

УДК 669.018.95

Я.А. Приписнов<sup>1</sup>, Е.И. Курбаткина<sup>1</sup>, Д.В. Косолапов<sup>1</sup>

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ МКМ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-60-71

*Проведен обзор актуальных сведений в области механической обработки и получения неразъемных соединений низконаполненных и высоконаполненных металлических композиционных материалов (МКМ) на основе алюминиевых сплавов, упрочненных различными армирующими наполнителями. Приведено сравнение технологических методов соединения алюминиевых МКМ, полученных разными способами изготовления. Рассмотрены такие современные методы и технологии формообразования и получения неразъемных соединений деталей из алюминиевых МКМ, как ультразвуковая токарная и фрезерная обработка, сварка трением с перемешиванием, сварка диодным лазером высокой мощности. Представлены свойства армирующих компонентов для металлических матриц и их влияние на износ режущего инструмента и качество получаемой поверхности. Проанализированы зарубежный опыт по целесообразности применения решений Ли–Шеффера и Эрнста–Мерчанта в области обработки алюминиевых МКМ, а также использование технологий лазерной сварки и пайки высоконаполненных подложек из сплава системы Al–SiC. В заключении обзора сделаны выводы и обозначены последние тенденции в области обработки алюминиевых МКМ и формирования соединения изделий из них.*

**Ключевые слова:** *металлический композиционный материал, алюмоматричные композиционные материалы, карбид кремния, армирование частицами, ультразвуковая механическая обработка, сварка диодным лазером высокой мощности, сварка трением с перемешиванием, соединение.*

Ya.A. Pripisnov<sup>1</sup>, E.I. Kurbatkina<sup>1</sup>, D.V. Kosolapov<sup>1</sup>

## THE MAIN TRENDS IN THE FIELD OF MACHINING AND JOINING Al-BASED MMCs (review)

*The paper presents a review of current information in the field of machining and production of permanent joints of low-filled and high-filled metal matrix composites (MMC) based on aluminum alloys, reinforced with various reinforcing fillers. The comparison of technological methods of joining of aluminum MMCs obtained by different manufacturing methods is given. Such modern methods and technologies of forming and obtaining permanent joints of parts from aluminum MMCs as ultrasonic turning and milling, friction welding with mixing are considered, high power diode laser welding. The properties of reinforcing components for metal matrices and their influence on the wear of the cutting tool and the quality of the resulting surface are shown. Analysis of foreign experience for the appropriateness of decisions Lee–Schaeffer and Ernst–Merchant in processing of aluminum MMCs and technologies, laser welding and brazing of highly filled backings of Al–SiC. At the end of the review, conclusions are drawn and the latest trends in the field of aluminum MMCs processing and the formation of the connection of final products from them are indicated.*

**Keywords:** *metal matrix composite material, aluminum matrix composites, silicon carbide, particle reinforcement, ultrasonic assisted machining, high power diode laser welding, friction stir welding, joining.*

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

Металлические композиционные материалы (МКМ) на основе алюминиевых сплавов являются перспективными материалами для применения в авиастроении благодаря своим хорошим физико-механическим свойствам. Добавление упрочняющей фазы в металлическую матрицу улучшает жесткость, удельную прочность, износостойкость, ползучесть и сопротивление усталости по сравнению с однокомпонентными конструкционными материалами [1–3].

Благодаря своим свойствам МКМ с алюминиевой матрицей нашли применение в авиационном газотурбинном двигателе (ГТД). Их использование возможно при изготовлении кольцевых уплотнений лопаток, корпусов и других деталей двигателя (рис. 1) [4, 5].

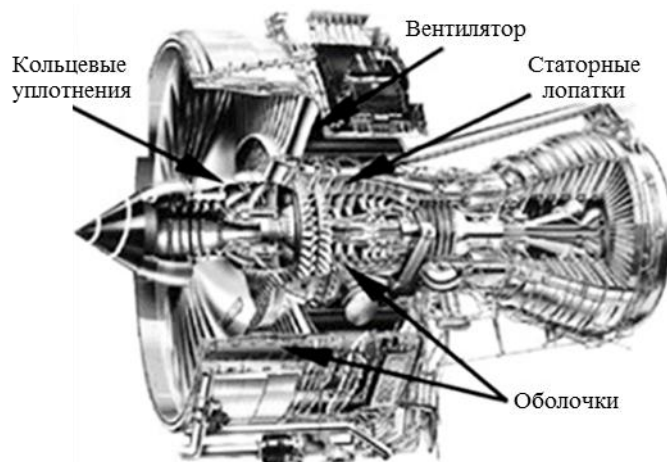


Рис. 1. Возможные области применения алюминиевых МКМ в авиационном двигателестроении

Однако, несмотря на преимущества МКМ перед классическими материалами, сдерживающими факторами при изготовлении деталей из них являются получение поверхностей сложной геометрической формы при механической обработке и создание неразъемных соединений с другими материалами.

