

Характеристики жаропрочности низколегированного молибденового сплава ВМ-1

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

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

^б Металлургический факультет Загребского университета, Сисак, Хорватия

Исследованы характеристики кратковременной статической прочности и секундной ползучести низколегированного молибденового сплава ВМ-1 в диапазоне температур 1820...2270 К. Получены значения пределов ползучести сплава по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации на базах 10^2 , 10^3 и 10^4 с при температурах 1820, 2120 и 2270 К. Предложена эмпирическая функциональная зависимость для описания корреляционной связи между характеристиками кратковременной статической прочности, пластичности и секундной ползучести материала в исследуемой температурно-силовой области.

Ключевые слова: низколегированный молибденовый сплав, кратковременная статическая прочность, пластичность, высокотемпературная секундная ползучесть, корреляционная связь.

Введение. Молибденовые сплавы, обладающие уникальным комплексом физико-механических и химических характеристик, широко используются в авиационной и ракетно-космической технике при изготовлении деталей и узлов, подверженных воздействию высоких нагрузок, температур, агрессивных газовых сред и других эксплуатационных факторов [1, 2]. Одним из основных требований, предъявляемых к изделиям столь ответственного назначения, является сохранение несущей способности, в том числе размерной стабильности, в течение заданного срока службы, который может колебаться от нескольких десятков и сотен секунд до сотен часов. Известно, что при температурах выше $0,5T_{пл}$ в металлических материалах имеют место процессы ползучести. При этом необратимые пластические деформации могут достигать существенных значений даже при напряжениях, не превышающих условный предел текучести материала, за относительно короткие промежутки времени [3]. Это может привести к непригодности конструкции к дальнейшей эксплуатации из-за потери заданных геометрических размеров и формы.

Известные из литературных источников данные по высокотемпературной прочности молибденовых сплавов при различных видах силового нагружения в основном носят фрагментарный характер. Они получены для материалов в разном структурном состоянии (деформированное, полигонизованное, рекристаллизованное, литое и т.д.) при испытании образцов, вырезанных из полуфабрикатов и конструктивных элементов (листовой прокат, прутки, поковки, проволоки, сварные швы и др.). Кроме того, достаточно сложно найти весь комплекс физико-механических свойств для материала одной плавки в одном структурном состоянии, включая характеристики упругости, кратковременной и длительной статической прочности, пластичности и пол-

зучести в интересующем температурном диапазоне. Это существенно затрудняет анализ и обобщение имеющихся данных.

В основном характеристики кратковременной статической прочности и пластичности молибденового сплава ВМ-1 получены при испытаниях на разных установках по различным методикам в диапазоне температур 290...2070 К. Образцы вырезали из тонколистового проката и прутка различных плавок, как правило, в нагартованном и реже в рекристаллизованном состоянии. В литературных источниках не всегда указана ориентация продольной оси образцов относительно направления технологической деформации полуфабриката, а процентное содержание легирующих элементов от плавки к плавке варьировалось в довольно широком диапазоне. В связи с этим приведенные разными авторами данные по механическим свойствам сплава характеризуются значительным рассеянием [4–7].

Характеристики длительной прочности и ползучести сплава ВМ-1 исследованы в диапазоне температур 1270...1770 К только для деформированного материала (лист толщиной 1 мм) на временной базе от 0,1 до 5000 ч. При этом в работах по длительной прочности и ползучести, как правило, не приведены первичные кривые ползучести и сведения о кратковременной прочности и пластичности материала данной плавки при исследуемых температурах [2, 4, 8].

Настоящая работа посвящена исследованию характеристик кратковременной статической прочности, пластичности и секундной ползучести низколегированного молибденового сплава ВМ-1 в диапазоне температур 1820...2070 К на временных базах, не превышающих 10 ч, а также установлению корреляционных зависимостей между ними.

Методика проведения исследований. Сплав ВМ-1 системы Mo–Ti–Zr относится к жаропрочным низколегированным сплавам молибдена с твердорастворным упрочнением и имеет следующий химический состав, мас. %: 0,2 Ti; 0,08–0,25 Zr; 0,01 С [9, 10].

