

УДК 538.911

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ СПЛАВА 5БДСР  
ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

И. М. ХОЗРОМ, А. Д. ОШОРОВ, И. В. УШАКОВ

Университет науки и технологий МИСИС

Москва, Россия

Нанокристаллические металлические сплавы представляют собой уникальные материалы, обладающие улучшенными механическими характеристиками и множеством потенциальных преимуществ относительно традиционных материалов [1, 2]. Существенным недостатком таких материалов является малая толщина, что ограничивает их применение в качестве элемента конструкции [3, 4]. Одним из способов устранения данного недостатка является создание композита на основе таких сплавов.

Создание композитных материалов представляет собой перспективное направление в физике конденсированного состояния и материаловедении, позволяющее формировать материалы с определенными характеристиками [5, 6]. В исследовании разработан композитный материал на основе нанокристаллического сплава марки 5БДСР с легкоплавким сплавом SD-318. Нанокристаллический сплав марки 5БДСР произведен на Ашинском металлургическом заводе в виде ленты толщиной 30 мкм и шириной 25 мм; химический состав: 77 % Fe + 1 % Cu + 3 % Nb + 13 % Si + 3 % В (вес. %). Легкоплавкий сплав SD-318 был в виде паяльной пасты; химический состав: 63 % Sn + 37 % Pb (вес. %).

Были проведены экспериментальные исследования с использованием различных легкоплавких сплавов с целью выбора оптимального сплава для создания композита с нанокристаллической лентой. В результате анализа полученных данных выявлено превосходство SD-318 над другими легкоплавкими сплавами из-за низкой температуры плавления ( $183^{\circ}$ ) и вязкости (200 Па), обеспечивающей равномерное распределение сплава по поверхности нанокристаллической ленты. Процесс подготовки образцов включал в себя очистку лент, нанесение флюса и покрытие паяльной пастой. Подготовленные образцы помещали в электрическую печь при  $200^{\circ}\text{C}$  на 5 мин. Готовые образцы подвергали одноосному растяжению на разрывной машине INSTRON 3365. Скорость деформации составляла 0,1 мм/с; ширина испытываемых образцов – 25 мм; длина рабочей зоны – 60 мм. Испытания проводились в трех температурных режимах для образцов сплава марки 5БДСР и для полученных композитов.

Результаты испытания аморфных нанокристаллических образцов марки 5БДСР показали, что напряжение при комнатной температуре составляет 1300 МПа. При температуре 220 К напряжение уменьшается на 4,1 %, а при температуре 78 К – на 16,2 %. При этом максимальное относительное удлинение образца 2,87 % наблюдается при температуре 220 К, а минимальное – при комнатной температуре – 1,81 %. Относительное удлинение при температуре 78 К составляет 2,08 %.

После проведения испытаний на растяжение нанокристаллического образца наблюдалось разрушение образца на множество мелких частиц при низких температурах. Разрыв образца произошел без формирования выраженной шейки, характерной для более пластичных материалов. Полученные частицы представляли собой острые и нерегулярные обломки, свидетельствуя о характере хрупкого разрыва. Фрагментация материала произошла в результате интенсивного распространения трещин в зонах локализации напряжений. Микроанализ структуры показал, что частицы образовались вдоль границ зерен, что подчеркивает влияние металлической нанокристаллической структуры на процесс разрушения. Полученные фрагменты обладали нанокристаллической текстурой с неровной поверхностью и микроскопическими трещинами вдоль границ зерен, подтверждая характер механического разрушения.

Результаты испытаний показали, что напряжение композита при комнатной температуре составляет 630 МПа, при температуре 220 К напряжение уменьшается на 12,8 %, а при температуре 78 К – на 29 %. Максимальное относительное удлинение композита 2,3 % наблюдается при комнатной температуре 298 К, а минимальное 1,6 % – при 78 К. Относительное удлинение композита при 220 К составляет 1,9 %.

При криогенных температурах композит разрушался на два больших куса с образованием небольших сколов на границе разрушения. Это может означать, что происходит вязкое разрушение, т. е. не наблюдается полное охрупчивание композита при воздействии таких температур.

Полученные результаты могут быть применены для формирования композитных материалов с желаемыми характеристиками и расширения теоретического понимания физики разрушения таких материалов. Разработанные композиты на основе нанокристаллической ленты и легкоплавкого сплава могут быть использованы в условиях низких температур.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Температура хрупко-вязкого перехода трубной стали К65 – экспериментальное определение и сопутствующие признаки / А. Б. Арабей [и др.] // Вести газовой науки: науч. техн. сб. – 2020. – № 2 (44). – С. 152–161.
2. **Ушаков, И. В.** Микроразрушение многослойного композита на основе аморфно-нанокристаллического металлического сплава / И. В. Ушаков, А. Д. Ошоров // Вестн. Моск. авиационного ин-та. – 2022. – Т. 29, № 3. – С. 246–252.
3. **Мильман, Ю. В.** О механизмах деформации в аморфных металлических сплавах / Ю. В. Мильман, Д. В. Козырев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 50–55.
4. **ГОСТ 1497–84.** Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Изд-во стандартов, 1986. – 22 с.
5. **Шинкин, В. Н.** Предварительная правка стальной полосы / В. Н. Шинкин // Черные металлы. – 2018. – № 5. – С. 34–40.
6. **Safronov, I. S.** Targeted alternation in properties of solid amorphous-nanocrystalline material in exposing to nanosecond laser radiation / I. S. Safronov, A. I. Ushakov // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – P. 469–474.