Цель данной работы – обзор актуальных тенденций в области методов механической обработки и получения неразъемных соединений низконаполненных и высоконаполненных алюминиевых МКМ при изготовлении высокотехнологичных изделий.

### Армирующие компоненты в составе алюминиевых МКМ

Затрудненная обрабатываемость заготовок из алюминиевых МКМ обусловлена присутствием твердых керамических частиц, что требует особого подхода к выбору инструмента и режима резания для получения необходимого качества поверхности детали.

Армирующий компонент в составе алюминиевых МКМ обладает выраженной разделенной границей с матрицей и придает материалу высокую прочность, твердость и повышенный модуль упругости. Распределение армирующих частиц в объеме матричного сплава оказывает очень большое влияние на свойства алюминиевых МКМ и может быть улучшено с помощью более тщательного перемешивания на стадии производства композиционного материала.

Наиболее распространенными керамическими армирующими компонентами являются частицы карбида кремния (SiC) и оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). Упрочнение частицами SiC повышает предел прочности, твердость, плотность и износостойкость композиционных материалов [6]. Оксид алюминия в составе алюминиевых МКМ увеличивает прочность при сжатии и износостойкость.

Металлические композиционные материалы также упрочняют частицами карбида бора ( $B_4C$ ), отличающимися высоким модулем упругости и вязкостью разрушения. Добавление карбида бора в матрицу алюминиевого сплава увеличивает твердость композиции, но не улучшает в значительной степени ее износостойкость [7].

Отдельной разновидностью армирующих наполнителей являются волокна, характеризующиеся высокой прочностью. Возникающие в алюминиевых МКМ напряжения растяжения–сжатия воспринимаются в основном этими волокнами. В материалах с алюминиевой матрицей применяют волокна карбида кремния, оксида алюминия и карбида бора.

Цирконовый песок ( $Zr_2SiO_4$ ) используют в полиармированных (или гибридных) композиционных материалах, содержащих различные по составу два и более армирующих компонента, равномерно распределенные в матрице относительно друг друга. Такой песок состоит в основном из силиката циркония ( $ZrSiO_4$ ) и небольшого количества гафния с дополнением некоторыми редкоземельными элементами, титановыми минералами, монацитом и т. д. Цирконовый песок признан перспективным армирующим материалом для алюминиевых, цинковых и свинцовых композитов [8].

В последнее десятилетие благодаря низкой стоимости и доступности началось использование летучей золы в качестве упрочняющей фазы, образующейся в виде побочного продукта отходов на тепловых электростанциях. Летучая зола усиливает эффект электромагнитного экранирования алюминиевых МКМ.

Опытным путем установлено [9], что увеличение объемного содержания керамических упрочняющих частиц в металлической матрице значительно ускоряет износ режущей части инструмента. Например, после резания металломатричного композиционного материала системы Al–SiC на токарном оборудовании, полученного методом литья с содержанием 5, 10 или 15% (объемн.) армирующего компонента, выявлено, что скорость подачи не так сильно влияет на износ режущего инструмента, как параметр скорости резания [10]. Однако при армировании 20% (объемн.) карбида кремния высокая скорость резания совместно с увеличенной глубиной резания улучшили шероховатость и качество поверхности заготовки [11–13].

Для получения нужных геометрических характеристик материалов при механической обработке, варьируют несколькими параметрами: вид материала и покрытия, геометрическая форма режущего инструмента, глубина резания и подача. В зависимости от выбора величин этих параметров формируется разнородная стружка. По закономерностям образования стружки в процессе резания, ее характеру отделения, виду, ширине и цвету можно определить, какой режим резания будет наиболее оптимальным для конкретного материала и будет способствовать достижению нужного качества поверхности (рис. 2). При механической обработке для алюминиевых МКМ действуют те же законы, что и для традиционных материалов, однако требуется более детальное прорабатывание методологии.

