

УДК 669.018.95

*В.М. Серпова¹, Д.В. Косолапов¹, А.Н. Жабин¹, А.А. Шавнев¹***МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-8-8

Реализация новых проектов в различных отраслях промышленности требует решения новых задач, одной из которых является создание перспективных материалов, обладающих повышенными рабочими характеристиками. К таким материалам относятся металлические волокнистые композиционные материалы, неотъемлемым этапом при создании которых является разработка технологий их изготовления. Технологическая схема изготовления металлических волокнистых композиционных материалов влияет на формирование их структуры и свойств. Поэтому необходимо правильно выбрать метод формирования полуфабрикатов для их изготовления, который обеспечивает изоляцию между волокнами слоем матричного материала, отсутствие их механического повреждения и химического взаимодействия с матричным материалом, а также способствует равномерному распределению волокон в материале.

В статье представлен обзор методов формирования полуфабрикатов для изготовления металлических волокнистых композиционных материалов. Показано, что наиболее распространенными являются методы жидкофазной технологии, газотермического напыления, физического осаждения в вакууме. Рассмотрены основные проблемы, возникающие при получении полуфабрикатов, и пути их решения.

Ключевые слова: полуфабрикат, композиционный материал, металлический композиционный материал, волокна карбида кремния.

The implementation of new projects in various industries requires the solution of new tasks, one of which is the creation of new materials with higher performance. To one of such materials belong fiber reinforced metal matrix composite materials. An integral step in the creation of which is the development of technologies for their production. The technological scheme of producing fiber reinforced metal matrix composites influences the formation of their structure and properties. Therefore, it is necessary to choose the method of forming semi-finished products for their manufacture, which ensures the insulation of the fibers between each other by a layer of matrix material, the absence of their mechanical damage and chemical interaction with the matrix material, and also promotes uniform distribution of fibers in the material.

The article presents an overview of methods for forming semi-finished products for the producing fiber metal matrix composite materials. It is shown that the most common methods liquid-phase technology, gas-thermal coating, physical vapor deposition. The main problems arising during production of semi-finished products and ways to solve them are considered.

Keywords: semi-finished, composite material, metal matrix composite material, silicon carbide fibers.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Реализация новых проектов в авиационной, космической, машиностроительной, энергетической, судостроительной и других отраслях промышленности требует решения новых задач, одной из которых является создание перспективных материалов,

обладающих повышенными рабочими характеристиками и низкой плотностью [1–6]. К числу таких материалов относятся высокопрочные и высокомодульные волокнистые металлические композиционные материалы (МКМ), обладающие, по сравнению с неармированными сплавами, высокими механическими характеристиками (временным сопротивлением, пределом выносливости, модулем упругости) в сочетании с низкими плотностью и склонностью к трещинообразованию [6, 7].

Статья подготовлена в рамках реализации комплексного научного направления 12.1. «Металлические композиционные материалы (МКМ), армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3].

Неотъемлемым фактором при создании металлических волокнистых композиционных материалов является разработка технологий их изготовления. Одной из особенностей технологии изготовления волокнистых МКМ является то, что применение одного из известных технологических процессов не позволяет получить компактный материал, обладающий требуемыми свойствами. При изготовлении таких материалов весьма часто приходится прибегать к последовательному осуществлению двух или более технологических процессов [6, 7].

При изготовлении волокнистых МКМ правильно выбранная технологическая схема и соблюдение режимов их получения оказывают существенное влияние на формирование структуры и свойств. При этом следует исходить по крайней мере из трех условий. Во-первых, технологический процесс должен обеспечивать равномерное распределение волокон при заданном их объемном содержании; они должны быть изолированы друг от друга слоем матрицы. Во-вторых, механическое повреждение волокон должно быть сведено к минимуму. В-третьих, взаимодействие волокон с окружающей средой и с матрицей в процессе их совмещения должно быть минимальным [6, 7].

Рассмотрим наиболее распространенные методы получения полуфабрикатов для изготовления волокнистых МКМ на основе легких сплавов. К полуфабрикатам для изготовления волокнистых композиционных материалов относят монослой (ламинат, лента), представляющий собой волокнистую заготовку из моноволокна или многофиламентных волокон, покрытых слоем матричного сплава.

