

Оценка влияния развития эрозии на движение среды внутри микроэлектрода

В. С. Деева **, С. М. Слободян *

Томский политехнический университет, г. Томск, 634050, Россия,
*e-mail: sm-sms@mail.ru, **e-mail: veradee@mail.ru

Поступила в редакцию 26.07.2021

После доработки 28.09.2021

Принята к публикации 30.09.2021

Рассмотрено влияние электроэрозии-дефекта внутреннего канала микроэлектрода, на движение среды его охлаждения. Используя уравнение неразрывности движения жидкости в канале внутри микроэлектрода, найдены аналитические соотношения, связывающие изменение перепада давления потока среды с зарождением и числом дефектов (пор и каверн) эрозии внутренней поверхности канала. На основе полученных соотношений предложен метод раннего выявления появления дефектов эрозии в поверхностном слое канала движения среды внутри электрода. Найдены простые выражения модели движения среды охлаждения в микроэлектроде. Решение доведено до аналитического вида. Проведен анализ модели. Дана оценка параметров движения среды охлаждения микроэлектрода для эффективного удаления частиц из активной зоны действия эрозии. Результаты моделирования имеют удовлетворительную сходимость с результатами экспериментов других исследователей и из практики.

Ключевые слова: флуктуации перепада давления, средняя численная оценка, поверхностный слой, микроканальный поток, наноразмерные дефекты, углеродная нанотрубка

УДК 537.528:621.9.048:621.89:534.8

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.12>

ВВЕДЕНИЕ

Во всех отраслях промышленного производства, включая область электроники, существует необходимость создания микроразмерных отверстий в изделиях сложной геометрии с различной мерой практического качества их поверхностей. Для решения таких задач, например, в точном машиностроении, приборостроении эффективно используют метод электроэрозионной обработки с заданным качеством получения отверстий в материалах [1–4]. Расширение перечня нано- и критических технологий, развитие средств высокой точности контроля поверхности молекулярного класса объектов, в том числе [5–8], не только в области точного машино- и приборостроения, но и медицины, биологии и других отраслей, требуют наличия микроразмерного инструмента для создания соразмерных инструменту отверстий, пазов, щелей и поверхности с требуемым микро-рельефом [9–12].

Наноразмерные и молекулярные технологии вызвали высокий интерес к созданию отверстий и ниш малого размера методом электрической эрозии [13–17]. В технике и метрологии молекулярных технологий минимальный размер отверстий, раковин и щелей соизмерим с нанометровой мерой [14–16, 18–22]. Качество полу-

чаемых этим путем отверстий и ниш зависит: во-первых, от стабильности давления среды охлаждения на выходе электрода и, во-вторых, от степени засорения ее потока продуктами эрозии в активной зоне воздействия [23, 24]. Потому поддержание стабильности величины перепада давления среды охлаждения в микроэлектроде и снижение влияния частиц эрозии в активной зоне на электрическое воздействие, важно для повышения качества отверстий и ниш, получаемых электроэрозией.

Кроме того, фактор присутствия в среде, охлаждающей инструмент, частиц эрозии, в том числе из-за адгезии к электроду, ведет к некоторому изменению динамики процесса эрозии с временной вариацией формы электрода и к нарушению качества результата воздействия эрозии на материал [1, 4, 8, 25, 26]. В зоне эрозии действует несколько факторов, влияющих на вариации формы электрода [5]. Основной из них – непрерывное образование в активной зоне эрозии микрочастиц материала, являющихся закономерным продуктом действия процесса. Форма частиц разнообразна и, чаще всего, случайно произвольная [1–4, 7–11, 21, 25–28]. При застревании в зоне эрозии они образуют в зазоре зоны проводника высокой проводимости тока. Перекрытие частицами эрозии малоразмерного канала их движения, это фактор сильного изменения эрозии, массопереноса,

термодинамики и т.п. [21, 23, 24, 27]. Поэтому поиск путей снижения нарушений однородности действия деструкции из-за задержки частиц в активной зоне эрозии, формируемой детали, важен для улучшения качества процесса.

Из анализа работ [1, 2, 4, 15–17, 23–26, 29–30] следует, что динамика протекания процесса эрозии в зоне действия деструкции, является многофакторной, что и обуславливает ее сложность. Практика показывает, что, при приближении к желаемой форме протекания процесса эрозии с электродами малого размера, пока имеется ряд труднопреодолимых явлений, в частности, наличие статистически случайных актов перекрытия частицами эрозии зоны активной деструкции. Решение задачи полного удаления частиц из активной зоны давлением потока охлаждающей электрод среды гарантированно улучшает динамику, массоперенос, стабильность протекания процесса эрозии. Потому изучение движения среды охлаждения в микроэлектроде для лучшего удаления частиц эрозии из активной зоны обработки материала на данном этапе развития электроэрозионной обработки является актуальным и представляет значительный академический и практический интерес.