Элементная стружка (или стружка скалывания) образуется в результате обработки пластичных металлов при большой толщине срезаемого слоя, относительно низкой скорости подачи инструмента и небольшом переднем угле режущей пластины (в настоящее время большая часть режущего инструмента характеризуется наличием одной или нескольких сменных режущих пластин). Отдельные элементы такой стружки слабо связаны между собой или совсем не связаны.

Ступенчатая стружка образуется в процессе резания со средней скоростью при обработке алюминия и его сплавов, а также металлов средней твердости. По виду она представляет собой ленту – гладкую со стороны резца и зазубренную с внутренней стороны.

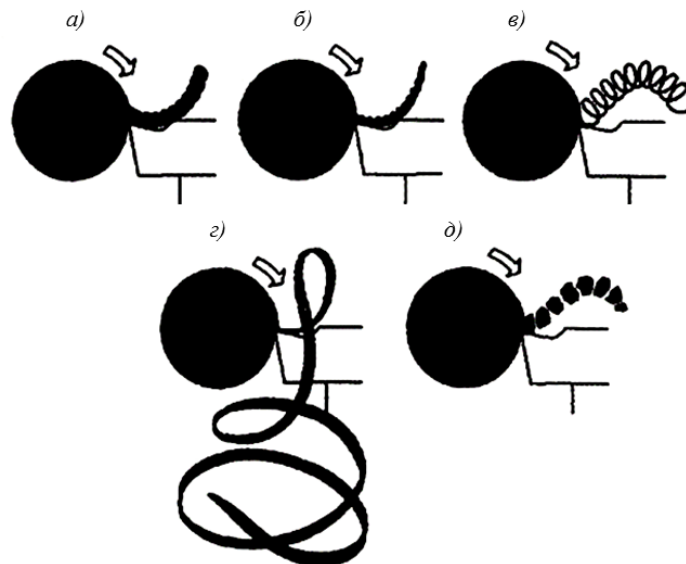


Рис. 2. Виды стружки при токарной механической обработке

Непрерывная сливная спиральная стружка – хороший показатель для стойкости режущей кромки пластины при обработке любых металлов; она обычно образуется при обработке мягких материалов при высокой скорости резания.

Другой вид сливной стружки – ленточная – представляет наибольшую опасность для человека и оборудования из-за своей особенности наматываться на заготовку, инструмент и пр.; она образуется при операциях точения вязких металлов на высоких скоростях.

Таким образом, по характеру получаемой стружки можно судить о целесообразности изменения параметров процесса резания конкретного алюминиевого МКМ.

### Модель резания при механической обработке алюминиевого МКМ

В настоящее время данных об образовании стружки при обработке композиционных материалов, произведенных порошковым методом, недостаточно. Механизм стружкообразования при механической обработке алюминиевых МКМ более непредсказуем и сложен, чем при обработке классических материалов.

В теории резания металлов наиболее распространенными стали решения Ли–Шеффера и Эрнста–Мерчанта, в основе которых предполагается существование некой единственной изолированной плоскости сдвига (обрабатываемый материал смещается под воздействием кромки режущего инструмента), совмещенной с направлением действия максимального касательного напряжения [14].

Эрнст и Мерчант впервые приняли первичную деформационную зону за плоскость, как показано на рис. 3, а.

Согласно теории Мерчанта, сила резания ( $F_c$ ), сила подачи ( $F_t$ ) и угол наклона условной плоскости сдвига ( $\varphi$ ) определяются соответственно уравнениями:

$$F_c = \frac{\tau_s A_c \cos(\beta - \alpha)}{\sin\varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \alpha) [1 - k \operatorname{tg}(\varphi + \beta - \alpha)]}; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}(\beta - \alpha) = \frac{F_t}{F_c}; \quad (2)$$

$$2\varphi + \beta - \alpha = C, \quad (3)$$

где  $C$  в уравнении (3) – константа  $\operatorname{arccot}(k)$ , зависящая от материала;  $\beta$  – угол трения;  $\alpha$  – угол наклона режущей кромки.

Ли и Шеффер использовали теорию пластичности для анализа процесса ортогонального резания (рис. 3, б).

