

Національна Академія Наук України
Інститут механіки ім.С.П.Тимошенка

На правах рукопису

Касперська Валентина Володимирівна

**ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОТРИВАЛОГО РУЙНУВАННЯ
МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА УМОВ ПОВЗУЧОСТІ
З УРАХУВАННЯМ ПРОЦЕСУ СКРИХЧЕННЯ**

05.02.09 - динаміка, міцність машин, приладів та апаратури

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Касперська

Київ - 1997



00752736 (U)

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Інституті механіки ім.С.П.Тимошенка
Національної академії наук України

Науковий керівник : доктор технічних наук,
професор ГОЛУБ Владислав Петрович

Офіційні опоненти : доктор технічних наук,
професор КРИВЕНЮК Володимир Володимирович

доктор технічних наук, САВЧЕНКО Віталій
Григорович

Провідна установа : Національний технічний університет
"Київський політехнічний інститут"

Захист відбудеться " 24 " червня 1997 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 01.03.02 в Інституті механіки ім.С.П.Тимошенка НАН України за адресою : 252057, Київ-57, вул. Нестерова,3

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту механіки ім.С.П.Тимошенка НАН України (252057, Київ-57, вул. Нестерова, 3)

Автореферат розіслано "21" травня 1997 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

доктор фізико-математичних наук

А.Т.Василенко

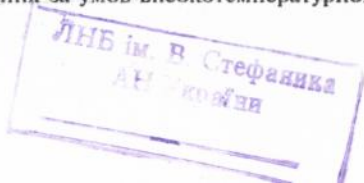
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи Сучасний рівень і тенденція технічного розвитку як одну із найбільш актуальних висунули проблему підвищення надійності інженерних конструкцій, забезпечення безпеки людей і оточуючого середовища. Вона зумовлена невпинним зростанням швидкості транспорту, підвищенням енергетичного рівня промисловості, створенням унікальних за розміром і потужністю комплексів для виробництва електроенергії, для видобування та транспортування нафти і газу. Особливо гостро стоїть проблема безпеки для об'єктів, експлуатація яких запланована аж до досягнення ними граничного стану.

У багатьох випадках конструкції піддаються дії механічного навантаження за умов високих температур і експлуатуються, коли має місце повзучість. У таких випадках на протязі тривалого часу накопичуються незворотні деформації, які можуть призвести до недопустимих змін розмірів деталей чи до їх повного руйнування.

Постановка і вирішення задачі повзучості і руйнування на даний час суттєво ускладнилися. Це пов'язано з тенденцією до зростання рівня експлуатаційних температур у зв'язку з необхідністю збільшення потужності і підвищення економічності енергетичних установок, а також з бажанням продовжити їх ресурс. Важливим є те, що у цьому випадку руйнування внаслідок повзучості буде відбуватися не тільки в області великих деформацій, але і при досить малому подовженні, набагато меншому, ніж подовження при статичному розриві. Тут суттєве значення будуть мати процеси скрихнення і пошкодження матеріалів. При цьому необхідно пам'ятати, що реальні умови навантаження є нестационарні і досить важливою постає задача врахування стану до навантаження. Суттєвий внесок до розв'язання проблеми довготривалої міцності внесено працями Р.А.Аругюняна, М.І.Бобиря, В.П.Голуба, С.М.Жукова, В.В.Кривенюка, Ф.Р.Ларсона, Ю.М.Работнова, В.Г.Савченка, І.І.Труніна, Н.Хоффа та інших вчених.

Мета роботи полягає у побудові та експериментальному обґрунтуванні одномірних моделей довготривалого руйнування за умов високотемпературної



повзучості, що дають можливість врахувати процес скрихчення матеріалів, і вирішення на цьому ґрунті задач прогнозування часу в'язко-крихкого та крихкого руйнування.

Наукова новизна дисертації полягає у наступному :

- на основі аналізу експериментальних даних встановлені закономірності і сформульований критерій скрихчення матеріалів у процесі повзучості, який надає можливість обчислювати за експоненціальним законом спад деформації повзучості, що накопичується на момент руйнування, у залежності від рівня діючих напруг;
- виходячи з умов спільного розгляду еволюційного рівняння повзучості та експоненціального закону скрихчення матеріалу побудована модель довготривалого руйнування, яка надає можливість спрогнозувати на 2-3 поряд-ка час до руйнування за умов повзучості;
- розв'язані задачі розрахунку та прогнозування часу в'язко-крихкого і крихкого руйнування жароміцних металевих матеріалів за умов повзучості та одновісного статичного розтягу.

Достовірність результатів, що отримані, забезпечується:

- використанням широко апробованих статистичних методів, а також згладжуючих сплайн-функцій задля обробки та аналізу експериментальних даних;
- використання ізохронної теорії повзучості для моделювання кінетики деформування, що отримала широке експериментальне обґрунтування за умов статичних та циклічних навантажень;
- співпаданням результатів прогнозування часу до руйнування з експериментальними даними цієї праці та таких, що залучені з літературних джерел.