Объектом исследования служил пруток диаметром 90 мм, полученный методом вакуумно-дуговой плавки с последующей ступенчатой горячей деформацией и промежуточными отжигами. На заключительном этапе технологического процесса полуфабрикат подвергали вакуумному стабилизационному отжигу при температуре 1870 К в течение 1 ч с целью выравнивания структурной и химической неоднородности и снятия внутренних напряжений.

Характеристики кратковременной статической прочности (предел прочности σ_b , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ , относительное равномерное удлинение δ_p и относительное сужение ψ) и ползучести определяли при температурах 1820, 2120 и 2270 К на универсальной установке ВТУ-2В [11] соответственно при активном статическом растяжении с относительной скоростью деформации $\sim 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ и в условиях длительного статического нагружения. Испытания проводили в вакууме не хуже $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па на пятикратных пропорциональных образцах с диаметром рабочего участка 3,0 и 3,5 мм. Образцы вырезали вдоль оси прутка в состоянии поставки.

Нагрев образцов осуществляли радиационным методом по режиму, включающему медленное повышение температуры в течение 6–7 мин до 570...770 К, быстрый ее подъем до заданных рабочих значений со скоростью ~ 5 К/с и временную выдержку для стабилизации температуры на образце в течение 5 мин перед нагружением. Система нагрева установки в процессе испытаний обеспечивает стабилизацию температуры в пределах $\pm 1\%$ и позволяет получить достаточно однородное ее распределение по длине образца. При 1820...2270 К перепад температуры вдоль рабочего участка не превышал 10...20 К. Температуру измеряли вольфрамрениевыми термопарами ВР 5/20.

При исследовании характеристик ползучести сплава ВМ-1 уровни прикладываемых напряжений составляли 35–90% значений условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ материала при соответствующей температуре испытания. Образцы до разрушения не доводили, а деформировали постоянной нагрузкой до определенного уровня пластической деформации (не выше 5%). Время испытаний не превышало 10 ч. На основании результатов испытаний строили начальные участки кривых ползучести, по которым определяли значения пределов ползучести по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации сплава на базах 10^2 , 10^3 и 10^4 с (соответственно $\sigma_{0,5/10^2}$, $\sigma_{0,5/10^3}$, $\sigma_{0,5/10^4}$ и $\sigma_{1,0/10^2}$, $\sigma_{1,0/10^3}$, $\sigma_{1,0/10^4}$).

Результаты и их обсуждение. Характеристики кратковременной статической прочности молибденового сплава ВМ-1 при комнатной и высоких температурах приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Характеристики кратковременной статической прочности сплава ВМ-1 при комнатной и высоких температурах

T , К	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	δ_p , %	ψ , %
290	548	–	25,8	–	–
1820	116	90	32,5	6,6	84,2
2120	53	37	49,7	6,2	93,0
2270	29	21	53,6	5,4	85,1

На рис. 1 представлены начальные участки кривых ползучести сплава при температурах 1820, 2120 и 2270 К. Рис. 2,а и 3,а иллюстрируют полученные после обработки этих кривых зависимости пределов ползучести по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации от времени. Значения пределов ползучести по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации на базах 10^2 , 10^3 и 10^4 с для исследуемых температур приведены в табл. 2.

Объем полученных экспериментальных данных по механическим свойствам сплава ВМ-1 позволяет провести их анализ с целью установления корреляционных зависимостей между характеристиками кратковременной статической прочности и ползучести. Известно, что температурные зависимости механических характеристик, определяющих сопротивление металли-

ческих материалов пластической деформации, качественно подобны. А между прочностными характеристиками металлов и сплавов при кратковременном и длительном статическом нагружении существуют корреляционные связи, которые могут быть описаны определенными аналитическими выражениями, основанными как на эмпирических, так и физически обоснованных подходах [12–18]. Научная и практическая значимость корреляционных зависимостей для ускоренной оценки жаропрочности материалов представляется очевидной. Эффективность их применения возрастает при использовании максимально возможного объема информации, полученной при кратковременных статических испытаниях и включающей не только показатели кратковременной прочности и пластичности материала, но и характер его разрушения [13–16].