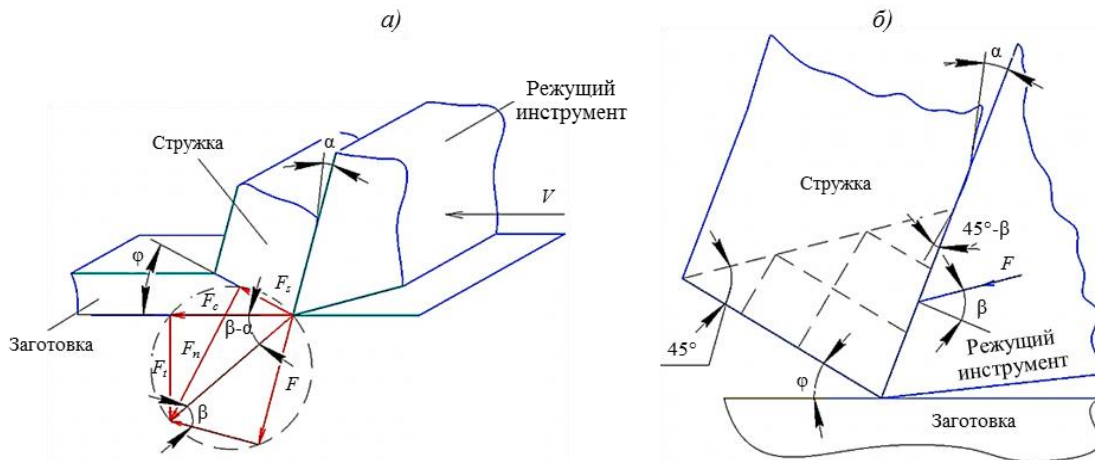


Рис. 3. Решения Эрнста–Мерчанта (а) и Ли–Шеффера (б)

В соответствии с этим решением угол наклона плоскости сдвига ( $\phi$ ) рассчитывается так:

$$\phi + \beta - \alpha = \frac{\pi}{4}.$$

Специалистами Ирана в области механической обработки проведены исследования [15] по обоснованию данных решений относительно токарной обработки алюминиевых МКМ состава Al–20% (по массе) SiC<sub>p</sub>. Значения сил резания при эксперименте сравнивали с расчетными значениями на углах плоскости сдвига, полученными из теорий Ли–Шеффера и Эрнста–Мерчанта. В процессе работы составлены диаграммы зависимости силы резания, силы подачи, величины наклепа материала от глубины резания. В результате выяснилось, что значения экспериментальных сил резания больше, чем значения расчетных сил по решениям Эрнста–Мерчанта и Ли–Шеффера. В этих теориях предполагается, что режущая кромка инструмента идеально остра и не изнашивается в процессе резания, отсутствуют наклеп и термическая деформация материала, в то время как в действительных условиях все эти факторы присутствуют. В итоге выясняется, что при механической обработке МКМ наиболее целесообразно ориентироваться на решение Эрнста–Мерчанта, исключив недостатки его идеализированных условий.

В обработке резанием МКМ системы Al–SiC существует постоянная проблема – труднообрабатываемость из-за истирающей природы частиц упрочняющей фазы. Эти частицы намного жестче большей части инструментальных материалов, из которых изготавливают режущий инструмент. Поэтому для решения задачи обрабатываемости алюминиевых МКМ ищут новые и совершенствуют старые технологии формообразования.

### Ультразвуковые технологии в механической обработке алюминиевых МКМ

Одним из перспективных методов формообразования труднообрабатываемых, высоконаполненных алюминиевых МКМ, которые отличаются хрупкостью и высокой твердостью, является механическая обработка, выполняемая с наложением ультразвуковых колебаний различной направленности на режущий инструмент.

Комбинирование вращения инструмента с наложением на него ультразвуковых колебаний в совокупности с применением смазывающе-охлаждающей жидкости

обеспечивает предотвращение наклепа материала на инструмент, а также значительно снижает (до 50%) силы резания. Такая гибридная обработка способствует уменьшению трения между режущим инструментом и заготовкой, существенно сохраняя стойкость инструмента и повышая качество обработанной поверхности (шероховатость – до  $R_a < 0,1$  мкм) [16].

Ультразвуковая технология фрезерования реализуется при помощи двух основных элементов обрабатывающего оборудования [17]. Первый – электронный компонент – частотный генератор, формирующий колебания и устанавливаемый непосредственно в обрабатывающий центр. Второй, и самый важный, элемент – это ультразвуковой привод, состоящий из специализированного держателя инструмента HSK (оправка выполнена по стандарту DIN 69893) с пьезоэлектрическим генератором (рис. 4). Механические колебания генерируются исключительно в держателе инструмента HSK, таким образом, механическая обработка на обрабатывающем центре может производиться и в стандартном, и в ультразвуковом режиме.