В науке и промышленных технологиях устройства и средства транспорта микроструктурных сред имеют различные применения. Особенно их важная и решающая роль заметна при использовании в устройствах и системах теплообмена и массопереноса, связанных с современной наукой молекулярных объектов исследования и наноразмерными технологиями. В частности, они широко применяются в практике многих промышленных технологий, в области техники и систем транспорта веществ и вязких сред [15, 23, 24], биомедицинских средств и систем [16, 26], в технике и средствах конструирования нанoeлектронных элементов на кристалле [31], в технике устройств микро-насосов и средств электроосмоса [6, 26, 32–34], а так же во многих других отраслях техники, включая технику управления передачей тепла в микроэлектро-механических устройствах и микроэлектронных системах [35]. Представленные в [35], результаты учитывают влияние на движение микропотока среды действия силы Лоренца. Взаимодействие магнитного и электрического полей является еще одним фактором влияния на непрерывное движение потока среды в элементе. Заметим, что для управления передачей потока тепла средой в исследованиях [32–35] учитывается неравновесность динамики. Там же обсуждается методология применения

метода конечных элементов, использованного для моделирования действия многомасштабной схемы деструкции. Моделированием изучалось влияние различных малоразмерных наполнителей на эффективность отвода тепла композитной средой как варианта способа охлаждения.

Подобные исследования помогают разработать оригинальные устройства, а также объяснить и обосновать физику и механику многих сложных явлений и процессов эрозии, связанных с движением потока сред. Движение в микроканалах достаточно широко изучается в связи с многомасштабностью факторов влияния на процессы эрозии. Поэтому указанные исследования проводятся на основе большого многообразия известных и оригинальных теоретических и экспериментальных методов и методик [23, 24, 27–32, 36–37].

Доставка тепла и охлаждающих потоков газовых и жидкостных сред через трубчатые и пористые элементы применяется весьма часто в современной науке и технике. Она играет важную роль в стабилизации термодинамики технологических процессов производств множества изделий. В течение нескольких десятков лет изучению проблем транспорта сред уделяют огромное внимание исследователи многих отраслей науки и производства, связанных с широким спектром инженерных приложений, таких как: термостабилизация работы электронных компонентов, обеспечение безопасности ядерных реакторов, охлаждаемых водой под давлением, транспирационное охлаждение, включая изоляцию пористыми материалами, технологические конструкции тепловых и охлаждающих труб, химические реакторы, процессы теплоизоляции и, конечно, создание элементов и структур сосудов, обеспечивающих поток жидкостей в различных физиологических, биологических и технологических процессах. Было проведено несколько исследований явления передачи тепла (охлаждения) с использованием микроканалов пористой среды.

В последнее десятилетие явления переноса в микроканалах пористых сред вызвали большой интерес при традиционных применениях и в новых областях микромасштабной передачи тепла и охлаждения [33–35]. Это обусловлено тем, что пористые структуры с малыми размерами канала движения сред служат основой изготовления более совершенных микроустройств в ряде областей высокоточного приборостроения.

Несмотря на значительный объем исследований [1, 30] по использованию движения среды охлаждения для удаления частиц электроэрозии,

имеется немало причин, когда погрешности оценок по ранее выведенным аналитическим формулам достигают существенных величин. Высокая неопределенность оценок связана с большим числом переменных, характеризующих движение среды охлаждения во внутреннем канале электрода. К числу указанных переменных сильно влияющих на движение среды в канале электрода относятся: массовый расход среды, плотность и вязкость среды в канале, поверхностное натяжение, шероховатость внутренней поверхности канала электрода, наклон оси канала электрода и ряд других. Проблема адекватности знания и прогноза о реальном движении среды в закрытом канале существенно усложняется при введении управления параметрами потока среды в канале электрода для повышения эффективности очистки активной зоны эрозии от микрочастиц материала. Следует отметить, что наши знания о динамике движения многих сред в закрытых от наблюдения каналах в значительной степени являются эмпирическими [23, 24]. Для получения надежных эмпирических результатов требуется достаточно широкая программа исследования такого рода многомасштабных и мультифакторных явлений. Основные трудности при получении знания о реальном движении потока среды для эффективного управления им в процессе электроэрозии связаны с необходимостью привлечения большого числа соотношений, безразмерных параметров, многофакторности явлений и тому подобное, принятых в этой области. В динамике управления происходит случайное изменение структуры потока движения среды в весьма широком диапазоне, что, несомненно, в сильной степени отражается на формировании эрозии поверхности канала движения среды в электроде и в активной зоне. Кроме того, переход от применения макроразмерной к микроразмерной технике существенным образом влияет на физические особенности процесса действия электроэрозии, переводя ее от интегральных к дифференциальным оценкам результатов взаимодействия [38–40].

