыми будут являться отдельные локальные критерии, учитывающих важность того или иного глобального. Эвристичность критериев достаточно высока на всех уровнях, кроме последнего. Операция «корректировка варианта» в условиях единичного и мелкосерийного производства должна производиться по следующим направлениям: корректировка точности, времени выполнения операций, себестоимости выполнения операции. Направления корректировок задаются на основе действующих директив системы управления организацией высшего уровня.

Корректировка точности выполняется по-разному:

на первом уровне – введением дополнительных переходов обработки поверхностей;

втором и третьем уровнях – изменением схемы базирования, перераспределением переходов, дифференциацией маршрута и т.д.

Корректировка времени выполнения обработки осуществляется на уровнях:

первом – заменой режущего инструмента, интенсификацией процесса резания;

втором-четвертом – интенсификацией процессов резания, объединением операций в пределах одного этапа и нескольких; выбором оборудования с более широкими технологическими возможностями.

Корректировка времени цикла заключается в уменьшении времени выполнения операций, обязательном объединении этапов; выполнении прерывающих маршрут операций в начале цикла обработки; заблаговременной подготовке заготовок.

При корректировке себестоимости обработки поверхностей и детали следует исходить из того факта, что она пропорциональна времени и

стоимости работы оборудования, включающего затраты по станкам, инструменту, заработной плате, для чего используются соответствующие зависимости. Следует заметить, что задача итерационна и решение ищется между параметрами, определяющими максимальную производительность и минимальную себестоимость [5]. Итерационность объясняется тем, что при интенсификации режимов обработки сокращается время, но увеличиваются затраты по инструменту. В связи с этим рекомендуются способы корректировки:

- 1) интенсификация режимов обработки;
- 2) если это ведет к увеличению себестоимости, их снижение;
- 3) использование в операции более дешевого оборудования и инструмента;
- 4) применение автоматизированного оборудования с ЧПУ;
- 5) сочетание способов 1 и 4;
- 6) сочетание способов 2 и 3;
- 7) сочетание способов 1 и 3.

Другие направления корректировки в условиях обработки малыми партиями (перекомпоновка схемы операции, изменение размеров заготовок и т.д.) приводят к длительным итерационным диалоговым циклам, позволяют незначительно улучшить решения и подходят для серийного, крупносерийного и массового производства.

Заключение. Указанные процедуры могут быть достаточно просто реализованы при разработке методики проектирования технологических процессов в САПР ТП для предприятий многономенклатурного наукоемкого производства. Их внедрение, согласно экспертным оценкам, позволит в 1,5–2 раза сократить время технологической подготовки производства и снизить трудоемкость и себестоимость изготовления изделий на 12–15 %.

Библиографический список

1. Палюх, Б.В. Повышение эффективности управления технологическими подразделениями в условиях единичного и мелкосерийного производств / Б.В. Палюх, Г.Б. Бурдо. – Текст: непосредственный // Вестник ДГТУ. – 2009. – Т. 9. – № 4 (43). – С. 659-666.
2. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / А.Г. Ракович, Г.К. Горанский, Л.В. Губич [и др.] – Минск : ИТК АН Беларуси, 1997. – 276 с. – Текст : непосредственный.
3. Капустин, Н.М. Структурный синтез проектирования технологических процессов деталей с использованием генетических алгоритмов // Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Информационные технологии. – 1998. – № 4. – С. 34-37.
4. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В.Д. Цветков. – Минск : Наука и техника, 1979. – 264 с. – Текст : непосредственный.
5. Бурдо, Г.Б. Обеспечение надежности технологических процессов / Г.Б. Бурдо, Г.И. Рогозин, А.И. Матвеев. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ТГТУ. – Тверь : ТГТУ, 1997. – С. 32-34.

А.М. Буров, М.В. Иванов, В.Е. Евланов
Институт архитектуры и строительства
Волгоградского государственного технического университета

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТА И ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СКВАЖИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСОВ КОС-02

© Буров А.М., Иванов М.В.,
Евланов В.Е., 2022

В статье приведен необходимый комплекс ремонтных работ для перевода скважины с фонтанного способа добычи на механизированный. Отмечены недостатки действующей технологии очистки. Предложена технология очистки скважины с использованием комплекса КОС-02 и многофункционального инструмента, имеющего возможность возвратно-поступательного и вращательного движения. Приведена схема силового воздействия очищающего инструмента, дана оценка силовых параметров процесса.

Ключевые слова: разрушение зоны забоя, песчаная пробка, оборудование, очистка скважин, очищающий инструмент, технология промывки.

IMPROVEMENT OF TOOL DESIGN AND WELL CLEANING TECHNOLOGY USING KOS-02 COMPLEXES

The article provides the necessary complex of repair works for transfer of the well from the fountain method of production to the mechanized one. The shortcomings of the current cleaning technology are noted. A technology for cleaning the well using the KOS-02 complex and a multifunctional tool with the possibility of reciprocating and rotational motion is proposed. A scheme of the force effect of the cleaning tool is given and an assessment of the force parameters of the process is given.

Keywords: destruction of the face zone, sand plug, equipment for cleaning wells, flushing technology.

Эксплуатация нефтяных и газовых скважин – это длительный процесс, состоящий из нескольких этапов, основными из которых являются:

- 1) рост добычи сырья;
- 2) стабилизация добычи;
- 3) падение добычи;
- 4) завершение эксплуатации.

В процессе эксплуатации нефтяных и газовых скважин падение добычи может произойти из-за снижения пластового давления в забое, по причине выработки месторождения, а также из-за деформации слабоустойчивых пород, что приводит к разрушению призабойной зоны. При этом если скорость потока жидкости мала и не обеспечивает вынос частиц породы на поверхность, то образуется пробка, существенно

влияющая на установленный технологический режим эксплуатации и состоящая из песка, глины, шлама, металлических фрагментов [1]. По мере увеличения пробки снижается производительность скважины и постепенно уменьшается ее дебит [2].

Цели работы: разработка конструкции многофункционального инструмента для очистки скважины, имеющего возможность возвратно-поступательного и вращательного движения; разработка маршрутной технологии очистки наклонно-направленных скважин с использованием комплекса КОС-02, работающего в составе бурильно-ремонтных установок; оценка силовых параметров процесса.

Материалы и методы. В условиях падения пластового давления обычно решается вопрос о переводе скважины с фонтанного способа добычи на более рациональные (механизированные) способы, которые позволят восстановить дебит и продолжать осуществлять эксплуатацию. При этом при переводе скважины всегда выполняется определенный комплекс технологических работ, включающий глушение скважины и проведение капитального ремонта, в процессе которого осуществляют промывку и очистку забоя.

Капитальный ремонт скважин осуществляется с помощью передвижных буровых установок типа УБРСП, УПА, АПР, предназначенных для производства спуско-подъемных операций при текущем и капитальном ремонте нефтяных и газовых скважин.

Работы по ремонту скважины включают технологические операции и проводятся в определенной последовательности: 1 – переезд от скважины к скважине; 2 – расстановка оборудования; 3 – монтаж подъемной установки и талевой системы; 4 – демонтаж оборудования фонтанной головки на скважине; 5 – монтаж противовыбросового оборудования; 6 – спуско-подъемные операции с насосно-компрессорными и бурильными трубами, устанавливаемыми вертикально свечами и насосными штангами; 7 – разбуривание песчаных пробок, цементных стаканов.

Ремонт скважин с целью разбивки пробок, очистки и восстановления дебита, осуществляется различными способами, включающие в том числе применение комплексов оборудования очистки скважин, например, типа КОС-01, КОС-02 и специальную инструментальную оснастку (таблица) [3].

Техническая характеристика комплексов типа КОС-01 и КОС-02

Параметр	КОС-01*108	КОС-02*108
Наибольший крутящий момент, передаваемый комплексом, не более, Н·м	1200	1500
Наибольшая осевая нагрузка на комплекс, не более, кН	24	30
Наибольший диаметр, мм	108	108
Колонна труб для спуска комплекса в скважину	НКТ-89	БТ-89
Колонна труб для организации контейнера	НКТ-89	НКТ-89

Особенностью применения специальной инструментальной оснастки является осевое силовое воздействие на пласт весом колонны бурильных труб (КБТ) и насосно-компрессорных труб (НКТ). В зависимости от глубины скважины и диаметра эксплуатационной колонны вес КБТ и НКТ может достигать нескольких десятков тонн.

По существующей технологии [4, 5] для очистки скважин с применением комплекса КОС-02 (рис. 1а) используется компоновка подземного оборудования, включающая кольцевой фрезер 7, тарельчатый и шариковый обратные клапаны 5 и 6, насос поршневой 3, колонну бурильных труб 1, переводник 2, накопитель механических примесей 4.

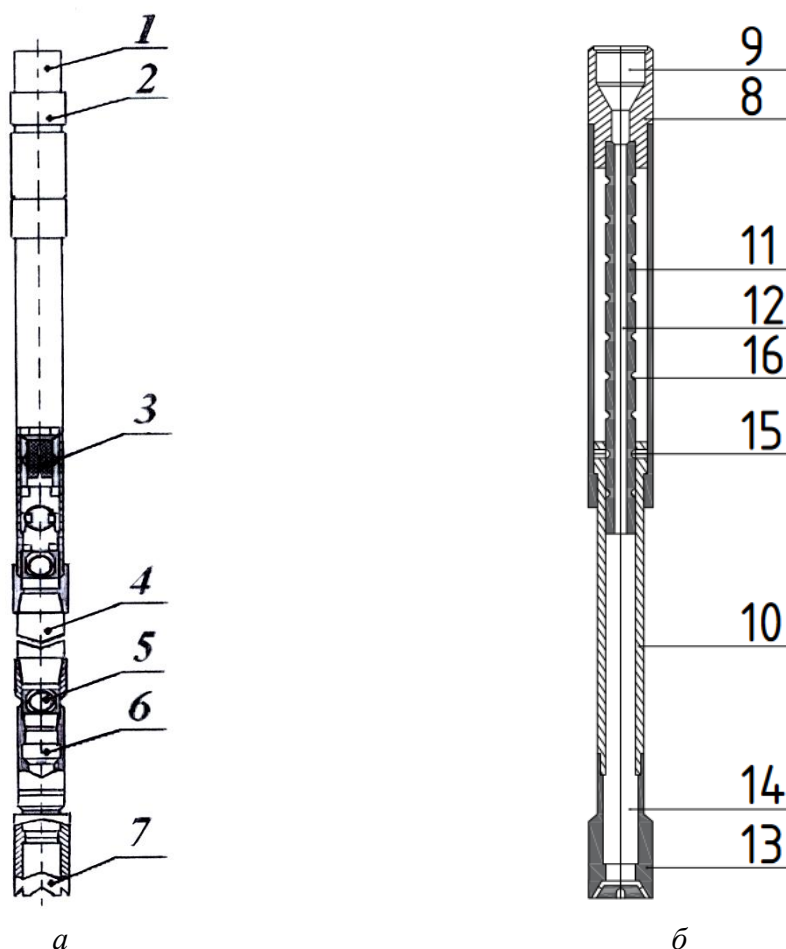


Рис. 1. Комплекс оборудования для очистки скважины типа КОС-02: компоновка КОС-02 с кольцевым фрезером (а); многофункциональное устройство с очищающим инструментом (б); 1 – колонна бурильных труб; 2 – переводник ПЗ-76×89; 3 – насос поршневой типа НП; 4 – накопитель механических примесей (колонна труб НКТ); 5 – клапан обратный типа КОШ; 6 – клапан обратный типа КОТ; 7 – фрезер кольцевой типа 2ФК; 8 – переводник; 9 – проходное отверстие; 10 – полый поршень; 11 – мандрель (полый цилиндр); 12 – продольное отверстие; 13 – очищающий инструмент; 14 – продольное отверстие; 15 – шарики; 16 – винтовые пазы

Работа осуществляется за счет использования перепада давления жидкости между скважиной и полостью в накопителе примесей, состоящем из труб НКТ. Для повышения давления можно использовать прямую и обратную промывку, что позволит более интенсивно осуществлять очистку скважины.

