



# ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО СПЕКАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ<sup>1</sup>, В. А. КОВТУН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Гомельский филиал НАН Беларуси. Беларусь. 246000, г. Гомель, ул. Кирова, 32, а

<sup>2</sup> Гомельский инженерный ин-т Мин-ва по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.  
Беларусь. 246023, г. Гомель, просп. Речицкий, 35, а. E-mail: vadimkov@vandex.ru

Представлены модельно-теоретические подходы к оптимизации структурно-технологических условий электроконтактного спекания металлополимерных покрытий. Показано, что применение методов компьютерного моделирования зон формирования порошковых композиционных материалов на принципах мезомеханического подхода с использованием структурных моделей, адаптированных к широкому диапазону значений технологических параметров и свойствам исходных компонентов порошковой системы, позволяет устанавливать закономерности влияния технологических факторов и структурных особенностей, а также характеристик исходных компонентов дисперсных порошковых систем на процессы структурообразования спеченных слоев. При этом определяющее значение имеет учет локального воздействия тепловых факторов и внутренних напряжений, возникающих в процессе формирования покрытий. Библиогр. 4, табл. 1, рис. 9.

*Ключевые слова:* электроконтактное спекание, металлополимерные композиционные покрытия, медная матрица, компьютерное моделирование, параметры спекания, структурно-технологические факторы, формирование покрытий

Перспективным направлением повышения эксплуатационного ресурса и расширения нагрузочно-скоростных режимов работы машин и механизмов является использование в узлах трения наноструктурированных углеродными нанотрубками и нанолуковицами металлополимерных композиционных самосмазывающихся материалов и покрытий на основе порошковой медной матрицы [1]. Однако введение полимерных наполнителей и наноструктур углерода известными технологическими приемами непосредственно в порошковую шихту и получение качественных материалов на основе металлической матрицы классическими методами порошковой металлургии весьма затруднено вследствие низких температур плавления и термостойкости полимеров. Решить данный вопрос позволяет метод электроконтактного спекания [2, 3], относящийся к разряду высокоскоростных и высокоэнергетических способов получения материалов и покрытий из порошковых композитов. Таким образом, его основная особенность заключается в возможности получения покрытий из порошковых материалов с различными физико-химическими свойствами.

Следует отметить, что свойства композиционных материалов с металлической матрицей обусловлены влиянием ряда факторов: свойств, количества и типа матрицы и наполнителя; вида и

характера распределения наполнителя в матрице; конструкции композита и технологии его получения; внешних воздействий. Поэтому знание закономерностей, обуславливающих наличие в композите тех или иных свойств, возможность прогнозирования и управления характером развития процессов теплопередачи и структурирования в ходе контактного взаимодействия дисперсных компонентов металлополимерных систем, особенно при высокоскоростном тепловом воздействии электрическим током, позволит рационально использовать существующие и создавать новые композиционные материалы с высоким уровнем эксплуатационных характеристик [4].

В процессе формирования структуры и свойств нанонаполненных металлополимерных порошковых покрытий возникают серьезные проблемы, связанные с тем, что и порошковые металлические матрицы, и дисперсные включения при высокоскоростном воздействии электрическим током воспринимают различные типы термонапряжений в зависимости от уровня температурного воздействия и вида тепловыделений, определяемых технологическими и структурными факторами. Такие порошковые системы целесообразно рассматривать как структурную последовательность, включающую дисперсную матрицу, зону контактного взаимодействия и дисперсный



наполнитель. Поэтому с точки зрения термомеханики адаптивных материалов исследование термонапряженного состояния наноструктурированных металлополимерных дисперсных систем при высокоскоростном воздействии электрическим током и установление закономерностей структурных превращений в зонах контактного взаимодействия металл – полимер представляется весьма сложной и нетрадиционной задачей.

**Модельно-теоретические подходы к оптимизации параметров электроконтактного спекания порошковых покрытий.** Одним из важных технологических параметров электроконтактного спекания порошковых композиций является время спекания, которое в значительной степени влияет на характер протекания процессов структурообразования в порошковых слоях и предопределяет прочностные характеристики и качественные показатели материалов. Время электроконтактного спекания металлических порошков и композиционных покрытий на их основе также оказывает значительное влияние на характер проявления в порошковом слое сопутствующих электрофизических процессов. В частности, на уровень влияния порождаемых электрическим током и возникающих в материале скин-эффекта, который заключается в вытеснении линий протекания электрического тока на поверхность токопроводящего элемента и может приводить к преимущественному спеканию порошка на периферии порошкового слоя, а также пинч-эффекта, который может приводить к искажению формы поверхности порошкового слоя. При этом во время выделения энергии при прохождении электрического тока через порошковую систему возможно возникновение ударных волн и их диссипация. В связи с этим оптимизация и установление эффективного времени спекания порошковых композиций, обеспечивающего достижение температур спекания порошковой системы и заданных прочностных характеристик металлической матрицы, представляются весьма важными при разработке технологии формирования композиционных порошковых покрытий электроконтактным спеканием.

