

## **Высокотемпературная прочность тугоплавких металлов, сплавов и композиционных материалов на их основе. Сообщение 2. Сплавы молибдена и ниобия**

**В. К. Харченко, В. В. Бухановский**

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

*Обобщены результаты исследований механических характеристик молибденовых и ниобиевых сплавов и их сварных соединений, используемых в ракетно-космической технике. Исследования проводили в условиях кратковременного, длительного статического и малоциклового нагружения на малых временных базах в диапазоне температур 290...2270 К.*

**Ключевые слова:** молибденовые и ниобиевые сплавы, кратковременная прочность, длительная прочность, малоцикловая прочность, секундная ползучесть, пластичность, высокие температуры, корреляционная связь.

**Введение.** Молибденовые и ниобиевые сплавы, обладающие уникальным комплексом физико-механических, технологических и служебных характеристик, широко используются в авиационной и ракетно-космической технике (РКТ) при изготовлении деталей и узлов, подверженных воздействию высоких нагрузок, температур, агрессивных газовых сред и других неблагоприятных эксплуатационных факторов [1–3]. Основными преимуществами современных молибденовых и ниобиевых сплавов по сравнению с вольфрамом являются повышенная пластичность и свариваемость, что позволяет создавать сварные конструкции сложной формы. Кроме того, они обладают высокой надежностью и экономичностью. В начале 80 гг. 20 ст. в области металлургии и металловедения тугоплавких материалов были достигнуты значительные успехи. Благодаря развитию вакуумной электрометаллургии получены молибденовые и ниобиевые сплавы с весьма низким содержанием примесей внедрения. А успешное решение задач технологии сварки тугоплавких металлов учеными Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины открыло большие возможности для их применения при изготовлении сварных конструкций ответственного назначения для РКТ [3].

Настоящее сообщение посвящено обобщению результатов исследования механических характеристик молибденовых и ниобиевых сплавов и их сварных соединений, используемых в РКТ, в условиях кратковременного, длительного статического и малоциклового нагружения на малых временных базах, а также многоциклового нагружения в широком диапазоне высоких температур (до 2270 К), выполненных в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины (далее – ИПП).

**Механические характеристики сплавов при кратковременном статическом растяжении и многоцикловом нагружении.** В 80 гг. 20 ст. отечественная промышленность начала производить свариваемые молибденовые низколегированные сплавы ЦМ-6, ЦМ-10, ЦМ-12, МИ-5, 4604 и 4605 систем Mo–Zr–B, Mo–Al–B, Mo–Zr–Hf–B, Mo–Re, Mo–V–C и Mo–Ti–C соответ-

венно, а также жаропрочные ниобиевые сплавы 5ВМЦ, 10ВМЦ системы Nb–W–Mo–Zr и их модификации с дополнительным легированием танталом, ванадием, рением, углеродом и бором в виде листового проката, кованных прутков, трубок и других профилей. Данные сплавы были получены вакуумно-дуговой и электронно-лучевой плавкой с последующей горячей деформацией на лист либо пруток с промежуточными высокотемпературными отжигами и стабилизирующей термической обработкой на заключительном этапе технологического процесса.

В это же время в ИПП начали проводить исследования по изучению механических характеристик таких материалов на плоских, цилиндрических и трубчатых образцах, вырезанных из основного металла, металла сварного шва и сварных соединений, в диапазоне температур 290...2270 К (рис. 1–4).