Совокупный анализ, основанный на обобщении многих работ, показывает, что проведение исследований с целью создания математической модели оценки влияния эрозии канала на движение потока среды охлаждения во внутреннем пространстве микроразмерного электрода является на данный момент времени насущно необходимым и весьма актуальным решением.

Цель работы – уточнение модели движения среды охлаждения в микроэлектроде с учетом

изменения свойств потока среды, используемого для транзитного выноса частиц эрозии давлением потока движения среды из внутреннего пространства канала микро-размерного электрода.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы исследования, используемые в работе, основаны на положениях физики и теории случайных процессов, вызванных электроэрозионным воздействием с учетом теории подобия для обеспечения эффективного выноса продуктов молекулярной эрозии из зоны обработки материала.

Изготовление канала движения среды в электроде вносит определенную шероховатость в его поверхность. Поверхность канала несомненно и существенно влияет на профиль скорости из-за действия эффектов шероховатости при любом движении потока среды охлаждения. В последние годы исследователи уделяют много внимания изучению движения микроканального потока сред [27, 32–35, 38–40]. В частности, в [25–28] изучали поток среды через микроканал с неидеальной стенкой. Результаты исследования движения потока среды в микроканале указали на существенное отличие в части снижения среднего распределения скорости в шероховатом микроканале по сравнению с гладким микроканалом. Приведенные данные подтверждают необходимость уточнения влияния дефектов поверхности канала движения потока среды на изменение перепада давления в электроде для стабилизации силового воздействия на вынос частиц из активной зоны эрозии.

Законы идеальных сред весьма просты, однако, они хорошо характеризуют поведение и свойства реальных сред открытых термодинамических систем при слабом давлении и средней температуре. Эти законы тем лучше описывают свойства реальных сред, чем дальше среды находятся от области насыщения и критического состояния. Для реальных сред существует большое число уравнений состояния [23]. Одно из них – уравнение Клапейрона с поправкой $Z = \Delta_g$, учитывающей отклонение реальной среды от свойств идеальной: $p\nu = \Delta_g RT$. Постоянная R – это работа расширения единицы количества среды при нагревании ее на 1°C при постоянном давлении ($p = \text{const}$). Поправка $Z = \Delta_g$ – это коэффициент сжимаемости $\Delta_g = p\nu/RT$. Внутри короткого электрода теплоемкость среды на практике часто не меняется (принято const). Практика широкомасштабных исследований [23, 25–29, 33–35, 38–39] выявила, что Δp – перепад давления потока на некотором

интервале между точками 1 и 2 в канале движения среды пропорционален квадрату v – средней скорости движения потока:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \lambda \times \left[(v)^2 / 2 \right] \times \rho (l / d_t). \quad (1)$$

Здесь: ρ – плотность среды в канале; l – длина и d_t – внутренний эквивалентный диаметр канала движения среды в электроде-инструменте. Значения λ – коэффициента сопротивления движению среды – зависят от типа движения потока среды в канале и свойств поверхности внутреннего канала движения среды в электроде.

Внимательный анализ выражения (1), с точки зрения поддержания стабильного значения Δp_i говорит о необходимости оценки степени влияния раннего развития неконтролируемых дефектов внутреннего канала при неизменности сохранения в нем основных параметров движения среды охлаждения электрода [25–28, 31, 32]. Раннее развитие наноразмерных дефектов (пор, каверн, щелей и тому подобных образований), образуемых в поверхностном слое микроканала электрода действием эрозии при движении внутри него транспортируемой среды происходит практически с начального момента эксплуатации электрода. Зарождение и развитие наноразмерных дефектов, образуемых в поверхностном слое микроканала электрода, ведут, во-первых, к изменению в среднем величины d_t – внутреннего диаметра канала движения среды в электроде и вместе с этим к неконтролируемому изменению значения Δp – перепада давления потока на интервале длины электрода. Во-вторых, деструктивное изменение d_t и трансформация исходного типа поверхности канала образованием дефектов нарушают идеальность типа потока движения и косвенно меняют значение λ – коэффициента сопротивления движению среды, которое сильно взаимообусловлено типом движения потока среды в канале и свойствами поверхности канала электрода.

Для установления меры проявления особенностей влияния дефектности поверхности канала на изменение выходного давления потока среды и получения аналитической взаимосвязи факторов малого изменения существующих закономерностей поведения характеристик и параметров потока молекулярной среды охлаждения необходима более точная модель, способная учитывать такие малые изменения размера микроканала движения среды в виде элементов эрозии его поверхности.

Нами была рассмотрена возможность применения математического аппарата эквивалентного представления внутреннего канала движения среды в электроде в виде дискретного представ-

ления геометрии канала эквивалентным сечением плотно упакованной группы из множества, наименее возможных на практике, сечений наномерной размерности элементов типа углеродных трубок для исследования процесса раннего развития эрозии канала движения среды методами моделирования.