Для установления оптимального времени спекания порошковых тонкослойных покрытий, учитывающего характер влияния некоторых указанных выше факторов, проведено модельно-теоретическое исследование протекающих физи-

ческих процессов. Для этого была разработана методика моделирования стадий прохождения электрического тока через мезофрагмент насыпного порошкового слоя меди и разработаны компьютерные структурные модели зон контактного взаимодействия электроды – порошковый слой, описывающие тепловое и напряженно-деформированное состояния материалов при приложении внешних воздействий, а также позволяющие наблюдать в реальном масштабе времени развитие электродинамических и тепловых процессов в мезофрагментах порошкового слоя, формируемого электроконтактным спеканием.

Исследования проведены для случая формирования покрытия с толщиной насыпного слоя 300 мкм из медного порошка марки ПМС-1 с размером частиц 100 мкм на поверхность медной подложки при помощи электродов, изготовленных из меди марки М1, когда плотность электрического тока составляет 400 А/мм<sup>2</sup>. Алгоритм решения поставленной задачи заключается в следующем: составление содержательного описания модели с обоснованием объекта исследования и уточнением связей компонентов системы; формализация модели; программирование модели с обоснованием выбора средств; испытания модели и получение достоверных результатов. В таблице приведены физические характеристики материалов, необходимые для моделирования. Температурный коэффициент сопротивления для меди соответствовал значению 0,0068 град<sup>-1</sup>, а коэффициент теплоотдачи для нагретых поверхностей при скорости воздушного потока для закрытых помещений 0,2 м/с составлял 5,2 Вт/м<sup>2</sup> град.

В общем случае при пропускании электрического тока через порошковый слой можно весь процесс разложить на некоторое количество стадий и рассматривать спекание порошкового материала на каждой стадии как отдельный процесс, исходными расчетными параметрами которого являются конечные расчетные параметры предыдущего этапа.

Большое значение при электроконтактном спекании имеет его первая стадия, длительность которой составляет до 0,3 с. При приложении разности потенциалов к спекаемому порошковому слою происходит резкое нарастание тока. Время, в течение которого происходит нарастание тока, не зависит от формы и площади поперечного сечения

**Свойства элементов расчетной модели мезофрагмента зоны электроконтактного спекания порошкового слоя**

Элементы модели	Материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(К·м)	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(кг·К)	Удельное электросопротивление $\rho$ , Ом·м	Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>
Электрод	Медь М1	390	$0,38 \cdot 10^3$	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$8,93 \cdot 10^3$
Порошок	Медь ПМС-1	365	$0,39 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$7,2 \cdot 10^3$
Оксидный слой	Cu <sub>2</sub> O	1,013	$0,429 \cdot 10^3$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^3$
Поры	Воздух	0,027	$1,009 \cdot 10^3$	–	1,293

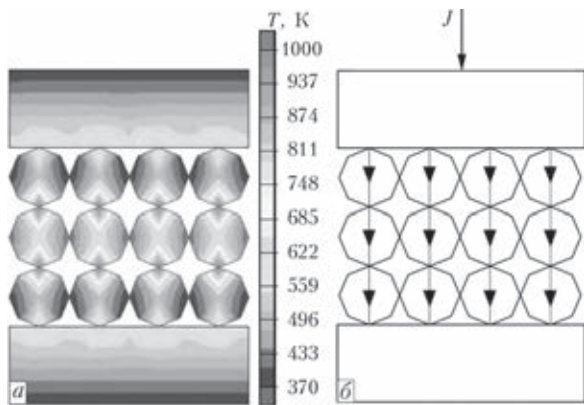


Рис. 1. Результаты моделирования (а) и схема прохождения электрического тока (б) на первой стадии процесса электроконтактного спекания порошкового медного слоя при времени спекания 0,3 с

прессовки, но в то же время зависит от ее высоты: с увеличением высоты увеличивается время нарастания. Однако необходимо отметить, что время нарастания тока значительно уменьшается при увеличении прикладываемого усилия и подводимого напряжения.

Характерной особенностью первой стадии является преимущественное тепловыделение на межчастичных контактах, обусловленное прохождением тока через поверхностные слабо проводящие слои (рис. 1, а).