Существующий технологический процесс очистки осуществляется следующим образом. Колонна бурильных труб с комплексом оборудования КОС-2 спускается в забой до упора. При упоре в пробку кольцевой фрезер под весом всего комплекса проникает в песчаную пробку и разрушает ее. За счет перепада давления забойная жидкость со шламом открывает тарельчатый клапан тип КОТ и проникает в накопитель механических примесей. Затем очищенная от примесей жидкость через обратный клапан сливается в скважину.

Последовательный спуск и подъем комплекса оборудования позволяют накапливать примеси под поршневым насосом и поднять на поверхность за цикл до 30 штук НКТ диаметром 89 мм, заполненных механическими примесями. При отсутствии перепада давления на забое комплекс оборудования КОС-02 позволяет осуществлять очистку, например, обратной промывкой, путем подачи жидкости под давлением в затрубное пространство с последующим отводом ее через НКТ и КБТ.

Действующий технологический процесс очистки скважины имеет ряд недостатков, главным из которых является ограниченность использования комплекса при плановых ремонтах, когда возникает необходимость бурения твердых пробок в наклонно-направленных скважинах [6, 7]. Это пропантовые пробки – твердые кристаллические соединения газа с водой. Для их удаления необходимо осуществлять бурение, но в условиях наклонно направленных скважин роторное бурение невозможно. Наличие только осевой силы снижает эффективность разрушения пробок, так как имитирует процесс дробления, а для повышения эффективности необходимо сочетание дробления и резания. Для реализации схемы резания следует обеспечить вращение инструмента.

Результаты исследования. По новой технологии очистки в компоновке оборудования комплекса КОС-02 инструмент – кольцевой фрезер заменяется на многофункциональное устройство, преобразующее возвратно-поступательное движение очищающего инструмента во вращательное (см. рис. 1б) [8]. Устройство содержит очищающий инструмент 13 с продольным отверстием 14. При этом очищающий инструмент 13 жестко соединен с полым поршнем 10 и имеет возможность преобразования возвратно-поступательного перемещения при спуске в скважину во вращательное движение за счет движения шариков 15 в винтовых пазах 16, выполненных на мандреле 11. Очищающий инструмент 13 имеет возможность обеспечения многофункциональности, а именно работать без промывки и с промывкой. При этом промывочная жидкость

имеет возможность, как прямой, так и обратной подачи через проходное отверстие 9 переводника 8 и продольные отверстия 12 и 14 (соответственно, мандрели 11 и очищающего инструмента 13) (см. рис. 1б) [8, 9].

Устройство устанавливают в нижнюю часть колонны труб комплекса КОС-02 (не показано) с предварительно присоединенным к полуму поршню 10 очищающим инструментом 13. Предлагаемое устройство можно отнести к шариковым винтовым парам, в которых шарики закреплены на полум цилиндре 10 в горизонтальной плоскости, и их количество должно быть не менее трех (см. рис. 1б). Каждый шарик имитирует внутренний профиль резьбы, а для этого необходимо наличие трех заходов винтовых канавок (рис. 2).

При спуске комплекса в скважину до упора возвратно-поступательные перемещения устройства преобразуются во вращательные движения полого поршня 10 с очищающим инструментом 13 за счет движения шариков 15 в винтовых пазах 16 (см. рис. 1б) [5, 10]. Схема силового взаимодействия в скважине изображена на рис. 2.

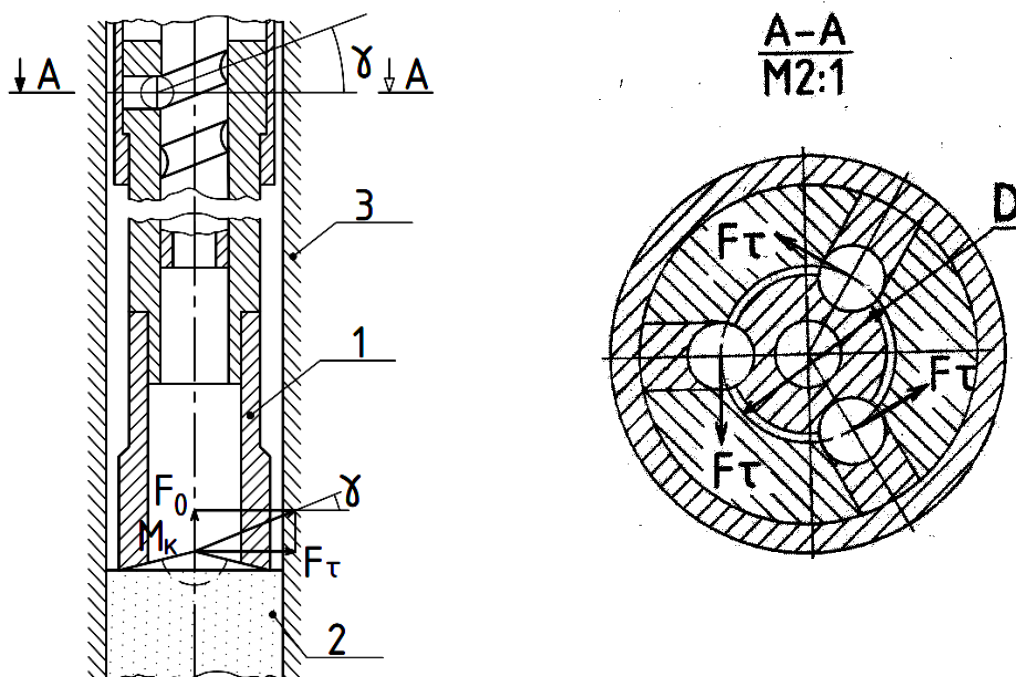


Рис. 2. Схема силового взаимодействия в скважине:

1 – очищающий инструмент; 2 – песчаная пробка; 3 – обсадная труба

Величина осевой силы воздействия на пробку определяется из выражения

$$F_0 = p \cdot S + G,$$

где p – давление в забое; S – площадь контакта инструмента с пробкой в забое; G – полный вес колонны КБТ и комплекса КОС-02.

Так как величина наклона винтовой линии равна углу подъема винтовой линии ψ , то в забое скважины на очищающем инструменте 13 действует, помимо осевой силы, тангенциальная составляющая силы F_τ (см. рис. 2). Величина этой составляющей рассчитывается по формуле

$$F_\tau = \frac{F_0}{\operatorname{tg}\psi}.$$

Кроме того, составляющая сила F_τ приводит к появлению реактивного крутящего момента M_k , зависящего от диаметра D (см. рис. 2), веса всего комплекса G и давления на забое p . В общем виде величина крутящего момента может быть найдена по формуле

$$M_k = F_\tau \cdot \frac{D}{2} = (p \cdot S + G) \cdot D \cdot \operatorname{ctg}\psi \cdot \frac{1}{2}.$$

Заключение. Таким образом, предложенная конструкция инструмента позволяет преобразовывать возвратно-поступательное движение очищающего инструмента во вращательное, что приводит к появлению дополнительного крутящего момента M_k , величина которого зависит от осевой силы F_0 , обусловленной весом буровой колонны и давлением в забое, и угла подъема винтовой линии ψ .

При последовательных операциях спуска-подъема наличие осевой силы F_0 позволяет осуществлять дробление пробок, а крутящего момента M_k в забое дает возможность реализовать схему резания.

Реализация технологического процесса ремонта по данной силовой схеме будет способствовать более интенсивному поперечному разрушению пробок в забое, что позволит проводить очистку от твердых кристаллических соединений в наклонно-направленных скважинах.

Библиографический список

1. Раабен, А.А. Ремонт и монтаж нефтепромыслового оборудования / А.А. Раабен, П.Е. Шевалди, Н.Х. Максудов. – Москва : Недра, 1989. – 317 с. – Текст : непосредственный.
2. Василевский, В.Н. Техника и технология определения параметров скважин и пластов / В.Н. Василевский, А.И. Петров. – Москва : Недра, 1989. – 249 с. – Текст : непосредственный.
3. Амиров, А.Д. Капитальный ремонт нефтяных и газовых скважин / А.Д. Амиров, С.Т. Овнатанов, А.С. Яшин. – Москва : Недра, 1975. – 344 с. – Текст : непосредственный.
4. Юшин, Е.С. Техника и технология текущего и капитального ремонта нефтяных и газовых скважин на суше и на море : учебное пособие / Е.С. Юшин. – Ухта : УГТУ, 2019. – 292 с. – Текст : непосредственный.
5. Лопухов, А.Н. Справочник инженера по добычи нефти. Том 1 / А.Н. Лопухов. – Москва : Недра, 2008. – 325 с. – Текст : непосредственный.

6. Bolchrove, P. Cuttings transport with drillstring rotation / P. Bolchrove. – Dep. in The MHS Eprints Archive 20.05.2008. IDCode: 135. Schlumberger: 2007. – 13 с. – Текст : непосредственный.

7. Проектирование и строительство морских нефтегазовых сооружений. В 2 частях. Часть 2 / В.А. Перфилов, В.В. Ярошик, А.М. Буров [и др.]. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – 303 с.– Текст : непосредственный.

8. Патент № 2 701 401 С1 Российская Федерация, МПК E21B37/00. Устройство очистки и промывки скважин с механическим преобразованием поступательного перемещения во вращательное: № 2019103303 : заявл. 06.02.2019 : опубл. 26.09.2019 / Адонин А.М., Гуляева Т.А., Соколов А.В. – 12 с. – Текст : непосредственный.

9. Молчанов, А.Г. Нефтепромысловые машины и механизмы / А.Г. Молчанов, В.Л. Чичеров. – Москва : Недра, 1983. – 308 с. – Текст : непосредственный.

10. Баграмов, Р.А. Буровые машины и комплексы / Р.А. Баграмов. – Москва : Недра, 1988. – 501 с. – Текст : непосредственный.

УДК 622.73

И.В. Горлов, А.Н. Болотов, П.Е. Митусов, Е.В. Полетаева
Тверской государственной технической университет

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ДРОБЛЕНИЯ

© Горлов И.В., Болотов А.Н.,
Митусов П.Е., Полетаева Е.В., 2022

Представлены основные процессы измельчения горных пород. Обоснована потребность разработки нового типа измельчительного оборудования. Приведена конструкция измельчителя-классификатора, а также изложен принцип действия и основы инженерных расчетов параметров дробления.

Ключевые слова: измельчитель-классификатор, поля линий скольжения, сдвиговые напряжения, вал-измельчитель, перфорированный барабан, тангенциальные скорости.

ANALYSIS OF THE DESTRUCTION OF WEAK ROCKS IN THE PROCESS OF CRUSHING

The main processes of crushing rocks are presented. The need to develop a new type of grinding equipment has been substantiated. The design of the grinder-classifier is presented, as well as the principle of operation and the basics of engineering calculations of the crushing parameters.

Keywords: shredder-classifier, fields of slip lines, shear stresses, shaft-shredder, perforated drum, different tangential velocities.

Введение

В настоящее время не уделяется достаточного внимания особенностям процесса измельчения горных пород средней и слабой прочности, к которым относятся тальк, мел, гипс, слабые известняки и др.

[1]. На большинстве перерабатывающих предприятий для измельчения горных пород используется типовое оборудование, такое как конусные и валковые дробилки для среднего дробления, шаровые барабанные мельницы для более тонкого измельчения [2]. Такое оборудование спроектировано под достаточно широкий круг задач, однако при этом оно использует традиционные принципы измельчения горных пород, что приводит в некоторых случаях к высокой металлоемкости конструкций, завышенным мощностям, обеспечивающим переработку широкого спектра материалов как по показателям прочности, так и по структурным свойствам. Специализированное оборудование, предназначенное для дробления и измельчения материалов средней и слабой прочности, практически не выпускается. В промышленности используются измельчители с различными видами воздействия на горную породу: раскалывающего и разламывающего действия; истирающе-раздав-ливающего и раздавливающего действия; ударно-истирающего и ударного действия; коллоидные измельчители [3].

