

Експрес-метод прогнозування довготривалої міцності та опору повзучості в високотемпературних сплавах на основі титану

Ю. М. Подрезов, Д. Г. Вербило, В. І. Даниленко,
Н. І. Циганенко, Б. В. Шуригін, П. М. Романко

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: Yupodrezov@ukr.net

Запропоновано експрес-метод дослідження механічної поведінки титанових сплавів за підвищених температур. Використання касетного пристрою дозволяє за спрощеною методикою випробувань на триточковий згин за короткий час визначати стандартні механічні характеристики сплавів, аналізувати температурну та структурну чутливість кривих зміцнення. Метод стрибка швидкості деформації дозволяє аналізувати швидкісну чутливість активаційних параметрів та прогнозувати механічні властивості досліджених сплавів за малих швидкостей деформації. Можливості методу продемонстровані на прикладі дослідження евтектичних сплавів системи Ti—Si—B та інтерметалідних сплавів системи титан—ніобій—молібден. Отримані результати добре узгоджуються з механічними характеристиками, одержаними за стандартними схемами випробувань.

Ключові слова: випробування на згин, високотемпературна міцність, опір повзучості, титанові сплави.

Вступ

Експрес-методи прогнозування механічної поведінки матеріалів доцільно використовувати на стадії оптимізації технології, коли з великої кількості чинників (склад, структура, термічна або термомеханічна обробки) слід обрати такі, що дозволяють отримати найкращий комплекс властивостей в умовах, максимально наближених до таких, в яких працюють вироби. В науковій школі В. І. Трефілова в 60-ті роки минулого сторіччя розроблено кілька таких методів. Найбільш відомий з них — визначення нижньої температури холодноламкості $T_{\text{хн}}$. Цим методом за допомогою випробувань на триточковий згин в діапазоні температур поблизу кімнатної для сплавів на основі тугоплавких ОЦК металів знаходили температуру переходу від крихкого руйнування до пластичного [1]. Завдяки простій формі зразків, відпрацьованим методикам їх виготовлення і випробувань за короткий час (1—3 доби) отримували необхідну інформацію про властивості дослідного сплаву і за відносно невеликий період проводили порівняння великої кількості сплавів, з яких обирали найкращі. Недолік методики полягав в складності інтерпретації діаграм навантаження, оскільки деформацію визначали як стрілу прогину, а значення напруження плинину було завищеним через нерівномірний розподіл деформацій по перерізу зразка. Тому для встановлення стандартних

© Ю. М. Подрезов, Д. Г. Вербило, В. І. Даниленко, Н. І. Циганенко,
Б. В. Шуригін, П. М. Романко, 2018

механічних характеристик відібрано сплави на останньому етапі досліджень на одновісний розтяг.

Другий метод — вимірювання гарячої твердості і досі успішно використовується для оцінки високотемпературних властивостей жароміцних сплавів. На відміну від стандартних випробувань твердості, де згідно зі стандартом, час навантаження складає 15 с, під час дослідження гарячої твердості навантаження на індентор триває одну годину, що значно наближує цю методику до стандартних експериментів на повзучість [2]. Обов'язкова умова проведення експерименту — наявність вакууму, оскільки твердість характеризує властивості приповерхневого шару і утворення оксидної плівки на поверхні суттєво впливає на результат. Використання карусельної схеми (обертання зразка в навантажувальному пристрої) дозволяє в одному досліді проводити серію вимірювань за різних температур. Попри безумовні переваги цього експрес-методу, отримані значення твердості складно перераховувати в кількісні показники міцності, а з характеристиками пластичності вони практично ніяк не пов'язані.

Розроблений метод є своєрідним симбіозом методу визначення температури холодноламкості та гарячої твердості: від першого взята схема триточкового згину, від другого — касетна схема випробування зразків, коли під час одного нагрівання випробовуються кілька зразків за різних температур. Експерименти проводяться на випробувальній машині TermoTest (рис. 1). Замість карусельної схеми в КБ ІПП НАН України розроблений спеціальний транспортер, який встановлює зразки безпосередньо на випробувальні ролики без порушення теплового режиму. Це, як і у методі гарячої твердості, значно прискорює отримання результатів високотемпературних випробувань.

За результатами випробувань бажано отримати комплекс механічних властивостей, які максимально наближені до характеристик, одержаних за стандартними схемами. Запорукою виконання цієї умови є правильний вибір схеми навантаження та розміру зразка. Особливу увагу слід приділити



Рис. 1. Машина TermoTest для випробувань жароміцних сплавів на деформування та руйнування під час згину на повітрі за температури до 1000 °С.