Следует отметить, что при этом возможно образование искрения. На первой стадии электрический ток протекает параллельно линиям напряженности электрического поля, образуя при этом отдельные цепочки (рис. 1, б). При этом ток в каждой цепочке имеет примерно одинаковое значение. Таким образом, необходимо отметить, что в начале процесса спекания отсутствует значительный нагрев самих частиц, а преимущественное тепловыделение происходит на контактном сопротивлении. Средняя температура порошкового слоя на первой стадии не превышает 573...623 К. В

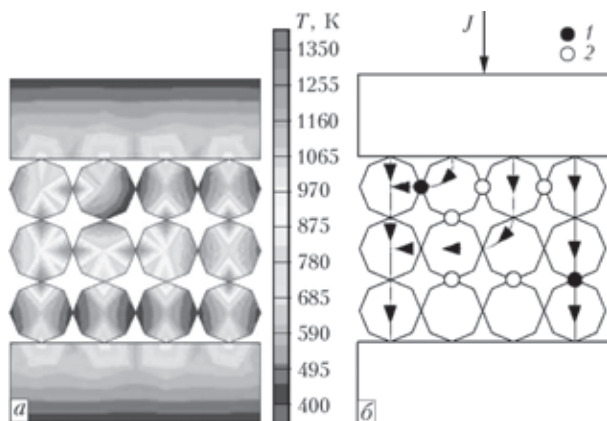


Рис. 2. Результаты моделирования (а) и схема прохождения электрического тока (б) на первом этапе второй стадии процесса электроконтактного спекания порошкового медного слоя при времени спекания 0,4 с: 1, 2 – контакты, в которых металл находится соответственно в твердо-жидком и жидком состоянии

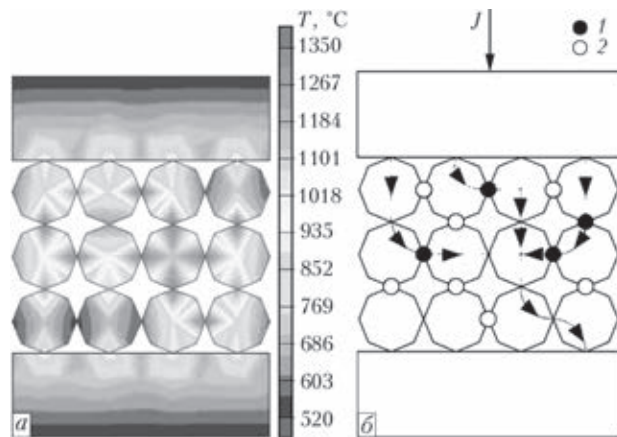


Рис. 3. Результаты моделирования (а) и схема прохождения электрического тока (б) на втором этапе второй стадии процесса электроконтактного спекания порошкового медного слоя при времени спекания 0,5 с (обозначения 1, 2 — те же, что и на рис. 2)

случае, если интенсивность тепловыделения при прохождении тока через порошковый слой превышает количество тепла, затрачиваемого на нагрев металла в зоне контактного взаимодействия частиц в твердой фазе до температуры плавления, а также на конвективный теплообмен с окружающей средой и теплопередачу в электроды, то часть металла может переходить в жидкое состояние.

На второй стадии благодаря нагреву, происходящему при пропускании электрического тока, согласно закону Джоуля–Ленца, температура контактных поверхностей частиц порошкового материала значительно превышает температуру самих частиц и достаточна для плавления оксидной пленки и части металла. Быстрое выделение большого количества тепловой энергии вблизи межчастичного контакта может привести к отколу мельчайших частиц, находящихся в твердой фазе. Однако данное явление не оказывает большого влияния на процесс спекания. При плавлении оксидного слоя и незначительной части металла, находящегося в контактном взаимодействии, отталкивающие силы, возникшие в результате теплового расширения, уменьшаются более чем в 10 раз. В результате плавления части металла возникают жидкометаллические мостики. Необходимо отметить, что удельное электрическое сопротивление жидкой меди в несколько раз превышает удельное электрическое сопротивление твердой меди. В частности, при нагреве меди до 970 °С удельное электрическое сопротивление повышается до  $9,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. При повышении температуры, снижении давления и, как следствие, повышении электрического сопротивления в контакте частиц происходит потеря устойчивости и деструкция жидкометаллических мостиков, что неизбежно ведет к изменению пути прохождения электрического тока по порошковому слою, ахождение тока осуществляется через нерасплав-

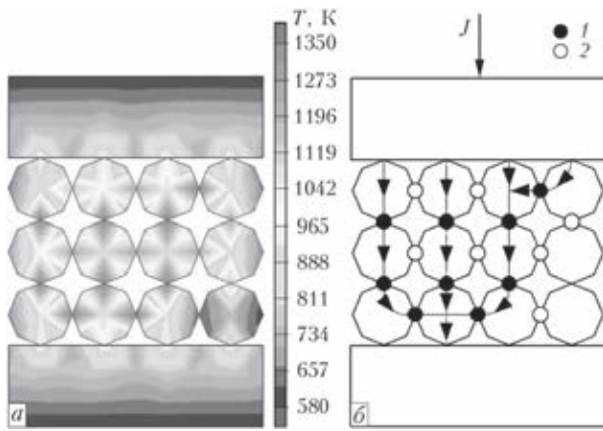


Рис. 4. Результаты моделирования (а) и схема прохождения электрического тока (б) на третьем этапе второй стадии процесса электроконтактного спекания порошкового медного слоя при времени спекания 0,6 с (обозначения 1, 2 — те же, что и на рис. 2)

ленные контакты, которые имеют более низкое сопротивление. Таким образом, происходит возникновение подобных жидкометаллических мостиков на других контактах частиц порошка.

