
Новые композиты с металлической матрицей

С.Т. Милейко

Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка

В докладе дан обзор современного состояния области разработок структур и технологий получения композитов с металлической (алюминиевой, титановой, тугоплавкой) матрицей. Аргументируется необходимость замены металлических сплавов в тех конструкциях, в которых неприменимы композиты с полимерной матрицей, композитами с металлической матрицей. Наиболее важное значение эти замены имеют для авиационной и ракетно-космической техники. Особое внимание в докладе уделяется угле-титановым композитам с непрерывными волокнами.

Novel metal matrix composites

S.T. Mileiko

ISSP RAS, Chernogolovka, Russia

A review of the state of the art in developing microstructures and fabrication technologies of metal matrix composites (MMCs) is presented. A necessity of replacing metal alloys in structural elements, in which fibre reinforced polymers cannot be used, by MMCs is explained. Such replacement is most important for aerospace techniques. Among aluminium- titanium- and refractory-matrix composites discussed a special attention is given to carbon-fibre/titanium-matrix composites.

1. Введение

Композиты с полимерной матрицей, прежде всего углепластики, начиная с 1970-х годов заменяют и будут заменять металлические сплавы в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники, что приводит к повышению тактико-технических характеристик летательных аппаратов. Однако подобно тому, как примерно полвека назад металлические сплавы приближались к пределу своих физических возможностей, и углепластики появились на технической сцене, сегодня углепластики приближаются к пределу своих физических возможностей, и это требует разработки принципиально новых конструкционных

материалов, коими являются композиты с металлической матрицей (КММ).

Эти материалы имеют свою историю разработки и применения. Что касается разработки композитов с металлической матрицей, то основное внимание исследователей привлекали углеалюминиевые структуры, соответствующие работы начались полвека назад (см., например, [1]). Обзор результатов, полученных в этом направлении в прошлом веке и в первом десятилетии века нынешнего, содержится в статье [2], обзор последних результатов – в [3; 4]. По-видимому, основная проблема, не решенная должным образом, чтобы углеалюминий стал реальным конструкционным материалом, – исключение из

композита карбида алюминия, разрушающего его структуру. Решить эту проблему пытались следующими способами:

– нанесением неметаллических и металлических покрытий на волокно;

– уменьшением времени контакта волокна с расплавом матрицы путем, например, протягивания волокна через расплав матрицы с формированием проволоки;

– легированием матрицы элементом с большим сродством к углероду.

В статье [3] сделан вывод о том, что разработка реальных углеалюминиевых структур требует реализации принципиально новых идей.

Единственным КММ, впервые успешно примененным в конструкции фермы, на которой располагались три спутника системы ГЛОНАСС, был бороалюминиевый композит. Этот композит имеет каноническую структуру на основе весьма дорогих волокон, поэтому его применение ограничено. Тем не менее, исследование взаимосвязей структуры и механических характеристик бороалюминия позволило обнаружить и понять некоторые принципиальные особенности механического поведения композитов с хрупкими высокомодульными волокнами и металлической матрицей. В частности, было показано принципиальное отличие такого типа композитов и металлических сплавов [5]: трещиностойкость должным образом спроектированных композитов растет вместе с повышением прочности, отсутствует так называемый конфликт между прочностью и трещиностойкостью, характерный для металлических сплавов.

Что требуется для того, чтобы КММ вошли в технологический обиход? Полувековой опыт исследований в этой области показывает, что нужны новые технологические идеи построения неканонических структур композитов. Такого рода идеи демонстрируются в докладе на примере двух типов композитов, применение которых может существенно повысить характеристики газотурбинных двигателей.

2. Углетитановые композиты – материалы для нормальных и повышенных температур

Малый диаметр филаментов в углеволокне и высокая реакционная активность углерода не позволяют использовать ни твердофазные, ни прямые жидкофазные технологии для получения углетитановых композитов с непрерывным волокном. Первые опыты по получению композитов с короткими волокнами были описаны в кратком сообщении [6]. Было показано, и это подтвердилось в последующих

экспериментах французских авторов [7], что существующие технологии не позволяют увеличить объемное содержание волокна в композитах до величин, характерных для традиционных композитов. Это определяет относительно небольшой рост их механических характеристик по сравнению с исходной матрицей. Кроме того, такого типа материалы, будучи по структуре близкими к изотропным, лишены принципиально важной особенности композитов: возможности проектирования структуры материала с учетом будущего напряженного состояния конструкционного элемента. Поэтому было решено искать пути использования жидкофазных процедур для получения композитов с непрерывными волокнами, которые позволяли бы проектировать структуру композита с учетом внешних нагрузок, действующих на конструкционный элемент.