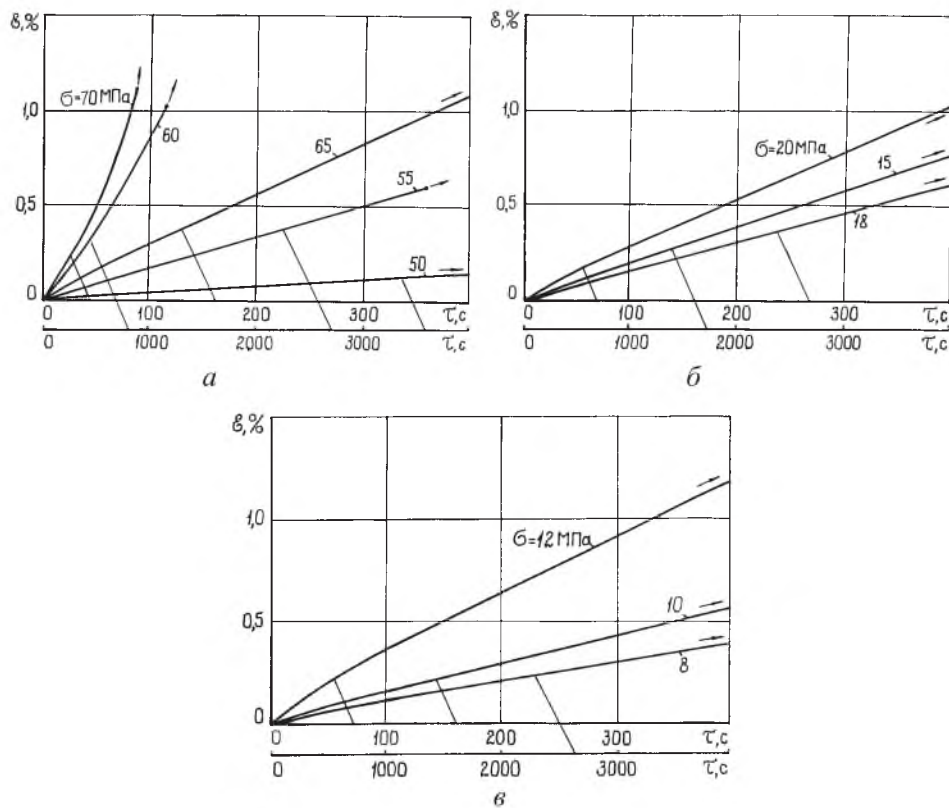


Рис. 1. Начальные участки кривых ползучести сплава ВМ-1 при температурах 1820 (а), 2120 (б) и 2270 К (в).

Рассматриваемые экспериментальные результаты получены при испытаниях в высокотемпературной области (выше $0,5T_{пл}$) при высоких значениях напряжений (не менее 10^{-4} модуля сдвига) на малых временных базах (до 10^5 с). Поэтому при обработке данных использовали подходы, основанные на гипотезе о том, что в исследуемой температурно-силовой области прочность молибденового сплава при различных режимах нагружения определяется аналогичными доминирующими механизмами пластической дефор-

мации и разрушения, которые контролируются преимущественно одной и той же системой препятствий на пути движения дислокаций. При этом полагали, что степень влияния температурного фактора на разупрочнение материала в условиях кратковременного активного и длительного статического нагружения одинакова.

Т а б л и ц а 2

Значения пределов ползучести сплава ВМ-1

T, К	По допуску 0,5%-ной остаточной деформации, МПа, на базе, с			По допуску 1,0%-ной остаточной деформации, МПа, на базе, с		
	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ²	10 ³	10 ⁴
1820	68	58	49	70	60	50
2120	20,5	16	11*	21*	18,5	13
2270	12	10	8,0*	13*	10,5	9

Примечание. Звездочкой обозначены значения пределов ползучести, полученные методом экстраполяции соответствующих кривых на рис. 2,а и 3,а.

