

Академія наук України
Інститут проблем міцності

На пр авах рукопису

КАРПІНОС Борис Сергі́йович

**ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ ТЕОРІЙ ГРАНИЧНИХ
СТАНІВ І ДОВГОВІЧНОСТІ МАТЕРІАЛІВ**

01.02.04' - Механіка деформівного твердого тіла

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Київ 1993



00757009 (S)

робота виконана в інституті проблем міцності АН України

Науковий консультант -
доктор технічних наук, професор ТРЕТЬЯЧЕНКО Г.М.

Офіційні опоненти:

член-кореспондент АН України,
доктор фізико-математичних наук, професор БУРАК Я.Й.

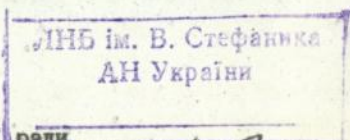
доктор технічних наук, професор ВЕТРОВ А.М.

доктор технічних наук, професор ІСАХАНОВ Г.В.

Провідна організація - Київський університет ім.Т. ШЕВЧЕНКА

Захист відбудеться "12" травня 1994 р. о 9³⁰ год
на засіданні Спеціалізованої ученої ради Д 016.33.01 при
Інституті проблем міцності АН України у приміщенні
конференц-зали (252014, Київ - 14, вул. Тімірязєвська, 2).
З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту.
Автореферат розісланий "12" квітня 1994 р.
Відгук на автореферат, засвідчений гербовою печаткою
просимо направляти за адресою Інституту

Учений секретар



Спеціалізованої ученої ради
доктор технічних наук

ГІГІНЯК Ф.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Науково-технічний прогрес у машинобудуванні визначає досягнення в енергетиці, газотурбобудуванні, авіаційній та космічній техніці, виробництві і обробці перспективних матеріалів та ін. Підвищення параметрів робочого середовища, використання нових типів теплоносіїв, скорочення часу перехідних і збільшення часу стаціонарних режимів, дія фізичних полів різної природи обумовлює роботу матеріалу в екстремальних умовах. В результаті цього в матеріалі інтенсифікуються процеси розаміцнювання, зменшується його пластичність і міцність, виникають дефекти, що спричинює вичерпання ресурсу експлуатації унікальних і дорогих конструкцій машин і обладнання: газових турбін, турбогенераторів, атомних та хімічних реакторів, комунікацій теплових і атомних електричних станцій, елементів ракетно-космічної техніки та ін.

Використовувані в даний час феноменологічні методи прогнозування довговічності матеріалів базуються на численних експериментальних дослідженнях закономірностей деформування і руйнування зразків за однорідних і неоднорідних, ізотермічних і неізотермічних станів, в агресивних і нейтральних середовищах, з концентраторами напруження і деформації та без них, за одноосного і двохосного напружено-деформованих станів і т.д. Разом з тим різноманітність конструкційних матеріалів, багатофакторність режимів навантажування, технічні труднощі виконання необхідних дослідів ускладняють, а, часто, не дозволяють розв'язати проблему прогнозування лише експериментальними методами. Отже, певні успіхи під час розроблення методів прогнозування довговічності матеріалів за умов термомеханічного навантажування з врахуванням процесів тепло-, енерго-, масоперенесення, хімічних реакцій можуть бути досягнуті, якщо використати принципово нові методологічні підходи, що базуються на останніх теоретичних і експериментальних досягненнях термодинаміки деформування, фізики міцності, механіки суцільного середовища.

Мета роботи. На основі положень механіки твердого деформованого тіла, термодинаміки деформування і методів фізичного моделю-

вання пошкоджуваності матеріалів розробити і науково обґрунтувати методи прогнозування граничних станів матеріалів в екстремальних умовах.

Наукова новизна. Сформульовано і експериментально підтверджено загальну умову досягнення граничних станів під час руйнування матеріалів, яка базується на аналізі порушення стійкості термодинамічної системи. Встановлено фундаментальні співвідношення між фізичними і механічними характеристиками при деформуванні і руйнуванні матеріалів за різних умов термосилового циклічного навантажування. Розроблено методи аналітичного і фізичного моделювання процесів неізотермічного неоднорідного деформування матеріалів енергетичного обладнання.

Практична цінність. Використовуючи методи фізичного моделювання нерівноважних термодинамічних станів матеріалів, на основі експериментальних даних, отриманих під час випробувань зразків простої або спеціальної форми, показано можливість прогнозування термовтсмної довговічності металічних і керамічних лопаток газових турбін, титанових виклопних систем двигунів літака, елементів енергетичних перетворювачів.

Побудовано графіки неусталених і неоднорідних теплових і термонапружених станів при нагріванні - охолодженні пластини, циліндра суцільного, порожнистого осесиметричного, порожнистого ексцентричного за стаціонарних і нестаціонарних, однорідних і неоднорідних межових умов теплообміну. За допомогою графіків оперативно визначаються необхідні умови випробувань зразків на термостійкість, термоудар, термовтому. Ці результати можна також використовувати як розв'язки прямих і зворотних задач дифузії, нейтроноперенесення, фільтрації, електропровідності, що виявляють вплив на процеси розміцнювання матеріалу.

Показано можливість кількісного і якісного оцінювання змінення модулів пружності, коефіцієнтів Пуасона і термічного розширення, теплоємності за дії зовнішніх чинників різної природи - теплових, механічних, технологічних.

Запропоновано інженерну методику визначення термонапруженого стану зразків або конструктивних елементів безпосередньо в проце-

сі теплового навантажування. Методика використовує отримані прості алгоритми розрахунку, а також встановлені закономірності регулярних режимів теплових і термонапружених станів.

Результати досліджень впроваджені в ЛНВО ім. В.Я.Клімова, КВ "Машиностроение", ВНДІ експериментальної фізики, Інституті проблем матеріалознавства ім. І.Н.Францевича АН України, НДІ двигунів, Київському механічному заводі ім О.К.Антонова та ін. і дали суттєвий економічний ефект.

Автор захищає такі основні положення.

- методологію аналізу нерівноважного термодинамічного стану матеріалу в екстремальних умовах;

- виведення фундаментальних співвідношень термодинаміки деформування твердих тіл, що зв'язують механічні і теплофізичні характеристики матеріалів за дії різних фізичних полів;

- формулювання і експериментальне обґрунтування умови порушення стійкості термодинамічної системи під час руйнування матеріалу з врахуванням теплових, механічних, хімічних та інших чинників зовнішньої дії;

- методологію моделювання заданих неоднорідних неусталених параметрів і функцій стану матеріалу за різних умов циклічного термосилового навантажування;

- розроблення і експериментальне обґрунтування методів прогнозування термоциклічної довговічності термонапружених елементів газових турбін.

Апробація роботи і публікації. Основні результати роботи доповідались, обговорювались і були схвалені на VI і VII З'їздах в теоретичної і прикладної механіки (Ташкент - 1986, Москва - 1991), VIII Всесоюзній науково-технічній конференції з конструкційної міцності і надійності авіаційних двигунів (Куйбишев - 1981), IV Всесоюзній науково-технічній конференції "Методи и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов" (Харків - 1983), Всесоюзній конференції з сучасних проблем будівельної механіки і міцності літальних апаратів (Москва - 1983), V Всесоюзному симпозиумі "Малоцикловая усталость - критерии разрушения и структура материалов" (Волгоград - 1987), II Всесоюзному

симпозіумі з перспективних металевих матеріалів (Москва - 1991), Сибірській школі з сучасних проблем механіки деформовного твердого тіла (Якутськ - 1990), I Симпозіумі повзучості матеріалів (Польща, Белосток - 1983), VIII і IX Конгресах з випробувань матеріалів (Угорщина, Будапешт - 1982, 1986), 7-й Європейській конференції з руйнування (Угорщина, Будапешт - 1988), семінарах і конференціях Інституту проблем міцності АН України, Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача АН України, Київського університету ім. Т.Г.Шевченка, Київського інституту інженерів цивільної авіації, Московського авіаційного інституту ім. С.Орджонікідзе, Московського державного технічного університету ім. М.Е.Баумана та ін.

Матеріали дисертації опубліковано у трьох монографіях, тридцяти наукових статтях і повідомленнях. За результатами виконаних методичних розробок отримано два авторських свідоцтва.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатку. Праця містить 310 сторінок друкарського тексту, 12 таблиць, 79 рисунків та бібліографію з 190 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано анотацію проблеми і задачі, розв'язуваних у дисертації, відмічено їх актуальність, подано основні наукові положення і результати досліджень, що виносяться на захист, показано наукову новизну і практичну значущість теоретичних і експериментальних результатів роботи.

У першому розділі подано критичний аналіз досліджень, присвячених вивченню і описанню різних аспектів процесів деформування конструкційних матеріалів.

