

Высокотемпературная прочность ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическим защитным покрытием. Сообщение 1. Характеристики кратковременной прочности

В. В. Бухановский^а, В. А. Борисенко^а, В. К. Харченко^а, И. Мамузич^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Загребский университет, Шишак, Хорватия

Анализируются экспериментальные данные по кратковременной прочности и пластичности ниобиевого сплава 5ВМЦ системы Nb–W–Mo–Zr в исходном состоянии, после отжига и при нанесении силицидно-керамического защитного покрытия, полученные при его испытаниях в вакууме, инертной среде и на воздухе в диапазоне температур 290...2270 К. Исследуется процесс зарождения и развития микротрещин в защитном покрытии и матрице при высокотемпературном статическом растяжении. Установлены значения предельных пластических деформаций, при которых композит сохраняет несущую способность в высокотемпературных агрессивных и окислительных газовых средах.

Ключевые слова: ниобиевый сплав, силицидно-керамическое защитное покрытие, композит, высокие температуры, кратковременная прочность, несущая способность.

Введение. Использование ниобия и его сплавов при изготовлении деталей и конструктивных элементов для работы в условиях высоких температур, агрессивных и окислительных газовых сред во многом зависит от разработки надежных защитных покрытий. Для материалов данного класса в качестве жаростойких покрытий наибольшее применение получила керамика на основе силицидов молибдена и гафния. Известно, что технология нанесения керамических шликерных покрытий оказывает влияние на структуру материала и его механические свойства [1–6].

Цель работы заключалась в изучении прочности и пластичности ниобиевого сплава 5ВМЦ и композита (сплав 5ВМЦ – силицидно-керамическое покрытие) при кратковременном статическом растяжении в диапазоне температур 290...2270 К. Исследуется процесс зарождения и развития микротрещин в покрытии и матрице при высокотемпературном механическом нагружении в упругопластической области. Показано влияние термической обработки по режиму, имитирующему температурный цикл нанесения покрытия, на механические характеристики сплава.

Методика проведения испытаний. Сплав 5ВМЦ (марка 5В2МЦ-2) системы Nb–W–Mo–Zr относится к низколегированным жаропрочным сплавам ниобия с твердорастворным упрочнением и имеет следующий химсостав, мас. %: 4,5...5,6 W; 1,7...2,3 Mo; 0,7...1,15Zr; 0,02 С. Благодаря оптимальному содержанию легирующих элементов он обладает уникальным комплексом физико-химических и технологических характеристик, оптимально сочетающих высокие показатели жаропрочности и низкотемпературной пластичности с хорошей технологичностью при механической обра-

ботке и сварке [1, 2]. Сплав получен методом вакуумно-дуговой плавки с последующей горячей деформацией на пруток диаметром 60 мм и лист толщиной 1 и 2 мм. На заключительной стадии технологического процесса прутки и листы подвергали рекристаллизационному отжигу при температуре 1670 К в течение 2 ч. В состоянии поставки листы сплава 5ВМЦ являются изотропными. Структура материала мелкозернистая с равномерными полиэдрическими зёрнами размером 25–50 мкм [7].

Механические характеристики сплава 5ВМЦ и композита определяли по результатам испытаний на растяжение плоских и цилиндрических (пятикратных) пропорциональных образцов на установках 1246-Р, ВТУ-2В и УВП-1 в вакууме, инертной среде и на воздухе [8–10].

Скорость деформирования образцов в процессе испытаний составляла 2 мм/мин, что соответствовало относительной скорости деформации $\sim 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Погрешность показаний испытательных машин и приборов при измерении нагрузки и деформации не превышала $\pm 2\%$. При каждой температуре испытывали не менее трех образцов, вырезанных соответственно из листового проката и прутка в продольном направлении. Ширина рабочего участка плоских образцов составляла 5 мм, диаметр рабочей части цилиндрических образцов – 3 и 5 мм. После изготовления образцы отжигали в вакууме не хуже 0,1 Па при температуре 1470 К в течение 1 ч для снятия внутренних напряжений, вызванных механической обработкой. С целью исследования влияния на структуру и механические свойства сплава ступенчатого высокотемпературного нагрева, соответствующего технологическому процессу нанесения защитного силицидно-керамического покрытия, часть образцов, вырезанных из прутка, подвергали отжигу при температурах 1470 (1 ч), 1670 (30 мин) и 2230 К (15 мин). Термическую обработку проводили в печи СНВЛ-1.3.1/16-М2 в вакууме не хуже $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па.