Решение было найдено [8; 9]: предложена иерархическая структура композита, состоящая из основной матрицы – деформируемого титанового сплава и армирующего слоя, представляющего собой слой волокон, пропитанный промежуточной матрицей с пониженной температурой плавления, которой может быть содержащая титан эвтектика (рис. 1 и рис. 2).

Важно подчеркнуть, во-первых, анизотропия прочности и модуля упругости этого КММ существенно меньше анизотропии характеристик армированных полимеров; во-вторых, структура армирующего слоя не изменится катастрофически при выдержках при температуре 800°C в течение 10 ч [10]; в-третьих, трещиностойкость композита достаточно высокая.

Примеры, характеризующие механические характеристики композитов на сегодняшнем этапе развития технологии, приводятся на рис. 3. Удельные характеристики композита существенно превышают соответствующие величины титановых сплавов (плотность образцов, представленных на рис. 3, находится в диапазоне 3,5...3,9 г/см³). Это относится, прежде всего, к упругим характеристикам.

Дальнейшее совершенствование технологии получения углетитанового композита, основанной на применении промежуточной матрицы, позволит производить компрессорные и вентиляторные лопатки авиационного газотурбинного двигателя с соответствующим снижением веса двигателя и увеличением удельной тяги.

3. Оксид-молибденовые композиты – материалы для высоких и ультравысоких температур

Замена никелевых сплавов, обеспечивающих температуру рабочей лопатки турбины до ~1100°C, более

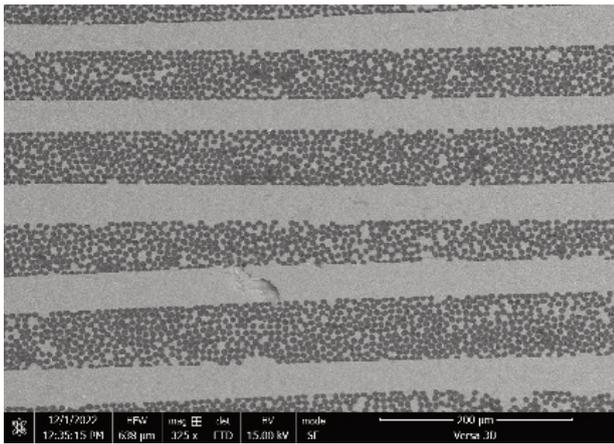


Рис. 1. Макроструктура углетитанового композита

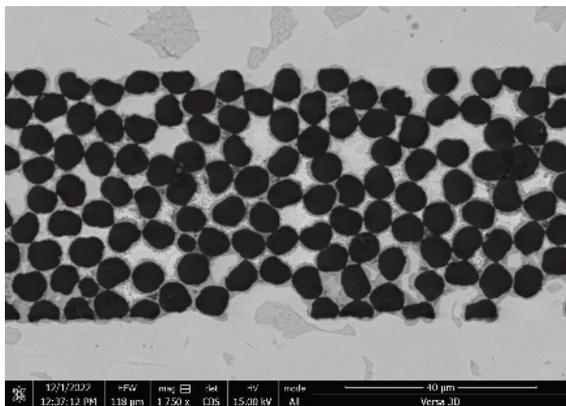
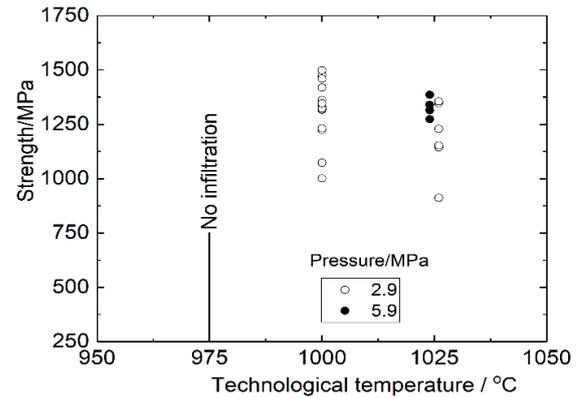


