

ПОЛЗУЧЕСТЬ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА ИЗ Nb-СПЛАВА С КАРБИДО-СИЛИЦИДНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Прохоров Д. В., Карпов М. И., Коржов В. П., Кийко В. М., Желтякова И. С.

Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка, Россия
prohorov@issp.ac.ru

Введение

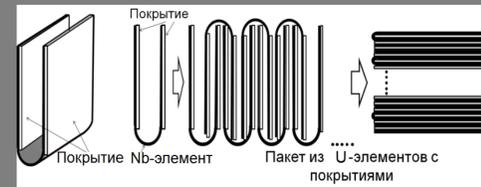
В материаловедении конструкционных жаропрочных материалов в настоящее время сложилось такое положение, что сплавы на основе железа и никеля уже достигли своего потолка рабочих температур 1000–1100°C и не могут удовлетворять современным требованиям промышленности. Поэтому большая работа проводится по разработке жаропрочных сплавов на основе титана, благодаря его малому удельному весу, ниобия и молибдена. Однако Ti-сплавы в состоянии поднять потолок рабочих температур не более, чем на 50–100°C. Прорыв в этой области материаловеды связывают с ниобием и молибденом. Первые разработки конструкционных сплавов на их основе по традиционным плавильным технологиям показали, что ниобий и молибден должны привести к получению жаропрочных сплавов с потолком рабочих температур до 1500°C и даже выше.

Разработки слоистых композитов на основе ниобиевых и молибденовых сплавов могут привести к получению жаропрочных материалов с наиболее высоким потолком рабочих температур. Высокие температуры плавления, прочность при высоких температурах и сопротивление ползучести соединений ниобия и молибдена, а также возможность организации повышенного сопротивления окислению, открывают реальную перспективу получения жаропрочных композитов на их основе.

Кроме того, объединение в структуре композитов тугоплавких металлов и их интерметаллических соединений с алюминием и кремнием или карбидо- и боридо-силицидов значительно снижает плотность композитов по сравнению с плотностью чистых ниобия и молибдена за счет относительно низкой плотности их химических соединений.

Жаропрочные композиты из Nb-сплавов с (C–Si)-упрочнением

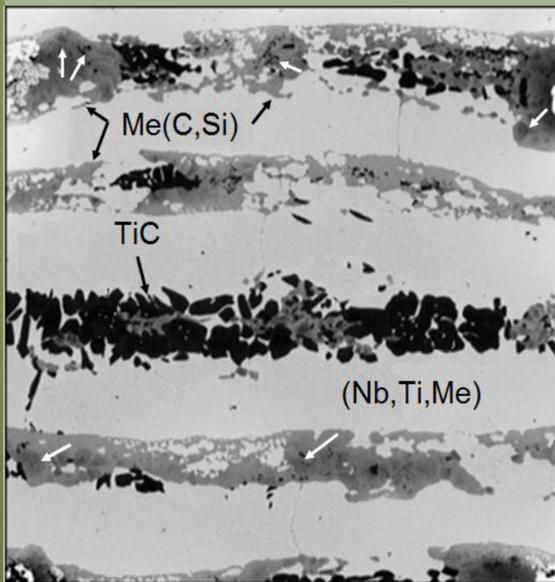
Элементами сборки служили U-образные элементы из Nb-фольги с покрытиями (рис. 1). Количество элементов в пакете – 15. Толщина Nb-фольги – 50 мкм. Одна наружная и одна внутренняя стороны U-элементов покрывались суспензионным слоем многокомпонентной смеси порошков в поливинилбутирале. Состав порошковой смеси: 55,2Nb–22,0Ti–8,9Mo–5,6Si–5,4ZrH2–1,7Cr–1,2 мас. % Al. Цирконий в смеси порошков был в виде гидрида, который распадался при нагреве, начиная с 350°C. До сварки пакет, изготовленный из U-элементов, сохранял целостность, представляя собой чередование Nb-фольги и покрытий. Количество Nb-слоев в пакете – 30 шт., количество покрытий – на одно меньше.



