


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ

на правах рукопису

БУХАНОВСЬКИЙ Віктор Володимирович

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА МІЦНІСТЬ МОЛІБДЕНОВИХ ТА
НІОБІЄВИХ СПЛАВІВ ТА ЇХНІХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

05.02.09 - Динаміка, міцність машин, приладів
та апаратури



Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 1995

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00755717 (W)

АВ 32.733

Робота виконана у ~~інституті~~ проблем міцності
Національної АН України

Наукові керівники: доктор технічних наук, професор
В.О. Борисенко
кандидат технічних наук, стар-
ший науковий співробітник
В.К. Харченко

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
В.В. Кривеньок
доктор технічних наук
І.С. Малашенко


Провідна установа: Інститут електрозварювання
ім.Є.О.Патона НАН України

Захист відбудеться "28" вересня 1995 р.
о 9³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 01.99.01 при Інституті проблем міцності НАН України
у приміщенні конференц-залу Інституту / 252014, Київ -
14, вул. Тимірязевська, 2 /.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інсти-
туту проблем міцності НАН України

Автореферат розіслано "4" серпня 1995 р.

Учений секретар
спеціалізованої ради
доктор технічних наук

 О.О. Гігіняк

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальність проблеми. Завдяки останнім досягненням в області металургії та технології зварювання тугоплавких металів та сплавів у ряді галузей промисловості з'явилися можливості виготовлення зварних конструкцій відповідального призначення, умови праці яких характеризуються екстремально високими рівнями температур, нестационарними режимами навантаження, впливом агресивних газових середовищ.

Відомо, що механічні характеристики тугоплавких металів та сплавів залежать від структурного стану матеріалу та визначаючих його технологічних факторів. А працездатність зварної конструкції в умовах високотемпературного навантаження визначається не лише короткочасною міцністю основного металу та зварних з'єднань, але і їхньою здатністю на протязі визначеного часу зберігати розмірну стабільність та задані фізико-механічні властивості.

Аналіз літературних відомостей показав, що дослідження механічних характеристик та особливостей руйнування зварних з'єднань тугоплавких сплавів з урахуванням впливу технологічних та експлуатаційних факторів обмежені. А експериментальні дані про їхню високотемпературну міцність та повзучість в умовах тривалого статичного та малоциклового навантаження вкрай рідкісні та мають фрагментарний характер. В зв'язку з цим є актуальною проблема систематичного дослідження закономірностей зміни міцності та деформативності даного класу матеріалів та їхніх зварних з'єднань в залежності від температури, впливу статичних та змінних у часі навантажень.

Мета дисертаційної роботи. полягає у вирішенні наступних основних завдань:

провести комплексне експериментальне дослідження характеристик міцності та закономірностей деформування та руйнування туго-

плавких сплавів на основі молібдену та ніобію з твердорозчинним та комбінованим зміцненням та їхніх зварних з'єднань у широкому діапазоні температур з урахуванням структурного стану матеріалу в умовах короткочасного, тривалого статичного та малоциклового навантаження;

розробити та експериментально обґрунтувати з використанням отриманих даних критерій високотемпературної малоциклової міцності матеріалів;

встановити кореляційні зв'язки поміж характеристиками міцності при згаданих умовах навантаження;

на підставі отриманих даних про міцність матеріалів та їхніх зварних з'єднань розробити рекомендації по вибору параметрів режиму зварювання та термічної обробки молібденових та ніобієвих сплавів.

наукова новизна. У роботі визначено основні закономірності зміни короткочасної міцності, пластичності та характеру руйнування молібденових та ніобієвих сплавів з твердорозчинним та комбінованим зміцненням та їхніх зварних з'єднань у діапазоні температур від 290 до 2270 К в залежності від структурного стану матеріалу та технологічних факторів, що його визначають. Показано, що короткочасна міцність деформованих сплавів молібдену систем Mo-Al-B, Mo-Zr-B та Mo-Zr-Hf-B у високотемпературній області /при $T > 0,5 T_{пл}$ / може бути збільшена на 30-60% шляхом старіння при термічній обробці матеріалу у діапазоні температур 1570-1870 К.

Досліджено закономірності деформування та руйнування молібденових та ніобієвих сплавів та їхніх зварних з'єднань в умовах високотемпературного тривалого статичного та малоциклового навантаження. На прикладі сплавів систем Mo-Al-B та Mo-Zr-B показано, що криві статичної та циклічної повзучості молібденових сплавів

при еквівалентних умовах навантаження є якісно *судимими*. А характеристики їхньої малоциклової міцності можна задовільно оцінити за результатами статичних випробувань на підставі гіпотези лінійного накопичення пошкоджень та уявлень про еквівалентні напруження. Запропоновано та експериментально обгрунтовано критерій малоциклової міцності, заснований на використанні еквівалентних напружень, виходячи з умови рівності роботи діючих напружень на деформаціях повзучості.

Встановлено емпіричні залежності, що пов'язують швидкість сталої повзучості та час до руйнування досліджених сплавів при заданих умовах статичного або малоциклового навантаження з відношенням величини прикладених напружень до границі міцності матеріалу при відповідній температурі.

Практична цінність. Одержано обширні експериментальні дані про короткочасну, тривалу статичну та малоциклову міцність промислових сплавів молібдену та ніобію з урахуванням характеристик розсіювання у широкому діапазоні температур. Запропоновано аналітичну залежність для оцінки несучої спроможності тугоплавких матеріалів в умовах високотемпературної циклічної повзучості.