малим деформаціям, оскільки сучасні жароміцні сплави на основі евтектик та інтерметалідів демонструють малу пластичність в широкому діапазоні температур. Для розробки методики слід враховувати, що важливою складовою дослідження механічної поведінки титанових сплавів є аналіз кривої зміцнення, оскільки її структурна чутливість дозволяє визначати головні чинники, які впливають на механізм деформації та руйнування. Слід також зазначити, що сучасні жароміцні сплави зазвичай оцінюють по довготривалій міцності, яка визначається за швидкості деформації 10^{-8} с^{-1} , тобто за 15 діб навантаження. Такі експерименти неможливо провести для великої кількості зразків, а у випадку фінансової та енергетичної кризи подібні дослідження стають нереальними. Тому бажано, щоб розроблена методика дозволяла визначати швидкісну чутливість механічних властивостей і прогнозувати механічну поведінку матеріалу за малих швидкостей деформації.

Дослідження пружних властивостей

Відомо, що під час триточкового згину деформація є пов'язана з прогином f співвідношенням

$$\varepsilon = \frac{6hf}{L^2}, \quad (1)$$

де h — висота зразка; f — стріла прогину; L — відстань між опорними роликami робочої частини зразка. Рівняння (1) вказує на те, що прецизійність дослідження початкових стадій можна підвищити збільшенням відстані між роликami та зменшенням висоти зразка. Обидва фактори сприяють збільшенню прогину зразка за даного ступеня деформації.

Напруження σ під час триточкового згину визначається з виразу

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}, \quad (2)$$

де P — зусилля; b — ширина зразка.

Якщо рівняння (1) дозволяє розрахувати прогин зразка, то (2) — оцінити співрозмірність прогину зразка з переміщеннями в силовому ланцюзі випробувальної машини. Для матеріалу з модулем $E = 130 \text{ ГПа}$ та границею плинності $\sigma_{0,2} = 1000 \text{ МПа}$ пружна деформація на границі плинності сягає $\varepsilon = 0,7\%$. Підставляючи це значення в (1), для зразка з розмірами $h = 2 \text{ мм}$, $b = 3 \text{ мм}$ за умови $L = 40 \text{ мм}$ отримуємо переміщення на границі плинності $f = 0,7 \text{ мм}$. З іншого боку, підставляючи значення границі плинності в (2), для зразка з цими розмірами отримуємо навантаження на границі плинності $P = 225 \text{ Н}$. Оскільки за паспортом піддатливість випробувальної машини на $10\ 000 \text{ Н}$ складає 1 мм , тоді переміщення в силовому ланцюзі на границі плинності складає $0,025 \text{ мм}$ або приблизно 3% від значення прогину. Під час експрес-дослідження таким внеском жорсткості машини можна знехтувати або в процесі прецизійних випробувань ефект можна врахувати відповідною поправкою. Подальше зменшення висоти зразка недоцільне, оскільки, згідно з вимогами випробувань, бажано, щоб в деформаційній зоні знаходилося мінімум 100 зерен. Мінімальні значення h та b визначаються з врахуванням розміру зерна. В литих жароміцних титанових сплавах $d \sim 200 \text{ мкм}$, мінімальні значення h та b повинні бути в 10 разів більшими.

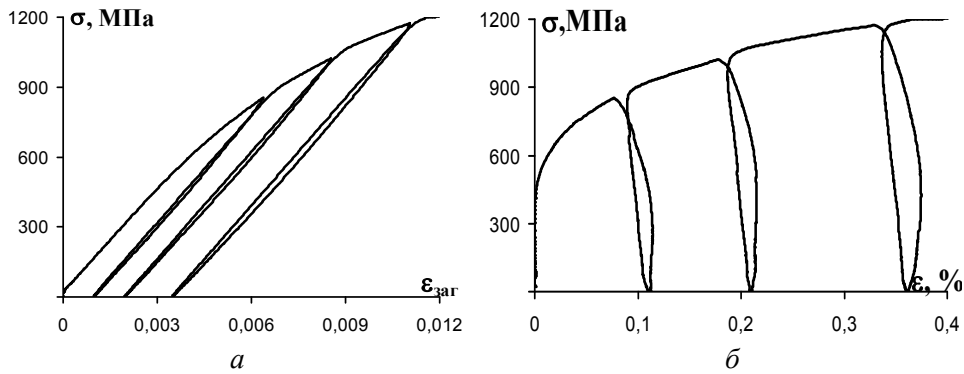


Рис. 2. Номінальні криві навантаження з періодичним розвантаженням бейнітного чавуну (а) та криві навантаження з відокремленою пружною складовою (б).

Таким чином, за обраних параметрів зразка та умов експерименту пружні властивості можна визначати безпосередньо з випробування на згин без застосування датчика переміщення, що значно спрощує випробування.