Знание направления формирования начальной траектории износа канала на ранней стадии развития микропор эрозии, образуемых изнутри внутреннего слоя поверхности электрода, при движении внутри них среды, является важным. Оно в полной мере корреляционной связи определяет начало и траекторию направления процесса последующей деструкции внутреннего слоя поверхности канала. Потому и служит показателем меры изменения перепада давления среды на интервале длины микроэлектрода.

Заметим, что в период начальной эксплуатации, то есть, на ранней стадии развития малого размера дефектов-пор, образуемых во внутреннем слое поверхности электрода с движением среды, начало деструкции внутренней поверхности канала обычно выпадает из практики измерения износа по некоторым причинам. Во-первых, ввиду внесения очень малых погрешностей в данные измерений, и, во-вторых, возможно, из-за труднодоступности к пространству развития пространственной и временной деструкции изнутри внутреннего слоя поверхности канала электрода.

Кратко поясним принятый нами подход эквивалентного представления. Подход включает получение оценок на основе [23] экспериментально апробированных методов оценки подобия тренда изменения параметров движения в общем канале движения и в сингулярном элементе эквивалента – отдельной поре, образуемой действием эрозии при движении этого же потока среды. Результат, который несет информацию о степени временной и пространственной деструкции внутреннего канала, следуя эквивалентному подходу, мы получаем в относительной мере. Иначе говоря, беря отношение величины перепада давления в эквивалентной отдельной поре (рис. 1), образованной действием эрозии потока, к величине перепада давления в канале электрода при синхронном движении этого же потока, мы выделяем меру влияния на динамику изменения давления с точностью оценки, определяемой мерой влияния отдельной поры эквивалента.

Таким образом, вычислением отношения перепада давления в отдельной поре, образованной действием эрозии потока, к величине перепада давления в канале электрода, по рассматриваемому методу, получаем в относи-

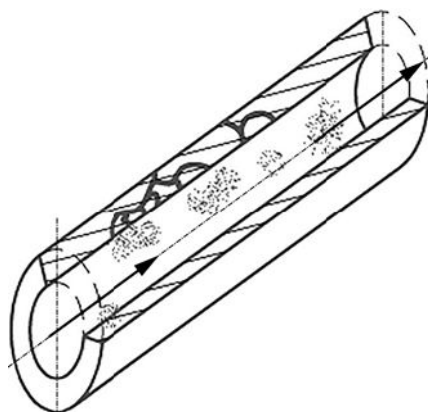


Рис. 1. Иллюстрация типичного развития (при движении внутри рабочих сред) дефекта-пор эрозии в стенке канала электрода.

тельной мере статистически среднюю долю вклада перепада давления, вносимого некоторым статистически средним числом отдельных пор, образованных за некоторое время, выбранное для оценки, действием эрозии потока в изменение перепада давления в общем канале электрода за тот же период времени.

Следует заметить, что обычно на начальной стадии эксплуатации столь малые флуктуации влияния на изменение давления, вносимого суммарно средним статистическим числом отдельных эквивалентных пор, образованных действием эрозии одного и того же потока, проявляются в изменении перепада давления в общем канале электрода. Однако, из-за малости вклада их влияние практически ускользает от внимания при анализе данных метрологии на начальной стадии эксплуатации. В практике применения получения интегральных оценок поведения тех или иных параметров малые, тем более случайного характера, отклонения параметра относят к проявлению случайного «шума». Это весьма важное замечание. Эти малые флуктуации перепада давления, вносимого среднестатистическим числом совместно действующих отдельных пор, образованных действием эрозии одного и того же потока, достаточно точно в среднем определяют раннюю стадию процесса и, самое главное, направление траектории процесса развития дефектов-микропор эрозии, обусловливаемых начальной пространственной и временной деструкцией внутренней поверхности электрода при движении внутри него среды с начального момента его эксплуатации.

Новое решение реализовано на базе известного подхода эквивалентирования процессов вкпе с применением основ теории подобия и известных методов оценки перепадов давления и расходов в трубопроводах и теплообменниках [24]. Но, в отличие от известных, учитывает аспекты движения потока среды в порождаемых им в слое внутренней поверхности

материала канала электрода действием трения [11, 18–21, 33], эрозии [21, 25–28, 31, 39], микропор эрозии (рис. 1), изменяющих свойства и условия движения среды охлаждения в электроде.