Одним из методов получения полуфабрикатов в виде лент является газотермическое напыление – газопламенное, электродуговое, высокочастотное и др. Для получения композиционных материалов наиболее широко используют метод плазменного напыления [6–8].

Плазменное напыление может быть реализовано в двух вариантах:

– 1 – непрерывное волокно с заданным шагом наматывают на барабан, на поверхности обода которого нарезана или накатана по винтовой линии канавка, затем на поверхность волокна наносят матричный сплав;

– 2 – на поверхность барабана укладывают фольгу из матричного сплава, наматывают на нее с заданным шагом волокно с последующим напылением матричного сплава.

Первый вариант имеет ряд преимуществ: наибольшее объемное содержание волокон и равномерное распределения их в матрице. Данным методом изготавливают полуфабрикаты для МКМ системы Al–В [7, 8].

Плазменным напылением на барабан можно получать также ленточные полуфабрикаты с моноволокнами или многофиламентными волокнами для деталей в виде тел вращения, которые затем подвергают прессованию или пропитке. Таким способом получают полуфабрикаты с алюминиевой матрицей на лентах из углеродных волокон. В этом случае распыляемые частицы практически не проникают в узкие межволоконные промежутки и образуют сверху углеродной ленты корковый слой, который затем используется как материал компонентов матрицы, участвующих в контактном плавлении

при горячем прессовании пакетов. Однако в этом случае равномерность укладки волокон при их намотке на очередной слой напыленной матрицы несколько ухудшается по сравнению с намоткой в канавки барабана [7, 8].

В процессе плазменного напыления очень важна связь между напыленным слоем и волокнами, а также между напыленным слоем и фольгой. Хорошая связь значительно облегчает операции раскроя и укладки, а также предотвращает отрыв и разрушение волокон [7, 8].

Покрyтия, получаемые газотермическим напылением, как правило, обладают значительной пористостью, однако при определенных режимах пористость может быть сведена к минимуму. Максимальная плотность, полученная на металлических покрытиях (например, никеля, алюминия и др.), составляет 95% [7, 8].

В результате взаимодействия расплавленных частиц с плазмой и окружающей атмосферой происходит значительное газонасыщение напыленного слоя. Например, в экспериментах по напылению данным методом в камере с контролируемой атмосферой показано, что титан и коррозионнотойкая сталь насыщаются кислородом до уровня, превышающего пределы растворимости кислорода в этих металлах в твердом состоянии [7, 8].

Наиболее ранние работы по использованию метода плазменного напыления связаны с получением полуфабрикатов для МКМ системы Al–В в атмосфере аргона. Остаточная пористость алюминиевого слоя непосредственно после напыления составляла 12–15%. Несмотря на использование камеры с защитной атмосферой, матрица дополнительно насыщалась кислородом; содержание кислорода в напыленном слое было на 1,5% (по массе) выше, чем в исходном алюминии [7, 8].

Необходимо учитывать воздействие плазмы на прочность волокна. Можно рассматривать два типа воздействия плазмы на волокно: во-первых, чисто термическое и, во-вторых, осложненное коррозионным воздействием активной газовой фазы на поверхность волокна. Если коррозионное воздействие среды нейтрализовано защитным покрытием на волокне или волокно достаточно стойко к химическому действию среды, то плазма оказывает главным образом термическое воздействие. Например, вследствие нагрева в факеле плазмы волокон бора с покрытием из карбида кремния и волокон карбида кремния наблюдается упрочнение до 10% от исходной прочности, что, очевидно, связано с более благоприятным перераспределением и частичным снятием внутренних напряжений в волокнах. Однако после напыления титановой и нихромовой матриц на волокна бора и карбида кремния на воздухе и в защитной атмосфере часть волокон разрушается уже в процессе напыления [8].

В системе Ti–В в процессе плазменного напыления происходит интенсивное взаимодействие между волокном и матрицей с образованием хрупких фаз (TiB, TiB₂, Ti₂B₅), что в сочетании с сильным термомеханическим воздействием (ударное давление при напылении титана приблизительно в 2 раза превышает аналогичное значение для алюминия) напыляемых частиц является причиной потери прочности волокон. В системе «карбид кремния–никель» также имеет место взаимодействие между волокном и матрицей при температурах, соответствующих температуре плавления матрицы. В системе «титан–карбид кремния» также обнаружено химическое взаимодействие с образованием боридов [8].

