

УДК 669:539

## КОМПОЗИТ С МАТРИЦЕЙ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, АРМИРОВАННОЙ ВОЛОКНАМИ САПФИРА

© 2022 г. В. М. Кийко<sup>а</sup>, \*, В. П. Коржов<sup>а</sup>, В. Н. Курлов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская область, 142432 Россия

\*e-mail: kiiko@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 22.05.2021 г.

Твердофазным методом диффузионной сварки получены слоисто-волоконистые композитные образцы иерархически организованной структуры с матрицей, содержащей титан, интерметаллиды системы титан–алюминий и твердые растворы алюминия в титане, однонаправленно армированной непрерывными монокристаллическими волокнами сапфира. Волокна получены модифицированным методом Степанова, обеспечивающим повышенную прочность и увеличение производительности их изготовления. Механические испытания и структура поверхностей разрушения образцов демонстрируют нехрупкий характер разрушения композита, содержащего хрупкие компоненты.

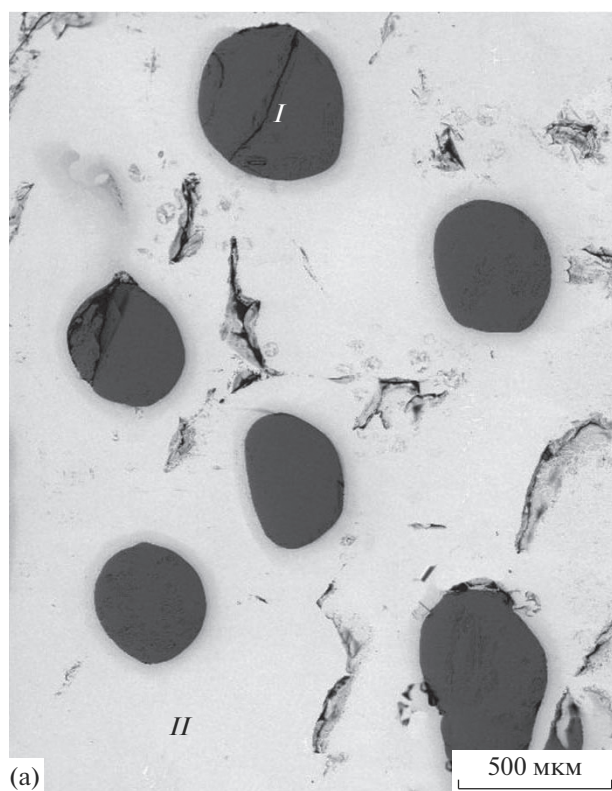
**Ключевые слова:** композит, матрица, титан, сапфир, волокна, слои, фольга, порошок, диффузионная сварка, структура, интерметаллиды, твердые растворы, нехрупкое разрушение.