Особливості розрахунку напружень та деформацій в пружно-пластичній області

В пластичній області розрахунки ускладнюються через некоректність використання рівнянь (1) та (2), які працюють за умови пружної зміни форми балки. Але, враховуючи відносно велике співвідношення між пружною та пластичною складовими (жароміцні титанові сплави мають відносно малий модуль пружності та демонструють велике напруження плину), а також відносно малу деформацію до руйнування (сумарна деформація з урахуванням пружної та пластичної складових не перевищує 3,5%), є підстави сподіватися, що відхилення є незначними та їх можна врахувати, отримавши інформацію з додаткового експерименту. Таким є експеримент з періодичним розвантаженням зразка на ділянці пластичної деформації і порівняння значень модулів пружності. Відповідні діаграми навантаження отримані нами під час згину зразка з бейнітного чавуну, який має подібні до жароміцних титанових сплавів властивості ($E = 156$ ГПа, $\sigma_{0,2} = 950$ МПа). На перший погляд, представлені на рис. 2, а діаграми вказують на те, що наявність пластичної складової практично не впливає на відтворюваність пружної ділянки діаграми, але з відокремленням пружної складової за умов незмінності модуля (рис. 2, б) виявилось: діаграми мають малий, але стійкий негативний нахил, який формально повинен свідчити про підвищення пружних властивостей зі збільшенням пластичної складової. Наступні прецизійні експерименти на одновісний розтяг не підтвердили цього припущення — модуль пружності лишається незмінним, а ефект підвищення модуля — це артефакт, зумовлений недоліками схеми згину. Цей негативний результат має позитивну складову: він вказує на те, що в області малих деформацій, коли пружні та пластичні складові співрозмірні, відхилення від значень, отриманих за рівняннями (1) та (2), лишається малим (не перевищує 5%) і за необхідності може бути враховано, наприклад, незначною корекцією вісі деформації.

В пластичній області корекції потребують також абсолютні значення деформуючого напруження, адже загально відомим є факт, що деформуючі напруження під час згину значно перевищують значення, що отримані з експериментів на розтяг. Це зумовлено тим, що поява пластичної складової деформації різко змінює розподіл напружень під час згину і розрахунок, виконаний без урахування цієї особливості, веде до перевищення істинних значень деформуючого напруження. Це питання висвітлено в роботі [3], де, зокрема, зазначається, що зв'язок між напруженням плинину з розтягом σ_T^p та згином σ_T^{3r} визначається з виразу

$$\sigma_T^{3r} = \sigma_T^p [3/2 - 2(r_T/h)^2], \quad (3)$$

де r_T — пружна складова в пружнопластичній зоні зразка, і оскільки $0 \leq r_T \leq h/2$, то виконується співвідношення $1,5\sigma_T^p \geq \sigma_T^{3r} \geq \sigma_T^p$; h — висота зразка. Напруження плинину зі згином, що розраховане за формулами, отриманими з теорії пружності, може до півтора рази перевищувати дійсні значення. Коефіцієнт, що характеризує це перевищення, залежить від пружнопластичного стану і наближається до верхньої границі в зразках, які демонструють сильне деформаційне зміцнення. Схема навантаження та розмір зразків також впливають на цей коефіцієнт. За великого співвідношення L/h він також наближається до верхньої границі. Про це свідчать, зокрема, дані, що отримані за результатами експериментів з визначення $T_{хн}$. В цих експериментах $L/h = 20$, а отримані значення границі плинності, за даними Ю. В. Мільмана зі співробітниками [4] та інших авторів [5, 6], в 1,5 разів перевищують границю плинності під час розтягу. Це слід враховувати, проводячи порівняльні дослідження з використанням різних схем навантаження.

Порівняльні експерименти проводили на стандартних інтерметалідних сплавах титан—ніобій—молібден (TNM) [7, 8] з різним вмістом алюмінію: 44% Al в сплаві № 9 та 47% — в сплаві № 3, Сплави випробувані за температури 700 °C на згин і на розтяг. Експерименти на згин виконували на зразках з оптимальними розмірами $h = 2$ мм та $b = 3$ мм. Довжина зразка складала 50 мм, щоб з одного боку вільно розташовуватися в комірках транспортера (52 мм), з іншого — безпечно вкладатися на опорні ролики з $L = 40$ мм. Перерахунок первинної діаграми навантаження в криву напруження—деформація проводили з використанням (1) та (2). По аналогії з випробуваннями на $T_{хн}$ експерименти здійснювали зі швидкістю переміщення траверси 1 мм/хв. Оскільки жорсткість машини значно перевищує жорсткість зразка, датчик прогину не використовувався.

В експериментах на розтяг зразки для механічних випробувань мали форму циліндра з діаметром 3 мм і довжиною робочої частини $l_0 = 15$ мм. Експерименти виконували згідно з стандартом ДСТУ EN10002 – 1:2006 зі швидкістю деформації 10^{-3} с^{-1} на машині 1246-2300/2 конструкції НИКИМП. Видовження фіксувалося тензометричним датчиком безпосередньо з робочої частини зразка. Конструкція тензометра дозволяла вимірювати деформацію зразка за кімнатної та підвищених температур з чутливістю не гірше $2 \cdot 10^{-5}$, а також модуль пружності з похибкою не більше 2%. Високотемпературні випробування проводили в вакуумі.