Процесс разрушения горных пород происходит со значительным объемным уплотнением материала, что оказывает положительное влияние на взаимодействие частиц породы между собой и с рабочими поверхностями агрегата. Частицы, которые примыкают к рабочим поверхностям измельчающего оборудования, обладают значительно меньшей возможностью перемещений в примыкающем слое, что изменяет картину разрушения. Процесс дробления, исходя из этого, можно условно разделить на два основных этапа. Первый протекает при относительно невысоких нагрузках и характеризуется уплотнением частиц с возникновением как упругих, так и пластических деформаций, при этом происходит разрушение менее прочных элементов по ослабленным сечениям или трещинам. Второй этап измельчения характеризуется преобладанием пластических деформаций всего объема материала, при этом основное разрушение происходит за счет перемещения частиц относительно друг друга.

Недостатком существующих технологий измельчения является то, что в процессе дробления возникают частицы различной дисперсности. При этом есть такие, размер которых не требует дальнейшего разрушения, но они остаются в общей массе материала, воспринимая на себя значительную часть действующих сил, что приводит к поглощению части энергии разрушения и переизмельчению, замедляя процесс дробления крупных кусков породы.

С учетом отрицательного эффекта при наличии в массе измельчаемой горной породы частиц, которые из-за своего размера не нуждаются в дальнейшем разрушении и приводят к снижению эффективности процесса измельчения, необходимо в конструкции разрабатываемых устройств предусмотреть возможность удаления (классификации) таких частиц в

процессе работы, например с использованием принципа барабанного грохота.

Разработка измельчителя-классификатора

На основе анализа типового дробильно-сортировочного оборудования была разработана принципиально новая конструкция измельчителя-классификатора [4] (рис. 1).

Справа представлен общий вид измельчителя-классификатора, а слева показан разрез А-А. Измельчитель-классификатор имеет загрузочное устройство 1, вращающийся перфорированный барабан 2 с перфорациями 3, который опирается на приводной ролик 4 и поддерживающий ролик 5. Внутри перфорированного барабана размещается рабочий орган в виде вала-измельчителя 6, который устанавливается с технологическим зазором 7, соответствующим размеру отверстий в перфорированном барабане. Вал-измельчитель имеет сменные рабочие рельефные накладки 8. Перфорированный барабан и вал-измельчитель приводятся в движение реверсивными индивидуальными приводами 9 и 10. Под нижней частью перфорированного барабана установлено разгрузочное устройство 11.

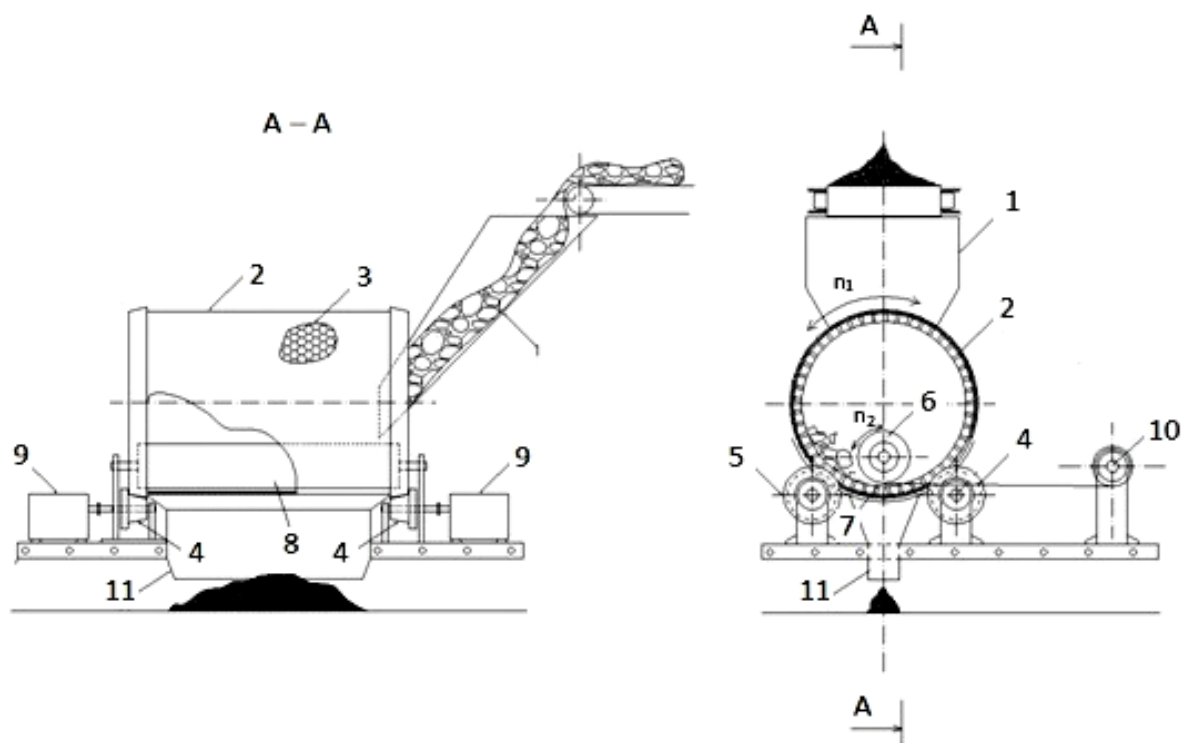


Рис. 1. Измельчитель-классификатор

Измельчитель-классификатор функционирует следующим образом. Предварительно подобранный по размеру исходный материал подается через загрузочное устройство и попадает внутрь вращающегося перфорированного барабана. Тангенциальная скорость перфорированного барабана меньше тангенциальной скорости вала-измельчителя за счет

применения индивидуального привода. Измельчаемый материал в зазоре между валом-измельчителем и перфорированным барабаном подвергается высокоэффективному дроблению и далее через отверстия перфорированного барабана перемещается в разгрузочное устройство.

Анализ процесса дробления слабых горных пород

Для предварительного анализа процесса дробления слабых горных пород с учетом тангенциальных сил можно использовать приближенный энергетический метод [5].

Метод основан на применении экстремальных принципов теории пластичности и состоит в том, что действительное поле линий скольжения пластически деформируемого материала заменяется более простым кинематически возможным полем, состоящим из отдельных жестких блоков и удовлетворяющим граничным условиям в скоростях и перемещениях. На рис. 2 представлены поле линий скольжения и план скоростей движения блоков при сжатии толстой пластины между двумя плоскими поверхностями.

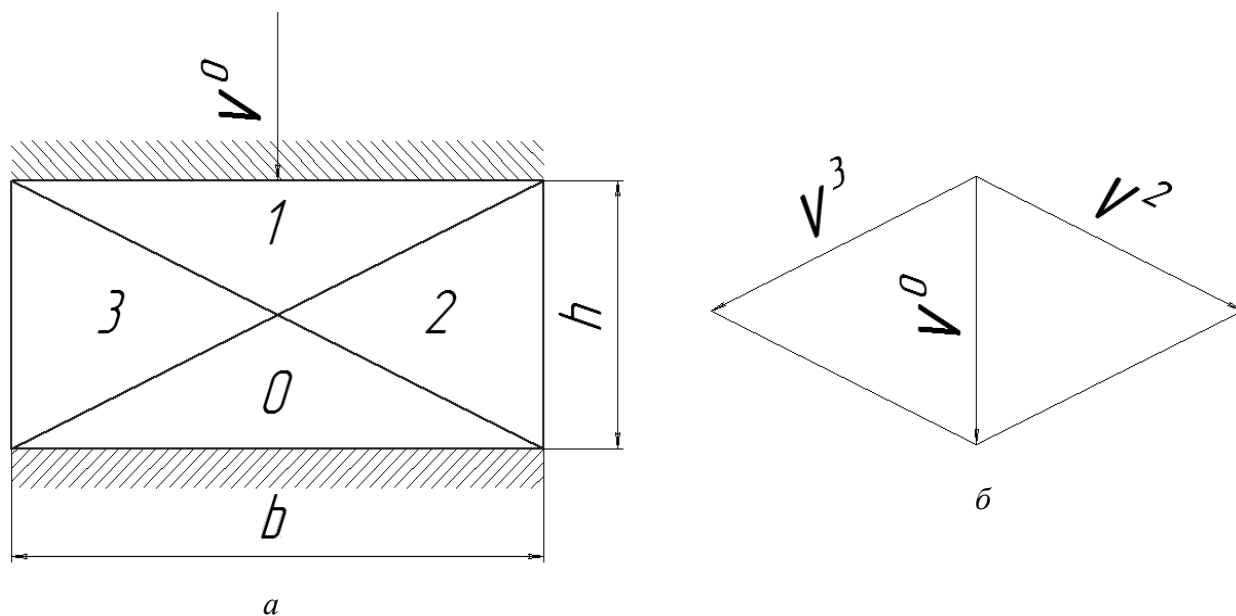


Рис. 2. Возможное поле линий скольжения блоков (а) и план скоростей движения блоков (б) при сжатии толстой пластины

Поле линий скольжения и план скоростей являются взаимными диаграммами Максвелла. Следовательно, для получения плана скоростей применимы обычные методы графостатики, при этом выполнение кинематических условий достигается автоматически.

Мощность, необходимая для обеспечения такой схемы деформации, превышает действительную мощность внутренних сил при пластическом формоизменении. Следовательно, удельные усилия, вычисленные при

помощи этого метода, являются верхней оценкой их действительных значений.

Мощность внутренних сил w_i , вычисляемая по принятому кинематически возможному полю, состоящему из отдельных жестких блоков, равна мощности, развиваемой на поверхностях, вдоль которых имеют место разрывы скоростей величиной v_i , и определяется по формуле

$$w_i = k \int_f^1 v_i df_i, \quad (1)$$

где k – пластическая постоянная материала (предел текучести при сдвиге); v_i – скорость относительного перемещения соседних блоков; f_i – площадь поверхности скольжения между двумя блоками.

Мощность внешних сил w_0 при поступательном движении инструмента, осуществляющего пластическое деформирование, рассчитывается по формуле

$$w_0 = qf_0v_0 - 2\mu k \int_f^1 v_j df_j, \quad (2)$$

где q – удельное усилие на поверхности деформирующего инструмента f_0 ; v_0 – скорость поступательного движения инструмента; μ – коэффициент трения; v_j – величина разрыва скорости на площади f_j ; f_0 – площадь контакта между материалом и инструментом, где возникают силы трения.

Из условия равенства мощностей внешних и внутренних сил находим

$$q / 2k = \left(\int_{f_j}^1 v_i df_i + 2\mu \int_{f_j}^1 v_j df_j \right) / 2f_0v_0; \quad (3)$$

При условии плоской деформации

$$f_i = l_i \ t; \ f_j = l_j \ t; \ f_0 = b \ t,$$

где l_i и l_j – длина площадок скольжения в плоскости деформации; t – размер площадок в перпендикулярном направлении; b – ширина проекции контактной площадки на плоскость ($b = 1$), перпендикулярную к направлению движения инструмента.

Если b и v_0 принять за единицы длины и скорости, удельное усилие для процессов плоской деформации будет определяться по формуле

$$q / 2k = 0,5 \left(\sum_i^1 v_i l_i + 2\mu \sum_j^1 v_j l_j \right), \quad (4)$$

где l_i , l_j и v_i , v_j являются безразмерными длинами и скоростями (величины их могут быть легко определены из принятого кинематически возможного поля и соответствующего плана скоростей) [6].

Используя возможное поле линий скольжения и план скоростей, показанные на рис. 1, можно получить давление, возникающее на поверхности деформирующего инструмента:

$$Q / 2k = 1 / \sin 2\alpha + \mu b / 2h, \quad (5)$$

где b и h – размеры пластины; α – угол между направлением движения инструмента и линией скольжения между блоками 1 и 2 (см. рис. 2).