Рис. 4. Принцип технологии ультразвуковой обработки ULTRASONIC

При ультразвуковой токарной обработке, так же как и при фрезерной, на резец с помощью специализированного агрегата накладываются высокочастотные низкоамплитудные колебания, за счет чего предотвращается постоянный контакт режущей части инструмента с заготовкой (рис. 5).

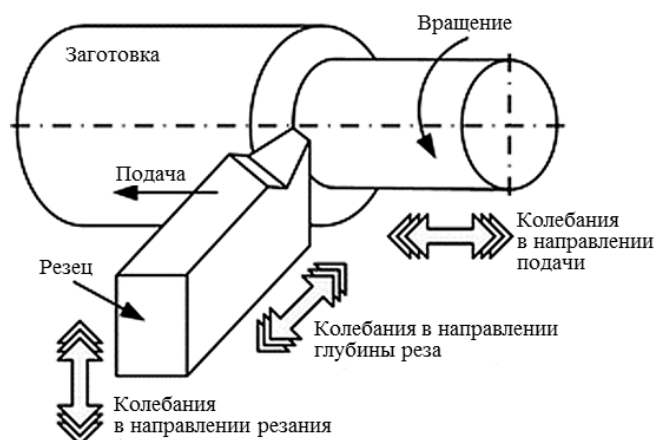


Рис. 5. Принцип ультразвуковой токарной обработки

По сравнению с традиционным точением ультразвуковая токарная обработка обеспечивает минимизацию контакта труднообрабатываемого материала с режущим инструментом, предотвращает наклеп, снижает усилия при обработке до 50%, что повышает качество поверхности до  $R_a < 0,1$  мкм.

В работе [18] представлен ход экспериментов по обработке пяти образцов из дисперсно-упрочненного алюминиевого МКМ состава А359–20% (по массе)  $SiC_p$ . После гибридного точения на каждом образце измеряли шероховатость трехкратно (табл. 1). У образца М5 – наилучший показатель шероховатости, однако качество поверхности остальных образцов алюминиевых МКМ, также обработанных с применением ультразвуковых колебаний, не всегда лучше, чем у образца М4, обработанного без ультразвуковых колебаний вибрации. Величины параметров  $R_a$  и  $R_t$  для образца М5 соответственно на 21 и 33% меньше, чем у образца М4. Это подтверждает тот факт, что, помимо колебаний, большое влияние на формообразование оказывают условия режима резания, глубина резания, скорость подачи и скорость резания.

Таблица 1

Данные экспериментов и средние значения шероховатости образцов из алюминиевого МКМ

Условный номер образца	Наличие ультразвуковых колебаний	Глубина резания, мкм	Скорость резания, м/мин	Скорость подачи, мкм/об	Шероховатость, мкм	
					$R_a$	$R_t$
М1	Да	3	1,5	15	0,134	1,415
М2	Да	1	3	15	0,099	1,016
М3	Да	3	3	5	0,187	1,548
М4	Нет	1	1,5	5	0,090	0,859
М5	Да	1	1,5	5	0,071	0,578

Примечание.  $R_a$  – среднее арифметическое значение шероховатости, состоящее из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины;  $R_t$  – максимальная высота профиля шероховатости.

Данные табл. 1 демонстрируют эффективность применения ультразвуковой токарной обработки при резании труднообрабатываемых МКМ.

### Методы получения неразъемных соединений алюминиевых МКМ

При изготовлении высокотехнологичных изделий с использованием алюминиевых МКМ актуальной проблемой, помимо обрабатываемости, является создание неразъемных соединений материалов. Логично предположить, что методы, которые применяют для получения неразъемных соединений алюминиевых сплавов, могут использоваться и для алюминиевых МКМ. Однако следует учитывать, что свойства алюминиевых МКМ характеризуются повышенными значениями. На основе данных, представленных в работе [19], составлена табл. 2 с обобщающими оценками технологических методов соединения алюминиевых МКМ. Несмотря на то что критерии для табл. 2 рассмотрены только для алюминиевых МКМ, использован ряд критериев для оценки методов, включающих: простоту технологии, прочность (с точки зрения металлургии и содержания дефектов) и физико-механические свойства получаемого соединения.

В области технологии сварки низконаполненных алюминиевых МКМ ведутся непрерывные исследования, но в настоящее время несколько способов считаются хорошо изученными и получили широкое распространение. Наибольшее применение нашли сварка трением с перемешиванием и сварка диодным лазером высокой мощности.