Примем в качестве эквивалента поры эрозии элементарную отдельную углеродную нанотрубку (УНТ) с виртуально сплошной поверхностью (англ.: cnt – carbon nanotube) из графена [6, 13, 25–28]. Тогда эквивалент сечения канала движения среды представит собой сотовую структуру вида виртуальной матрицы из $N_{0т}$ сингулярных элементов сечения канала. В сечении сотовой структуры каждый элемент эквивалентно подобен углеродной нанотрубке с виртуально сплошной поверхностью. Математическая интерпретация: сечение поры представляет собой дифференциальный элемент ds , а исходное сечение внутреннего канала движения среды при отсутствии дефектов поверхности является матрицей из $N_{0т}ds$ сингулярных дифференциальных элементов сотовой структуры. Зарождение $n_n \neq 0$ дефектов в поверхности внутреннего канала движения порождает эквивалентное изменение формата матрицы сечения канала из $N_{0т}ds$ элементов сотовой структуры. Для общего случая изменения $N_{эт}ds$ формата исходной матрицы из $N_{0т}ds$ элементов сечения можно записать:

$$N_{эт}ds = (N_{0т} \pm n_n)ds, \quad (2)$$

где $N_{эт}$ – изменение в динамике матрицы сечения канала электрода как число унт-эквивалентов; $N_{0т}$ – начальное сечение канала электрода как число унт-эквивалентов; n_n – число дефектов-пор эрозии (унт-эквивалентов), образованных на интервале оценки; знак «±» – отражает направление влияния эрозии (гипотетически возможные направления изменения сечения канала); индексы: «эт» – унт-эквивалент сечения канала электрода в текущей динамике, «0т» – унт-эквивалент сечения канала в начальный момент эксплуатации, «п» – пора-

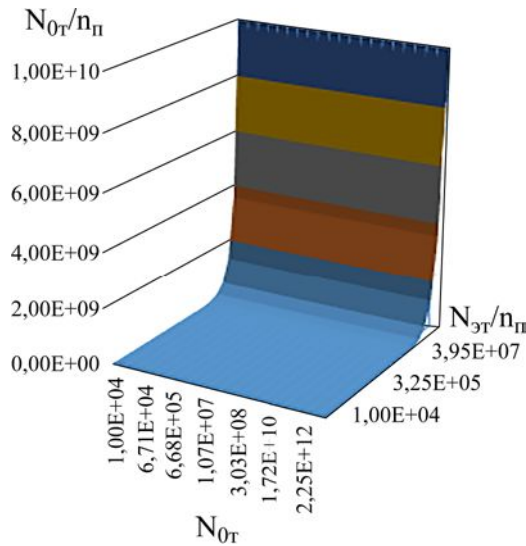


Рис. 2. Иллюстрация действия роста числа дефектов (пор, каверн) эрозии, образованных с начала эксплуатации как числа унт-эквивалентов в произвольном сечении канала электрода, при отсутствии или незначительности электромагнитного воздействия на движение потока рабочей среды и на модификацию процесса эрозии.

дефект как отдельный унт-эквивалент. Нормируя соотношение (2) на ds , как минимально возможную для измерения норму сечения потока, получим соотношение пространственно-временной деструкции канала движения среды:

$$N_{эт} = (N_{0т} \pm n_p). \quad (3)$$

Результат моделирования соотношения (3), соответствующий движению внутри микроэлектрода молекулярного ламинарного потока рабочей среды с числом Re диапазона $\sim (64-2000)$, представлен на рис. 2. Результаты моделирования приведены для изотермического предположения движения потока рабочей среды (температура $T=const$; при малой длине электрода $l \sim 0$) и справедливости действия в этих сечениях закона Бойля-Мариотта (с учетом измеренного приборами давления на входе микроэлектрода, изменения объема из-за изменения поперечных сечений в выбираемых точках потока) и уравнения Клапейрона.

Количество среды, проходящей через поперечное сечение унт-эквивалента, в произвольной точке унт-эквивалента постоянного сечения и без отбора среды по длине унт-эквивалента остается постоянным. Это соответствует стационарному установившемуся движению среды в канале микроэлектрода и унт-эквиваленте [15–16, 23–24]. Тогда V_s – объем среды, проходящий через $S_t = ds$ – поперечное сечение унт-эквивалента в единицу времени, равен произведению v – линейной скорости движения среды на площадь поперечного сечения унт-эквивалента, то есть

$$V_s = S_t \times v = V / (t = 1 c).$$

Отсюда, для постоянного сечения, при постоянной плотности среды в унт-эквиваленте и канале электрода, уравнение неразрывности сводится к постоянству объемного расхода в любом сечении. Другими словами, в микроканале с $S_t=const$ и обычном уровне давления плотность среды охлаждения практически постоянна, поскольку внутри она несжимаема. Для короткого микроканала уравнение неразрывности упрощается: $S_t \times v = const$. Это уравнение применимо и в активной зоне эрозии при выносе частиц эрозии давлением потока с малым перепадом давления, когда плотность потока среды в канале электрода и зоне эрозии в первом приближении постоянна. В общем случае, следуя постулатам физики, давление потока среды p на любую частицу эрозии равно пределу отношения нормальной составляющей силы F_N к площади сечения частицы эрозии s_i , на которую действует сила давления потока среды в направлении ее выноса из активной зоны эрозии материала:

$$p = \lim F_N / s_i = \partial F_N / \partial s.$$

В предположении равномерного распределения сил по сечению потока на выходе канала электрода давление среды на частицу эрозии составит величину, равную отношению:

$$p = F_N / s_i.$$

Последнее отношение в неявной форме через направление вектора нормальной составляющей силы F_N показывает наличие влияния пространственной ориентации электрода и канала движения в нем потока среды охлаждения на формирование меры давления p при выносе потоком любой из частиц материала, которая

образовалась в активной зоне эрозии [23–25]. Исследование влияния угла отклонения от горизонтали электрода и осевой траектории движения потока среды охлаждения внутри микроэлектрода в условиях действия сил земного притяжения указывает, например, при динамическом взаимодействии двух сред, на существование нелинейного поведения этого рода закономерностей [18, 36, 37].