Если проводить анализ дробления внутри барабана мельницы рабочим органом в виде вала-измельчителя с помощью энергетического метода расчета, то нужно разработать расчетную модель процесса, соответствующую условиям деформации измельчаемого материала. На рис. 3 представлен процесс дробления горной породы в барабане мельницы валом-измельчителем. Рабочее пространство, в котором происходит дробление, можно условно разделить на две зоны: зона A соответствует объему, в котором происходит уплотнение материала и частично пластически и упруго деформируются менее прочные фракции; зона B представляет собой уплотненную среду, в которой за счет интенсивной пластической деформации происходит интенсивное дробление горной породы.

Для получения кинематически возможного поля линий скольжения разобьем зону B на секторы, протяженность которых выберем равной величине минимального зазора между барабаном мельницы и валом-измельчителем (секторы на рис. 3 обозначим цифрами 1–5).

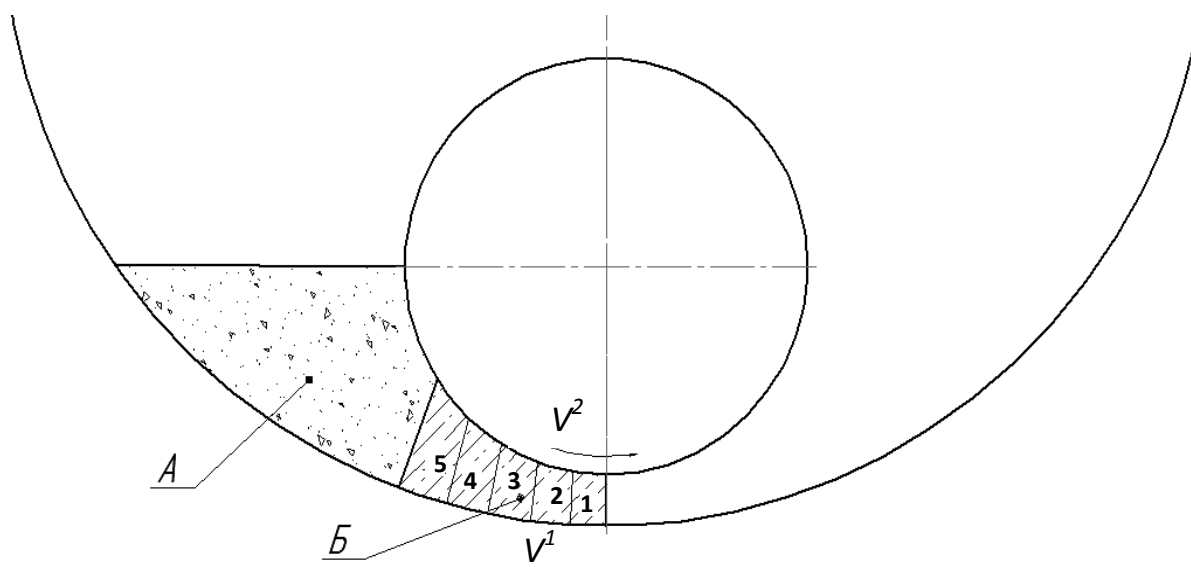


Рис. 3. Процесс дробления горной породы в барабане мельницы валом-измельчителем

Если тангенциальные скорости барабана V^1 и вала-измельчителя V^2 будут равны, то зону Б можно представить в виде возможного поля линий скольжения, которое ограничивается областью пластической деформации между двумя плоскостями, расположенными под углом γ друг к другу и движущимися навстречу (рис. 4). Скорость сближения V_τ можно выразить через расстояние h (минимальный зазор между барабаном мельницы и валом-измельчителем), отнесенное к времени поворота барабана на угол ω , соответствующий длине сектора зоны Б.

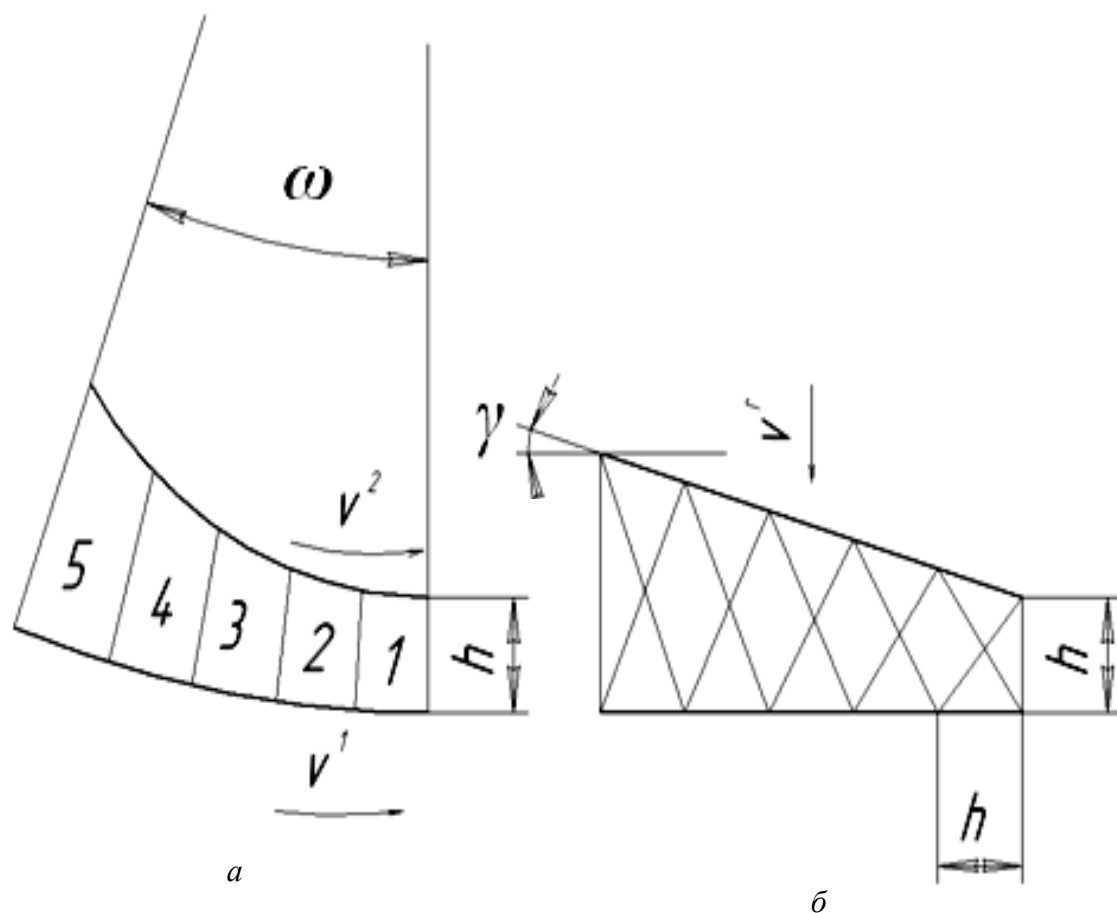


Рис. 4. Зона пластических деформаций: зона Б (см. рис. 2) (а); возможное поле линий скольжения жестких блоков в зоне Б (б)

На основе выражения (5) можно рассчитать давление, возникающее на поверхности вала-измельчителя и определить мощность необходимую для осуществления процесса дробления.

Иная картина возникает, если тангенциальная скорость вала-измельчителя V^2 будет больше тангенциальной скорости барабана V^1 (рис. 5). Так как тангенциальная скорость вала-измельчителя выше тангенциальной скорости барабана, возникает относительная тангенциальная скорость V_τ , с ростом которой линии скольжения разворачиваются вдоль ее вектора.

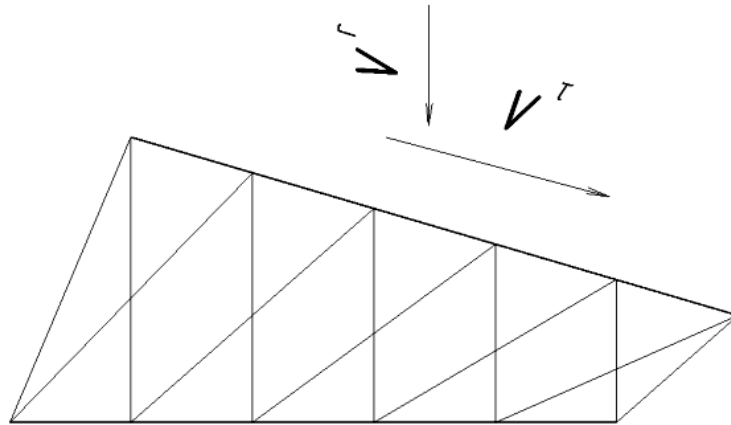


Рис. 5. Возможное поле линий скольжения

Заключение

При допущении, что линии скольжения будут стремиться развернуться параллельно тангенциальной скорости V_τ , то в некотором приближении представляется деформация за счет тангенциальных сил близкая по своим параметрам к деформации в неньютоновской пластичной жидкости. Представленное допущение, позволяет рассчитать мощность необходимую для такой деформации, используя известные выражения, полученные для неньютоновской пластической жидкости, что позволит провести предварительный анализ процесса дробления слабых горных пород с помощью касательных сил.

Библиографический список

1. Алванян, А.К. Физико-механические свойства гипсового камня и инженерно-геологические условия Селищенского месторождения строительного гипса / А.К. Алванян, К.А. Алванян. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. – 2019. – Т. 18. – № 4. – С. 386-393.
2. Авдохин, В.М. Обогащение углей. В 2 томах. Том 1: Процессы и машины / В.М. Авдохин. – Москва : Горная книга, 2012. – 424 с. – Текст : непосредственный.
3. Донченко, А.С. Справочник механика рудообогатительной фабрики / А.С. Донченко, В.А. Донченко. – Москва : Недра, 1986. – 543 с. – Текст : непосредственный.
4. Разработка конструкции измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород / П.Я. Бибииков, А.Д. Бардовский, П.Е. Митусов, А.В. Калакутский. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 3. – С. 233-237.
5. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. – Москва : Металлургия, 1972. – 408 с. – Текст : непосредственный.
6. Горлов, И.В. Изменение механических свойств изношенной поверхности восстановленной пластическим деформированием / И.В. Горлов, А.Н. Болотов – Текст : непосредственный // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 7. – С. 3-7.

М.К. Альсигар, А.Д. Алмаваши, П.П. Переверзев
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ КРУГЛОМ НАРУЖНОМ ШЛИФОВАНИИ С РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ С ВЫХАЖИВАЮЩИМ ХОДОМ

© Альсигар М.К., Алмаваши А.Д.,
Переверзев П.П., 2022

Управление производительностью операции круглого наружного шлифования с осевой подачей ведется с помощью двух автоматических ступенчатых циклов: радиальной и осевой подач, управляемым по командам прибора активного контроля при круглом наружном шлифовании, зависящим от оставшейся части припуска. В статье предложен подход к анализу влияния технологических ограничений на циклы подач путем построения области ограничений подач в трехмерном пространстве параметров управления процессом шлифования.

Ключевые слова: ЧПУ, наружное шлифование, цикл, режимы резания, ход, подача.

SELECTION OF QUALITATIVE COMPARATIVE CYCLES WITH STROKE TREATMENT

The productivity control of the operation of external cylindrical grinding with axial feed is carried out using two automatic cycles of radial and axial feed, the parameters of the feed cycle include: the number of steps, feed at each step and the removed part of the allowance at each step. The article proposes an approach to the analysis of the influence of technological constraints on feed cycles by constructing an area of feed constraints in the three-dimensional space of parameters for controlling the grinding process.

Keywords: CNC; external grinding, cycle, cutting conditions, stroke, feed.

Введение. В соответствии с программой развития цифровой экономики Российской Федерации перед современным машиностроением стоит задача интеграции цифрового производства, в котором применяются станки с числовым программным управлением (ЧПУ) и роботизированное оборудование, а технологическая подготовка производства ведется в единой виртуальной среде с использованием технологий цифрового моделирования и проектирования как непосредственно продуктов и изделий, так и производственных процессов.