Рис. 2. Микроструктура армирующего слоя

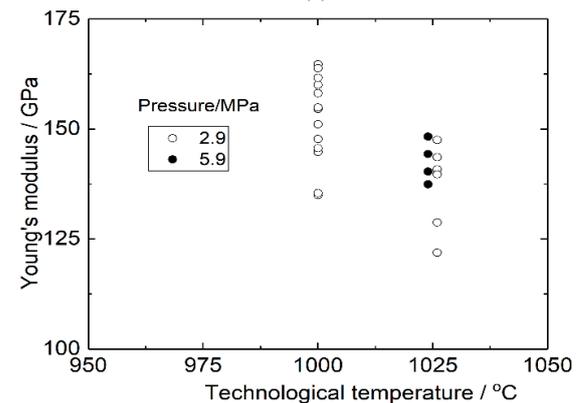
высокотемпературными материалами представляет одну из важнейших и в то же время труднорешаемую в рамках классического металловедения задачу. Повышение температуры лопатки до 1300°C приведет к уменьшению удельного расхода топлива на ~20% с соответствующим сокращением вредных выбросов.

Основное направление исследований в этой области, начавшихся четверть века назад [11], – разработка молибденовых сплавов, содержащих упрочняющие частицы Mo_3Si и Mo_5SiB_3 , при этом последние определяют и достаточно высокую для молибденовых сплавов жаростойкость. Однако достаточно крипоустойкие при температурах до 1200°C сплавы этого семейства характеризуются тем же конфликтом прочность – трещиностойкость, что и другие сплавы, прочность которых определяется торможением дислокационных движений [12; 13]. Корреляция, построенная на рис. 4 по экспериментальным данным [13], указывает на факт: увеличение содержания частиц в сплаве ведет к росту прочности и катастрофическому падению трещиностойкости.

Предварительные опыты исследовательской группы автора по армированию различными оксид-



(a)



(б)

Рис. 3. Зависимости прочности (а) и модуля Юнга (б) углетитанового композита с основной матрицей отожженного сплава ВТ16 и волокнами ЮМАТЕКС-40-3к от технологических параметров (температура и давление)

ными волокнами молибденового сплава, близкого по составу к разрабатываемым сплавам [10; 14; 15], с использованием изобретенного много лет назад способа армирования молибдена разнообразными монокристаллическими и композитными оксидными волокнами [16], показали вполне обнадеживающие результаты: сопротивление ползучести (1% деформации ползучести за 100 ч) достигает 90 МПа при 1300°C, при этом критический коэффициент интенсивности напряжений лучших образцов превышает 40 МПа·м^{1/2} (рис. 5).

Это означает, что подключение к работе прикладных институтов и промышленности позволит разработать технологию производства рабочей лопатки турбины с температурой 1300°C.

4. Заключение

Исследовательская группа автора, работающая в институте Российской академии наук, заложила фундамент для двух типов материалов перспективных авиационных двигателей. Для построения здания на этом фундаменте необходимо объединение наших усилий с усилиями

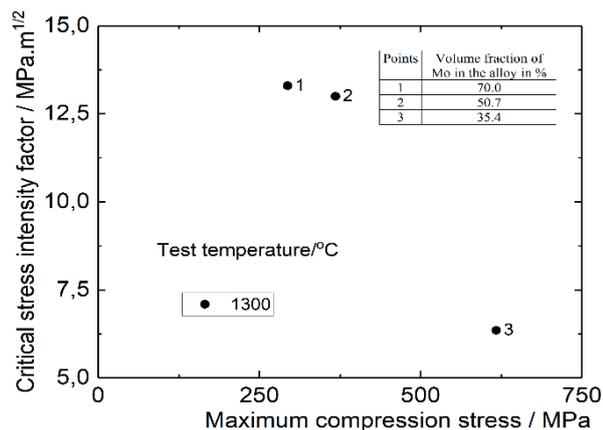


Рис. 4. Корреляция между предельным напряжением сжатия при температуре 1300°C и трещиностойкостью сплавов Mo-Mo₅SiB₂-Mo₃Si [13]

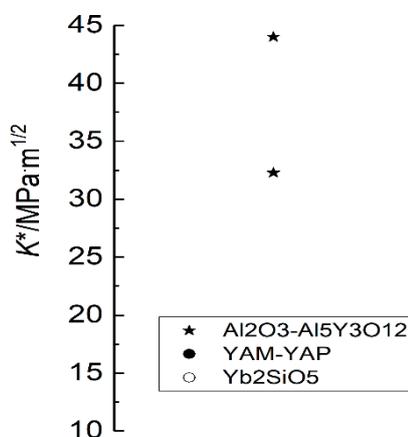


Рис. 5. Трещиностойкость композитов с матрицей из молибденового сплава и тремя типами волокон (ось абсцисс использована для разнесения композитов с различными волокнами)

конструкторов и технологов промышленности.

