

ПРОЧНОСТЬ, ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И МОДУЛИ УПРУГОСТИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, НИОБИЯ И МОЛИБДЕНА

Коржов В.П., Кийко В.М., Прохоров Д.В.

Институт физики твердого тела РАН,
г. Черноголовка, Россия, E-mail: korzhov@issp.ac.ru

Необходимость повышения рабочих температур разрабатываемых жаропрочных материалов приводит к использованию композитных структур, содержащих тугоплавкие высокопрочные, но хрупкие по природе соединения. На получение слоистых композитов, сочетающих приемлемый для конструкционных материалов баланс прочности, трещиностойкости и жаропрочности нацелена настоящая работа.

Задачи решаются получением композитов, в которых достаточно пластичные слои металлических твердых растворов чередуются со слоями высокопрочных интерметаллидов. Представленные в работе материалы изготавливались твердофазным методом горячего прессования в вакууме заготовок, представляющих собой в исходном состоянии многослойные пакеты из металлических фольг. В случае получения композитов на основе Ni–Al заготовки состояли из чередующихся Ni- и Al-фольг. Для получения композитов типа Nb–Si–B или Mo–Si–B пакеты составлялись из фольг ниобия или молибдена с покрытиями суспензией смеси порошков Si/B=3 в полиэтиленгликоле. Вариации исходных соотношений металлов и (Si–B) были возможны за счет изменения толщины металлических фольг и числа покрытий. Подбор технологических режимов горячего прессования позволял формировать необходимую структуру материалов, добиваясь заданных механических характеристик.

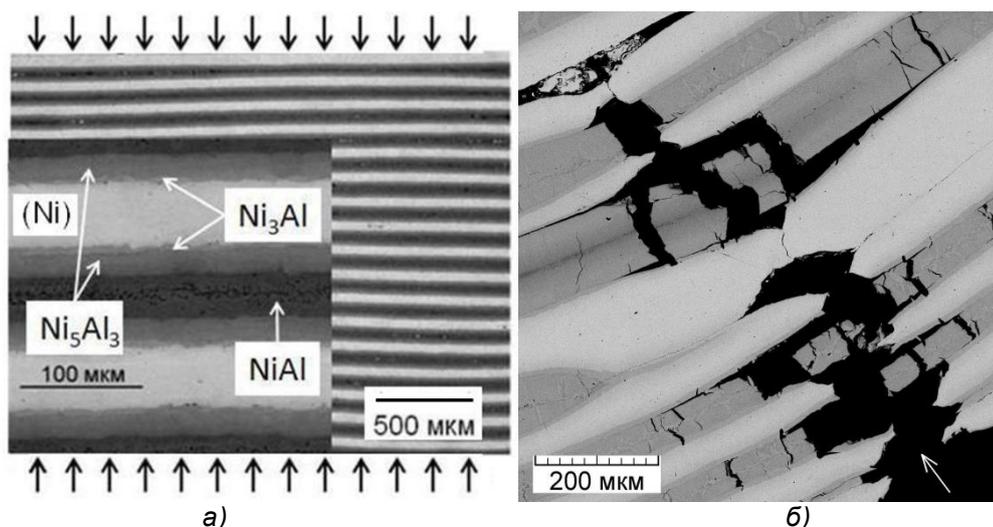


Рисунок 1 – Композит на основе Ni–Al: а – микроструктура после горячего прессования (600°C, 1 ч + 950°C, 5 ч) под давлением 0,7 МПа, стрелки сверху и снизу показывают направление приложения нагрузки [1]; б – (550°C, 1 ч, 15 МПа) + (1100°C, 1 ч, 20 МПа), микроструктура образца в месте разрушения после испытаний на прочность, нагрузка прикладывалась перпендикулярно слоям, стрелкой показано направление распространения макротрещины, (Ni) – твердый раствор Al в Ni

Примеры структур слоистых композитных материалов с указанием режимов их изготовления приведены на рисунках 1 и 2.

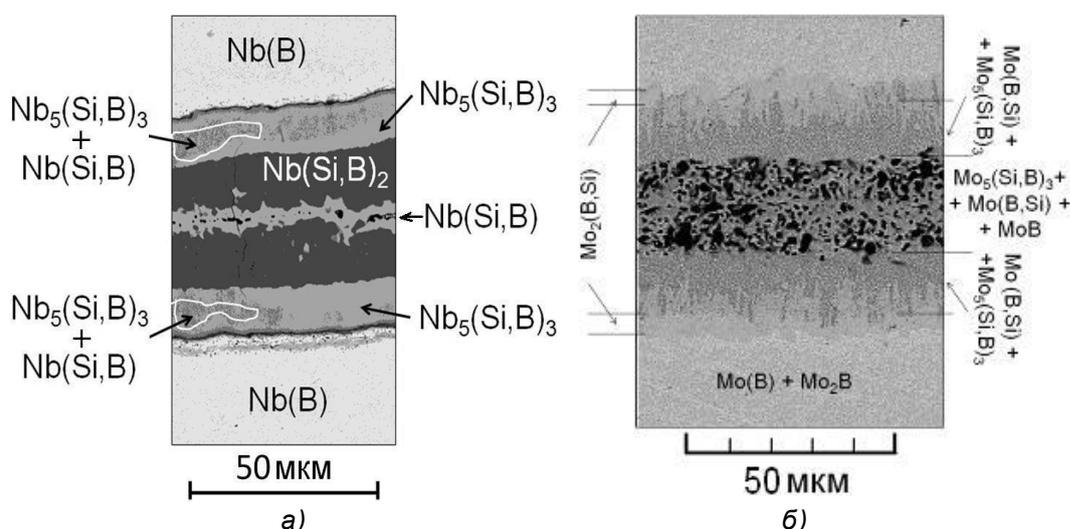


Рисунок 2 – Микроструктура диффузионных слоёвкомпозитов на основе Nb–Si–B после прессования при 1500°С, 1 ч при 14 МПа (а) и Mo–Si–B после прессования при (1500°С, 30 мин при 10,5 МПа) + (1500°С, 30 мин при 14 МПа) (б): Nb(B) и Mo(B) – твердые растворы бора в Nb и Mo. Фазовая структура образовавшихся диффузионных зон отражена в подписях на рисунках