Эффективным способом снижения теплового и силового воздействия плазменной струи на волокна является метод импульсного напыления. Например, использование такого режима позволило получить никелевое покрытие на борных волокнах с показателем разупрочнения волокон не более 10%, в то время как при стационарном режиме волокно теряет до половины своей исходной прочности [7].

Основными причинами падения прочности волокон являются: локальный нагрев волокна в месте удара и деформации частицы, химическое действие окружающей среды и материала частицы в зоне локального нагрева, механическое воздействие частиц при их ударе о волокно, высокий уровень остаточных напряжений под частицами на волокне и другие причины [7].

В работе [9] рассматривается возможность получения монослоя, состоящего из волокон карбида кремния, покрытых титановым сплавом методом плазменного напыления в инертной среде. Показано, что макроскопические отслоения матрицы от волокон, трещины, возникающие в результате термических напряжений, отсутствуют. Кроме того, повреждений или разрушений по границе «матрица–волокно» не происходит. Пористость составляет менее 1%. Отмечено, что на поверхности монослоя присутствует небольшое количество продуктов окисления матричного сплава, что связывают с применением водорода в качестве плазмообразующего газа и из-за недостаточной его чистоты. В качестве плазмообразующего газа рекомендуют использовать аргон или азот. При последующих технологических операциях происходило образование трещин, что авторы данной статьи связывают с недостаточным радиусом изгиба монослоя, который он принял в процессе плазменного напыления на волокна, намотанные на цилиндрическую форму определенного диаметра. Для улучшения пластичности монослота рекомендуют применять термическую обработку. Полученный монослой представлен на рис. 1.

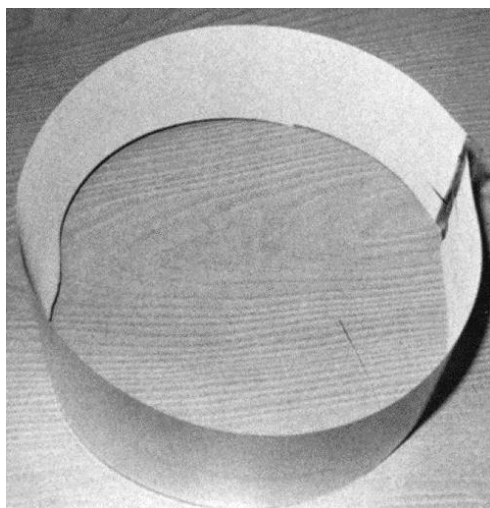


Рис. 1. Монослой из волокон карбида кремния, покрытых титановым сплавом, полученный плазменным напылением [9]

Авторами работ [10, 11] показан способ термического напыления порошков с помощью вакуумного плазменного напыления на примере получения полуфабриката в виде осесимметричного кольца. В качестве матрицы использовали титановый сплав системы Ti–6Al–4V, волокна – карбид кремния марки SCS-6. Важным этапом технологического процесса является то, что технологическая операция вакуумного плазменного напыления происходит в одну стадию. На рис. 2 показана схема технологического процесса плазменного напыления. Процесс осуществляется в вакууме и состоит из параллельных стадий плазменного напыления материала матрицы и намотки волокна на вращающуюся оправку.

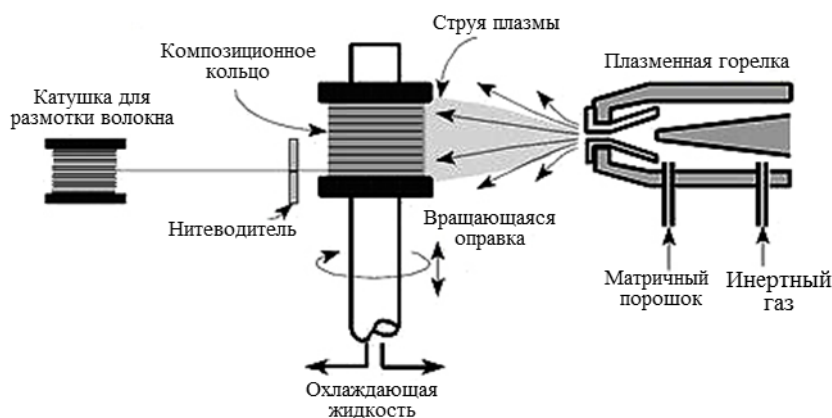


Рис. 2. Схема технологического процесса плазменного напыления [10]