Запропоновано аналітичні вирази для опису кореляційних зв'язків поміж характеристиками короткочасної, тривалої статичної та малоциклової міцності молібденових та ніобієвих сплавів при температурах більш як $0,5 T_{пл}$, що дозволяють проводити прискорену оцінку характеристик жароміцності матеріалу, виходячи з його паспортних відомостей про механічні властивості при короткочасному навантаженні.

На підставі дослідження впливу способу, швидкості зварювання та температури відгалу на механічні властивості зварних з'єднань розроблено науково-обгрунтовані рекомендації по вибору параметрів режиму зварювання та термічної обробки малолегованих спл-

авів молібдену та ніобію з твердорозчинним та комбінованим зміцненням. Отримані експериментальні дані використано при виборі матеріалів, призначенні параметрів режиму зварювання та термічної обробки, а також у розрахунках міцності зварних конструкцій елементів систем газоструменного керування та аеродинамічних рулів об'єктів ракетно-космічної техніки.

Результати досліджень впроваджено у Московському інституті теплотехніки, НВО "Композит" / м.Калінінград Московської обл. /, ДКБ "Темп" / м.Перм / з суттєвим економічним ефектом, що дозволило знизити витрати на проведення дослідно-конструкторських робіт та підвищити надійність зварних конструкцій об'єктів нової техніки.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на XII та XIII-му Всесоюзних семінарах із зварювання тугоплавких металів / Київ, ІЄЗ ім.Є.О.Патона НАН України, 1985, 1988 р.р. /, Всесоюзній конференції "Сучасні проблеми фізики та її додатків" / Москва, 1987р. /, Другій міжвузівській науково-практичній конференції "Проблеми міцності та надійності деталей та конструкцій" / Кіровоград, 1987 р. /, X Всесоюзній конференції з електронно-променевого зварювання / Санкт-Петербург, 1988 р. /, I Всесоюзному симпозиумі "Нові жароміцні та жаростійкі матеріали" / Москва, 1990 р. /, IV Всесоюзній конференції із зварювання кольорових металів / Маріуполь, 1990 р. /, Міжнародній конференції "Зварні конструкції" / Київ, ІЄЗ ім.Є.О.Патона НАН України, 1990 р. /.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 22 друкованих праці.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав, списку використаної літератури та додатку. Роботу викладено на 158 сторінках друкованого тексту, містить 12 таб-

лиць, 85 ілюстрацій, 157 найменувань літератури.

Особистий внесок автора. Автором особисто отримано, проаналізовано і узагальнено обширні експериментальні дані з міцності, деформативності та характеру руйнування молібденових і ніобієвих сплавів та їхніх зварних з'єднань в умовах короткочасного, тривалого статичного і малоциклового навантаження у широкому діапазоні температур. Розроблено та експериментально обгрунтовано критерій малоциклової міцності матеріалів, що базується на енергетичних підходах. Отримано емпіричні залежності, що пов'язують характеристики повзучості, тривалої статичної і короткочасної міцності досліджених сплавів у певному температурному інтервалі.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проаналізовано стан проблеми, обумовлено актуальність завдань, що становлять предмет досліджень, охарактеризовано новизну та практичну цінність отриманих результатів і суть наукових положень, що винесено на захист.

У першій главі подано огляд даних про методи отримання та зварювання, основні властивості і галузі промислового використання тугоплавких металів та сплавів стосовно до створення зварних конструкцій, що працюють у екстремальних умовах. Обгрунтовано необхідність проведення експериментальних досліджень механічних властивостей нових тугоплавких сплавів молібдену і ніобію та їхніх зварних з'єднань з урахуванням впливу технологічних та експлуатаційних факторів / способу, параметрів режиму зварювання і термічної обробки, високих температур, нестационарних режимів навантаження /.

Подано огляд методів та експериментальних засобів для дослідження механічних властивостей тугоплавких матеріалів в умовах короткочасного, тривалого статичного і малоциклового навантажен-

ня у широкому діапазоні температур.

Розглядено основні закономірності деформування та критерії оцінки несучої спроможності жароміцних і тугоплавких матеріалів в умовах високотемпературного малоциклового навантаження. Проведено аналіз кореляційних залежностей між механічними характеристиками матеріалів при різноманітних видах навантаження та методів прогнозування характеристик тривалої міцності тугоплавких металів і сплавів.

На підставі огляду сформульовано ціль та завдання дисертаційної роботи.

У другій главі надано характеристику молібденових сплавів системи Mo-Al-B / ЦМ-10 /, Mo-Zr-B / ЦМ-6 /, Mo-Zr-Hf-B / ЦМ-12 /, Mo-Re / МІ-5 /, Mo-V-C / сплав 4604 / та ніобієвих сплавів системи Nb-W-Mo-Zr / 5ВЦ і 10ВЦ /, Nb-W-Mo-Ta-Re-Zr / 10ВЦ-ТР /, Nb-W-Mo-V-Ta-Zr / 10ВЦ-ВТ / та Nb-W-Mo-Zr-B з твердорозчинним і комбінованим зміцненням. Розглянуто їхні основні властивості, хімічний склад та особливості структури у деформованому, литому і рекристалізованому стані. Наведено способи та технологію отримання сплавів, режими зварювання і термічної обробки.

Описано використане експериментальне обладнання та методи проведення високотемпературних механічних випробувань при короткочасному, тривалому статичному і малоцикловому навантаженні.

