

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г.В.КАРПЕНКА

На правах рукопису

КОГУТ  
МИКОЛА СТЕПАНОВИЧ

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТРІЩИНІСТОЇКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ  
МАТЕРІАЛІВ І ЇХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ В УМОВАХ  
КРИХКОГО ТА КВАЗІКРИХКОГО РУЙНУВАННЯ

Спеціальність 01.02.04 - механіка деформівного  
твердого тіла

Д и с е р т а ц і я

на здобуття вченого ступеня доктора  
технічних наук

Львів - 1994

AB 30.579

Робота виконана у Державному університеті "Львівська політехніка".

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук РУСИНКО К.М.; доктор фізико-математичних наук ОСАДЧУК В.А.; доктор технічних наук ЯСНІЙ П.В.

Провідча організація - Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона, м.Київ.

Захист відбудеться "29" 06 1994 р.  
"15" год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої ради 016.42.01 у фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка АН України за адресою: 290061, Львів, МСГ, вул.Наукова, 5.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту.

Автореферат розіслано "27" 05 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради,  
доктор технічних наук

НИКИФОРЧИН Г.М.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00777515 (W)

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Актуальність теми

Проблема надійності та довговічності елементів конструкцій і їх зварних з'єднань нерозривно пов'язана з удосконаленням прогресивних методів розрахунку, а також розробкою ефективних способів підвищення міцності конструкційних матеріалів і встановленням їх тріщиностійкості при різних видах навантажень. Актуальність цієї проблеми зростає у зв'язку з розвитком нової техніки та розширенням номенклатури нових матеріалів для інженерної практики, зокрема високоміцні сталі та сплави.

Важливи в цій галузі є вивчення явищ крихкого руйнування конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань з урахуванням експлуатаційних факторів /низькі температури, високі робочі тиски, агресивні середовища, динаміка навантаження тощо/.

Аналіз катастрофічних руйнувань морських суден, трубопроводів, літаків, резервуарів високим тиском, а також екстремально навантажених елементів конструкцій транспортного машинобудування, гірничого обладнання показує, що основною першопричиною їх руйнування, як правило, є дефекти типу тріщин і слабкий епір матеріалів поширених в ньому тріщини.

У зв'язку з цим, для визначення надійності та довговічності таких конструкцій необхідно враховувати здатність матеріалу чинити епір поширення в ньому тріщини, а це, в свою чергу, вимагає розробки ефективних методів оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань.

Важливість вивчення процесів поширення тріщини в конструкційних матеріалах і зварних з'єднаннях зумовлена також і тим, що випадки руйнування конструкцій свідчать про недостатність оцінки міцності матеріалів на основі тільки традиційних /стандартних/ механічних характеристик / $\sigma_s, \sigma_{0.2}, \delta, \psi, K_{CV}$  та ін./.

За останні роки проблема міцності та руйнування матеріалів з позицій їх тріщиностійкості інтенсивно розробляється науковцями та інженерами в Україні та за її межами. З цього приводу розроблено ряд методів і засобів випробувань конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань щодо їх стійкості до крихкого руйнування, тобто методів визначення характеристик тріщиностійкості  $K_{IC}$  або  $K_{IC}$  матеріалу, критичного розкриття тріщини в її тупиковій частині  $\delta C$ ; густини енергії руйнування  $\gamma^*$ , сумарної роботи поширення тріщини  $K_{CT}$  на зразках з надрізом-тріщиною тощо.

В цьому плані слід відзначити праці відомих вчених: О.Є.Андрейківа, У.Брауна, Х.Ф.Бюккнера, Г.С.Васильченка, В.О.Винокурова, М.Гензамера, А.А.Гріффітса, Д.С.Дагдейла, Б.О.Дроздовського, Т.Бюкборі, В.С.Іванової, Д.Р.Ірвіна, Т.Капазави, Б.С.Касахіна, С.Є.Ковчика, А.Х.Котрела, А.Я.Красовського, В.Н.Ларіонова, А.О.Лебедєва, М.Я.Леонова, Г.Лібізіна, М.О.Махутова, Є.М.Морозова, Н.Ф.Мотта, В.П.Науменка, Г.О.Ніколаса, Дж.Нотта, Г.М.Никифорчина, В.А.Осадчука, В.В.Панасюка, П.С.Паріса, В.З.Партона, Г.С.Писаренка, В.В.Покровського, В.І.Похмурського, В.М.Работнова, О.М.Романіза, К.М.Русинка, М.П.Саврука, К.Сато, С.В.Серенсена, Дж.Срулі, К.Тернера, М.Тюеда, В.Т.Троценка, В.І.Труф'якова, А.А.Уелса, Я.Б.Фрідмана, К.Хеккеля, Г.П.Черепанова, С.Я.Яреми, П.В.Яснія та інших.