**DOI:** 10.31857/S1028096022020054

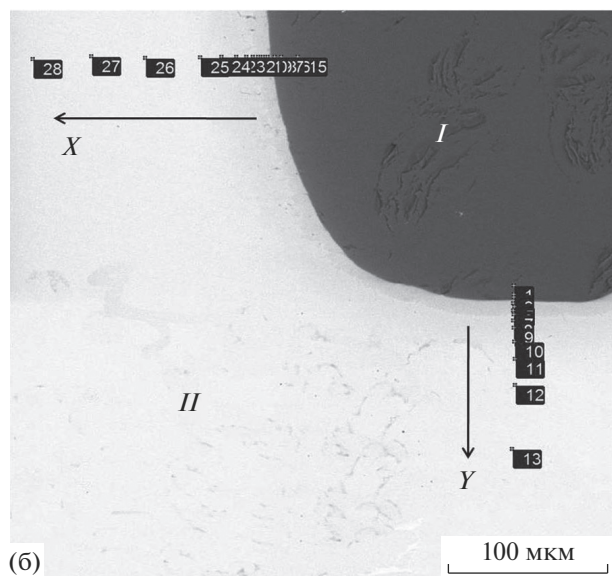
### ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности транспортных средств авиационной и космической техники тесно связано с увеличением удельных характеристик и рабочих температур конструкционных материалов в таких изделиях. Материалы на основе титана остаются весьма привлекательными для использования в элементах конструкций газотурбинных двигателей, например, компрессорных лопаток, а также фюзеляжей и в автомобильной промышленности. Они обладают достоинствами, как-то: низкой плотностью, высокими механическими характеристиками, а также коррозионной стойкостью. Титану и его сплавам традиционно посвящают международные конференции, например [1], и проводят работы по исследованию результатов применения прогрессивных, в том числе аддитивных технологий [2]. Кроме того, титан включают в состав новых высокоэнтропийных сплавов [3]. Однако возможности традиционных титановых сплавов практически исчерпаны [4, 5]. Продвижение в области механических свойств и рабочих температур заключается в разработке новых композитных структур и применении обычно ранее не используемых соединений [6]. Армированные волокнами композиты с матрицей на основе металлических сплавов представляют собой особый и сложный класс материалов, в особенности на основе титана, известного своей химической активностью [4].

В работе представлена пилотная разработка новой композитной слоисто-волоконистой структуры с матрицей на основе титана, содержащей чередующиеся слои интерметаллидов системы титан–алюминий и твердых растворов алюминия в титане, армированной непрерывными монокристаллическими волокнами сапфира, полученными модифицированным методом Степанова (EFG) (EFG – Edge-defined Film-fed Growth) [7]. Такая трехкомпонентная структура потенциально способна существенным образом реализовать синергетический эффект, превосходящий эффект в двухкомпонентных композитах [8]. Волокна отличает высокая прочность, соответствующая мировому уровню, превосходящая прочность волокон, получаемых другими методами, а в нашей стране такие волокна являются уникальными [7, 9–11]. Групповой способ получения волокон приводит к приемлемой для конструкционных применений стоимости их получения, а его модификация, заключающаяся в стабилизации роста волокон, позволяет изготавливать волокна с повышенным качеством поверхности, которая обеспечивает не только рост прочности, но и возрастание их оптических свойств и теплопроводности. Оксид алюминия, имеющий близкий с титаном температурный коэффициент линейного расширения, практически решает проблему остаточных напряжений, обычно возникающих при технологических процедурах. Иерархически орга-



(a)



(б)

**Рис. 1.** Участок поперечного сечения композита: а – волокна сапфира *I* в матрице *II* на основе титана; б – схема рентгеновского элементного “точечного” микроанализа (флажки) в зоне одного из волокон вдоль осей *X* и *Y*. Направление *X* – направление прессования перпендикулярно плоскостям фольг.

низованная слоисто-волоконистая структура, содержащая разного рода неоднородности, включая границы раздела между компонентами, позволяет также достичь посредством выбора составов, гео-

метрии структуры и технологических режимов необходимой трещиностойкости композита, содержащего хрупкие компоненты.

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ, СТРУКТУРА И ИСПЫТАНИЯ КОМПОЗИТОВ

Композит изготавливали твердофазным методом [7] путем горячего прессования заготовки, представляющей собой многослойный пакет чередующихся фольг титана, алюминия и расположенных параллельно друг другу волокон сапфира, промежутки между которыми заполняли порошком гидрида титана. В результате нагрева под нагрузкой происходило компактирование заготовки, дегидрирование титана, диффузия элементов и образование твердых растворов алюминия в титане и интерметаллидов в системе титан–алюминий, а также формирование границ раздела между компонентами структуры. Диффузионную сварку выполняли в вакууме не ниже  $10^{-4}$  мм рт. ст. с остановкой при температуре  $\sim 600^\circ\text{C}$  в течение 1 ч в окончательном режиме:  $1250^\circ\text{C}$ , 1 ч, 8.3 МПа. Функция остановки заключалась в обеспечении связывания структуры плавящимся алюминием, образования твердых растворов алюминия в титане и относительно низкотемпературных интерметаллидов Ti–Al. В результате формировалась структура с достаточной плотностью. На рис. 1а показан участок поперечного сечения полученного композита.

