

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МІЦНОСТІ

На правах рукопису

УДК 539.43:620.191:620.192:620.178

КАПЛУНЕНКО Володимир Георгійович

ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНСТІЙКОСТІ
ТЕПЛОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ
РОЗМІРІВ ВРАЗОКІВ

01.02.04 - Механіка деформівного
твердого тіла

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Київ 1994

АВ 31.347

Робота виконана в Інституті проблем міцності НАН України.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор	А.Я.Красовський
доктор технічних наук, професор член кореспондент НАН України	В.І.Труфяков
доктор технічних наук	Г.М.Никифорчин

Провідна організація - Науково-технічний центр Госатомнагляду України (м.Київ).

Наукові консультанти:

академік НАН України	В.Т.Трощенко
доктор технічних наук, професор	В.В.Покровський

Захист відбудеться " 15 " зрудня 1994 р. на засіданні спеціалізованої ради Д 016.33.01 при Інституті проблем міцності НАН України за адресою: 252014, Київ -14, вул. Тимірязевська, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту проблем міцності НАН України

Автореферат розісланий " 14 " истопада 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
доктор технічних наук

Ф.Ф.Гігіняк

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00777178 (.)

ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми й мета роботи. Не дивлячись на великі успіхи, досягнуті механікою руйнування (МР), вона має ряд проблем, які вимагають подальших досліджень і рішень. Однією з перших в цьому ряді є проблема впливу розмірів зразків на характеристики тріщиностійкості, тобто проблема ефекту масштабу (ЕМ), в якій, як в ніякій іншій проблемі, досягають найвищого ступеня окладності дві взаємозв'язані задачі - задача про напружено-деформований стан (НДС) та задача визначення критеріїв руйнування тіл різних розмірів з тріщинами і, відповідно, з рівним НДС. Перша з них вимагає тривимірного пружно-пластичного рішення про поля напружень і деформацій у вершині тріщини, друга - унікального експериментального обладнання і величезних затрат коштів і часу.

При цьому проблема ЕМ вимагала свого рішення з самого початку формування МР як науки, тому що без обліку ЕМ неправомірно переносити результати випробувань малих лабораторних зразків на великогабаритні конструкції і агрегати, кількість яких інтенсивно збільшується. Це атомні і кімічні реактори, літаки, судна, естакади, мости і багато іншого. До того ж в практиці проектування і виготовлення таких конструкцій і агрегатів, які мають не тільки великі абсолютні розміри, але і складне конструктивне оформлення, важко уникнути технологічних тріщиноподібних дефектів (непроварів, іншорідних включень і т.ін.), а в зонах концентрації напружень - атомних тріщин (ВТ), що робить практичний аспект ЕМ в МР ще більш актуальним, ніж в інших галузях науки про міцність і довговічність матеріалів та конструкційних елементів.

Враховуючи велику актуальність проблеми ЕМ в практичному плані, до неї зверталась увага багатьох дослідників. Про-

те велика кількість попередніх робіт не переросла в якісно новий рівень вирішення проблеми ЕМ, і, як показує аналіз літературних даних, жодна з робіт, присвячених ЕМ, не дозволяє дати ясне фізико-механічне роз'яснення складному суперечливому характеру цього ефекту і кількісно прогнозувати трищільність тіла конкретних розмірів і форми для конструкційних сплавів різного класу. В цілому, загальними недоліками робіт, які ґрунтуються як на принципах лінійної МР (ЛМР), так і на принципах нелінійної МР (НЛМР), є такі недоліки, усунення яких зможе помітно вплинути на вирішення цієї актуальної проблеми. По-перше, занадто абсолютизується проблема визначення граничних характеристик типу K_{T0} і J_{T0} , вирішення якої в цілому не вирішує проблеми сціпки в'язкості руйнування (ВР) більшості реальних конструкційних елементів, які є при руйнуванні в НДС, що відрізняється від плоскої деформації (ПД). По-друге, не враховується взагалі або враховується недостатньо взаємозв'язок між розмірами тіла, НДС, стисненням пластичного деформування, параметрами локального руйнування та ВР. По-третє, при відсутності системного підходу до вирішення проблеми ЕМ, що виявляється в фрагментності виконаних досліджень (досліджувався вузький клас матеріалів, вузький діапазон змін розмірів зразків та ін.) робилися, як правило, узагальнюючі висновки.

У відповідності до вищезгаданого в цій роботі вирішувалися такі основні задачі: 1- Глибоке комплексне дослідження на матеріалах широкого класу, в широкому діапазоні змін розмірів зразків, режимів і умов навантажень (тобто в реалізації всіх основних НДС та мікромеханізмів руйнування) впливу ЕМ на характеристики статичної та циклічної трищільності, що має за мету встановлення природи і основних тенденцій

прояву ЕМ в МР. 2 - Розробка моделей прогнозування ВР великогабаритних тіл в результаті випробувань малих зразків, які б дали ясне фізико-механічне пояснення ЕМ. 3 - Розробка моделі для прогнозування швидкості росту ВТ (РВТ) в залежності від силового й енергетичного параметрів навантаження з урахуванням реального НДС у вершині тріщини, обумовленого розмірами тіла і циклічністю пружно-пластичного деформування. 4 - Обґрунтування методів підвищення опору крихкому руйнуванню великогабаритних тіл з тріщинами, які базуються на попередньому пластичному деформуванні (ППД) та кількісне прогнозування такого підвищення за результатами досліджень малих зразків.

Наукова новизна роботи. Одержано унікальні дані про статичну і циклічну тріщиностійкість конструкційних сплавів широкого класу, які дали можливість встановити природу та основні тенденції виявлення ЕМ в механіці руйнування.

Встановлено для широкого класу конструкційних сплавів інваріантність щодо розмірів і геометрії тіла, довжини і форми тріщини, асиметрії циклу навантаження залежності швидкості РВТ від розмаху величини розкриття вершини тріщини (ВРВТ), що відтворює реальний НДС як в пружній, так і пружно-пластичній зоні.

Розроблено наукову методологію прогнозування статичної та циклічної тріщиностійкості великогабаритних тіл в результаті випробувань малих лабораторних зразків, яка базується як на детермінічному, так і імовірністному підходах до ЕМ та обліку взаємозв'язку між ВР, розмірами тіла, НДС у вершині тріщини, параметрами локального руйнування, отисненням пластичної деформації, статистичною природою характеристик ВР. В межах детермінічного підходу введено параметр НДС, що дозво-

ляє кількісно оцінювати вплив розмірів тіла на стиснення пластичних деформацій у вершині тріщини, і в його використанні розроблено конкретні моделі прогнозування швидкості РВТ та характеристик ВР на нижньому й верхньому шельфі температурної залежності ВР з урахуванням впливу розмірів тіла, які дозволяють дати чітке фізико-механічне пояснення суперечливому характеру ЕМ і його природі.

Розвинуто новий імовіростний підхід до оцінки ЕМ при крихкому руйнуванні, який базується на гіпотезі "слабкої ланки" й трипараметровому розподілі Вейбулла, одному з параметрів якого надається смисл критичного КІН при першому нестабільному стрибку тріщини, який визначається безпосереднім експериментом на акрихчених матеріалах.

Розроблено фізико-механічну модель прогнозування опору крихкому руйнуванню великогабаритних тіл з тріщинами після їх ШЦД, враховуючи вплив НДС на проходження процесу ШЦД.

Практичне значення роботи. Розроблено комплекс оригінальних методик по визначенню всього набору характеристик статичної, циклічної та динамічної тріщиностійкості конструкційних сплавів в широкому діапазоні змін геометрії і товщини з'явки (включаючи натурну товщину стінки корпусу атомного реактора); довжини і форми тріщини; температури дослідження (від низьких до високих); режимів, рівнів і умов навантажень. Особливістю розроблених методик є їх відносна простота, яка дозволяє їх тиражування без значних витрат в лабораторних і виробничих умовах.

Одержано великий обсяг даних про характеристики тріщиностійкості відповідальних конструкційних сплавів, з тому числі й матеріалів корпусів атомних реакторів типу ВВЕР з урахуванням основних конструктивних, технологічних й експлуата-

ційних факторів, які зможуть бути безпосередньо використані як службові характеристики на стадії проектування і в перевірних розрахунках. Одержані результати дозволили дати рекомендації для обґрунтування вибору матеріалів корпусів ВВЕР з урахуванням їх радіаційного змикнення при експлуатації.

Запропоновані й експериментально обґрунтовані методи оцінки опору великогабаритних тіл з тріщинами криккому, в'якому і втомному руйнуванню за результатами випробування тільки малих лабораторних зразків, що дозволяє одержати з достатньою достовірністю необхідні дані в тих випадках, коли випробування зразків натурної товщини в реальних умовах або важко реалізувати, або практично неможливо (наприклад, під радіаційним випромінюванням).

На зразках натурної товщини з реальною формою й довжиною тріщини підтверджена висока ефективність методу попереднього теплового навантаження (ПТН) як способу підвищення опору криккому руйнуванню конструкційних сплавів, в тому числі й матеріалів корпусів атомних реакторів ВВЕР-440 та ВВЕР-1000, для яких визначені оптимально-силові режими ПТН. Розроблений і готується до практичного впровадження оригінальний метод реалізації ПТН, який виключає недопустиме перевантаження відповідального конструктивного елемента типу корпусу атомного реактора.

Основні практичні результати роботи враховані в останніх нормативних документах для проектування та експлуатації атомних енергетичних реакторів.

Основні положення, що виносяться на захист.

1. Введення параметра НДС α , що є функцією трьох головних нормальних напружень в зоні передруйнування у верхині тріщини і дозволяє кількісно врахувати вплив цього НДС на розви-

ток пластичної деформації, яка передувє основним видам руйнування матеріалу в тріщинах - в'язкому, крихкому, втомному.

2. Модель прогнозування характеристик ВР великогабаритних тіл на верхньому шельфі температурної залежності ВР за результатами випробувань малих лабораторних зразків (в тріщинах і без).

3. Модель прогнозування характеру ЕМ на верхньому шельфі температурної залежності ВР, що ґрунтується на залежності цього характеру від фізико-механічних властивостей матеріалу, що визначають чутливість поточної й критичної пластичної деформації до зміни відповідних параметрів НДС, яка викликана зміною розмірів тіла.

4. Модель прогнозування характеристик ВР на нижньому шельфі температурної залежності ВР, основана на припущенні, що зміна розмірів тіла впливає на ВР в тій мірі, в якій впливає викликана нею зміна НДС, що оцінюється параметром α , на пластичну деформацію, яка передувє крихкому руйнуванню сколом.

5. Новий імовірнісний підхід до прогнозування ЕМ при крихкому руйнуванні, який ґрунтується на трипараметровому розподілі Вейбулла, один з параметрів якого (параметр положення) визначається не статистичними методами, а безпосереднім експериментом і відповідає при цьому величині критичного КІН при першому нестійкому стрибку втомної тріщини при її стрибковому розвитку в крихченому матеріалі.

6. Встановлена для широкого класу конструкційних сплавів інваріантність до розмірів і геометрії тіла, довжини і форми тріщини, асиметрії циклу навантаження залежності швидкості РВТ від розмаку розкриття вершини тріщини.

7. Модель для прогнозування швидкості РВТ в залежності

від силового (KIN) або енергетичного (J-інтеграл) параметрів навантаження з урахуванням реального НДС, обумовленого такими факторами як розміри тіла та циклічність пружно-пластичного деформування.

8. Модель прогнозування ВР після ППД матеріалу з тріщиною, що враховує вплив НДС при ППД і дозволяє прогнозувати за результатами випробувань малих зразків ВР великогабаритних тіл, що підлягають дії ППД з заданими температурно-силовими режимами.