Практична цінність дисертації полягає у тому, що :

- у рамках побудованої моделі розроблено і випробувано методику прогнозування довготривалої міцності з урахуванням процесу скрихчення, яка використовує базовий експеримент для ідентифікації матеріальних констант у вигляді легко відновлюваних стандартних досліджень звичайних

- зразків на розтяг та повзучість за умов дії одного фіксованого рівня напружень;
- розроблено методику використання згладжуючих сплайн-функцій для апроксимації експериментальних кривих повзучості за параметром температури;
- отримано і оброблено за допомогою сплайн-функцій і систематизовано експериментальні дані довго- та короткотривалої міцності сучасних та перспективних жароміцних сплавів для стаціонарного та транспортного енергомашинобудування.

Реалізація та впровадження результатів. Наукові та практичні здобутки дисертації увійшли до звітів тем НДР Інституту механіки ім.С.П.Тимошенка НАН України (№№ ДР 0189.0025907, 0190.0013608, 0194.V015133 та Державних науково-технічних програм (шифр 5.51.01/051, 5.52.03/062).

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися на ІХ науковій конференції молодих вчених Інституту механіки АН України (м.Київ,1982); Х Всесоюзній нараді з теплової мікроскопії (м.Новокузнецьк, 1982);VІ Українській конференції "Моделювання та дослідження стійкості систем" (м.Київ,1996); XXVI Міжнародній науково-технічній нараді з динаміки та міцності двигунів (м.Самара,1996).

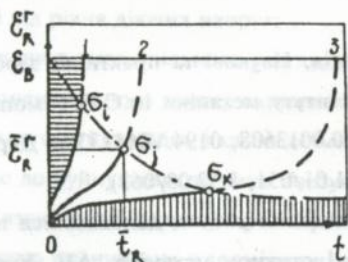
Публікації. З теми дисертації надруковано 8 наукових праць у фахових виданнях. Основний зміст роботи відображено у публікації 1,2,4,5,7,8. У працях, які написані у співавторстві з керівником, професору В.П.Голубу належить ідея проведення досліджень, а також деякі теоретичні положення, що були покладені до основи методів розв'язку поставлених задач. Співавторам належить участь у обговоренні та аналізі результатів. Дисертанту - систематизація відомих та оригінальних експериментів, формулювання закону скрихчення за умов руйнування, розв'язання задач прогнозування та порівняння з експериментом.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав, висновків і списку літератури. Робота викладена на 149 сторінках, містить 37 малюнків. Бібліографічний список налічує 154 назви.

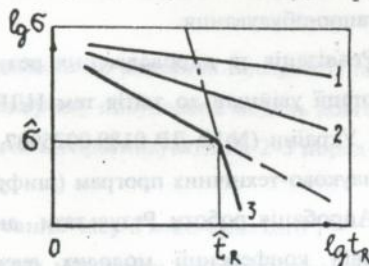
КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано огляд публікацій з теми дисертації, сформульована мета роботи і визначено її місце серед раніше проведених досліджень, подана її коротка характеристика. Сформульовані положення, що виносяться на захист. Стисло наводиться виклад роботи по главам.

У першій главі зроблено огляд наукових публікацій, які мають відношення до тих питань, що є головними у дисертаційній роботі. Схематизовано скрихнення у процесі повзучості (мал.1а) та узагальнено діаграми дов-



Мал.1а.



Мал.1б.

гогривалого руйнування матеріалів (мал.1б). Зроблено викладку підходів до моделювання і розв'язання задач прогнозування довготривалого руйнування матеріалів за умов повзучості та показано їх значення і місце в механіці повзучості та довготривалій міцності. Проаналізовані можливості відомих моделей довготривалого руйнування, де були враховані такі характерні особливості, як процеси скрихнення та пошкодження, і на цій основі сформульовані мета і задачі даного дослідження.

У другій главі сформульовано початкові співвідношення ізохронної теорії повзучості, викладено методику експериментальних досліджень, методику планування експерименту та методику обробки експериментальних діаграм повзучості та короточасної міцності за допомогою згладжуючих сплайн-функцій.

Запропоновано експериментальну методику побудови діаграм миттєвого деформування, згідно якої було введено розуміння швидкості деформування та швидкості деформації. Показано, що основним параметром, який засвід-

чує розвиток реологічних ефектів при експериментальній побудові діаграм розтягу є ефект перевищення швидкості деформування швидкості деформації. Задача побудови миттєвої діаграми розтягу зводиться, таким чином, до знаходження такого значення швидкості навантаження, коли швидкість деформування і швидкість деформації будуть співпадати. Тому в роботі методика визначення "миттєвої" швидкості навантаження зводиться до процедури поетапному збільшенню швидкості навантаження за межею текучості, а також вимірюванню і співставленню на кожному етапі навантаження значення швидкості деформування і швидкості деформації. Експериментальне дослідження повзучості і довготривалої міцності проводили на дослідних установках, створених на базі дослідної машини ZST-3/3, яка дозволяє проводити дослідження у діапазоні температур 20-1100°C та автоматично фіксувати повзучість на базах до 20 000 годин.