Механічні характеристики сплавів визначали на глоских п'ятикратних пропорційних зразках, що було вирізано з листового прокату товщиною 1-2 мм та зварних з'єднань, отриманих методами дугового зварювання у контрольованій атмосфері гелію і електронно-променевого зварювання у вакуумі^ж.

^ж Зварювання виконували в ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАН України.

Випробування на короточасну статичну міцність проводили у вакуумі не гірше за $1,3 \times 10^{-2}$ Па з постійною швидкістю деформування 2 мм/хв. , що відповідало відносній швидкості деформації $2,2 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Рівні температур / $0,5-0,8 T_{\text{пл.}}$ /, напружень / $0,3-0,9 \sigma_B$ / та часові бази / $0,1-10 \text{ г.}$ / при випробуваннях на повзучість та тривалу міцність в умовах статичного та малоциклового навантаження було обрано, виходячи з реальних умов експлуатації деяких об'єктів нової техніки.

Наприкінці глави описано методики структурних досліджень матеріалів та статистичної обробки результатів випробувань*.

У третій главі наведено результати експериментальних досліджень короточасної міцності, закономірностей деформування та руйнування листового прокату, металу шва та зварних з'єднань молібденових та ніобієвих сплавів у діапазоні температур $290-2270 \text{ К}$ в залежності від структурного стану матеріалу та технологічних факторів, що його визначають.

Встановлено, що серед досліджених сплавів молібдену найбільш високою міцністю володіють сплави ЦМ-6 та ЦМ-12 систем Мо- Zr -В та Мо- Zr - Hf -В. При температурі 2270 К границя міцності зазначених сплавів становить: для деформованого основного матеріалу 30 та 40 МПа та для литого металу шва - 23 та 32 МПа відповідно. Найнижчу міцність має сплав ЦМ-10 системи Мо- Al -В, що за хімічним складом дуже близький до технічно чистого молібдену. Його границя міцності при 2270 К становить лише 8 МПа . Сплав М1-5 системи Мо- Re показав найбільш високу пластичність як у деформованому, так і у литому стані, у поєднанні з підвищеною жароміцністю.

* Структурні дослідження проводили у ЦМ, ІІЗ ім.С.О.Патона та ІІМ ім. І.М.Францевича НАН України.

Механічні характеристики молібденових сплавів залежать від структурного стану матеріалу. У найбільшій мірі різниця у властивостях деформованого, рекристалізованого та литого матеріалу виявляється у діапазоні температур від кімнатної до температур початку рекристалізації. Причому, якщо термічна обробка призводить до розміцнення сплавів при кімнатній та підвищених температурах, то у високотемпературній області міцність деформованого матеріалу може бути збільшена на 30-60% шляхом старіння при 1-годинному відгалі у діапазоні температур 1570-1870 К.

Зварні з'єднання молібденових сплавів за міцністю поступаються основному металу в інтервалі температур від кімнатної до 1770 К та рівномічні з ним при більш високих температурах.

Механічні характеристики зварних з'єднань молібденових сплавів чутливі до зміни параметрів режиму зварювання та термічної обробки. Так, високотемпературний відгалі призводить до окрихнення зварних швів та різкого, до 60%, зниження їхньої міцності. При цьому у зломі зростає доля інтеркристалітного руйнування, з'являються пори, що свідчать про вихід газових домішок до границь зерна.

Показано, що зварювання на підвищених швидкостях, у діапазоні I, II-2, 22 $\text{cm}^2/\text{с}$, сприяє збільшенню міцності та деформативності зварних з'єднань технічно чистого молібдену / сплав ІМ-10 / за рахунок формування дрібнозернистої структури шва з більш рівномірним розподілом домішок проникнення. При цьому міцність та пластичність металу шва збільшується до 30 та 50% відповідно. Для жароміцних сплавів ІМ-6 та ІМ-12 оптимальними являються швидкості зварювання порядку 0,28-0,56 $\text{cm}^2/\text{с}$.

Спосіб зварювання не впливає на міцність зварних з'єднань молібдену та його сплавів.

Характер руйнування молібденових сплавів залежить від стр-

руктурного стану матеріалу та температури вигробування. Для деформованого матеріалу має місце в'язке руйнування у всьому дослідженому діапазоні температур. Для рекристалізованого основного металу та литого металу шва характерне крихке транс- та інтеркристалітне руйнування при температурах нижче температур в'язко-крихкого переходу та в'язке руйнування у високотемпературній області.

Ніобієві сплави 5ВМЦ та ІОБМЦ системи Nb-W-Mo-Zr мають високу пластичність як у рекристалізованому, так і у литому стані, у поєднанні з показниками високотемпературної міцності, що не поступається жароміцним сплавам молібдену. Так, границя міцності сплава 5ВМЦ при 2270 К становить 20 МПа, сплава ІОБМЦ - 40 МПа.

Характерною особливістю температурних залежностей механічних властивостей ніобієвих сплавів є екстремуми у діапазоні 770-1270 К, пов'язані з процесами динамічного деформаційного старіння, що проявляється у збільшенні міцності та зниженні пластичності матеріалу.

Зварні з'єднання ніобієвих сплавів мають рівну міцність з основним металом у всьому дослідженому діапазоні температур. При кімнатній та підвищених температурах вони руйнуються по шву та зоні сплавлення, у високотемпературній області - здебільшого по основному металу. Руйнування практично у всіх випадках має в'язкий характер.

