

Высокотемпературная прочность ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическим защитным покрытием. Сообщение 2. Характеристики секундной ползучести

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

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

^б Загребский университет, Шишак, Хорватия

Исследованы закономерности изменения характеристик секундной ползучести и длительной прочности на малых временных базах ниобиевого сплава 5ВМЦ и композита (сплав 5ВМЦ – силицидно-керамическое покрытие) в диапазоне температур 1770...2020 К. Получены значения пределов ползучести сплава и композита по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации на базе 0,1; 1,0 и 10 ч при температурах 1770, 1970 и 2020 К в вакууме, инертной среде и на воздухе.

Ключевые слова: ниобиевый сплав, силицидно-керамическое защитное покрытие, композит, высокотемпературная секундная ползучесть, предел ползучести, длительная прочность.

Введение. Ранее [1] показано, что критические значения пластической деформации, при которых композит (сплав 5ВМЦ – силицидно-керамическое покрытие) сохраняет несущую способность при высокотемпературном растяжении в окислительной и агрессивных газовых средах, не должны превышать 0,5%. Известно, что при длительном статическом нагружении металлических материалов в высокотемпературной области, даже при напряжениях намного ниже предела текучести, значительные пластические деформации, обусловленные процессами кратковременной ползучести, могут накапливаться за относительно короткое время [2]. Поэтому при назначении гарантированного ресурса безопасной эксплуатации деталей и конструктивных элементов в конкретных условиях температурно-силового нагружения необходимо учитывать закономерности изменения характеристик секундной ползучести сплава 5ВМЦ как в исходном состоянии, так и после нанесения силицидно-керамического защитного покрытия, что и является целью настоящей работы.

Методика исследований. Определение характеристик секундной ползучести и длительной прочности на малых временных базах ниобиевого сплава 5ВМЦ и композита проводили на плоских и цилиндрических пятикратных пропорциональных образцах при температурах 1770, 1970 и 2020 К в вакууме, инертной среде и на воздухе с использованием установок ВТУ-2В и УВП-1 [3]. Образцы вырезали соответственно из листового проката толщиной 1 и 2 мм и из прутка Ø60 мм сплава 5ВМЦ вдоль продольной оси. Одну часть образцов испытывали в исходном состоянии, другую – отжигали в вакуумной печи по режиму нанесения защитного покрытия. На рабочий участок третьей части образцов наносили керамическое покрытие на основе силицидов молибдена и гафния. Химический состав покрытия и технология

его нанесения описаны ранее [1]. Уровни прикладываемых напряжений σ составляли 25...90% значений условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ материала, соответствующих температуре испытания.

Образцы, как правило, до разрушения не доводили, а деформировали путем приложения постоянной нагрузки до определенного уровня деформации ползучести, не превышающего 5%. На основании результатов испытаний строили кривые ползучести либо их начальные участки, по которым определяли значения пределов ползучести по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации для сплава и композита на базах 360, 3600 и 36000 с или 0,1; 1,0 и 10 ч (соответственно $\sigma_{0,5/0,1}$, $\sigma_{0,5/1,0}$, $\sigma_{0,5/10}$; $\sigma_{1,0/0,1}$, $\sigma_{1,0/1,0}$ и $\sigma_{1,0/10}$) [4].

По кривой ползучести определяли скорость ползучести на установившемся участке $\dot{\epsilon}$, время до разрушения τ_p , относительное удлинение ϵ_p и относительное сужение ψ_p образцов после разрушения. Поскольку переход от установившейся стадии ползучести к ускоренной сопровождается существенным увеличением интенсивности накопления необратимых повреждений в материале и обуславливает неизбежность его последующего разрушения, находили значения координат ϵ'' и τ'' точки, характеризующей начало ускоренной ползучести [2]. Результаты испытаний представляли в виде кривых ползучести, зависимостей скорости установившейся ползучести от напряжений и диаграмм длительной прочности. При этом в качестве уравнений регрессии для аппроксимации последних использовали степенные зависимости вида

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^\alpha \quad (1)$$

и

$$\tau_p = B\sigma^{-\beta}, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость установившейся ползучести, $\% \cdot \text{с}^{-1}$; τ_p – время до разрушения, с; σ – напряжения, МПа; A , B , α и β – коэффициенты, зависящие от структурного состояния материала и температуры испытания.