Для обробки експериментальних даних запропоновано використовувати згладжуючі кубічні сплайни, що дозволяють описати експериментальні діаграми повзучості до руйнування. Функція повзучості $\epsilon'(t)$ може бути надана у вигляді

$$\epsilon'(t) = A_i(t - t_i)^3 + B_i(t - t_i)^2 + C_i(t - t_i) + D_i + \epsilon_0, \quad i = \overline{1, L-1}, \quad (1)$$

де прийнято

$$A_i = \frac{k_{i+1} - k_i}{6h_i}, \quad B_i = \frac{k_i}{2}, \quad C_i = \frac{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}{h_i} - \frac{h_i}{6}(2k_i + k_{i+1}),$$

$$t \in [t_i, t_{i+1}], \quad h_i = t_{i+1} - t_i, \quad i = \overline{1, L-1},$$

тут k_i - коефіцієнти сплайну, що визначаються за умов неперервності першої похідної у точках t_i ($i = \overline{2, L-1}$), ϵ_i - табличні значення функції у точках t_i , апроксимація якої шукається; ϵ_0 - початкова пружна компонента деформації. Методика згладжування базується на припущенні, що апроксимуюча функція не обов'язково строго повинна проходити через фіксовані табличні значення. Вводиться процедура "збурення" табличних значень деформації повзучості за допомогою "вагових" коефіцієнтів, які є відображенням експериментальної похибки вимірів.

У третій главі подані результати експериментальних досліджень у вигляді розтягу, первісних кривих повзучості, діаграм довготривалої міцності для деяких жароміцних сталей та сплавів, а також основні закономірності деформування та скрихчення за умов високотемпературного навантаження.

Дослідження жароміцних матеріалів класифіковано за характером деформаційного зміцнення, що визначається згідно діаграм миттєвого деформування. У залежності від рівня температури той чи інший жароміцний матеріал може бути віднесений до одного з 4-х типів : що зміцнюються лінійно, що зміцнюються нелінійно, ідеально-пластичні та ті що розміцнюються. У якості критерія класифікації використовуються форма діаграм розтягу за межею текучості і значення безрозмірних величин

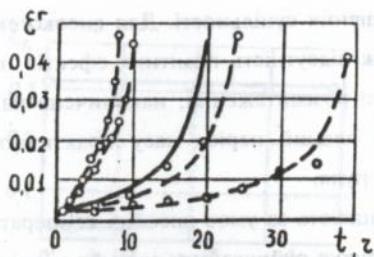
$$\bar{\eta} = \frac{\theta}{\theta_m}; \quad \bar{\xi} = \frac{\epsilon_B}{\epsilon_R}, \quad (2)$$

де θ і θ_m - робоча температура і температура плавлення відповідно; ϵ_B - деформація, яка відповідає межі міцності; ϵ_R - деформація повзучості на момент руйнування.

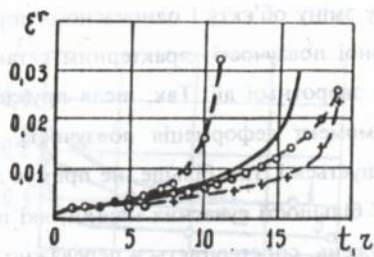
У роботі експериментально досліджено повзучість та довготривалу міцність низки сучасних та перспективних теплостійких, жаростійких і жароміцних сталей та сплавів у діапазоні зміни температур від 500 до 1100°C при напруженні від 100 до 500 МПа та тривалості досліджень від 0,1 до 4000 годин. Експериментальні дані подані у формі первинних кривих повзучості у координатах " ϵ' - t " та оброблені за допомогою згладжуючих кубічних сплайнів. Як приклад, на мал.2 наведені експериментальні дані (точки) з повзучості сплавів EI867(a) при $\theta=950^\circ\text{C}$, $\sigma=200$ МПа та

ВЖЛ12У(б) при $\theta=1000^\circ\text{C}$, $\sigma=200$ МПа та результати їх апроксимації (лінії) кубічними згладжуючими сплайнами. Суцільними лініями надані осереднені апроксимації.

З даних, наведених на мал.2 видно, що в цілому отримано досить пристойні результати апроксимації, навіть при значних розбіжностях вихідних даних. Зафіксовані всі особливості процесу повзучості та зміна характеру



Мал.2а.



Мал.2б.

повзучості в залежності від типу матеріалу, рівня температури і навантаження, що спостерігаються в експерименті. Особливе значення у зв'язку із цим приділено аналізу рівня деформації повзучості ϵ'_R , що була накопичена на момент руйнування. Цей рівень власне визначає і характер руйнування: в'язкий, крихкий чи змішаний.