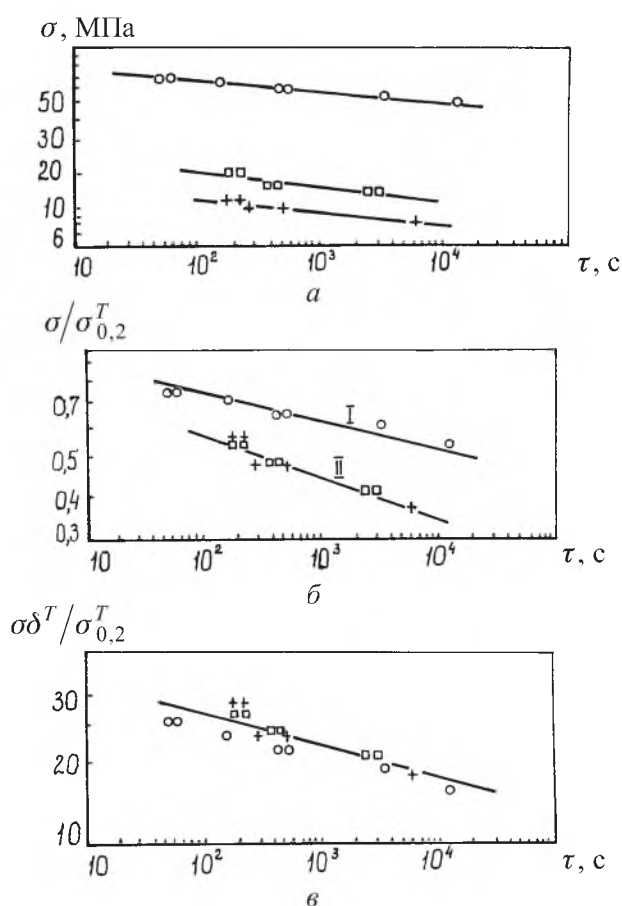


Рис. 2. Зависимость пределов ползучести по допуску 0,5%-ной остаточной деформации сплава ВМ-1 от времени. (Здесь и на рис. 3: \circ – $T = 1820$ К; \square – $T = 2120$ К; $+$ – $T = 2270$ К.)

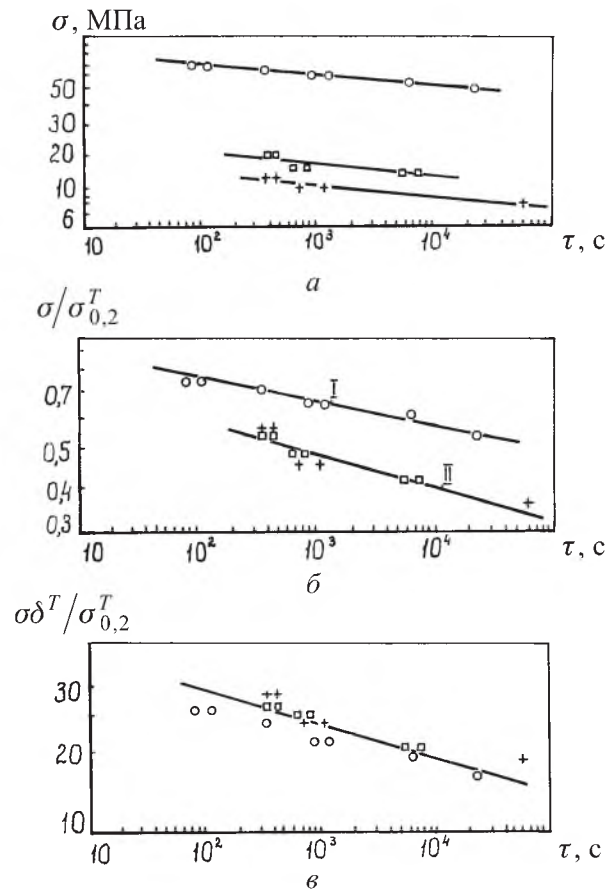


Рис. 3. Зависимость пределов ползучести по допуску 1,0%-ной остаточной деформации сплава VM-1 от времени.

На рис. 2,б и 3,б приведены зависимости пределов ползучести по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации сплава VM-1 от времени, построенные в координатах $\sigma/\sigma_{0,2}^T - \tau$, где $\sigma_{0,2}^T$ – условный предел текучести материала при исследуемой температуре. Как видно, в предложенной системе координат экспериментальные данные, полученные при температурах 2120 и 2270 К, принадлежат общей генеральной совокупности (кривые II) и могут быть удовлетворительно описаны уравнением

$$\tau = B(\sigma/\sigma_{0,2}^T)^{-\beta} \quad (1)$$

(σ – величина предела ползучести по допуску 0,5- или 1,0%-ной остаточной деформации; τ – время, за которое в материале накапливается 0,5- или 1,0%-ная остаточная деформация; β и B – коэффициенты, постоянные для данного материала в диапазоне температур 2120...2270 К). Данные для температуры 1820 К представлены на рис. 2,б и 3,б кривыми I.