Процес деформування, інтегрально відбиваючи вплив багатьох зовнішніх факторів на поточний термодинамічний стан матеріалу, залежить як від механічних характеристик, так і від умов навантаження: статичних або циклічних, ізотермічних або неізотермічних, наявності або відсутності фізичних полів і хімічних реакцій

і т.д. Інтенсивність нагромадження пошкоджень і здатність матеріалу опиратися різним механічним, тепловим чинникам визначається траєкторією навантажування, пружністю, пластичністю, тепло- і температуропровідністю, структурою матеріалу, технологією його виготовлення, корозійним впливом робочого середовища. Для різних конструкційних матеріалів стосовно до вивчених умов навантажування отримані емпіричні залежності, що дозволяють зробити кількісну оцінку настання граничного стану. Добре відомі деформаційні, енергетичні, ентропійні рівняння граничних станів Бажанова, Гольденבלата, Дульнева, Іванової, Італьянцева, Коффіна, Лібертіні, Махутова, Менсона, Третьяченка, Трошенка, Тулякова, Федорова і ін. Запропоновані рівняння мають феноменологічний характер і, як наслідок, велику кількість коефіцієнтів, що визначаються на основі багатofакторних дослідів. Разом з тим огляд сучасних теоретичних і експериментальних досліджень закономірностей деформування і руйнування матеріалів в екстремальних умовах свідчить про те, що загальні методологічні підходи до проблеми міцності матеріалів вимагають подальшого всебічного і глибокого розвинення. Це мотивується рядом основних причин: першою - відсутністю фундаментального співвідношення, яке зв'язує між собою умову руйнування і змінення в процесі навантажування сукупності всіх термодинамічних параметрів і функцій стану, що визначають процес руйнування; другою - відсутністю деяких даних про механічні, теплофізичні властивості матеріалу, їх взаємозв'язок, що необхідно для визначення поточних значень функцій стану; третьою - відсутністю розв'язків певних задач моделювання нерівноважних термодинамічних станів матеріалу енергоперетворювачів та недостатнім використанням сучасних методів узагальнення дослідних і теоретичних даних стосовно до розробки критеріїв і рівнянь граничних станів.

Робиться висновок про необхідність розроблення методу прогнозування граничних станів матеріалів, що використовує фізично обгрунтовані моделі руйнування і що враховує змінення в процесі деформування і руйнування різних термодинамічних параметрів і функцій стану. Достовірність методу досягається узагальненням багатьох експериментальних даних з використанням положень теорій

моделювання і подібності.

На основі аналізу стану експериментальних і теоретичних досліджень з проблеми викладено мету і задачі роботи.

У другому розділі для визначення небезпечного стану матеріалів за циклічних механічних і теплових дій вивчено змінення їх термодинамічного стану. Його аналіз направлений на розв'язок задачі пошуку аргументів рівнянь граничних станів, оцінювання діапазону параметрів стану, в якому відмічається один переважальний механізм деформування і руйнування. Розглянено термодинамічні цикли, що мають місце в матеріалі конструкції і під час випробувань зразків на ізотермічну і неізотермічну мало- і багаточислову втому, циклічну повзучість. Цикли графічно інтерпретують у різних координатах $(\sigma - \epsilon)$, $(\sigma - T)$, $(\epsilon - T)$, $(\Delta s - T)$ залежності між напруженнями σ , деформаціями ϵ , абсолютною температурою T , приростом ентропії пружно-пластичного деформування Δs і дозволяють зробити висновок про незворотні зміни, що відбуваються в матеріалі на різних стадіях пружного і пружно-пластичного деформування. Цикл у координатах $(\sigma - \epsilon)$ дає інформацію про роботу деформування, її складові - пружну, пластичну, зміцнення; цикл у координатах $(\sigma - T)$, $(\epsilon - T)$ спільно з температурними залежностями граничних характеристик дозволяє установити умови досягнення небезпечного стану; цикл у координатах $(\Delta s - T)$ відбиває загальні закономірності переходження теплової енергії в механічну і навпаки, а також ступінь пошкоджуваності матеріалу.

Особливу увагу звернено до термічної втоми. Деформування і руйнування за термічної втоми обумовлено термодинамічними процесами циклічних переходів теплової, а часто також і хімічної або інших видів енергій у механічну. Для масивних зразків, що нагрівались і охолоджувались за різних межових умов теплообміну, побудовані графіки термодинамічного циклу. Графіки визначають залежності, що зв'язують відносні термопружні напруження (деформації) σ^* , відносні прирости функцій Гіббса Δg^* , Гельмгольца Δf^* , ентропії Δs^* , з відносною температурою θ . Цикл у координатах $(\sigma^* - \theta)$ дає змогу установити вплив межових умов теплообміну на величину максимальних деформацій і відповідну їм температуру,

цикл у координатах $(\Delta s^* - \theta)$ - витратну роботу на термопружне деформування, його незворотність, цикл у координатах $(\Delta g^* - \theta)$, $(\Delta f^* - \theta)$ - додаткову роботу стиснення або розтягнення до величини відносної деформації $\epsilon^* = (\theta^* - \theta)$ за температури θ .

Виходячи з аналізу розглянутого термодинамічного циклу за найбільш загальний критерій пошкоджуваності матеріалу приймається приріст ентропії пружно-пластичного деформування $\Delta s_{пл}$ і можливих хімічних реакцій $\Delta s_{хім}$. Для визначення впливу хімічних реакцій на напружений стан отримані залежності між модулем пружності E , коефіцієнтом лінійного термічного розширення α , хімічним потенціалом μ_k .

Зокрема, для ізотропного матеріалу

$$-\partial \delta / \partial \mu_k = \partial \mu_k / \partial \epsilon \quad \text{і} \quad \partial \mu_k / \partial T = E \alpha \Delta V_{хім} / 3.$$

де μ_k - кількість молей, $\Delta V_{хім}$ - відносна зміна об'єму при хімічній реакції.

Таким чином можливі аргументи рівнянь граничного стану є підстава записати як суму складових приростів ентропії.

При визначенні складової $\Delta s_{пл}$ використовується така графо-аналітична методика (рис.1). Процес деформування поверхневих шарів деталі і зразків, що зазнають нагрівання - охолодження,

$$\text{розглядається у координатах } (\Delta s_{пр} - T), \text{ де } \Delta s_{пр} = \int_0^{\epsilon} \frac{\epsilon \delta \epsilon}{T},$$

і у координатах $(\epsilon - T)$.

Графіки мають загальну координату - вісь температури. Графік процесу деформування у координатах $(\epsilon - T)$ має загальну вісь деформацій з залежністю $E_c/E_{300} = f(\epsilon)$, де E_c , E_{300} - модуль січний і модуль пружності за температури $T=300$ К. У координатах $(\epsilon - T)$ також подано температурну залежність деформацій, що обумовлюють після розвантаження рівень залишкових деформацій, $\epsilon_{50,002} = f(T)$. Припускається, що пластичні деформації локалізуються у невеликому об'єму зразка. Значення деформацій не залежать від характеру деформування.

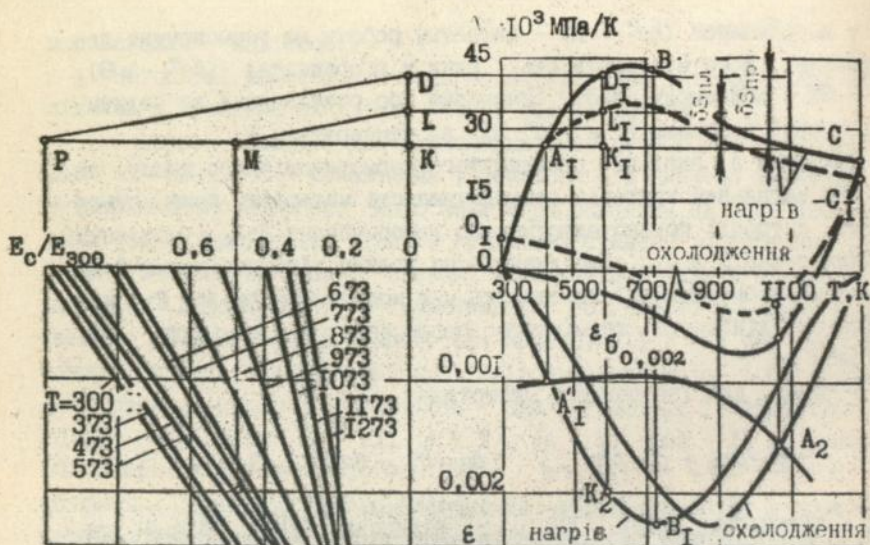


Рис. 1. Термодинамічний цикл при пружному $\Delta s_{пр} = f(T)$ (суцільна лінія) і пружно-пластичному $\Delta s_{пл} = f(T)$ (штрихова лінія) деформуванні матеріалу на поверхні циліндричного зразка зі сталі 1X18N9T. Межові умови теплобіну при нагріванні - оохолодженні $Bi=1$, $\Delta T = 1000$ K.

У напівциклі нагрівання відрізок OA_1 описує пружне деформування. Пластичне деформування у координатах $(\epsilon - T)$ починається у точці A_1 і, враховуючи висловлені припущення, продовжується у напрямку до точки B_1 . При цьому величина $\delta s_{пл}$ пропорційна $\delta s_{пр}$ і відношенню E_c/E_{300} при відповідній деформації і температурі. Для розгляданого поточного стану (точки K_2, D_1) вона визначається з подібності трикутників PDK і MLK , $\delta s_{пл}/\delta s_{пр} = LK/DK = MK/PK$. Зростання пластичних деформацій закінчується за стану, для якого різниця між пружно-пластичними деформаціями і залежністю $\epsilon_{0,002} = f(T)$ є максимальною. Потім з підвищенням температури відбувається розвантажування. Кінцеве значення приросту ентропії у напівциклі нагрівання визначається алгебричним підсумовуванням поточних значень і відповідає ординаті точки C_1 , а також одночас-

но дорівнює початковому значенню приросту ентропії у напівциклі охолодження. В цьому випадку з урахуванням залишкових напружень у напівциклі нагрівання початку пластичного деформування у напівциклі охолодження відповідає ордината точки A_2 . Відрізок OO_1 являє собою приріст ентропії у циклі за рахунок пластичного деформування. Його величина кількісно визначає накопичення пошкоджень при неізотермічному деформуванні.