Публікація та апробація роботи. По темі дисертації опубліковано 56 робіт в журналах і збірниках, одержано 7 авторських свідоцтв. Найбільш суттєві результати роботи доповідалися на таких наукових форумах: VIII і IX конференціях по втомі металів (Москва, 1982, 1986); Міжнародній конференції " Велике випробувальне обладнання та випробування моделей" (Карлові Вари, Чехословаччина, 1982); I та II Всесоюзних конференціях " Міцність матеріалів при низьких температурах" (Київ, 1982; Житомир, 1986); IV й V Всесоюзних симпозиумах " Малоциклова втома - механіка руйнування, живучість і матеріалоземкість конструкцій" (Краснодар, 1983; Волгоград, 1987); VII та XI Міжнародних колоквиумах " Механічна втома металів" (Мішкольц, Угорщина, 1983; Київ, 1991); II Всесоюзному симпозиумі з механіки руйнування (Житомир, 1985); I Всесоюзній конференції " Механіка руйнування матеріалів" (Львів, 1987); Всесоюзних науково-технічних семінарах " Конструктивна міцність і механіка руйнування аварних з'єднань"; " Сучасні способи забезпечення надійності й міцності аварних конструкцій"; " Механіка руйнування і міцність аварних з'єднань та конотрукцій" (Ленінград, 1986, 1989, 1991); XIII Всесоюзній науково-технічній конференції " Структура і

міцність матеріалів в широкому діапазоні температур" (Каунас, 1989); X та XI Міжнародних конференціях по структурній механіці в реакторній технології (Анакейм, США, 1989; Токіо, Японія, 1991); II та III Міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми матеріалознавства при виготовленні та експлуатації обладнання АЕС" (С.-Петербург, РФ, 1992, 1994).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, бібліографії; має 320 сторінок машинописного тексту, 149 малюнків, 6 таблиць, список використаних джерел з 749 найменувань.

Особистий вклад автора. Автором цієї дисертаційної роботи особисто розроблена методика досліджень; отримані і проаналізовані експериментальні дані про статичну та циклічну тріщиностійкість зразків різних розмірів і форми при різних режимах і умовах навантаження; розроблені моделі прогнозування статичної та циклічної тріщиностійкості конструкційних сплавів з урахуванням розмірів тіла.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито актуальність досліджуваної проблеми ЕМ, описується її загальний стан у МР, етапи й результати рішення. Відображено основні одержані в роботі результати, показано їх наукову новизну та практичну значимість.

В першому розділі здійснено детальний аналіз великого обсягу літературних даних про вплив розмірів і геометрії зразків, довжини і форми тріщини на характеристики статичної та циклічної тріщиностійкості сплавів, що свідчить про складний і суперечливий характер ЕМ як в межах ЛМР, так і НЛМР; описуються моделі і підходи, що використовуються для прогнозування ЕМ; вказується на їх можливості та обмеження.

Проаналізовано також літературні дані, які свідчать про залежність, з одного боку, між параметрами НДС і розмірами і формою тіла, а також довжиною і формою тріщини, і, з другого боку - між параметрами НДС і параметрами локального руйнування, які контролюють старт тріщини.

На основі літературного огляду, який показав відсутність загального підходу до проблеми ЕМ у МР, що дозволяло би, з одного боку, пояснити складний характер цього ефекту, а, з другого боку, кількісно прогнозувати для даного матеріалу тріщиностійкість тіла конкретних розмірів і форми, формулюються основні задачі роботи і шляхи їх вирішення.

У другому розділі подаються розроблені методи й методики дослідження статичної, циклічної та динамічної (по зупинці тріщини) тріщиностійкості зразків різних розмірів і форм в діапазоні температур 77...623К; методика дослідження параметрів локального руйнування - критичного сколу σ_c і критичної деформації ε_f .

Характеристики статичної і циклічної тріщиностійкості досліджувались на компактних зразках і зразках на триточечний згин (ЗРВ) товщиною 25...150мм. При цьому ЗРВ-зразки були як з довгою крізовою тріщиною (ЗРВЛ), так і з короткою напівеліптичною (ЗРВШ). Критичний КІН по зупинці тріщини визначали на ДКВ-зразках товщиною 12,5...75 мм. ЗРВШ - і ДКВ-зразки мали оригінальну конструкцію, що визначалась особливостями проблеми випробування саме великогабаритних зразків.

Стосовно великогабаритних зразків розроблено методику випробувань при високих температурах, відповідно з якою нагрів зразка здійснюється за принципово новою схемою, що виключає нагрів захватів, загальна маса яких в кілька разів більша за масу зразка, і забезпечує рівномірний нагрів црак-

тично усієї поверхні зразка. Необхідність запису діаграм "навантаження Р-переміщення берегів тріщини на лінії дії сили V" та " навантаження Р - переміщення берегів тріщини поблизу її вершини δ " у великогабаритних зразках в діапазоні температур 77...823К вимагала необхідності розробки набору спеціальних тензometrів, відмінних конструктивно і по схемі кріплення від раніше використовуваних для малогабаритних зразків.

Розроблено методику дослідження впливу ППД на підвищення статичної і циклічної ВР, що дозволяє здійснити і силове, і несилове попереднє навантаження великогабаритних зразків.

Для дослідження закономірностей нестабільного (отрибками) РВТ в зразках різних розмірів і геометрій розроблено методику, яка ґрунтується на явищі акустичної емісії.

В третьому розділі подається загальна характеристика і призначення досліджених матеріалів, їх хімічний склад, механічні властивості й режими термообробки; подані результати досліджень впливу НДС та ППД на σ_c і ϵ_f .

Основним предметом дослідження були теплостійкі (ферито-перлитні) сталі та їх зварні з'єднання, що йдуть на виготовлення корпусів атомних реакторів ВВЕР-440 (15Х2МФА, 15Х2МФАА, Св-10ХМФТ, Св-13Х2МФА) і ВВЕР-1000 (15Х2НМФА, 15Х2НМФАА, Св-08ХГНМТА, Св-16Х2НМФА). Досліджувалися також спеціальні сталі ИП-1, ИП-2, ИП-3 і аустенітна сталь 08Х18Н10Т. При цьому досліджувалися матеріали, одержані при допомозі різних технологій. Так, досліджувалися зварні з'єднання, виконані автоматичним дуговим (Св-10ХМФТ, Св-10ХМФТУ, Св-08ХГНМТА) та електрошлаковим (Св-13Х2МФА, Св-16Х2НМФА) зварюваннями. Досліджувалися матеріали як з підвищеним (15Х2МФА, 15Х2НМФА, Св-10ХМФТ), так і зниженим (15Х2МФАА,

15Х2НМФА, Св-10ХМФТУ) вмістом шкідливих елементів. З метою дослідження впливу радіаційного опромінювання на характеристики тріщиностійкості матеріали знаходилися в рівному стані - вихідному і зкриженому спеціальною термообробкою, що імітує вплив рівних доз радіаційного опромінювання. Вихідному стану відповідають сталі 15Х2НМФА(I), 15Х2МФАА, 15Х2МФА(I), Св-10ХМФТ(I), Св-10ХМФТУ, Св-13Х2МФА, Св-08ХГНМТА(I) та Св-16Х2НМФА, а зкриженому - сталі 15Х2МФА(II), 15Х2МФА(III), 15Х2НМФА(II), Св-10ХМФТ(II), Св-08ХГНМФА(II). В цілому, за своїми характеристиками - механічними властивостями, ударній в'язкості, твердості, схильності до деформаційного зміцнення - досліджені матеріали суттєво відрізняються між собою (зокрема, межа плинності змінюється в діапазоні $\sigma_{0,2}$ - 270...1500 МПа), що дає змогу зробити певні узагальнюючі висновки за результатами їх досліджень.

Дослідження величин σ_c і ϵ_c і впливу на них тріщинності напруженого стану, що визначалось відношенням гідростатичного напруження σ_m до інтенсивності напружень σ_i (σ_m/σ_i), проводилось на гладеньких циліндричних зразках і циліндричних зразках з кільцевим концентратором радіусом 0,5; 1; 2; 4 мм.

Величина σ_c досліджувалась для сталей 15Х2МФА(III) і 15Х2НМФА(II) при температурі 77 і 153 К. Встановлено, що при 77 К руйнування всіх зразків проходило без помітних пластичних деформацій, і величина σ_c не залежить від σ_m/σ_i . В той же час при 153 К величина σ_c зменшується зі збільшенням σ_m/σ_i . При цьому руйнування гладеньких зразків і зразків з радіусом концентратора 2 і 4 мм супроводжувалося розвитком пластичних деформацій, і величина σ_c була вища, ніж при 77 К. Для зразків з більш гострим концентратором і відповідно більшим значенням σ_m/σ_i збільшення температури випробуван

від 77 до 153 К практично не впливає на σ_c . При цьому також не було помітного збільшення пластичної деформації.

Вплив самого ПЦД на величину σ_c проводили для сталей 15Х2МФА(I), 15Х2МФА(III) і 15Х2НМФА(II). ПЦД сталей 15Х2МФА(III) і 15Х2НМФА(II) здійснювалось при 573 К, сталі 15Х2МФА(I) - при 293К. Величину σ_c після ПЦД визначали на гладеньких циліндричних зразках при 77 К. Встановлено, що зі збільшенням ступеню ПЦД величина σ_c одноманітно підвищується і може суттєво відрізнятись від величини критичного напруження σ_{c0} для матеріалів у вихідному стані. При цьому експериментальна залежність величини σ_c від пластичної деформації ϵ_i^p може бути задовільно апроксимірована рівнянням типу

$$\sigma_c = \sigma_{c0} + H_d (\epsilon_i^p)^{J_d}, \quad (1)$$

де H_d та J_d - константи.

Дослідження впливу σ_m/σ_i на величину ϵ_f проводили для пластичної сталі 15Х2МФА(I) при 293 К, а для акрихчених сталей 15Х2МФА(II), 15Х2МФА(III) та 15Х2НМФА(II) - при 573 К. Встановлено, що величина ϵ_f є зменшувальною функцією від σ_m/σ_i для всіх досліджених сталей і прагне до свого асимптотичного наближення. При цьому інтенсивність зменшення величини ϵ_f з ростом σ_m/σ_i дуже відмінна для різних сталей. Неоднаковий відповідно і діапазон збільшення σ_m/σ_i , в якому величина ϵ_f виходить на своє асимптотичне наближення $\epsilon_{f\infty}$, що відмінне для різних сталей. Показано, що залежність ϵ_f від σ_m/σ_i може бути прийнята у вигляді такого рівняння

$$\epsilon_f = \epsilon_f \exp\left(-k_f \frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right) + \epsilon_{f\infty} \quad (2)$$

з параметрами ϵ_f , k_f , $\epsilon_{f\infty}$, відмінними для різних сталей.

В четвертому розділі подаються результати досліджень

впливу розмірів зразків та режимів циклічного навантаження на закономірності стабільного і нестабільного PBT; описані особливості PBT в зварних з'єднаннях великих перерізів.

В основі дослідження лежать кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) зразків товщиною від 25 до 150 мм із сталей різної категорії міцності, які представлені у вигляді залежностей швидкості PBT dI/dN від максимального KIH у циклі $K_{I_{max}}$ і одержані при 293 K і асиметрії циклу $R = 0$.

Аналіз КДВР показує, що вплив розмірів зразків на закономірності PBT неоднозначний і залежить від матеріалів і величини $K_{I_{max}}$. На першій ділянці КДВР розміри зразків мало впливають на пороговий KIH K_{th} і швидкість PBT для високоміцної сталі 15X2MFA(II), але роблять істотний вплив на ці параметри для пластичних сталей 15X2MFA(I), 15X2HMFA(I) та 08X18N10T. Причому, якщо для сталей 15X2MFA(I) і 15X2HMFA(I) циклічна тріщиностійкість на цій ділянці підвищується із збільшенням товщини зразку, то для сталі 08X18N10T - навпаки, знижується. На другій (прямолінійній) ділянці діаграми, збільшення товщини зразків практично не впливає на швидкість PBT для сталей 15X2MFA(I), 15X2MFA(II) та 15X2HMFA(I), але приводить до підвищення швидкості PBT для сталі 08X18N10T. На третій ділянці діаграми (при високіх $K_{I_{max}}$) збільшення товщини зразків не впливає на закономірності PBT для сталі 15X2MFA(II), але приводить до підвищення опору PBT для сталей 15X2MFA(I), 15X2HMFA(I) і 08X18N10T.

В зв'язку з неможливістю однозначного описання швидкості PBT в сталях 15X2MFA(I), 15X2HMFA(I) і 08X18N10T при допомозі величини $K_{I_{max}}$ була зроблена спроба досягнути цієї мети за допомогою інших параметрів MP, а саме: циклічних J-інтегралу і коефіцієнта інтенсивності деформацій \bar{K}_{Ic} , одержаних

розрахунковим шляхом, та максимальної ВРВТ δ_{max} , одержаної безпосередніми вимірами. Другою важливою причиною використання цих параметрів МР була непрямокутність використання КІН у високоамплітудній області як параметру НДС для зразків товщиною 25 мм із сталей 15Х2МФА(І) та 15Х2НМФА(І) і товщиною 25...150 мм із сталі 08Х18Н10Т у зв'язку розвитку в них істотних (нестиснених) пластичних деформацій.