Эмпирические значения параметров β и B , а также коэффициенты корреляции r_1 между $\ln(\sigma/\sigma_{0,2}^T)$ и $\ln \tau$, полученные в результате статисти-

ческой обработки и регрессионного анализа экспериментальных данных, приведены в табл. 3.

Существенным недостатком вышеизложенного подхода является то, что он не позволяет объединить весь массив полученных в работе экспериментальных данных в единую выборку и описать их общей функциональной зависимостью. В [13–16] отмечалось, что при прогнозировании ползучести и длительной прочности по данным кратковременных испытаний лучшие результаты получены по методам, основанным на использовании в качестве условной характеристики сопротивления материала длительному разрушению отношения предела текучести $\sigma_{0,2}^T$ к величине относительного удлинения после разрушения δ . При этом принималось, что полученные с применением данного критерия эмпирические зависимости хорошо согласуются с физически обоснованными представлениями о единой природе процессов пластической деформации материала при кратковременном активном растяжении и в условиях ползучести.

Т а б л и ц а 3

Результаты совместной статистической обработки характеристик кратковременной прочности и ползучести сплава ВМ-1 в диапазоне температур 1820...2270 К

Кривая	Объем выборки	T , К	r_1 между $\ln(\sigma/\sigma_{0,2}^T)$ и $\ln \tau$	β	B
I на рис. 2,б	7	1820	-0,979	13,0	2,47
II на рис. 2,б	11	2120, 2270	-0,959	8,5	0,99
I на рис. 3,б	7	1820	-0,999	16,4	1,51
II на рис. 3,б	11	2120, 2270	-0,942	10,9	0,41

На рис. 2,в и 3,в приведены графики, характеризующие зависимость пределов ползучести по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации сплава ВМ-1 от времени, построенные в координатах $\sigma\delta^T/\sigma_{0,2}^T - \tau$, где δ^T – относительное удлинение материала при исследуемой температуре. Видно, что при использовании предложенного параметра по оси ординат все полученные экспериментальные данные, сведенные в единую выборку, принадлежат общей генеральной совокупности и могут быть удовлетворительно описаны уравнением

$$\tau = B'(\sigma\delta^T/\sigma_{0,2}^T)^{-\beta'}, \quad (2)$$

где β' и B' – коэффициенты, постоянные для данного материала в исследуемом диапазоне температур (1820...2270 К).

Полученные в результате статистической обработки эмпирические значения параметров β' и B' , а также коэффициенты корреляции r_2 между $\ln(\sigma\delta^T/\sigma_{0,2}^T)$ и $\ln \tau$ приведены в табл. 4. Понятно, что объединение в единую выборку всех полученных экспериментальных данных по жаропрочности молибденового сплава в широком диапазоне температур привело к увеличению их рассеяния и ослаблению корреляционной связи, описы-

ваемой уравнением (2). Однако достаточно близкие к единице значения коэффициентов r_2 свидетельствуют о правомерности подхода, основанного на использовании в качестве условной характеристики сопротивления материала длительному разрушению отношения предела текучести к величине относительного удлинения.

Т а б л и ц а 4

Результаты совместной статистической обработки характеристик кратковременной прочности, пластичности и ползучести сплава ВМ-1 в диапазоне температур 1820...2270 К

Кривая	Объем выборки	r_2 между $\ln(\sigma\delta^T/\sigma_{0,2}^T)$ и $\ln\tau$	β'	B'
На рис. 2,б	18	-0,816	8,4	$2,00 \cdot 10^{14}$
На рис. 3,б	18	-0,794	9,3	$6,47 \cdot 10^{15}$

Выводы

1. Исследованы закономерности изменения характеристик кратковременной статической прочности и секундной ползучести низколегированного сплава ВМ-1 в диапазоне температур 1820...2270 К.

2. Получены значения пределов ползучести сплава ВМ-1 по допуску 0,5- и 1,0%-ной остаточной деформации на базах 10^2 , 10^3 и 10^4 с при температурах 1820, 2120 и 2270 К.

3. Предложена эмпирическая функциональная зависимость между характеристиками кратковременной статической прочности, пластичности и секундной ползучести молибденового сплава в исследуемой температурно-силовой области.