**Оценка технологических методов соединения алюминиевых МКМ,  
полученных разными способами изготовления**

Технологический процесс	Оценка качества методов получения заготовки		
	прокаткой	экструзией	литьем
Газовая дуговая сварка вольфрамом (GTAW)	Хорошо	Хорошо	Хорошо
Сварка металлическим электродом в газовой среде (GMAW)	Хорошо	Хорошо	Хорошо
Лазерные методы	Неудовлетворительно	Неудовлетворительно	Неудовлетворительно
Электронно-лучевая сварка	Неудовлетворительно	Неудовлетворительно	Неудовлетворительно
Конденсаторная сварка (CDW)	Хорошо	Не применяется	Не применяется
Сварка трением	Не применяется	Хорошо	Хорошо
Диффузионная сварка	Отлично	Отлично	Отлично
Магнитно-импульсная дуговая стыковая сварка (МИАВ)	Не применяется	Отлично	Не применяется
Стыковая сварка оплавлением	Не применяется	Хорошо	Хорошо
Пайка	Отлично	Отлично	Отлично
Клеевое соединение	Хорошо	Хорошо	Хорошо

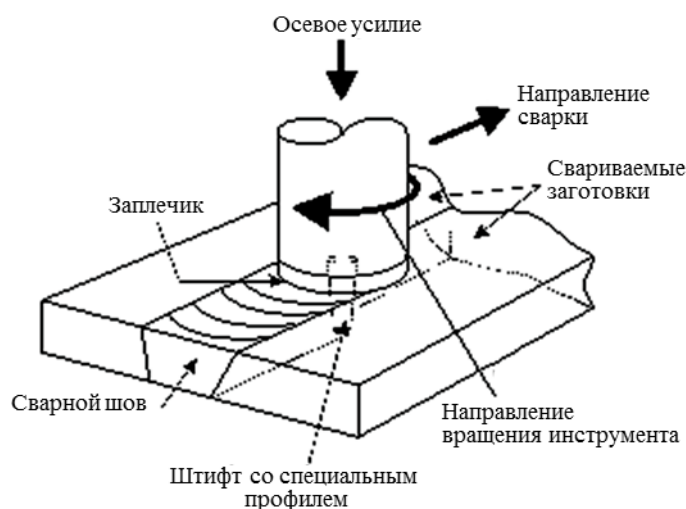


Рис. 6. Принцип сварки трением с перемешиванием

Сварка трением с перемешиванием (рис. 6) представляет собой твердофазный процесс соединения, лишенный недостатков, так как связан с расплавлением и испарением металла [20]. В методе используется нерасходуемый инструмент для соединения экструдированных деталей без плавления материала заготовки, т. е. для процесса сварки не требуется расходуемых электродов, флюсов и защитной среды. Тепло генерируется трением между вращающимся инструментом и материалом заготовки, что приводит к размягчению области рядом с инструментом. В то время как инструмент перемещается вдоль линии соединения, он механически смешивает две пластины металла и выковывает горячий и размягченный металл под действием механического давления, которое прикладывается инструментом, подобно соединению глины или теста. При сварке материалов системы Al-SiC из-за интенсивной пластической деформации

происходит разрушение оксидной пленки на поверхности контакта, что способствует однородности и прочности сварного соединения. Данный метод позволяет получить прочность сварного соединения 92% от прочности самого композиционного материала [21].

Существует несколько проблем соединения алюминиевых МКМ системы Al–SiC традиционными методами: с одной стороны, это высокая реакционная способность между карбидом кремния и расплавленным алюминием, продуцирующая карбид алюминия – хрупкое и гигроскопичное соединение, которое сильно ухудшает свойства материала; с другой стороны, плохая смачиваемость частиц карбида кремния расплавленным алюминием имеет тенденцию к образованию пористости, неоднородному распределению армирующих частиц, способствующих изъянам соединения.

В настоящее время стали доступны диодные лазеры большой мощности. Такие лазеры с мощностью свыше 6 кВт имеют повышенную долговечность, по сравнению с другими лазерами, а также обладают возможностью работы в режиме непрерывного луча. Одним из главных преимуществ этих лазеров является их высокая энергетическая эффективность – больше в ~10 раз, чем в твердотельных лазерах; расход энергии такого оборудования намного меньше, чем у оборудования для альтернативной лазерной технологии; размеры, стоимость и потребление энергии вспомогательного оборудования (например, охладителей или источников излучения) также значительно меньше [22].