Состав и структура композитов изучены с использованием растрового электронного микроскопа CamScan MV230 (VEGA TS 5130MM), оснащенного детекторами вторичных и отраженных электронов и энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором. Обнаружено взаимодействие волокон сапфира с титановой матрицей: кольцевые окаймления волокон серого цвета различной ширины, отличных по контрасту, указывают на их различный состав (рис. 1). На диаграмме состояний Ti–Al имеются четыре стабильных интерметаллидных соединения:  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ,  $\text{TiAl}$  и  $\text{TiAl}_3$ , а также  $\text{Ti}_2\text{Al}$  с отношениями атомов Ti/Al 1/3–3. Идентификация набора фаз в диффузионных слоях представляет известную трудность. Результаты элементного микроанализа Ti и Al в области одного из волокон приведены на рис. 1б и 2. Приборная погрешность, равная удвоенному среднеквадратическому отклонению величин измерений в каждой из “точек”, не превышает 1.2% для Al и 1.4% для Ti, что соответствует размерам значков (треугольников), показанных на графиках. Соответственно, погрешности отношений Ti/Al, определяющих химические соединения, оценочно не превышают 2.6%. Собственно, величины этих отношений попадают в указанный выше диапазон 1/3–3. Таким образом, возможно образование всего указанного ряда интерметаллидов,

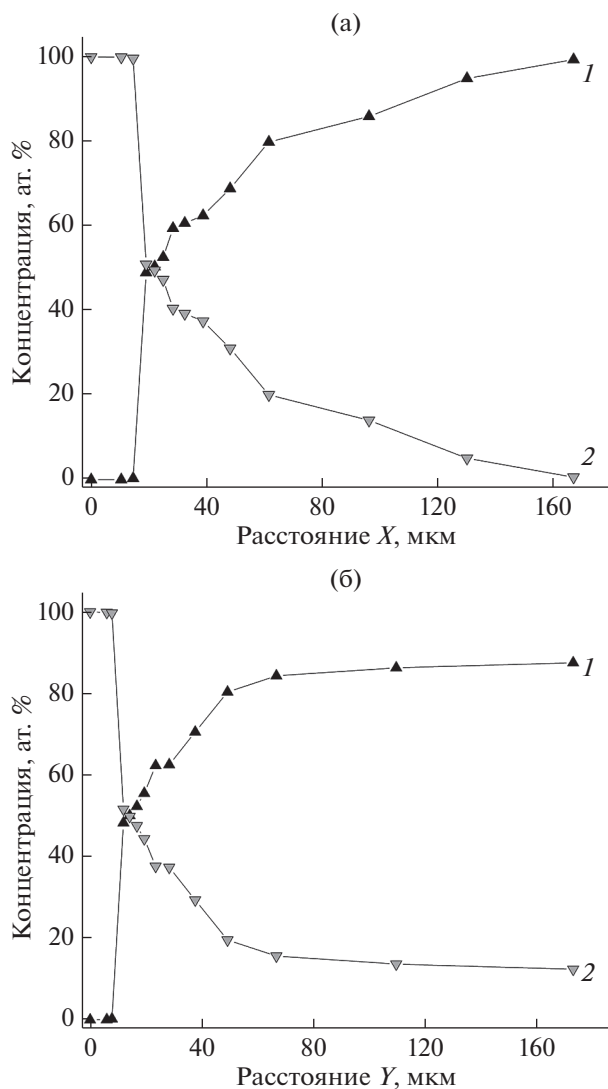


Рис. 2. Концентрационные зависимости Ti (1) и Al (2) в композите вдоль осей X (а) и Y (б) (рис. 1б).