Для получения средних численных оценок воздействия при влиянии раннего развития деструкции поверхности канала движения среды в электроде можно использовать некоторые обобщенные данные [6, 16, 32, 35, 38] по геометрии унт-эквивалента, принятого в работе. Приведем их. Для большинства технических областей применения геометрические параметры (диаметр и длина) углеродных нанотрубок весьма точно измеряются методами электронной микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, атомной силовой микроскопии и рамановской спектроскопии. Результаты экспериментальных измерений, полученных на этой технике, говорят о том, что в «статистически среднем» длина углеродных нанотрубок лежит в диапазоне значений порядка 4 мкм. Диаметр однослойных углеродных трубок графена, по данным тех же измерений, находится в диапазоне значений $\sim(0,7-2,1)\times 10^{-9}$ м. Диаметр многослойных углеродных трубок (по тем же измерениям) в среднем имеет значение ~ 150 нм = 150×10^{-9} м [16]. Приведенные средние значения данных могут быть использованы совместно с положениями фундаментальной теории подобия для получения статистически средних численных оценок влияния раннего развития деструкции поверхности канала движения среды в электроде и проведения обоснования приемлемости той или иной изучаемой модели. Следуя теории подобия, можно провести тестовые сравнения в виде проверок размерностей и алгоритма вычислений на физических задачах по моделям, идентичным рассматриваемой, дающей удовлетворительный результат.

В завершение заметим, что на ранней стадии развития пор и каналов эрозии, образуемых в стенке движущейся внутри электрода средой, закономерно на начальном этапе эксплуатации отнести их к скрытым дефектам в электродах, не приводящих к потере свойств последних. Привлечение техники внешнего наблюдения и методов неразрушающего дистанционного контроля, например, акустического, оптического, радиационного, радиоволнового, теплового, электромагнитного, вихретокового и других для выявления ранней стадии развития дефектов

эрозии, образуемых изнутри в поверхности электрода при движении среды, будут малоэффективны, из-за отсутствия на практике наглядных внешних признаков существенных отклонений [31, 33–35, 37–39, 40, 41].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность построения математической модели формирования и динамики движения потока среды охлаждения для выявления ранней стадии зарождения дефектов и действия эрозии в канале микроэлектрода, которые динамически меняют геометрию потока движения среды из-за пространственно-временной деструкции поверхности канала, оказывая существенное влияние на эффективность выноса частиц из активной зоны электроэрозии.

Использованием аддитивного эффекта накопления пространственно-временной деструкции канала движения среды, которая обуславливает малые флуктуации перепада давления, вносимого совместно действующим средним статистическим числом элементарных дефектов, образованных действием эрозии, с высокой точностью выявлено, что малые флуктуации давления в среднем определяют раннюю стадию и направление траектории процесса развития дефектов эрозии, вызванной начальной пространственной и временной деструкцией поверхности канала электрода и связанной с движением внутри него среды.

Численный анализ динамики изменения малых флуктуаций давления потока среды внутри электрода указывает на сильно нелинейный характер процесса развития внутренних дефектов эрозии под действием пространственной и временной деструкцией поверхности канала электрода, существенно изменяющих характер движения среды и меру эффективности ее действия на вынос частиц из активной зоны электроэрозии, из-за влияния эффекта накопления дефектов эрозии.

Важно отметить, что в изложении материала данной работы, чтобы не затенять сущность предложенного метода моделирования при решении задач исследования внутреннего движения рабочей среды, исключен анализ полномасштабного влияния всех аспектов электромагнитного воздействия на изучаемое движение потока рабочей среды, оказываемого протеканием тока через электрод и в объеме его эрозионного действия, несомненно присутствующего в реальном процессе на практике. Анализ полномасштабного влияния всех аспектов электромагнитного воздействия на изучаемое движение потока рабочей среды, связанного с

протеканием тока через электрод и в объеме его эрозионного действия, достаточно сложный в своей физической взаимосвязи, его весьма трудно изложить в столь краткой статье, поскольку изучение этих вопросов представляет собой значительный академический интерес, который может быть реализован только на основе достаточно объемной программы исследования влияния этого многофакторного аспекта, публикация результатов которой равнозначна десяткам работ типа [42, 43].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась при поддержке Минобрнауки в соответствии с ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2014–2020 гг. при частичной поддержке РФФИ, проект № 15-08-02265.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ О ВКЛАДЕ АВТОРОВ

Работа создана совместным и равным трудом авторов.