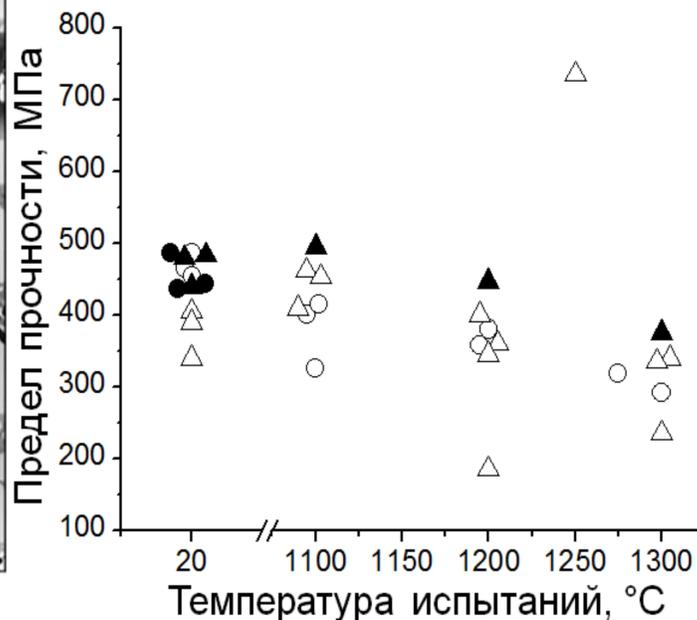
U-элемент из Nb-фольги с покрытиями, схема сборки многослойного пакета и пакет из U-элементов с покрытиями

Диффузионную сварку пакетов Nb/(C–Si) проводили при 1400°C по двум режимам, которые отличались временем и давлением при сварке пакетов: 5 ч при 8,4 МПа и 10 ч при 15,3 МПа соответственно для композитов 1 и 2. Углерод проникал в порошковое покрытие при сварке из атмосферы в камере установки, которая была оснащена графитовым нагревателем. Толщина пакетов после сварки – 3,3 и 2,7 мм соответственно. У композита с большими временем и давлением сварки она оказалась заметно меньше.