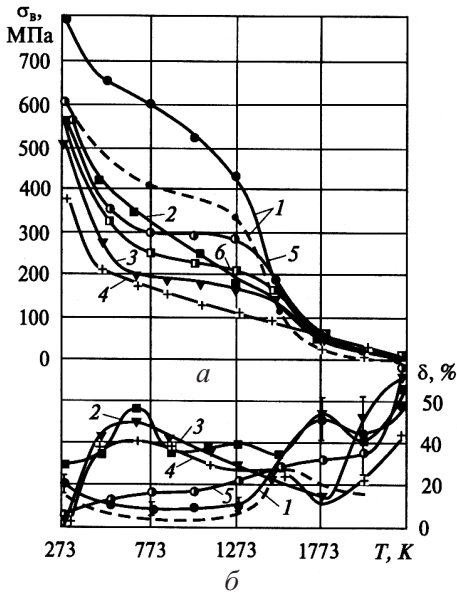


Рис. 1

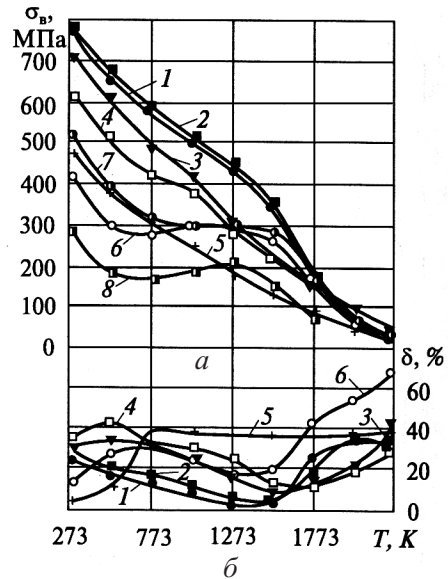


Рис. 2

Рис. 1. Температурные зависимости предела прочности (а) и относительного удлинения (б) молибденового сплава ЦМ-10 (1–4 – основной металл, лист толщиной 1,0 мм): 1 – отжиг при 1220 К, 1 ч (состояние поставки); 2 – отжиг при 1420 К, 1 ч; 3 – отжиг при 1970 К, 1 ч; 4 – отжиг при 2120 К, 1 ч; 5 – металл сварного шва; 6 – сварное соединение. (Дуговая сварка в гелии при скорости 0,28 см/с.)

Рис. 2. Температурные зависимости предела прочности (а) и относительного удлинения (б) молибденового сплава ЦМ-12 (1–5 – основной металл, лист толщиной 1,0 мм): 1 – отжиг при 1420 К, 1 ч (состояние поставки); 2 – отжиг при 1570 К, 1 ч; 3 – отжиг при 1770 К, 1 ч; 4 – отжиг при 1870 К, 1 ч; 5 – отжиг при 2270 К, 1 ч; 6 – металл сварного шва; 7, 8 – сварное соединение (7 – состояние после сварки, 8 – отжиг при 1770 К, 1 ч). (Дуговая сварка в гелии при скорости 0,28 см/с.)

Было исследовано влияние структурного состояния молибденовых и ниобиевых сплавов и определяющих его технологических факторов (термическая обработка, способ и параметры режима сварки и др.) на характеристики кратковременной прочности и пластичности основного металла, металла сварного шва и сварных соединений. Установлено, что сварные швы нио-

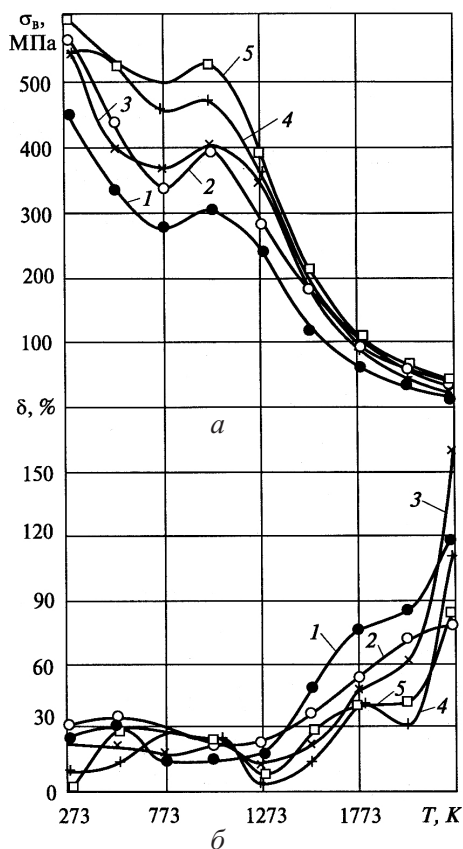


Рис. 3. Температурные зависимости предела прочности (а) и относительного удлинения (б) ниобиевых сплавов 5ВМЦ (1, 3) и 10ВМЦ (2, 4, 5): 1, 2 – основной металл (лист толщиной 1,0 мм, отжиг при 1420 К, 1 ч); 3–5 – металл сварного шва. (Дуговая сварка в гелии при скорости 0,28 см/с (3, 4) и 1,67 см/с (5).)