Міцність та деформативність зварних з'єднань сплава ІОБМЦ чутливі до зміни параметрів режиму зварювання та термічної обробки. Збільшення швидкості зварювання сприяє підвищенню міцності з'єднань. Однак, шви, отримані на підвищених швидкостях, порядку 1,67 см/с, мають низьку пластичність при кімнатній температурі внаслідок формування в них елементів дендритних структур. Одно-

годинний відгал у діапазоні температур 1470-1670 К сприяє вирівнюванню мікрохімічної неоднорідності, стабілізації структури та механічних характеристик зварних з'єднань.

Подання температурних залежностей характеристик міцності молібденових та ніобієвих сплавів у полулогарифмічних координатах $\ln \sigma_B - T$ показало, що у межах температурних інтервалів, де пластична деформація та руйнування матеріалу контролюються одними й тими ж провідними процесами та механізмами, вони задовільно описуються відомою експоненційною функцією / рис.1 /.

Отримані експериментальні дані з короточасної міцності використано при розробці практичних рекомендацій по вибору параметрів режиму зварювання та термічної обробки досліджених сплавів. Для підвищення високотемпературної міцності деформованих сп-

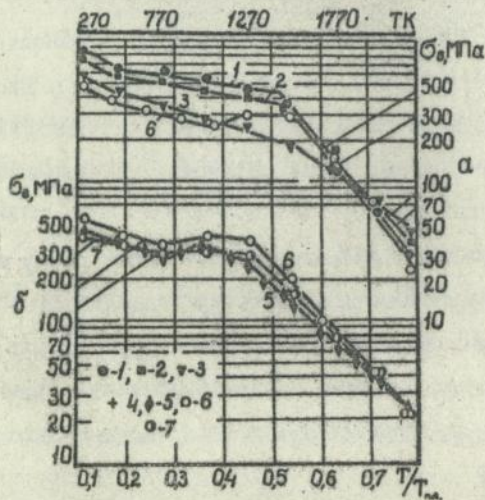


Рис.1. Температурні залежності границі міцності молібденового сплаву ЦМ-6 /а/ та ніобієвого сплаву 5ВМЦ /б/: 1-5 - основний метал ; 1 - відгал при 1420 К, 1г ; 2 - 1570 К, 1г ; 3 - 1770 К, 1г ; 4 - 2270 К, 1г ; 5 - 1670 К, 2г ; 6 - метал зварного шву ; 7 - зварне з'єднання.

лавів молібдену рекомендовано відгал у діапазоні температур 1570-1870 К. Зварювання технічно чистого молібдену рекомендовано проводити на підвищених швидкостях, у діапазоні I, II-2, 22 $\text{cm}^2/\text{с}$. Для жароміцних сплавів типу ЦМ-6 та ЦМ-12 рекомендовано швидкості порядку 0,28-0,56 $\text{cm}^2/\text{с}$ без наступної термічної обробки.

Для ніобієвих сплавів оптимальною є швидкість зварювання порядку 0,28 $\text{cm}^2/\text{с}$ з наступним відгалом у діапазоні температур 1470-1670 К.

Обидва досліджених способи зварювання рівноцінні. Однак, електронно-променеве зварювання має перевагу завдяки більш широким технологічним можливостям.

У четвертій главі наведено результати досліджень характеристик високотемпературної повзучості та міцності молібденових та ніобієвих сплавів та їхніх зварних з'єднань в умовах тривалого статичного та малоциклового навантаження на базах часу, що не перевищують 10 годин.

Встановлено, що характер кривих повзучості молібденових сплавів залежить від хімічного складу, структурного стану матеріалу та температури випробувань.

Найбільш високими показниками жароміцності володіє сплав ЦМ-12 системи Mo-Zr-Nf-B , найбільш низькими --- сплав ЦМ-10. Характеристики опору повзучості та тривалості міцності досліджених сплавів молібдену у литому та рекристалізованому стані здебільшого нижче у порівнянні з деформованим матеріалом. На кривих тривалості міцності зварних з'єднань при напруженнях, що становлять 0,5-0,8 від границі міцності, спостерігаються переломи. Перехід до другої ділянки діаграм супроводжується суттєвим зменшенням накопиченої до руйнування пластичної деформації / для сплава ЦМ-10 / або пересуненням місця руйнування з основного металу до зони сплавління / для сплава ЦМ-6 /.

Руйнування молібденових сплавів в залежності від умов температурно-силового навантаження та структурного стану матеріалу має в'язкий інтеркристалітний, транскристалітний або змішаний характер.

Міцність ніобієвих сплавів 5ВМЦ та 10ВМЦ системи Nb-W-Mo-Zr в умовах тривалого статичного навантаження не поступається аналогічним показникам жароміцних сплавів молібдену. Причому, їхні зварні з'єднання практично у всіх випадках мають рівну міцність з основним металом.

Криві повзучості, залежності швидкості сталої повзучості та часу до руйнування від напружень для ніобієвих сплавів в залежності від хімічного складу, структурного стану матеріалу та температури випробувань поділяються на два характерних типи, кожному з яких відповідає свій провідний механізм пластичної деформації та характер руйнування.

У випадку експериментальних даних, що описуються кривими першого типу, пластична деформація реалізується здебільшого за рахунок внутрішньозеренного сковзання з формуванням в'язкого транскристалітного руйнування. Значення коефіцієнтів α та β , що характеризують у логарифмічних координатах кут нахилу залежностей $\dot{\epsilon} = f(\sigma)$ та $\tau_p = f(\sigma)$, знаходяться у межах 5-7.

Для кривих другого типу характерне поміжзеренне сковзання, зародження та розвиток тріщин по границям зерна з формуванням в'язкого інтеркристалітного руйнування. Значення коефіцієнтів α та β становлять 9-11.