Керамическое покрытие на рабочем участке образца формировалось путем погружения (два раза) в шликерную суспензию, состоящую из 40% Мо и 60% силицидной смеси, содержащей, в свою очередь, 80% силицидов молибдена (MoSi_2 и Mo_5Si_2) и 20% дисилицида гафния (HfSi_2), с последующим низко- и высокотемпературным отжигом и вакуумным диффузионным силицированием в парах кремния при 1470 К в течение 15 ч с активатором. После нанесения первого слоя шликера образцы отжигали* при 1670 К, 30 мин, после повторного нанесения силицидно-керамической смеси того же состава – при 2230 К, 15 мин. Толщина покрытия составляла 100–120 мкм.

Образцы из сплава 5ВМЦ в исходном состоянии и после отжига деформировали до полного разрушения. Одну часть образцов с силицидно-керамическим покрытием также деформировали до полного разрушения, другую – до определенного заданного уровня упругой или пластической деформации (0,2; 0,5; 1,0; 1,5% и т.д.). При испытаниях записывали полные диаграммы растяжения либо их начальные участки. Структуру и характер разрушения образцов сплава и композита после высокотемпературного

* Работы по термической обработке образцов и нанесению силицидно-керамических покрытий выполнены в НПО “Композит” Н. И. Зарубовой и Н. Н. Мельниковой.

растяжения изучали методами оптической металлографии на микроскопе "Neophot-2", методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JSM-35CF. Шлифы вырезали из рабочего участка образца электроискровым способом, затем полировали и подвергали химическому травлению.

По результатам испытаний определяли стандартные механические характеристики материала: предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$; условный предел текучести $\sigma_{0,2}$; предел прочности $\sigma_{\text{в}}$; относительное удлинение δ ; относительное равномерное удлинение $\delta_{\text{р}}$ и относительное сужение ψ . Величину пластической деформации образца находили по диаграмме растяжения и контролировали по реперным точкам, нанесенным с обеих сторон рабочей части образца. Остаточное удлинение измеряли на оптическом микроскопе МИР-12 с точностью $\pm 0,01$ мм. Относительное равномерное удлинение определяли по диаграмме растяжения как соответствующее наибольшей нагрузке P_{max} .

В экспериментах применяли лучевой метод нагрева, суть которого заключалась в тепловом излучении нагревателей специальной конструкции, изготовленных по типу нагревательных элементов печей электросопротивления, либо промежуточной втулки-нагревателя, одетой на образец и разогреваемой токами высокой частоты (метод индукционного нагрева). Время нагрева до температуры испытания после стабилизирующей выдержки при 770 К в течение 15 мин не превышало 10...15 мин. При индукционном методе общее время нагрева составляло 5...10 мин. В случае проведения испытаний на воздухе нагреватели и нагревательные втулки, изготовленные из молибдена или сплава 5ВМЦ, покрывали силицидно-керамическим защитным покрытием, состав которого приведен выше.

При механических испытаниях температуру на образце измеряли вольфрамиевыми термопарами ВР 5/20 либо с помощью оптического пирометра ЛОП-72. Системы нагрева экспериментальных установок обеспечивали предельные отклонения от задаваемой температуры испытания в пределах $\pm 1\%$. Градиент температуры по длине рабочего участка образца не превышал 10...20 град в диапазоне 1270...1770 К и 25...30 град при более высоких температурах.