ниобиевых сплавов благодаря формированию в них характерной ячеистой структуры обладают высокой пластичностью и равнопрочны с основным металлом во всем исследованном диапазоне температур. Для молибденовых сплавов равнопрочность сварных соединений и основного металла имеет место только при температурах выше 1770 К, что связано с хрупкостью литого металла шва в области комнатных и повышенных температур [4–17]. На основании этого были сделаны рекомендации по выбору оптимальных режимов термической обработки и сварки указанных сплавов.

Исследовали также характеристики сопротивления усталости тонколистовых молибденовых и ниобиевых сплавов и их сварных соединений в различных структурных состояниях на базе до  $1 \cdot 10^6$  цикл, что было связано с необходимостью обеспечения целостности сварных конструкций РКТ при транспортировке по железной дороге [18–20]. По результатам испытаний установлены корреляционные связи между характеристиками кратковременной прочности, выносливости и размером зерна молибденовых ЦМ-6, ЦМ-10 и ниобиевых 5ВМЦ, 10ВМЦ сплавов, что позволяет существенно сократить затраты на проведение дальнейших исследований.

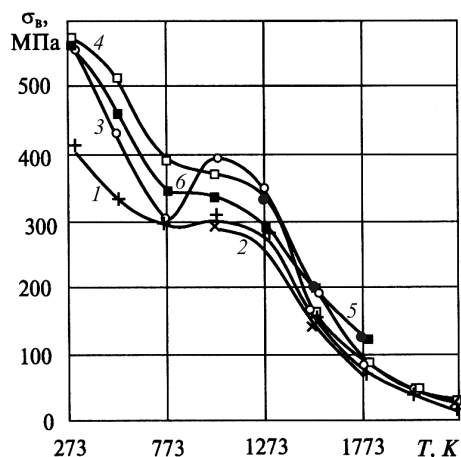


Рис. 4. Температурные зависимости предела прочности сварных соединений (дуговая сварка в гелии) ниобиевых сплавов 5ВМЦ (1, 2) и 10ВМЦ (3–6) после сварки (1–4) и отжига при 1470 К, 1 ч (5, 6): 1, 3, 5 – скорость сварки 0,28 см/с; 2, 4, 6 – скорость сварки 1,67 см/с.

**Характеристики высокотемпературной ползучести, длительной статической и малоцикловой прочности молибденовых и ниобиевых сплавов.** Характеристики ползучести, длительной статической и малоцикловой прочности листового проката, металла сварного шва и сварных соединений молибденовых и ниобиевых сплавов исследовали в диапазоне температур 1520...2270 К на временных базах до 8 ч с учетом технологических и эксплуатационных факторов. Установлено, что характеристики длительной прочности и ползучести металла сварного шва и сварных соединений молибденового сплава ЦМ-10, представляющего собой технически чистый молибден, раскисленный алюминием и бором, существенно ниже, чем листового проката. Характеристики жаропрочности сварных швов молибденовых сплавов ЦМ-6, ЦМ-12 и МИ-5, легированных в малых количествах редкоземельными металлами, а также ниобиевых сплавов 5ВМЦ и 10ВМЦ соответствуют таковым основного металла [21–29].

Анализ экспериментальных результатов по циклической ползучести и длительной прочности (рис. 5–7) листового проката молибденовых сплавов 4604, ЦМ-6 и ЦМ-10 показывает, что кривые малоцикловой прочности и предельных скоростей циклической ползучести могут быть удовлетворительно описаны с помощью данных по статической ползучести и длительной прочности при аналогичных температурах, исходя из представлений об эквивалентных напряжениях и линейной гипотезы суммирования повреждений [21, 23, 28].

Учитывая, что ряд ответственных конструктивных элементов объектов РКТ работает в условиях воздействия высокотемпературных окислительных и агрессивных газовых сред, были проведены исследования по оценке влияния продуктов сгорания ракетного топлива на структуру и механические характеристики ниобиевого сплава 10ВМЦ, а также определены характеристики высокотемпературной прочности, пластичности и ползучести ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическими защитными покрытиями в вакууме, инертной среде и на воздухе [30–33].