Резюме

Досліджено характеристики короткочасної статичної міцності і секундної повзучості низьколегованого молибденового сплаву ВМ-1 у діапазоні температур 1820...2270 К. Отримано значення границь повзучості сплаву за допуском 0,5- і 1,0%-ної залишкової деформації на базах 10^2 , 10^3 і 10^4 с при температурах 1820, 2120 і 2270 К. Запропоновано емпіричну функціональну залежність для опису кореляційного зв'язку між характеристиками короткочасної статичної міцності, пластичності і секундної повзучості матеріалу в досліджуваній температурно-силовій області.

1. *Тугоплавкие металлы и сплавы* / Под ред. Г. С. Бурханова и Ю. В. Ефимова. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
2. *Моргунова Н. Н., Клытин Б. А., Бояришинов В. А. и др.* Сплавы молибдена. – М.: Металлургия, 1975. – 392 с.
3. *Работнов Ю. А., Милейко С. Т.* Кратковременная ползучесть. – М.: Наука, 1970. – 224 с.
4. *Тугоплавкие материалы в машиностроении. Справочник* / Под ред. А. Т. Туманова, К. И. Портного. – М.: Машиностроение, 1967. – 392 с.

5. *Справочник по авиационным материалам*. Т. 3. Коррозионно-стойкие и жаропрочные стали и сплавы / Под ред. А. Т. Туманова. – М.: Машиностроение, 1965. – 632 с.
6. *Аракелов А. Г., Гончаров С. П., Кривулина Т. А. и др.* Высокотемпературные механические свойства тугоплавких металлов и их сплавов. Справочник / Под ред. М. В. Мельникова, А. Г. Аракелова, Л. З. Поляка. – М.: ГОНТИ-4, 1969. – 147 с.
7. *Коноваленко В. П., Овсепян Е. С., Соболев А. А. и др.* Микромеханические испытания молибденовых сплавов типа ВМ-1 и ВМ-2 при высоких температурах // Свойства тугоплавких металлов и их сплавов. – М.: ВИАМ; ОНТИ, 1963. – С. 41 – 44.
8. *Клытин А. А.* Длительная прочность молибденовых и ниобиевых сплавов при высоких температурах // Свойства тугоплавких металлов и их сплавов. – М.: ВИАМ; ОНТИ, 1963. – С. 5 – 11.
9. *Трефилов В. И., Мильман Ю. В., Иващенко Р. К. и др.* Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена / Под ред. В. И. Трефилова. – Киев: Наук. думка, 1983. – 232 с.
10. *Тихонов Л. В., Кононенко В. А., Прокопенко Г. И. и др.* Структура и свойства металлов и сплавов. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1986. – 567 с.
11. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях*. В 2 т. / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1980. – Т. 1. – 535 с.
12. *Борисенко В. А.* Твердость и прочность тугоплавких материалов при высоких температурах. – Киев: Наук. думка, 1984. – 212 с.
13. *Кривенюк В. В.* Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
14. *Зленко В. Ф., Бугай Н. В.* О связи длительных и кратковременных свойств прочности трубных сталей // Энергетик. – 1970. – № 11. – С. 4 – 17.
15. *Борисенко В. А., Бухановский В. В., Харченко В. К. и др.* Связь между характеристиками кратковременной и длительной прочности листового проката и сварных швов ниобиевого сплава 10ВМЦ // Автомат. сварка. – 1994. – № 5-6. – С. 21 – 27.
16. *Бухановский В. В.* Взаимосвязь характеристик прочности и ползучести сплавов на основе ниобия // Металлы. – 2000. – № 3. – С. 86 – 93.
17. *Bukhanovsky V. V., Mamuzic I., and Borisenko V. A.* Interrelation between the structural state of material and mechanical properties of low-alloyed molybdenum alloys over the wide range of temperatures // Metalurgija. – 2003. – 42, No. 3. – P. 159 – 166.
18. *Борисенко В. А., Бухановский В. В., Мамузич И.* Взаимосвязь между характеристиками кратковременной, длительной статической прочности и сопротивлением ползучести вольфрама при высоких температурах // Пробл. прочности. – 2005. – № 6. – С. 50 – 60.

Поступила 16. 11. 2006