Результаты в настоящем обзоре, относящиеся к углетитановому композиту, получены в рамках работы по проекту РНФ № 23-19-00419.

Список использованных источников

- [1] Jackson P.W., Braddick D.M., Walker P.J. Tensile and flexural properties of carbon fibre-aluminium matrix composites // *Fibre Science and Technology*. 1972. Vol. 5, iss. 3. P. 219–236.
- [2] Carbon materials reinforced aluminum composites: A review / Y. Huang, Q. Ouyang, D. Zhang, J. Zhu, R. Li, H. Yu // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2014. Vol. 27. P. 775–786.
- [3] Милейко С.Т. Антони Келли и композиты сегодня. Часть 2: Композиты с металлической матрицей // *Композиты и Наноструктуры*. 2021. Т. 13, № 3-4 (51-52). С. 59–107.
- [4] Mileiko S. Carbon-fibre/metal-matrix composites: a

review // *Journal of Composites Science*. 2022. Vol. 6, iss. 10. P. 297.

- [5] Mileiko S.T. *Metal and Ceramic Based Composites*. Amsterdam.: Elsevier, 1997. 691 p.
- [6] Mileiko S.T., Rudnev A.M., Gelachov M.V. Low cost PM route for titanium matrix carbon fibre composites // *Powder Metallurgy*. 1996. Vol. 39. P. 97–99.
- [7] Even C., Arvieu C., Quenisset J.M. Powder route processing of carbon fibres reinforced titanium matrix composites // *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68, iss. 6. P. 1273–1281.
- [8] Способ получения композиционных материалов на основе углеволокна и металла: пат. RU 2 731 699 C1 / С.Т. Милейко, А.А. Колчин, С.Н. Галышев и др.; патентообладатель ИФТТ РАН. № 2020105321; заявл. 04.02.2020; опублик. 08.09.2020, Бюл. № 25. 12 с.
- [9] Carbon-fibre/titanium-matrix composites of a hierarchical microstructure / S.T. Mileiko, A.A. Kolchin, D.I. Krivtsov, S.N. Galyshev, N.A. Prokopenko, O.F. Shakhlevich, O.V. Petrova // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. Vol. 155. Art. 106817.
- [10] Новые композиты с металлической матрицей в Институте физики твердого тела РАН / С.Т. Милейко, А.А. Колчин, С.Н. Галышев, В.М. Прокопенко, М.Ю. Никонович, Б. Мыктыбеков // *Композиты и наноструктуры*. 2020. Т. 12, № 3. С. 88–100.
- [11] Berczik D. Oxidation resistant molybdenum alloy: US Patent 5693156. December 2, 1997.
- [12] Processing and mechanical properties of a molybdenum silicide with the composition Mo-12Si-8.5B (at.%) / J.H. Schneibel, M.J. Kramer, Ö. Ünal, R.N. Wright // *Intermetallics*. 2001. Vol. 9. P. 25–31.
- [13] Correlation between microstructure and properties of fine grained Mo-Mo₃Si-Mo₅SiB₂ alloys / M. Krüger, P. Jain, K.S. Kumar, M. Heilmaier // *Intermetallics*. 2014. Vol. 48. P. 10–18.
- [14] Высокотемпературные композиты с молибденовой матрицей и способ их получения: пат. RU 2 712333 C9 / Милейко С.Т., Колчин А.А. и др.; патентообладатель ИФТТ РАН. № 2019109319; заявл. 29.03.2019; опублик. 28.01.2020, Бюл. 4. 11 с.
- [15] Oxide-fibre/molybdenum-alloy-matrix composites: A new way of making and some mechanical properties / S.T. Mileiko, A.A. Kolchin, S.N. Galyshev, O.F. Shakhlevich, V.M. Prokopenko // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020. Vol. 132. Art. 105830.
- [16] Милейко С.Т., Казьмин В.И. Получение композитов методом внутренней кристаллизации // *Механика композитных материалов*. 1991. № 5. С. 898–908.