Кинетику зарождения и развития повреждений в композите изучали на плоских образцах специальной формы. Для металлографических исследований на одной из боковых поверхностей рабочего участка образцов удаляли силицидно-керамическое покрытие и приготавливали шлифы. Перед механическими испытаниями в покрытии обнаруживали и фотографировали зоны вероятного зарождения повреждений, которые идентифицировали реперными точками (зоны А, В, С и т.д.). После высокотемпературной пластической деформации в вакууме до заданной величины образец охлаждали до комнатной температуры и проводили металлографическое исследование шлифа. При этом обследовали уже имеющиеся зоны, а также выявляли новые очаги зарождения повреждений и фотографировали их. Затем образец растягивали при той же температуре до более высокого уровня деформации и опять проводили металлографические исследования. Методика позволяет исследовать кинетику зарождения и развития повреждений (трещины, поры) в керамическом покрытии, переходной зоне и матрице.

В связи с рассеянием экспериментальных данных проводили их статистическую обработку. При этом вычисляли среднее значение (математическое ожидание) \bar{x} , выборочное среднеквадратическое отклонение (СКВО) S_x и доверительные интервалы для математического ожидания механических характеристик при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Нижний гарантированный предел прочностных и пластических характеристик x_n определяли как нижний толерантный предел для уровня доверительной вероятности $\gamma = 0,99$ и вероятности $p = 1 - \alpha = 0,95$ [11].

Результаты исследований и их обсуждение. Механические свойства ниобиевого сплава 5ВМЦ и композита (сплав 5ВМЦ – силицидно-керамическое покрытие) приведены в табл. 1–4. Характеристики кратковременной прочности и пластичности листового проката сплава 5ВМЦ толщиной 1 мм (табл. 1) получены по результатам испытаний достаточно представительной выборки образцов трех промышленных плавов [7]. В табл. 2 представлены механические характеристики сплава, полученные при испытаниях в вакууме на цилиндрических образцах, вырезанных из прутка диаметром 60 мм в исходном состоянии (отжиг при 1670 К, 2 ч) и после термической обработки по режиму нанесения силицидно-керамического покрытия. Из данных табл. 1 и 2 видно, что характеристики прочности и пластичности сплава 5ВМЦ несколько отличаются, причем в зависимости от температуры испытания это отличие может колебаться от 5 до 50%.

Т а б л и ц а 1

Механические характеристики ниобиевого сплава 5ВМЦ в диапазоне температур 290...2270 К (отжиг при 1670 К, 2 ч)

| $T_{\text{исп}}, \text{ К}$ | $\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{\text{пл}}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$ | $\delta_{\text{p}}, \%$ | $\delta, \%$ |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------|
| 290 | 443 | 315 | 338 | 15,9 | 32,2 |
| 520 | 332 | 232 | 237 | 18,2 | 34,8 |
| 770 | 276 | 180 | 199 | 10,2 | 21,6 |
| 1070 | 295 | 155 | 182 | 11,9 | 20,8 |
| 1270 | 245 | 140 | 166 | 10,1 | 22,8 |
| 1470 | 145 | 100 | 120 | 7,5 | 50,9 |
| 1520 | 127 | 100 | 109 | 6,1 | 49,4 |
| 1770 | 68 | 54 | 62 | 2,3 | 83,6 |
| 2020 | 37 | 33 | 35 | 1,3 | 96,2 |
| 2270 | 21 | 19 | 20 | 0,5 | 102,3 |

Термическая обработка сплава 5ВМЦ по режиму нанесения силицидно-керамического покрытия приводит к разупрочнению материала на 5...10% в диапазоне температур 290...1770 К и повышению на такую же величину его прочностных характеристик при более высоких температурах. Пластические характеристики отожженного материала уменьшаются в 1,3–2,0 раза по сравнению с таковыми в исходном состоянии во всем исследованном диа-

пазоне температур (табл. 2). Изменяется также характер разрушения сплава, особенно в высокотемпературной области: с вязкого внутрзеренного для материала в состоянии поставки на вязкий межзеренный для материала, прошедшего трехступенчатый высокотемпературный отжиг.