Распределение волокон и их объемного содержания осуществляется за счет регулирования скорости вращения оправки и скорости подачи порошка матрицы в факел плазмы. В работе использовали порошок титанового сплава с размером частиц от 70 до 100 мкм, в качестве плазмообразующего газа применяли смесь аргона, водорода и гелия в равных объемах, скорость подачи порошка матрицы составляла 27 г/мин, скорость вращения оправки – от 45 до 60 об/мин, скорость подачи волокна 10 м/мин. Авторами данной статьи показано, что в ходе технологического процесса при соударении титанового порошка с волокном не происходит повреждение последних. Кроме того, водоохлаждаемая оправка, на которую происходит намотка волокна, способствует тому, что слои матричного материала напыляются на предыдущие охлажденные слои. Данный факт, по мнению авторов данной статьи, уменьшает уровень химического взаимодействия на границе раздела «волокно–матрица». При этом пористость матрицы составляла 16%, аналогичное распределение пористости отмечается и в работах [9, 10]. Структура осесимметричного кольца после вакуумного плазменного напыления показана на рис. 3.

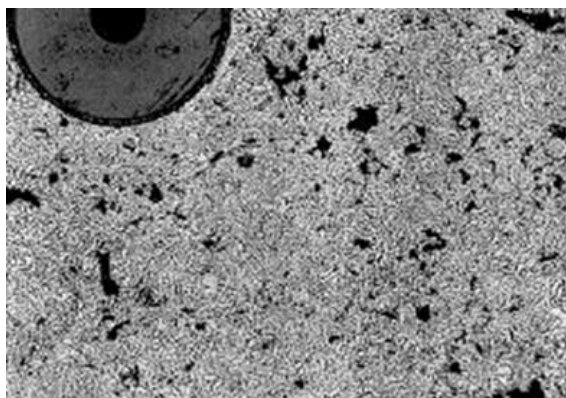


Рис. 3. Структура осесимметричного кольца после вакуумного плазменного напыления [10]

К одному из малораспространенных способов получения полуфабрикатов относится метод жидкофазной технологии. В работах [12–15] описано получение полуфабрикатов в виде непрерывного керамического волокна карбида кремния, покрытого слоем титанового сплава, по жидкофазной технологии. Способ получения заключается в следующем: непрерывное керамическое волокно протягивают через тигель с расплавленным металлом матрицы.

Для предотвращения контакта расплавленного матричного титанового сплава с материалом тигля применяют электромагнитный индуктор, который генерирует магнитное поле в объеме тигля, позволяющее удерживать расплав в виде сферы в состоянии левитации. Питание тигля осуществляется с помощью подачи в него титанового матричного сплава, который может быть в виде прутка или порошка [12–15].

Одним из параметров, влияющих на равномерность толщины покрытия на волокне в вышеприведенном методе, является высота источника, а именно: высота волокна, погруженного в тигель с жидким матричным материалом. Для обеспечения постоянной толщины покрытия по всей длине необходимо, чтобы высота источника была постоянной во времени. Требуемая толщина покрытия на волокне регулируется с помощью скорости прохождения волокна через тигель [12, 15].

Следует отметить, что при использовании порошка матричного материала для питания тигля необходимо подбирать оптимальные соотношения скорости расхода порошка и скорости подачи волокна. При увеличении скорости расхода порошка выше критической, может наблюдаться агломерация частиц, что задерживает их плавление и приводит к сцеплению с волокном, образуя дефекты покрытия на волокне. При низкой скорости расхода порошка происходит уменьшение объема жидкого металла в тигле, что приводит к неравномерному нанесению слоя матричного материала [12, 15].

Получение полуфабрикатов по методу жидкофазной технологии возможно только при условии, что жидкая матрица смачивает поверхность упрочняющего компонента. Следовательно, технологические режимы должны быть подобраны таким образом, чтобы точка химического взаимодействия не превышала «критическую», после которой следует интенсивное разупрочнение упрочняющего компонента [7].