Досить повний аналіз стану наукових і прикладних досліджень з цієї проблеми наведено в 4-х томіях монографії "Механіка розрушення и прочність матеріалів", під ред. В.В.Панасюка /Київ, "Наукова думка", 1988-1990 р.р./ та 7-ми томіях енциклопедії "Разрушение", під ред. Г.Лібовіце /Москва, "Мир" - "Машиностроение", 1973-1976 р.р./ та відомих стандартів.

Разом з тим, інженерні методи визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів, зокрема з урахуванням технологічних факторів, ще не одержали належного розвитку /див. огляд в [1,2,18,49]/. Існуючі підходи часто дуже складні в технічному виконанні, вимагають потужних випробувальних машин. Мало також робіт, присвячених визначенню характеристик тріщиностійкості конструкційних матеріалів в залежності від технологічних, металургійних, структурних і інших факторів з урахуванням впливу робочих середовищ, високих тисків, низьких температур, масштабного ефекту тощо. Надстатньо вивчені явища квазікрихкого руйнування, особливо металу зва та прилежної області в залежності від режимів термообробки та способів зварювання однорідних і неоднорідних зварних з'єднань.

Робота присвячена розв'язання цих питань.

Мета та завдання роботи полягає в розв'язанні важливої науково-технічної проблеми: створення методології експериментальних досліджень і розробка на цій основі ефективних методів для визначення характеристик тріщиностійкості конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань з урахуванням умов їх експлуатації.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом комплексного розв'язання наступних завдань:

1. Формулювання і обґрунтування постулатів методології щодо визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів.
2. Підбір для проведення експериментальних досліджень і обґрунтування відповідності ним постулатам базових силових схем руйнування зразків з тріщинами.
3. Розробка технології виготовлення дослідних зразків і техніки проведення експериментів.
4. Перевірки експериментальним шляхом коректності розроблених методів визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів і відповідність їх сформульованим постулатам.
5. Узагальнення розроблених методів щодо визначення характеристик тріщиностійкості на випадок умов експлуатації металів і сплавів, а також їх зварних з'єднань.
6. Апробація та впровадження розроблених методів і підходів для вирішення завдань інженерної практики щодо досліджень тріщиностійкості матеріалів для конкретних елементів конструкцій та деталей машин.

Наукова новизна. В роботі створено нову методологію оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів і несучої здатності зварних з'єднань на базі випробувань циліндричних і трубчастих зразків з кільцевими тріщинами в умовах статичних і динамічних навантажень.

Дана методологія апробована на різних класах конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань з урахуванням впливу технологічних факторів, дії робочих середовищ, розмірів заготовок для виготовлення лабораторних зразків, схем їх навантаження, силового поля тощо.

Розроблено ряд ефективних способів ініціювання втомної тріщини у циліндричному зразку шляхом кругового згину із жорстко-фіксованов стрілов прогику. Вихідні тріщини мають строгу концентричність і регламентовану глибину, що є важливою умовою для вивчення процесів втомного руйнування матеріалів. На цій основі побудовано діаграми втомного руйнування матеріалів з записом процесів зародження та поширення втомної тріщини після наводнення, дії робочих середовищ, низьких температур тощо.

Вперше встановлено умови контрольного навантаження для схеми трьохточкового чи консольного кругового згину циліндричного зразка з кільцевим концентратором на стадії ініціювання втомної тріщини з постійним коефіцієнтом інтенсивності напружень  $K_{I\sigma}$  у її верхній частині завдяки використанню токарних автоматів для виготовлення зразка і одночасного застосування дискових кулачкових механізмів зі спадним профілем архімедової спіралі для радіального навантаження зразка. Удержано універсальну формулу для підрахунку радіального навантаження циліндричного зразка на операції вирощування втомної тріщини, незалежну від геометричних розмірів зразка, а також нові результати щодо закономірностей зародження втомних тріщин в умовах кімнатної температури.