Т а б л и ц а 2

**Механические характеристики ниобиевого сплава 5ВМЦ
в диапазоне температур 290...2070 К**

| $T_{\text{исп}}, \text{ К}$ | $\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{\text{шц}}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$ | $\delta_{\text{р}}, \%$ | $\delta, \%$ | $\psi, \%$ |
|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------|------------|
| 290 | 420 | 308 | 315 | 20,7 | 41,8 | 78,6 |
| | 395 | 290 | 310 | 15,2 | 30,5 | 74,0 |
| 770 | 250 | 125 | 130 | 18,6 | 36,4 | 87,0 |
| | 235 | 130 | 133 | 13,0 | 29,6 | 96,7 |
| 1270 | 244 | 130 | 152 | 11,7 | 31,2 | 83,5 |
| | 220 | 120 | 140 | 11,8 | 29,0 | 96,7 |
| 1520 | 140 | 100 | 114 | 4,3 | 62,5 | 95,3 |
| | 124 | 92 | 110 | 3,2 | 34,4 | 98,5 |
| 1770 | 94 | 80 | 84 | 3,1 | 68,0 | 88,9 |
| | 84 | 77 | 81 | 2,9 | 51,8 | 63,6 |
| 2020 | 43 | 39 | 41 | 2,9 | 99,6 | 99,5 |
| | 47 | 40 | 43 | 3,2 | 49,2 | 64,6 |
| 2070 | 41 | 38 | 39 | 3,9 | 93,1 | 99,5 |
| | 44 | 39 | 41 | 3,3 | 47,0 | 60,7 |

Примечания: 1. Образцы вырезаны вдоль продольной оси прутка. 2. Над чертой приведены данные для материала в состоянии поставки (отжиг при 1670 К, 2 ч), под чертой – после термической обработки по режиму нанесения силицидно-керамического покрытия (трехступенчатый отжиг при 1470, 1 ч, 1670, 30 мин и 2230 К, 15 мин).

Влияние термической обработки на механические свойства и характер разрушения сплава 5ВМЦ обусловлено как ростом зерна до 250–350 мкм вследствие процессов собирательной рекристаллизации, так и повышением в материале процентного содержания проникающих путем диффузии из защитной среды печи газообразных примесей внедрения, особенно в пограничных зонах кристаллитов [2].

В табл. 3 и 4 приведены характеристики кратковременной прочности и пластичности ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическим покрытием при комнатной и высоких температурах, полученные по результатам испытаний цилиндрических и плоских образцов в вакууме, инертной среде и на воздухе. Сопоставление данных, представленных в табл. 1, 2 и 3, 4, показало следующее. Как правило, характеристики прочности композита по сравнению с материалом основы в исходном и отожженном состоянии уменьшаются на 10...40% практически во всем исследованном диапазоне температур. Однако прочностные характеристики композита, полученные на плоских образцах при температурах 1770...2020 К, примерно соответствуют аналогичным характеристикам листового материала.

Т а б л и ц а 3

Механические характеристики композита в вакууме и инертной среде

| Образец | $T_{\text{исп}}, \text{ К}$ | $\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{\text{пл}}, \text{ МПа}$ |
|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Плоский (лист толщиной 1 мм) | 1270 | $\frac{166}{-}$ | $\frac{140}{-}$ |
| | 1520 | $\frac{105}{-}$ | $\frac{96}{-}$ |
| | 1770 | $\frac{71}{-}$ | $\frac{64}{-}$ |
| | 2020 | $\frac{33}{-}$ | $\frac{30}{-}$ |
| | 2270 | $\frac{27}{-}$ | $\frac{26}{-}$ |
| Цилиндрический (пруток диаметром 60 мм) | 1270 | $\frac{140}{132}$ | $\frac{136}{102}$ |
| | 1520 | $\frac{102}{-}$ | $\frac{94}{-}$ |
| | 1770 | $\frac{70}{86}$ | $\frac{63}{80}$ |
| | 2020 | $\frac{32}{38}$ | $\frac{29}{35}$ |
| | 2270 | $\frac{26}{-}$ | $\frac{22}{-}$ |

Примечание. Над чертой приведены данные, полученные при испытаниях в вакууме, под чертой – в инертной среде (аргон).