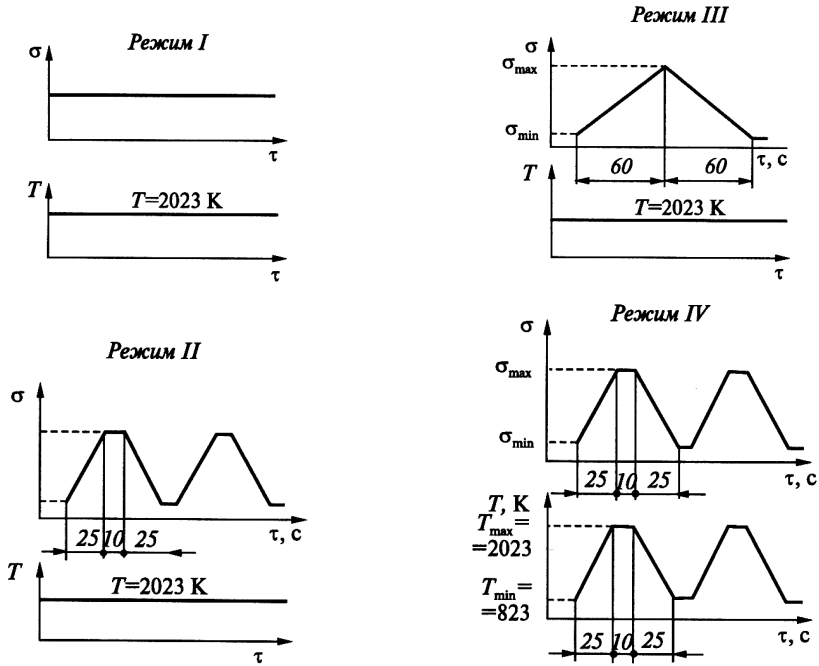


Рис. 5. Режимы испытаний молибденового сплава 4604.

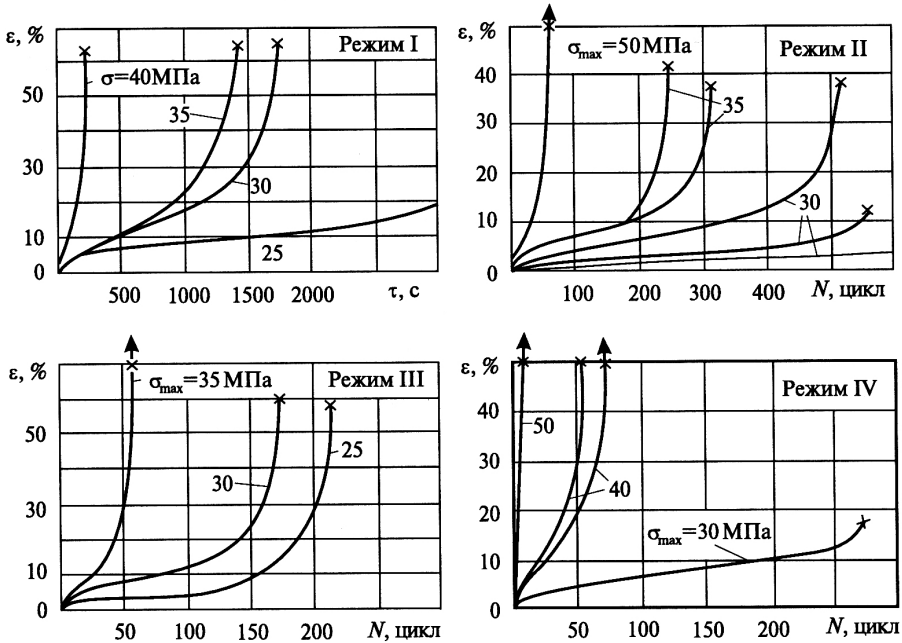


Рис. 6. Кривые ползучести сплава 4604 при различных режимах температурно-силового нагружения (рис. 5).

