

В результате проведенной работы была изготовлена партия модельных лопаток составной конструкции в количестве 15 шт. для проведения испытаний на разгонном стенде. Геометрические параметры лопаток практически полностью совпадают у всей партии, что является свидетельством освоения технологии изготовления модельных пустотелых лопаток составной конструкции. Разработано ТЗ на проектирование пресс-форм для изготовления полноразмерной широкохордной пустотелой лопатки составной конструкции для вентиляторов ГТД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Салибеков С.Е., Абузин Ю.А., Рыльников В.С., Турченков В.А., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. Конструктивные и технологические решения для создания составных лопаток перспективных вентиляторов с применением прочных и жестких металлокомпозитов //В сб.: Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 3. Композиционные и керамические материалы в ГТД.– М.: ЦИАМ, 2003, с. 124–139.
2. Шавнев А.А, Абузин Ю.А., Кочетов В.Н. Оптимизация технологии получения боралюминиевого композиционного материала и его диффузионной сварки с титаном, с. 16–22 (наст. сборника).

*Ю.А. Абузин, М.В. Григорьев, И.Е. Гончаров*

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АРМИРУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ С КРУПНЫМИ ЧАСТИЦАМИ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Al–SiC**

Традиционные алюминиевые сплавы, обладая хорошим комплексом свойств в температурном интервале 20–250°C, не способны работать длительное время при температурах более 300–350°C. Существенного повышения эксплуатационных характеристик можно достичь путем использования метода механического легирования (МЛ), который представляет собой многосторонний процесс, протекающий при высокоэнергетическом размоле металлического порошка, смешанного с одним или несколькими легирующими компонентами, и позволяющий получать порошки сплава с уникальной микроструктурой. Метод МЛ является одним из современных и эффективных способов получения дисперсноупрочненных композиционных материалов (КМ) на основе алюминиевых сплавов. Он свободен от ограничений по составу и количеству компонентов, универсален и применим при низких и умеренных температурах.

В ВИАМ разработана технология производства КМ Д16–SiC с применением метода МЛ. Проводимые ранее исследования этого КМ в основном были ориентированы на оптимизацию технологических параметров процесса МЛ исходя из комплекса свойств конечного КМ. Основным изменяемым параметром при этом была продолжительность полной механохимической обработки. Было показано, что требуемый уро-

вень свойств достигается после обработки исходной смеси порошков в течение 10 и более часов. При этом не рассматривались вопросы развития физических процессов, обеспечивающих достижение конечных свойств компактного материала. Таких процессов достаточно много, и в данной работе исследованы некоторые из них: разрушение частиц армирующей фазы и уменьшение их среднего размера, изменение размера зерна или субзерна алюминиевого твердого раствора во время механохимической обработки. Поэтому для более детального исследования указанных процессов в качестве исходных частиц армирующей фазы кремния был использован карбид кремния повышенной крупности – на уровне 200–250 мкм – в отличие от традиционно использовавшихся частиц размером 7–20 мкм. Следует также отметить, что анализ научно-технической и патентной литературы показал, что механизмы структурообразования алюминиевых дисперсноупрочненных КМ на разных стадиях их получения также еще недостаточно изучены.

### *Результаты исследования*

В качестве матричного сплава для создания КМ был использован порошок алюминиевого сплава Д16 со средним размером частиц 40 мкм, полученный распылением слитка матричного сплава методом вращающегося электрода. Плавку сплава проводили в электрической печи сопротивления в графитошамотном тигле при температуре 720–740°C. Сплавы отливали в стальные изложницы. Средняя скорость охлаждения составляла 10 град/с.

В качестве армирующей составляющей КМ был выбран порошок карбида кремния крупностью 200–250 мкм.

Обработку исходных порошковых смесей проводили в вибросмесителе СМВ-0,005 в среде технического аргона. Размол производился шарами диаметром 12,5 мм. Соотношение массы шаров к массе порошка составляло 20:1, частота вибрации 23,8 Гц. Начальные условия механического легирования соответствовали состоянию вибросмесителя с наработанным рабочим слоем на корпусе и рабочих телах. Время размола изменяли от 1 до 45 ч.

Металлографические исследования структуры гранул КМ проводили на оптическом микроскопе Neophot-30.

Микротвердость гранул КМ оценивали на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450–76 с нагрузкой на алмазном инденторе 10 г.

Размер частиц карбида кремния определяли на ЭВМ при помощи специализированной программы SIZER с использованием фотографий, сделанных на электронном сканирующем микроскопе.