Специалисты из Университета имени короля Хуана Карлоса (Испания) провели исследования свариваемости алюминиевых МКМ [22], где в качестве энергетического источника использовали диодный лазер высокой мощности, а сварные швы выполняли на подложках из алюминиевого МКМ состава A356–75% (по массе) SiC<sub>p</sub>. Проведены два опыта при различных условиях мощности излучения, скорости перемещения лазера и давлении в рабочей камере. В первом опыте на подложку помещали магнийсодержащую присадку ER5356, покрытую вдоль линии сварного шва золь-гелем на основе диоксида кремния (рис. 7, а). Во втором опыте осуществляли процесс лазерной пайки вдоль совмещенных торцов двух подложек, также обработанных золь-гелем (рис. 7, б).

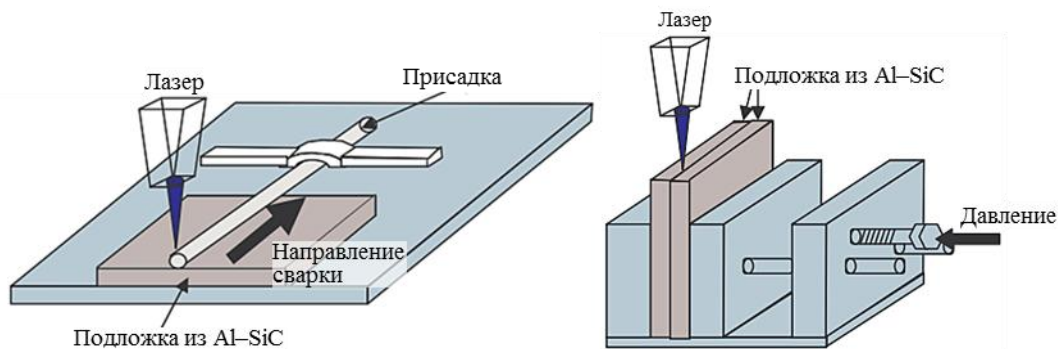


Рис. 7. Схема сварки (а) и пайки (б) алюминиевых МКМ

Лазерное излучение, необходимое для сварки или пайки МКМ, приводит к вытеснению алюминия из материала, оставляя поры и зазоры в области сварного шва. Для того чтобы противодействовать тенденции алюминия к вытеканию наружу, исследователи увеличили избыточное давление рабочей атмосферы до 1 бар (~0,1 МПа). Это привело к уменьшению объема вытесненного алюминия до 90%, а покрытие золь-гелем диоксида кремния предотвратило образование микротрещин или макроскопических дефектов на поверхности обрабатываемого материала.

Таким образом, благодаря использованию различных стратегий обработки поверхности и применения покрытия на основе золь-геля диоксида кремния удалось получить непрерывные швы без ухудшения качества соединения алюминиевых МКМ.

Получение неразъемных соединений из алюминиевых МКМ на основе алюминиевых сплавов возможно реализовать при помощи современных технологий, таких как сварка трением с перемешиванием, лазерная сварка с применением присадочных материалов и т. п. Однако необходимо проводить дополнительные работы по исследованию параметров технологических процессов и разработке оптимальных режимов, позволяющих получать сварной шов со стабильными прочностными свойствами.

### Заключения

Рассмотрены особенности современных методов механической обработки (технология ультразвуковой токарной и фрезерной обработки) и получения неразъемных соединений (лазерная сварка, сварка трением с перемешиванием) на примере алюминиевых МКМ.

Определен ряд проблемных вопросов, возникающих при механической обработке алюминиевых МКМ. Показано, что качество поверхности обрабатываемого материала зависит от параметров резания (скорости главного движения резания, скорости подачи, глубины резания) и геометрической формы режущего инструмента. Истирающая природа частиц упрочняющей фазы высоконаполненных алюминиевых МКМ при резании значительно ухудшает геометрическую форму режущего инструмента, что приводит к неравномерности обработки и падению качества обрабатываемой поверхности. Прогрессивным методом формообразования поверхностей алюминиевых МКМ является ультразвуковая технология точения или фрезерования, которая обеспечивает минимизацию контакта труднообрабатываемого материала с режущим инструментом, предотвращает наклеп, снижает усилия при обработке до 50%, что повышает качество поверхности до  $R_a < 0,1$  мкм.

Помимо проблемы механической обработки, применение алюминиевых сплавов в узлах перспективных изделий невозможно без решения задачи создания неразъемных соединений из алюминиевых МКМ. Наиболее перспективными методами соединений являются сварка трением с перемешиванием и лазерная сварка, позволяющие получать сварные швы со стабильными прочностными характеристиками.