С одной стороны, способность к смачиванию волокон сплавом при использовании вышеприведенного способа уменьшается с ростом скорости протягивания волокна через тигель с жидким матричным материалом. С другой стороны, желательно, чтобы скорость была как можно больше, поскольку с уменьшением скорости протягивания волокна через тигель увеличивается время контакта волокна и матрицы в жидкой фазе, что приводит к их химическому взаимодействию и, как следствие, – к разрушению волокна [12, 15].

Предполагают, что для улучшения смачивания титановым сплавом волокон карбида кремния необходимо наличие на поверхности волокна покрытия, смачиваемого этим металлом [12–15]. С одной стороны, для решения данной задачи предлагается регулировать скорость протягивания волокна через тигель с расплавленным титановым сплавом таким образом, чтобы на границе раздела образовался карбид титана, но при этом не происходило разрушения волокна, поскольку, по мнению авторов работ [13, 14], карбид титана улучшает смачивание керамических волокон карбида кремния титановым сплавом.

С другой стороны, в работах [12, 15] предлагают волокно перед прохождением через тигель с расплавленным матричным титановым сплавом покрывать карбидом титана, диборидом титана методом химического осаждения из газовой фазы, причем толщина осаждаемого покрытия должна быть от 50 до 300 нм.

Выбор покрытия для смачивания волокон сплавом матрицы зависит от физико-химических, механических и технологических требований, предъявляемых к данному покрытию. К основным требованиям, предъявляемым к покрытию для нанесения на керамические волокна по вышеприведенному технологическому процессу в системе «титан–карбид кремния», можно отнести: способность смачиваться титановым сплавом, сохранение механических характеристик керамического волокна, непрерывное нанесение [12, 15].

Практическое применение метода жидкофазной технологии ограничено из-за того, что большинство армирующих компонентов обладают высокой реакционной способностью по отношению к металлическим расплавам матрицы, что приводит к разупрочнению армирующего компонента [6–8].

Получение полуфабрикатов для изготовления МКМ также возможно с применением технологий пленок и покрытий, среди которых особое место занимают методы физического осаждения в вакууме, осуществляемые путем прямой конденсации пара наносимого материала [15–17].

В работе [15] непрерывные волокна марок Sigma SM1040 и Textron SCS6 (диаметром 100 и 140 мкм соответственно) наматывались на цилиндрический барабан и покрывались тонким слоем матричного сплава (γ -TiAl, γ -TiAl₃) методом физического осаждения из паровой фазы в вакууме, а именно электронно-лучевым осаждением. Электронно-лучевое осаждение является формой физического осаждения из паровой фазы, в котором мишень-анод бомбардируют пучком электронов, испускаемых термоэлектронным катодом под высоким вакуумом. Электронный пучок выбивает атомы из мишени, чтобы превратить их в газовую фазу. Эти атомы затем осаждаются на подложку. Принципиальная схема данного процесса представлена на рис. 4.

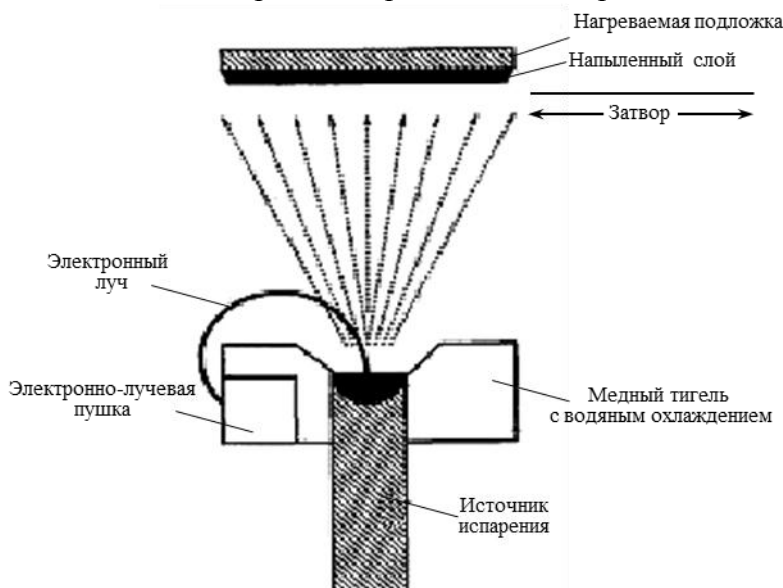


Рис. 4. Принципиальная схема электронно-лучевого осаждения [15]

Скорость осаждения матричного сплава на волокна составляла 1–2 мкм/мин, давление в камере для осаждения находилось на уровне 10^{-6} мбар (10^{-4} Па), мощность потока электронно-лучевого пучка 14 кВт. Для получения покрытий γ -TiAl или γ -TiAl₃ использовали два источника испарения, состоящие из строжней составов системы Ti–6Al–4V и чистого алюминия. По мнению авторов данной статьи, использование двух источников испарения позволяет проводить осаждение материалов, значительно различающихся по значению давления насыщенных паров [15].