Результати досліджень показали, що значення модуля пружності, визначені з прямого експерименту на розтяг, приблизно на 8—10% більше отриманих за розрахунковими формулами (1) та (2) з експериментів на

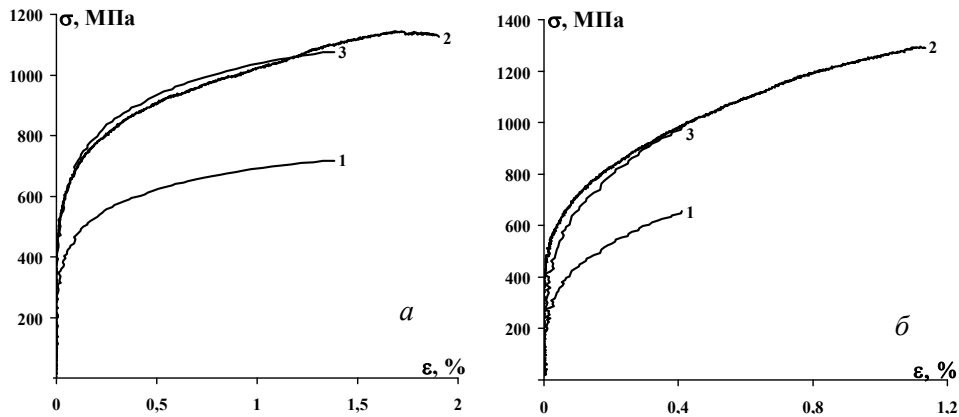


Рис. 3. Залежності напруження плину від ступеня пластичної деформації $\varepsilon_{\text{пл}}$ для зразків № 3 (а) та № 9 (б): 1 — розтяг; 2 — згин; 3 — розтяг, нормований на $K = 1,5$.

згин. Для зразка сплаву № 3 ці значення $E_p = 136$ ГПа та $E_3 = 126$ ГПа, для зразка № 9 — $E_p = 121$ ГПа та $E_3 = 109$ ГПа. Ці відхилення трохи перевищують прогнозовані, можливо, через зменшення жорсткості силового ланцюга з підвищенням температури, але вони лишаються достатньо малими і з введенням необхідної поправки дозволяють аналізувати пружні властивості сплавів за підвищених температур по результатах експрес-випробувань на згин. Отримані значення модуля були використані для відокремлення пружної складової з загальної пружно-пластичної діаграми навантаження шляхом віднімання значення пружної деформації для кожного прикладеного напруження σ . Для розтягу внесок пружної деформації визначали з формули $\varepsilon_{\text{пр}}^p = \sigma/E_p$ і для згину — з $\varepsilon_{\text{пр}}^3 = \sigma/E_3$. Розраховані таким чином залежності напруження плину від ступеня пластичної деформації $\varepsilon_{\text{пл}}$ для зразків № 3 та 9 наведені на рис. 3, а, б відповідно.

На рис. 3 криві 1 отримані з випробувань на розтяг, криві 2 — з випробувань на згин, криві 3 — з даних випробувань на розтяг шляхом множення напруження плину на коефіцієнт $K = 1,5$. Порівняння корегованої залежності (3) з даними, отриманими з випробувань на згин (2), вказує на хороше співпадіння для обох досліджених сплавів. Оскільки ці сплави суттєво відрізняються між собою за швидкістю зміцнення, отримані дані можуть свідчити про загальний характер одержаних результатів і випробування на згин можуть бути використані для кількісного розрахунку параметрів зміцнення титанових сплавів в широкому діапазоні температур випробувань.

Дослідження температурної залежності механічних властивостей

Прикладами визначення температурної чутливості кривої плину високотемпературних сплавів Ті за допомогою випробувань на згин можуть слугувати експерименти, виконані на евтектичних сплавах на основі системи Ті—Si—В (рис. 4, а) та сплаві № 3 на основі інтерметалідів титану (рис. 4, б). Детальний аналіз цих та інших подібних залежностей виходить далеко за межі даної роботи, але слід підкреслити, що дані для кожного графіку отримані практично за одну добу і дозволяють не тільки визначати температурну чутливість основних механічних характеристик,

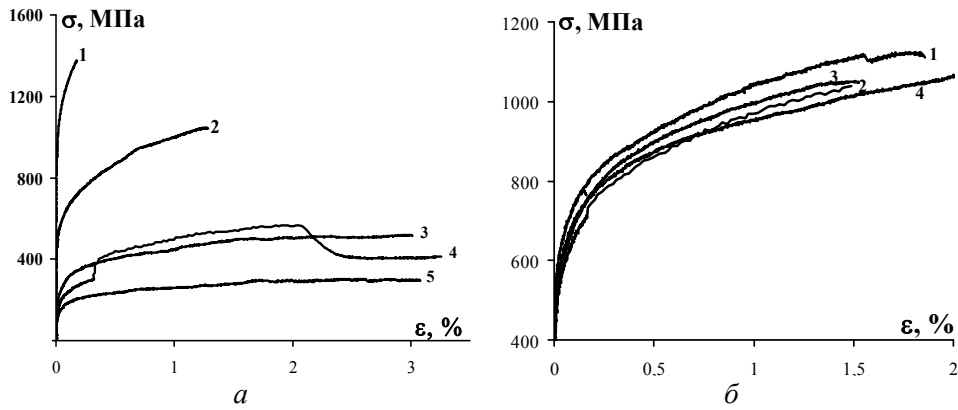


Рис. 4. Температурна чутливість кривих плинну високотемпературних сплавів Ti: *a* — сплав № 2L на основі системи Ti—Si—B (1 — 20; 2 — 350; 3 — 650; 4 — 700 та 5 — 750 °C); *б* — інтерметалічний сплав № 3V системи TNM (1 — 700; 2 — 750; 3 — 800 та 4 — 850 °C).