Сварка трением с перемешиванием обладает определенными преимуществами: отсутствуют расходимые электроды, флюсы и защитная среда, а из-за интенсивной пластической деформации происходит разрушение оксидной пленки на поверхности контакта, что способствует однородности и прочности сварного соединения. Данный метод позволяет получить прочность сварного соединения 92% от прочности самого композиционного материала.

Лазерная сварка в свою очередь обладает такими преимуществами, как: высокая производительность, низкая трудоемкость, высокое качество сварных соединений, возможность сварки в труднодоступных местах и разных пространственных положениях, гибкость процесса. Существуют примеры использования данного метода при сварке подложек из алюминиевого МКМ состава А356–75% (по массе) SiC<sub>p</sub>. Однако для получения сварных соединений со стабильными свойствами требуется продолжение исследований в области уточнения параметров технологических процессов сварки и по разработке оптимальных режимов процессов.

**Библиографический список**

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
3. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
4. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
5. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
6. Narayana Murty S.V.S., Nageswara Rao B., Kashyap B.P. On the hot working characteristics of 6061Al–SiC and 6061–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particulate reinforced metal matrix composites // *Composites science and technology*. 2003. Vol. 63. P. 119. DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00197-5.
7. Previtali B., Poggi D., Taccardo C. Application of traditional investment casting process to aluminum matrix composites // *Composites: Part A*. 2008. Vol. 39. P. 1606. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.07.001.
8. Rino J., Sivalingappa D., Koti H., Jebin V.D. Properties of Al6063 MMC Reinforced With Zircon Sand and Alumina // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2013. Vol. 5. Is. 5. P. 72–73. DOI: 10.9790/1684-0557277.
9. Li X., Seah W.K.H. Tool wear acceleration in relation to workpiece reinforcement percentage in cutting of metal matrix composites // *Wear*. 2001. Vol. 247. P. 161–171. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00524-X.
10. Ozben T., Kilickap E., Cakir O. Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 198. P. 574–579. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.06.082.
11. El-Gallab M., Sklad M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites. Part I. Tool performance // *Journal of Materials Processing Technology*. 1998. Vol. 83. P. 151–158. DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00054-5.
12. El-Gallab M., Sklad M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites. Part III. Comprehensive tool wear models // *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. Vol. 101. P. 10–20. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00351-9.
13. El-Gallab M., Sklad M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites. Part IV. Residual stresses in the machined workpiece // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 152. P. 23–34. DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00072-7.
14. Коврижных А.М. Обобщение решения Ли–Шеффера в теории резания металлов // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 418. №2. С. 184–187.
15. Nikouei S.M., Yousefi R., Kouchakzadeh M.A., Kadivar M.A. Cutting Model in Machining of Al/SiCp Metal Matrix Composite // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 410. P. 291–297. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.410.291.
16. Приписнов Я.А., Гришина О.И. Современные методы механической обработки композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. №10 (70). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61.
17. Feucht F., Ketelaer J., Wolff A., Mori M., Fujishima M. Latest machining Technologies of Hard-to-cut Materials by Ultrasonic Machine Tool // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 14. P. 148–152. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.040.

18. Zhong Z.W., Lin G. Ultrasonic assisted turning of an aluminium-based metal matrix composite reinforced with SiC particles // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 27. Is. 11–12. P. 1077–1081. DOI: 10.1007/s00170-004-2320-3.
19. Ellis M.B.D. Joining of Al-Based Metal Matrix Composites // *Materials and Manufacturing Processes*. 1996. Vol. 11. P. 45–46. DOI: 10.1080/10426919608947460.
20. Sheikh-Ahmad Y., Ali D.S., Deveci S., Almaskari F., Jarrar F. Friction stir welding of high density polyethylene-Carbon black composite // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 264. P. 402–413. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.09.033.
21. Periyasamy P., Mohan B., Balasubramanian V. et al. Multi-objective optimization of friction stir welding parameters using desirability approach to join Al/SiCp metal matrix composites // *Transactions of Nonferrous Metals Society China*. 2013. Vol. 23. P. 942–955. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62551-0.
22. Rams J., Ferrer M., Múnez C.J., Urena A. High-power diode laser welding of highly reinforced Al–SiC composites // *13th European Conference on Composite Materials (Jun 2–5, 2008)*. URL: <http://www.escm.eu/docs/eccm13/1312.pdf> (дата обращения: 09.01.2020).