ЛИТЕРАТУРА

- Боков, В.М., Сиса, О.Ф., Использование электрической дуги для получения металлических порошков, *ЭОМ*, 2019, т. 55, № 2, с. 60.
- Смирнов, А.П., Жекул, В.Г., Хвошан, О.В., Инициирование электрического разряда в воде тонкослойным проводником, *ЭОМ*, 2021, т. 57, № 2, с. 15.
- German, R.M., Progress in titanium metal powder injection molding, *Materials*, 2013, vol. 6, p. 3641.
- Angelo, P.C., Micro and nanofabrication by powder metallurgy. *J. Powder Metall Min.* 2015, vol. 4, p. 1.
- Deeva, V., Slobodyan, S., Effect of pressure changes in sliding contact, *Int. J. Engineer. Technol. (UAE)*, 2018, vol. 7, p. 167.
- Graphene: Fabrication, Characterizations, Properties and Applications*, Zhu, H., Xu, Z., Xie, D., Fang, Y., eds., Beijing: Academic Press, 2018.
- Gruzdev, A.A., Morgunov, Y.A. and Saushkin, B.P., Electrical discharge drilling of small diameter holes upon ultrasonic field application, Part 1. Results of technological experiments, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, p. 166.
- Furusato, T., Yamamoto, Y., Sakamoto, T., Oura, K., et al., Simulation of voltage/current waveforms and contact area of pulsed surface discharge on water, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, vol. 26, p. 439.
- Deeva, V., Slobodyan, S. and Martikyan, M., Physical model of the sliding contact of conductors of the alloy Cu-Zr and Cu-Re under high current density, *Mater. Today: Proceedings*, 2016, vol. 3, no. 9, p. 3114.
- Deng, Z.Q., Zhu, Y.W., Wang, F., Gu, X., et. al., Analysis and experimental study of vibration system characteristics of ultrasonic compound electrical machining, *Strength Materials*, 2017, vol. 49, p. 37.
- Li, Y., Single-atom catalysts: The role of intrinsic intermediate, *Green Energ. Environ.*, 2020, vol. 5, p. 4.
- Deeva, V., Slobodyan, S., Assessment of the tribological contact between sliding surfaces via an entropy approach, *J. Tribology-Trans. ASME*, 2019, vol. 141, p. 031602.
- Namilae, S., Chandra, N. and Shet, C., Mechanical behavior of functionalized nanotubes, *Chem. Phys. Lett.*, 2004, vol. 387, p. 247.
- Silva, J., Lanceros-Mendez, S. and Simoes, R., Effect of cylindrical filler aggregation on the electrical conductivity of composites, *Phys. Lett. A*, 2014, vol. 378, p. 2985.
- Deeva, V.S., Slobodyan, S.M. and Teterin, V.S., Optimization of oil particles separation disperser parameters, *Mater. Sci. Forum*, 2016, vol. 870, p. 677.
- Tinh, T., Chuc, N., Jourdain, V., Paillet, M., et al., Synthesis of individual ultra-long carbon nanotubes and transfer to other substrates, *J. Experim. Nanoscience*, 2011, vol. 6, p. 547.
- Gao, X., Li, T., Sarkar, A., Li, L., et. al., Development and validation of an enhanced filtered drag model for simulating gas-solid fluidization of Geldart. A particles in all flow regimes, *Chem. Engineer. Sci.*, 2018, vol. 184, p. 38.
- Deeva, V.S. and Slobodyan, S.M., The Joule-Thomson effect and the non-equilibrium thermodynamics of sliding nano-contact, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1019, p. 012029.
- Scaraggi, M. and Persson, B., Friction and universal contact area law for randomly rough viscoelastic contacts, *Phys. Condens. Matter*, 2015, vol. 27, p. 105102.
- Afferrante, L., Bottiglione, F., Putignano, C., Persson, B. et al., Elastic contact mechanics of randomly rough surfaces: An assessment of advanced asperity models and Persson's theory, *Tribology Lett.*, 2018, vol. 66, p. 1.
- Deeva, V. and Slobodyan, S., Nanolayer in brush collector contact under Joule heating, *Appl. Surf. Sci.*, 2020, vol. 500, p. 143999.
- Dabbagh, F. and Schneiderbauer, S., Small-scale flow topologies, pseudo-turbulence and impact on filtered drag models in turbulent fluidization, *Phys. Rev. Fluids*, 2021, vol. 6, p. 044310.
- Batchelor, G.K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 758 p.
- Chisholm, D., *Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchanges*, London: Pitman Press, 1983. 232 p.