але й аналізувати зміну механізмів деформації та руйнування з температурою. Зокрема, з отриманих даних слідує, що евтектичні сплави є менш жароміцними і деградують уже за температур 650—700 °C, тоді як інтерметаліди системи TNM зберігають жароміцність за температури 850 °C.

Швидкісна чутливість напруження плинну

Для дослідження швидкісної чутливості параметрів зміцнення в сучасній теорії жароміцності широко використовується метод стрибка швидкості деформації. Прикладом таких досліджень на титанових сплавах слугують результати роботи [9], які виконані на евтектичних сплавах системи Ti—TiB₂. На рис. 5, *a* наведено характерні стрибкоподібні діаграми навантажень, отримані з випробувань на стиснення під час різкої зміни швидкості деформацій в діапазоні 10⁻⁶—10⁻³ с⁻¹.

Ці експерименти дозволяють визначити два важливих параметра теорії повзучості, які характеризують вплив швидкості деформації на процеси плинну в матеріалі. Перший з них — коефіцієнт швидкісної чутливості a ,

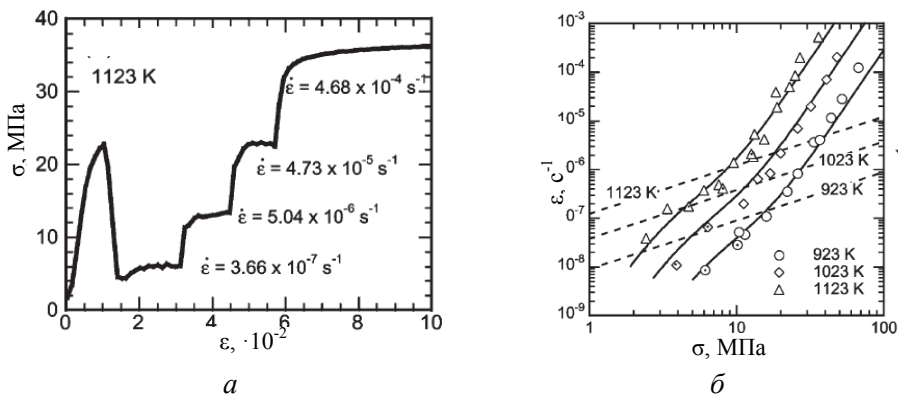


Рис. 5. Стрибкоподібні діаграми навантажень сплаву Ti—15TiB₂, отримані з випробувань на стиснення під час різкої зміни швидкості деформацій в діапазоні 10⁻⁶—10⁻³ с⁻¹ (*a*) та розраховані з цих діаграм залежності в координатах ln(σ)—ln(ε̇) (*б*) [9].

який визначається як результат ділення логарифму відношення початкової $\dot{\epsilon}_n$ та кінцевої $\dot{\epsilon}_k$ швидкостей деформації на логарифм відношення початкового σ_n та кінцевого σ_k напружень плинину:

$$a = \ln(\dot{\epsilon}'_n / \dot{\epsilon}'_k) / \ln(\sigma_n / \sigma_k). \quad (4)$$

В діаграмі повзучості в логарифмічних координатах $\ln(\sigma) - \ln(\dot{\epsilon})$ параметр a визначає кут її нахилу (рис. 5, б). За умови незмінності механізму повзучості його значення лишається приблизно незмінним, що може бути використано в практичній площині: для прогнозування механічної поведінки матеріалу за малих швидкостей, тобто за його довготривалої експлуатації.

Другий параметр — активаційний об'єм, який задіяний під час термоактиваційного подолання перешкод в процесі дислокаційного плинину. Він визначається з виразу

$$V = MkT / (\Delta\sigma / \Delta \ln \dot{\epsilon}), \quad (5)$$

де V — активаційний об'єм; M — параметр Тейлора; k — стала Больцмана; T — температура випробувань. Щоб визначити, який об'єм кристалічної ґратки приймає участь у термоактиваційному стрибкоподібному подоланні потенційного бар'єру на шляху руху дислокацій, параметр V нормується на b^3 , де b — вектор Бюргерса (для титану $b = 0,297$ нм).

Зауважимо, що в роботі [9] та багатьох наступних роботах базовим методом є випробування на стиснення, де завдяки значній деформації до руйнування зразки піддаються великій кількості маніпуляцій. Це, зокрема, дозволило в роботах [7, 10] методом стрибка деформації дослідити вплив попередньої деформації, температури, термічної та термомеханічної обробки на термоактиваційні параметри деформаційних механізмів в сплавах на основі алюмінідів титану.