Полученные экспериментальные данные обрабатывали с использованием стандартных методов математической статистики. При этом определяли эмпирические значения постоянных A , B , α , β и коэффициенты корреляции r_1 между $\ln \dot{\epsilon}$ и $\ln \sigma$ и r_2 между $\ln \tau_p$ и $\ln \sigma$, характеризующие рассеяние результатов эксперимента. Для вероятностной оценки теоретических линий регрессии строили доверительные области для уровня вероятности $p = 0,95$ [5].

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены характерные кривые ползучести сплава 5ВМЦ. Зависимости скорости установившейся ползучести от напряжений и диаграммы длительной прочности сплава 5ВМЦ в состоянии поставки и после термической обработки по режиму нанесения силицидно-керамического покрытия иллюстрируют рис. 2 и 3 соответственно. Испытания проводили при температурах 1770 и 2020 К в вакууме на цилиндрических образцах, вырезанных из прутка $\varnothing 60$ мм. Полученные в результате статистической обработки значения постоянных в уравнениях (1) и (2) и коэффициентов корреляции r_1 и r_2 для обоих структурных состояний сплава 5ВМЦ приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты статистической обработки характеристик жаропрочности сплава 5ВМЦ

Состояние материала	T, K	n	r_1	α	A	r_2	β	B
Поставка (отжиг при 1670 К, 2 ч)	1770	6	0,99	6,7	$4,7 \times 10^{-14}$	-0,99	6,6	$4,4 \times 10^{14}$
	2020	6	0,99	5,2	$5,9 \times 10^{-10}$	-0,99	5,3	$9,7 \times 10^{10}$
Термическая обработка по режиму нанесения покрытия	1770	7	0,87	4,4	$9,0 \times 10^{-11}$	-0,99	5,6	$2,3 \times 10^{13}$
	2020	6	0,98	6,5	$9,8 \times 10^{-13}$	-0,99	6,8	$5,4 \times 10^{13}$

Примечание. n – объем экспериментальной выборки.

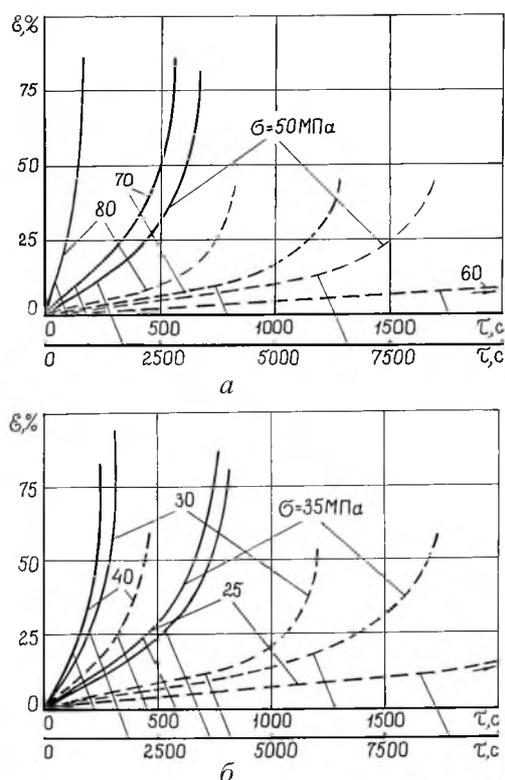


Рис. 1. Характерные кривые ползучести сплава 5ВМЦ в исходном состоянии (сплошные линии) и после термической обработки по режиму нанесения силицидно-керамического покрытия (штриховые линии) при температурах 1770 (а) и 2020 К (б).

Исследования показали, что термическая обработка по режиму нанесения защитного покрытия приводит к росту зерна с 25...50 до 250...350 мкм за счет процессов собирательной рекристаллизации материала [1] и оказывает заметное влияние на жаропрочность сплава 5ВМЦ. После термической обработки материала характеристики сопротивления ползучести и длительной прочности повышаются, а характеристики остаточной пластичности (ϵ_p и ψ_p) в условиях длительного нагружения снижаются. Так, время до разрушения сплава, прошедшего термическую обработку, при аналогичных температурах и уровнях приложенных напряжений увеличивается в 2,5–4 раза. При этом скорость ползучести на установившемся участке умень-