У третьому розділі подано встановлені фундаментальні залежності між пружними, міцністними, деформаційними і теплофізичними характеристиками матеріалів, загальні і окремі умови термодинамічної сталості за неізотермічного деформування і руйнування. Одержані результати дали можливість зробити фізичне і феноменологічне обґрунтування запропонованих рівнянь граничних станів.

Як відомо, для визначення в процесі деформування змінення параметрів і функцій стану необхідні знання різних характеристик матеріалу, що дають змогу кількісно оцінити його термодинамічний стан. Аналіз енергетичного стану кристалічної ґратки твердих тіл засвідчує про зв'язок між модулем пружності E , коефіцієнтами Пуасона μ , лінійного розширення α , питомими теплоємностями за сталої тиску c_p і об'єму c_v

$$c_p - c_v = E\alpha^2 T / (1 - 2\mu).$$

Використовуючи малопараметричний аналіз цього співвідношення, виявлено, що при відсутності у матеріалі структурних і фазових перетворень між температурними коефіцієнтами модуля пружності m_E , коефіцієнтів Пуасона m_μ і лінійного розширення m_α має місце залежність $m_E + 2m_\mu - m_\alpha = 0$, при наявності структурних перетворень $m_{jE} + 2m_{j\mu} - m_{j\alpha} = 0$, де відповідні факторні коефіцієнти враховують зміну модуля пружності m_{jE} , коефіцієнтів Пуасона $m_{j\mu}$ і лінійного розширення $m_{j\alpha}$. Наслідком цього є виконання умов

$$E\alpha^2 / (1 - 2\mu) = \text{const.} \quad \text{і} \quad E\alpha = \text{const.}$$

Ці умови спрощують як розрахунки напруженого стану зразка або деталі, так і вибір безрозмірних критеріїв граничних станів. Наприклад, сталість добутку $E\alpha$ виявлено для конструкційних матеріалів ЗИ 607, ЗИ 787, ЗИ 826, W, Mo, Cu, Ti, Ta, ЖСВУ, ЖСЗ3 і ін. при змінненні температури $300 \text{ K} < T < 1000 \text{ K}$; для сталі 40X

при пластичному деформуванні до рівня $\epsilon = 0,08$; для α -заліза при його легуванні M_0 , C_0 . Після узагальнення довідкових даних також виявлено, що для різних хімічних елементів та їх сполук відношення $E\alpha/(1-2\mu)$ зв'язано з атомною масою A залежністю

$$E\alpha V/(1-2\mu) = C_* A^{0,25},$$

де V - атомний об'єм, C_* - стала. Це дозволило зробити висновок про зв'язок з атомною масою не тільки хімічних, а також і фізичних властивостей і можливість прогнозування характеристик пружності нових перспективних конструкційних матеріалів.

Далі дослідження були сконцентровані на пошуку співвідношень між характеристиками граничних станів і теплофізичними характеристиками. З метою виявлення при руйнуванні загальних причинно-наслідкових зв'язків до уваги брали змінення сукупності термодинамічних функцій стану при плавленні - тобто при руйнуванні, що має місце для всіх твердих тіл. Для різних хімічних елементів, солей, оксидів, карбидів, нітридів з використанням властивостей π - теореми теорії розмірностей аналізувалось змінення відносних величин:

$$\text{відношення } Q_1^* = \frac{Q_{пл}}{0} \int_0^{T_{пл}} c_p dT \text{ і добутку } \Delta V_T = 3 \int_0^{T_{пл}} \alpha dT,$$

де $Q_{пл}$ і $T_{пл}$ - теплота і температура плавлення речовини.

Залежності $Q_1^* = f(\Delta V_T)$ спостерігались у вигляді двох статистичних сукупностей, що апроксимовані рівнянням

$$Q_1^* \Delta V_T = C. \quad (1)$$

де C - стала (для матеріалів з ковалентним, або металевим зв'язком $C=0,024$, для матеріалів з йонним зв'язком $C=0,075$). Взявши до уваги висновки теорій теплоємності Енштейна, Дебая, теорій теплового розширення Фермі, Френкеля і записавши роботу руйнування при плавленні у вигляді добутку теоретичної міцності $b_{теор}$ на міжатомну відстань, встановлено фізичний сенс сталої C . Стала C дорівнює $C=b_{теор}/\epsilon E$. Її значення задовільно збігається зі значеннями відношення $b_{теор}/2E$, які розраховувались за різними моделями твердих тіл. Таким чином,

$$\frac{T_{\text{пл}}}{0} \frac{T_{\text{пл}}}{0} (Q_{\text{пл}}/\int c_p dT) \int \alpha dT \approx b_{\text{теор}}/2E. \quad (2)$$

Залежність (2) у загальному відносному вигляді визначає зв'язок між параметрами і функціями стану при руйнуванні і є фундаментальним співвідношенням. З цього співвідношення для групи або класу матеріалів, як окремі випадки, випливають залежності Ліндемана ($\Delta V_T = \text{const}$), Річардса ($S_{\text{пл}} = Q_{\text{пл}}/T_{\text{пл}} = \text{const}$), Грюнайзена ($\alpha/c_p = \text{const}$), умова міцності Скубічевського b_0 , $b_0 = (GE)/(3G-E)$, "універсальна стала руйнування" Іванової Δ_0 , $\Delta_0 = Q_1 (G/E)$, де G - модуль зсуву. Для одноразового статичного навантажування залежність (2) конкретизується у вигляді

$$\frac{T}{0} \frac{T}{0} (W_{\text{ро}}/\int c_p dT) \int \alpha dT^m = b_B/(2E(1-\psi)), \quad (3)$$

де $W_{\text{ро}}$ - робота одноразового пружно-пластичного деформування за температури T , b_B - границя міцності матеріалу, ψ - поперечне звуження зразка за розриву, m - показник ступеня, залежний від температури (рис. 2).

Потім на основі отриманих результатів сформульовано умови термодинамічної стійкості за неізотермічного деформування матеріалів. За неізотермічного деформування аналізували нерівність $[\Delta^2 g(T, b)]_k < 0$, де $\Delta^2 g$ - варіація функції Гіббса другого порядку. Розвинувши нерівність у ряд Маклорена, виключивши при цьому члени третього і вищих порядків з урахуванням значень частинних похідних $\partial^2 g/\partial b^2 = -((1-2\mu)/E)\epsilon$, $\partial^2 g/(\partial b \partial T) = \alpha\epsilon$, $\partial^2 g/\partial T^2 = c_p T$ в остаточному вигляді подана залежність

$$((1-2\mu)/E)\epsilon(\Delta b)^2 - 2\epsilon(\Delta b)(\Delta T) + ((c_p - c_v)/T)(\Delta T)^2 + (c_v/T)(\Delta T)^2 > 0,$$

справедливість якої має місце при $(1-2\mu)/E > 0$, $c_p > c_v$, $c_v > 0$. Тобто термодинамічна система за неізотермічного деформування буде стійкою в тому випадку, якщо виконуються умови механічної та термічної стійкості. При руйнуванні аналізували нерівність $[\Delta^2 h(s)]_b > 0$, де $\Delta^2 h$ - варіація ентальпії другого порядку. З

цієї нерівності постає умова $(\partial^2 h / \partial s^2) \delta = (\partial T / \partial s) \delta > 0$. З урахуванням рівнянь (2) і (3) у вигляді

$$S_{пл}(T_{пл}\alpha) = (Q_{пл} / T_{пл} C_p) (T_{пл}\alpha) = \text{const}, \quad s_{po}(T\alpha)^m = (W_{po} / T C_p) (T\alpha)^m = \text{const}$$

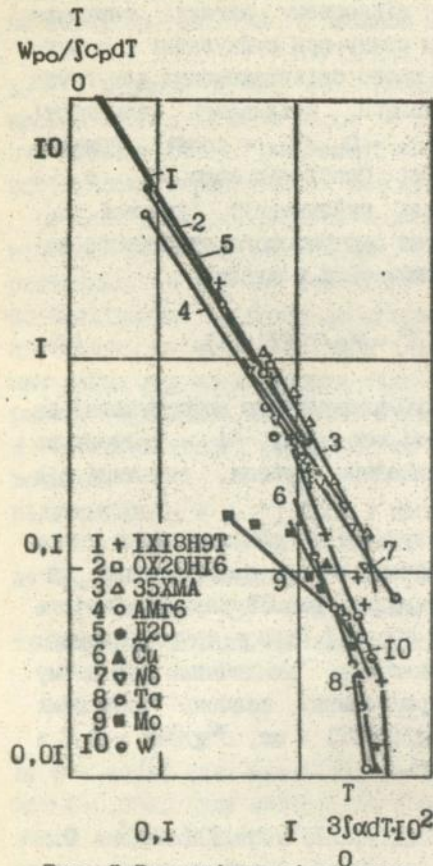


Рис. 2 Залежність відношення $\frac{W_{po}}{\int C_p dT}$ від величини $3 \int \alpha dT \cdot 10^2$ для різних конструкційних матеріалів.