Під час випробувань на згин деформація до руйнування мала, що обмежує можливість використання методу стрибка деформації. Розрахована з рівняння (1) швидкість деформації зразка за умови швидкості прогину 1 мм/хв складає 10^{-4} с $^{-1}$. Тобто, якщо деформація до руйнування сягає 2%, вона буде досягнута за 200 с. Зі збільшенням швидкості деформації стрибком в 10 разів час до руйнування зменшується до 20 с. За цей час реально провести експеримент з одним прямим стрибком зі швидкості 10^{-4} с $^{-1}$ на 10^{-3} с $^{-1}$. Стрибок доцільно проводити за деформацією $\epsilon_{пл} = 0,3\%$. Ця деформація, з одного боку, далека до границі розрізнення, з іншого — до граничної деформації руйнування. Якщо зразок не руйнується після деформації 2%, можливий зворотній стрибок, який може бути корисним для аналізу впливу попередньої деформації на термоактиваційні механізми деформації.

Зазначені експерименти виконані на сплавах евтектичної системи Ti—Si—В (рис. 6, а) за температури 700 °С та інтерметалідних сплавах системи TNM, що випробувані за 750 °С (рис. 5, б).

Визначені з експерименту значення напруження на початку стрибка за швидкості 10^{-4} с $^{-1}$ ($\sigma_{10^{-4}}$) та в кінці за швидкості 10^{-3} с $^{-1}$ ($\sigma_{10^{-3}}$) та розраховані за рівняннями (4) та (5) значення термоактиваційних параметрів, що встановлюють швидкісну чутливість міцності, представлені в табл. 1 для литих (L) та відпалених (V) сплавів системи Ti—Si—В та в табл. 2 — для литих інтерметалідних сплавів системи TNM.

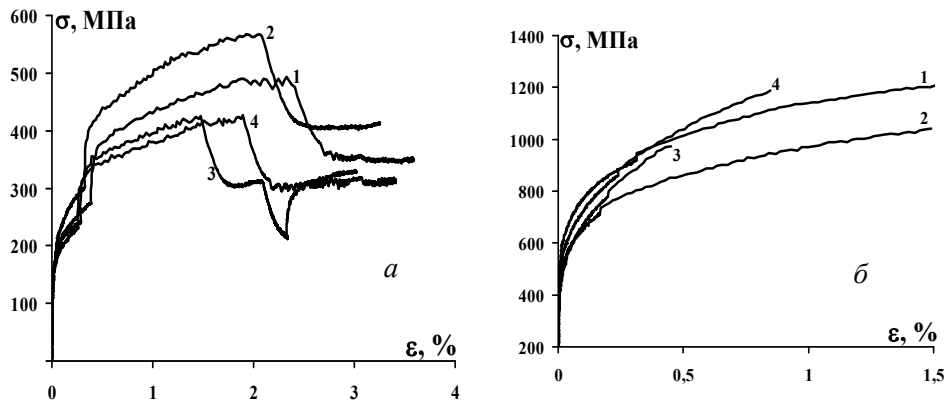


Рис. 6. Стрибокподібні діаграми жароміцних сплавів титану, отримані під час згину за температури 700 °С сплавів на основі системи Ti—Si—B: 1 — 1L; 2 — 2L; 3 — 1V; 4 — 2V (а) та за 750 °С інтерметалідних сплавів № 3 та 9 системи TNM: 1 — 3L; 2 — 9L; 3 — 3V; 4 — 9V (б).

Т а б л и ц я 1. Швидкісна чутливість параметрів міцності за температури 700 °С

Зразок	σ_{10}^{-4} , МПа	σ_{10}^{-3} , МПа	$\epsilon_{10}^{-4} \cdot 10^{-3}$	σ_{10}^{-3} , МПа	σ_{10}^{-4} , МПа	$\epsilon_{10}^{-3} \cdot 10^{-4}$	a_n	a_3	V_n/b^3	V_3/b^3	σ_{10}^{-8} , МПа
1L	276	367	0,4	475	361	2,5	8,	8,4	38,	30	87
1V	244	335	0,3	424	307	1,6	7,3	7,1	38	30	68
2L	300	400	0,4	563	418	2,5	8	7,7	35	24	94
2V	231	334	0,3	426	301	2,1	6,3	6,6	34	28	52