Длительность второй стадии длится, начиная с 0,3 с и заканчивается на 0,6 с. При этом результаты компьютерного моделирования показали, что средняя температура в порошковом слое на данной стадии превышает 623 К. Так как вторая стадия электроконтактного спекания порошкового материала характеризуется большим числом изменений путей прохождения электрического тока, то при моделировании ее необходимо разложить на несколько этапов.

Пути прохождения линий электрического тока и модель теплового состояния мезофрагмента зоны электроконтактного спекания порошкового слоя на первом этапе второй стадии спекания

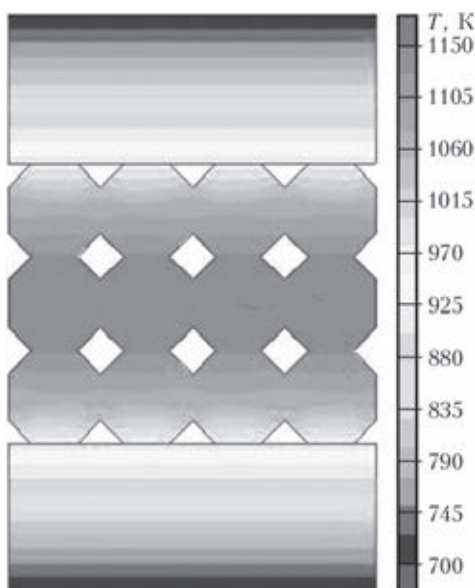


Рис. 5. Модель совмещенного теплового и деформированного состояния, сформированного электроконтактным спеканием порошкового медного слоя по истечении времени спекания 1,2 с при воздействии на мезофрагмент сжимающей нагрузки 150 Н

представлены на рис. 2, на втором этапе второй стадии спекания — на рис. 3, на третьем этапе второй стадии спекания — на рис. 4.

На представленных моделях видно, что пути прохождения электрического тока с увеличением времени спекания захватывают все контакты, подплавляют их, способствуя тем самым соединению частиц меди и спеканию порошковой системы. При этом результаты компьютерного моделирования теплового состояния медного порошкового слоя в процессе электроконтактного спекания показали удовлетворительную корреляцию с результатами экспериментальных исследований. После прохождения тока через межчастичные контакты их плавление сопровождается повышением электрического сопротивления и описанный выше процесс повторяется вновь до плавления всех частиц металла либо до прекращения подачи тока. Металл на контактных участках частиц переходит в расплавленное или сильно размягченное состояние. Частицы порошковой системы начинают незначительно смещаться друг относительно друга, что ведет к уплотнению композиционного материала.

В результате описанных выше процессов образуется незначительное количество жидкой фазы и интенсивное спекание порошковой системы. Необходимо отметить, что на заключительной третьей стадии, которая начинается на 0,6 с и заканчивается на временном диапазоне порядка 1,1...1,3 с происходит повышение средней температуры порошковой системы, которая достигает значений до 1073...1123 К, что соответствует уровню температур спекания медной матрицы. На данной стадии также происходит завершение процессов уплотнения порошкового слоя посредством пластической деформации (рис. 5). При повышении давления в порошковой системе путем подачи усилия на электрод происходит возрастание напряжения в частицах и их упругое деформирование. После достижения напряжений в частицах, превышающих предел текучести материала, происходит их пластическое деформирование. Материал частиц стремится заполнить исходное межчастичное поровое пространство. Как следствие повышается плотность материала. В то же время при увеличении контактной поверхности происходит снижение контактного сопротивления между частицами. При этом в порошковом слое происходит снижение эквивалентных напряжений по Мизесу, максимальные значения которых составляют порядка 112...156 МПа. В результате воздействия электрическим током и приложения давления формируется металлическая медная матрица, имеющая относительную плотность 80...90 %. Необходимо отметить, что



с уменьшением геометрических размеров частиц спекаемой порошковой системы сопротивление прессовки увеличивается. Данное явление можно объяснить тем, что с увеличением количества компонентов системы определенного объема увеличивается прямо пропорционально количество электрических контактов, вследствие чего снижается проводимость порошкового слоя.