Як було встановлено, серед досліджених параметрів тільки δ_{max} , визначена експериментально, однозначно контролює швидкість РВТ в досліджених сталях і дозволяє одержати для них інваріантні щодо розмірів зразків КДВР, які прямолінійні впритул до руйнування і описуються залежністю типу

$$dl/dN = B (\delta_{max})^3, \quad (3)$$

де B, β - константи. При цьому обумовлюється відсутність в одержаних діаграмах $dl/dN - \delta_{max}$ біляпорогової області, в якій втомна тріщина була або практично закрита, або δ_{max} складала лише частини мікрону, що не дозволяло в достатній мірі досягти точності її виміру.

Збільшення асиметрії циклу в діапазоні $R=0...0.75$ і перехід до двочастотного навантаження в співвідношенням частот $F=1000$ й амплітуд $q=0.05...0.75$ істотно впливає на закономірності РУТ. При цьому, якщо із збільшенням R швидкість РУТ монотонно знижується, то із збільшенням q , навпаки - монотонно збільшується. Дослідження спільного впливу розмірів зразків і режимів циклічного навантаження показало, що останні в цілому не змінюють характер ЕМ за винятком біляпорогової області, де РВТ в значній мірі визначається окисненням на новоствореній поверхні, залежним як від розмірів зразків, так і від режимів циклічного навантаження, що

приводить до суттєвого підвищення ефекту закриття ВТ і відповідного зниження ефективного КІН і підвищення внаслідок цього K_{th} . Так, якщо при $R = 0$ збільшення товщини зразку приводить до інтенсифікації оксидування і, як наслідок, збільшення K_{th} , то при $R=0,75$ і двочастотному навантаженні оксидування практично немає, і ЕМ відсутній.

Для оцінки дійсного K_{th} запропоновані дві групи методів. Одна з них ґрунтується на визначенні K_{th} при таких умовах і режимах циклічного навантаження (асиметрії циклу, підвищеній температурі, двочастотності), при яких, з одного боку, немає помітного впливу цих умов і режимів на закономірності РЕТ, а, з другого боку, немає і інтенсивного оксидування. Другий метод враховує ЕМ з допомогою рівняння *

$$K_{th}^{(t_2)} = K_{th}^{(t_1)} + \frac{S_{Na}^{(t_2)}(t_2/t_1 - 1)E}{4\sqrt{\pi} \Delta l_{ce} (1 - \nu^2)}, \quad (4)$$

де $K_{th}^{(t_2)}$ і $K_{th}^{(t_1)}$ відповідно K_{th} для зразків товщиною t_2 і t_1 ($t_2 > t_1$); $S_{Na}^{(t_2)}$ - товщина оксидної плівки у зразку товщиною t_1 ; Δl_{ce} - розмір ділянки закриття втомної тріщини; E - модуль Юнга, ν - коефіцієнт Пуассона.

Встановлено, що асиметрія циклу впливає на швидкість РЕТ не тільки для залежності $dl/dN - K_{Imax}$, але і для залежності $dl/dN - \delta_{max}$. Разом з тим було встановлено, що залежність $dl/dN - \Delta \delta$, де $\Delta \delta$ - розмах ВРЕТ, інваріантна як до розмірів зразків, так і асиметрії циклу і при цьому задовільно описується рівнянням

$$dl/dN = B'(\Delta \delta)^2, \quad (5)$$

де B' і ν - константи при даних умовах навантаження.

Дуже важливим експериментально встановленим фактом є

інваріантність залежності (5) не тільки щодо розмірів вразків і асиметрії циклу, але і щодо геометрії вразків, а також розміру, типу (крізна чи поверхнева) і форми тріщини втоми.

При дослідженні акрихчених матеріалів типу сталі 15Х2МФА(II) було встановлено, що в них при досягненні $K_{I_{max}}$ критичного КІН $K_{jc}^{(i)}$ відбувається перехід від стабільного РЕТ до нестабільного (стрибками). Дослідження закономірностей нестабільного РЕТ, виконане на вразках різних розмірів і геометрії, з різною довжиною і формою тріщин, при рівній асиметрії циклу, показало, що закономірності нестабільного РЕТ повністю описуються рівняннями типу

$$\Delta \ell_c^{(i)} = D(K_{jc}^{(i)})^\beta, \quad (6) \quad \Delta \ell_c^{(i)} = H(K_{jc}^{(i)})^\gamma, \quad (7) \quad \Delta N^{(i)} = M[(1-R)K_{jc}^{(i)}]^\omega \quad (8)$$

з константами $D, \beta, H, \gamma, M, \omega$, інваріантними до розмірів і геометрії вразків, довжини і форми тріщини, асиметрії циклу. Тут $K_{jc}^{(i)}$ - критичний КІН в момент стрибка тріщини; $\Delta N^{(i)}$ - число циклів навантаження перед стрибком тріщини; $\Delta \ell_c^{(i)}$ - розмір стрибка тріщини; $\Delta \ell_c^{(i)}$ - розмір ділянки стабільного РЕТ; i - порядковий номер стрибка. З рівнянь (6) - (8) виходить, що розмір крихкого стрибка тріщини, який контролюється зоною циклічного пошкодження матеріалу у вершині тріщини, визначається максимальним КІН в циклі, а кількість циклів навантаження, необхідне для пошкодження зони, - амплітудою КІН.

Встановлено, що основною особливістю втомного руйнування зварних з'єднань великих перерізів є значний вплив на закономірності РЕТ залишкових напружень (ЗН), які характерні тільки для зварних з'єднань великих перерізів, виконаних багатопрохідним дуговим зварюванням, і які мають місце після кінцевої термообробки, призначеної для їх зняття. Найбільш суттєвий вплив ЗН виявляється у біляпорогової області, де

вони близькі до діючих номінальних напружень і обумовлюють тим самим ЕМ. При цьому характер та інтенсивність впливу ЗН на швидкість РЕТ і K_{LL} встановлюється їх знаком і величиною. Запропоновані рівняння для розрахунку K_{eff} і R_{eff} з урахуванням ЗН, які ґрунтуються на методі суперпозиції ЗН і номінальних напружень і припущенні, що в біляпорогової області, де вплив ЗН особливо істотний, відсутні значні пластичні деформації, які приводять до релаксації або перерозподілу ЗН.

У п'ятому розділі подаються результати дослідження впливу розмірів зразків на характеристики ВР при статичному, циклічному і динамічному (по зупинці тріщини) навантаженні в широкому діапазоні змін розмірів і геометрії зразків, розмірів і форми тріщини, температури випробування, режимів навантаження.

Показано, що для достовірного визначення ЕМ і його характеру дуже важливим є використання такої методики випробування і залучення таких параметрів для оцінки ВР, які гарантують одержання дійсних значень ВР для зразків всіх випробуваних розмірів. При цьому встановлено, що величина $K_Q^{5\%}$, яка визначена за стандартною методикою на зразках із сталей 15Х2МФА(I), 15Х2НМФА(I), 15Х2НМФА(II) і 08Х18Н10Т з нелінійними діаграмами $P - V$ і яка зростає з збільшенням товщини зразків, не є характеристикою руйнування, а відповідає переходу до великомасштабної текучості при номінальних напруженнях, близьких до межі плинності. Коли ж для оцінки ВР вказаних сталей використовується критичний J -інтеграл або критична ВРЕТ, які визначаються по стертій тріщині, то ЕМ в діапазоні зміни товщини зразків 25...150 мм відсутній. При цьому старт тріщини в зразках різних розмірів відбувається по механізму коалесценції пор, хоч макроруйнування зразків тов-

щиною 150мм мало при температурі 293К макрокрихкий характер.

В той же час було встановлено, що для сталей 15Х2МФА(II) і 15Х2МФА(III) в близьким G_{ϕ} має місце помітне проявлення ЕМ в діапазоні температур 393...573К для ВР, яка оцінювалась при допомозі різних параметрів МР при гарантованому забезпеченні їх діюності. Вартим уваги при цьому є протилежний характер ЕМ для сталі 15Х2МФА(II) і сталі 15Х2МФА(III): для першої з них ВР зі збільшенням товщини зразків зменшується, а для другої - навпаки, збільшується.

Встановлено, що на відміну від товщини зразків геометрія зразків, схема навантаження, розміри і форма тріщини помітного впливу на ВР досліджених сталей не дають.

Встановлено, що особливістю крихкого руйнування зварних з'єднань великих перерізів є значно більший, ніж в основному металі розкид характеристик ВР, одержаних як на різних, так і на одному і тому ж зразку, а також суттєва різниця між характеристиками ВР при статичному і циклічному навантаженні.

При дослідженні впливу розмірів зразків і асиметрії циклу на циклічну ВР встановлені такі основні закономірності:

- для пластичних сталей 15Х2МФА(I), 15Х2НМФА(I) і 08Х18Н10Т збільшення товщини зразку приводить до підвищення критичного КІН. При цьому для зразків товщиною 25 мм із сталей 15Х2МФА(I) та 15Х2НМФА(I) і товщиною 25...150 мм із сталі 08Х18Н10Т величина K_{ϕ}^s не є характеристикою циклічної ВР, а відповідає максимальному розрахунковому КІН при руйнуванні в умовах повномасштабної текучості і близька по своєму чисельному значенню до величини K_{ϕ}^{max} , що визначається при статичному навантаженні по максимальному навантаженню на діаграмі Р-У;
- для високоміцної сталі типу 15Х2МФА(II), яка характеризується наявністю в ній стадії нестабільного РВТ, розміри і

геометрія ґразків, розміри і форма тріщини, асиметрія циклу не впливають на критичні КІН $K_{Ic}^{(d)}$ і $K_{Ic}^{(c)}$, що контролюють відповідно початок і кінець стадії нестабільного РВТ;

-асиметрія циклу в діапазоні $R=0...0.75$, не впливаючи на критичний КІН при циклічному навантаженні для сталей 15Х2НМФА(I) і 15Х2НМФА(II), в той же час суттєво знижує критичну швидкість РВТ $(dl/dN)_c$, що може бути прийнята як характеристика переходу від втомного до крихкого руйнування, чутлива до асиметрії циклу навантаження. Запропоновано рівняння для прогнозування впливу асиметрії циклу на $(dl/dN)_c$.

При дослідженні критичного КІН по зупинці тріщини K_{Ic} не було встановлено помітного впливу розмірів ґразку на цю величину, якщо витримувалися умови плоскої деформації для всіх випробуваних розмірів ґразків.

Порівняльний аналіз досліджених характеристик ВР показав, що величина $K_{Ic}^{(d)}$ є серед них мінімальною по абсолютному значенню і найбільш інваріантною до основних факторів, що впливають на ВР (розміри і геометрія ґразку, розміри і форма тріщини, режими циклічного навантаження, температура випробування), і може бути признана мінімально можливою ВР, що реалізується на практиці для досліджених матеріалів.

Шостий розділ присвячений розробці методів прогнозування тріщиностійкості конструкційних сплавів з урахуванням ЕМ.

У відповідності з установленою для досліджених матеріалів природою ЕМ при статичному навантаженні використовувалися два підходи: детермінічний та імовірнісний. Тільки детермінічний підхід використовувався на верхньому шельфі температурної залежності ВР, коли руйнування не є раптовим спонтанним, а контролюється багаточаговим процесом послідовного зародження, розвитку і коалесценції пор. І детермініч-

ний, і імовірностний підходи використовувалися на нижньому шельфі температурної залежності ВР, коли раптовому крихкому руйнуванню сколом передувала помітна пластична деформація.

При розробці детермінічного підходу використовувалися фізико-механічні моделі, у відповідності з якими просування макротріщини проходить в тому випадку, коли на деякій характеристичній відстані від вершини тріщини реалізується критична ситуація, яка контролюється величиною σ_c у випадку крихкого руйнування і величиною ϵ_y у випадку в'язкого руйнування. В основі детермінічного підходу лежить припущення, що розміри зразку в тій мірі впливають на характеристики тріщностійкості, в якій вони впливають на певні (які саме, покажемо нижче) параметри НДС.