З позицій механіки руйнування вперше запропоновано новий підхід щодо підрахунку значень фундаментальної характеристики тріщинності  $K_{Ic}$  на підставі експериментальних даних  $K_{Ic}$  і деякого коефіцієнта змінення матеріала  $\Gamma$ , які встановлені після випробувань малогабаритних циліндричних зразків з тріщиною. Апробація цього підходу на різних класах конструкційних матеріалів дозволила розширити рамки його застосування для оцінки тріщинності квазікрихких матеріалів.

Вивчено фактор масштабного ефекту та його впливу на характер крихкого руйнування матеріалів. На цій основі запропоновано ряд ефективних методів оцінки тріщинності конструкційних матеріалів в умовах квазікрихкого руйнування завдяки використанню різних модифікацій конструкції малогабаритних циліндричних зразків з кільцевою тріщиною, що дозволило реалізувати такі дослідження без використання великогабаритних зразків, потужного силового оснащення та складної контрольно-виміральної техніки.

Розроблено методику коректного визначення критичного розкриття тріщини на циліндричному зразку з двома кільцевими тріщинами однакової глибокості безпосередньо в процесі його осьового розтягу. Показано ефективність цього методу оцінки тріщинності за параметром  $\delta_c$  тоді, коли використання класичних критеріїв ме-

ханія руйнування є неможливим, особливо у випадку дослідження матеріалів з низькою міцністю та підвищеною пластичністю.

Одержано ряд експериментальних даних про тріщиностійкість для конструкційних сталей, титанових і алюмінієвих сплавів з урахуванням низьких температур, текстур, термічного оброблення, хімічного складу, способу виплавлення та видано ряд рекомендацій для інженерної практики, чого не можна було встановити на підставі даних механічних характеристик міцності чи ударної в'язкості.

Запропоновано теоретико-експериментальну методику оцінки тріщиностійкості зварних з'єднань з використанням трубчастих зразків, з внутрішнім кільцевим тріщином, а саме: виконано ранжування за тріщиностійкість однорідних і неоднорідних зварних з'єднань. Це встановлено, що найбільш небезпечною з точки зору тріщиностійкості є зона сплавлення зварного шва з характерною для цієї зони дефектністю.

На цій основі запропонована технологія підвищення тріщиностійкості для цієї зони за рахунок застосування прогресивних способів зварювання в сукупності з підбором оптимального режиму термічного оброблення. Розроблено рекомендації щодо оптимізації автоматичного зварювання та сформульовано критерії оцінки працездатності для таких зварних з'єднань.

На підставі розроблених і обґрунтованих нових наукових методів і одержаних результатів досліджень створена база оцінки міцності конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань з позицій їх тріщиностійкості.

Достовірність досліджень підтверджується фізичною коректністю встановлених критеріїв і розрахункових моделей, математичною точністю постановки та вирішення розглядуваних задач, хорошою збіжністю одержаних результатів експериментів з відомими в літературі даними як теоретичного, так і експериментального характеру.

Практична цінність роботи полягає в створенні спеціального обладнання та пристроїв для реалізації інженерних методів оцінки міцності та довговічності елементів конструкцій і несучої здатності зварних з'єднань на підставі використання теоретичних положень граничної рівноваги пружно-пластичних твердих тіл з дефектами типу тріщин. Запропоновані методи направлені на побудову та вдосконалення загальної теорії міцності конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань в умовах крихкого та квазікрихкого руйнування.

Розроблені методи та одержані основні результати роботи знайшли застосування у вирішенні важливих практичних задач з вдоскона-

лення технології термічного оброблення пружинної сталі 60С2А для підвищення надійності пружин, що працюють у відповідальних елементах конструкцій автотракторних причепів, виявленні порогів холодноламокості для високоміцних і вогнетривких конструкційних сталей 2Х3СНМВ4А, 14Х17Н2, 13Х12М2БМ5, 10Х11Н20Т3Р, для роботи в умовах низьких температур в об'єктах енергетичного машинобудування, здійснено ранжування /за характеристиками тріщинстійкості/ однорідних і неоднорідних зварних з'єднань із нових алюмінієвих АМг6НН, 1201, 1420 і титанових ВТ3-1, ВТ-14 сплавів у відповідальних деталях виробів авіаційної техніки та хімічного машинобудування; встановлені значення тріщинстійкості мостових сталей 10ХСНД, 15Г2АФДпс, 16Г2АФ, трубних сталей 08Г2НБФ, 06Г2НБФ, 08Г2СФ, 17ГС, що використовуються для виготовлення посудин тиску, трубопроводів, резервуарів тощо. Одержані результати впроваджені у виробництво ряду підприємств: машинобудівного заводу автотракторних причепів /м.Челябінськ/, заводу "Електросила" /м.Санкт-Петербург/, машинобудівного заводу "Олмаз" /м.Ліпнярськевськ/, Уральського науково-дослідного інституту трібної промисловості /м.Челябінськ/, Інституту електрозварювання ім.Є.О.Патона НАН України /м.Київ/, фізико-механічного інституту ім.Г.В.Карпенка НАН України /м.Львів/.