Характеристики малоциклової міцності тугоплавких матеріалів досліджували на молібденових сплавах ЦМ-6 та ЦМ-10 в умовах повторно-статичного розтягу за трапецеїдальним циклом зміни навантаження при температурах 1770 та 2020 К та максимальних напруженнях циклу, що перевищують 0,5 границі міцності матеріалу

/ рис.2 /.

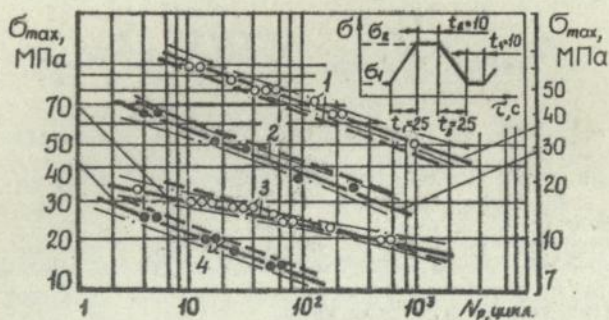


Рис.2. Форма циклу зміни напружень та криві малоциклової втомененості молібденового сплаву LM-10 при температурах 1770 К /1,2/ та 2020 К /3,4/ : 1,3 - основний метал ; 2,4 - метал зварного шва.

Встановлено, що руйнування листового прокату та металу шва молібденових сплавів при зазначених умовах навантаження має місце у квазистатичній області та визначається процесами циклічної повзучості. А криві циклічної та статичної повзучості є якісно схожими.

Показано, що характеристики малоциклової міцності молібденових сплавів задовільно описуються на підставі результатів випробувань на тривалу статичну міцність, виходячи з гіпотези лінійного накопичення пошкоджень та уявлень про еквівалентні напруження.

Для оцінки еквівалентних напружень циклічної повзучості запропоновано та експериментально обґрунтовано залежність, що базується на енергетичних підходах, в якій в якості параметру стану матеріалу приймається робота діючих напружень на деформаціях повзучості. У цьому випадку умова еквівалентного пошкодження матеріалу для циклічного та статичного навантаження запише-

ться таким чином:

$$A_{\text{цикл.}} = A_{\text{стат.}} = \int_0^{\sigma} \sigma(t) d\sigma, \quad / 1 /$$

де $A_{\text{цикл.}}$ - робота, що здійснюється циклічно змінюючимися напруженнями на шляху пластичної деформації від 0 до σ за певний відрізок часу t ;

$A_{\text{стат.}}$ - робота, що здійснюється еквівалентними статичними напруженнями за той же відрізок часу.

Враховуючи те, що

$$d\sigma = \dot{\sigma} dt = k \sigma^{\alpha} dt, \quad / 2 /$$

а рівень напружень у разі циклічного навантаження на кожній з ділянок трапецеїдального циклу постійна або змінюється за лінійним законом / рис.2 /, вирази для визначення $A_{\text{стат.}}$ та $A_{\text{цикл.}}$ за період часу $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ можна записати у вигляді:

$$A_{\text{стат.}} = \int_0^T k \sigma_{\text{екв.}}^{\alpha+1} dt = k \sigma_{\text{екв.}}^{\alpha+1} (t_1 + t_2 + t_3 + t_4), \quad / 3 /$$

$$A_{\text{цикл.}} = \int_0^{t_1} k \left[\sigma_1 + \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{t_1} t \right]^{\alpha+1} dt + \int_0^{t_2} k \sigma_2^{\alpha+1} dt + \\ + \int_0^{t_3} k \left[\sigma_2 - \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{t_3} t \right]^{\alpha+1} dt + \int_0^{t_4} k \sigma_1^{\alpha+1} dt \quad / 4 /$$

Виконавши інтегрування та вирівнявши разом рівняння /3/ та /4/ відносно $\sigma_{\text{екв.}}$, отримаєм вираз для визначення еквівалентних напружень по параметру роботи діючих напружень на шляху пластичного деформування матеріалу у загальному випадку трапецеїдального циклу:

$$\sigma_{\text{звб}} = \left[\frac{(\sigma_2^{\alpha+2} - \sigma_1^{\alpha+2})(t_1 + t_3)}{(\sigma_2 - \sigma_1)^{(\alpha+2)}(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)} + \frac{\sigma_2^{\alpha+1}t_2 + \sigma_1^{\alpha+1}t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}, 5 /$$

Для досліджених сплавів молібдену при $T > 0,5 T_{\text{пл}}$. $\alpha = 5-8$.

Криві малоциклової втомленості молібденових сплавів, побудовані за результатами тривалих статичних випробувань, здебільшого знаходяться у межах довірчих областей експериментальних кривих / рис.2 /. Причому, для металу шва відповідність поміж результатами експерименту та розрахунками, отриманими з використанням запропонованих енергетичних підходів, дещо вище у порівнянні з кривими, побудованими по відомим раніше залежностям.

Отриманий обсяг експериментальних даних з короткочасної, тривалої статичної та малоциклової міцності молібденових та ніобієвих сплавів дозволив провести їхній спільний аналіз з метою встановлення кореляційних зв'язків поміж зазначеними механічними характеристиками.

При аналізі виходили з припущення про те, що фізичні процеси та механізми, що контролюють пластичну деформацію та руйнування матеріалу при короткочасному, тривалому статичному та малоцикловому навантаженні у певних інтервалах температури та часу є схожими, а вплив температурного фактору у рівній мірі позначається на розміщенні матеріалу при різноманітних видах навантаження.