Для прийнятої моделі в'язкого руйнування умови старту тріщини описуються рівнянням

$$\epsilon_i^p(r) \Big|_{r=X_c} = \epsilon_y, \quad (9)$$

де $\epsilon_i^p(r)$ розподіл інтенсивності пластичних деформацій у вершині тріщини, X_c - характеристична відстань. Як встановлено в третьому розділі, між величинами ϵ_y і σ_m/σ_i існує залежність, яка описується рівнянням (2). Тому вплив розмірів тіла на ϵ_y може враховуватись через їх вплив на величину σ_m/σ_i . Для кількісної оцінки впливу НДС на інтенсивність поточних (відповідних до даного навантаження) деформацій використовується параметр α , названий коефіцієнтом наближення до плоскої деформації. Параметр α може бути визначений рішенням тримірної пружної задачі і його використання в цій роботі ґрунтується на справедливості залежності Діксона-Нейбера

$$\sigma_i \epsilon_i = \sigma_i^e \epsilon_i^e, \quad (10)$$

де σ_i , ϵ_i - відповідно інтенсивності напружень і деформа-

цій в пружнопластичній області: σ_i^e, ϵ_i^e - теж в пружній області. Визначення α витікає з таких залежностей:

- при плоскому напруженому стані (ПНС): $\sigma_3 = 0, \epsilon_3 = -\nu(\sigma_1 + \sigma_2)/E$;
- при плоскій деформації (ПД): $\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2), \epsilon_3 = 0$;
- в загальному тримірному випадку: $\sigma_3 = \epsilon_3 E + \nu(\sigma_1 + \sigma_2), \epsilon_3 \neq 0$.

При переході від ПНС до ПД ϵ_3 змінюється від $-\nu(\sigma_1 + \sigma_2)/E$ до 0, тобто ..
 $\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2)k + \nu(\sigma_1 + \sigma_2) = \nu(\sigma_1 + \sigma_2)(k + 1)$, де $-1 \leq k \leq 0$. Поклавши $\alpha = 1 + k$, остаточно маємо

$$\alpha = \sigma_3 / \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (11)$$

Таким чином, при ПНС $\alpha = 0$, при ПД $\alpha = 1$, в загальному тримірному випадку $0 \leq \alpha \leq 1$. З урахуванням α маємо такі основні залежності в площині тріщини по моді I:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = K_I / \sqrt{2\pi r} \quad , \quad (12) \quad \sigma_3 = 2\nu\alpha K_I / \sqrt{2\pi r} \quad , \quad (13)$$

$$\sigma_i^e = K_I(1 - 2\nu\alpha) / \sqrt{2\pi r} \quad , \quad (14) \quad \sigma_T^{ep} = \sigma_{\sigma_2} / (1 - 2\nu) \quad , \quad (15)$$

$$r_p = K_I^2(1 - 2\nu\alpha)^2 / 2\pi\sigma_{\sigma_2}^2 \quad , \quad (16)$$

де σ_T^{ep} - ефективна межа плинності, r - відстань від вершини тріщини, r_p - розмір пластичної зони.

Визначення і використання параметру α ґрунтується на припущенні, що серед розмірів тіла домінуючий вплив на α і, відповідно, стиснення пластичних деформацій робить товщина тіла. Це припущення в свою чергу ґрунтується на експериментальних результатах цієї та інших робіт, які свідчать, що вплив інших розмірів зразків на ВР значно менший, ніж вплив товщини. В загальному випадку параметр α для зразку даної товщини t визначається співвідношенням $\alpha = 1/t \int \alpha(z) dz$,

де $\alpha(Z)$ - функція аміни α по товщині зразку. Зона переходу від НДС до ПД, а, отже, і переходу α від 0 до 1 може бути прийнята постійною, і тому відношення цієї зони до товщини зразку амінюється з товщиною зразку, визначаючи тим самим значення для зразку в цілому. Залежність (16) дає можливість визначити параметр α експериментально.

Враховуючись на залежності (10), використовуючи відомі залежності між G_i^e і ϵ_i^e та між K_T і J_T , а також беручи степенну апроксимацію залежності між G_i і ϵ_i , тобто $G_i = A(\epsilon_i)^n$, де A і n - константи матеріалу, одержуємо таке рівняння для розподілу деформації у вершині тріщини

$$\epsilon_i = \left[\frac{J_T(1+\nu)}{3\pi r A} \right]^{\frac{1}{1+n}} (1-2\alpha)^{\frac{n}{1+n}} \quad (17)$$

Як виходить із залежності (17), при однаковому рівні навантаження (J_T) для даного матеріалу (константи ν, r, A, E) величина деформації у вершині тріщини визначається значенням α . Іншими словами, параметр α є кількісною мірою впливу НДС на процес деформування у вершині тріщини. Залежність (17) аналогічна відомому HRR-рішенню для плоскої задачі, хоч і одержана іншим способом. При цьому, що важливо, в обох рішеннях співпадають сингулярності деформацій. Разом з тим, важливою відмінністю залежності (17) від HRR-рішення є її здатність враховувати вплив НДС на ϵ_i за допомогою параметра α .

Із (2), (9) і (17) маємо рівняння для прогнозування ВР

$$J_c = \left[\epsilon_f \exp(-k_f \frac{G_m}{G_i}) + \epsilon_{zf} \right]^{n+1} \chi_c M_f (1-2\alpha\nu)^2, \quad M_f = 3\pi A / (1+\nu). \quad (18)$$

У рівнянні (18) є параметри G_m/G_i і α , що враховують вплив НДС як на ϵ_f , так і на процес деформування перед досягненням величини ϵ_f , тобто, визначивши для конкретних розмірів тіла значення G_m/G_i і α , можна прогнозувати для цього

тіла ВР з відомих констант матеріала $A, n, V, E, C_f, k, \epsilon_{Tf}$, отриманих при випробуванні зразків на одноосне розтягування (гладеньких і з концентратором). Окрім залежності (18), яка базується на результатах випробувань зразків без тріщин, отримана залежність для прогнозування ВР великогабаритних тіл з результатів випробувань малих зразків з тріщиною:

$$(J_c)_2 = (J_c)_1 \left[\frac{C_f \exp(-k_f(G_m/G_i)_2) + \epsilon_{Tf}}{C_f \exp(-k_f(G_m/G_i)_1) + \epsilon_{Tf}} \right]^{n+1} (1 - 2\alpha_0 \nu)^2, \quad (19)$$

де $(J_c)_1, (G_m/G_i)_1, \alpha_1$ і $(J_c)_2, (G_m/G_i)_2, \alpha_2 - J_c, G_m/G_i, \alpha$ відповідно для малого зразка і великогабаритного тіла. Значення G_m/G_i і α для малого зразка найбільш просто отримати, якщо розміри зразка вибрати такими, щоб НДС \rightarrow ПНС. В цьому випадку $\alpha_1 \rightarrow 0$, а G_m/G_i точно визначається з HRR-рішення.

Розроблена модель дає ясне фізико-механічне пояснення, чому для різних матеріалів ЕМ проявляється по різному і передбачає характер ЕМ. Так, у відповідності з моделлю ЕМ визначається двома протилежно діючими факторами. Зі збільшенням розмірів тіла, з одного боку, зростає G_m/G_i , відповідно, зменшується ϵ_f , а, з другого боку, зростає α , відповідно, зростає стиснення пластичної деформації, тобто більш важким робиться досягнення ϵ_f^p . Кожен матеріал має свій запас пластичності і свою чутливість величини ϵ_f до зміни G_m/G_i , і тому можливі такі три випадки: 1 - зі збільшенням товщини зразка t стиснення величини ϵ_f^p проходить менш інтенсивно, ніж зменшення величини ϵ_f , і ВР зменшується; 2 - зі збільшенням t інтенсивність зростання стиснення величини ϵ_f^p більша, ніж зменшення величини ϵ_f , і ВР зростає; 3 - збільшення стиснення ϵ_f^p і зменшення ϵ_f зі зміною t урівноважують один одного, і тому ЕМ відсутній. Математично вказані вище випадки прояву

ЕМ описуються відповідно залежності (10) співвідношеннями:

1. $\frac{d(1-2\varepsilon\nu)^{-2}}{d\varepsilon} < \frac{d[\varepsilon_f \exp(-k_f G_m/G_i) + \varepsilon_{xf}]^{n+1}}{d(G_m/G_i)}$ - ВР зменшується
2. $\frac{d(1-2\varepsilon\nu)^{-2}}{d\varepsilon} > \frac{d[\varepsilon_f \exp(-k_f G_m/G_i) + \varepsilon_{xf}]^{n+1}}{d(G_m/G_i)}$ - ВР збільшується
3. $\frac{d(1-2\varepsilon\nu)^{-2}}{d\varepsilon} = \frac{d[\varepsilon_f \exp(-k_f G_m/G_i) + \varepsilon_{xf}]^{n+1}}{d(G_m/G_i)}$ - ВР не змінюється

Схематично прояви характеру ЕМ ілюструються на рис. 1

Розроблена вище модель, зокрема, пояснює такий феномен, як рівний характер ЕМ у сталей 15Х2МФА(II) і 15Х2МФА(III) в близькими значеннями G_{92} . Сталь 15Х2МФА(III) в той же час має значно менше значення ε_f і при цьому виходить на крайнє значення ε_{xf} вже при низькому значенні G_m/G_i , тобто зразки товщиною 25 і 150 мм мають практично однакову критичну деформацію. Тому в зразках товщиною 25 мм в меншим стисненням пластичних деформацій деформування проходить більш інтенсивно і критичний стан досягається раніше, ніж у зразка товщиною 150 мм (схема "б" на рис. 1). Сталь 15Х2МФА(II) має вище значення ε_f і більшу чутливість ε_f до зміни G_m/G_i , і для неї ЕМ, навпаки, приводить до зніження ВР (схема "а" на рис. 1).

Детермінічна модель урахування ЕМ при крижкому руйнуванні ґрунтується на припущенні про те, що розміри тіла в тій мірі впливають на ВР, в якій впливає визвана ними зміна НДС на пластичну деформацію ε_i^p , що передув крижкому руйнуванню сколом. З урахуванням прийнятої моделі крижкого руйнування, залежностей (1), (12), (17) і $\varepsilon_i^p = \varepsilon_i - \varepsilon_i^e$ маємо таку систему рівнянь для прогнозування ВР

$$K_c = [G_{c_0} + H_d(\varepsilon_i^p)^{3/4}] \sqrt{2\pi X_c}, \quad \varepsilon_i^p(\alpha, T, K_c) < \varepsilon_f(G_m/G_i), \quad (20)$$

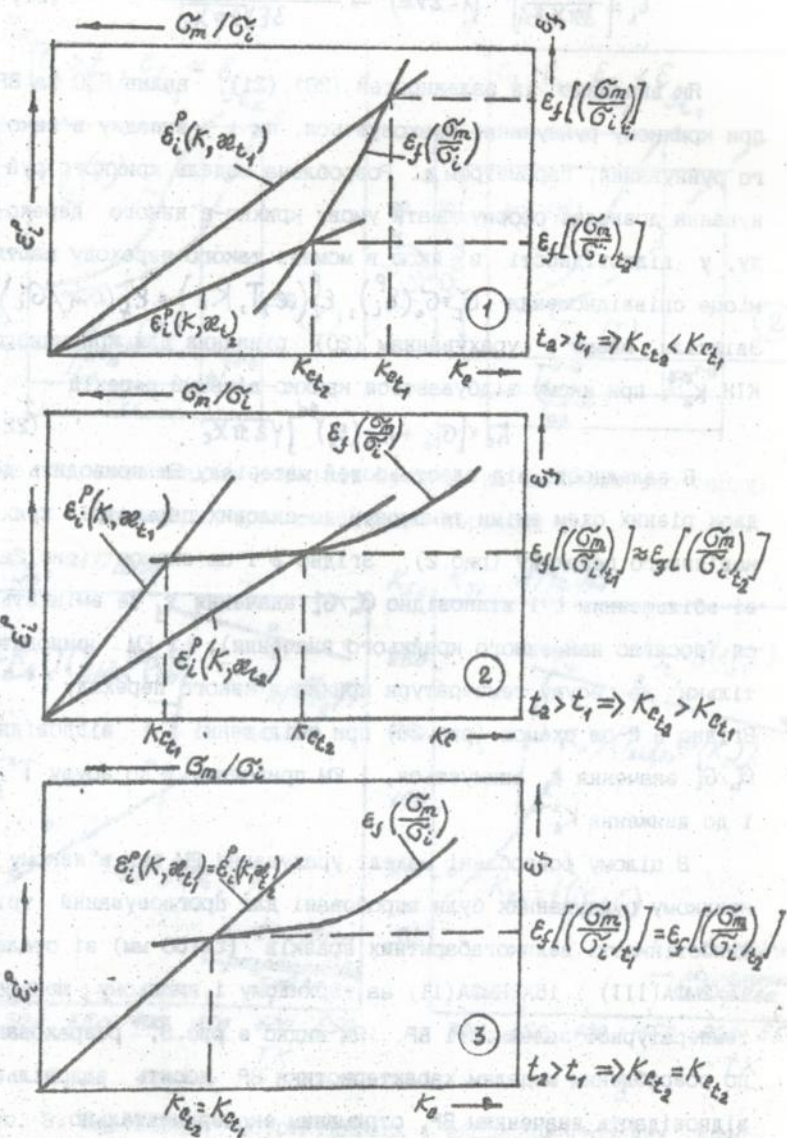


Рис.1 Схема прогнозування характеру впливу товщини ґравків на в'язкість руйнування.