Враховуючи, що евтектичні сплави системи Ti—Si—B за температури 700 °С є більш пластичними, експерименти проводили з прямим та зворотним стрибками. Результати розрахунків позначені індексами n та z . Отримані значення параметра $a \sim 6-8$ є достатньо високими як для механізмів дифузійної повзучості [11], але слід враховувати, що за такої швидкісної чутливості зміна швидкості лише в 10 разів змінює напруження плинину практично на 100 МПа. За умови незмінності параметра a зі зменшенням швидкості деформації (як, наприклад, показано на рис. 5, б) рівняння (4) дозволяє прогнозувати значення напруження плинину за малої швидкості деформації 10^{-8} с^{-1} , характерної для довготривалого високо-температурного використання. Результати розрахунків (табл. 1) показали, що за температури 700 °С та швидкості 10^{-8} с^{-1} напруження плинину в литих сплавах буде в межах 90 МПа, а у відпаленому — 60—70 МПа. Отримані значення слід розглядати як верхню границю прогнозу, оскільки розрахунок передбачає незмінність механізму повзучості зі зменшенням швидкості (тобто a є сталою величиною). Якщо зі зменшенням швидкості деформації схильність до дифузійної повзучості збільшиться, тоді параметр a зменшиться, значення напруження плинину знизиться. Порівняння значень параметра a для різних досліджених зразків показало, що цей параметр в литих сплавах дещо вищий, ніж у відпалених, а у зразків складу 1 вищий, ніж у складу 2.

Нормовані значення активаційного об'єму V/b^3 змінюються в діапазоні 25—38 і є достатньо низькими як для дислокаційних механізмів подолання

Т а б л и ц я 2. Швидкісна чутливість литих та відпалених сплавів системи TNM за температури 750 °С

Зразок	$\sigma_{10^{-4}}$, МПа	$\sigma_{10^{-3}}$, МПа	$\sigma_{10^{-8}}$, МПа	a	V/b^3
3L	785	812	685	68,1	136,4
9L	921	948	819	79,7	136,4
3V	709	733	620	69,2	153
9V	857	884	756	74	136,5

уявлень [7] вказує на чутливість цього параметра до змін деформаційної структури, які відбуваються під час навантаження. Для першого складу ці значення дещо вищі, ніж для другого, хоча для литого та відпаленого станів вони практично співпадають.

Як вже було показано (рис. 4, б), в сплавах системи TNM напруження плинину за підвищених температур 700—850 °С в усіх досліджених матеріалах залишається на достатньо високому рівні, що робить ці матеріали перспективними для високотемпературного використання. Тому швидкісну чутливість цього класу матеріалів визначали за більш високої температури — 750 °С. Враховуючи, що зразки за цієї температури демонстрували відносно малу пластичність ($\varepsilon \sim 1\text{—}2\%$), випробування виконували лише з прямим стрибком. Результати розрахунків наведені в табл. 2.

Слід зазначити, що в достатньо високому як для титанових сплавів діапазоні температур випробувань для сплаву № 3 падіння границі плинності відносно мале — від 814 МПа за 700 °С до 777 МПа — за 850 °С (рис. 4, б). Сплави з 44% (мас.) Al мають ще вищі значення границі плинності, але є більш крихкими (рис. 3, б). Для обох типів сплавів характерне незначне зменшення параметрів зміцнення з температурою, яке притаманне дислокаційному механізму повзучості. Про це свідчать також результати експериментів, які визначають швидкісну чутливість механічних властивостей за температури 750 °С (рис. 6, б). Представлені в табл. 2 значення параметра $a \sim 70$ (для сплаву № 3) та $a \sim 75\text{—}80$ (для сплаву № 9) є високими і не характерні для механізмів дифузійної повзучості, які реалізуються за цих температур в інших титанових сплавах [7]. З даних таблиць слідує, що сплави проявляють слабку швидкісну чутливість: зміна швидкості в 10 разів змінює напруження плинину лише на 20—30 МПа. В табл. 2 наведено прогнозовані за допомогою рівняння (1) значення напруження плинину за малої швидкості деформації 10^{-8} c^{-1} , характерній для довготривалого високотемпературного використання. Результати розрахунків показують, що у загартованому стані за температури 750 °С та швидкості 10^{-8} c^{-1} напруження плинину під час згину буде в межах 650—700 МПа, а у литому сплаві № 9 — навіть 800 МПа. Отримані значення слід розглядати як верхню межу прогнозу, оскільки, по-перше, як вказувалося раніш, напруження плинину зі згином в 1,5 вище, ніж із розтягом, і, по-друге, слід враховувати, що розрахунок передбачає незмінність механізму повзучості зі зменшенням швидкості (тобто a є сталою величиною). Якщо зі зменшенням швидкості деформації схильність до дифузійної повзучості збільшиться, тоді параметр a зменшиться, напруження плинину знизиться.

активаційних бар'єрів, що вказує на змішаний механізм повзучості. Отримані значення нормованого активаційного об'єму зменшуються зі збільшенням ступеня деформації, активаційних бар'єрів, що у відповідності до теоретичних

Нормовані значення активаційного об'єму V/b^3 , що отримані нами за температури 750 °С, змінюються в діапазоні 100—150. Оскільки параметри зміцнення, отримані під час розтягу, в 1,5 рази нижчі, ніж під час згину (рис. 3), то дійсні значення активаційного об'єму за стандартних схем випробувань слід збільшити в 1,5 рази. Тоді кореговані значення параметра V/b^3 становлять ~ 200 , що добре узгоджується з результатами робіт [7, 10], одержаними для сплавів алюмініду титану в цьому діапазоні температур випробувань [7, 9].