На рис. 6 представлены зависимости температуры порошкового слоя, полученные в результате компьютерного моделирования теплового состояния зоны электроконтактного спекания порошкового медного слоя с применением разработанной структурной модели, учитывающей структурные особенности формируемого порошкового композита, а также в результате экспериментальных исследований. Определение температуры в порошковом слое проводили на специально разработанном рабочем макете установки при ее совместном использовании с машиной контактной шовной сварки МШ-3207 в режиме точечного спекания. Нагрузка на порошковый слой меди осуществлялась только под действием силы тяжести электрода. Регистрация температуры в зоне спекания осуществлялась с помощью хромель-алюмелевой термопары на электронном потенциометре Мемограф с автоматической обработкой сигналов, оснащенного интерфейсом RS485 для параметрирования и переноса данных в компьютер.

Как видно, разница между значениями температур, полученными в результате экспериментальных исследований и компьютерного моделирования, во всем диапазоне изменения времени спекания не превышает 10...15 %, что можно считать достаточно приемлемым в случае формирования порошковых слоев данным высокоскоростным методом электроконтактного спекания.

**Модельно-теоретическое описание влияния структурно-технологических факторов на тепловое состояние зоны формирования металлополимерных порошковых покрытий на основе меди в процессе электроконтактного спекания.** В процессе электроконтактного спекания порошковых металлополимерных систем особую значимость приобретают вопросы теоретического описания и исследования процессов переноса и распространения тепла в зонах формирования покрытий. При этом необходимо учитывать, что быстрое выделение тепловой энергии вблизи межчастичного контакта вследствие прохождения электрического тока, и особенно, когда между смежными металлическими частицами имеются диэлектрические пространства (воздух, диэлектрический наполнитель, оксидная пленка и т.д.), может приводить к возникновению разнообразных явлений, определяемых электрическими,

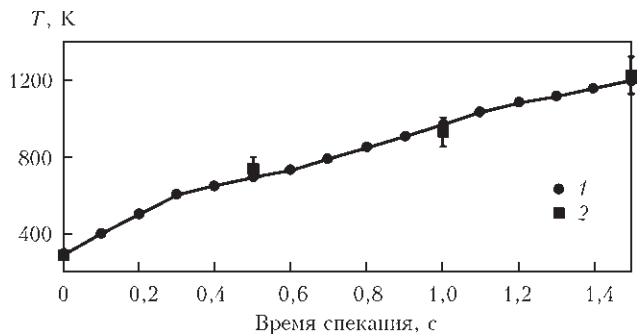


Рис. 6. Зависимости температуры в порошковом слое от времени спекания при воздействии электрическим током: 1 — результаты компьютерного моделирования; 2 — экспериментальные значения

теплофизическими и механическими характеристиками компонентов. Вызывает также научный интерес исследование теплового состояния электродов-пуансонов, поскольку на процессы распространения тепла в них значительно влияют размеры площади контакта со спекаемым материалом и природа порошковой композиционной системы. Необходимо также отметить, что теоретическое описание, исследование и анализ полей распределения температур, градиента температур и тепловых потоков, а также получение корректных результатов исследований позволяют оптимизировать и прогнозировать распределение температур, тепловых потоков и градиента температур внутри композиционного металлополимерного порошкового материала при изменении структурно-технологических условий.

В связи с указанным выше была решена компьютерная плоскопараллельная задача стационарной теплопередачи при электроконтактном спекании металлополимерных порошковых систем с медной матрицей, когда температура между двумя электродами и в зоне спекания достигает 1073 К, т.е. температуры спекания медного порошка.

Рассмотрим распределение температурных полей в зоне формирования порошкового слоя при схеме спекания, когда два электрода находятся в контакте со всей спекаемой поверхностью материала — композиции медного порошка и 10, 20 и 50 об. % ПТФЭ, равномерно распределенного в металлической матрице (рис. 7).

Результаты моделирования показали, что наибольший нагрев электродов наблюдается при спекании композиции, содержащей 10 об. % ПТФЭ (рис. 7, а), слабее при спекании композита, содержащего 20 (рис. 7, б) и 50 об. % (рис. 7, в). Видно также, что медные частицы, не контактирующие с полимером, полностью прогреваются до температур 1073 К, т.е. до технологической температуры спекания. Поверхностная область верхнего электрода, который не контактирует с частицами ПТФЭ, также прогрет сильнее, чем нижний электрод, где наблюдается разрыв изотерм. При этом