Як було показано і раніше, найбільш принципове значення для розвитку процесу повзучості та реалізації характеру руйнування має рівень температури.

За температур нижче 0,5 температури плавлення ($\theta < 0,5\theta_m$) повзучість жароміцних матеріалів практично не розвивається. У процесі деформування реалізується лише нестала стадія, швидкість якої прямує до нуля. Накопичена до моменту руйнування деформація ϵ'_R , або співвимірна з пружною компонентою ϵ_0 , або на порядок менша. Деформація і руйнування зразка відбувається без зміни геометрії, тільки за рахунок порушення суцільності, тобто за рахунок накопичення розсіяних пошкоджень. Збільшення напружень не приводить до якісних змін характеристик процесу повзучості.

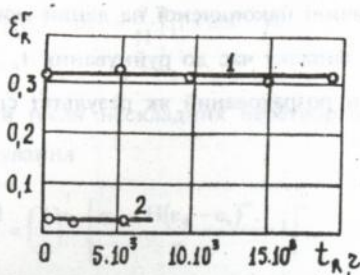
В області високих гомологічних температур ($\theta > 0,6\theta_m$) виникають якісні зміни характеру процесу повзучості (мал.2). Вони, перш за все пов'язані зі зміною форм кривих повзучості, які показують розвиток всіх характерних стадій процесу: нестала, стала і прискорена. Характерною особливістю високотемпературної повзучості є також та обставина, що більша частина накопиченої до моменту руйнування деформації є незворотною. У цьому випадку величина ϵ_0 буде значно меншою величини ϵ'_R , так що можна прийняти, що $\epsilon' \approx \epsilon''$. Деформація на момент руйнування може досягати кількох відсотків чи навіть десятків відсотків. У цьому випадку необхідно враховувати геомет-

ричну зміну об'єкту і одночасного порушення суцільності. Для високотемпературної повзучості характерним є також відсутність помітних ефектів після дії та зворотньої дії. Так, після пружного розвантаження, накопичена на даний момент деформація повзучості, за певний період часу практично не зменшується і, тим більше, не прямує до нуля.

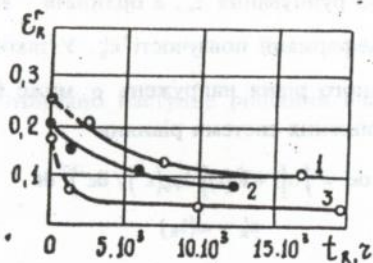
У більшості сучасних машин, які працюють за умов високих температур і напружень, спостерігається переважно крихке руйнування, яке має місце при деформації порядку 1% і менше. Фізична картина скрихнення при повзучості надзвичайно складна і має багато різноманітних трактувань. У металічних сплавах з незрівноваженою структурою, наприклад, відбуваються на протязі певного часу зміни механічних властивостей, які залежать від рівня температури. Особливо суттєвими є ефекти скрихнення коли відбувається явище дифузії, поверхневих взаємодій, корозійно-механічного розтріскування

У даній роботі для кількісної ідентифікації характеру руйнування за умов повзучості додатково пропонується примінити аналіз кінетики зміни деформації повзучості ϵ_R^t , що накопичується на момент руйнування. Ця величина безпосередньо характеризує деформаційні властивості матеріалу, а за її числовим значенням власне і визначається характер руйнування. Аналіз результатів досліджень, виконаних у даній роботі, а також літературні дані, показали, що величина ϵ_R^t перш за все залежить від типу матеріалу. Зокрема, встановлено, що для деяких хромонікелевих і аустенітних сталей характерна незначна зміна величини ϵ_R^t при зміні температури і напружень. Так для сталі 12Х2МФА - у межах 20-24%, а для сталей Х18Н9 і 12Х18Н10Т - у межах 35,5-40,2%. На мал.3а наведена залежність ϵ_R^t від t_R для сталей 12Х1МФ(1) при $\theta=565^\circ\text{C}$ та Е1481(2) при $\theta=700^\circ\text{C}$, що підтверджує це положення. Характерно також, що значення ϵ_R^t для цих матеріалів близьке до значення де формації ϵ_n , яка відповідає межі міцності.

Проте, для більшості досліджуваних металевих матеріалів характерні ефекти скрихнення, які проявляються у спаданні величини ϵ_R^t , (мал.3б) при зменшенні напружень і при збільшенні відповідно часу до руйнування. Із спів-



Мал.3а.



Мал.3б.

ставлення діаграм повзучості можна також зробити висновок, що скрихчення, характерне лише для високотемпературної області (мал.4, штрих-пунктирні лінії), оскільки в області низьких гомологічних температур руйнування є лише крихким і відбувається при значеннях ϵ'_R , співвимірних з пружною компонентою $\epsilon_0 = \sigma_0/E$. Характерним є те, що величина ϵ'_R спадає і по відношенню до значення ϵ_B , яка завжди виявляється максимально можливою.