шается в 2–10 раза (рис. 2, 3). Однако величина накопленной до разрушения пластической деформации ϵ_p для отожженного материала уменьшается в среднем в два раза (с 75,5...83,0% до 39,0...48,5%) при температуре 1770 К и в 1,5 раза (с 83,5...96,5% до 50,5...64,5%) при 2020 К. А значения ϵ'' при температуре 1770 К уменьшаются в 2,2 раза (с 13,5...27,5% до 6,5...12,5%) и при 2020 К в 1,2 раза (с 14,5...18,5% до 11,5...15,0%). Это свидетельствует о потере устойчивости пластического течения отожженного материала и переходе его к ускоренной стадии ползучести при более низких значениях накопленной деформации по сравнению с исходным состоянием.

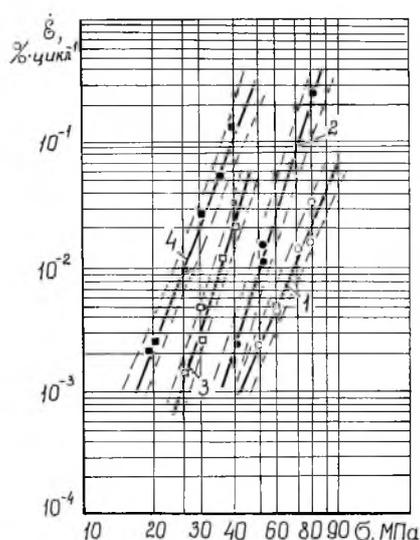


Рис. 2. Зависимости скорости установившейся ползучести от напряжений для сплава 5ВМЦ в исходном состоянии (темные точки) и после термической обработки по режиму нанесения силицидно-керамического покрытия (светлые точки) при температурах 1770 (1, 2) и 2020 К (3, 4).

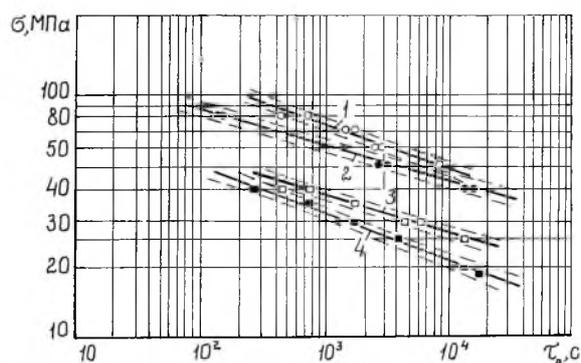


Рис. 3. Диаграммы длительной прочности сплава 5ВМЦ. (Обозначения те же, что на рис. 2).

Значения относительного сужения ψ_p образцов после разрушения для сплава 5ВМЦ, прошедшего термическую обработку по режиму нанесения силицидно-керамического покрытия, уменьшаются при аналогичных условиях испытаний в среднем в 1,2–1,3 раза по сравнению с материалом в состоянии поставки.

Повышение жаропрочности сплава 5ВМЦ после термической обработки, сопровождающейся процессами вторичной рекристаллизации материала, находится в соответствии с известными представлениями о влиянии размера зерна на характеристики высокотемпературной длительной прочности и сопротивления ползучести металлов и сплавов [6–9].

Несмотря на обнаруженные различия между абсолютными значениями характеристик жаропрочности и остаточной пластичности для обоих структурных состояний сплава 5ВМЦ в исследованной температурно-силовой области имеет место подобие кривых ползучести (рис. 1), перестроенных в обобщенных координатах $\varepsilon/\varepsilon_p - \tau/\tau_p$ [10]. Для сплава 5ВМЦ как в состоянии поставки, так и после термической обработки значения приведенной скорости ползучести на установившемся участке $\xi = \dot{\varepsilon} \tau_p / \varepsilon_p$ колеблются в пределах 0,35–0,4. При этом относительная доля запаса пластичности материала, реализуемая на первых двух стадиях ползучести $\varepsilon''/\varepsilon_p$, составляет около 0,2. А доля долговечности, реализуемая до начала ускоренной стадии ползучести τ''/τ_p , равна в среднем 0,5.

На рис. 4 приведены начальные участки характерных кривых ползучести композита, построенные по результатам испытаний цилиндрических образцов в вакууме, инертной среде и на воздухе при температурах 1770 и 2020 К.