Подання результатів випробувань молібденових сплавів на тривалу статичну та малоциклову міцність у діапазоні температур 1770-2270 K у вигляді графіків, що характеризують у логарифмічних координатах залежності швидкості сталої повзучості та часу до руйнування від величини відношення прикладених напружень / у випадку малоциклового навантаження - еквівалентних напружень /

до границі міцності матеріалу при відповідній температурі σ_B^T , показано, що усі отримані дані належать до єдиної генеральної сукупності та можуть бути описані наступними виразами:

$$\dot{\epsilon} = A' (\sigma / \sigma_B^T)^{\alpha'} \quad / 6 /$$

$$\tau_p = B' (\sigma / \sigma_B^T)^{\beta'} \quad / 7 /$$

де α' , β' , A' та B' - коефіцієнти, постійні для даного класу матеріалів у певному діапазоні температур та що залежать від їхнього структурного стану.

Наявність відомого взаємозв'язку поміж швидкістю сталості повзучості та довговічністю матеріалу, який для малолегованих сплавів молібдену описується виразом:

$$\tau_p \dot{\epsilon}^{0,73} = 44,05 \quad / 8 /$$

дозволило зробити припущення, що для даного класу матеріалів у високотемпературній області існує загальна кореляційна залежність, що пов'язує три характеристики: відношення діючих напружень до границі міцності матеріалу при визначеній температурі σ / σ_B^T , швидкість сталості повзучості $\dot{\epsilon}$ та час до руйнування τ_p , що відповідають зазначеному рівню напружень в умовах тривалого статичного або малоциклового навантаження. Ця залежність, отримана емпірично, являє собою пряму лінію у просторі у трійній системі координат, по осях якої відкладено відповідно логарифми $\dot{\epsilon}$, τ_p та σ / σ_B^T / рис. 3 / та може бути описана системою рівнянь:

$$A_1 \ln \dot{\epsilon} + B_1 \ln \tau_p + C_1 \ln (\sigma / \sigma_B^T) + D_1 = 0 \quad / 9 /$$

$$A_2 \ln \dot{\epsilon} + B_2 \ln \tau_p + C_2 \ln (\sigma / \sigma_B^T) + D_2 = 0, \quad / 10 /$$

де $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2$ та D_2 - коефіцієнти, постійні для даного класу матеріалів у певній температурно-силовій області, у межах якої пластична деформація та руйнування матеріалу контролюються переважно одними й тими ж фізичними процесами та механізмами, та що залежать від структурного стану матеріалу.

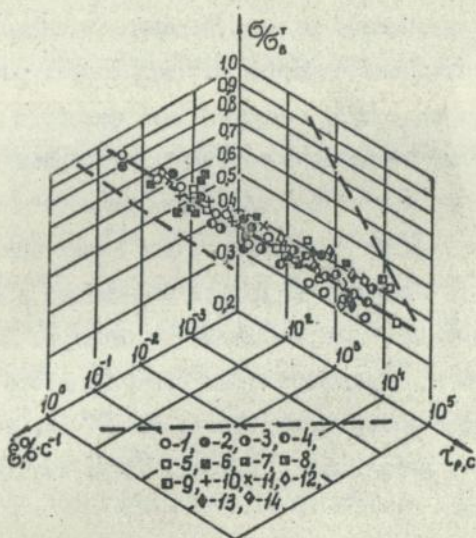


Рис.3. Залежність швидкості сталої повзучості та часу до руйнування молібденових сплавів від величини σ / σ_B^T : 1-4 - сплав ЦМ-10; 5-9 - ЦМ-6; 10, 11 - МІ-5; 12-14 - ЦМ-12; 1, 2, 5-7, 10, 14 - статична повзучість; 3, 4, 8, 9 - циклічна повзучість; 1, 3, 5, 8, 10, 12 - температура 1170 К; 2, 4, 6, 9, 11, 13 - 2020 К; 7, 14 - 2270 К.

В. Стефаніка
ІН України

Аналогічні кореляційні зв'язки мають місце також і для досліджених сплавів ніобію.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено закономірності зміни у діапазоні температур 290-2270 К характеристик короткочасної міцності, пластичності та характеру руйнування малолегованих сплавів молібдену систем Mo-Al-B / ЦМ-10 /, Mo-Zr-B / ЦМ-6 /, Mo-Zr-Hf-B / ЦМ-12 /, Mo-Re / МІ-5 / та Mo-V-C / сплав 4604 / та ніобієвих сплавів систем Nb-W-Mo-Zr / 5ВМЦ та ЮВМЦ /, Nb-W-Mo-Ta-Re-Zr / ЮВМЦ-ТР /, Nb-W-Mo-V-Ta-Zr / ЮВМЦ-ВТ / та Nb-W-Mo-Zr-B з твердорозчинним та комбінованим зміцненням, а також їхніх зварних з'єднань в залежності від структурного стану матеріалу та визначаючих його технологічних факторів / способу та параметрів режиму зварювання та термічної обробки /.

Показано, що зварні шви ніобієвих сплавів з твердорозчинним зміцненням завдяки формуванню в них характерної для даного класу матеріалів ячеїстої структури рівномісній з основним металом в усьому дослідженому діапазоні температур. Для молібденових сплавів зварні з'єднання мають рівну міцність з основним металом лише при температурах більше за 1770 К, що пов'язано з крихкістю литого металу шва в області більш низьких та кімнатних температур.