С помощью технологических процессов моделируется изготовление изделия на всем протяжении его жизненного цикла в виртуальной модели, которая состоит из оборудования, производственных процессов и персонала предприятия. Цифровое производство предполагает сквозную

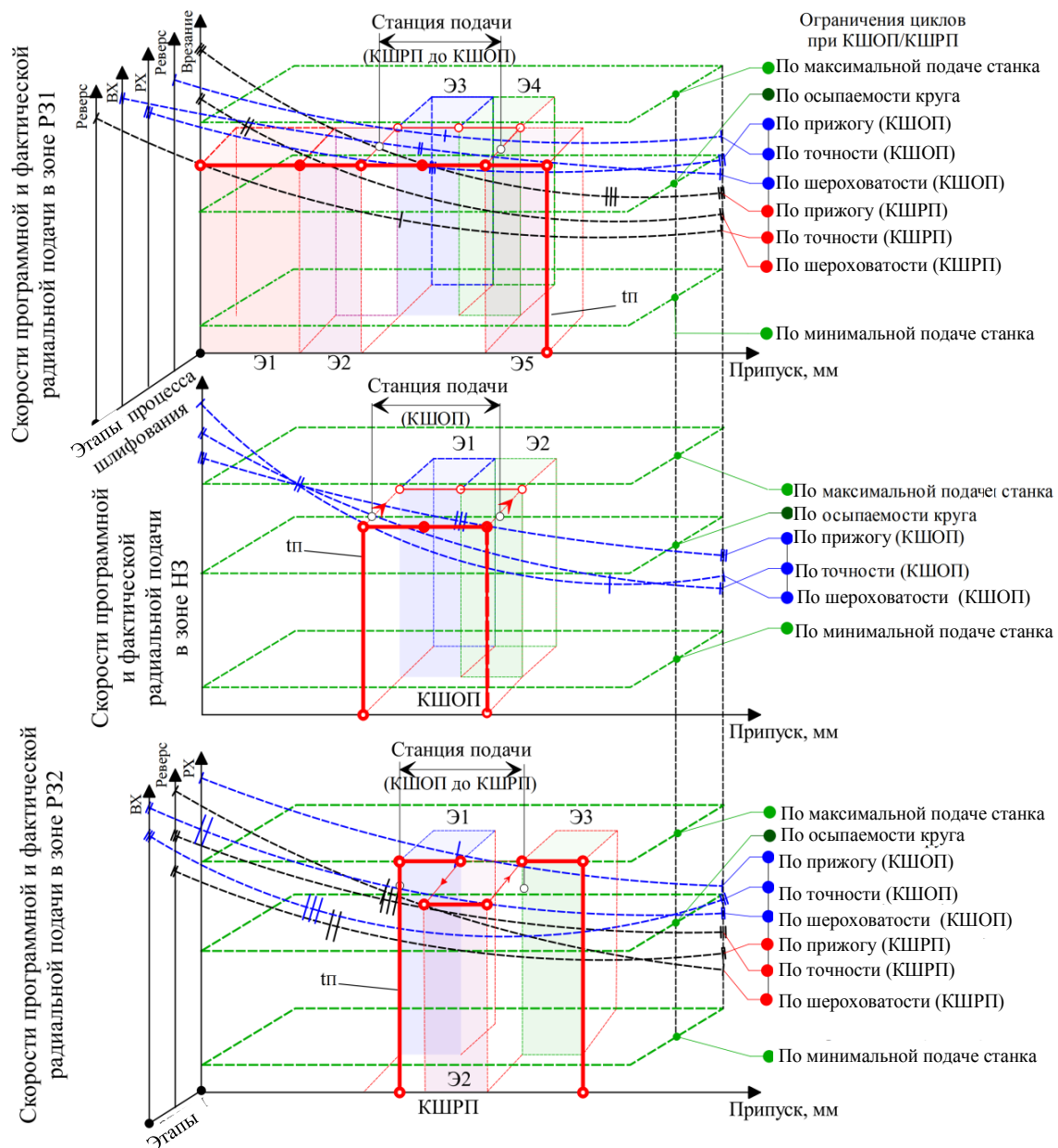
автоматизацию процессов технологической подготовки производства (ТПП), включая полную автоматизацию процессов разработки управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ путем перевода всей информации об операции в цифровой вид и применение виртуального моделирования, что помогает выявлять возможные проблемы, находить подходящие или оптимальные параметры режимов резания, прогнозировать качество обработки и проверять надежность УП для станка с ЧПУ в изменяющихся условиях обработки партии заготовок. Однако в современном машиностроении до сих пор отсутствуют как виртуальные среды, так и технологии цифрового проектирования оптимальных циклов при одновременном управлении осевой и радиальной подачами для программ управления станками с ЧПУ, предназначенных для проектирования операций круглого наружного шлифования с осевой подачей (КШОП). В современных САМ-системах отсутствует блок расчета оптимальных режимов резания для циклов круглого шлифования с ЧПУ при совместном управлении радиальной и осевой подачами. В таких САМ-системах процесс проектирования УП автоматизирован частично, только для программирования идеальных траекторий перемещения шлифовального круга без расчета оптимальных режимов резания, обеспечивающих требуемую точность и качество обрабатываемой поверхности с учетом многочисленных нестабильных факторов, таких как колебание силы резания, переменная податливость технологической системы, колебание припуска, затупление режущего инструмента и др.

Режимы резания, относящиеся к параметрам циклов радиальной и осевой подач, назначаются технологом вручную, на основе заводской статистики, опыта наладки и, при возможности, путем использования пробных заготовок. В большинстве доступных работ авторами предлагаются методики построения цикла, задающие варьирование единственного параметра (радиальной подачи), а также методики расчета точности и качества обработки на основе экспериментальных данных без широкодиапазонной аналитической модели взаимосвязи силы резания с физико-механическими свойствами обрабатываемой заготовки, затуплением зерен шлифовального круга, жесткостью технологической системы, используемыми режимами резания, фактической радиальной подачей и т.д. Кроме того, в научной литературе для операций КШОП отсутствуют методики проектирования оптимальных (с точки зрения технологии) циклов совместного управления осевой и радиальной подачами, которые могли бы обеспечить максимальную производительность операции при стабильном выполнении всех требований, предъявляемых к обработке партии деталей как по точности, так и по качеству.

Целью работы является повышение производительности операций КШОП, которые выполняются на станках с ЧПУ, путем оптимизации управляющих параметров циклов радиальной и осевой подачи. Над графиками подач (рисунок) показаны границы различных ограничений (ограничений по точности, шероховатости обрабатываемой поверхности, бесприжоговости, по техническим данным станка и осыпаемости шлифовального круга). Чем больше количество ступеней переключения программной подачи, тем ближе можно позиционировать траекторию фактической подачи к границе области допустимых значений. Приближение траектории фактической радиальной подачи к области допустимых значений осуществляется путем ступенчатого изменения программной подачи [1, 3–6]. Однако визуализация ограничений цикла при КШОП проводится отдельно для каждой подачи в зонах Р31, НЗ и Р32 и является сложной задачей, так как необходимо представлять ограничения во всех зонах – Р31, НЗ и Р32) в трехмерном пространстве – в координатах (рисунок): радиальная подача S_{rad} , мм/об, в зонах Р31 (Э1, Э2 и Э5) и Р32 (Э2); осевая подача S_{oc} , мм/ход, в зонах Р31 (Э3 и Э4), НЗ (Э1 и Э2), Р32 (Э1 и Э3); припуск П, мм [3, 5, 8].

Рассмотрим особенности визуализации комплекса технологических ограничений целевой функции в различных зонах шлифования. В зоне Р31 область ограничений проходит через пять этапов (Э1, Э2, Э3, Э4 и Э5). Сама область ограничений разделяется для процессов КШРП и КШОП (рисунок). Для НЗ и Р32 показаны комплексы областей технологических ограничений целевой функции за время двойного хода отдельно по видам КШОП и круглого наружного шлифования с радиальной подачей (КШРП) [1, 7, 9–13]. В зоне НЗ показан только КШОП. Фактическое изменение радиальной подачи из-за упругих перемещений технологической системы показано штрихпунктирной линией в трех зонах вала. Различные технологические ограничения, накладываемые на пространственную область допустимых фактических значений радиальной подачи, представлены в виде криволинейных поверхностей, разграниченных разноструктурными линиями [1, 5, 9].

Выводы. Практическим результатом системы диагностики цикла шлифования на устойчивость и системы проектирования оптимального циклов является повышение уровня автоматизации проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ, обеспечивающей расчет оптимальных значений подачи во всех зонах вала с учетом чередующихся видов шлифования во всех зонах Р31, Р32 и НЗ, при которых обеспечивается минимальное основное время цикла шлифования и снижение рисков по выполнению заданных требований к качеству обрабатываемой детали.



Трехмерное представление области ограничений радиальной и осевой подач цикла КШОП

Библиографический список

1. Переверзев, П.П. Моделирование процесса съема металла в автоматических циклах круглого наружного шлифования с продольной подачей / П.П. Переверзев, М.К. Альсигар. – Текст : непосредственный // *Металлообработка*. – 2017. – № 6 (102). – С. 2-8.
2. Альсигар, М.К. Современные методы математического моделирования процесса съема металла и основных элементов режима резания при шлифовании с продольной подачей / М.К. Альсигар. – Текст : непосредственный // *Металлообработка*. – 2017. – № 2 (104). – С. 23–27.

3. Переверзев, П.П. Модель съема припуска в реверсных и нереверсных зонах для операций круглого шлифования с продольной подачей / П.П. Переверзев, М.К. Альсигар. – Текст : непосредственный // *Металлообработка*. – 2017. – № 3 (105). – С. 19-24.
4. Переверзев, П.П. Моделирование взаимосвязи силы резания с основными технологическими факторами при круглом шлифовании с продольной подачей / П.П. Переверзев, М.К. Альсигар. – Текст : непосредственный // *Современные фундаментальные и прикладные исследования*. – 2017. – № 4 (27). – С. 38-44.
5. Альсигар, М.К. Виртуальное формообразование обрабатываемой поверхности при круглом наружном шлифовании с осевой подачей в реверсных и нереверсных зонах / М.К. Альсигар, П.П. Переверзев. – Текст : непосредственный // *Вестник ИрГТУ*. – 2018. – № 8 (139). – С. 10–16.
6. Alsigar, M.K. Model of processing accuracy prediction with consideration of multi-stage process of circular grinding with axial feed / M.K. Alsigar, P.P. Pereverzev, A.D. Almawash. – Текст : непосредственный // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. – 2019. – Vol. 709. – P. 9-14.
7. Alsigar, M.K. Multi-stages to ensure quality control of designing and production at external cylindrical grinding machines / M.K. Alsigar, P.P. Pereverzev, A.D. Almawash. – Текст : непосредственный // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. – 2020. – Vol. 95. – P. 23-28.
8. Alsigar, M.K. An approach to complex model ECGA for the stable and unstable grinding conditions/ M.K. Alsigar, P.P. Pereverzev, A.D. Almawash. – Текст : непосредственный // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 971. – P. 022097.
9. Alsigar, M.K. Optimal design of grinding systems with use of mathematical complex models ECGA / M.K. Alsigar, A.D. Almawash. – Текст : непосредственный // *Proceedings. International Confon Modern Trends in Manufacturing Technologies*. – 2021. – Vol. 38. – P. 1521-1525.
10. Virtual Prediction of Accuracy of Processing on Example of External Circular Grinding / P.P. Pereverzev, A.V. Akintseva, M.K. Alsigar. – Текст : непосредственный // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering*. – 2019. – P. 217-224.
11. Almawash, A.D. Modeling metal removal in automatic circular grinding cycles taking into account process dynamics / A.D. Almawash, M.K. Alsigar. – Текст : непосредственный // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. – 2020. – P. 335-343.
12. Корчак, С.Н. Теоретические основы влияния технологических факторов на повышение производительности шлифования деталей : специальность 05.02.08 Технология машиностроения : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Корчак С.Н. – Челябинск, 1971. – 371 с. – Текст : непосредственный.
13. Кулыгин, В.Л. Разработка теории и методики расчета автоматических циклов наибольшей производительности при заданной точности обработки для круглого наружного продольного шлифования : специальность 05.02.08 Технология машиностроения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кулыгин В.Л. – Куйбышев, 1987. –170 с. – Текст : непосредственный.