Т а б л и ц а 4

Механические характеристики композита на воздухе и в инертной среде

| $T_{\text{исп}}, \text{ К}$ | Объем выборки | Статистический параметр | | | ГДИ для математи- ческого ожидания | Выбо- рочное СКВО | НГП |
|-----------------------------------|------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|---|-------------------------|-----|
| | | мини- мальный | макси- мальный | среднее выборочное | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| $\sigma_{\text{пл}}, \text{ МПа}$ | | | | | | | |
| 290 | 3 | 212 | 222 | 217 | – | – | – |
| 1270 | 7 | 131 | 138 | 134 | ± 3 | 2,3 | 127 |
| | 8 | 127 | 173 | 151 | ± 21 | 19,5 | 91 |
| 1770 | 11 | 42 | 80 | 63 | ± 9 | 13,6 | 25 |
| | 7 | 40 | 55 | 49 | ± 7 | 5,2 | 32 |
| 2020 | 3 | 19,5 | 20,5 | 20 | – | – | – |
| | 6 | 22,5 | 29,5 | 27 | ± 10 | 2,9 | 17 |
| $\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$ | | | | | | | |
| 290 | 3 | 228 | 334 | 232 | – | – | – |
| 1270 | 7 | 146 | 152 | 148 | ± 3 | 2,2 | 140 |
| | 8 | 144 | 183 | 166 | ± 18 | 17,0 | 113 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|
| $\sigma_{0,2}$, МПа | | | | | | | |
| 1770 | $\frac{11}{7}$ | $\frac{48}{47}$ | $\frac{85}{63}$ | $\frac{72}{56}$ | $\frac{\pm 8}{\pm 6}$ | $\frac{12,4}{5,1}$ | $\frac{37}{39}$ |
| 2020 | $\frac{3}{6}$ | $\frac{28}{28}$ | $\frac{32}{34}$ | $\frac{30}{31}$ | $\frac{-}{\pm 4}$ | $\frac{-}{3,1}$ | $\frac{-}{21}$ |
| σ_B , МПа | | | | | | | |
| 290 | 3 | 420 | 415 | 417 | - | - | - |
| 1270 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{185}{220}$ | $\frac{206}{210}$ | $\frac{195}{213}$ | - | - | - |
| 1770 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{83}{77}$ | $\frac{88}{85}$ | $\frac{86}{81}$ | - | - | - |
| 2020 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{41}{42}$ | $\frac{45}{46}$ | $\frac{43}{44}$ | - | - | - |
| δ_p , % | | | | | | | |
| 290 | $\frac{3}{-}$ | $\frac{9}{-}$ | $\frac{11}{-}$ | $\frac{10,5}{-}$ | - | - | - |
| 1270 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{2,4}{6,5}$ | $\frac{3,0}{8,5}$ | $\frac{2,7}{7,0}$ | - | - | - |
| 1770 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{1,0}{3,6}$ | $\frac{2,0}{6,0}$ | $\frac{1,5}{4,8}$ | - | - | - |
| 2020 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{4,5}{11,5}$ | $\frac{7,0}{14,0}$ | $\frac{6,0}{12,5}$ | - | - | - |
| δ , % (до разрушения) | | | | | | | |
| 290 | $\frac{3}{-}$ | $\frac{20,0}{-}$ | $\frac{24,0}{-}$ | $\frac{21,5}{-}$ | - | - | - |
| 1270 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{5,0}{10,5}$ | $\frac{5,5}{13,5}$ | $\frac{5,2}{11,5}$ | - | - | - |
| 1770 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{23,0}{41,0}$ | $\frac{27,5}{45,0}$ | $\frac{25,5}{43,0}$ | - | - | - |
| 2020 | $\frac{3}{3}$ | $\frac{37,0}{87,5}$ | $\frac{44,0}{92,0}$ | $\frac{41,0}{90,0}$ | - | - | - |

Примечания: 1. НГП – нижний гарантированный предел, ГДИ – граница доверительных интервалов. 2. Над чертой приведены данные, полученные при испытаниях на воздухе, под чертой – в инертной среде (аргон). 3. Характеристики прочности композита определяли на плоских образцах толщиной 2 мм.