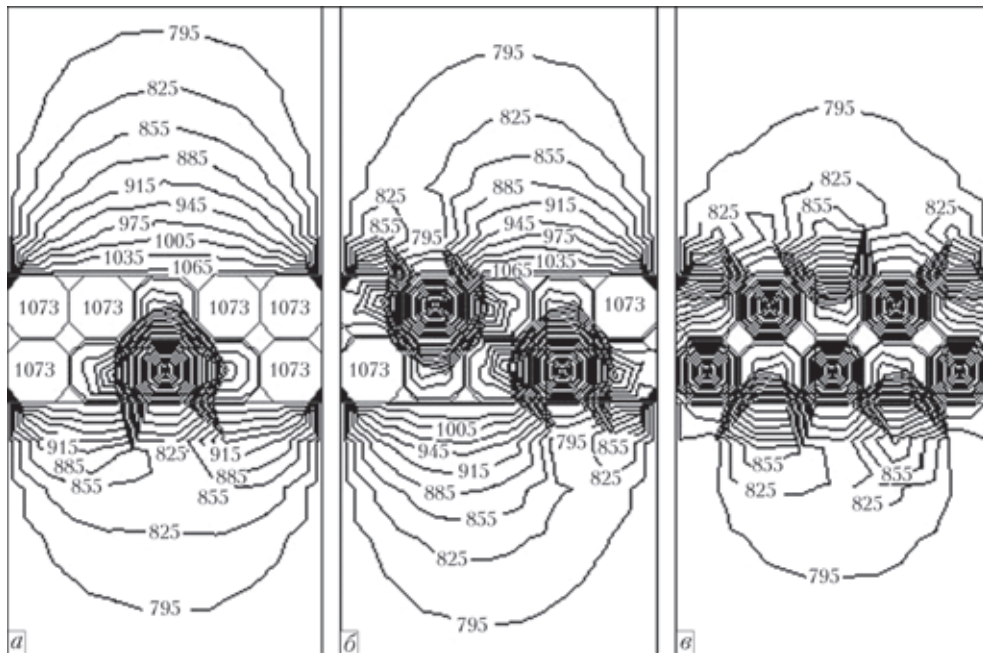


Рис. 7. Модели распределения температурных полей в мезофрагментах зон электроконтактного спекания металлополимерного порошкового слоя при различной степени наполнения медной матрицы частицами ПТФЭ: *а* — 10 об.%; *б* — 20; *в* — 50

уровень температурных полей в нижнем электроде в зоне контакта с полимерной частицей ПТФЭ меньше, чем в зоне контакта электрода с медными частицами на 10...15 %. Разрыв изотерм в электродах наблюдается и при наличии в зоне спекания 20 об. % полимерных частиц ПТФЭ (рис. 7, *б*). Медные частицы, контактирующие с полимерными частицами, также имеют меньшую температуру по сравнению с частицами, не контактирующими с частицами ПТФЭ. Как видно, при увеличении содержания полимерного наполнителя в металлической порошковой матрице снижается температурная нагруженность в центральной части зоны спекания металлополимерного материала с одновременным смещением участков температурного равновесия электродов к периферийным областям.

При нахождении в зоне спекания равного количества медных и полимерных частиц (рис. 7, *в*) наблюдается определенная температурная стабилизация в порошковом металлополимерном композиционном слое, значительное снижение прогрева обоих электродов, увеличение количества зон разрыва изотерм, но недостаточный нагрев медных частиц для качественного спекания металлической матрицы.

Механизмы тепловыделения и распространения тепла в объеме металлополимерной порошковой системы и особенно на границах дисперсный металл – дисперсный полимер оказывают существенное влияние на процессы структурообразования композиционных порошковых покрытий. Из-за кратковременности процесса электроконтактного спекания очень трудно оценить экспериментальными методами характер распростране-

ния тепловых потоков как в объеме порошковых металлополимерных систем, так и на границах раздела дисперсный металл – дисперсный полимер распределение температурных полей и температурных градиентов. Вместе с тем исследование и установление закономерностей процессов теплопередачи в таких порошковых системах является достаточно важным на стадии их разработки.

Для оценки свойств порошковых композиционных материалов данного класса, в частности, в зонах контактного взаимодействия полимер – металл, которые наиболее подвержены перепаду температур между токопроводящими медными частицами и токонепроводящими частицами полимера, были использованы подходы структурного моделирования с применением конечноэлементной дискретизации. На рис. 8 представлены модели распределения температурных полей в области исследования мезофрагмента зоны формирования металлополимерной порошковой системы при различном времени воздействия электрическим током в процессе электроконтактного спекания. Необходимо подчеркнуть, что особенностью данной задачи является учет времени нахождения композиционной порошковой системы в зоне спекания, т.е. решена задача нестационарной теплопередачи. В соответствии с полученными ранее данными принято, что время воздействия электрическим током на металлополимерную порошковую систему в зоне электроконтактного спекания составляет от 0,3 до 1,2 с. Сила тока, подводимая к источнику выделения тепла, составляет 12 кА.