Для определения гранулометрического состава обработанных в вибросмесителе порошковых смесей, в работе использовали ситовый анализ на механическом виброприводе типа ВП С/220 с комплектом круглых сит диаметром 200 мм, глубиной 25 мм, высотой обечайки 40 мм с величиной отверстий 2,0; 0,9; 0,5; 0,08; 0,04 мм.

С помощью методики рентгенодифрактометрического анализа, разработанной в МИСиС, оценивали размер зерна алюминиевого твердого раствора.

Для получения реальной картины развития процессов, происходящих при механическом легировании, продолжительность обработки в вибросмесителе варьировали от 1 до 45 ч с шагом 1 ч. В ходе проведенных металлографических исследований полученных смесей установлено, что после 1 ч обработки в структуре КМ отсутствуют частицы матричного сплава с внедренными в них частицами карбида кремния (такой материал в дальнейшем будем называть гранулы КМ). С увеличением продолжительности обработки до 5 ч появляются гранулы КМ, но распределение карбида кремния в них неравномерное: в структуре гранул КМ присутствуют как крупные, так и мелкие частицы карбида кремния, а также области, свободные от частиц.

Одним из основных параметров структуры гранул, обеспечивающих достижение конечных свойств КМ, является средний размер частиц карбида кремния. В процессе обработки в течение 45 ч средний размер частиц карбида кремния в первые часы обра-

ботки измельчается с ~200 до ~10 мкм, а в последующие 40 ч плавно уменьшается до ~3 мкм. Дальнейшее увеличение продолжительности обработки, скорее всего, будет способствовать дальнейшему измельчению частиц карбида кремния и их более равномерному распределению по частицам матричного сплава.

Одновременно с изменением среднего размера частиц карбида кремния наблюдается изменение размера областей когерентного рассеяния (ОКР) алюминиевого твердого раствора, по которому можно с удовлетворительной точностью судить о размере зерен или субзерен в КМ. В первые 30 ч обработки в вибросмесителе ОКР плавно увеличивается с 54 до 66 нм, а в последующие 15 ч обработки уменьшается до 43 нм.

Для выявления основных различий на уровне полученных в ходе поэтапного процесса МЛ партий композиционных гранул, а также внутри каждой партии на основе разделения ее на представительные фракции по крупности частиц, в работе определяли гранулометрический состав КМ путем использования ситового анализа. Кроме гранулометрического состава, по данным ситового анализа был определен средний размер гранул КМ в каждой фракции.

Далее по специальной методике определяли содержание карбида кремния в каждом фракционном классе. Объединив полученные результаты с данными по ситовому анализу, установили, что, по мере измельчения армирующей фазы и уменьшения ее количества в гранулах КМ фракционного состава  $-0,5+0,08$  мм, проходит процесс формирования гранул КМ фракционного состава  $-0,9+0,5$  мм и  $-2,0+0,9$  мм. Как было отмечено выше, основные изменения в структуре гранул КМ Д16+20% (по массе) SiC начинаются после 5 ч обработки. Таким образом, процесс измельчения частиц карбида кремния является контролирующим при формировании гранул КМ.

Одним из существенных параметров, позволяющих косвенно оценивать способность гранул КМ к деформированию, является микротвердость. В свою очередь, деформируемость металла имеет важное значение для оценки технологических свойств гранул, главным образом их прессуемости. Пластичность гранул в значительной степени определяет условия формирования и прочность заготовок, требуемую мощность прессового оборудования, стойкость пресс-формы и т. п. Удобной мерой прочности и пластичности гранул является микротвердость. В первые 5 ч обработки происходит резкое увеличение микротвердости гранул КМ Д16+20% (по массе) SiC с 122 до 158 МПа, причиной которого, скорее всего, является повышение дефектности алюминиевого твердого раствора, его дисперсионное твердение в результате распада и выделения дисперсных фаз, дисперсное упрочнение за счет измельченных керамических частиц упрочнителя и частиц избыточных фаз матричного сплава. При увеличении времени обработки от 5 до 45 ч наблюдается медленный рост со 158 до 169 МПа, связанный с замедлением протекания указанных процессов.

Следует отметить, что при обработке порошка матричного сплава и порошка карбида кремния в планетарном активаторе возникла проблема интенсивной сварки гранул КМ между собой, со стенками барабана и мелющими телами. При обработке в вибросмесителе подобной проблемы не возникает.