$$\varepsilon_i^p = \left[\frac{K_x^2(1+\nu)}{3\pi X_c EA} \right]^{\frac{1}{1+\nu}} (1-2\nu)\alpha^{\frac{2}{1+\nu}} \frac{2(1+\nu)(1-2\nu)\alpha K_x}{3E\nu 2\pi X_c} \quad (21)$$

Як впливає іа залежностей (20), (21), вплив НДС на ВР при криккому руйнуванні враховується, як і у випадку в'язкого руйнування, параметром α . Розроблена модель криккого руйнування дозволяє сформулювати умову крикко-в'язкого переходу, у відповідності з якою в момент такого переходу мають місце співвідношення $\sigma_1 = \sigma_c(\varepsilon_i^p)$, $\varepsilon_i^p(\alpha, T, K_c) = \varepsilon_j(\sigma_m/\sigma_i)$. Звідкіля маємо в урахуванням (20) рівняння для критичного КІН K_c^{x-B} , при якому відбувається крикко-в'язкий перехід

$$K_c = \left[\sigma_{c0} + H_d(\varepsilon_j)^{nd} \right] \sqrt{2\pi X_c} \quad (22)$$

В залежності від властивостей матеріалу ЕМ приводить до двох різних схем зміни температурно-силових параметрів крикко-в'язкого переходу (рис.2). Згідно з 1-ою схемою (рис.2а) зі збільшенням t і відповідно σ_m/σ_i значення ε_j не змінюється (досягло найменшого крайнього значення), і ЕМ приводить тільки до зсуву температури крикко-в'язкого переходу T^{x-B} . Згідно з 2-ою схемою (рис.2б) при збільшенні t і відповідно σ_m/σ_i значення ε_j знижується, і ЕМ приводить і до зсуву T^{x-B} і до зниження K_c^{x-B} .

В цілому розроблені моделі урахування ЕМ при в'язкому і криккому руйнуваннях були апробовані для прогнозування тріщиностійкості великогабаритних зварків ($t=150$ мм) зі сталей 15Х2МФА(III) і 15Х2НМФА(II) на верхньому і нижньому шельфах температурної залежності ВР. Як видно з рис.3, розраховані по розробленим-моделям характеристики ВР досить задовільно відповідають значенням ВР, отриманим експериментально.

Для експериментального обґрунтування імовірностного підходу був виконаний статистичний аналіз великого масиву отриманих значень ВР, який встановив, що серед досліджених

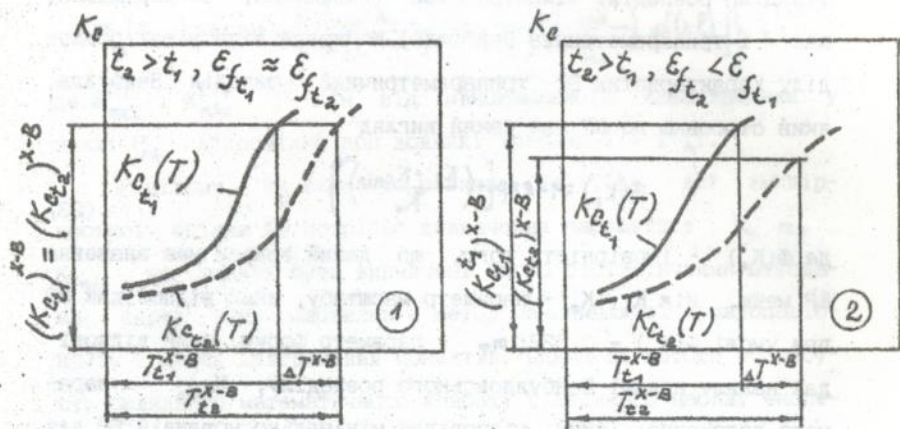


Рис. 2. Схеми впливу розмірів ґравків на температурно-силові параметри кричко-в'язкого переходу

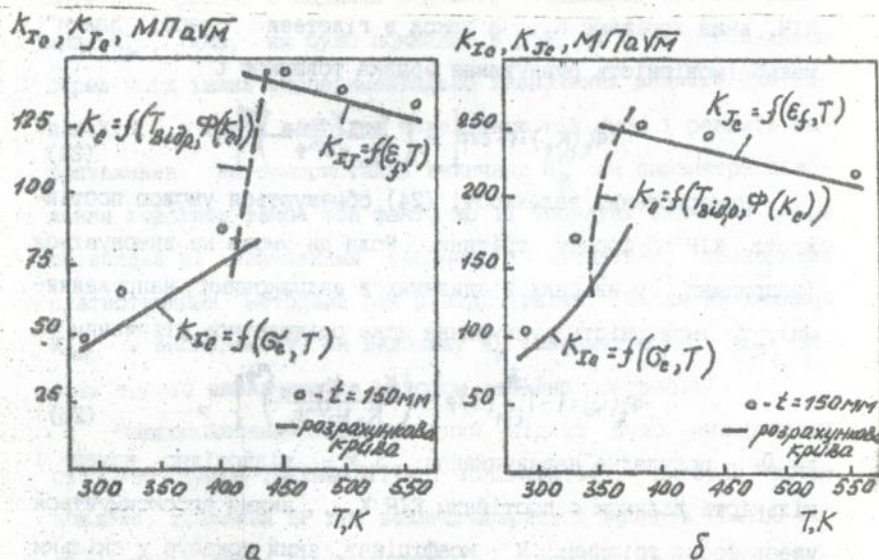


Рис. 3. Порівняння розрахункових і експериментальних даних про температурну залежність вязкості руйнування ґравків товщиною 150 мм в сталей 15X2MDA(III)- а і 15X2MDA(II)- б

функцій розподілу імовірностей (нормальна, логнормальна, дво- і трипараметрична Вейбулла) найкраще відповідає розподілу характеристик ВР трипараметричний розподіл Вейбулла, який стосовно до ВР має такий вигляд

$$\Phi(K_c) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K_c - K_{cmin}}{K_0}\right)^{m_\Phi}\right], \quad (23)$$

де $\Phi(K_c)$ - імовірність того, що даний зразок має значення ВР менш, ніж K_c ; K_0 - параметр масштабу, який відповідає ВР при умові $\Phi(K_0) = 0,632$; m_Φ - параметр форми, який відповідає нахилу прямої Вейбулловського розподілу; K_{cmin} - параметр положення, який відповідає мінімально можливій ВР для даного матеріалу. Виходячи з припущення, що рівняння (23) визначає імовірність руйнування зразка одиничної товщини при КІН, який дорівнює K_c , а також з гіпотези "слабої ланки", маємо імовірність руйнування зразка товщиною t

$$\Phi_t(K_c) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K_c - K_{cmin}}{K_0 t^{1/m_\Phi}}\right)^{m_\Phi}\right]. \quad (24)$$

Використання залежності (24) обмежується умовою постійності КІН по фронту тріщини. Коли ця умова не виконується (наприклад, у зварних з'єднаннях з залишковими напруженнями), то імовірність руйнування може оцінюватись рівнянням

$$\Phi_t(Q) = 1 - \prod_{i=1}^k \exp\left[-\left(\frac{K_{ci} - K_{cmin}}{K_0 N_i^{1/m_\Phi}}\right)^{m_\Phi}\right], \quad (25)$$

де Q_c - прикладне навантаження; i, k - відповідно номер і кількість ділянок с постійним КІН K_{ci} , якими апроксимується увесь фронт тріщини; N - коефіцієнт, який показує у скільки разів довжина i -ої ділянки більша за одиницю.

Імовірність крихкого руйнування зразка товщиною t при втомному розвитку тріщини від довжини l до довжини $l+a$ визначається рівнянням:

$$Q_{1/2}(P_{\max}) = 1 - \exp - \left\{ \left[\left(\frac{K_{\max}^{(\ell)} - K_{\min}^{(\ell)}}{K_0 t / m_{\text{ф}}} \right)^{m_{\text{ф}}} \right] \left[1 + \frac{1}{\chi_c} \int_0^{\Delta \ell} \left(\frac{K_{\max}^{(\ell+\Delta \ell)}}{K_{\max}^{(\ell)}} \right)^{m_{\text{ф}}} d(\Delta \ell) \right] \right\}, \quad (26)$$

де $K_{\max}^{(\ell)}$ і $K_{\max}^{\ell+\Delta \ell}$ - КІН від максимального навантаження у циклі P_{\max} відповідно при довжині тріщини l і $l+\Delta l$.

В цілому, як видно із рівнянь (24)-(26), для імовірностної оцінки ЕМ потрібно визначення параметрів K_0 , $m_{\text{ф}}$, $K_{\text{смір}}$, що можуть бути визначені чисто статистичними методами, серед яких основними є метод максимальної правдоподібності і метод центральних моментів. Однак ці методи потребують складного математичного апарату і великого масиву експериментальних даних, що стримує їх використання у широкій інженерній практиці. Основною особливістю імовірностного підходу цієї роботи є надання параметру положення змісту величини $K_{\text{зе}}^{(i)}$, яка, як було показано в розділі 5, є мінімальною серед усіх інших експериментально визначених величин критичних КІН, а також найбільш незалежною від умов і режимів навантаження. За використання величини $K_{\text{зе}}^{(i)}$ як параметра положення говорить також той факт, що її чисельне значення добре співпадає зі значеннями параметрів положення, визначених статистичними методами для різних сталей. Після визначення $K_{\text{смір}}$ з експерименту як величину $K_{\text{зе}}$ параметри K_0 і $m_{\text{ф}}$ досить просто визначаються методом лінійної регресії.

Запропонований імовірностний підхід було використано стосовно сталей 15Х2МФА(III) і 15Х2НМФА(II). Як було встановлено, значення ВР для великогабаритних зразків ($t=150$ мм) обох сталей добре прогнозується за допомогою цього підходу, виходячи з результатів випробувань малих зразків ($t=25$ мм).

Розроблена модель прогнозування швидкості РВТ з урахуванням впливу розмірів тіла (опосередкованого через вплив

НДС) ґрунтується на встановленій експериментально інваріантності до розмірів зразків і асиметрії цикла параметрів B' і J рівняння (5), де величина $\Delta\delta$ визначалась безпосереднім виміром. В такому способі визначення величини $\Delta\delta$ міститься одночасно і головна перевага, і головний недолік залежності (5). Головна перевага є в тому, що для визначення B' і J можуть використовуватись будь-які найбільш зручні для випробувань зразки, оскільки немає звичних вимог до розмірів зразків і немає необхідності знати відповідні тарировки (K-тарировки, J-тарировки) і прикладене навантаження. Достатньо лише фіксувати швидкість PBT і вимірювати величину $\Delta\delta$, що відповідає цій швидкості. Головний недолік полягає в тому, що при переході до конструкційного елемента виникає проблема, з яким чисельним значенням силового (KIN) або енергетичного (J-інтеграл) параметра пов'язувати конкретне значення $\Delta\delta$, що враховує як ефект розміру тіла, так і ефект циклічності пружно-пластичного деформування у вершині тріщини. В загальному випадку ця проблема може бути в наш час принципово вирішена за допомогою чисельних методів рішення тримірних циклічних пружно-пластичних задач. Однак це пов'язано з величезними технічними труднощами та затратами, і навряд чи досяжно у широкій інженерній практиці.

