

клеевого шва [2]. Это особенно актуально для оценки свойств зазорозаполняющих клеевых композиций, широко применяемых при сборке изделий авиационной техники. В настоящее время в ОКБ Сухого проводится экспериментальная работа по оценке влияния толщины клеевого шва, выполненного с использованием зазорозаполняющего клея [3], на прочность соединения эпоксипластиков. Некоторые результаты представлены в таблице.

Зависимость результатов предела прочности при сдвиге методом изгиба от толщины клеевой прослойки

Толщина клеевого шва, мм	Предел прочности при сдвиге, МПа
0,2	9,2
1,0	5,4
1,3	6,1

Необходимо обратить внимание на адгезионный характер разрушения образцов, по которым представлены результаты испытаний. Таким образом, имеется резерв по повышению прочности клеевых соединений за счет организации когезионного механизма разрушения (улучшение сочетаемости компонентов, подготовка поверхности и др.).

Л и т е р а т у р а

1. Выбор конструктивно-технологических параметров при ремонте авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / Ф. А. Насонов, Б. Б. Морозов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2014. – № 12. – С. 11–16.
2. Influence of adhesive bond line thickness on joint strength of composite aircraft structures / V. Kostin, F. Nasonov, A. Zinin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – N 19. – P. 012070. DOI 10.1088/1742-6596/1925/1/012070
3. Mode of access: <https://itecma.ru/products/klei-i-kleevye-plenki/temperatura-ekspluatatsii-do-180-s/50/>. – Date of access: 27.08.2022.

УДК 621.891:620.22

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНОЙ МИКРОРАЗМЕРНОЙ МЕДНОЙ МАТРИЦЫ И НАНОРАЗМЕРНОГО УГЛЕРОДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун

*Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты*

*Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,
г. Минск*

Разработана теоретическая модель формирования структуры порошковых композиционных материалов на основе дисперсной микроразмерной медной матрицы и наноразмерного углеродного наполнителя, основанная на рассмотрении протекающих физических процессов структурообразования на технологических стадиях активирования, уплотнения, упругого и пластического деформирования, спекания. Модель учитывает форму, размеры и свойства исходных дисперсных компонентов различного структурного уровня и позволяет прогнозировать прочностные и теплофизические характеристики композитов, получаемых с использованием методов механоактивации, прессования и электроконтактного спекания.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, медь, порошковые композиционные материалы, теоретическая модель.

THEORETICAL MODEL OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON A DISPERSED MICROSIZED COPPER MATRIX AND A NANOSIZED CARBON FILLER

V. N. Pasovets, V. A. Kovtun

State Educational Institution "University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus", Minsk

A theoretical model of the formation of the structure of powder composite materials based on a dispersed microsized copper matrix and a nanosized carbon filler has been developed. This model is based on the consideration of the physical processes of structure formation at the technological stages of activation, compaction, elastic and plastic deformation, and sintering. This model takes into account the shape, size and properties of the initial dispersed components. This model makes it possible to predict the strength and thermal characteristics of the obtained composites.

Keywords: carbon nanotubes, copper, powder composite materials, theoretical model.

В широкой номенклатуре машиностроительных композитов особое место занимают порошковые материалы, в состав которых введены наполнители с наноразмерными частицами [1]. Данные материалы по устоявшейся терминологии относят к нанокompозитам. При этом наиболее часто в качестве наноструктурного наполнителя применяют углеродные нанотрубки (УНТ). Формирование структуры и свойств таких композиционных материалов происходит постадийно. Основными стадиями при этом являются активирование, уплотнение, упругое и пластическое деформирование, спекание. Цель работы состояла в теоретическом описании процесса формирования структуры и свойств композиционных материалов на основе медной порошковой матрицы и УНТ.

Стадия активирования. На стадии активирования выполняется предварительная подготовка порошковой смеси, состоящей из микро- и наноразмерных компонентов. Для распределения наноструктур углерода в металлической матрице обоснованным является использование методов механоактивации [2]. Замена процесса смешивания механоактивацией препятствует сегрегации УНТ и их последующей повторной агломерации. При этом процесс механоактивации исходных компонентов характеризуется геометрическими параметрами активатора, частотой вращения и коэффициентом заполнения его рабочей камеры.

Немаловажную роль в процессе внедрения наночастиц в поверхностный слой материала играет длительность механоактивации. Чем больше время механоактивации при постоянных параметрах и энергии, подводимой к порошковой смеси, тем более интенсивно происходит насыщение поверхностного слоя частиц меди наночастицами, что способствует улучшению физико-механических свойств материала. Результаты проведенных исследований показали, что оптимальное время обработки составляет около 60 мин. При более длительной механической обработке прочность композиционного порошкового материала снижается, а его пористость увеличивается, что, вероятно, связано с нарушением однородности системы, заключающемся в разрушении частиц меди, выходе наноструктурного наполнителя из междендритного пространства с одновременным образованием агломератов УНТ [3].

Стадия уплотнения. Засыпанная в пресс-форму предварительно подготовленная порошковая смесь имеет хаотическое расположение частиц. При этом частицы порошка могут образовывать пустоты, мостики и арки, препятствуя тем самым плотной укладке.