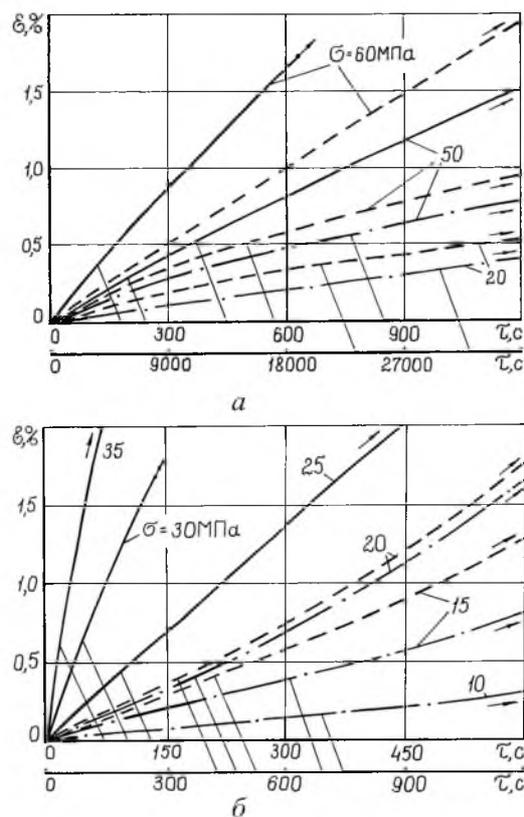


Рис. 4. Начальные участки кривых ползучести композита в вакууме (сплошные линии), инертной среде (штриховые линии) и на воздухе (штрихпунктирные линии) при температурах 1770 (а) и 2020 К (б).

Т а б л и ц а 2

Характеристики сопротивления ползучести сплава 5ВМЦ и композита

T, К	Предел ползучести по допуску 0,5%-ной остаточной деформации, МПа, на базе, ч			Предел ползучести по допуску 1,0%-ной остаточной деформации, МПа, на базе, ч		
	0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
Вакуум						
1770	48	28 *	—	53	35 *	—
	42	26 *	—	52	32 *	—
2020	18	9 *	—	23	12 *	—
	23	12 *	—	27	17 *	—
Инертная среда						
1770	50	30	18	65	40	25
2020	18	8*	—	20	10*	—
Воздух						
1770	60	35	22	75*	47	30
2020	21	10	—	24*	12	—

Примечания. 1. Над чертой приведены значения пределов ползучести для композита, под чертой – для сплава 5ВМЦ (отжиг по режиму нанесения покрытия). 2. Звездочкой обозначены значения пределов ползучести, полученные методом экстраполяции соответствующих кривых на рис. 5.

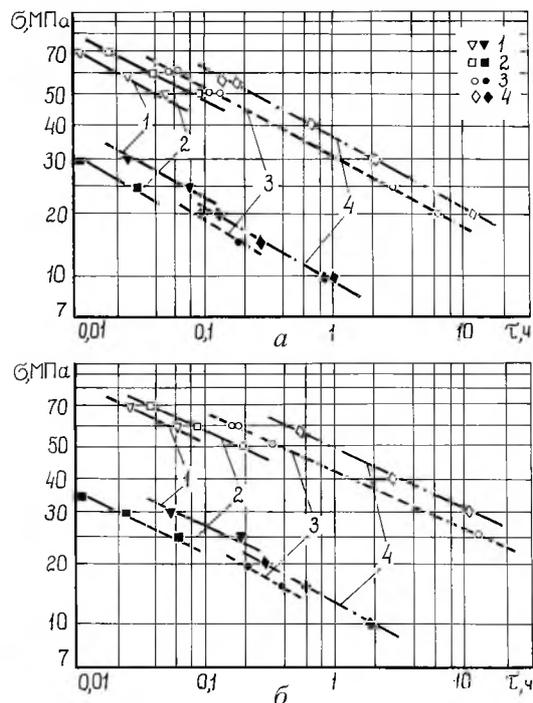


Рис. 5. Зависимости пределов ползучести по допуску 0,5- (а) и 1,0%-ной (б) остаточной деформации сплава 5ВМЦ после отжига по режиму нанесения покрытия (1) и композита (2–4) от времени при температурах 1770 (светлые точки) и 2020 К (темные точки): 1, 2, сплошные линии – испытания в вакууме; 3, штриховые линии – в инертной среде; 4, штрихпунктирные линии – на воздухе.