а также твердых растворов алюминия в титане различных концентраций. В настоящей же работе достаточно качественно установить образование этих соединений. Дополнительным подтверждением их существования могут служить данные об образовании таких соединений в сходных с [12] условиях. Вид концентрационных зависимостей (рис. 2) Ti и Al указывает на анизотропию состава матрицы вдоль направлений X и Y, определяемую структурой исходной заготовки композита и направлением приложения нагрузки при диффузионной сварке.

Полученный композитный материал в виде пластины разрезали на образцы в форме стержней прямоугольного сечения, которые были испытаны на изгиб с целью определения характеристик разрушения. На рис. 3 показаны некоторые результаты испытаний, произвольно выбранных

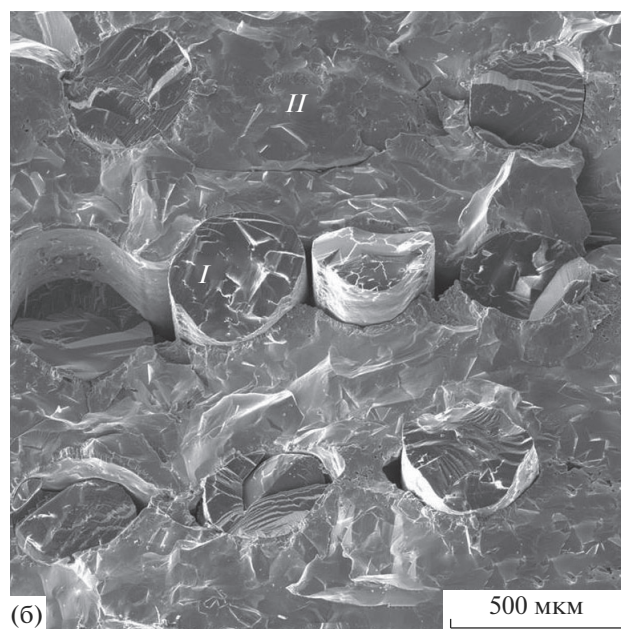
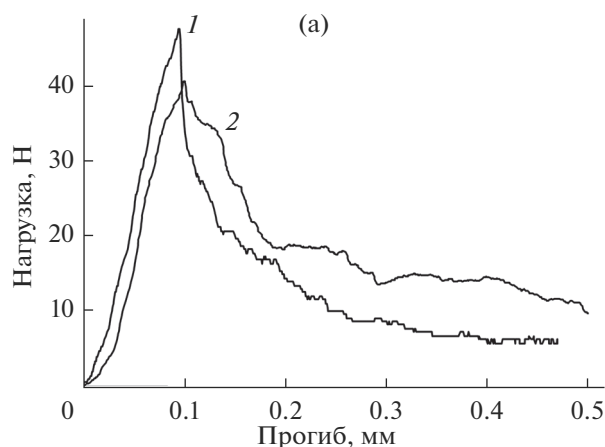


Рис. 3. Зависимости прогибов композитных образцов (1, 2) от нагрузок при испытаниях на изгиб (а). Участок поверхности разрушения материала образца (б): I – волокно, II – матрица.

образцов размером  $\sim 4 \times 3 \times 25$  мм с направлением приложения нагрузки перпендикулярно плоскостям исходных фольг (вдоль оси X). Вид деформационных кривых (рис. 3а) указывает на их незначительный разброс и нехрупкий характер разрушения образцов. Морфология поверхности разрушения (рис. 3б), представляющая одну из поверхностей макротрещины, также свидетельствует о нехрупком характере разрушения. Наблюдаются дробление волокон, вытягивание волокон из матрицы, расщепление по границам волокон–матрица, развитая топология поверхностей волокон и матрицы. Указанные множественные микроразрушения вносят существенный вклад в увеличение общей эффективной поверхностной энергии разрушения композита.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модифицированным методом Степанова, заключающимся в формообразовании, стабилизации роста волокон и групповом выращивании волокон из расплава оксида алюминия, изготовлены сапфировые монокристаллические армирующие волокна. Метод обеспечивает повышение качества и производительности процесса получения волокон.