одержана нерівність $(\partial s / \partial T) \delta < 0$, яка задовольняє умові рівноваги термодинамічної системи і не задовольняє умові її термодинамічної стійкості. Отже, запропоновані рівняння граничних станів описують рівноважний несталый процес у матеріалі за його плавлення або одноразового навантажування.

В четвертому розділі викладено загальні підходи до моделювання необхідних неусталених термопружних станів матеріалу і узагальнення результатів експериментальних досліджень граничних станів. Ці підходи базувались на положеннях теорій подібності та аналізу розмірностей. Використавши лінійні перетворення диференціальних рівнянь термодинаміки, були одержані інваріанти стану: Ts/u , $\beta\epsilon/u$, $\Phi_1\Phi_1/u$, $\mu_k n_k/u$, $\beta\epsilon/Ts$, $\Phi_1\Phi_1/Ts$, $\mu_k n_k/Ts$, f/Ts , g/Ts , h/Ts , $\beta\epsilon/g$, $\beta\epsilon/f$, $\beta\epsilon/h$, де u , f , g , h - густина внутрішньої енергії, функції Гельмгольца, функції Гіббса, ентальпії, Φ_1 , Φ_1 - потенціал

і шлях роботи в і - тому фізичному полі. Ці інваріанти визначають термодинамічну подібність теплових, механічних, хімічних та інших процесів і встановлюють співвідношення енергій різної природи. Аналогічні перетворення були виконані стосовно рівнянь перенесення (енерго-, тепло-, електропровідності, дифузії, фільтрації, нейтроноперенесення). Їх аналіз дав можливість узагальнити теоретичні і експериментальні дані окремих розв'язків межових задач перенесення і використати результати конкретних дослідів і розрахунків при вивченні стану матеріалу у фізичних полях.

Для формулювання і встановлення загальних залежностей, які описують процес руйнування групи або класу матеріалів, запропоновано узагальнені відносні параметри термодинамічного стану і граничних характеристик. Вони витікають з отриманих інваріантів теплового, напружено-деформованого станів, межових умов навантажування або аналізу розчірностей граничних характеристик. Зокрема, механічний стан відображають параметри - δ/E , $\delta(1-\mu)/E$, δ_{-1}/E , $\delta_{пт}/E$, δ_B/E , W_{p0}/E , ψ , $E\alpha/c_p$, $\delta/c_p T$, $W_{p0}/c_p T$ та ін.; тепловий - T/T_0 , $(T-T_0)/(T_c-T_0)$, $T/(T_c-T_0)$, αT , $T/T_{пл}$, at/l^2 , $\alpha^* l/\lambda$, $q/(\lambda(T_c-T_0))$ та ін.; термопружний - $\delta/E\alpha T_0$, $\delta(1-\mu)/(E\alpha(T_c-T_0))$ та ін.; час механічного навантажування - tE/ap , $tER_{\theta}c_{\theta}/\rho$, $tE/D_{др}$; фізико-хімічні перетворення - $Q_{пл}/c_p T_{пл}$, $Q_{\theta}/c_p T_{\theta}$, $\Delta V_{\theta}/T_{\theta}\alpha$; стан тіл з дефектами - $(\delta\alpha/\lambda)(\varepsilon F^*/\rho)^{1/2}$, $(\delta/a)(F^*/E\rho)^{1/2}$, $(\delta D_{д})(F^*/E\rho)^{1/2}$, $(\delta R_{\theta}c_{\theta})(F^*/E\rho)^{1/2}$, $F^{*1/2}(kE\alpha)^{1/3}$; стан тіл, коли змінюється маса - $\Delta m E^{3/2}/(\rho^{5/2} a^3)$, де δ_{-1} , $\delta_{пт}$ - границі витривалості і текучості; T_0 - початкова температура тіла, T_c - температура середовища; a , λ , $D_{д}$, R_{θ} , c_{θ} , ρ - температуро-, теплопровідність, концентраційна провідність, електричний опір, ємність, густина, l - характерний розмір тіла, α^* - коефіцієнт тепловіддачі, q - питомий тепловий потік, Q_{θ} , T_{θ} , ΔV_{θ} - теплота, температура і змінення відносного об'єму при фізико-хімічних перетвореннях, F^* - площа дефекту, k - стала Вольфмана Δm - змінення маси тіла. Параметри конкретизували зв'язки між механічними і фізичними характеристиками, що дало змогу з'ясувати вплив на довговічність матеріалу, як модуля пружності, коефіцієнта лінійного розширення, їх добутку, так і температури-

тепло-, масо-, електропровідності. Це підтвердилось при вивченні швидкості зростання тріщини термічної втоми в зразках з сталей 16ГНМ, 15Х1М1Ф, 12Х1МФ, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9, ХНЗБВТ, 22К та ін., які відрізнялися значеннями E , α , λ .

За допомогою узагальнених параметрів зроблено співставлення можливості матеріалів чинити опір статичним і циклічним механічним, термічним та іншим навантаженням. Однаковими матеріалами вважались ті, у яких аналогічні безрозмірні граничні характеристики мали однакові чисельні значення, що спостерігалось нечасто. Співставлення здійснювалось за однакових механічних і термічних умов навантажувань $\delta/E = idem$, $\alpha T = idem$, $tE/\sigma_p = idem$. Наприклад, значенню відносної температури $\alpha T = 0,01$ відповідала температура випробувань: для Mg - 530 K, Al - 540 K, Fe - 830 K, 1Х19Н9Т - 880 K, V - 1080 K, а відносному часу навантажування $tE/\sigma_p = 5 \cdot 10^{12}$ - час випробувань: для W - 1 сек, 1Х19Н9Т - 2,5 сек, Fe - 3,2 сек, Al - 10 сек. Таким чином, інформацію про закономірність руйнування легкоплавких матеріалів за невисоких температур при дотриманні термодинамічної подібності та автотомельності процесу можна використовувати для прогнозування граничних характеристик жароміцних і тугоплавких матеріалів за високих температур. Оброблення результатів експериментального дослідження статичної і циклічної міцності великої кількості конструкційних матеріалів у координатах $((\delta_B/E) - \alpha T)$, $((\delta_{пТ}/E) - \alpha T)$, $(\psi - \alpha T)$, $((\delta_{-1}/E) - \alpha T)$ дало змогу встановити емпіричні співвідношення

$$\frac{\partial \psi}{\partial (\alpha T)} = 1000 \left(\frac{\partial \delta_B/E}{\partial (\alpha T)} + \frac{\partial \delta_{пТ}/E}{\partial (\alpha T)} \right) \text{ і } \frac{\delta_{-1}}{E} = K_{\psi} \frac{\delta_B - \delta_{пТ}}{E},$$

де K_{ψ} - незалежний від температури коефіцієнт. Похибка прогнозування δ_B , $\delta_{пТ}$, ψ для сплаву ЗИ826 в інтервалі робочих температур дорівнювала 4%, для сплаву ЖС6КП - 8%, похибка прогнозування δ_{-1} для сплавів ЗИ826, ЖС6КП, ЗИ698ВД, ЗИ202, ВТ9 - 5%.

В залежності від значень відносних граничних характеристик матеріалів, які зв'язані з їх структурою, механічною і термічною обробкою, впливом фізичних полів, матеріали класифіковано на

міцні, пластичні, зміцнівкі, механічно стабільні та ін. Такий розподіл для матеріалу, що вивчається, дозволив зробити попередній вибір аргументів і виду окремих безрозмірних рівнянь граничних станів.

У п'ятому розділі представлено результати моделювання нерівноважних процесів неізотермічного деформування конструкційних матеріалів енергетичного обладнання.

Емпіричний характер отриманих рівнянь граничних станів обумовив вивчення закономірностей руйнування зразків в умовах, що максимально наближені до експлуатаційних. Для цього при підготовці і проведенні багатofакторних експериментальних досліджень використовувався метод фізичного моделювання необхідних неусталених термодинамічних станів.

Початковою інформацією були результати розв'язку рівнянь нестационарної теплопровідності і термопружності для напівобмеженого тіла, пластини, циліндру суцільного, порожнистого осесиметричного, порожнистого ексцентричного за стаціонарних і нестационарних, однорідних і неоднорідних межових умов теплообміну. При розв'язанні рівнянь застосовувались методи: аналітичні, напіваналітичні, скінченних різниць, скінченних елементів - як такі, що забезпечували для кожної задачі необхідну точність отримуваних результатів. Розв'язки подані як залежності відносних температур $\theta = (T - T_0) / (T_c - T_0)$ і термічних напружень $\sigma^* = \sigma(1 - \mu) / (E\alpha(T_c - T_0))$ від безрозмірного часу $Fo = at / l^2$ за різних значень $Bi = \alpha l / \lambda$, $Ki = ql / (\lambda(T_c - T_0))$, $Pd = bl^2 / T_0$, $\Lambda_T = k^* l^2 / a$, де b - швидкість змінення температури, k^* - темп змінення температури або теплового потоку. Значення Bi , Ki , Pd , Λ_T , Fo змінювались у широких межах (на два-три порядки) і відповідали умовам теплового навантажування елементів енергетичних перетворювачів.

Виконані розрахунки показали, що у початковий період теплової дії до $Fo \approx 0,2$ розрахункові поля температур у зразку в одній і двовимірних задачах мало відрізняються і, таким чином, для визначення теплового стану зразка за неоднорідних граничних умов можна використати розв'язки локально-одновимірних задач нестационарної теплопровідності.