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет установить корреляционные связи между характеристиками кратковременной, длительной статической, малоцикловой прочности и ползучести исследованных сплавов молибдена и ниобия в определенных температурно-силовых областях

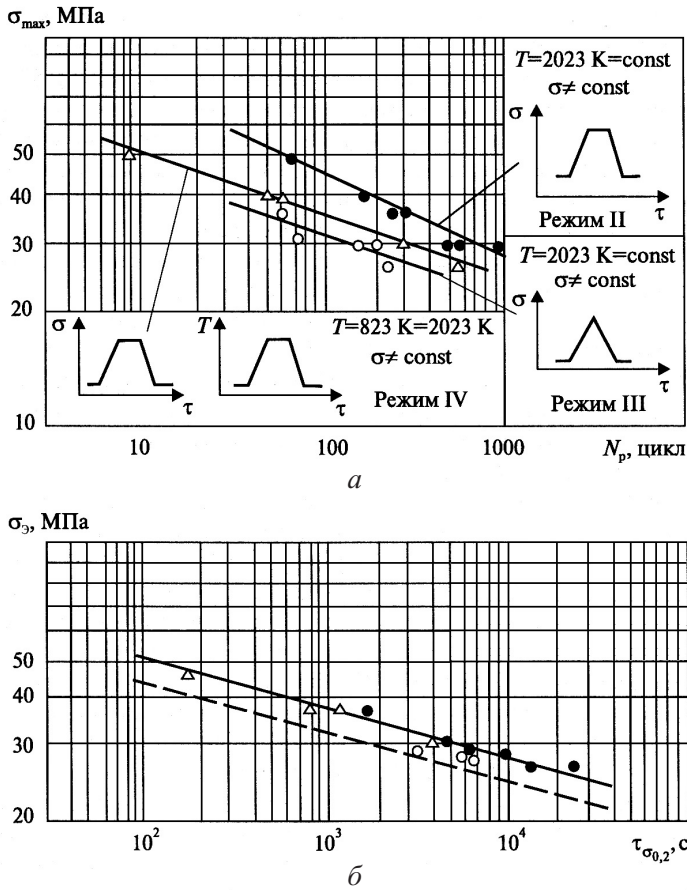


Рис. 7. Кривые длительной прочности сплава 4604 при различных режимах температурно-силового нагружения в координатах  $\lg \sigma_{\max} - \lg N_p$  - а и  $\lg \sigma_{\text{э}} - \lg \tau_{\sigma_{0,2}}$  - б ( $\sigma_{\text{э}}$  - эквивалентные напряжения;  $\tau_{\sigma_{0,2}}$  - суммарное время до разрушения при напряжениях цикла, превышающих предел текучести материала): ● - режим II; ○ - режим III; △ - режим IV.

((0,5...0,8) $T_{\text{пл}}$ ), в пределах которых пластическая деформация и разрушение материала контролируются одними и теми же превалирующими физическими процессами и механизмами. Были предложены аналитические выражения для описания этих связей и показано, что в ряде случаев они носят общий характер, описываются единой кривой и не зависят от химического состава и структурного состояния материала [34–36].

**Прочность при сложном напряженном состоянии.** При исследовании законов упрочнения и предельной пластичности молибденовых сплавов при сложном напряженном состоянии установлено, что вид напряженного состояния существенно влияет на их прочность и пластичность [37–41], особенно в низкотемпературном диапазоне (160...290 К). С наложением второй растягивающей компоненты при температурах ниже 200 К и прочность и пластичность сплавов снижаются приблизительно на порядок. В высокотемпературном диапазоне влияние вида напряженного состояния проявляется меньше. Так, в отличие от низкотемпературного диапазона, при температурах 290...