Твердофазным методом диффузионной сварки впервые получены образцы однонаправленно армированного непрерывными волокнами монокристаллического сапфира слоисто-волоконного композита иерархической структуры с матрицей на основе титана.

Методами растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа исследована структура композитов. Установлено образование в технологическом процессе интерметаллидов системы Ti–Al и твердых растворов алюминия в титане, а также анизотропия состава матрицы. Механические испытания композитных образцов, содержащих хрупкие компоненты, на макрокопическом уровне по виду деформационных кривых указывают на нехрупкий характер их разрушения, подтверждаемый микроскопическими наблюдениями поверхностей разрушения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Госзадания № 0028-2019-0020 и при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00402) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-03-00296). Авторы выражают благодарность Абашкину С.А., Стрюкову Д.О., Шикуну С.Л.,

Прохорову Д.В. и Некрасову А.Н. за помощь в экспериментальной работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Титан*. Металловедение и технологии в 3-х томах / Ред. А.Ф. Белов. М.: ВИЛС, 1977. 1826 с.
2. *Пушилина Н.С., Кудияров В.Н., Сыртанов М.С., Кашкаров Е.Б.* // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2019. № 5. С. 75
3. *Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Печковский Э.П.* // Композиты и наноструктуры. 2011. № 2. С. 5.
4. *Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Изотова А.Ю.* // Вестн. МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № S2. С. 60.
5. *Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Изотова А.Ю., Новак А.В.* // Титан. 2012. № 4. С. 42.
6. *Гринберг Б.А., Иванов М.А.* Интерметаллиды Ni<sub>3</sub>Al и TiAl: микроструктура и деформационное поведение. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 360 с.
7. *Кийко В.М., Коржов В.П., Курлов В.Н.* // Актуальные проблемы прочности. Молодечно: Институт технической акустики НАН Беларуси, 2020. С. 287.
8. *Милейко С.Т.* // Композиты и наноструктуры. 2015. № 4. С. 191.
9. *Изотова А.Ю., Гришина О.И., Шавнев А.А.* // Тр. ВИАМ. 2017. № 5. С. 42.
10. *Гришина О.И., Кочетов В.Н., Шавнев А.А., Серпова В.Н.* // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-тех. журн. 2014. № 10. С. 05.
11. *Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А.* // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-тех. журн. 2013. № 2. С. 5.
12. *Берлин А.А., Штейнберг А.С., Краснов Е.И., Шавнев А.А., Ломов С.Б., Серпова В.М.* // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S6. 2014. С. 5. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s6-5-10>

## Composite with Titanium Based Matrix Reinforced with Sapphire Fibres

V. M. Kiiko<sup>1</sup>, \*, V. P. Korzhov<sup>1</sup>, and V. N. Kurlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Solid State Physics Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow oblast, 142432 Russia*

\**e-mail: kiiko@issp.ac.ru*

Laminated fiber composite specimens of a hierarchically organized structure with a matrix containing titanium, intermetallic compounds of the titanium–aluminum system, and solid solutions of aluminum in titanium, unidirectionally reinforced with continuous single-crystal sapphire fibers, were obtained by solid-phase diffusion welding. The fibers are obtained by the modified Stepanov method, which ensures increased strength and an increase in the manufacture productivity. Mechanical testing and the structure of the fracture surfaces of the specimens demonstrate the non-brittle nature of the fracture of the composite containing brittle components.

**Keywords:** composite, matrix, titanium, sapphire, fibers, layers, foil, powder, diffusion welding, structure, intermetallic compounds, solid solutions, non-brittle fracture.