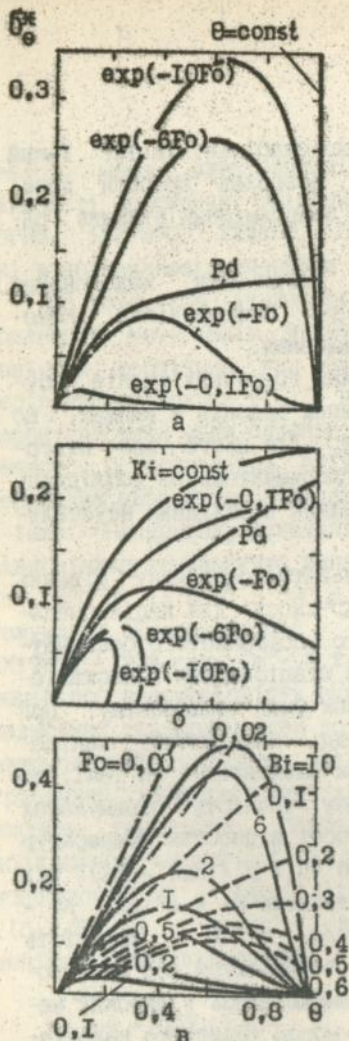


Рис. 3 Залежності між відносними коловими термічними напруженнями σ_e^* і відносною температурою θ на поверхні циліндра за граничних умов теплообміну I(a), II(б), III(в) роду.

Моделювання неусталених і неоднорідних теплових і термонапружених станів матеріалу масивних конструктивних елементів (корпусів реакторів і турбогенераторів, паропроводів, соплових вкладених реактивних двигунів, артилерійських стволів, валків прокатних станів, матриць і пуансонів горячого пресування та ін.) здійснюється за циклічних нагрівань вільних від зовнішніх сил зразків у вигляді пластин, суцільних або порожнистих циліндрів. Розв'язування основної задачі моделювання зводиться до розв'язку прямих і зворотних задач теплопровідності і термопружності. Враховуючи потребу збудження необхідного рівня термічних напружень σ^* , для матеріалу з відомими теплофізичними і механічними характеристиками вибирається закон змінення у часі межових умов теплообміну, їх характер та інтенсивність, що забезпечують збудження на поверхні зразка заданих рівнів температур θ (рис. 3). Після чого визначають розміри зразка, його початкову температуру T_0 , час теплового навантаження Fo , параметри рухомого робочого середовища (швидкість, в'язкість, температуру). Моделювання додаткових параметрів станів: градієнтів температур і термічних напружень, їх швидкостей, зміни

концентрації агресивних компонентів середовища - досягається за рахунок варіації лінійних розмірів зразка, хімічного складу теплоносія, при цьому важко забезпечити виконання умов $\sigma^* = idem$, $\theta = idem$, $K_1 = idem$, $P_d = idem$, $V_1 = idem$, $A_T = idem$, $F_o = idem$.

Звертається увага, що при зміні розмірів зразка змінюється час досягнення екстремальних термодинамічних станів. Виконання умови $V_1 = idem$ може бути досягнуто при різних швидкостях течії в'язкої рідини що, у свою чергу, може сприяти перебігу фізико-хімічних процесів на поверхні зразка і деталі з різними швидкостями.

Термонапружений стан тонкостінних конструкцій (корпусів літальних апаратів, камер згорання реактивних двигунів, оболонок тепловідділяючих елементів, жарових труб та охолоджуваних лопаток газових турбін та ін.) моделюється при нагріваннях порожнистих ексцентричних циліндричних або порожнистих еліптичних зразків.

Виконано чисельний експеримент за межових умов теплообміну, що мають місце при ламінарній і турбулентній поперечній обтічності циліндрів високотемпературним робочим середовищем. Аналіз результатів розрахунків показав, що у зразках з жароміщних сплавів (внутрішній діаметр $D_1 = 4...8$ мм, зовнішній - $D_2 = 12$ мм, мінімальна товщина стінки $\delta_{min} = 0,8$ мм) при їх нагріваннях газовим потоком ($\alpha^* = 500...1500$ Вт/м²К, $T_c = 300 \pm 1800$ К) і у охолоджуваних лопатках газових турбін за перехідних режимів роботи двигуна змінення у часі температур і термічних напружень тотожно. Варіювання внутрішнього діаметра зразка у інтервалі $4\text{мм} < D_1 < 8\text{мм}$ виявляє більш суттєвий вплив на температуру, ніж на значення максимальних термічних напружень, що дозволяє моделювати напружений стан за різних температур.

Здійснити моделювання різних рівнів напружень при обумовленому законі змінення у часі температур можна також при циклічних нагріваннях тонкостінних еліптичних зразків з масивною перегородкою. Змінення довжин осей еліпса n та m , товщини перегородки δ_n , її положення центру тяжіння x_c , кута нахилу β зводить до зміни максимальних термічних напружень σ_{max}^* . Зокрема, на основі результатів розрахунків теплового і термонапруженого станів тон-

костінного еліпсу за межових умов теплообміну, характерних для лопаток газових турбін, одержано регресійне рівняння

$$\begin{aligned} b^*_{\max} = & 0,168 + 0,114(x_1/m) + 0,07(x_2/m) + 0,03(\delta_n/\delta_{CT}) + \\ & + 0,954(n/m) + 0,432B_1 + 0,189(x_1/m)^2 - 0,19(x_1/m) \times \\ & \times (x_2/m) + 0,085(x_1/m)(\delta_n/\delta_{CT}) + 0,633(x_1/m)(n/m) - \\ & - 0,06(x_1/m)B_1 - 0,113(x_2/m)^2 + 0,295(x_2/m)(\delta_n/\delta_{CT}) - \\ & - 0,341(x_2/m)(n/m) - 0,232(x_2/m)B_1 - 0,024(\delta_n/\delta_{CT})^2 + \\ & + 0,408(\delta_n/\delta_{CT})(n/m) - 0,008(\delta_n/\delta_{CT})B_1 + 0,842(n/m)^2 - \\ & - 0,98(n/m)B_1 + 0,021B_1^2, \end{aligned}$$

де $b^*_{\max} = b_{\max} / (E\alpha(T_C - T_0))$, b_{\max} - максимальні термічні напруження у перерізі лопатки, x_1 , x_2 - координати середньої лінії перегородки, δ_{CT} - товщина стінки еліпса, $B_1 = \alpha^* \delta_{CT} / \lambda$. Згідно значущості у порядку зростання аргументи рівняння розташовуються у послідовності: (δ_n/δ_{CT}) , (x_1/m) , (x_2/m) , (n/m) , B_1 .

За жорстких обмежень на зміну розмірів, геометричної форми багатозв'язного тіла, умов навантажування керувати тепловим і термонапруженим станом можна, використовуючи теплоту фазових перетворень. Найявність в порожнині зразка або деталі легкоплавного металу може сприяти збільшенню або зменшенню рівня термічних напружень. За рахунок заповнення алюмінієм поздовжнього каналу охолоджуваної лопатки газової турбіни вдалося зменшити розмах термічних напружень на вхідній кромці на 30% (А.с. N1248358).

Розв'язки задач моделювання термодинамічного стану значно спрощуються, якщо використати запропоновані два методи оперативного оцінювання і безпосереднього контролювання поточного напруженого стану зразка. Перший метод базується на установлений у загальному вигляді емпіричній залежності між змінням температур і змінням термічних напружень

$$b^*/\theta = 1 - A_5/\theta_0 \exp(-B_5\theta_0), \quad (4)$$

де A_5 та B_5 - коефіцієнти, які мало залежать від характеру і рівня межових умов теплообміну. Мінімальна похибка залежності (4)

спостерігається на початковій стадії теплового навантажування. Саме на цій стадії напруження максимальні, що обґрунтовує використання залежності (4) при вивченні граничних станів малопластичних матеріалів. Другий метод базується на аналізі закономірностей змінення полів температур і термічних напружень у процесі нагрівання - охолодження. Встановлено, що у тілах простої форми, окрім регулярного режиму теплового стану, має місце регулярний режим термопружного стану. Це дозволяє записати алгоритм для визначення відносних осьових термічних напружень у вигляді

$$\sigma^*_{z} = \theta - \theta_1.$$

де θ_1 - середньоінтегральне значення температури зразка. Координати нейтральної лінії (тобто $\sigma^*=0$, $\theta=\theta_1$) у регулярному режимі не змінюються, а їх значення мало залежать від межових умов теплообміну. Вимірявши різницю між локальною θ і середньоінтегральною θ_1 температурами, можна з точністю до множника $E\alpha(T_c-T_0)/(1-\mu)$ визначити і проконтролювати значення термічних напружень безпосередньо під час проведення експериментальних досліджень. Похибка методу мінімальна за регулярного режиму при досягненні небезпечного стану у зразках з пластичних матеріалів.

Універсальність розглянутих методів моделювання нерівноважних термодинамічних станів полягає в можливості збудження необхідних станів у зразках з різних матеріалів за різних межових і початкових умов навантажування з урахуванням технологічних і експлуатаційних чинників.

У шостому розділі представлено термодинаміко-феноменологічні методи прогнозування граничних станів матеріалів в екстремальних умовах.

Формулювання єдиного критерію міцності з позицій термодинаміки, статистики та фізики, область використання якого поширювалась би на більшість умов навантажування конструкційних матеріалів, у даний час дискусійне і проблематичне.