25. Dewapriya, M. and Rajapakse, R., Molecular dynamics simulations and continuum modeling of temperature and strain rate dependent fracture strength of graphene with vacancy defects, *J. Appl. Mechan.*, 2014, vol. 81, p. 081010.
26. Seriani, S., Medvet, E., Carrato, S. and Gallina, P., A complete framework for the synthesis of powered floor systems, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 2020, vol. 25, p. 1045.
27. Sempértegui-Tapia, D.F. and Ribatski, G., Two-phase frictional pressure drop in horizontal micro-scale channels: Experimental data analysis and prediction method development, *Int. J. Refrig.*, 2017, vol. 79, p. 143.
28. Joshi, M., Sharma, E., Anand, A., Thirugnanam, M., et al., Effect of Stone-Thrower-Walls defect on mechanical properties of Bi-layer graphene – A molecular dynamics study, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 912, p. 032084.
29. Chisholm, N., Legendre, D., Lauga, E. and Khair, A., A squirmer across Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, 2016, vol. 796, p. 233.
30. Malyushevskaya, A.P. and Malyushevskii, P.P., Optimization of the process of fine electric discharge dispersion, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, p. 400.
31. Aki, A.A. and Hassanien, A.S., Comparative microstructural studies using different methods: Effect of Cd-addition on crystallography, microstructural properties, and crystal imperfections of nano-structural thin $Cd_xZn_{1-x}Se$ films, *Physica B: Condens. Matt.*, 2021, vol. 620, p. 413267.
32. Kumar, Y., Sahoo, S. and Chakraborty, A.K., Mechanical properties of graphene, defective graphene, multilayer graphene and SiC-graphene composites: A molecular dynamics study, *Physica B: Cond. Matt.*, 2021, vol. 620, p. 413250.
33. Li, X.J. and Hibiki, T., Frictional pressure drop correlation for two-phase flows in mini and micro single-channels, *Int. J. Multiphase Flow*, 2017, vol. 90, p. 29.
34. Khoei, A.R. and Ghahremani, P., Temperature-dependent multi-scale modeling of surface effects in nano-materials, *Mechan. Mater.*, 2012, vol. 46, p. 94.
35. Razzaghi, L., Khalkhali, M., Rajabpour, A. and Khoeini, F., Effect of graphene and carbon-nitride nanofillers on the thermal transport properties of polymer nanocomposites: A combined molecular dynamics and finite element study, *Phys. Rev. E*, 2021, vol. 103, 013310.
36. Sánchez, S.F., Luna, R., Carvajal, M.I. and Tolentino, E., Pressure drop models evaluation for two-phase flow in 90 degree horizontal elbows, *Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo*, 2010, vol. 3, p. 115.
37. Liu, Z., Liao, R., Luo, W., Ribeiro, J.X.F. et al., Friction pressure drop model of gas-liquid two-phase flow in an inclined pipe with high gas and liquid velocities, *AIP Adv.*, 2019, vol. 9, p. 085025.
38. Edgcombe, C., Masur, S., Linscott, E., Whaley, B.J. et al., Analysis of a capped carbon nanotube by linear-scaling density-functional theory, *Ultramicroscopy*, 2019, vol. 198, p. 26.
39. Kong, R., Kim, S., Bajorek, S., Tien, K. et al., Effects of pipe size on horizontal two-phase flow: Flow regimes, pressure drop, two-phase flow parameters, and drift-flux analysis, *Experim. Therm. Fluid Sci.*, 2018, vol. 96, p. 75.
40. Bolshanin, V., Slobodyan, S., Yakovlev, A. et al., Two-channel optical transducer for an industrial inspection system, *Meas. Tech.*, 1987, vol. 30, p. 954.
41. Slobodyan, M., Shishigin, S., Slobodyan, S., Method of acoustic sensor diagnosis, *Meas. Tech.*, 2008, vol. 51, p. 798
42. Dai, H., Hafner, J., Rinzler, A., Colbert D., et al., Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature*, 1996, 384, p. 147.
43. Dutta, A., Surface damage of CuZr metallic glass by hypervelocity nano-projectile: A molecular dynamics study, *Comput. Mater. Sci.*, 2017, vol. 141, p. 41.

Summary

The impact of the inside erosion of a microelectrode on the cooling medium motion is considered in the paper. Taking into account the equation of continuity for a fluid flow inside the microelectrode channel, the analytical relation between the pressure gradient flow and the number of defects (holes and cavities) of the internal cooling surface is received. Driven by this ratio, the method of an early detection of the defect nucleation and the defect dynamics inside the microelectrode channel is proposed, and a simple analytical motion model for the cooling medium is built. The motion variables are evaluated, and an effective way to remove the soil particles from the erosion area by a medium flowing is offered. The findings are in good agreement with the studies elsewhere and experimental data of other researchers.

Keywords: variation in pressure change, numerical evaluation of mean values, surface layer, microchannel flow, nanoscale defects, carbon nanotube