Еще в большей степени нанесение силицидно-керамического покрытия влияет на пластичность рассматриваемого сплава. В частности, при испытаниях в инертной среде относительное удлинение образцов из композита уменьшается по сравнению с таковым образцов из сплава 5ВМЦ в 1,5–2 раза, а при испытаниях на воздухе – в 3–4 раза (табл. 1, 4).

Механические характеристики композита, полученные в аналогичных условиях на плоских и цилиндрических образцах, отличаются несущественно. Характеристики прочности и пластичности сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическим покрытием при испытаниях на воздухе, как правило, ниже, чем полученные в инертной среде. Причем если прочностные показатели композита при испытаниях на воздухе уменьшаются незначительно, то пластические – весьма заметно.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что при нанесении на образцы сплава 5ВМЦ защитного силицидно-керамического покрытия на механические характеристики материала основы влияние оказывают как сопутствующая термическая обработка материала, так и протекающие физико-химические процессы в диффузионной зоне, в частности диффузия кремния из поверхностных слоев покрытия в металл [12].

Исследование поврежденности композита при высокотемпературном растяжении по описанной выше методике показало следующее. В исходном состоянии в покрытии имеют место множественные поры округлой формы размером от 2,5 до 12 мкм, а также отдельные трещины длиной до 25 мкм. Причем поры расположены преимущественно вблизи наружной поверхности композита и практически отсутствуют со стороны матрицы (рис. 1,а). При высокотемпературном нагружении в упругой области (до предела пропорциональности) заметных изменений в покрытии и матрице не обнаружено.

В процессе деформирования композита при 1770 К трещины могут зарождаться от дефектов, расположенных как на его поверхности, так и в теле силицидно-керамического покрытия (рис. 1,б–г). На определенных этапах деформирования они могут раскрываться, выходя на поверхность (рис. 1,г), и залечиваться со стороны наружной поверхности композита. В последнем случае трещина представляет наибольшую опасность, поскольку, будучи не заметной с наружной поверхности конструктивного элемента, она может прорасти в матрицу.

Термическая обработка и физико-механические процессы в диффузионной зоне, сопутствующие нанесению силицидно-керамического покрытия, а также высокотемпературная пластическая деформация композита в процессе эксплуатации, и особенно в агрессивных и окислительных газовых средах, представляют существенную опасность с точки зрения охрупчивания материала и снижения характеристик прочности даже для такого высокопластичного сплава, как 5ВМЦ. Поэтому наличие в композите трещин, проникающих в матрицу, можно считать недопустимым дефектом.

Трещины подобного рода наблюдались в отдельных зонах композита уже на начальном этапе упругопластического деформирования при пластической деформации порядка 0,7% (рис. 2,а). Стрелкой на рис. 2,а обозначена волосная трещина, проникшая в глубь матрицы на 10 мкм и не заметная с наружной поверхности композита. На следующих этапах нагружения трещина устойчиво развивалась как в сторону наружной поверхности силицидно-керамического покрытия, так и в сторону матрицы. Так, после высокотемпературной деформации образца до 1,3% она проникла в матрицу на 25 мкм. В покрытии ее ширина составила 5 мкм, в матрице – 2–2,5 мкм. В

процессе продвижения трещины в глубь металла в ее вершине имеет место сформировавшаяся пластическая зона. После деформации образца до 3,9% трещина углубилась в матрицу еще на 5 мкм и расширилась до 18 мкм в покрытии и до 7,5 мкм в матрице (рис. 2,б). При этом ее вершина притупилась и приобрела округлую форму с радиусом 4 мкм, что свидетельствует о высокой релаксационной способности ниобиевого сплава.