Аналіз результатів, приведених на мал.3б, а також інших аналогічних даних показав, що кінетика скрихчення підпорядковується експоненціальному закону, так що

$$\epsilon'_R = \epsilon_B \exp(-k_{\text{сб}} \epsilon_B), \quad (3)$$

де $k_{\text{сб}}$ - коефіцієнт, який визначається експериментально, характеризує схильність матеріалу до скрихчення ($0 = k_{\text{сб}} \leq \infty$). При $k_{\text{сб}} \Rightarrow 0$ величина $\epsilon'_R \Rightarrow \epsilon_B$ і руйнування можна розглядати як в'язке, якщо $k_{\text{сб}} \Rightarrow \infty$ величина $\epsilon'_R \Rightarrow 0$ і руйнування є абсолютно крихким.

Четверта глава присвячена вибору та обґрунтуванню вихідних співвідношень, а також формулюванню основних вирішальних рівнянь моделей довготривалого руйнування матеріалів за умов повзучості із урахуванням процесів скрихчення. Розв'язані задачі прогнозування часу в'язко-крихкого та крихкого руйнування жароміцних матеріалів за умов статичного навантаження.

Момент руйнування за умов повзучості для заданого рівня напружень σ визначається як точка на кривій повзучості (мал.1), абсциса якої відповідає

часу до руйнування t_R , а ордината - величині накопиченої на даний момент часу деформації повзучості ϵ'_R . У такому випадку час до руйнування t_R , для довільного рівня напружень σ може бути розрахований як результат спільного рішення системи рівнянь

$$\begin{cases} \int_{\epsilon'}^{\epsilon'_R} d\epsilon' = \int_t^t \sigma [1 + K(t)] (d\varphi_0(\epsilon') / d\epsilon')^{-1} dt, \\ \epsilon'_R = \omega(t_R) \end{cases}, \quad (4)$$

перше з яких задає закон накопичення деформації повзучості ϵ' за часом t згідно ізохронної теорії повзучості, а друге - закон скрихнення матеріалу у процесі повзучості. Тут $K(t)$ - оператор часу, $\varphi_0(\epsilon')$ - рівняння кривої миттєвого деформування, а крапкою позначено диференцювання у часі.

Із структури моделі руйнування (4) видно, що найбільш суттєво на час до руйнування t_R має впливати закон зміни дотичного модулю $d\varphi_0(\epsilon') / d\epsilon'$ та закон скрихнення матеріалу $\omega(t_R)$. Вся різноманітність стану руйнування за умов повзучоті в залежності від вигляду функцій $\varphi_0(\bullet)$ та $\omega(\bullet)$, що задають властивості матеріалу, може бути зведена до в'язкого, змішаного та крихкого руйнування (див. мал. 1).

Частково, в'язке руйнування (із утворенням шийки) має бути зреалізоване у випадку коли інтенсивність деформаційного зміцнення матеріалу $d\varphi_0(\epsilon') / d\epsilon'$ прагне до нуля. За цих умов криві повзучості (мал. 1а, $\epsilon_B = 1$) будуть мати прискорену стадію та асимптотичне збільшення швидкості $\dot{\epsilon}'$ та деформації ϵ' повзучості до нескінченності. Проте в реальних матеріалах деформація на момент руйнування ϵ'_R має бути обмежена деформацією ϵ_B , що відповідає межі міцності σ_B , так що $\omega(t_R) = \epsilon_B$.

Додатково визначимо, що із умови забезпечення критерію в'язкого руйнування $d\varphi_0(\epsilon') / d\epsilon' \rightarrow 0$, в'язке руйнування може бути зреалізовано у матеріалах із степеневим зміцненням та в ідеально-пластичних матеріалах. Частково, для матеріалів із степеневим зміцненням модель (4) може бути записана у вигляді

$$\int_{\epsilon'_v}^{\epsilon'_R} (\epsilon')^{1-m} d\epsilon' = \frac{\sigma}{H} \int_0^{t_R} (1 + abt^{b-1}) dt, \quad (5)$$

$$\epsilon'_R = \epsilon_B$$

звідки після нескладних перетворень отримано наступне рівняння в'язкого руйнування

$$t_R = \left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \cdot \left[\frac{\sigma_v + H(\epsilon_B - \epsilon_v)^m}{\sigma} - 1 \right]^{\frac{1}{b}}, \quad (6)$$

тут a, b - реологічні константи матеріалу для оператора часу $K(t) = at^b$; H, m - параметри деформаційного зміцнення для закону $\phi_0(\epsilon') = H(\epsilon')^m$; σ_v - межа течії матеріалу; ϵ_v, ϵ_B - деформації, що відповідають межі течії σ_v та межі міцності σ_B відповідно.