Д.А. Зоренко, Д.С. Фаина
Тверской государственной технической университет

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПАКТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ РЕДУКТОРОВ

© Зоренко Д.А., Фаина Д.С., 2022

В статье рассмотрены варианты использования аддитивных технологий для производства корпусных деталей редукторов современных технических устройств. Представлены основные результаты исследования режимов формования и применяемых материалов, способных удовлетворять техническим требованиям, предъявляемым к корпусным деталям компактных малонагруженных редукторов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, корпус редуктора, 3D-печать, экструзия, САД-модели, термопластичные материалы, АБС-пластик, прототипирование.

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF COMPACT POLYMER GEARBOXES

The article discusses the application of additive technologies for the production of housing parts of gearboxes of modern technical devices. The main results of the study of molding modes and applied materials capable of meeting the technical requirements for the body parts of compact low-load gearboxes are presented.

Keywords: additive technologies, gearbox housing, 3D printing, extrusion, CAD models, thermoplastic materials, ABS plastic, prototyping.

Целью исследовательской работы, проведенной в Тверском государственном техническом университете, являлся поиск возможности применения аддитивных технологий в производстве корпусных элементов компактных редукторов, способных конкурировать с традиционными машиностроительными технологиями в условиях мелкосерийного производства. Одной из основных задач стал поиск наиболее удачного варианта аддитивной технологии. Объектом исследования были выбраны существующие технологии 3D-печати и их основные режимы. Предметом исследования явились организационно-технические и экономические характеристики процесса.

Для достижения поставленной цели были решены пять задач:

- 1) выполнен анализ существующих технологий 3D-печати и используемых при этом материалов;
- 2) проведено сравнение качества и работоспособности корпуса, полученного аддитивным и традиционным методами;
- 3) проведено экономическое обоснование внедрения аддитивных технологий в производство компактных корпусов;

4) подобраны режимы, материал и оборудование, удовлетворяющие условиям изготовления корпусных элементов редукторов;

5) сформулированы рекомендации по производству корпусных элементов компактных редукторов.

Актуальность темы исследования обусловлена потребностью в различном специальном инструменте и оснастке, производство которой характеризуется малыми сериями выпуска. При этом геометрия изделий достаточно сложна и требует затратной (во всех смыслах) подготовки традиционного производства. В описанных условиях экономически целесообразной (а иногда и единственно возможной) становится технология 3D-печати деталей из полимерных материалов. Достаточно широкое распространение получают компактные малонагруженные редукторы, основным материалом которых являются полимеры и чаще всего термопластичные пластики. Одним из передовых аддитивных методов изготовления деталей из пластика является 3D-печать. Вместо традиционного метода обработки резанием, при котором с заготовки удаляется излишний материал, 3D-печать позволяет создавать деталь послойно, без траты лишних ресурсов и получения отходов.

Детали, изготовленные методом трехмерной печати, имеют более высокие эксплуатационные характеристики, чем заводские. Кроме того, использование современных 3D-принтеров позволяет получать детали сложных форм из таких трудно поддающихся обработке материалов, как титан, металлокерамика, а также твердые сплавы. В настоящее время в мире насчитывается более 100 официально зарегистрированных методов трехмерной печати как полимерами, так и металлами [1, 2]. 3D-печать металлами менее распространена по причине существенно более высокой стоимости оборудования. Соответственно, это направление не рассматривалось. Из ныне существующих методов в указанной сфере наиболее применим метод FDM-печати.

FDM (Fused Deposition Modelling) – технология трехмерной печати, при которой построение объекта происходит за счет расплавления нити пластика, подаваемой через экструдер на рабочую поверхность. Корпуса, полученные этим методом, имеют наиболее приемлемые механические свойства, точность размеров и качество поверхности и могут применяться в изделиях без существенной механической доработки (доработки, как правило, требуют лишь посадочные места под подшипники). Чтобы осуществить FDM-печать, необходимо иметь 3D-модель нужного изделия в формате STL. Для печати всей модели на принтер сначала передаются данные о форме первого слоя, после чего устройство начинает выдавливать в строго заданных местах расплавленный пластик. Сегодня FDM-технология может обеспечить толщину слоя в 0,02–0,05 мм. После нанесения пластика экструдер отодвигается от модели на эту толщину и процесс повторяется [3, 4].

Анализ материалов показал, что наиболее удачным с технологической точки зрения является АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол), позволяющий получать тонкие слои и, соответственно, наилучшую сплошность материала, качество поверхности и точность размеров, тем самым и эксплуатационные характеристики корпуса становятся наилучшими. Это самый популярный и один из лучших расходных материалов для 3D-печати. Акрилонитрилбутадиенстирол не имеет запаха, нетоксичен, ударопрочен и эластичен. Температура плавления составляет от 240 до 248 °С. 3D-модели, сделанные из АБС-пластика, характеризуются долговечностью и прочностью [5]. Широкий ассортимент цветов позволяет воплотить любое цветовое решение, но с помощью этого материала невозможно получить прозрачные модели, так как прозрачного АБС-пластика не существует, что для данной задачи не критично.

АБС-пластик для 3D-принтера обладает высокой механической прочностью, влагостойкостью, инертностью по отношению к кислотам и маслам, что позволяет использовать в изготавливаемых редукторах смазочные материалы; характеризуется легкостью обработки, высокими показателями теплоемкости, способностью работать в температурном диапазоне от -40 до +80 °С.

Для достижения наилучшего результата печати важно выбрать оптимальные параметры, причем многое будет зависеть от возможностей и типа 3D-принтера. Выбор касается таких характеристик, как температура плавления, скорость печати, толщина слоя, температура стола (если имеется функция его подогрева). Подбор показателей осуществлялся опытным путем, т.е. печатью ряда черновых вариантов (при необходимости вносились изменения). Результат представлен на рисунке.



Корпус, выполненный с помощью 3D-печати (материал – АБС-пластик)

Наиболее удачной температурой экструзии явилась температура в 250 °С, толщина слоя 0,03 мм, коэффициент подачи пластика 0,85,

скорость печати 40 мм/с. Поскольку для АБС-пластика характерны проблемы с адгезией к рабочей платформе принтера, то последняя должна быть оснащена подогревом.

Для проведения анализа экономической эффективности внедрения аддитивных технологий необходимо отдельно анализировать производство, на котором планируется изготавливать конечное изделие полностью с применением аддитивной технологии и для производства которого планируется частичное применение рассматриваемой технологии. Одним из аспектов успешного внедрения будет являться наличие квалифицированных кадров. При этом возникают затраты, связанные с обучением персонала.

Эффективность применения аддитивной технологии при изготовлении полимерного компактного корпуса редуктора для ручного электроинструмента может определяться следующими соотношениями:

$$K_1 = \frac{\mathcal{E}_a}{\mathcal{E}_d},$$

где K_1 – параметр эффективности внедрения аддитивного производства по энергоэффективности; \mathcal{E}_a – энергозатраты после внедрения аддитивных технологий для изготовления изделия; \mathcal{E}_d – энергозатраты до их внедрения;

$$K_2 = \frac{M_a}{M_d},$$

где K_2 – параметр эффективности внедрения аддитивного производства по коэффициенту материалоемкости; M_a – материалоемкость изделия после внедрения аддитивных технологий для изготовления изделия; M_d – материалоемкость изделия до внедрения;

$$K_3 = \frac{t_a}{t_d},$$

где K_3 – параметр эффективности внедрения аддитивного производства по времени изготовления изделия; t_a – материалоемкость изделия после внедрения аддитивных технологий для изготовления изделия, t_d – время изготовления изделия до внедрения.

Тогда условие эффективности можно представить в виде

$$\begin{cases} K_1 < 1; \\ K_2 < 1; \\ K_3 < 1. \end{cases}$$

Выполнение этого условия подтверждает эффективность внедрения аддитивной технологии в производство. Если же условие не выполняется по одному или двум параметрам, то необходимо рассчитывать материальные затраты на производство изделия.

Обоснование применения аддитивных технологий в производстве основывается на сравнении затрат с традиционной машиностроительной технологией, оценкой срока окупаемости, а также сравнении показателей качества. В случае производства отдельных деталей, входящих в состав изделия, аддитивную технологию в первую очередь следует применять для изготовления наиболее трудоемких деталей, точность которых будет обеспечена рассматриваемой технологией.

Таким образом, использование аддитивных технологий, согласно полученным результатам, обеспечивает сокращение длительности технологической подготовки производства, что позволяет уменьшить трудоемкость изготовления подобных компактных корпусных деталей в условиях мелкосерийного производства почти в шесть раз с учетом отсутствия необходимости изготавливать дополнительную технологическую оснастку и закупать специальный режущий инструмент. Кроме этого, 3D-печать в данном случае позволяет получать тонкостенные корпуса с толщиной стенок менее 2 мм с большим количеством ребер жесткости. Применение ABS-пластика в качестве основного конструкционного материала обеспечивает хорошее сочетание прочности и жесткости в широком диапазоне температур. Изделия, полученные с помощью описанной технологии, хорошо поддаются механической доработке и могут быть рассчитаны на долгий срок эксплуатации. ABS-пластик подходит для мелкосерийной печати корпусов и является более практичным по сравнению с остальными пластиками данного технологического назначения.

Аддитивные технологии постоянно развиваются, появляются новые методы воспроизводства объектов, а также дорабатываются уже имеющиеся методы с целью увеличения скорости печати, качества и энергоэффективности. Применение 3D-печати для производства корпусов компактных редукторов возможно в единичном, мелкосерийном, а иногда и в средне-серийном производстве. Кроме рассмотренных элементов, представленная технология может использоваться в производстве малогабаритных деталей в различных отраслях промышленности. Таким образом, 3D-печать в условиях современного машиностроения, наряду с недостатками, имеет массу преимуществ перед традиционными методами изготовления деталей, обеспечивая данной технологии дальнейшее широкое применение.

Библиографический список

1. Кулик, В.И. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники : учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов. – Санкт-Петербург : БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2018. – 160 с. – Текст : непосредственный.
2. Должиков, В.П. Технологии наукоемких машиностроительных производств : учебное пособие / В.П. Должиков. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 304 с. – Текст : непосредственный.

3. Звонцов, И.Ф. Разработка технологических процессов изготовления деталей общего и специального машиностроения : учебное пособие / И.Ф. Звонцов, К.М. Иванов, П.П. Серебrenицкий. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 696 с. – Текст : непосредственный.

4. Преображенский, А.П. О научных подходах при использовании аддитивных технологий / А.П. Преображенский, Н.М. Токарева. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2018. – № 3 (26). – С. 22-24.

5. Дресвянников, В.А. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования / В.А. Дресвянников, Е.П. Страхов. – Текст : непосредственный // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 2. – С. 16-28.

УДК 331.45:621-05

Е.Б. Голубева
Тверской государственной технической университет

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

© Голубева Е.Б., 2022

Рассмотрены актуальные вопросы охраны труда на машиностроительных предприятиях. Приведены общая статистика травматизма российского производства и классификация его по степени тяжести. На конкретных примерах показан порядок расследования несчастных случаев на производстве, устанавливаемый в соответствии с законодательством государства по труду.

Ключевые слова: производственный травматизм, расследование несчастного случая, происшествие, метод расследования несчастного случая, обучение по охране труда, инструктажи по охране труда.