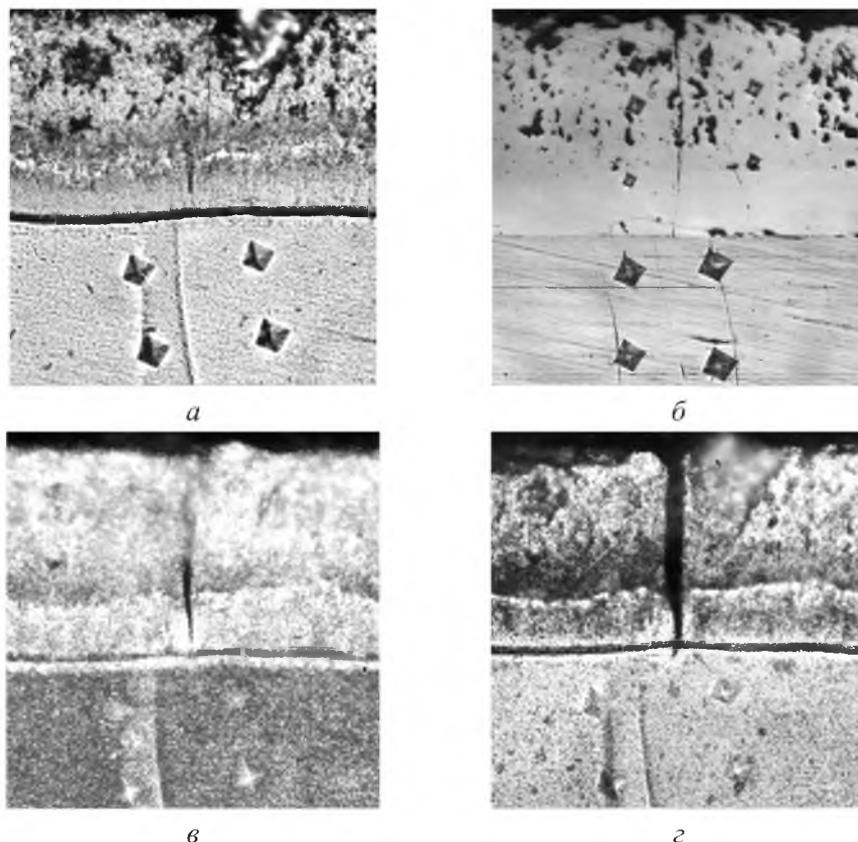


Рис. 1. Микрофотографии зоны *A* вероятного зарождения трещины в композите: *a* – исходное состояние; *б*, *в*, *г* – деформация соответственно 0,7, 1,3 и 3,9%. ($T_{исп} = 1770 \text{ K}$, $\times 400$.)

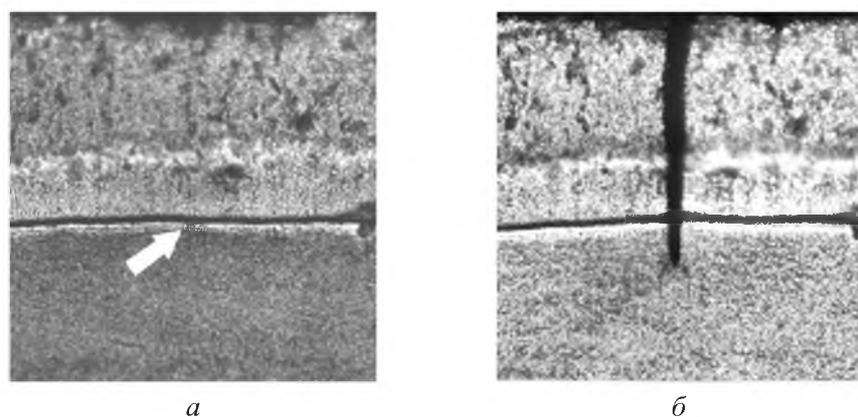


Рис. 2. Микрофотографии зоны *B* зарождения трещины в композите: *a*, *б* – деформация соответственно 0,7 и 3,9%. ($T_{исп} = 1770 \text{ K}$, $\times 400$.)

При пластической деформации выше 5% наряду с множественными трещинами в композите отмечалось отслоение покрытия от матрицы. А при температуре 2070 К, что на 50 градусов выше верхней границы рабочего диапазона температур данного композита, имело место частичное оплавление силицидно-керамического покрытия.