В цій роботі запропоновано наближене рішення даної задачі з припустимою для практики точністю, яке базується на таких основних припущеннях, які раніше підтверджувались в інших роботах: 1 - величина $\Delta\delta$ і величина $\Delta\epsilon_i$, пов'язані між собою залежністю типу Райса-Джонсона $\Delta\epsilon = C\Delta\delta/r$, де C - константа матеріалу; 2 - зона предруйнування у вершині тріщини апроксимується рядом мікрозразків, поперечний переріз яких відповідає розміру характерного структурного елемента

X_c ; 3 - перший акт втомного руйнування відбувається у найбільшому до вершини тріщини врааку, що накопичив максимальне пошкодження; 4 - НДС в межах мікроврааку рівномірне і компоненти його тензора напружень і деформацій відповідають точці, що лежить на границі між мікровоаками; 5 - матеріал е циклічно стабільним; 6 - діаграма деформування відповідає трансляційному лінійному закону зміцнення; 7 - при циклічн-му навантаженні задіається справедливою залежність (10), а також має місце залежність $\Delta \epsilon_i \Delta \sigma_i = \Delta \epsilon_i^e \sigma_i^e$; 8 - в пружно-пластичній області може бути прийняте співвідношення $\sigma_2/\sigma_1 \sim 0,6$, а для визначення співвідношення σ_3/σ_1 приймається допущення про постійність співвідношення ϵ_3/ϵ_1 і його рівність співвідношенню $\epsilon_3^e/\epsilon_1^e$ в пружній області.

Допущення 1 і 2 дають можливість перейти від залежності (5) до залежності

$$d\ell/dN = B'' (\Delta \epsilon_i)^{\beta}, \quad (27)$$

де параметр β такий же, що і в залежності (5), а параметр B'' визначається із співвідношення параметрів B', β, C, X_c .

Величина $\Delta \epsilon_i$, що відповідає прикладеному силовому (КІН), чи енергетичному (J-інтеграл) параметру і враховує вплив НДС, визначається, грунтуючись на допущеннях 3-8, теоремі про роввантаження, принципі Мазінга, умов пластичності Хубера-Міаєса для лінійного трансляційного зміцнення. При цьому враховується також притуплення втомної тріщини в кінці нульового напівциклу.

Остаточно маємо таке рівняння для визначення $\Delta \epsilon_i$:

$$\Delta \epsilon_i = C_1 \alpha_0 + \sqrt{C_2^2 \alpha_0^2 + \frac{C_2 \Delta K_I^2 (1-2\nu)^2}{E (X_c + \beta/2)} \left[1 + \frac{\beta}{2(X_c + \beta/2)} \right]^2}, \quad (28)$$

$$C_1 = \frac{\sigma_{0.2} [2(1+\nu)E' - 3E]}{6EE'}, \quad C_2 = \frac{1+\nu}{3\pi E'}$$

де α_{σ} - відношення циклічної та статичної меж пластичності, яке визначається в ході отримання рішення для $\Delta \varepsilon_i$; $\rho = \delta_{max} / 2$, δ_{max} - БРБТ у кінці нульового напівциклу, що визначається через значення ε_i за допомогою залежності Райса-Джонсона.

Підставивши в (27) значення $\Delta \varepsilon_i$, маємо рівняння для опису швидкості РБТ в залежності від КІН

$$\frac{dL}{dN} = B'' \left\{ C_1 \alpha_{\sigma} + \sqrt{C_1^2 \alpha_{\sigma}^2 + \frac{C_2 \Delta K_I^2 (1-2\nu\alpha)^2}{E(X_c + \rho/2)}} \left[1 + \frac{\rho}{2(X_c + \rho/2)} \right]^2 \right\}^n \quad (29)$$

або в залежності від J-інтегралу

$$\frac{dL}{dN} = B'' \left\{ C_1 \alpha_{\sigma} + \sqrt{C_1^2 \alpha_{\sigma}^2 + \frac{C_2 \Delta J (1-2\nu\alpha)^2}{X_c + \rho/2}} \left[1 + \frac{\rho}{2(X_c + \rho/2)} \right]^2 \right\}^n \quad (30)$$

Як виходить із залежностей (29) і (30), вплив НДС при втомному руйнуванні також, як і кричкому та в'якому руйнуваннях, враховується за допомогою параметру α .

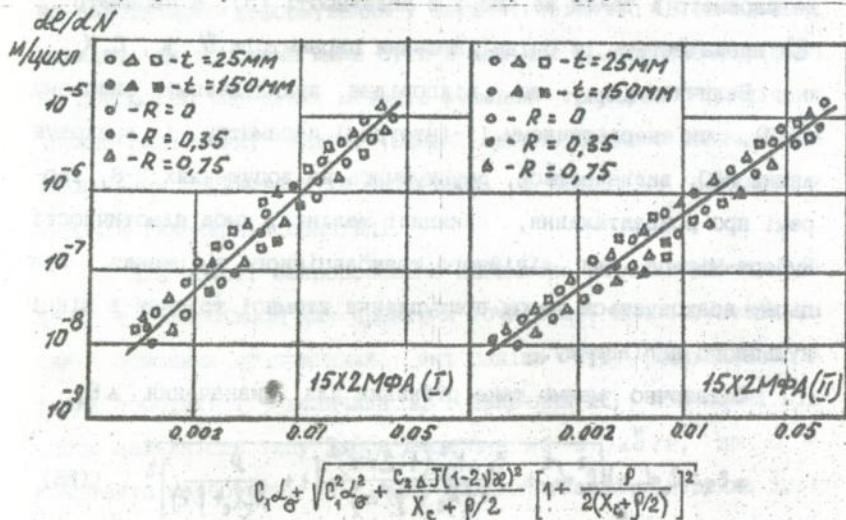


Рис.4 Подання експериментальних даних про швидкість РБТ в зразках різної товщини за допомогою залежності (30).

Рівняння (30) було використане для опису швидкості РЕТ в зразках різної товщини із сталей 15Х2МДА(І) і 15Х2МДА(І) при різній асиметрії циклу. Як видно з рис.4, залежність (30) так само, як і залежність (5), що лежить у її основі, є інваріантна до розмірів зразків та асиметрії циклу.

В цьому розділі подані результати експериментального дослідження попереднього пластичного деформування (попереднього "теплого" навантаження (ПТН)) на ВР зразків різних розмірів і на їх основі розроблена модель прогнозування ВР після ПТН з урахуванням ЕМ.

Встановлено, що ПТН може приводити до суттєвого збільшення ВР усіх досліджених матеріалів. При цьому статична ВР може збільшуватись до 2 раз, а циклічна - до 4 раз, якщо останню зрівнювати з величиною $K_{Ic}^{(d)}$. При цьому ефект ПТН має місце як для довгих кріаних тріщин, так і для коротких поверхневих тріщин, що дуже важливо з практичної точки зору, тому що саме останні найбільш характерні для конструкційних елементів, в тому числі і для корпусу атомного реактора.

Найбільш сильно ефект ПТН проявляється відносно найменшої з досліджених температур (293 К) і зменшується з ростом температури до свого практичного зникнення при певній температурі, що залежить від матеріалу та рівня ПТН. Встановлено, що ефект ПТН має місце в температурному діапазоні, в якому виконується умова $\epsilon_{Ic}^P < \epsilon_{I_{ПТН}}^P$, де $\epsilon_{I_{ПТН}}^P$ і ϵ_{Ic}^P - відповідно пластична деформація при ПТН і пластична деформація перед кінцевим руйнуванням матеріалу у вихідному стані (без ПТН). Величини ϵ_{Ic}^P та $\epsilon_{I_{ПТН}}^P$ визначаються з рівняння (21).

Встановлено, що для всіх досліджених матеріалів оптимальним рівнем ПТН є $K_{ПТН} / K_{Ic}(T_{ПТН}) = 0,75 \dots 0,8$, де $K_{ПТН}$ - КІН при ПТН, $K_{Ic}(T_{ПТН})$ - ВР при температурі ПТН. При меншо-

му рівні ПТН відбувається інтенсивне зниження ПТН, при більшому - різко підвищується імовірність повного руйнування при ПТН, тому що $K_{\text{ПТН}}$ входить у смугу розкиду $K_{\text{Дс}}(T_{\text{ПТН}})$. Встановлено, що оптимальні температурно-силові режими ПТН залежать від матеріалу та розмірів зразків. Різниця в оптимальних режимах ПТН для матеріалів (основний метал і зварний шов), що йдуть на виготовлення одного типу корпусу реактора, вимагає, щоб ПТН проводилось або по режимах, які є прийнятними одночасно для двох матеріалів, або по технології, що забезпечує окреме ПТН кожного з цих матеріалів. В межах цієї роботи розроблено спосіб практичної реалізації методу ПТН, який відповідає вказаним вище вимогам.

Встановлено, що для досліджених матеріалів основними факторами, що обумовлюють позитивний ефект ПТН, є як зміна геометрії (затуплення) вершини вихідної тріщини, так і підвищення критичного напруження в зоні "процесу", яке контролює-старт тріщини по механізму сколу. Грунтуючись на встановлених механізмах ПТН розроблено фізико-механічну модель прогнозування ВР після ПТН з урахуванням впливу НДС. При цьому залежність σ_c від $\epsilon_{\text{ПТН}}^p$ враховувалась за допомогою рівняння (1), а для урахування затуплення вершини тріщини і викликаної їм зміни розподілу σ_1 використовувалось рівняння

$$\sigma_1 = (K_1 / \sqrt{2\pi(x + \rho/2)}) \left[1 + \frac{\rho}{2(x + \rho/2)} \right], \quad (31)$$

де $\rho = \delta_{3\text{эл}} / 2$. Для прогнозування залишкової ВРБТ після ПТН $\delta_{3\text{эл}}$ аналізувались діаграми "Р-" при ПТН та наступному розвантаженні, які в загальному випадку можуть бути розподілені на три ділянки - I, II, III. На ділянці I, в силу хоча і малої, але всеж-таки відмінності від нуля радіуса вершини реальної вихідної тріщини, буде мати пружне розкриття вершини тріщини і лінійка залежність між приростом ΔP і приростом $\Delta \delta$.

Тому, якщо $K_{ПТН}$ не перебільшує K_{IH} , який відповідає крайній точці ділянки I, то затуплення тріщини не буде. На ділянці II, що відповідає умовам маломасштабної плинності, величина $\Delta\delta$ пропорційна ΔP^2 . На ділянці III, що відповідає умовам великомасштабної плинності величина $\Delta\delta$ пропорційна приросту ΔV . Розвантаження з ділянок II і III приводить до утворення δ_{30A} . При цьому може мати місце як повністю пружне розвантаження, так і розвантаження з частковою зворотною течією. Положення ділянок I, II, III визначається властивостями даного матеріалу, рівнем ПТН та НДС, що обумовлює стиснення пластичної деформації у вершині тріщини, тобто параметром α .

Для визначення ВР після ПТН K_f використовувалась відповідна модель крихкого руйнування, згідно з якою в рівнянні (31) робилась зміна K_x на K_f , x на χ_c , ρ на $\delta_{30A}/2$ і G_1 на G_0 . Рішення отриманого рівняння відносно K_f приводить до

$$K_f = \sqrt{2\pi(\chi_c + \delta_{30A}/4)} \left[1 + \delta_{30A}/(4\chi_c + \delta_{30A}) \right] \times \\ \times \left\{ G_0 + H_d \left[\left(\frac{K_{ПТН}^2 (1+\nu)}{3\pi \chi_c EA} \right)^{\frac{1}{1+n}} (1-2)\alpha^{\frac{2}{1+n}} - \frac{(1+\nu)(1-2\nu)\alpha}{3EV2\pi\chi_c} K_{ПТН} \right] \right\} \quad (32)$$

Використовуючи в рівнянні (32) різні вихідні дані, що стосуються температури та рівня ПТН, можна отримати серію прогнозуємих характеристик і відповідно вибрати режим ПТН, який забезпечує максимальне підвищення опору крихкому руйнуванню. Якщо отримати таку ж серію прогнозуємих характеристик для другого матеріалу, наприклад, для металу зварного шва, то можна отримати режим ПТН, який буде оптимальний одночасно для двох матеріалів. Якщо в дану модель вводити поперемінно вихідні дані, що стосуються тільки одного з факторів підвищення ВР після ПТН, то можна оцінити конкретний внесок кожного з цих факторів. Якщо в залежності від матеріалу внеском

якого-небудь з факторів можна анектувати через незначний його вплив, то розрахунки по моделі значно спрощуються.