### **Выводы**

1. Показана возможность получения методом МЛ в вибросмесителе КМ на основе сплава Д16 с 20% (по массе) частиц карбида кремния размером ~200 мкм.

2. Выявлены основные стадии и кинетика изменения структуры и свойств композиционных гранул в зависимости от продолжительности обработки в вибросмесителе. Показано, что основные изменения в структуре гранул КМ Д16+20% (по массе) SiC начинаются после 5 ч обработки.

3. Показано, что с увеличением продолжительности обработки в вибросмесителе средний размер частиц карбида кремния уменьшается с ~200 до ~10 мкм в первые 5 ч обработки, а в последующие 40 ч обработки – плавно уменьшается до ~3 мкм. Одновременно с изменением среднего размера частиц карбида кремния наблюдается умень-

шение размера областей когерентного рассеяния алюминиевого твердого раствора: после 45 ч обработки размер этих областей может составлять ~43 нм.

4. Установлено, что процесс измельчения частиц карбида кремния является контролирующим при формировании гранул КМ.

5. Оценочные расчеты показали, что использование крупных частиц карбида кремния позволяет снизить затраты на исходное сырье для получения КМ и тем самым снизить себестоимость КМ в 1,2 раза.

*М.И. Душин, А.В. Хрульков, А.Е. Раскутин*

## **К ВОПРОСУ УДАЛЕНИЯ ИЗЛИШКОВ СВЯЗУЮЩЕГО ПРИ АВТОКЛАВНОМ ФОРМОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Соотношение армирующего наполнителя и связующего при прочих равных условиях определяет физико-механические характеристики полимерных композиционных материалов (ПКМ) и изделий на их основе. Поэтому при изготовлении изделий из ПКМ необходимо обеспечивать заданное соотношение компонентов. При автоклавном формовании используются препреги, в которых содержание связующего колеблется в пределах  $\pm 2,0 \div \pm 2,5\%$  от среднего номинала. В этом случае возникает необходимость удалить излишки связующего из собранного пакета препрегов. Удаление может происходить по двум направлениям: вдоль слоев препрегов к краям формируемых изделий и в поперечном к ним направлении, т. е. в направлении толщины изделия.

Удалить излишки связующего в направлении укладки слоев в случае, когда габаритные размеры изделия значительно превосходят его толщину, нереально, так как удаление произойдет только вблизи кромок изделия, что может привести затем к его короблению. Поэтому, если необходимо обеспечить равномерное распределение армирующего наполнителя и связующего по всему объему изделия, надо осуществлять удаление излишков в поперечном направлении. При этом, для исключения вытекания связующего в направлении укладки слоев, по периметру изделия укладываются ограничители типа герметизирующего жгута. А при использовании однонаправленных препрегов на основе жгутовых наполнителей эти ограничители обязательны для предотвращения расползания слоев вместе с потоком отжимаемых излишков связующего.

Для сбора излишков связующего используются так называемые впитывающие слои (блидеры) (Перспектив материалов для автоклавного формования фирмы «Airtech», 1993), обладающие большой впитывающей способностью. Фирма «Hexcel» (Перспектив фирмы «Hexcel», «Prepreg Technology», 1997) предлагает формулу расчета количества слоев блидера, необходимого для получения заданного содержания волокна  $V_f$  в пластике:

$$N_b = \frac{\left[ W_r - \left( \frac{W_f \cdot p_r \cdot V_r}{p_f \cdot V_f} \right) \right] N_p}{A}, \quad (1)$$

где  $N_b$  – количество слоев блидера;  $A$  – поглощающая способность блидера,  $\text{г/м}^2$ ;  $W_r$  – поверхностная плотность смолы в препреге,  $\text{г/м}^2$ ;  $W_f$  – поверхностная плотность волокна в препреге,  $\text{г/м}^2$ ;  $V_f$  – заданное (выбранное) объемное содержание волокна, %;  $V_r$  – объемное содержание смолы, %;  $p_r$  – плотность смолы,  $\text{г/см}^3$ ;  $p_f$  – плотность волокна,  $\text{г/см}^3$ ;  $N_p$  – количество слоев в пакете ламината.

Там же (в проспекте) приводится предлагаемый порядок проведения опытов по оценке впитывающей способности материала блидера, поверхностной плотности смолы и наполнителя в препреге.

Как показывает практика, впитывающий слой играет важную, но не главную роль в удалении излишков связующего, так как процесс удаления требует значительных усилий и времени и зависит от многих факторов: структуры армирующего напол-