Установлено, что с помощью предложенной методики можно на одном образце проследить кинетику зарождения и развития очагов разрушения, а также выявить степень их опасности на различных стадиях деформирования. Кроме того, методика позволяет связать поврежденность композита с используемой в инженерных расчетах количественной величиной (уровень пластической деформации). В частности, представляется очевидным, что пластические деформации выше 0,5% для деталей и конструктивных элементов из сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическими покрытиями, работающих в условиях высоких температур, недопустимы. Недостатком методики является то, что разработана она для испытаний только в защитной среде.

Выводы

1. Определены характеристики кратковременной статической прочности и пластичности композита (сплав 5ВМЦ – силицидно-керамическое покрытие) при комнатной и высоких температурах в вакууме, в среде инертного газа и на воздухе.

2. Термическая обработка, сопутствующая технологическому процессу нанесения силицидно-керамического покрытия, приводит к разупрочнению сплава 5ВМЦ на 5...10% в диапазоне температур от комнатной до 1770 К и к повышению его прочностных характеристик при более высоких температурах. Пластические свойства отожженного материала снижаются в 1,3–2 раза во всем исследованном температурном интервале.

3. Нанесение силицидно-керамического покрытия приводит к уменьшению характеристик кратковременной прочности сплава 5ВМЦ на 10...40% практически во всем исследованном диапазоне температур. При этом пластические свойства композита по сравнению с материалом основы ниже в 1,5–4 раза.

4. Предельные значения пластических деформаций, при которых композит сохраняет работоспособность в высокотемпературных окислительной и агрессивных газовых средах, не должны превышать 0,5%.

Резюме

Аналізуються експериментальні дані щодо короткочасної міцності та пластичності ніобієвого сплаву 5ВМЦ системи Nb–W–Mo–Zr у початковому стані, після відпалу і з силицидно-керамічними захисними покриттями, що отримані при його випробуванні у вакуумі, інертному середовищі та на відкритому повітрі у діапазоні температур 290...2270 К. Досліджено кінетику зародження і розвитку мікротріщин у захисному покритті і матриці в процесі високотемпературного статичного розтягу. Встановлено значення граничних пластичних деформацій, за яких композит зберігає несучу здатність у високотемпературних агресивних та окисних газових середовищах.

1. *Тугоплавкие металлы и сплавы* / Под ред. Г. С. Бурханова, Ю. В. Ефимова. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
2. *Металлургия и технология сварки тугоплавких металлов и сплавов на их основе* / Под ред. С. М. Гуревича. – Киев: Наук. думка, 1982. – 304 с.
3. *Самсонов Г. В., Борисова А. Л.* Состояние и перспективы использования защитных покрытий в народном хозяйстве // *Защитные покрытия на металлах*. – Киев: Наук. думка, 1977. – Вып. II. – С. 3 – 8.
4. *Терентьева В. С., Богачкова О. П.* Гетерофазные защитные покрытия для жаропрочных материалов // *Материаловедение*. – 1998. – № 9. – С. 2 – 7.
5. *Горячева Е. В., Терентьева В. С.* Изучение структуры и фазового состава покрытий системы кремний–титан–молибден–бор на ниобиевом сплаве после высокотемпературных испытаний // V Междунар. симп. “Динамика и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” (Ярополец, февр. 1999). – Ярополец: Гефест, 1999. – С. 59 – 60.
6. *Змий В. И., Ковтун Н. В.* Стабильность и жаростойкость силицидных покрытий на тугоплавких металлах // *Порошк. металлургия*. – 2002. – № 7-8. – С. 70 – 74.
7. *Bukhanovsky V. V. and Mamuzic I.* The effect of temperature on mechanical characteristics of niobium alloys of the system Nb–W–Mo–Zr // *Metallurgija*. – 2003. – 42, No. 2. – P. 85 – 90.
8. *Испытательная техника. Справочник: В 2 т.* / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – Т. 2. – 570 с.
9. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях: В 2 т.* / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1980. – Т. 1. – 535 с.
10. *Харченко В. К.* О высокотемпературной прочности тугоплавких материалов // *Пробл. прочности*. – 1980. – № 10. – С. 94 – 103.
11. *Степнов М. Н.* Статистическая обработка результатов испытаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
12. *Гецов Л. Б.* Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 591 с.

Поступила 23. 03. 2003