2. На прикладі сплавів ЦМ-6 та ЦМ-10 показано, що руйнування малолегованих сплавів молібдену в умовах повторно-статичного розтягу при температурах більш як $0,5 T_{пл}$ та максимальних напруженнях циклу, що перевищують $0,5$ границі міцності матеріалу, визначається процесами циклічної повзучості. А характеристики їхньої малоциклової міцності можна оцінити за результатами тривалих статичних випробувань, виходячи з гіпотези лінійного накопичення пошкоджень та уявлень про еквівалентні напруження.

3. Запропоновано та експериментально обґрунтовано для молібденових сплавів ЦМ-6 та ЦМ-10 критерій малоциклової міцності, заснований на використанні у якості еквівалентної пошкодженості матеріалу роботи діючих напружень на накопичених деформаціях повзучості.

4. Встановлено, що поміж характеристиками короткочасної, тривалої статичної та малоциклової міцності досліджених сплавів молібдену та ніобію у визначених температурно-силових областях, у межах яких пластична деформація та руйнування матеріалу контролюються одними й тими ж ведучими механізмами, існує тісний кореляційний зв'язок.

5. Запропоновано емпіричні залежності, що пов'язують швидкість сталої повзучості та час до руйнування досліджених сплавів у визначених умовах тривалого статичного та малоциклового навантаження з відношенням величини прикладених напружень до їхньої границі міцності при відповідній температурі.

6. Встановлено, що характеристики короткочасної міцності деформованих сплавів молібдену систем Мо-АІ-В, Мо- Zr -В та Мо- Zr -Нf-В в умовах температур більше за 1770 К збільшується на 30-60% за рахунок процесів старіння шляхом 1-годинного відгалу у діапазоні температур 1570-1870 К.

7. Показано, що зварювання на підвищених швидкостях / порядку I, II-2,22 $\text{cm}^2/\text{с}$ / сприяє збільшенню характеристик міцності та пластичності зварних з'єднань технічно чистого молібдену / сплав ЦМ-10 системи Мо-АІ-В / за рахунок формування дрібнозернистої структури шва з більш рівномірним розподілом домішок проникнення поміж тілом та границею зерна.

Виявлено, що для зварювання жароміцного сплаву ЦМ-6 системи Мо- Zr -В оптимальними є швидкості порядку 0,28-0,56 $\text{cm}^2/\text{с}$.

8. Встановлено, що термічна обробка зварних з'єднань моліб-

деновию сплавів призводить до зниження їхніх характеристик міцності та скрихченню металу шва за рахунок підвищення концентрації домішок проникнення у прикордонних зонах кристалітів.

9. На прикладі аналізу характеристик міцності та деформативності зварних з'єднань сплаву ІОВМЦ показано, що для ніобієвих сплавів системи Nb-W-Mo-Zr більш бажані помірні швидкості зварювання / порядку $0,28 \text{ см/с}$ / з наступним І-годинним відгалом у діапазоні температур 1470-1670 К для вирівнювання структурної та хімічної неоднорідності з'єднань.

10. Результати досліджень механічних характеристик використано при створенні елементів систем газоструменного керування та аеродинамічних рулів об'єктів ракетно-космічної техніки при виборі матеріалів, параметрів режиму зварювання та термічної обробки, а також у розрахунках міцності зварних конструкцій з молибденових та ніобієвих сплавів, що дозволило отримати значний економічний ефект.

Основні результати дисертаційної роботи знайшли відображення у наступних публікаціях:

1. Механические свойства основного металла и сварных соединений молибдена, легированного рением / В.В. Бухановский, Г.Н. Алексеевко, Т.Н. Василенко и др. // Автомат. сварка. - 1987. - № 8. - С. 24 - 26.

2. Влияние термической обработки на механические свойства и характер разрушения листовых молибденовых сплавов / В.В. Бухановский, Н.Г. Картышов, Е.П. Полищук и др. // Пробл. прочности. - 1987. - № 8. - С. 53 - 57.

3. Влияние технологических факторов на характеристики жаропрочности молибденовых сплавов / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Е.П. Полищук и др. // Пробл. прочности. - 1988. - № 6. -

С. 102 - 108.

4. Кратковременная ползучесть и длительная прочность сварных швов ниобиевого сплава ЮВЩ при высоких температурах / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Е.А. Аснис и др. // Автомат. сварка. - 1989. - № 9. - С. 32 - 37.

5. Сопротивление усталости листового проката и сварных соединений ниобиевого сплава ЮВЩ / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Е.А. Аснис и др. // Автомат. сварка. - 1989. - № 3. - С. 15 - 18.

6. Циклическая ползучесть и разрушение молибденовых сплавов ЦМ-6 и ЦМ-10 при высоких температурах / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, В.С. Кравченко и др. // Пробл. прочности. - 1989. - № 8. - С. 37 - 42.

7. Механические свойства и разрушение листового проката и сварных соединений ниобиевых сплавов в диапазоне температур 20-2000 °С / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Е.А. Аснис и др. // Автомат. сварка. - 1990. - № 5. - С. 16 - 20.

8. Характеристики жаропрочности листового проката и сварных швов молибденовых сплавов Мо-5%Re и ЦМ-10 / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Н.В. Скригник и др. // Автомат. сварка. - 1990. - № 5. - С. 21 - 25.

9. Длительная прочность и ползучесть сварных швов на молибденовых сплавах при высоких температурах / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Е.П. Полищук и др. // Автомат. сварка. - 1992. - № 2. - С. 15 - 20.