У роботі висловлюється концепція, згідно з якою методологія прогнозування міцності і довговічності матеріалів у екстремальних умовах враховує: по-перше, всебічний аналіз змінення у процесі навантажування усіх термодинамічних параметрів та функцій стану;

по-друге, експериментальне дослідження і фізичну інтерпретацію руйнування зразків або моделей за неоднорідних і нерівноважних станів, включаючи зародження і розповсюдження тріщин, незворотну формозміну; по-третьє, широке використання методів теорії подібності та аналізу розмірностей для узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Рівняння (2), (3), які визначають загальну умову досягнення граничних станів, запишемо у відносному вигляді

$$\Delta S^*_p (\Delta \epsilon_T)^m = \Delta \epsilon_m / 2, \quad (5)$$

де $\Delta S^*_p = \Delta S_p / c_p$ - відносний приріст ентропії руйнування, $\Delta S_p = W_p / T$, W_p - робота, що витрачається на руйнування зразка, $\Delta \epsilon_T$ - об'ємна теплова деформація зразка при його нагріванні до температури випробувань T , $\Delta \epsilon_m$ - гранична механічна деформація, що відповідає чинному механізму деформування. Стосовно до досліджуваних матеріалів і умов навантажування конкретизація фундаментальних співвідношень (2), (3), (5) спрямована на розв'язки загальних і окремих задач прогнозування граничних станів. Для малопластичних матеріалів, визначивши роботу руйнування у вигляді $W_p = b_B^2 / 2E$, а граничну механічну деформацію $\Delta \epsilon_m = \Delta \epsilon_T / 3 = \alpha(T - T_0)$, де $(T - T_0)$ - різниця температур, що обумовлює руйнування абсолютно затисненого зразка, в залежності (5) впливають відомі критерії термостійкості

$$\begin{aligned} & b_B(1 - 2\mu) / (E(1 - \mu)), & b_B(1 - \mu) / E\alpha, \\ & b_B(1 - \mu) / E\alpha\lambda, & b_B\alpha(1 - \mu) / E\alpha. \end{aligned}$$

Для металів на основі аналізу кривих одноразового деформування і ривання (3) отримана узагальнена залежність границі текучості

$b_{0,2}$ від температури T

$$b_{0,2} = k_{*1} c_p (T_{пл}^2 / T) \quad \text{при} \quad T / T_{пл} < 0,5,$$

$$b_{0,2} = k_{*2} c_p (T_{пл}^4 / T^3) \quad \text{при} \quad T / T_{пл} > 0,5,$$

де k_{*1} , k_{*2} - емпіричні коефіцієнти. Умова міцності матеріалів при складному напруженому стані, як впливає в залежності (5), описує критерій, який у загальному випадку залежить від інтенсивності напружень b_1 . головних напружень b_1 , b_2 , границь міцності при розтягненні $b_{B,p}$ і стисканні $b_{B,c}$. Аналізуючи зміну початко-

вих характеристик $(W_p/\Delta\epsilon_m)_0$ та відповідних характеристик після фізико-хімічного впливу $(W_p/\Delta\epsilon_m)_1$, а саме відношення $(W_p/\Delta\epsilon_m)_0/(W_p/\Delta\epsilon_m)_1$, зроблено кількісний висновок про вплив температури випробувань, термічної, механічної, хімічної обробки, агресивного робочого середовища, швидкості навантажування, нейтронного опромінення, електричних та магнітних полів та ін. не атомодельність процесу деформування матеріалів. З залежності (5), як окремі випадки, також постають рівняння граничних станів статичної повзучості:

за великих рівнів напружень $W_{p,n} = \int_0^{\epsilon_p} b d\epsilon = \text{const}$, (рівняння Сосніна),

за невеликих рівнів напружень $W_{p,n} = \int_0^{\epsilon_p} \epsilon dt = \epsilon_p = \text{const}$, де ϵ_p -

деформація повзучості, що накопичена за час t_p , ϵ - швидкість повзучості. Визначивши за N_p циклів роботу пластичного деформування у вигляді $W_p = N_p \Delta\epsilon_n^2 E_y$ і порівнявши її з роботою за одноразового навантаження $W_{p,0} = (\ln(1-\psi)^{-1})^2 E_y / 2$, отримано рівняння малоциклової втоми - рівняння Коффіна-Менсона $\sqrt{N_p} \Delta\epsilon_n = 1/\sqrt{2} \ln(1-\psi)^{-1}$, де $\Delta\epsilon_n$ - розмах пластичних деформацій у циклі, E_y - модуль зміцнення. Виділивши з сумарної роботи багатоциклового пружно-пластичного деформування "небезпечну" складову і порівнявши її з теплою плавлення, доведено, що рівняння граничного стану (5) може бути перетворено у рівняння баг.тоциклової втоми - рівняння Іванової, Троценка. При цьому відзначається можливість зв'язку між характеристиками мало-, багатоциклової втоми і характеристиками короткочасної міцності. Залежність (5), враховуючи ймовірний незалежний вплив різних механізмів деформування на інтегральне розміцнення матеріалу, дозволила дати фізичну інтерпретацію і феноменологічну підставу лінійним та нелінійним гіпотезам підсумовування пошкоджень. Сфера застосування того чи іншого рівняння граничного стану для групи або класу матеріалів визначається наявністю подібності деформування у вивчаному діапазоні зміни параметрів стану.

Узагальненням і подальшим розвитком отриманих рівнянь граничних станів і відомих рівнянь стану твердих деформівних тіл

можна вважати запропоновану залежність, що зв'язує у загальному вигляді змінення різних термодинамічних параметрів, функцій стану, довговічність N_p та умову руйнування матеріалу за циклічної термосилової дії у хімічно і фізично активних середовищах

$$N_p \Delta S_p^* (\Delta \epsilon_T) \prod_{i=1}^m \left(1 + (Q_{\Phi} / (T_{\Phi} C_p)) \Delta V_{\Phi} \right)_i = C_* \quad (6)$$

або

$$N_p \Delta S_p^* (\Delta \epsilon_T) \prod_{i=1}^{m'} \exp((k_i Q_{\Phi} / (T_{\Phi} C_p)) (l_i \Delta V_T))_i = C_*^* \quad (7)$$

де γ , γ' , m , m' , l_1 , l_1' , k_1 , k_1' , C_* , C_*^* - емпіричні коефіцієнти. Залежності (6) та (7) задовольняють рівнянню (5) як початковій умові.

Результати досліджень* довговічності сталей 1X18H9T, 25ХМА, ХНВ0Т6Ю при циклічних нагріваннях масивних зразків високотемпературним газовим потоком, у якому присутні сполуки сірки, солей морської води підтвердили у лінійній постановці справедливості співвідношення (6).

Рівняння (5), (6), (7), відображаючи енергетичний характер критеріїв граничних станів, не враховують вплив на довговічність матеріалу технологічних, конструктивних, експлуатаційних чинників: неусталених і неоднорідних напружених станів, термомеханічної обробки, стану поверхневого шару та ін. Урахувати ці чинники і, таким чином, розв'язати декілька прикладних задач прогнозування довговічності дозволили дослідження умов руйнування зразків, стани яких моделювали термодинамічні стани матеріалу у найбільш напружених зонах конструктивних елементів.

Моделювання неусталених полів температур і термічних напружень, що мали місце у суцільних лопатках газових турбін і енергетичних перетворювачах, здійснювалось за циклічних нагрівань

* Експериментальні дослідження виконували: Г.М.Третьяченко, Л.В.Кравчук, В.О.Конев, Е.П.Косигін, В.В.Литвін.

близькозвуковим газовим потоком внутрішньої поверхні товстостінних порожнистих циліндрів різної довжини. Зразки виготовлялись з жаростійких сталей: маломіцної 1X18H9T ($\psi=0,53$, $b_B/E=3,15 \cdot 10^{-3}$, $b_{0,2}/b_B=0,412$) і високоміцних ЗИ 787 РД ($\psi=0,40$, $b_B/E=6,01 \cdot 10^{-3}$, $b_{0,2}/b_B=0,62$), сталі М* ($\psi=0,60$, $b_B/E=6,4 \cdot 10^{-3}$, $b_{0,2}/b_B=0,913$), а також з керамічного матеріалу $Si_3N_4(59,1\%) + SiC(39,4\%) + MgO(1,47\%) - b_B/E=0,8 \cdot 10^{-3}$.

План експерименту передбачав варіювання у циклах навантажувальних рівнів температур, пружних і пружно-пластичних напружень і деформацій, їх градієнтів і швидкостей, відношень головних напружень. Аналіз експериментальних результатів показав, що для жаростійких сталей статистично значуща відмінність термоциклічної довговічності зразків у діапазоні змінення параметрів станів, характерних для експлуатації розглянутих конструктивних елементів, спостерігається при варіюванні розмаху пружно-пластичних деформацій у циклі, їх градієнтів, відношень головних напружень. За однорідного одноосного напруженого стану залежність довговічності N_{PT} від розмаху пружно-пластичних деформацій $\Delta \epsilon_{п.п}$ у циклі, вра-

ховуючи рівняння (5), (6), має вигляд $N_{PT} = C_{*T} \Delta \epsilon_{п.п}^{\gamma_T}$, де C_{*T} , γ_T - коефіцієнти. Було зроблено припущення, що вигляд залежності залишається без зміни за неоднорідного напруженого стані, якщо як аргумент взяти деформацію $\Delta \epsilon_{пр} = \Delta \epsilon_{п.п} \exp(A_* \text{grad } \Delta \epsilon_{п.п})$, де A_* - коефіцієнт. Експерименти підтвердили справедливість такого припущення при неоднорідному одно- і двохосному напруженому стані

$$N_{PT} = C_{*T} (\Delta \epsilon_{п.п})^{\gamma_T} \exp(A_* \text{grad } \Delta \epsilon_{п.п}),$$

де $\Delta \epsilon_{п.п}$ - розмах інтенсивності пружно-пластичних деформацій у циклі. Таким чином одержано рівняння термічної втоми жароміцних сталей, що зв'язує другий інваріант тензору пружно-пластичних деформацій та його градієнт з кількістю тепловмін до руйнування.