ANALYSIS OF INDUSTRIAL INJURIES AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

Topical issues of labor protection at machine-building enterprises are considered. The general statistics of Russian-made injuries and their classification according to severity are given. On specific examples, the procedure for investigating industrial accidents, established in accordance with the state labor legislation, is discussed.

Keywords: industrial injuries, accident investigation, accident investigation method, labor protection.

Возможность травмирования работников – одна из главных производственных опасностей машиностроительных предприятий. Согласно принятой классификации, выделяют несчастные случаи, связанные с работами с применением подъемных сооружений; с профессиональной деятельностью рабочих (сваркой, фрезерованием, работой на точильно-шлифовальном станке, штамповкой и др.); с обслуживанием

баллонов и сосудов, работающих под давлением; с производственным транспортом (автопогрузчиками, электротележками и др.); с работой на высоте; электротравмы.

Производственный травматизм представляет собой совокупность травм, которые были получены на производственном объекте. Травмы на объекте производственной деятельности происходят вследствие травмирования работающего на производственном объекте, которое вызвано неисполнением требований безопасности трудового процесса. Проблема травматизма на объекте производственной деятельности во всем мире, в частности в России, весьма актуальна. Каждый год в нашей стране вследствие несчастных случаев на производстве гибнут более тысячи человек, а сотни тысяч получают травмы.

Несчастный случай на производстве – это событие, в результате которого работник погиб или получил повреждение здоровья при выполнении трудовых обязанностей или работ в интересах работодателя. Такое определение дано в Трудовом кодексе (ТК) Российской Федерации. В трудовом законодательстве, помимо понятия «несчастный случай на производстве», есть понятие «несчастный случай, не связанный с производством». Установить, связан несчастный случай с производством или нет, по условиям ст. 229.2 ТК РФ вправе только комиссия в ходе расследования, которое должно быть организовано работодателем.

Расследованию подлежат, согласно условиям ст. 227 ТК РФ, несчастные случаи, которые имеют признаки:

пострадавший – это работник или иное лицо, участвующее в производственной деятельности работодателя, в том числе то, которое подлежит обязательному социальному страхованию от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

происшедшее событие указано в перечне событий, которые квалифицируются как несчастный случай;

обстоятельства произошедшего события (время, место и др.) соответствуют обстоятельствам, перечисленным в ч. 3 ст. 227 ТК РФ;

результат произошедшего события – одно из последствий, указанных в абзаце 1 ч. 3 ст. 227 ТК РФ [1].

О том, что наличие этих признаков обязательно для правильной квалификации несчастного случая, сказано и в п. 9 Постановления Пленума Верховного Суда РФ от 10 марта 2011 г. № 2 «О применении судами законодательства об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».

Положение об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях (в редакции Приказа Минтруда России от 14 ноября 2016 г. № 640н) устанавливает более строгие требования к квалификации несчастных случаев как произошедших на

производстве. Например, нахождение пострадавшего в состоянии алкогольного опьянения должно быть подтверждено медицинским заключением, несчастные случаи с пострадавшим при хищении материалов – заключением правоохранительных органов [3].

К несчастным случаям на производстве относятся все несчастные случаи, произошедшие во время пребывания на работе (начиная с момента прихода и заканчивая уходом с территории организации или участка, где работником выполнялись трудовые обязанности). При этом не имеет значения, произошел ли несчастный случай перед началом работы, в период подготовки рабочего места, после окончания работы, на постоянном месте работы, в другом цехе, по пути следования из одного пункта в другой и т.д. Например, работник пришел на предприятие за час до начала смены с целью отремонтировать за это время спецобувь. При обработке каблука на заточном станке он травмировал глаз, и, хотя травма получена до начала смены, это будет считаться несчастным случаем на производстве [4].

Человеческое общество постоянно испытывает потребность в новых видах продукции либо в сокращении затрат труда при изготовлении освоенной продукции. Современное машиностроительное производство непрерывно совершенствуется, развиваются и внедряются прогрессивные технологии.

Процесс фрезерования является весьма распространенной операцией в технологии машиностроения. Фрезерованием обрабатывают плоские, криволинейные и угловые поверхности, пазы и уступы. Точность обработки находится в пределах 14–6 квалитетов.

Рассмотрим несчастный случай, произошедший на машиностроительном предприятии г. Твери. Фрезеровщик второго разряда (вторая профессия – стропальщик) 20 февраля приступил в 6:30 к работе по фрезеровке деталей. В 11:30 он закончил обработку и получил новое задание от начальника участка – фрезеровать фаски на детали. Отфрезеровав фаски на одной стороне, рабочий перекантовал деталь на 180°, застропив ее одним цепным стропом за среднюю технологическую перемычку, не предназначенную для строповки, чем нарушил типовую схему строповки. При опускании детали рабочему помешал пульт управления станком. Фрезеровщик отодвинул деталь в сторону, чтобы дотянуться до пульта. В это время строп с середины перемычки соскользнул на край, центр тяжести сместился, деталь качнулась и углом ударила по лицу рабочего. Масса детали 156 кг. Сказав о случившемся фрезеровщику с соседнего станка, рабочий пошел в здравпункт завода, где ему оказали первую медицинскую помощь, а затем на дежурной машине в сопровождении мастера был доставлен в больницу.

Характер полученных повреждений, описание органа, подвергшегося повреждению, были указаны в медицинском заключении о тяжести

повреждения здоровья: рвано-ушибленная рана верхнего века и левой брови, полнослойная рвано-ушибленная рана носа с повреждением хрящевого отдела. Травма относится к категории легких. Нахождение пострадавшего в состоянии алкогольного или наркотического опьянения: нет. Очевидцы несчастного случая: нет.

Причины несчастного случая:

1. Недостатки в организации производства работ:

1) недостаточный контроль применения работником безопасных приемов работы при кантовке деталей;

2) отсутствие специальной площадки для кантовки изделий;

3) нарушение должностной инструкции.

2. Несоблюдение работником типовых схем строповки и кантовки изделий. Нарушение стандарта предприятия, производственной инструкции по охране труда для лиц, пользующихся грузоподъемными машинами, управляемыми с пола.

3. Лица, допустившие нарушение требований охраны труда: начальник участка (не обеспечил безопасных условий производства, не проконтролировал соблюдение технологии кантовки изделий).

4. Нарушение должностной инструкции: фрезеровщик, имеющий вторую профессию «стропальщик» (при кантовке деталей нарушил схему строповки).

5. Нарушение стандарта предприятия, производственной инструкции по охране труда для лиц, пользующихся грузоподъемными машинами, управляемыми с пола.

Мероприятия по устранению причин несчастного случая:

1) издание приказа по результатам несчастного случая;

2) проведение внепланового инструктажа со станочниками цеха по производственной инструкции по охране труда для лиц, пользующихся управляемыми с пола грузоподъемными машинами.

Расследование несчастного случая – это выяснение обстоятельств, при которых произошел несчастный случай, установление причин, его вызвавших, и разработка мер по их предупреждению.

Проанализируем еще один несчастный случай, произошедший с учеником фрезеровщика на машиностроительном предприятии г. Твери. Фрезеровщик приступил в 6:30 к работе по фрезеровке детали. В 10:00 он выполнил задание и получил от мастера новое задание – на фрезеровку детали «пятник» массой 385 кг. Деталь была установлена на стол станка (продольно-фрезерного станка модели 6М610Ф1) мостовым краном (фрезеровщик имеет вторую профессию (стропальщик)). В 12:40 он закончил обработку детали. Деталь нужно было снять со станка. Со схемой строповки фрезеровщик был ознакомлен. Ученик фрезеровщика, наблюдавший за процессом обработки, увидел, что фрезеровщик хочет

снять деталь со станка, и решил помочь ему. Ученик взял две подкладки, а фрезеровщик в это время приподнял один край детали при помощи монтировки, чтобы завести стропы под деталь. Ученик подложил под край детали две деревянные подкладки. Фрезеровщик предупредил ученика, чтобы он убрал руки из-под детали и, убедившись, как ему показалось, что руки ученика находятся вне опасной зоны, опустил деталь. Ученик резко отдернул руку, так как третий палец правой кисти, оказавшийся между острой кромкой детали и деревянной подкладкой, был травмирован. В сопровождении мастера ученик был доставлен в здравпункт предприятия, где ему оказали первую медицинскую помощь. Из здравпункта ученик был отправлен на машине предприятия в сопровождении мастера в травматологическое отделение больницы. В больнице ему была сделана операция, на этой же машине его отвезли домой.

Характер полученных повреждений, описание органа, подвергшегося повреждению, были указаны в медицинском заключении о тяжести повреждения здоровья: травматическая ампутация неполной фаланги третьего пальца правой кисти. Травма относится к категории легких. Вид происшествия: падение детали. Нахождение пострадавшего в состоянии алкогольного или наркотического опьянения: нет. Очевидцы несчастного случая: фрезеровщик.

Причины несчастного случая:

1. Недостатки в организации производства работ:

1) недостаточный контроль применения работником безопасных приемов работы при снятии детали со станка;

2) нарушение должностной инструкции.

2. Несоблюдение трудовой производственной дисциплины:

1) несоблюдение работником схемы строповки детали «пятник»;

2) нарушение производственной инструкции (по охране труда) для стропальщиков по безопасному производству работ грузоподъемными кранами;

3) нарушение инструкции по охране труда при работе на фрезерных станках.

3. Лица, допустившие нарушение требований охраны труда: мастер участка (не обеспечил безопасных условий труда, не проконтролировал соблюдение схемы строповки детали «пятник»).

4. Нарушение должностной инструкции мастера: фрезеровщик, имеющий вторую профессию стропальщика (при съеме детали «пятник» со стола станка нарушил схему строповки).

5. Нарушение производственной инструкции (по охране труда) для стропальщиков по безопасному производству работ грузоподъемными кранами: ученик фрезеровщика нарушил инструкцию по охране труда при работе на фрезерных станках.

Мероприятия по устранению причин несчастного случая:

1) издание приказа по результатам расследования причин несчастного случая;

2) проведение внепланового инструктажа со станочниками цеха по производственной инструкции (по охране труда) для стропальщиков по безопасному производству работ грузоподъемными машинами;

3) повторное ознакомление основных рабочих, имеющих вторую профессию стропальщика, со схемами строповки, кантовки, транспортировки грузов.

Современное общество характеризуется высоким уровнем использования технических средств, предназначенных для удовлетворения жизненных потребностей человека. При этом ключевым элементом на производстве по-прежнему остается человек, призванный обслуживать, контролировать технические системы и технологические процессы и управлять ими [5].

Библиографический список

1. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации : ТК : текст с изменениями и дополнениями на 1 марта 2022 года [принят Государственной думой 21 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года] // Российская газета. – 2001. – 31 декабря № 256.

2. Пузырев, А.М.К вопросу о повышении качества обучения в области безопасности и охраны труда на машиностроительных предприятиях / А.М. Пузырев, Л.В. Козырева, В.А. Мартемьянов. – Текст : непосредственный // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2020. – № 13. – С. 101-107.

3. Кузнецова, Е.А. Столетняя история развития методов расследования несчастных случаев на производстве / Е.А. Кузнецова – Текст : непосредственный // Экономика, предпринимательство и право. – 2021. – Т. 11. – № 1. – С. 193-212.

4. Кузнецова, Е.А. Методы расследования несчастных случаев на производстве / Е.А. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Экономика труда. – 2020. – Т. 7. – № 12. – С. 1307-1322.

5. О фоновых уровнях аварийных опасностей на опасных производственных объектах / А.И. Гражданкин, А.С. Печеркин, Е.А. Самусева [и др.]. – Текст : непосредственный // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 10. – С. 50-56.

Е.Б. Голубева
Тверской государственной технической университет

НЕСЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ СО СМЕРТЕЛЬНЫМ ИСХОДОМ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ: АНАЛИЗ, ПРИЧИНЫ, ОБСТОЯТЕЛЬСТВА

© Голубева Е.Б., 2022

Статья написана в форме сравнения двух несчастных случаев – связанного с производством и не связанного с производством. Анализируются их особенности и обстоятельства.