Отмечается, что у некоторых образцов покрытие не соответствует требуемому химическому составу [15]. Возможно, это связано с тем, что при данном процессе испарение матричного материала осуществляется локально, из-за чего легкоплавкие элементы матрицы могут испаряться за пределы напыленного волокна, поскольку отсутствует сдерживающее магнитное поле [18, 19]. Кроме того, существует возможность образования капельной фазы во время осаждения, что является дефектом покрытия на волокнах. Поэтому авторы данной статьи для точного воспроизведения состава покрытия рекомендуют тщательно контролировать процесс физического осаждения в вакууме [15].

Одним из важных условий получения волокнистого МКМ со стабильными и высокими физико-механическими характеристиками является равномерное распределение волокон в объеме матрицы, характеризующееся стабильным межволоконным расстоянием при заданном объемном содержании, что формируется на этапе получения полуфабриката [6, 7, 16].

Кроме того, межволоконное расстояние является одним из важных факторов, влияющих на образование термических трещин (рис. 5), образующихся на заключительных стадиях технологического процесса изготовления волокнистых МКМ. К проявлению такого вида явлений в особенности склонны волокнистые МКМ на основе хрупких матриц – например, $TiAl$, $TiAl_3$, Ti_3Al и др. [7, 8, 15, 21]. Таким образом, по мнению авторов работы [15], чем меньше межволоконное расстояние, тем больше склонность материала к термическим трещинам. Поэтому для предотвращения таких дефектов необходимо правильно выбирать технологическую схему изготовления полуфабрикатов, которая оказывает существенное влияние на формирование структуры волокнистых МКМ [18].

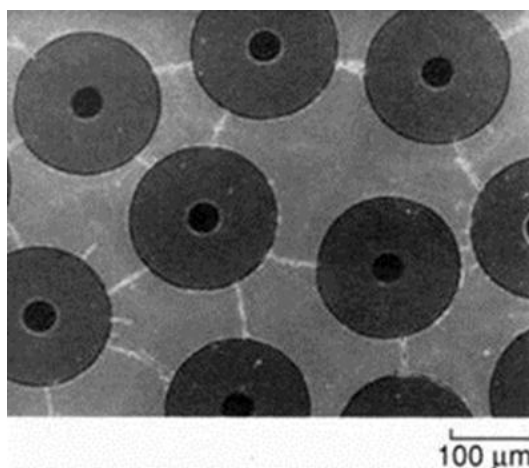


Рис. 5. Структура металлического композиционного материала с термическими трещинами [20]

Получение покрытий сложного состава с использованием простых исходных веществ методом физического осаждения в вакууме возможно с применением реакционных газов. Обычно для этого используют разряды высокой частоты, реже – постоянного тока. Первый способ применяется для распыления диэлектриков, состав которых близок к составу покрытий. Он имеет общеизвестные недостатки, присущие высокочастотным системам, а именно: низкую скорость осаждения и невысокий КПД, сложность динамического согласования импедансов схемы питания, проблемы с экранированием и опасностью облучения персонала. Разряды постоянного тока позволяют распылять металлическую мишень более простого состава, но при этом возникают проблемы, связанные с частым возникновением дуг на мишени и «исчезновением анода» из-за образования на них диэлектрических слоев в результате химического взаимодействия распыленного вещества с реакционным газом [19].

Авторы работы [22] показали, что технология физического осаждения в вакууме с применением реакционных газов может использоваться для формирования полуфабриката, состоящего из высокопрочных непрерывных волокон, покрытых титаном или титановым сплавом. В качестве высокопрочных волокон применялись волокна карбида кремния, в качестве реакционноспособной атмосферы применялся азот, вовлекаемый в образующееся покрытие и реагирующий с компонентами матричного сплава с образованием керамических частиц.