*Сталь М - умовне, запропоноване у роботі позначення хромо-нікелемарганцевої сталі.

Використання запропонованого рівняння для прогнозування термоциклічної довговічності лопаток зі сплаву ЗН 787 ВД засвідчило про задовільну відповідність розрахунків і експериментальних результатів. Експериментальні значення довговічності розташовувались у 95%-ому довірчому інтервалі лінії регресії.

Дослідження закономірностей руйнування керамічних лопаток при теплозімінах показали, що термоциклічна довговічність N_{PT} лопаток у діапазоні змінення параметрів станів, що мали місце під час роботи двигуна у аварійних режимах, залежить від рівня максимальних термічних напружень σ_{max} та границі міцності матеріалу σ_B

$$N_{PT} = 24 (\sigma_{max}/\sigma_B)^{-3,64}$$

Умови навантажування зразків забезпечували моделювання станів лопаток у режимі скидання потужності двигуна, коли на вихідній кромці лопатки виникали великі напруження розтягу $\sigma/\sigma_B = 0,6 \dots 0,9$. Аналіз неусталених теплових і термонапружених станів лопаток і зразків дав підставу зробити висновок, що досягти повної збіжності усіх параметрів стану за рахунок зміни форми і розмірів зразків, межових умов теплообміну неможливо, хоча неоднаковість не істотна. Зіставлення довговічностей лопаток і зразків показало, що за напружень $\sigma < 70$ МПа ($\sigma/\sigma_B < 0,8$), $N_{PT} > 300$ циклів різниця середніх логарифмів довговічностей статистично незначуща, а при $\sigma > 70$ МПа - статистично значуща. Отже, встановлена межа адекватного оцінювання термоциклічної довговічності керамічних лопаток за допомогою рівняння термічної втоми, що отримано на підставі результатів випробувань геометрично неподібних моделей у високотемпературному швидкому газовому потоці.

Була також розв'язана задача прогнозування термоциклічної довговічності матеріалу вихлопних систем літакових газотурбінних двигунів. Основним конструктивним елементом таких систем є підкріплені оболонки, що зазнають циклічних теплових і механічних навантажуваль. Досвід експлуатації оболонок зі сталі 12Х18Н10Т показав, що тріщини термічної втоми з'являються після нетривалого часу, $N_{PT} = 30 \dots 300$ циклів. Технічно і економічно виправданим

методом підвищення довговічності вихлопних систем була заміна оболонки зі сталі 12Х18Н9Т на оболонки з титанового сплаву ОТ4-1, що обумовило необхідність прогнозування їх довговічності ще на стадії проектування. Методика розрахунку передбачала аналіз кривих термічної втоми різних матеріалів (жаростійких хромоникелевих та інструментальних сталей, кольорових сплавів і т.д.) і подальший пошук матеріалу, у якого відносні характеристики міцності і деформативності співпадали б з відповідними відносними характеристиками сплаву ОТ4-1. Таким матеріалом виявилась бронза БраЖ9. Матеріали за температури $T=293$ К мали такі характеристики: ОТ4-1 - $E = 1,1 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha = 8,1 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} , $\sigma_B/E = 6,3 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{0,2}/E = 5,2 \cdot 10^{-3}$, $\psi = 0,35$; БраЖ9 - $E = 1,1 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha = 16,8 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} , $\sigma_B/E = 6,25 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{0,2}/E = 2,86 \cdot 10^{-3}$, $\psi = 0,35$. Це дало можливість прийняти параметри кривих термічної втоми сплаву ОТ4-1 і малоциклової ізотермічної втоми бронзи БраЖ9 однаковими. Для оболонки з сплаву ОТ4-1 порівняння розрахункових значень довговічності $N_{p.p.}$ та експериментальних $N_{p.e.}$ показало їх задовільну відповідність, $N_{p.p.} = 4200$ циклів, $N_{p.e.} = 2500 \dots 4000$ циклів.

Розглянуті приклади прогнозування граничних станів матеріалів дозволили зробити висновок щодо перспективності розробленого термодинаміко-феноменологічного підходу рішення задач міцності і довговічності матеріалів в екстремальних умовах.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

На основі загальних положень термодинаміки деформування твердих тіл, методів моделювання станів матеріалів у фізичних полях, методів теорій подібності і аналізу розмірностей закладені підвалени розв'язки проблеми обґрунтування теоретико-експериментальних методів прогнозування довговічності конструкційних матеріалів в екстремальних термосилових умовах.

Розроблений науковий підхід передбачає всебічний аналіз змінення сукупності визначальних термодинамічних параметрів і функцій стану в процесі навантажування з якісною оцінкою небезпечного стану, постановку і проведення фізичного експерименту, за якого у

зразу забезпечуються протікання заданих механічних, теплофізичних, дифузійних і хімічних процесів, використання інваріантів і критеріїв подібності термодинамічних станів для обґрунтування рівнянь граничних станів. Підхід базується на встановлених автором фундаментальних співвідношеннях між різними фізичними характеристиками матеріалів, що дозволяє розв'язувати нагальні задачі прогнозування довговічності матеріалів енергетичного обладнання.

На основі проведених досліджень сформульовано наукові і практичні висновки.

1. Показано і експериментально підтверджено, що загальні умови досягнення граничних станів при руйнуванні матеріалів можуть базуватись на аналізі умов порушення стійкості термодинамічної системи. Ці умови конкретизовані для конструкційних матеріалів за різних механізмів руйнування: плавлення, одноразового і багаторазового циклічного навантажування, повзучості.

2. Встановлено фундаментальні співвідношення між модулем пружності, коефіцієнтами Пуасона і термічного розширення, роботою пружно-пластичного деформування, теплоємністю, теплотою і температурою плавлення, наслідком яких є відомі емпіричні залежності Ліндемана, Трутона, Річардса, Скубічевського, Іванової. Установлені співвідношення надали можливість кількісно і якісно визначити загальні причинно-наслідкові зв'язки між термодинамічними параметрами і функціями стану за неізотермічного деформування і запропонувати найпростіші критерії граничних станів за термосилового навантажування.

3. На основі лінійних перетворень рівнянь термодинаміки встановлені критерії термодинамічної подібності механічних, теплових і хімічних процесів, що дозволило представити розв'язки задач прогнозування граничних станів матеріалів в екстремальних умовах у вигляді безрозмірних критеріальних рівнянь.

Визначено умови автотодельності процесу руйнування, структуру, форму запису критеріальних рівнянь граничних станів, що зв'язують між собою поточні і граничні значення параметрів стану за механічного і теплового навантажування з урахуванням дії на матеріал фізичних полів різної природи та хімічної взаємодії по-

верхневих шарів матеріалу з робочим середовищем.

Одержано рівняння граничних станів, що зв'язує змінення відносної ентропії пружно-пластичного деформування, змінення відносного об'єму при нагріванні з граничним значенням деформації відповідно чинному механізму руйнування.

4. На основі аналізу розмірностей основних параметрів, що характеризують процес деформування матеріалів у фізичних полях, запропоновано систему критеріїв подібності і безрозмірних параметрів, які дозволяють описати у відносних координатах процес неізотермічного навантажування і деформування різних конструкційних матеріалів.

Аналіз рівнянь тепло- і масоперенесення, межових і початкових умов дозволив запропонувати і узагальнити критерії подібності для процесів передачі теплоти, електропровідності, дифузії, нейтронперенесення і фільтрації стосовно до задачі вивчення механічних властивостей матеріалів. Враховуючи тотожні записи рівнянь перенесення, є підстави для використання відомих закономірностей одного явища для прогнозування характеристик іншого явища, подібного до того, що вивчається.

5. Розроблена методика моделювання неусталених неоднорідних станів матеріалу конструктивних елементів енергетичного обладнання. Методика дозволяє в геометрично неподібних моделях (зразках), що циклічно нагріваються і охолоджуються, збуджувати в заданий час задані рівні термодинамічних параметрів і функцій стану. Варіювання рівнів температур, компонент термічних деформацій і напружень, значень термодинамічних функцій стану, їх градієнтів і швидкостей здійснюється за рахунок змінення початкових і межових умов теплообміну, фізичних і хімічних параметрів робочого середовища, геометричної форми і розмірів зразків.

6. З метою вибору форми, розмірів і умов випробовувань зразків на термоудар і термічну втому для напівобмеженого тіла, пластини, циліндра (суцільного, порожнистих концентричного, ексцентричного і еліптичного) побудовані численні графіки нестационарних полів температур і термічних напружень за різних постійних і змінних у часі межових умов теплообміну. Розв'язки рівнянь неста-

ціонарної теплопровідності і термoprужності здійснювались сучасними аналітичними і чисельними методами. Графіки представлені в безрозмірному вигляді, що дає змогу їх використовувати також при вивченні процесів дифузії, електронно- і масоперенесення.