Детальный анализ полученных результатов позволил установить следующее. Рассматривая случай нагрева, когда время спекания составляет

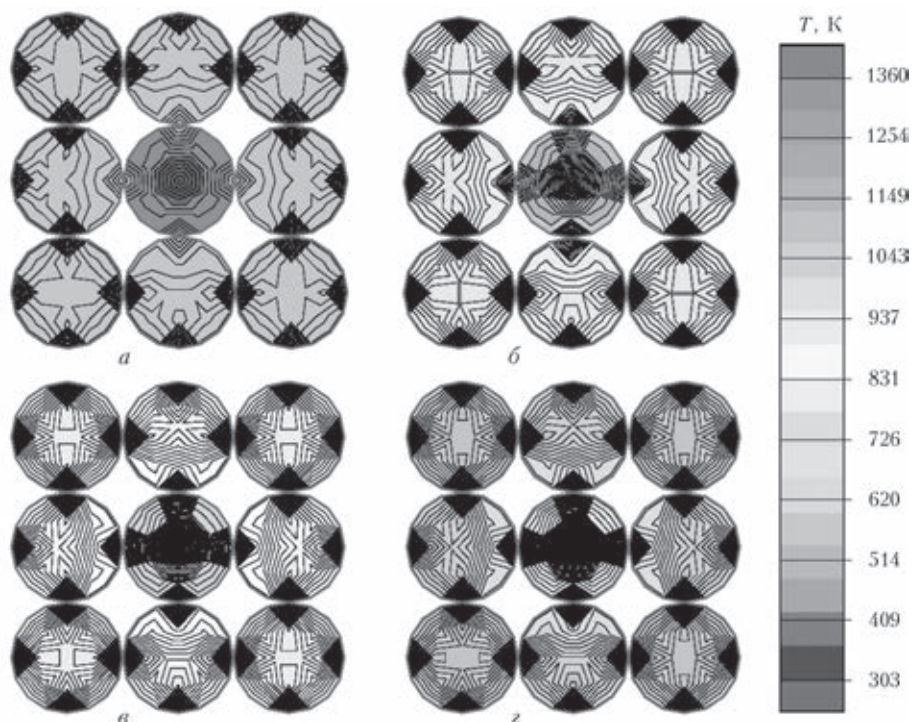


Рис. 8. Модели распределения температурных полей в зоне контактного взаимодействия медь — ПТФЭ при разном времени спекания: *a* — 0,3 с, *б* — 0,6, *в* — 0,9; *з* — 1,2

0,3 с, температура в контактных зонах между металлическими частицами металлополимерной порошковой системы достигает 623 К (рис. 8, *a*), а на остальной поверхности медных частиц в исследуемом мезофрагменте от 601 до 623 К.

По мере удаления от поверхности частиц меди к их центру происходит сглаживание изотерм. В областях контакта частиц меди наблюдается сгущение и локализация большого количества изолиний, что подтверждает наблюдаемое характерное снижение температуры в данной области до 530 К на расстоянии 25 мкм от поверхности медной частицы к её центру. В области контактного взаимодействия частица меди — частица ПТФЭ видно, что при удалении от поверхности контакта к центру полимерной частицы температура снижается с 440 до 390 К, в то время как температура в медной частице увеличивается от 440 до 495 К при рассмотрении зоны удаления от точки контакта на 25 мкм. При этом существенное воздействие на уровень теплового состояния периферийных участков дисперсных частиц оказывает наличие пор в рассматриваемом мезофрагменте.

При увеличении времени спекания до 0,6 с наблюдается повышение уровня омического нагрева металлополимерной порошковой системы. При этом температура в зонах контактного взаимодействия медь — медь составляет порядка 923 К (рис. 8, *б*), а на остальной поверхности медных частиц от 770 до 912 К. Изменение температурного состояния в медных частицах, не контактирующих с частицей ПТФЭ, происходит в направлении

от их поверхности к центру таким образом, что температура на расстоянии 25 мкм от её поверхности составляет около 695 К. В области контактного взаимодействия частица меди — частица полимера наблюдается снижение температуры с 584 до 495 К в направлении от контактной поверхности к центру полимерной частицы. В то же время в медной частице наблюдается противоположная картина, характеризующаяся повышением температуры от 589 до 695 К при рассмотрении зоны удаления от точки контакта на 25 мкм.

В случае нагрева металлополимерной порошковой системы в течение 0,9 с температура в зонах контактного взаимодействия металл — металл составляет 1223 К (рис. 8, *в*), а на поверхности медных частиц от 736 до 1111 К. При удалении от поверхности к центру медных частиц, не контактирующих с частицей полимера, температура снижается, достигая значения 934 К на радиальном расстоянии 25 мкм. В области контактного взаимодействия частица меди — частица полимера видно, что при удалении от контактной поверхности к центру полимерной частицы температура снижается до 553 К, в то время как в медной частице наоборот повышается до 896 К при рассмотрении зоны удаления от точки контакта на 25 мкм.