Ключевые слова: производственный травматизм, расследование, несчастный случай, обучение, инструктаж по охране труда.

FATAL ACCIDENTS AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES: ANALYSIS, CAUSES, CIRCUMSTANCES

The article is written in the form of a comparison of two accidents. An accident related to production and unrelated to production, their features and circumstances are described.

Keywords: industrial injuries, accident investigation, training, instruction, labor protection.

Расследование несчастного случая – одна из сложных процедур в работе по охране труда по нескольким причинам: ограничены сроки расследования; необходимо взаимодействовать с пострадавшим работником или его представителями, проверяющими органами. Порядок расследования несчастных случаев регламентируют Трудовой кодекс РФ и Положение об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях, утвержденное Постановлением Минтруда и соцразвития РФ от 24 октября 2002 г. № 73. В данной статье будут рассмотрены два несчастных случая со смертельным исходом, произошедшие со стропальщиками на рабочем месте в рабочее время.

Первый случай. Несчастный случай произошел на складе металла складского хозяйства, расположенного на территории предприятия. На месте происшествия находился козловой электрический кран КК-32 грузоподъемностью 32 т, на крюке крана – четырехветвевой строп цепной (4СЦ – 16,0/К – 6,3/3500). На месте производства работ находились два универсальных стропа канатных (УСК 2,0/4000), листовая металл в штабеле 1 500–6 500 мм. Работа выполнялась вне помещения, состояние освещенности естественное, светлое время суток, видимость хорошая, температура –2 °С.

3 декабря в 10:20 бригада стропальщиков погрузо-разгрузочного участка транспортного цеха по заданию мастера приступила к подаче металла со склада металла в цех. Стропальщики Ш. и Б. завели с одного конца пачки металла канатный строп УСК 2,0/4000 и зацепили его на четырехветвевой строп цепной. Ш. подал команду крановщику на подъем груза на высоту 300 мм для того, чтобы завести второй строп УСК 2,0/4000. Стропальщики отошли на безопасное расстояние от поднимаемого груза, и в это время Ш. потерял сознание и упал на землю. Мастер вызвал медперсонал здравпункта завода и скорую помощь, стал делать искусственное дыхание Ш. Приехавший медперсонал из здравпункта на заводской дежурной машине и прибывшие врачи скорой помощи провели реанимационные мероприятия (искусственную вентиляцию легких, непрямой массаж сердца), но результат был отрицательный. Врачами скорой помощи была констатирована смерть.

По заключению судебно-медицинской экспертизы смерть Ш. наступила от ишемической болезни сердца, осложнившейся острой коронарной недостаточностью. Этиловый спирт в крови обнаружен не был.

Комиссия, проводившая расследование несчастного случая, пришла к заключению: на основании ст. 229 ТК РФ [1], Положения об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях, утвержденного Постановлением Минтруда и соцразвития РФ от 24 декабря 2002 г. № 73 [2], и, исходя из вышеизложенного, квалифицировать смертельный несчастный случай с Ш. как не связанный с производством.

Второй случай. Несчастный случай произошел на территории открытого склада металла складского хозяйства цеха.

На территории склада установлены два козловых крана. Примерно в 20 м от места происшествия находится помещение для хранения инвентаря. В помещении хранятся лопаты для очистки склада от снега, ломы, молотки, костыли для разъединения листов металла, металлические багры и металлические крюки для ориентации груза в пространстве и подтягивания съемных грузозахватных приспособлений под грузом, при невозможности безопасно завести строп под груз вручную. На стене помещения вывешены два стенда с графическими изображениями схем строповки металлопроката, поступающего на склад.

Под козловым краном грузоподъемностью 32 т установлен седельный тягач МАЗ с полуприцепом. Третья секция левого борта полуприцепа (по ходу движения автомобиля) открыта, в открытом проеме установлена приставная металлическая лестница для подъема в кузов. В передней части полуприцепа находятся 5 листов металла толщиной по 30 мм каждый, размером 6 x 1,5 м, на подкладках, и кусок металлической упаковочной ленты, оставшейся в кузове от предыдущего рейса. В задней части полуприцепа находятся 4 бруса 100 x 100 мм – подкладки от пачки листового металла, перемещенного на склад.

На крюковой подвеске козлового крана подвешен четырехветвевой цепной строп 8-4СЦ-17,0/2 500-000 СБ, 2 500 мм, грузоподъемностью 17 т. На двух крюках четырехветвевых строп подвешены два одноветвевых цепных строп 1СЦ-5,3 х4 000 (звено-звено) грузоподъемностью по 5,3 т. Стропы находятся в исправном состоянии. Осмотр стропов проведен. Результаты осмотра занесены в Журнал учета и осмотра тары и СГП.

18 марта в 8:00 заместитель начальника цеха на основании заявки выдал мастеру задание по перемещению материала в производственный цех и разгрузке металла, поступившего на склад. В 8:05 мастер собрал бригаду из двух машинистов кранов, двух стропальщиков и кладовщика и выдал им задание на перемещение металла со склада в цех для производства работ и последующей разгрузки металла, привозимого автомобилями на склад. До обеда машинист крана и стропальщики производили погрузку и перевозку металла в помещение цеха. В 11:30 кладовщица привезла на автомобиле МАЗ металл с другого предприятия на склад металла, где и произошел несчастный случай. В кузове полуприцепа автомашины находились две пачки металла – одна размером 3 х 1,5 м, другая 6 х 1,5 м. Автомобиль установили для разгрузки под козловой кран грузоподъемностью 32 т.

После установки автомашины бригада ушла на обед. После обеда, в 12:10, машинист крана подъехал на кране к автомашине и установил крюковую подвеску над пачкой металла 3 х 1,5 м, находящегося на подкладках и предполагаемого к разгрузке. Масса пачки составляла 8,6 т. Стropальщик поднялся в кузов полуприцепа, осмотрел груз и направил второго стропальщика подготовить место складирования. Машинист крана опустил крюковую подвеску, на которой находился четырехветвевой цепной строп, с крюками на концах. На двух крюках четырехветвевых строп были подвешены два одноветвевых цепных строп с кольцами на концах. Стropальщик снял один одноветвевой строп с крюка, а вторым стропом, висевшем на крюках, застропил пачку с левой стороны (по ходу движения машины) и дал команду на подъем. Подняв левый край пачки примерно на 200 мм, стропальщик попытался завести в образовавшийся проем второй одноветвевой строп, бросив его под пачку. Один конец стропы остался у стропальщика, а второй застрял где-то под пачкой с противоположной стороны. В этот момент стропальщик стоял у левого борта по ходу движения машины. Затем он перешел на другую сторону к правому борту (по ходу движения машины) и дал команду на подъем левой стороны пачки. При этом борта машины были закрыты. Когда пачка была приподнята, стропальщик лег на пол полуприцепа (между бортом и приподнятой пачкой) и попытался достать строп рукой. Однако до стропы было не дотянуться, он стал пытаться подлезть под пачку. Машинист крана подал звуковой сигнал и крикнул: «Не лезь под груз!». В этот момент одноветвевой строп, зацепленный за пачку с левой стороны, соскользнул с груза и груз металла упал на голову стропальщика.

Прибывшие врачи скорой медицинской помощи констатировали его смерть.

Смерть стропальщика, согласно акту судебно-медицинского исследования трупа, наступила в результате тяжелой сочетанной травмы с переломами костей свода и основания черепа, ребер и ключицы справа, размождением головного мозга. Этиловый спирт в крови погибшего обнаружен не был.

Оба случая произошли в рабочее время и на рабочем месте, но в первом случае стропальщик умер от болезни, поэтому это не связанный с производством несчастный случай. Во втором случае стропальщик погиб в результате воздействия на него опасного производственного фактора (подвешенного груза) и грубого нарушения инструкции по охране труда. При расследовании комиссия выяснила, что стропальщик не прошел первичный инструктаж по охране труда.

При проведении первичного инструктажа по охране труда на рабочем месте непосредственный руководитель должен добиться изучения работником документов:

инструкций по охране труда по основной профессии и другим видам работ, которые периодически может выполнять работник;

локальных нормативных актов организации (правил внутреннего трудового распорядка, приказов, положений, распоряжений, коллективного договора и др.);

технической, технологической и эксплуатационной документации [3].

Библиографический список

1. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации : ТК : текст с изменениями и дополнениями на 1 марта 2022 года [принят Государственной думой 21 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года] // Российская газета. – 2001. – 31 декабря № 256.

2. Российская Федерация. Законы. Об утверждении форм документов, необходимых для расследования и учета несчастных случаев на производстве, и положения об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях : Положение № 73 [утверждено Постановлением Минтруда России от 24 октября 2002 года : зарегистрировано в Минюсте России 5 декабря 2002 года]. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : справочно-правовая система : официальный сайт. – 2022. – URL: <https://rosmintrud.ru/docs/1281> (дата обращения: 20.02.2022).

3. Пузырев, А.М. К вопросу о повышении качества обучения в области безопасности и охраны труда на машиностроительных предприятиях / А.М. Пузырев, Л.В. Козырева, В.А. Мартемьянов – Текст : непосредственный // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. – 2020. – № 13. – С. 101-107.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Часть 1	
<i>Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В., Янишевский Я.А.</i> Некоторые физико-химические особенности магнитных масел, влияющие на их смазочные свойства.....	4
<i>Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.</i> Выбор толщины керамического слоя на алюминии и его сплавах с учетом затрат энергии и ресурсов на его получение.....	12
<i>Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н.</i> Влияние несквозной перфорации поверхности детали на характеристики керамического микродугового оксидирования покрытия.....	17
<i>Зоренко Д.А.</i> Современные представления о механизмах изнашивания подвижных элементов узлов трения.....	22
<i>Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В.</i> Комплекс аппаратуры для испытаний электрофрикционных контактных соединений. Часть 1.....	29
<i>Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В.</i> Комплекс аппаратуры для испытаний электрофрикционных контактных соединений. Часть 2.....	37
<i>Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В.</i> Комплекс аппаратуры для испытаний электрофрикционных контактных соединений. Часть 3.....	45
Часть 2	
Доклады Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное развитие машиностроения и энергетики России», посвященной 100-летию Тверского государственного технического университета (г. Тверь, 18 января 2022 г.).....	53
<i>Мешков В.В.</i> О моделировании напряженно-деформированного состояния и износа полимерного поршня с учетом влияния пленок переноса.....	54

<i>Бойко М.В., Бичеров А.А., Ананко А.М., Бойко Т.Г.</i> Повышение износостойкости эпоксидно-диановых композитов армированием ультрадисперсными частицами оксидов-гидроксидов переходных металлов.....	59
<i>Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р.</i> Образование вторичных структур при адаптации в условиях трения.....	65
<i>Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш., Мигранов А.М.</i> Термодинамическое описание адаптации поверхностей трения при лезвийной обработки резанием.....	73
<i>Бурдо Г.Б., Болотов А.Н.</i> Исследование процедур проектирования технологий в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами.....	83
<i>Буров А.М., Иванов М.В., Евланов В.Е.</i> Усовершенствование конструкции инструмента и технологии очистки скважин с использованием комплексов КОС-02.....	93
<i>Горлов И.В., Болотов А.Н., Митусов П.Е., Полетаева Е.В.</i> Анализ разрушения слабых горных пород в процессе дробления.....	99
<i>Альсигар М.К., Алмаваши А.Д., Переверзев П.П.</i> Сравнительный анализ основных результатов исследования при круглом наружном шлифовании с радиальной подачей с выхаживающим ходом.....	107
<i>Зоренко Д.А., Фадина Д.С.</i> Применение аддитивных технологий в производстве компактных полимерных редукторов.....	112
<i>Голубева Е.Б.</i> Анализ производственного травматизма на машиностроительных предприятиях.....	117
<i>Голубева Е.Б.</i> Несчастные случаи со смертельным исходом на машиностроительных предприятиях: анализ, причины, обстоятельства.....	123