10. Механические свойства листового проката и сварных соединений молибденовых сплавов ЦМ-6 и ЦМ-10 в диапазоне температур 293...2273 К / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, К.Н. Касьян и др. // Автомат. сварка. - 1992. - № 4. - С. 13 - 16, 20.

11. 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.

12. Связь между характеристиками кратковременной и длительной прочности листового проката и сварных швов ниобиевого сплава ЮВМЦ / В.А. Борисенко, В.В. Бухановский, В.К. Харченко и др. // Автомат. сварка. - 1994. - № 5. - С. 1 - 7.

13. Характеристики прочности и пластичности молибденового сплава системы Mo-Zr-Nf -В в широком диапазоне температур. Сообщение 1. Кратковременная прочность / В.А. Борисенко, В.В. Бухановский, В.К. Харченко и др. // Физика и химия материалов. - 1994. - № 3. - С. 140 - 148.

14. Характеристики прочности и пластичности молибденового сплава системы Mo-Zr-Nf -В в широком диапазоне температур. Сообщение 2. Ползучесть и длительная прочность / В.А. Борисенко, В.В. Бухановский, В.К. Харченко и др. // Физика и химия материалов. - 1994. - № 4-5. - С. 231 - 239.

15. 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.

16. Бухановский В.В., Борисенко В.А., Харченко В.К. Связь между характеристиками кратковременной, длительной статической и малоцикловой прочности малолегированных сплавов молибдена при высоких температурах // Пробл. прочности. - 1994. - № 12. - С. 43 - 51.

17. Исследование высокотемпературных механических характеристик сварных соединений ниобиевого сплава ЮВМЦ / В.К. Харченко, В.В. Бухановский, Е.А. Аснис и др. // Сварка тугоплавких

металлов. - Киев : ИЭС им.Е.О.Патона, 1986. - С. 3 - 7.

18. Несущая способность листового проката и сварных швов малолегированных сплавов молибдена при малоциловом высокотемпературном нагружении / В.В. Бухановский, Г.Н. Алексеенко, В.А. Костин и др. // Сварка тугоплавких металлов и сплавов. - Киев : ИЭС им.Е.О.Патона, 1989. - С. 15 - 16.

19. Влияние технологических факторов на механические свойства сварных соединений молибденовых сплавов / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Е.П. Полищук и др. // IУ Всесоюз. конф. по сварке цветных металлов, Мариуполь, 4-7 сент. 1990 г. : Тез. докл. - Киев : ИЭС им.Е.О.Патона, 1990. - С. 74.

20. Высокотемпературная прочность и разрушение листового проката и сварных соединений тугоплавких сплавов на основе ниобия и молибдена / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Е.А. Аснис и др. // Международная конф. "Сварные конструкции", 24 - 28 сент. 1990 г. : Тез. докл. - Киев : ИЭС им.Е.О.Патона. - 1990. - С. 189 - 190.

21. Полищук Е.П., Бухановский В.В., Алексеенко Г.Н. Особенности структуры и свойств легированного молибдена // Всесоюз. конф. "Современные проблемы физики и ее приложений", Москва, 19 - 21 апреля 1987 г. : Тез. докл. - М. : ВИНТИ, 1987. - Ч. II. - С. II4.

22. Высокотемпературная прочность и особенности разрушения сварных соединений ниобиевого сплава ЮВМЦ / В.В. Бухановский, В.К. Харченко, Е.А. Аснис и др. // X Всесоюз. конф. "Электронно-лучевая сварка", Ленинград, 22 - 24 ноября 1988 г. : Тез. докл. - Л. : ЛПИ, 1988. - С. 35 - 36.

23. А.с. 1200162 СССР, МКИ⁴ G 01 N 3/04. Устройство для захвата образца при испытаниях на растяжение / Бухановский В.В., Скрипник Н.В., Яковкин В.Н. - Опубл. 23.12.86; Бюл. № 47.

Бухановский В.В. Високотемпературная прочность молибденовых и ниобиевых сплавов и их сварных соединений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 - динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры. Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, 1995 г.

Защищается 22 научных работы, содержащие результаты исследований характеристик кратковременной, длительной статической и малоцикловой прочности молибденовых и ниобиевых сплавов в широком диапазоне температур. Разработан и экспериментально обоснован критерий малоцикловой прочности, базирующийся на энергетических подходах. Установлены эмпирические корреляционные зависимости, связывающие характеристики прочности исследованных материалов при указанных видах нагружения.

Buckhanovsky V.V. High temperature strength of the molybdenum and niobium alloys and their welded joints. Dissertation for the degree of Candidate of Engineering Science in the speciality 05.02.09 - The dynamics, strength of machines, instruments and apparatus, Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

22 scientific works are being defended, which involve investigations of the short-term, long-term static, and low-cycle strengths of molybdenum and niobium alloys in a wide temperature range. The criterion of low-cycle strength, which based on the energy approaches, is elaborated and validated experimentally. The empirical correlations between strength characteristics of the materials investigated for the above modes of loading were found.

Ключові слова: тугоплавкі сплави ніобію та молибдену, зварні з'єднання, високотемпературна міцність, кореляційні зв'язки.

Підп. до друку 29.06.95р. Формат 60х84/16. Папір офс.
Офс. др. Ум. друк. арш. 0,93. Ум. фарб.-відб. 1,05.
Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим. Зам. 282.

Дільниця ротаринтного друкування ВНТІ ЦИМ НАН України
252014, Київ-14, вул. Тимірязевська, 2

454291

AB 32.733

AB 32.733