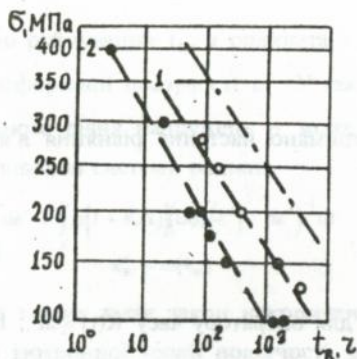
Виходячи зі структури рівняння (6) маємо зазначити, що збільшення межі течії матеріалу σ_v призводить до зростання часу в'язкого руйнування, так само, як зі збільшенням характеристик деформаційного зміцнення H і m , а також різниці між значеннями ϵ_B і ϵ_v . Залежність часу до руйнування t_R від напруження σ підпорядковується степеневому закону і в логариф-мічній системі координат рівнянню (6) буде відповідати пряма лінія, що якісно узгоджується з відомими літературними даними (див. мал. 1б, лінія 1).

Результати розрахунків (штрихові лінії), що виконані за рівнянням (6), порівняні на мал. 4а із експериментальними даними (точки) для сталі 12Х1МФ(1) при $\theta = 540^\circ \text{C}$ та для сплаву ЕІ437Б(2) при $\theta = 800^\circ \text{C}$. Штрихпунктирною лінією нанесені розрахунки для сталі 12Х1МФ, що виконані за моделлю Хоффе.

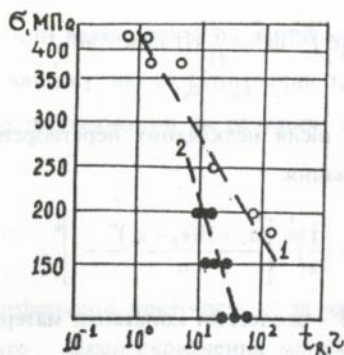
Для часу до руйнування ідеально-пластичних матеріалів із системи рівнянь (4) маємо співвідношення

$$t_R = \left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \cdot \left(\frac{\sigma_v}{\sigma} - 1\right)^{\frac{1}{b}}, \quad (7)$$

яке співпадає з (6) при $H=0$, що відповідає умові відсутності у матеріалі



Мал.4а.



Мал.4б.

ефекту зміцнення. Залежність часу в'язкого руйнування від напруження ідеально-пластичних матеріалів також підпорядковується степеневому закону і зі збільшенням межі текучії матеріалу σ_v зростає.

Результати розрахунків (штрихові лінії) за рівнянням (7) зіставлено на мал.4б із експериментальними даними (точки) для сплаву ЕП718(1) при $\theta = 800^\circ\text{C}$ та для сплаву ЕІ437Б(2) при $\theta = 850^\circ\text{C}$.

Змішане руйнування реалізується в металевих матеріалах одночасно з розвитком суттєвих деформацій повзучості та процесу скрихнення. Область змішаного руйнування на мал.1а, може бути обмежена кривими повзучості σ_v і σ_R (не заштрихована область). У цьому випадку руйнування також відбувається за наявності прискореної стадії повзучості, але при значеннях ϵ_R^t менших, ніж величина ϵ_v та залежить згідно (2) від часу до руйнування t_R . По суті, змішане руйнування реалізується лише у матеріалах з нелінійним зміцненням, так що для матеріалів із степеневим зміцненням із (4) отримуємо систему рівнянь

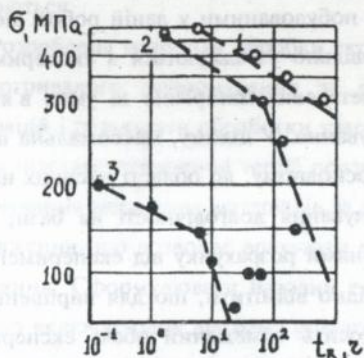
$$\begin{cases} \int_{\sigma'}^{\sigma} (\epsilon')^{1-m} d\epsilon' = \frac{\sigma}{H} \int_0^t (1 + abt^{b-1}) dt \\ \epsilon_R^t = \epsilon_v \exp\left(-\frac{t_R}{A}\right) \end{cases} \quad (8)$$

звідки, після нескладних перетворень, для часу змішаного руйнування маємо співвідношення

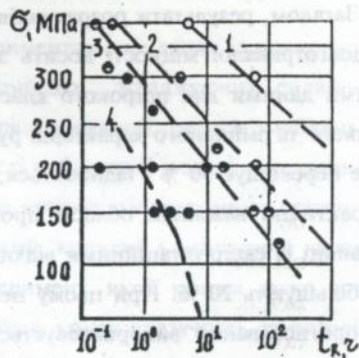
$$\epsilon_v \left(\frac{\bar{\epsilon}_R^t}{\epsilon_v}\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{1}{H}\right)^{\frac{1}{m}} \left\{ \sigma \left[1 + a(t_R)^b \right] - \sigma_v \right\}^{\frac{1}{m}} + \frac{\sigma_v - \sigma}{E} \quad (9)$$

тут σ - застосоване напруження; \bar{t}_R , $\bar{\epsilon}_R^i$ - координати точки руйнування на базовій кривій повзучості, що використовується для визначення коефіцієнтів моделі. Решта позначень співпадає із такими, що прийняті у (6). При $\bar{\epsilon}_R^i = \epsilon_0$ величина $t_R = \bar{t}_R$ і рівняння (9) співпадає з (6). Рівняння (9) розв'язується відносно величини t_R чисельно, методом ітерації.