Розроблена модель використовувалась для прогнозування характеристик ВР після різних рівнів ПТН граків товщиною 150 мм зі акричних сталей 15Х2МФА(III) і 15Х2НМФА(II). Результати прогнозування задовільно відповідають експериментальним даним, які цілком вміщуються в області, що обмежується 95%-ними довірчими інтервалами (рис.5).

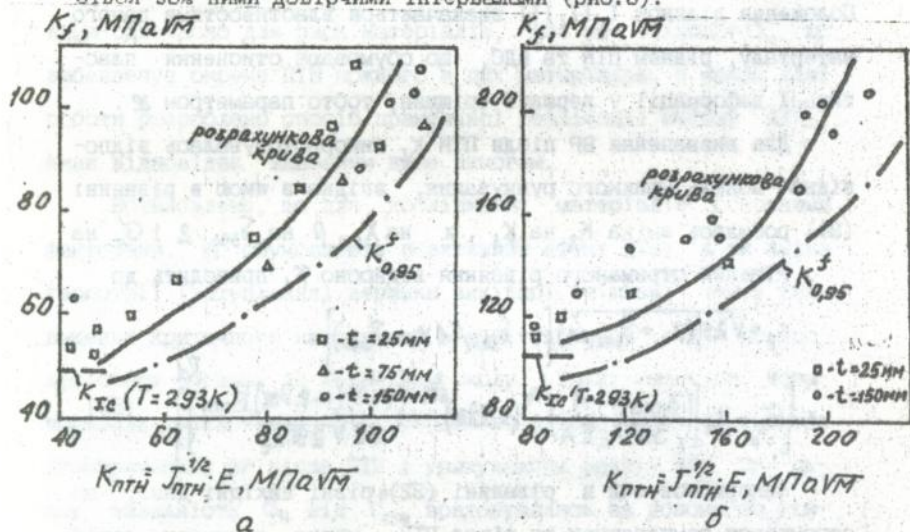


Рис.5 Залежність вязкості руйнування після ПТН K_f від рівня ПТН $K_{пТН}$ для сталей 15Х2МФА(III)-а і 15Х2НМФА(II)-б

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. На основі аналізу наявних літературних даних показано, що проблема ефекту масштабу (ЕМ) є однією з найбільш складних і актуальних проблем сучасної механіки руйнування і вимагає для подальшого помітного просування в своєму рішенні великої комплексної роботи, в якій, з одного боку, було б здійснено глибоке експериментальне дослідження впливу розмі-

рів зразків на характеристики тріщиностійкості конструкційних сплавів широкого класу, а, з другого боку, були б розроблені методи кількісного прогнозування ЕМ при основних видах руйнування матеріалів з тріщинами - крихкому, в'язкому і втомному, які дозволяли б при цьому дати ясне фізико-механічне пояснення суперечливому характеру ЕМ і його природі.

2. Для досягнення поставлених в цій роботі цілей розроблено комплекс оригінальних методів і методик досліджень, які дозволяють вирішувати такі методичні задачі: визначити параметри локального руйнування конструкційних сплавів в діапазоні температур 77...823 К з урахуванням напруженого стану і попереднього пластичного деформування; визначити на зразках різної товщини, включаючи натурну товщину стінки корпусу атомного реактора, з різною геометрією, схемою навантаження, довжиною і формою тріщини характеристики статичної та циклічної в'язкості руйнування (ВР) в діапазоні температур 77...823 К; досліджувати на зразках різної товщини, включаючи натурну, закономірності стабільного та нестабільного розвитку втомних тріщин різних форм і розмірів у широкому діапазоні зміни температури досліджень (77...823 К) та режимів одночастотного і двучастотного циклічного навантаження; визначити на зразках оригінальної конструкції товщиною до 150 мм динамічну (по зупинці тріщини) ВР; досліджувати на зразках натурної товщини з різною геометрією, схемою навантаження, довжиною і формою тріщини вплив попереднього пластичного деформування на підвищення статичної та циклічної ВР.

3. Отримано великий обсяг унікальних експериментальних даних про параметри локального руйнування та характеристики тріщиностійкості різних конструкційних сплавів, в тому числі

сталей 15Х2МФА і 15Х2НМФА та їх зварних з'єднань, які використовуються для виготовлення корпусів атомних енергетичних реакторів типу ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 і які піддані різним режимам спеціальної термообробки, що імітує вплив різних доз радіаційного опромінювання. З одного боку, експериментальні результати роботи дають основу для узагальнюючих наукових висновків про ЕМ в механіці руйнування, тому що вони отримані при великому наборі досліджених матеріалів ($\sigma_{0.2} = 270 \dots 1500$ МПа); різних видах (статичне, циклічне і динамічне) та схемах (розтяг, згин) навантаження; в широкому діапазоні зміни товщини зразків ($t = 12.5 \dots 150$ мм); довжини ($l/w = 0.5 \dots 0.8$), форми ($l/2a = 0.2 \dots 0.6$) і типу (крівна, поверхнева) тріщини; в широкому діапазоні зміни температури досліджень ($T = 77 \dots 573$ К); різних режимах одночастотного та двочастотного навантаження. З другого боку, експериментальні дані про тріщиностійкість корпусів атомних реакторів, які отримані на зразках натурної товщини з урахуванням основних конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів, можуть бути безпосередньо використовані як службові характеристики і мають в зв'язку з цим велике практичне значення.

4. Встановлено, що для досліджених оплавів критичне напруження мікроскоду є малочутливим до зміни напруженого стану, якщо температура випробувань достатньо низька, щоб дозволити розвиток помітних пластичних деформацій перед крихким руйнуванням. У протилежному разі збільшення триосності напруженого стану приводить до зміни критичного напруження мікроскоду і даний вплив опосередкований через вплив напруженого стану на попередню пластичну деформацію.

5. Отримані експериментальні дані про статичну та циклічну ЕР конструкційних сплавів широкого класу свідчать про

складний суперечливий характер ЕМ, який залежить, в першу чергу, від діапазону зміни товщини зразків та фізико-механічних властивостей матеріалу, в тому числі і визначених впливом технологічних та експлуатаційних факторів. В цілому, отримані дані підтверджують відзначену в різних літературних джерелах можливість виявлення трьох різних характерів залежності ВР від розмірів зразків (ВР може збільшуватись, зменшуватись і залишатись незмінною зі збільшенням розмірів зразків), прогнозування і пояснення яких в межах запропонованих раніше підходів не уявляється можливим.

6. Встановлено, що вплив розмірів зразків є складним і суперечливим не тільки на характеристики в'язкості руйнування, але й на закономірності розвитку втомних тріщин (РВТ).

Для високоміцних окрихчених сплавів типу сталі 15Х2МФА(II), втомне руйнування яких відбувається в умовах плоскої деформації в усьому діапазоні зміни товщини зразків і КІН, ЕМ не виявляється, і швидкість РВТ однозначно визначається значенням прикладеного КІН. Для мало- і середньоміцних сплавів типу сталей 08Х18Н10Т і 15Х2МФА(I), втомне руйнування яких супроводжується розвитком значних пластичних деформацій, що залежать від розмірів зразка, останні виявляють неоднозначний вплив на закономірності РВТ в усьому діапазоні зміни КІН від K_{ch} до K_{ch}^s ; характер цього впливу визначається реальним напружено-деформованим станом (НДС) у вершині тріщини, залежним як від розмірів зразків, так і від залишкових деформацій і напружень, обумовлених циклічності пружно-пластичного деформування і технологічними факторами.

Режим циклічного навантаження (асиметрія циклу, двочастотність) в цілому не змінюють характер впливу розмірів зразків на закономірності РВТ за винятком біляпорогової об-

ласті, де розвиток втомної тріщини в значній мірі визначається процесом оксидування, що залежить від товщини зразків та режимів циклічного навантаження і приводить до суттєвого підсилення ефекту закриття втомної тріщини і відповідному зниженню ефективного КІН.

7. Встановлено, що для досліджених сплавів, які представляють за своїми механічними властивостями широкий клас конструкційних сплавів, швидкість РВТ як в пружній, так і в пружно-пластичній області однозначно контролюється величиною розкриття вершини тріщини, що визначена безпосереднім виміром і відображає реальний НДС у вершині тріщини з урахуванням розмірів і геометрії зразків, довжини і форми тріщини, циклічності пружно-пластичного деформування. При цьому залежність швидкості РВТ від розмаху величини розкриття вершини тріщини інваріантна не тільки до вказаних факторів, але й до асиметрії циклу навантаження.

8. При нестабільному (стрибокподібному) розвитку втомних тріщин у високоміцних скрихчених сталях розміри і геометрія зразків, довжина і форма тріщини, асиметрія циклу навантаження не впливають на критичні КІН, довжину ділянки стабільного зростання тріщини і розмір крихкого стрибка тріщини, який контролюється зоною циклічного пошкодження матеріалу у вершині тріщини. При цьому розмір самої зони циклічного пошкодження визначається максимальним КІН у циклі, а число циклів навантаження, необхідне для циклічного пошкодження зони, - його амплітудою.

9. Розроблена методологія прогнозування ЕМ для конструкційних сплавів широкого класу, оснований як на детермінічному, так і імовірністному підходах до проблеми ЕМ і урахуванні зв'язку між ЕР, розмірами тіла, НДС, параметрами ло-

кального руйнування, стисненням пластичної деформації, статистичною природою ВР. В межах методології введено параметр НДС \mathcal{E} , який є явною функцією всіх трьох головних нормальних напружень у зоні передруйнування у вершині тріщини і дозволяє кількісно ураховувати вплив даного НДС на розвиток пластичної деформації, що передусє основним видам руйнування матеріалу з тріщиною - в'язкому, крихкому і втомному; розроблені відповідні моделі прогнозування характеристик ВР при в'язкому, крихкому і втомному руйнуванні з урахуванням впливу розмірів тіла як опосередкованого через зміну НДС.

10. Відповідно до розробленої моделі в'язкого руйнування, яка ґрунтується на фізико-механічній моделі руйнування, що контролюється досягненням пластичною деформацією у вершині тріщини \mathcal{E}_i^p критичного значення \mathcal{E}_c , припускається, що як осяма величина \mathcal{E}_i^p , яка передусє старту тріщини по механізму коалесценції пор, так і критична деформація \mathcal{E}_c є функції конкретних параметрів НДС, а саме: величина \mathcal{E}_i^p є функція параметру \mathcal{E} , а критична деформація \mathcal{E}_c є функція триосності напруженого стану σ_m/σ_i . При цьому характер ЕМ (зростання або зниження ВР зі збільшенням розмірів тіла) буде залежати від фізико-механічних властивостей матеріалу, що визначають чутливість величин \mathcal{E}_i^p і \mathcal{E}_c відповідно до зміни параметрів \mathcal{E} і σ_m/σ_i , яка викликана зміною розмірів тіла.

Розроблена модель має дві модифікації, одна з яких дозволяє прогнозувати ВР великогабаритних тіл з результатів випробувань тільки малих циліндричних зразків (гладеньких та з концентратором), друга - з результатів випробувань циліндричних зразків без тріщини і малих зразків з тріщиною.

11. В межах загальної методології розроблена модель крихкого руйнування з урахуванням розмірів тіла, що ґрунту-

ється на фізико-механічній моделі руйнування, яке контролюється критичним напруженням сколу, залежним, в свою чергу, від попередньої пластичної деформації, а також на припущенні, що зміна розмірів тіла впливає на ВР в тій мірі, в якій впливає викликана нею зміна НДС, що оцінюється параметром \mathcal{E} , на пластичну деформацію перед крихким руйнуванням сколом.

Модель дозволяє прогнозувати вплив напруженого стану на температурно-силові параметри крихко-в'язкого переходу, виходячи із умови, що перехід від старту тріщини по механізму сколу до старту тріщини по механізму коалесценції пор відбувається тоді, коли вперше пластична деформація у вершині тріщини, що є функція температури, КІН і параметра \mathcal{E} , досягає величини критичної деформації ϵ_c , яка є функція σ_m, σ_c , раніш, ніж нормальне напруження σ_c досягає критичного напруження мікросколу σ_c . Відповідно до даної моделі збільшення товщини зразку може в одних випадках приводити тільки до зсуву температури крихко-в'язкого переходу, а в інших - і до зсуву температури крихко-в'язкого переходу, і до зниження критичного КІН, при якому цей перехід відбувається.