При достижении температуры омического нагрева порошковой системы до 1356 К, что обеспечивается временем спекания 1,2 с (рис. 8, *з*), медные частицы прогреваются практически равномерно по всей площади до температуры спекания, соответствующей 1073 К, а в точках кон-

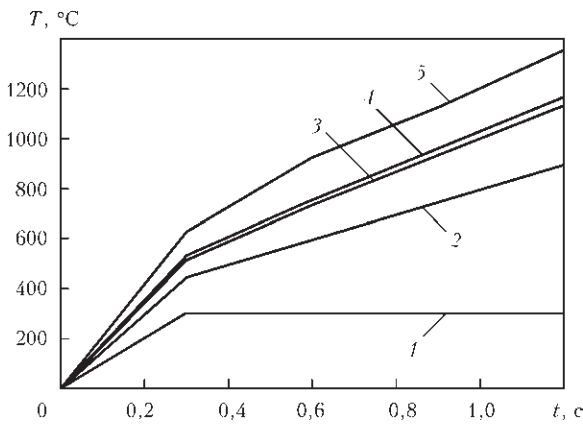


Рис. 9. Зависимости влияния времени электроконтактного спекания металлополимерной порошковой системы на изменение температуры в характерных точках композиции: 1 — центр частицы ПТФЭ; 2 — точка контакта медь — ПТФЭ; 3, 4 — центр медной частицы соответственно контактирующей с частицей ПТФЭ и не контактирующей; 5 — точка контакта медь — медь

тактного взаимодействия дисперсных частиц меди наблюдаются участки локального нагрева до температуры плавления. Также установлено, что превышение температуры термоокислительной деградации полимера наблюдается в локальных областях их контактного взаимодействия с медными частицами на радиальном расстоянии, не превышающем 18...20 мкм от поверхности частицы ПТФЭ к их центру.

На основании полученных результатов модельно-теоретических исследований построены зависимости, характеризующие влияние времени электроконтактного спекания на изменение температуры в характерных точках мезофрагмента порошковой металлополимерной системы (рис. 9).

В заключение следует отметить, что предложенный модельно-теоретический подход позволяет разрабатывать компьютерные структурные модели зон контактного взаимодействия электроды — порошковый слой, описывающие тепловое и напряженно-деформированное состояние материалов при приложении внешних воздействий (плотность электрического тока и усилие сжатия электродов) в условиях нестационарной теплопередачи, отличающиеся от существующих возможностью учета влияния времени электроконтактного спекания, контактного взаимодействия поверхностей и особенности структуры частиц порошкового слоя (наличие оксидного слоя и порового пространства) на формирование температурных полей, деформации компонентов, распределение температуры, термо- и механические напряжения. На основе такого подхода и проведенного комплекса исследований оптимизировано с учетом экспериментальной корреляции время нахождения порошковой системы в зоне спека-

ния при электроконтактном воздействии для заданных технологических условий формирования порошковых металлополимерных наноструктурированных покрытий с толщиной насыпного слоя 300...500 мкм, составляющее 1,1...1,3 с, обеспечивающее достижение температуры спекания металлической медной матрицы 1073...1123 К, а при одновременном воздействии заданной нагрузкой — завершение процессов уплотнения насыпного порошкового слоя посредством пластической деформации и снижение эквивалентных напряжений по Мизесу в сформированном порошковом покрытии толщиной 90...100 мкм до уровня значений 112...156 МПа.

Впервые показано, что при формировании покрытий электроконтактным спеканием, когда температура достигает значений, обеспечивающих экстремальные условия теплового омического нагрева и теплопередачи в порошковой металлополимерной системе, температура в диаметральном сечении медных частиц снижается в 1,4...1,5 раза, в то время как температура в диаметральном сечении полимерных частиц снижается в 2,8...3,0 раза. Установленный эффект способствует «эстафетному» развитию процессов теплопередачи с возникновением локальных термонапряжений в зонах физического контакта металл — полимер и концентрированию тепловой энергии в поверхностном слое дисперсных полимерных частиц и благодаря низким по сравнению с частицами металлической матрицы значениям теплопроводности частиц полимерного наполнителя, а также высокой (800...900 °C/с) скорости нагрева порошковой композиционной системы и кратковременности процесса спекания (порядка 1,1...1,3 с) происходит перенаправление распространения тепловых потоков, что в совокупности снижает термонапряженность на границе раздела дисперсный полимер — дисперсный металл, вследствие чего процессы термоокислительной деградации практически не развиваются по направлению к центру частиц полимеров.

1. Пасовец В. Н., Ковтун В. А., Плескачевский Ю. М. Получение, свойства и безопасность композитов на основе порошковых металлов и наноструктур углерода. — Гомель: БелГУТ, 2011. — 200 с.
2. Yu. M. Pleskachevsky, V. A. Kovtun, Yu. E. Kirpichenko. Tribological coatings formed by electrocontact sintering of powder systems // Wear. — 1997. — **203–204**. — P. 679–684.
3. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. — М.: Металлургия, 1987. — 128 с.
4. V. A. Kovtun, T. V. Semenova, M. Mihovski. Research of influence of thermal state of metal-polymer powder coatings during electrocontact sintering on their tribological behavior and structure // J. Mater. Sci. and Technol. — 2006. — **14**, № 3. — P. 159–172.

Поступила в редакцию 28.02.2013