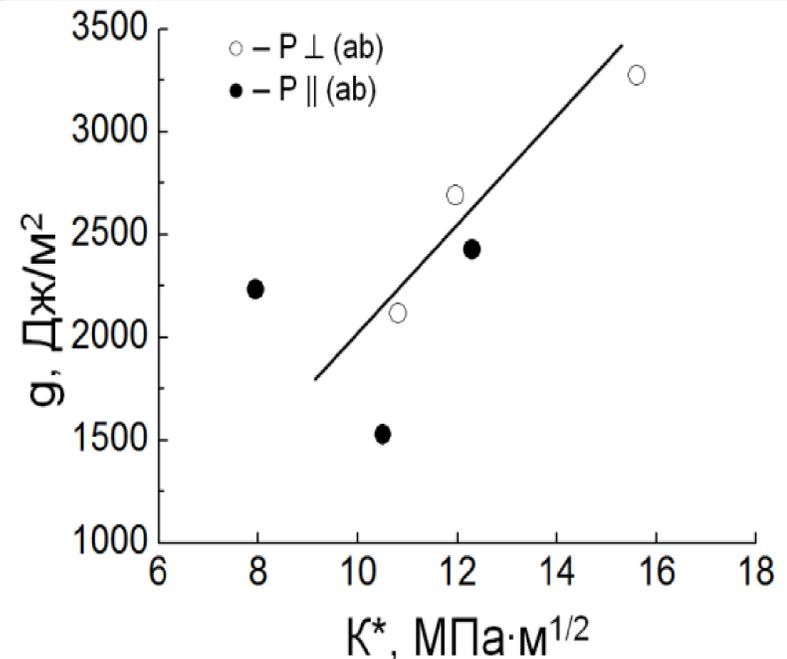
РЕЗУЛЬТАТЫ



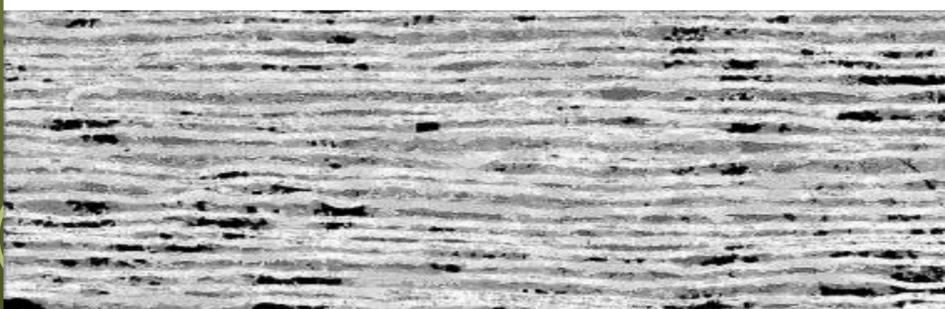
Микроструктура композита Nb/(C–Si)1 после диффузионной сварки при 1400°C и давлении 8,4 МПа в течение 5 ч



Зависимости предела прочности σ_B для композитов Nb/(C–Si)1 (○, ●) и 2 (△, ▲) от температуры испытания при P ⊥ (ab) (○ и △) и P || (ab) (● и ▲)



Корреляция между трещиностойкостью K* и эффективной поверхностной энергией g



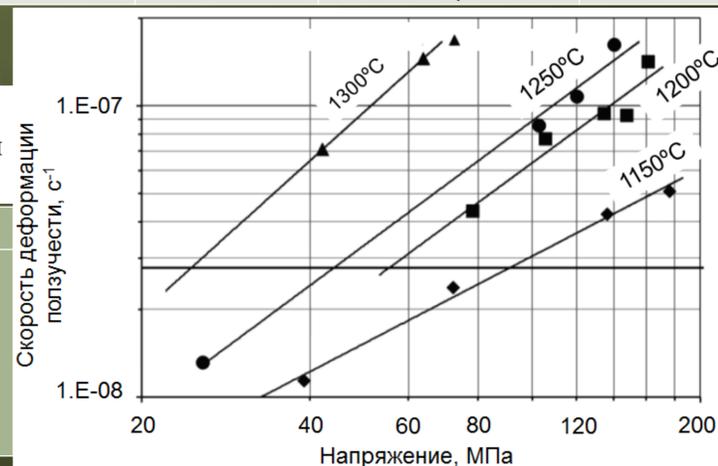
Макроструктура поперечного сечения композита Nb/(C–Si)3 после диффузионной сварки при 1500°C и давлении 19 МПа в течение 3 ч

Результаты испытаний композитов Nb/(Si–C)2 на трещиностойкость

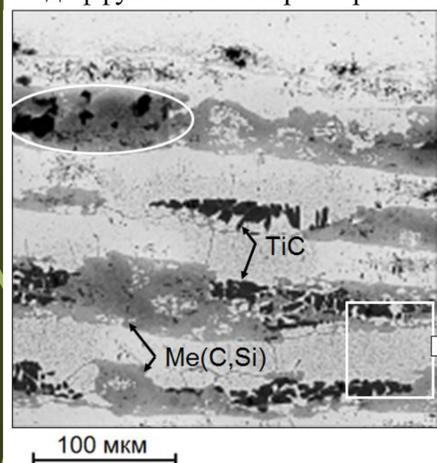
| Приложение нагрузки | K*, МПа·м ^{1/2} | g, Дж/м ² | Приложение нагрузки | K*, МПа·м ^{1/2} | g, Дж/м ² |
|---------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|----------------------|
| P ⊥ (ab) | 12,0 | 2690 | P (ab) | 7,9 | 2230 |
| | 10,8 | 2120 | | 12,9 | 2430 |
| | 15,6 | 3280 | | 10,5 | 1530 |

Численные значения 100-часового предела текучести композита Nb/(Si–C)3 и величины наклона прямых $\dot{\epsilon}(\sigma)$

| T _{исп.} , °C | σ_{100}^T , МПа | n |
|------------------------|------------------------|------|
| 1150 | 90 | 1,02 |
| 1200 | 55 | 1,41 |
| 1250 | 45 | 1,64 |
| 1300 | 25 | 1,73 |



Зависимости скорости ползучести от напряжения для композита Nb/(Si–C)3 при температурах в интервале 1150–1300°C. Горизонтальная линия проведена на уровне 100-часовой прочности



Слоистая структура композита Nb/(C–Si)3 после диффузионной сварки и фрагмент слоя с эвтектической структурой