Следует отметить, что присутствие реакционного газа сказывается на состоянии распыляемого материала, так как проявляется эффект поглощения реакционного газа распыляемым материалом, и на его поверхности появляются продукты реакции распыленного и обратнорассеянного материала мишени с газом – оксиды, нитриды и т. д., т. е. происходит изменение химического состава распыляемого материала [18, 19].

Обсуждение и заключения

При проведении анализа научных литературных данных показано, что при формировании полуфабрикатов для изготовления волокнистых композиционных материалов применимы методы жидкофазной технологии, газотермического напыления, а также методы физического осаждения в вакууме.

Показано, что для формирования полуфабрикатов в виде моноволокна, покрытого матричным сплавом, используются способы электронно-лучевого осаждения и протягивания волокна через тигель с расплавленным металлом матрицы.

Плазменным напылением можно получать ленточные полуфабрикаты с моноволокнами или многофиламентными волокнами в виде монослоя (ламината, ленты).

При выборе метода формирования полуфабриката необходимо руководствоваться видом полуфабриката и учитывать преимущества и недостатки выбранного метода, который должен обеспечивать: изоляцию волокон друг от друга слоем матричного материала, отсутствие их механического повреждения и химического взаимодействия с матричным материалом, а также равномерное распределение волокон в материале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
4. Гришина О.И., Шавнев А.А., Серпова В.М. Особенности влияния структурных параметров на механические характеристики металлического композиционного материала на основе алюминиевых сплавов, упрочненных частицами карбида кремния (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S6. С. 24–27. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-24-27.
5. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 373–380.
6. Chawla N., Chawla K.K. Metal Matrix Composites. New York: Springer Science+Business Media Inc., 2006. P. 2–107.
7. Портной К.И., Салибеков С.Е., Светлов И.Л., Чубаров В.М. Структура и свойства композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
8. Шорохов М.Х., Колпашников А.И., Костиков В.И. и др. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
9. Valente T., Bartuli C. A plasma spray process for the manufacture of long-fiber reinforced Ti–6Al–4V composite monotapes // Journal of Thermal Spray Technology. 1994. Vol. 3 (1). P. 63–68.
10. Beddoes J., Koul A.K., Saxena P. Processing & properties of continuous fiber reinforced titanium matrix axi-symmetric composites // ICCM-12. 1999. P. 284.
11. Method to manufacture reinforced axi-symmetric metal matrix composite shapes: pat. 5897922 US. No. 08/826672; filed 07.04.97; publ. 27.24.99.
12. Procédé d'enduction métallique de fibres par voie liquid: pat. 0931846 EP. No. 99400129.5; filed 21.01.99; publ. 28.07.99.
13. Procédé et dispositif d'enduction métallique par voie liquid de fibres en materiau ceramique: pat. 2945823 FR; filed 25.05.09; publ. 26.11.10.

14. Способ и устройство жидкостного нанесения металлического покрытия волокна: пат. 2469123 Рос. Федерация; заявл. 21.05.2008; опубл. 10.12.2012, Бюл. №34. 13 с.
15. Способ нанесения металлического покрытия на волокна жидким методом: пат. 2422554 Рос. Федерация; заявл. 04.10.2006, опубл. 27.06.2011, Бюл. №18. 11 с.
16. Wood M., Ward-Close M. Fiber-reinforced intermetallic compounds by physical vapor deposition // *Materials Science and Engineering*. 1995. Vol. A192/193. P. 590–596.
17. Matrix-coated reinforcement for production of metal matrix composites: pat. 2268192 GB. No. 9315647.9; filed 10.02.92; publ. 05.01.94.
18. Серпова В.М., Шавнев А.А., Гришина О.И. и др. Смачиваемость и межфазное взаимодействие в металлическом композиционном материале на алюминиевой матрице, армированной оксидом алюминия // *Материаловедение*. 2014. №12. С. 29–35.
19. Кузмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Киев: Аверс, 2008. Кн. 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления. 244 с.
20. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 72 с.
21. Upadhyaya D., Wood M. et al. Coating and Fiber Effects on SiC-Reinforced Titanium // *TMC*. 1994. November. P. 62–67.
22. Semifinished product made of a composite material and method for producing a semifinished product from a composite material: pat. WO 2005/066382; filed 22.12.04; publ. 21.07.05.