На образцах в виде стержней прямоугольного сечения, вырезанных из композитных пластин, определялись прочности, трещиностойкости, плотности и модули упругости. Значения прочности и трещиностойкости определялись при комнатной температуре в результате испытаний образцов при трехточечном изгибе. Плотности материалов измерялись гидростатическим взвешиванием образцов в дистиллированной воде. Модули упругости материалов вычислялись на основе измерений резонансных частот поперечных колебаний образцов, их плотности и геометрии. Результаты измерений сведены в таблице 1. Значения прочности материалов достаточно высоки, величины трещиностойкости приближаются к высокопрочным конструкционным сплавам, превосходя обычные керамики, что дает право рассматривать их в качестве потенциальных претендентов для практического применения.

Таблица 1 – Прочность, трещиностойкость, плотность и модуль упругости композитных материалов при комнатной температуре. Приведены средние значения по 3–4 измерениям, режимы получения см. в подписях к рисункам

Материал	Ni-Al*	Nb-Si-B**	Mo-Si-B**
Прочность при \perp/\parallel^* , МПа	870/880	600/790	620/590
Трещиностойкость при \perp/\parallel^* , МПа·м ^{1/2}	20.0/18.0	13.0/12.0	-
Плотность, кг/м ³	7500	7200	8600
Модуль упругости, ГПа	220	130	270

* нагрузка прикладывалась перпендикулярно (\perp) и параллельно (\parallel) плоскости слоев

Образование в структуре композитов интерметаллидов приводит к понижению плотности материалов в сравнении с исходными металлами фольг – никелем, ниобием и молибденом, а также к повышению модуля упругости композитных материалов на основе Ni-Al и Nb-Si-B.

Слоистые композиты являются анизотропными по структуре, что находит свое отражение в характере деформационных зависимостей (рис.3) при механических испытаниях и в величинах прочности и трещиностойкости (табл. 1). Поэтому испытания проводились как при нагрузках P перпендикулярно, так и параллельно слоям композита (ab). Следует отметить «сложный» – «композитный» – характер разрушения всех образцов. Пример структуры после испытаний на прочность (см. рис.1,б) демонстрирует различные виды микроразрушений: множественное растрескивание хрупких интерметаллидных слоев, «шейкообразование» при деформации и разрывах

пластичных слоев твердого раствора, расслоения по границам различных слоёв, «ветвление» макротрещины. В результате микроразрушений увеличивается сопротивление разрушению композита в целом.

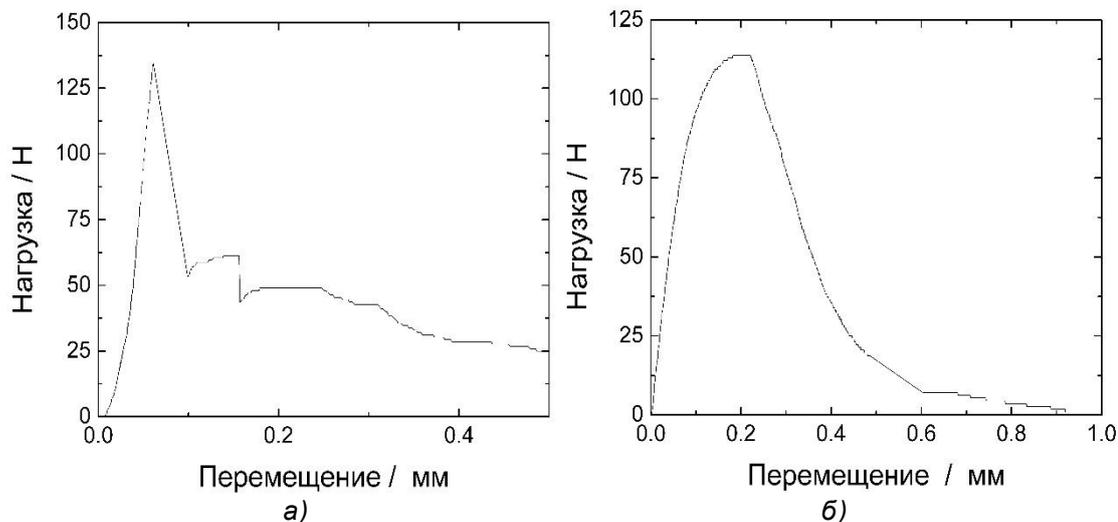


Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости нагрузка–прогиб (перемещение) для образцов Nb–Si–В при испытаниях на трехточечный изгиб: а – P⊥(ab), б – P∥(ab)

Испытания при высоких температурах композитных образцов Ni–Al и Nb–Si–В при P⊥(ab) были проведены в диапазонах 1000–1150 и 1100–1500°C соответственно. Средние значения прочности образцов в указанных температурных интервалах менялись с плавным понижением от начала к концу интервалов: для Ni–Al от 290 до 160 МПа, для Nb–Si–В от 270 до 190 МПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-03-00687 А и № 17-08-1739 А).

Список литературы:

1. Коржов В.П., Карпов М.И., Кийко В.М. Многослойный композит на основе никеля, армированный интерметаллидными слоями // Физика и техника высоких давлений. -2010. Т. 20, №4. - С. 101-108.