Висновки

Запропонований експрес-метод дослідження механічної поведінки титанових сплавів за підвищених температур дозволяє за спрощеною методикою визначати стандартні механічні характеристики, аналізувати їх температурну та структурну чутливість кривих зміцнення. Метод стрибка швидкості деформації дозволяє аналізувати швидкісну чутливість активаційних параметрів та прогнозувати механічні властивості досліджених сплавів за малих швидкостей деформації.

1. *Трефилов В. И.* Физические основы прочности тугоплавких металлов / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, С. А. Фирстов. — Киев : Наук. думка, 1975. — 315 с.
2. *Трефилов В. И.* Дисперсные частицы в металлах / В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев. — Киев : Наук. думка, 1982. — 295 с.
3. *Шапошников Н. А.* Механические испытания металлов. — М. : Машгиз, 1954. — 315 с.
4. *Трефилов В. И.* Структура, текстура и механические свойства деформированных сплавов молибдена / [В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, Р. К. Иващенко и др.]. — Киев : Наук. думка, 1983. — 254 с.
5. *Драчинский А. С.* О температуре хладноломкости по границам и телу зерна сплавов, склонных к межзеренному разрушению / А. С. Драчинский, В. И. Трефилов, Ю. Н. Подрезов // Физика металлов и металловедение. — 1981. — 52, вып. 2. — С. 9—19.
6. *Денисюк В. А.* О влиянии локальных внутренних напряжений на особенности интеркристаллитного разрушения сплавов молибдена в области вязкохрупкого перехода / [В. А. Денисюк, А. С. Драчинский, Ю. Н. Подрезов, В. И. Трефилов и др.] // Проблемы прочности. — 1979. — № 8. — С. 56—69.
7. *Appel F.* Gamma titanium aluminide alloys / F. Appel, J. D. H. Paul, M. Oehring. — Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2011. — 732 p.
8. *Mayer S.* Intermetallic β -solidifying γ -TiAl based alloys / [S. Mayer, P. Erdely, F. D. Fischer et al.] // Adv. Engineering Mater. — 2017. — P. 1—27 (1600735).
9. *Kawabata K.* High temperature deformation with diffusional and plastic accommodation in Ti/TiB whisker-reinforce *in situ* composites / K. Kawabata, E. Sato, K. Kuribayashi // Acta Materialia. — 2003. — 51. — P. 1909—1922.
10. *Appel F.* Modeling concepts for intermetallic titanium aluminides / F. Appel, H. Clemens, F. D. Fischer // Progress Mater. Sci. — 2016. — 81. — P. 55—124.
11. *Пуарье Ж. П.* Высокотемпературная ползучесть кристаллических тел. — М. : Металлургия, 1982. — 275 с.

**Экспресс-метод прогнозирования длительной прочности
и сопротивления ползучести высокотемпературных
сплавов на основе титана**

Ю. Н. Подрезов, Д. Г. Вербило, В. И. Даниленко, Н. И. Цыганенко,
Б. В. Шурыгин, П. М. Романко

Предложен экспресс-метод исследования механического поведения титановых сплавов при повышенных температурах. Использование кассетного приспособления позволяет с помощью упрощенной методики испытаний на трехточечный изгиб за короткое время определять стандартные механические характеристики сплавов, анализировать температурную и структурную чувствительность кривых упрочнения. Метод скачка скорости деформации позволяет анализировать скоростную чувствительность активационных параметров и прогнозировать механические свойства исследованных материалов при малых скоростях деформации. Возможности метода продемонстрированы на примере исследования эвтектических сплавов титана системы Ti—Si—B и интерметаллидных сплавов системы титан—ниобий—молибден. Полученные результаты хорошо согласуются с механическими характеристиками, полученными при стандартных схемах испытаний.

Ключевые слова: испытания на изгиб, высокотемпературная прочность, сопротивление ползучести, титановые сплавы.

**Express method for prediction of long-term strength and creep
resistance of high-temperature titanium-based alloys**

Yu. M. Podrezov, D. G. Verbylo, V. I. Danylenko, N. I. Tsyganenko,
B. V. Shurygin, P. M. Romanko

Express method for investigation the mechanical behavior of titanium alloys at elevated temperatures is Cassette device for three-point bending simplifies test procedure. Standard mechanical characteristics of alloys may be determined for a short time. Curves of hardening used for analyzing of temperature and structural sensitivity of strengthening. Strain - rate cycling tests were applied for investigation of the activation parameters and predict the mechanical properties of the materials studied at low strain rates. The possibilities of the method are demonstrated on high temperature investigation The eutectic Ti—Si—B titanium alloys and the nonmetallic alloys of the titanium—niobium—molybdenum system were tested by express. three-point bending method The results of experiments demonstrate a good agreement with the mechanical characteristics obtained by standard test schemes.

Keywords: bending tests, high temperature strengths, creep resistance, titanium alloys.