При приложении внешнего давления происходит свободное перемещение частиц и разрушение арок, что ведет к уплотнению материала от насыпной плотности, составляющей для медной матрицы на основе порошка ПМС-1 ГОСТ 4960–2017 15–25 % плотности компактного материала, до плотности, соответствующей 45–50 % плотности компактного материала. Данная стадия характеризуется переукладкой порошковых частиц, что сопровождается уменьшением размеров порового пространства, изменением количества контактов, образовавшихся при засыпке порошковой смеси, разрушением мостиков и арок. После снятия нагрузки прессовка превращается в слабо связанное кластерное тело [4].

Стадия упругого деформирования. Нарастание давления прессования ведет к изменению структуры материала от высокопористой к более плотной за счет взаимного перемещения частиц матрицы. Протекание процессов переукладки, сопровождающихся скольжением металлических частиц с высоким коэффициентом трения (коэффициент трения пары «медь – медь» $f \approx 0,6–1$), значительно облегчается за счет наличия наноструктур углерода, обладающих коэффициентом трения менее 0,1. В процессе трения частиц матрицы частично разрушаются окисные пленки, обнажается металл матрицы, из неметаллических контактов между частицами матрицы формируются металлические контакты.

При повышении давления прессования рост плотности композита происходит монотонно. На данной стадии полностью завершается перекладка частиц матрицы и наполнителя, уменьшение размеров пор замедляется.

Дальнейшее нарастание давления прессования ведет к уменьшению порового пространства за счет упругой деформации металлических частиц и пластической деформации областей контактного взаимодействия частиц матрицы. Однако на данной стадии препятствием для образования прочных металлических контактов являются не полностью разрушенные окисные пленки, которыми изначально покрыты металлические частицы матрицы.

Данная стадия процесса прессования характеризуется тем, что частицы порошка, упакованные максимально плотно, оказывают определенное сопротивление сжатию, давление прессования возрастает, а плотность порошкового тела при этом практически не увеличивается. Относительная плотность формируемого материала в конце данной стадии составляет 50–60 %.

Стадия пластического деформирования. Стадия характеризуется преимущественно пластическим деформированием частиц микроразмерной металлической матрицы, которое изначально происходит в зонах контактного взаимодействия частиц, где напряжения достигают значений, соответствующих пределу текучести материала. На локальных участках могут происходить процессы схватывания. При этом структурообразование сопровождается выделением тепла.

На данной стадии частицы металлической матрицы интенсивно деформируются, композиционный материал уплотняется, увеличивается площадь металлических контактов, происходит внедрение наноразмерных частиц наполнителя в поверхность микроразмерных частиц матрицы, а также рост напряжений внутри наноструктур углерода. Относительная плотность в конце данной стадии составляет 70–80 %.

Стадия спекания. При пропуске электрического тока через предварительно спрессованную порошковую систему, находящуюся под давлением, уплотнение про-

текает по механизму пластического течения. При этом изначально выделение джоулева тепла, обусловленное протеканием тока через порошковый материал, преимущественно наблюдается на межчастичных контактах. Протекающий электрический ток образует отдельные цепочки. С течением времени происходит увеличение контактной поверхности за счет образования новых контактных участков при вращении и перемещении частиц матрицы, находящихся под действием давления и тока. Резкое выделение большого количества тепловой энергии, размягчение и деформация частиц порошковой матрицы под действием прилагаемых усилий создают условия для преимущественной ориентации УНТ в пространстве. Итогом вышеописанных процессов является образование незначительного количества жидкой фазы и интенсивное спекание порошковой системы с плотной упаковкой, а следовательно, с низкой пористостью. На стадии спекания формируется структура композиционного материала, имеющая относительную плотность 96–98 %.

Таким образом, разработана теоретическая модель формирования структуры порошковых композиционных материалов на основе дисперсной микроразмерной медной матрицы и наноразмерного углеродного наполнителя. Показано, что процесс получения порошковых композиционных материалов на основе микроразмерной металлической матрицы, модифицированной наноструктурами углерода, состоит из пяти стадий: активирования – характеризующейся протекающими процессами деагломерирования наноструктурного наполнителя с последующим его распределением в матрице; уплотнения – определяющей перемещением частиц и разрушением локальных дефектов первоначальной укладки; упругого деформирования – отличающейся нарастанием напряжений внутри компонентов материала; пластического деформирования – характеризующейся возникновением интенсивных пластических деформаций металлических частиц матрицы; спекания – характеризующейся резким нарастанием температуры, возникновением преимущественной ориентации углеродных нанотрубок и образованием жидкой фазы [5].

Литература

1. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / П. А. Витязь [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя, К. А. Солнцева. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 283 с.
2. Research of the interaction energy of carbon nanotubes in the agglomeration process / V. Kovtun [et al.] // International Journal “NDT Days”. – 2020. – Vol. 3, iss. 2. – P. 72–79.
3. Пасовец, В. Н. Технологические особенности введения наноразмерных компонентов в порошковые композиты на основе меди / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 1. – С. 47–55.
4. Пасовец, В. Н. Модель процесса получения нанокomпозиционного материала / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов : материалы 8-й Междунар. конф., Москва, 19–22 нояб. 2019 г. / Ин-т металлов и материаловедения им. А. А. Байкова ; редкол.: О. А. Банных [и др.]. – М., 2019. – С. 746–747.
5. Пасовец, В. Н. Износостойкость наноструктурированных металлополимерных самосмазывающихся порошковых композитов / В. Н. Пасовец, В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 154–160.