7. Для оцінки незворотних змін у твердому тілі за найбільш загальних умов термосилового навантажування проаналізовано термодинамічний цикл, що відображує змінення між параметрами (температурою, пружними і пружно-пластичними деформаціями і напруженнями) та функціями стану (ентропією, ентальпією, вільною енергією, потенціалом Гіббса). Розроблено методику призначення межових умов теплообміну та режимів навантажування зразків за випробувань на термічну втому.

8. Запропоновано графо-аналітичну методику визначення приросту ентропії при нагріваннях - охолодженнях зразків. Методика ґрунтується на використанні результатів розрахунку термoprужного стану зразків і залежності січних модулів пружності від температури і деформації.

9. Для прогнозування термоциклічної довговічності соплових лопаток газових турбін, елементів енергетичних перетворювачів запропоновано рівняння термічної втоми, яке зв'язує розмах пружно-пластичних деформацій і їх градієнтів з кількістю циклів до появи тріщини певної довжини. Ці рівняння розроблено для жаростійких, жароміцних сплавів і сталей. Встановлено, що в діапазоні відношень головних напружень $1 < \sigma_1/\sigma_2 < \infty$ узагальненим параметром напруженого стану може бути розмах інтенсивності пружно-пластичних деформацій у циклі $\Delta \epsilon_1$ п.п. Рівняння експериментально підтверджено випробуваннями на термічну втому масивних товстостінних циліндричних зразків різної довжини.

10. Запропоновано рівняння термічної втоми для розрахунків довговічності соплових керамічних лопаток газових турбін на основі нітриду і карбиду силіція. Рівняння зв'язує кількість тепловміни до руйнування з максимальними напруженнями у циклі і границею міцності кераміки. Визначено границі можливого використання методів фізичного моделювання термoprужних станів лопаток газових турбін і методів прогнозування їх термоциклічної довговічності.

Ці границі установлені на підставі аналізу умов руйнування порожнистих циліндричних зразків, що випробовуються за циклічних нагрівань.

11. Розроблено метод прогнозування термоциклічної втоми матеріалів вихлопних систем авіаційних газотурбінних двигунів. Метод базується на запропонованій систематизації механічних і теплофізичних властивостей сучасних конструкційних матеріалів, аналізі їх кривих втоми, виборі матеріалів, що мають однакові відносні значення граничних характеристик.

Представлені у дисертації результати теоретичних і експериментальних досліджень використовувались для оцінювання довговічності термонапружених елементів конструкцій, що розроблялись і створювались у конструкторських бюро і установах:

ЛНВО ім. В.Я.Клімова, КВ "Машиностроение",

ВНДІ експериментальної фізики, НДІ двигунів,

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича АН України,

Київський механічний завод ім. О.К.Антонова та ін.

і дали економічний ефект близько 1 млн. руб. за курсом 1990 р.

Зміст роботи відображено у слідуючих публікаціях.

1. А.с. N 1248358-А(СССР). Лопатка газовой турбины / Карпинос В.С., Самулеев В.В.
2. А.с. N 672541 (СССР). Установка для исследования термостойкости объектов в газовом потоке / Карпинос В.С., Третьяченко Г.Н.
3. Барило В.Г., Карпинос В.С., Третьяченко Г.Н. Теория экстремальных состояний материалов при циклических нагружениях / В кн. "VII Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике" - М.: - 1991. -С.36.
4. Карпинос В.С. Систематизация механических характеристик при исследовании прочности материалов в экстремальных условиях / В кн. "Синергетика. Новые технологии получения и свойства

- металлических материалов". Часть II. - М.: - 1991. - С.173.
5. Карпинос В.С. Теоретико-экспериментальный метод диагностики термонапряженного состояния лопаток газовых турбин / В кн. "IV Всесоюзная научно-техническая конференция. Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их систем". - Харьков. ХАИ. -1983. -С.114...115.
 6. Карпинос В.С. Термодинамические аспекты высокочастотного нагружения металлов / В кн. "Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения". - Киев. ИПП АНУ. - 1992. -С.114...115.
 7. Карпинос В.С. Самулаев В.В. Нестационарное тепловое состояние пластины при неоднородных по длине граничных условиях теплообмена // Пром. теплотехника. -1984. -N 3. -С.61...62.
 8. Карпинос В.С., Третьяченко Г.Н. Моделирование неоднородных неустановившихся термонапряженных состояний конструктивных элементов на образцах простой формы / В кн. "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов" - М.: -МАИ. - 1983. - С.113.
 9. Карпинос В.С., Третьяченко Г.Н. Термодинамические циклы термической усталости / В кн. "VI Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике". - Ташкент. - 1986. -С.333...334.
 10. Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния / Третьяченко Г.Н., Кравчук Л.В., Курият Р.И., Карпинос В.С., Семенов Г.Р. // - Киев: Наук. думка. - 1986. - 278 с.
 11. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Анализ теплового и термонапряженного состояний полых цилиндров при внутреннем одностороннем нагреве // Пробл. прочности. - 1978. -N12. -С.3...6.
 12. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Зависимость между механическими и теплофизическими характеристиками материалов при тепловом нагружении твердых тел // Пробл. прочности. - 1986. - N10. -С.9...14.
 13. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Зависимость между механическими и теплофизическими характеристиками материалов при разрушении // Пробл. прочности. - 1989. -N9. -С.22...27.

14. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Исследование термонапряженного состояния полых цилиндрических образцов при интенсивном теплообмене на внутренней поверхности // Пром. теплотехника. - 1980. т.2, №3. - С.6...9.
15. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Методика исследования предельных состояний полых цилиндров при внутреннем одностороннем нагреве газовым потоком с высокими термодинамическими параметрами // В кн. "XIV Научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкций". - Киев: Наук. думка. - 1977. - С.103...104.
16. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Моделирование неоднородных неустановившихся термонапряженных состояний материала на образцах простой формы // Пробл. прочности. - 1986. - №4. - С.67...72.
17. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Подход к исследованию термической усталости жаропрочных сталей при нестационарном неоднородном тепловом и термонапряженном состояниях / В кн. "I Симпозиум ползучести материалов". - ПНР. Белосток. - 1983. - С.421...432.
18. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Прочность и долговечность материалов при циклических тепловых воздействиях. - Киев: Наук. думка. - 1990. - 250 с.
19. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Тепловое состояние полых цилиндров при внутреннем одностороннем нагреве // Пробл. прочности. - 1977. - №5. - С.56...58.
20. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Термическая усталость материалов при неоднородном термонапряженном состоянии / В кн. "V Всесоюзный симпозиум. Малоцикловая усталость - критерии разрушения и структуры материалов". Часть II. - Волгоград. - 1987. - С.34...36.
21. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С. Установка для исследования термостойкости образцов материалов в трансзвуковом высокотемпературном газовом потоке // Пробл. прочности. - 1978. - №6. - С.130...132.
22. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С., Андреев В.Е. Моделирование

- неустановившихся термонапряженных состояний охлаждаемых лопаток газовых турбин // Пробл. прочности. - 1986. - №1. - С.68...71.
23. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С., Барило В.Г. Разрушение материалов при циклических нагревах. - Киев: Наук. думка. - 1993. - 288 с.
24. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С., Кияшко Л.Е. Термонапряженное состояние полых цилиндров при внутреннем одностороннем нагреве // Пробл. прочности. - 1977. - №9. - С.21...24.
25. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С., Кияшко Л.Е. Оценка погрешностей при численном расчете тепловых и термонапряженных состояний полых цилиндров // Пром. теплотехника. - 1981. - т.3, №6. - С.42...46.
26. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С., Косов В.Д. Термическая усталость лопаток газотурбинных двигателей из материала на основе нитрида и карбида кремния // Пробл. прочности. - 1983. №7. - С.9...12.
27. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С., Косов В.Д. Исследование термической усталости жаропрочных сталей при плоском неоднородном напряженном состоянии // Пробл. прочности. - 1983. - №6. - С.27...32.
28. Третьяченко Г.Н., Карпинос В.С., Косов В.Д. Термоциклическая долговечность жаропрочных сталей при плоском неоднородном напряженном состоянии / В кн. "VIII Всесоюзная научно-техническая конференция. Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей". - Куйбышев. - КИАИ. - 1981. С.93.
29. Tretychenko G.N., Karpinos V.S. An Approach to Investigation into Thermal Fatigue of High-Temperature Steels in Time- and Coordinate-Dependant Thermal Stress State. 8th Congress on Material Testing. Budapest. 1982.
30. Tretychenko G.N., Karpinos V.S., Solovyova N.G. Functions of State in Materials under Conditions of Thermal Fatigue. The 7th European Conference on Fracture, Budapest. 1988.

В. С. Карпинос

Підп. до др. 4.04.94. Формат 60*84/16. Папір офс.
Офс. др. Умовн. др. арк. 1,63. Умовн. кр. - відб. 1,35.
Обл. - вид. арк. 4,75. Тираж 100 прим. Замовл. 228.
Ціна безкоштовно.

Дільниця ротаринтного друкування ВНТІ ІПМ АНУ
252014, Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2

AB 29.579