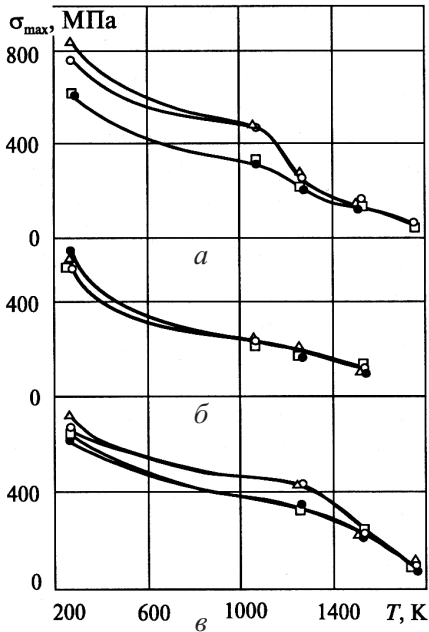


Рис. 8

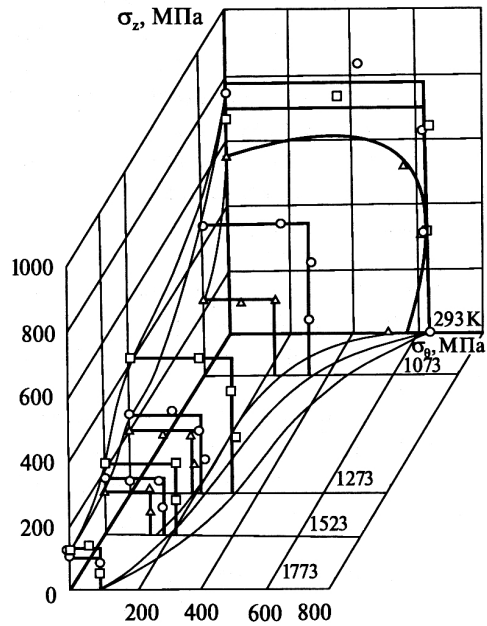


Рис. 9

Рис. 8. Температурные зависимости максимальных напряжений молибдена (а) и его сплавов ЦМ-6 (б) и 4605 (в) при различных видах напряженного состояния:  $\circ$  –  $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$ ;  $\triangle$  –  $K = 2$ ;  $\square$  –  $K = 1$ ;  $\bullet$  –  $K = 0,5$ .

Рис. 9. Предельные кривые разрушения молибдена МЧ ( $\circ$ ) и его сплавов 4605 ( $\square$ ) и ЦМ-6 ( $\triangle$ ) при высоких температурах.

...1520 К подтверждается гипотеза о существовании единой кривой деформирования в координатах интенсивность напряжений – интенсивность деформаций (рис. 8, 9).

Предельное состояние разрушения в высокотемпературной области удовлетворительно описывается критерием максимальных касательных напряжений, в то время как в низкотемпературном диапазоне применение известных критериев прочности для расчета предельных состояний не представляется возможным. Поэтому несущую способность элементов конструкций из сплавов молибдена необходимо рассчитывать на основе экспериментальных данных, полученных при конкретных условиях температурного и силового нагружения. Анализ экспериментально полученных кривых разрушения молибдена и его сплавов показывает, что с повышением температуры изменяются не только размеры, но и форма предельных кривых, что свидетельствует о фазовых превращениях в металлах вследствие влияния как температуры, так и вида напряженного состояния.

Предложено условие прочности, описывающее предельное состояние анизотропных сплавов на основе молибдена в широком диапазоне температур [39]. Установлено, что анизотропия деформированных молибденовых сплавов, наблюдаемая при комнатной температуре, сохраняется во всем исследованном температурном диапазоне, в интервале средней гомологической температуры  $(0,35 \dots 0,45)T_{пл}$  она значительно возрастает.

## Выводы

1. На основании проведенных комплексных экспериментальных исследований определены механические характеристики и установлены закономерности деформирования и разрушения молибденовых и ниобиевых сплавов при кратковременном, длительном статическом, мало- и многоцикловом нагружении в широком диапазоне высоких температур с учетом влияния химического состава материала, его структуры, технологических и эксплуатационных факторов.

2. Результаты исследований использованы при выборе материалов, параметров термической обработки и сварки, а также в прочностных расчетах ответственных деталей и конструктивных элементов объектов РКТ.

## Резюме

Узагальнено результати досліджень механічних характеристик молибденових і ніобієвих сплавів та їх зварних з'єднань, що використовуються в ракетно-космічній техніці. Дослідження проводили в умовах короткочасного, тривалого статичного і малоциклового навантаження на малих часових базах у діапазоні температур 290...2270 К