Т а б л и ц а 3

Характеристики сопротивления ползучести композита в инертной среде и на воздухе

T, К	Предел ползучести по допуску 0,5%-ной остаточной деформации, МПа, на базе, ч			Предел ползучести по допуску 1,0%-ной остаточной деформации, МПа, на базе, ч		
	0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
Инертная среда						
1770	35	22	12,0	40	25	17,0
1970	15	8	5,5*	17	10	6,5*
Воздух						
1770	45	30	18,0	50	32	22,0
1970	18	10	6,5*	22	12	7,5*

На рис. 5 представлены полученные после обработки описанных выше кривых (рис. 1, 4) зависимости пределов ползучести по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации сплава 5ВМЦ после отжига по режиму нанесения покрытия и композита от времени. Значения пределов ползучести по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации на базах 0,1; 1,0 и 10 ч приведены в табл. 2. Экспериментальные данные получены по результатам испытаний цилиндрических образцов (диаметр рабочего участка 5 мм), вырезанных из прутка Ø60 мм.

Из рис. 4,а, и рис. 5, а также данных табл. 2 видно, что при температуре 1770 К характеристики сопротивления ползучести композита на начальных стадиях нагружения во всех исследованных случаях заметно выше, чем материала основы (сплав 5ВМЦ). Причем жаропрочность композита при испытаниях в защитной среде ниже, чем на воздухе. А сопротивление ползучести в аргоне выше, чем при испытаниях в вакууме.

При температуре 2020 К наблюдается обратная картина: во всех случаях характеристики жаропрочности композита по сравнению с таковыми сплава 5ВМЦ ниже. Однако характер влияния окружающей среды на результаты испытаний не изменяется. При испытаниях в вакууме сопротивление ползучести композита ниже, чем в инертной среде. В свою очередь, его жаропрочность в защитной среде ниже, чем на воздухе (рис. 4,б, 5 и табл. 2).

Следует отметить, что обнаруженные особенности влияния силицидно-керамического покрытия и термической обработки на характеристики кратковременной, длительной статической прочности и сопротивления ползучести сплава 5ВМЦ в основном совпадают [1]. Аналогичный вывод можно сделать относительно влияния состава окружающей среды на механические характеристики композита при исследованных условиях высокотемпературного нагружения.

Характеристики сопротивления ползучести композита, полученные по результатам испытаний плоских образцов (вырезаны из листа толщиной 2 мм) в инертной среде и на воздухе при температурах 1770 и 1970 К, приведены на рис. 6, 7 и в табл. 3. Анализ экспериментальных данных показал, что значения пределов ползучести композита по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации, полученные при сопоставимых условиях на плоских

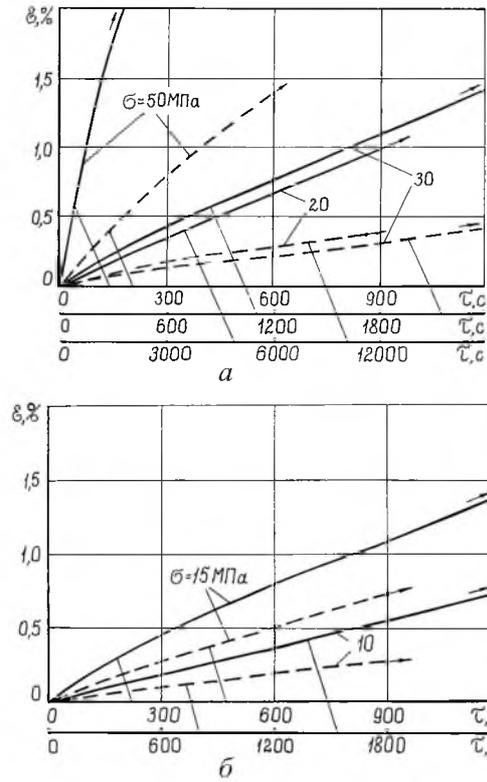


Рис. 6. Начальные участки кривых ползучести композита в инертной среде (сплошные линии) и на воздухе (штриховые линии) при температурах 1770 (а) и 1970 К (б).