На мал.5, як приклад, наведені результати розрахунків (штрихові лінії), що виконані за рівнянням (9) для сплавів EI867(a) при температурах $\theta = 800$ (1), 900 (2), 1000 (3)°C та ВЖЛ12У при температурах $\theta = 900$ (1), 950 (2), 1000 (3), 1050 (4)°C. Експериментальні дані наведені точками.



Мал.5а.



Мал.5б.

Змішаному руйнуванню на мал.5 відповідає верхня ділянка діаграм довготривалої міцності (до зламу, якщо вони є на діаграмах). Нижня ділянка діаграм довготривалої міцності відповідає крихкому руйнуванню.

Крихке руйнування може реалізуватися лише на неусталеній стадії повзучості, а на мал.1а, обмежується заштрихованою областю σ_k . Накопичена на момент руйнування деформація ϵ_R^i мала і співвимірна з початковою пружною компонентою ϵ_0 . Оскільки незалежно від характеру зміцнення матеріалу, неусталена повзучість описується рівняннями однакової структури, для моделі крихкого руйнування з (4) отримуємо систему рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{t'}^t d\epsilon^t = \frac{\sigma}{E_*} \int_t^t (1 + abt^{b-1}) dt \\ \epsilon_R^t = \epsilon_B \exp\left(-\frac{t_R}{A}\right) \end{array} \right. , \quad (10)$$

звідки для часу крихкого руйнування маємо співвідношення

$$\left(\frac{\epsilon_R^t}{\epsilon_B}\right)^{1/a} = \frac{\sigma \epsilon_B}{E_*} [2 + a(t_R)^b], \quad (11)$$

яке також розв'язується чисельно методом ітерації. Тут E_* - модуль лінійного зміцнення матеріалу. Результати розрахунків згідно рівняння (11) наведені на мал.5 штрих-пунктирними лініями.

Загалом, результати розрахунків за побудованими у даній роботі моделями довготривалої міцності досить задовільно узгоджуються з експериментальними даними для широкого класу металевих матеріалів за умов в'язкого, крихкого та змішаного характерів руйнування. У цілому, максимальна похибка не перевищує 30 % і відноситься, в основному, до області високих напруг. У практично важливій області прогнозування довговічності на бази, що є порівняні із експлуатаційними відхиленнями розрахунку від експерименту не перебільшують 20 %. При цьому необхідно відмітити, що для вирішення задач прогнозування використовується досить обмежений обсяг експериментальних даних, що з економічної точки зору є досить перспективним.

У висновках стисло сформульовано головні наукові здобутки дисертаційної роботи:

1. Дано критичний аналіз існуючих підходів до вирішення одновимірних задач прогнозування довготривалої міцності металевих матеріалів за умов повзучості при статичному навантаженні. Показано, що найбільш перспективним є модельний підхід, коли визначаються співвідношення, будуються на їх основі деякі гіпотези по відношенню до характеру зв'язку між основними параметрами процесу, а для ідентифікації матеріальних констант використовується незалежний експеримент.

2. Розроблена методика експерименту і виконані обширні експериментальні дослідження процесів миттєвого деформування, повзучості та довготривалої міцності ряду теплостійких, жаростійких і жароміцних сталей і

сплавів у широкому діапазоні температур і напруг, які дозволяють встановити нові закономірності, у тому числі :

- сформулювати експоненціальний закон скрихнення металевих матеріалів за умов повзучості, що задають кінетику зменшення накопиченої на момент руйнування деформації стосовно величини ϵ_n ;

- виявити кореляцію між характером довготривалого руйнування і типом деформаційного зміцнення матеріалу та показати, наприклад, що в'язке руйнування можливе лише у матеріалах з нелінійним зміцненням в ідеально-пластичних матеріалах, а крихке руйнування - у матеріалах, що лінійно зміцнюються.

3. Розроблена методика обробки експериментальних даних із повзучості та короткотривалого деформування за допомогою згладжуючих сплайн-апроксимацій і результати обробки узагальнені у вигляді графіків і таблиць.

4. На підставі ізохронної теорії повзучості побудовані моделі довготривалого руйнування металевих матеріалів за умов високотемпературного статичного навантаження, що дозволяє врахувати в'язкий, крихкий і змішаний характер руйнування. Сформулювати базовий експеримент, який можна легко повторити, що включає одну діаграму розтягу і одну криву повзучості, та розроблена методика ідентифікації параметрів моделей.

5. Розраховані і спрогнозовані на один-два порядки криві повзучості і діаграми довготривалого руйнування ряду жароміцних сталей та сплавів, що використовуються в стаціонарному і транспортному газотурбобудуванні. Результати розрахунків співставлені з оригінальними та запозиченими експериментальними даними і отримано досить задовільне узгодження розрахунку з експериментом.