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. *Металлургия и технология сварки тугоплавких металлов и сплавов на их основе* / Под ред. С. М. Гуревича. – Киев: Наук. думка, 1982. – 304 с.
4. *Бухановский В. В., Харченко В. К., Юдковский С. И., Киселева В. Н.* Влияние температуры и условий испытаний на механические свойства молибденового сплава 4604 в различных структурных состояниях // Пробл. прочности. – 1984. – № 12. – С. 33 – 40.
5. *Бухановский В. В., Алексеенко Г. Н., Василенко Т. Н. и др.* Механические свойства основного металла и сварных соединений молибдена, легированного рением // Автомат. сварка. – 1987. – № 8. – С. 24 – 26.
6. *Бухановский В. В., Картышов Н. Г., Полищук Е. П. и др.* Влияние термической обработки на механические свойства и характер разрушения листовых молибденовых сплавов // Пробл. прочности. – 1987. – № 8. – С. 53 – 57.
7. *Бухановский В. В., Харченко В. К., Полищук Е. П. и др.* Влияние технологических факторов на характеристики жаропрочности молибденовых сплавов // Там же. – 1988. – № 6. – С. 102 – 108.
8. *Бухановский В. В., Харченко В. К., Аснис Е. А. и др.* Механические свойства и разрушение листового проката и сварных соединений ниобиевых сплавов в диапазоне температур 20–2000°C // Автомат. сварка. – 1990. – № 5. – С. 16 – 20.



9. Бухановский В. В., Харченко В. К., Касьян К. Н. и др. Механические свойства листового проката и сварных соединений молибденовых сплавов ЦМ-6 и ЦМ-10 в диапазоне температур 293...2273 К // Там же. – 1992. – № 4. – С. 13 – 16.
10. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. и др. Характеристики прочности молибденового сплава системы Mo–Zr–Hf–W в широком диапазоне температур. Сообщ. 1. Кратковременная прочность // Физика и химия обраб. материалов. – 1994. – № 3. – С. 140 – 148.
11. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. Механические характеристики молибденовых сплавов систем Mo–Al–W и Mo–Zr–W в диапазоне температур 290...2270 К // Пробл. прочности. – 1995. – № 11-12. – С. 70 – 80.
12. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. Характеристики кратковременной прочности и пластичности ниобиевого сплава 10ВМЦ системы Nb–W–Mo–Zr в диапазоне температур 290...2270 // Там же. – 1996. – № 6. – С. 113 – 120.
13. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. Механические свойства ниобиевого сплава Nb–W–Mo–Zr в широком диапазоне температур // Металлы. – 1998. – № 1. – С. 71 – 74.
14. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. Закономерности пластической деформации и структурные превращения в сварных соединениях ниобиевого сплава 10ВМЦ при комнатной и высокой температурах // Там же. – № 5. – С. 56 – 62.
15. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. и др. Прочность и пластичность листового проката и сварных соединений ниобиевого сплава 10ВМЦ и его модификаций в диапазоне температур 290...2270 К // Автомат. сварка. – 1997. – № 1-6. – С. 10 – 15.
16. Бухановский В. В. Влияние термической обработки и сварки на механические характеристики низколегированных молибденовых сплавов в широком диапазоне температур // Металловедение и терм. обраб. металлов. – 2000. – № 7. – С. 27 – 32.
17. Бухановский В. В. Влияние термической обработки и сварки на механические свойства сварных соединений молибденовых сплавов в широком диапазоне температур // Там же. – 2001. – № 9. – С. 28 – 34.
18. Бухановский В. В., Харченко В. К., Аснис Е. А. и др. Сопротивление усталости листового проката и сварных соединений ниобиевого сплава 10ВМЦ // Автомат. сварка. – 1989. – № 3. – С. 15 – 18.
19. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. Влияние термической обработки и сварки на сопротивление усталости молибденовых сплавов систем Mo–Al–W и Mo–Zr–W // Металловедение и терм. обраб. металлов. – 1997. – № 6. – С. 16 – 19.
20. Бухановский В. В. Взаимосвязь характеристик сопротивления усталости, кратковременной прочности и структурой низколегированных молибденовых сплавов // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 75 – 85.