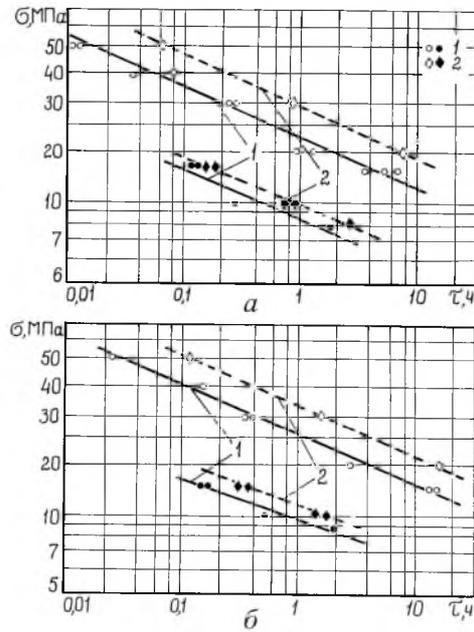


Рис. 7. Зависимости пределов ползучести по допуску 0,5- (а) и 1,0%-ной (б) остаточной деформации композита от времени при температурах 1770 К (светлые точки) и 1970 К (темные точки): 1, сплошные линии – испытания в инертной среде; 2, штриховые линии – на воздухе.

образцах из листового материала, несколько ниже, чем полученные на цилиндрических образцах из прутка. Аналогичные результаты получены ранее [1] для характеристик кратковременной статической прочности сплава 5ВМЦ и композита при температурах выше $0,5T_{пл}$.

Выводы

1. Исследованы закономерности изменения характеристик секундной ползучести и длительной прочности на малых временных базах ниобиевого сплава 5ВМЦ в исходном состоянии и с силицидно-керамическим защитным покрытием при температурах выше $0,5T_{пл}$ в вакууме, инертной среде и на воздухе.

2. Показано, что термическая обработка сплава 5ВМЦ, соответствующая технологическому процессу нанесения защитного покрытия, способствует повышению его жаропрочности при одновременном снижении характеристик остаточной пластичности и сохранении качественного подобия кривых ползучести.

3. Получены значения пределов ползучести сплава 5ВМЦ и композита по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации на базах 0,1; 1,0 и 10 ч при температурах 1770, 1970 и 2020 К в вакууме, инертной среде и на воздухе.

4. Установлено, что характеристики жаропрочности композита при испытании в защитной среде ниже, чем на воздухе. А сопротивление ползучести в аргоне выше, чем при испытаниях в вакууме.

Резюме

Досліджено закономірності зміни характеристик секундної повзучості та тривалої міцності на малих часових базах ніобієвого сплаву 5ВМЦ та композиту (сплав 5ВМЦ – силицидно-керамічне покриття) в діапазоні температур 1770...2020 К. Отримано значення границь повзучості сплаву та композита за допуском 0,5- і 1,0%-ної залишкової деформації на базі 0,1; 1,0 та 10 г при температурах 1770, 1970 та 2020 К у вакуумі, інертному середовищі та на відкритому повітрі.

1. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К., Мамузич И. Высокотемпературная прочность ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическими защитными покрытиями. Сообщ. 1. Характеристики кратковременной прочности // Пробл. прочности. – 2004. – № 2. – С. 119 – 129.
2. Работнов Ю. Н., Милейко С. Т. Кратковременная ползучесть. – М.: Наука, 1970. – 224 с.
3. Харченко В. К. О высокотемпературной прочности тугоплавких материалов // Пробл. прочности. – 1980. – № 10. – С. 94 – 103.
4. Тихонов Л. В., Кононенко В. А., Прокопенко Г. И. и др. Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1986. – 567 с.

5. *Степнов М. Н.* Статистическая обработка результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
6. *Тайра С., Отани Р.* Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с.
7. *Трефилов В. И., Мильман Ю. В., Фирстов С. А.* Физические основы прочности тугоплавких металлов. – Киев: Наук. думка, 1975. – 315 с.
8. *Химушин Ф. Ф.* Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1970. – 749 с.
9. *Филиповский А. В., Лопушанский В. А.* Влияние дисперсности структуры на жаропрочность хромоникелевых сплавов // Пробл. прочности. – 1998. – № 4. – С. 68 – 72.
10. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев: Наук. думка, 1973. – 238 с.

Поступила 28. 03. 2003