Основні результати дисертації головним чином викладені та надруковані у наступних публікаціях:

1. Исследование влияния модификации нитридами ванадия на механические свойства конструкционной стали 25Л//Проб. прочности.- 1985, № 3 . - С. 54-59. (Співавтори Іщенко І.І., Синайський Б.М. та інш.)

2. Влияние обработки инструментом из гексанида-Р на структурное состояние поверхности и сопротивление усталости низкоуглеродистых сталей // Сверхтвердые материалы. - 1980, № 6. - С.46-51. (Співавтори Іщенко І.І., Нижник С.Б., Погребняк А.Д. та інші.)
3. О влиянии модифицирования нитридами ванадия на прочностные свойства конструкционной стали. // Труды IX науч. конф. мол. вчених ІМех АН Укр. - Київ, 1982. / Ін-т механіки АН Укр. - Київ, 1982. - С.81-85. Деп. в ВІНТІ 16.06.82, № 2644.
4. Идентификация и прогнозирование параметров высокотемпературной ползучести с учетом трехстадийности процесса деформирования // В кн.: Динамика и прочность двигателей. Збірн. тез. XXVI Міжнародної науково-технічної наради з динаміки та міцності двигунів. - Самара, 1996. С.45. (Співавтори Голуб В.П., Погребняк А.Д.).
5. Методика сглаживающей сплайн-аппроксимации экспериментальных диаграмм ползучести // В кн.: Моделирование устойчивости систем. Збірн. тез. доп. - VII Укр. конф. Моделювання та дослідження стійкості систем. - Київ, 1996. - С.47. (Співавтор. Голуб В.П., Романенко І.Б.).
6. Влияние модифицирования нитридами ванадия на структуру и прочностные свойства стали 25Л при повышенных температурах. В кн.: Структуры и свойства материалов в широком диапазоне температур. Тез. доп. - X Всесоюзная нарада з теплової мікроскопії, - Новокузнецьк, 1982. - С.40-41. (Співавтори Іщенко І.І., Синайський Б.М.).
7. Дослідження повзучості жароміцних сталей і сплавів та статистична обробка їх результатів. - Київ, 1997. - 28 с. - Деп. в УкрІНТЕІ 27.01.97, № 93-Уі 97. (анот. Прикл. механіка. - 1997. - 33, № 3. - С. 101). (Співавтор. Погребняк А.Д., Романенко І.Б.).
8. До оцінки часу до руйнування за умов повзучості, коли матеріал починає набувати крихкості. Київ, 1997. - 16 с. - Деп. в УкрІНТЕІ 27.01.97, № 86-Уі 97 (анот. Прикл. механіка. - 1997. - 33, № 3. - С.101). (Співавтор. Тетерук Р.Г.).

Аннотация.

Касперская В.В. Прогнозирование длительного разрушения металлических материалов в условиях ползучести с учетом процесса охрупчивания.

Диссертация является рукописью на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09.- динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, Институт механики им.С.П.Тимошенко НАН Украины, Киев, 1997.

Защищается 8 научных работ, которые содержат результаты экспериментальных и теоретических исследований в области ползучести и длительной прочности жаропрочных материалов. на основе анализа экспериментальных данных установлены закономерности и сформулирован критерий охрупчивания материалов в процессе ползучести. Построены модели длительного разрушения и разработана методика идентификации параметров моделей. Решены задачи прогнозирования времени вязкого, вязко-хрупкого и хрупкого разрушения жаропрочных материалов при растяжении.

Kasperska V.V. Prediction of longterm fracture of metallic materials under creep conditions with allowance for embrittlement process.

The thesis is a monograph submitted for awarding of Candidate degree of Technical Sciences on speciality 05.02.09- dynamics, strength of machines, devices and apparatus's, S.P.Timoshenko Institute of Mechanics of Ukrainian NAS, Kyiv, 1997.

The 8 scientific publications which contain experimental and theoretical investigations in the area of creep and longterm strength of heat resistant materials are submitted for awardness of degree. Some regularities have been established based on the experimental data analysis and materials embrittlement criterion during the creep process is formulated. Longterm fracture models are constructed and identification technique of model parameters is developed. Some problems of the viscous, visco-brittle and brittle time to fracture prediction of heat resistant materials under tension are solved.

Ключові слова: високотемпературна повзучість, довготривала міцність, час до руйнування, процес скрихчення, в'язке руйнування, крихке руйнування, в'язко-крихке руйнування, прогнозування часу до руйнування.

Ав 37.903

Підп. до друку 15.05.94, Формат 60×84¹/₁₆.
Папір друк. № 1 . Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 0,93.
Умовн. фарбо-відб. 1,04 . Обл.-вид. арк. 1,0 .
Тираж 100 . Зам. № 7-1541 .

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.