12. Одержав новий розвиток імовіростний підхід до прогнозування ЕМ для випадків крихкого руйнування, що ґрунтується на трипараметричному розподілі Вейбулла, відмінною особливістю якого є визначення одного з параметрів функції розподілу (параметра положення $K_{e_{min}}$) не загальноприйнятими статистичними методами, а безпосереднім експериментом, що значно зменшує вимоги до об'єму виборки і зпрощує математичний апарат. При цьому параметру $K_{e_{min}}$ відповідає величина критичного КІН при першому нестабільному стрибку втомної тріщини $K_{fc}^{(s)}$, яка є з результатів великого об'єму експериментальних даних мінімальною і найбільш інваріантною серед усіх

інших експериментально визначених величин критичних КІН.

13. Виходячи з експериментально встановленої для конструкційних сплавів широкого класу інваріантності до розмірів вразків і асиметрії циклу залежності швидкості РВТ від розмаху розкриття вершини тріщини та наближеного рішення тримірної циклічної задачі отримано рівняння для опису швидкості РВТ, яке дозволяє прогнозувати швидкість РВТ в залежності від силового (КІН) чи енергетичного (J - інтеграл) параметрів навантаження з урахуванням реального НДС у вершині втомної тріщини, обумовленого такими факторами як розміри тіла і циклічність пружно-пластичного деформування. При цьому всі константи і параметри, які входять у структуру рівняння і необхідні для врахування вказаних факторів, можуть бути отримані з результатів втомних випробувань малих лабораторних вразків і за допомогою існуючих рішень статичних задач.

14. Встановлено, що попереднє "тепле" навантаження (ПТН) матеріалів з тріщиною при температурі, яка вища за їх температуру крихко-в'язкого переходу, є ефективним методом підвищення опору крихкого руйнування великогабаритних тіл із цих матеріалів і може бути рекомендоване для практичної реалізації стосовно корпусів атомних реакторів і інших відповідальних конструкцій, раптове крихке руйнування яких недопустимо як при нормальній експлуатації, так і при аварійних ситуаціях. При цьому оптимальний температурно-силовий режим ПТН визначається як властивостями даного матеріалу, так і його товщиною, яка контролює інтенсивність пластичного деформування в процесі ПТН.

15. Виходячи з установлених механізмів ефекту ПТН, розроблено фізико-механічну модель прогнозування ВР після ПТН з урахуванням впливу НДС у вершині тріщини при ПТН. Модель

дозволяє з результатів випробувань малих зразків прогнозувати ВР великогабаритних тіл, підданих процесу ПТН з заданими температурно-силовими режимами. При цьому найбільш оптимальні режими ПТН також можуть бути визначені за допомогою даної моделі в тому числі і для кількох матеріалів, складаючих конструкцію і одночасно підданих процесу ПТН.

16. Розроблений і отримав визнання в зацікавлених організаціях оригінальний метод практичної реалізації ПТН, який виключає недопустиме перевантаження усього відповідального елемента типу корпусу атомного енергетичного реактора.

Основні публікації за матеріалами дисертаційної роботи

1. Влияние размеров образцов на трещиностойкость корпусных теплоустойчивых сталей / В.Т.Троценко, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко и др. // Пробл. прочности. - 1982. - №10. - С.3-11.
2. Влияние асимметрии цикла нагружения на трещиностойкость конструкционных сплавов / П.В.Ясний, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко и др. // Пробл. прочности. - 1982. - №11. - С.29-34.
3. Влияние масштаба и режимов циклического нагружения на характеристики трещиностойкости теплоустойчивых сталей / В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко, В.Т.Тимофеев, В.А.Игнатов // Proc. 7th Colloq. Mech. Fatigue metals, Mishkolo, 1983. - 1983. - Vol.2. - P.103-119.
4. В.Г.Каплуненко Методика исследования трещиностойкости конструкционной стали в момент старта и остановки трещин // Пробл. прочности. - 1984. - №10. - С.59-63.
5. Трещиностойкость металла швов сварных соединений из стали 15Х2МФА реальных толщин / В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко, В.Т.Тимофеев, Т.А.Черненко // Вопросы судостроения. - Сер. сварки. - Вып. 39. - 1985. - С. 27-33.

6. Методика исследования закономерностей неустойчивого развития трещин при циклическом нагружении с использованием явления акустической эмиссии /В.Т.Трощенко, В.А.Стрижало, В.Г.Каплуненко и др. //Пробл.прочности.- 1985. - N12. - С.30-33.
7. В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко Влияние размеров образцов на характеристики циклической трещиностойкости теплоустойчивых сталей. Сообщ. 1 //Пробл.прочности. - 1986. - N4. - С.3-9.
8. В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко Влияние размеров образцов на характеристики циклической трещиностойкости теплоустойчивых сталей. Сообщ. 2 //Пробл.прочности. - 1986. - N8. - С.13-18.
9. В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко, Т.Н.Матченко Расчет коэффициента интенсивности напряжений для металла сварного шва с криволинейным фронтом трещины //В сб.: Конструкционная прочность и механика разрушения сварных соединений. - Ленинград, 1986. - С.25-29.
10. Использование эффекта АЭ для исследования закономерностей неустойчивого развития трещин при циклическом нагружении /В.Т.Трощенко, В.А.Стрижало, В.Г.Каплуненко и др. //Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. - 1986. - N3. - С.47-49.
11. Определение коэффициента интенсивности напряжений для компактного образца с криволинейной трещиной при трехосном напряженно-деформированном состоянии /А.С.Сахаров, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко, Т.Н.Матченко //Пробл.прочности. - 1986. - N11. - С.72-76.
12. Влияние размеров образцов и асимметрии цикла на закономерности неустойчивого (скачками) развития трещин при циклическом нагружении /В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко

- ненко, Б.Т. Тимофеев /Пробл. прочности. - 1987. - №3. - С.8-12.
13. Влияние асимметрии цикла нагружения на характеристики трещиностойкости теплоустойчивых сталей /В.В. Покровский, В.Г. Каплуненко, Ю.И. Звездин, Б.Т. Тимофеев //Пробл. прочности. - 1987. - №11. - С.8-13.
14. Влияние температуры на характеристики трещиностойкости стали разного уровня прочности /В.Т. Трошенко, П.В. Ясный, В.Г. Каплуненко и др. //Пробл. прочности. - 1988. - №9. - С.8-13.
15. Особенности развития трещин в материалах сварных соединений больших сечений //В.В. Покровский, В.Г. Каплуненко, В.В. Захарченко и др. //Пробл. прочности. - 1989. - №5. - С.3-11.
16. Трещиностойкость крупногабаритных сварных соединений из сталей 15Х2НМФА и 15Х2МФА /В.В. Покровский, В.Г. Каплуненко, Г.П. Каргов и др. //В сб.: Современные способы обеспечения надежности и прочности сварных конструкций. - Ленинград - 1989. - С.11-17.
17. The effect of metallurgical factors on crack resistance of pressure vessel materials /V.T. Troshchenko, V.V. Pokrovsky, V.G. Kaplunenko et al. //Proc. 10th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology. Anaheim, California, USA, 1989. - 1989. - G.09.
18. В.Г. Каплуненко, Т.Н. Матченко О форме фронта усталостной трещины //Пробл. прочности. - 1989. - №8. - С.18-23.
19. В.В. Покровский, В.Г. Каплуненко, Ю.С. Скоренко Влияние размеров образцов и режимов циклического нагружения на циклическую трещиностойкость стали 15Х2МФА //Пробл. прочности. - 1990. - №11. - С.27-32.
20. Ultimate state substantiation and methods of the life extension for PWR pressure vessel /V.T. Troshchenko, V.V. Pokrovsky, V.G. Kaplunenko et al. //Proc. 11th Int. Conf. on

Structural Mechanics in Reactor Technology. Tokyo, Japan, 1989 - 1989. - G.0315 - P.71-76.

21. Влияние масштаба на трещиностойкость корпусных материалов в области вязко-хрупкого перехода /В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко, В.Т.Тимофеев, Т.А.Чернаенко //В сб.: Механика разрушения и прочность сварных соединений и конструкций - Ленинград. - 1991. - С.45-50.

22. Оценка трещиностойкости стали 15Х2МФА в больших сечениях по результатам испытаний малых образцов /В.П.Науменко, В.А.Раковский, Г.С.Волков, В.Г.Каплуненко //Пробл.прочности. - 1991. - №5. - С.23-28.

23. V.T.Troshchenko, V.V.Pokrovsky, V.G.Kaplunenko The effect of metallurgical factors on crack resistance of pressure-vessel materials //Nuclear Engineering and Design. - 1992. - 136 - P.225-237.

24. Теплая опрессовка - способ повышения сопротивления хрупкому разрушению и увеличения радиационного ресурса корпусов ВВЭР / В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко и др. //В сб. трудов II Международной научно-технической конференции "Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации АЭС". Санкт-Петербург, 1992. - С.227-251.

25. A promising methods for enhancing resistance of pressure vessels to brittle fracture /V.V.Pokrovsky, V.T.Troshchenko, V.G.Kaplunenko et al. //Int. J. Pres. Ves. and Piping. - 1994. - 58 - P.9-24.

26. А.с. 1045063 СССР. Приватический образец для определения вязкости разрушения материала /В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко и др. //В.И. - 1983. - №36.

27. А.с. 1133542 СССР. Способ регистрации развития трещин в материалах /В.В.Покровский, В.Т.Трощенко, В.Г.Каплуненко и

др. //В.И. - 1985. - №1.

28.А.с. 1747393 СССР. Образец для испытаний на трещиностойкость / В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко, Н.Э.Назаренко //В.И. - 1992. - №26.

29.А.с. 1748055 СССР. Установка для испытания на трещиностойкость плоских образцов с концентратором //В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко //В.И. - 1992. - №26.

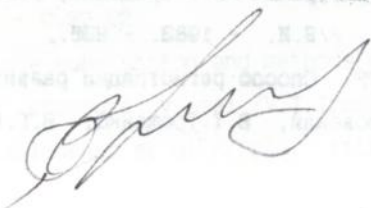
30.В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко, Ю.С.Скоренко Способ определения порогового коэффициента интенсивности напряжений // Положительное решение по заявке на изобретение №4843205/28.

31.Способ испытания материалов на трещиностойкость. В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко, П.П.Ворошко //Положительное решение по заявке на изобретение №49444492/28/048484.

32.Патент СССР и Украины. Способ повышения стойкости элементов конструкций к распространению трещин /В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, В.Г.Каплуненко и др.

33.Предельное состояние металлов с трещинами при циклическом нагружении. Модель и методы определения вязкости разрушения конструкционных сплавов при циклическом нагружении /В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, П.В.Ясний, В.Г.Каплуненко //АН Украины, Ин-т пробл.прочности. Препринт, Киев, 1988. - 49с.

34.Предельное состояние металлов с трещинами при циклическом нагружении. Прогнозирование долговечности с учетом стадии нестабильного развития усталостных трещин /В.Т.Трощенко, В.В.Покровский, П.В.Ясний, В.Г.Каплуненко //АН Украины, Ин-т пробл.прочности. Препринт, Киев, 1988. - 30с.



Калпуненко В.Г. Прогнозирование характеристик трещиностойкости теплоустойчивых сталей с учетом влияния размеров образцов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела, Ин-т проблем прочности НАН Украины, Киев, 1994.

Защищается 56 научных работ, содержащих результаты исследований влияния размеров тела на трещиностойкость конструкционных сплавов. Установлено существенное влияние размеров тела на характеристики статической и циклической трещиностойкости. Разработана научная методология прогнозирования трещиностойкости сплавов с учетом влияния размеров тела. Результаты работы используются в нормативных документах по проектированию и эксплуатации корпусов атомных реакторов.

Kaplunenko V.G. Prediction of Fracture Toughness Characteristics for Heat-Resistant Steels Considering the Specimen Size Effect.

Dissertation for a Doctor of Engineering Science Degree in the speciality 01.02.04 - Mechanics of a Deformable Solid, Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1994.

56 scientific works are being defended, which involve investigations of the influence of a body size on the fracture toughness of steels. It has been found that the dimensions of a body can affect appreciably the fracture toughness. Scientific methodology has been developed for prediction of fracture toughness of steels with the account taken of the body size effect. The results of the work have been used in the codes and standards on designing and operation of nuclear reactor vessels.

Ключові слова:

в'язкість руйнування, трещиностійкість, ефект масштабу.

454797

AB 31.347

AB 31.347