21. Каспрук Е. Н., Хамаза Л. А., Харченко В. К. и др. Исследование закономерностей деформирования и разрушения поликристаллического сплава молибдена при высокотемпературной циклической ползучести. Сообщ. 1. Длительная прочность и ползучесть // Там же. – 1982. – № 12. – С. 32 – 37.
22. Бухановский В. В., Харченко В. К., Аснис Е. А. и др. Кратковременная ползучесть и длительная прочность сварных швов ниобиевого сплава 10ВМЦ при высоких температурах // Автомат. сварка. – 1989. – № 9. – С. 32 – 37.
23. Бухановский В. В., Харченко В. К., Кравченко В. С. и др. Циклическая ползучесть и разрушение молибденовых сплавов ЦМ-6 и ЦМ-10 при высоких температурах // Пробл. прочности. – 1989. – № 8. – С. 37 – 42.
24. Бухановский В. В., Харченко В. К., Скрипник Н. В. и др. Характеристики жаропрочности листового проката и сварных швов молибденовых сплавов Мо–5%Re и ЦМ-10 // Автомат. сварка. – 1990. – № 5. – С. 21 – 25.
25. Бухановский В. В., Харченко В. К., Полищук Е. П. и др. Длительная прочность и ползучесть сварных швов на молибденовых сплавах при высоких температурах // Там же. – 1992. – № 2. – С. 15 – 20.
26. Борисенко В. А., Бухановский В. В., Харченко В. К. Ползучесть и длительная прочность листового проката и сварных соединений ниобиевого сплава системы Nb–W–Mo–Zr при высоких температурах // Пробл. прочности. – 1993. – № 12. – С. 24 – 32.
27. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. и др. Характеристики прочности молибденового сплава системы Mo–Zr–Hf–W в широком диапазоне температур. Сообщ. 2. Ползучесть и длительная прочность // Физика и химия обраб. материалов. – 1994. – № 4-5. – С. 231 – 239.
28. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К. Высокотемпературная прочность и ползучесть сварных швов молибденовых сплавов при малоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 1994. – № 11. – С. 32 – 44.
29. Бухановский В. В., Харченко В. К., Мамузич И. Характеристики жаропрочности низколегированного молибденового сплава ВМ-1 // Там же. – 2007. – № 4. – С. 90 – 98.
30. Бухановский В. В., Мамузич И. Влияние высокотемпературной газовой среды на структуру и механические характеристики ниобиевого сплава 10ВМЦ // Металловедение и терм. обраб. металлов. – 2008. – № 3. – С. 31 – 37.
31. Бухановский В. В. Влияние силицидно-керамических покрытий на высокотемпературную прочность ниобиевого сплава системы Nb–W–Mo–Zr // Там же. – 2004. – № 2. – С. 29 – 34.
32. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К., Мамузич И. Высокотемпературная прочность ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическим защитным покрытием. Сообщ. 1. Характеристики кратковременной прочности // Пробл. прочности. – 2004. – № 2. – С. 119 – 129.

33. Бухановский В. В., Борисенко В. А., Харченко В. К., Мамузич И. Высоко-температурная прочность ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическим защитным покрытием. Сообщ. 2. Характеристики секундной ползучести // Там же. – № 5. – С. 77 – 86.
34. Бухановский В. В., Борисенко В. А., 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.
35. Бухановский В. В. Взаимосвязь характеристик прочности и ползучести сплавов на основе молибдена и вольфрама // Металлы. – 1999. – № 5. – С. 73 – 79.
36. Бухановский В. В. Взаимосвязь характеристик прочности и ползучести сплавов на основе ниобия // Там же. – 2000. – № 3. – С. 86 – 93.
37. Харченко В. К., Волков Ю. Н. Исследование прочности и пластичности молибдена в условиях сложного напряженного состояния в диапазоне температур от 293 до 1773 К // Пробл. прочности. – 1981. – № 10. – С. 63 – 65.
38. Волков Ю. Н., Харченко В. К. Условия прочности молибдена и его малолегированных сплавов при сложном напряженном состоянии и высоких температурах // Там же. – 1983. – № 2. – С. 49 – 53.
39. Волков Ю. Н. Статическая прочность тугоплавких металлов и их сплавов при сложном напряженном состоянии и высоких температурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1983. – 24 с.
40. Волков Ю. Н., Гигиняк Ф. Ф., Харченко В. К. Закономерности деформирования и разрушения молибдена при плоском напряженном состоянии в широком диапазоне температур // Прочность материалов и элементов конструкций при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 55 – 60.
41. Волков Ю. Н., Харченко В. К. Влияние вида напряженного состояния на прочность и пластичность сплавов на основе молибдена и ниобия при высоких температурах // Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1986. – С. 71 – 75.

Поступила 22. 06. 2011