Окремі розробки автора, зокрема методика ініціювання кільцевої тріщини у циліндричній у зразку та теоретико-експериментальна методика визначення характеристики тріщиностійкості  $K_{Ic}$  матеріалу увійшли в нормативні документи: "Методичні вказівки. Розрахунки та випробування на міцність з машинобудування. Методи механічних випробувань металів, визначення характеристик в'язкості руйнування /тріщиностійкості/ в умовах статичного навантаження". РД-10-260-31. - М.: Вид-во стандартів, 1982. - 56 с., а також в Державний стандарт /ГОСТ 25.506-85/ "Розрахунки та випробування на міцність. Методи механічних випробувань металів. Визначення характеристик трібно-стійкості /в'язкості руйнування/ в умовах статичного навантаження". - М.: Вид-во стандартів: 1985. - 60 с.

Основні положення, що виносяться на захист:

1. Сформульовані основні постулати методології щодо визначення характеристик тріщиностійкості конструкційних матеріалів і обґрунтована відповідність ім'я слових схем циліндричних /суцільних і долик/ зразків з кільцевими тріщинами.

2. Технологія, засоби та обладнання для виготовлення циліндричних /суцільних і долик/ зразків з контрольованими кільцевими

тріщинами /зовнішніми і внутрішніми/ із однорідних і зварених заготовок.

3. Метод оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів за даними розриву циліндричного зразка з кільцевою тріщиною з урахуванням розмірів базових заготовок.

4. Методи визначення тріщиностійкості  $K_{IC}$  матеріалу на мзлогабаритному циліндричному зразку з насадними різевими кільцями на поверхні його основи та на циліндричному зразку з кільцевою канавкою для наплавлення досліджуваного матеріалу.

5. Метод оцінки характеристики тріщиностійкості квазікрихких матеріалів  $\delta_c$  на циліндричному зразку з двома паралельними кільцевими тріщинами заданої глибини.

6. Метод оцінки динамічної тріщиностійкості /KST/ конструкційних матеріалів в залежності від впливу низьких температур, режимів термічного оброблення тощо.

7. Метод визначення характеристики тріщиностійкості матеріалів і їх зварних з'єднань в умовах одночасної дії на них агресивних середовищ, температур і високих тисків.

8. Інженерні методи оцінки міцності конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань, окремі із яких впроваджено у виробництво зі значним економічним ефектом.

9. Стандартизовані методи для визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів, які увійшли в РД-50-260-81 і Державний стандарт - ГОСТ 25.506-85.

Апробація роботи. Основні результати досліджень представлялись:

- на наукових семінарах кафедри технології машинобудування Державного університету "Львівська політехніка" /Львів, 1987-1994 рр./;
- на науковому семінарі фізико-механічного інституту ім.Г.В.Карпенка НАН України /Львів, 1992-1994 рр./;
- на науковому семінарі Інституту електрозварювання ім.С.С.Патона НАН України /Київ, 1993 р./;
- Окремі результати досліджень доповідались:
  - на I Міжнародній конференції "Конструкційні та функціональні матеріали" /Львів, 1993 р./;
  - на УШ Міжнародній конференції "Механіка руйнування конструкційних матеріалів" /Київ, 1993 р./;
  - на VI Всесвітньому симпозіумі "Малощклована в'єсма конструкційних матеріалів" /Кишинів, 1991 р./;

- на Всесоюзній конференції "Надійність труб і трубопроводів" /Челябінськ, 1985 р./;

- на Всесоюзній конференції "Застосування методів механіки руйнування в розрахунках будівельних металевих конструкцій на крихку міцність і довговічність" /Красноярськ, 1984 р./;

- на Всесоюзній конференції "Проблеми підвищення надійності конструкцій" /Куйбишев, 1980 р./;

- на Всесоюзній конференції "Шляхи підвищення надійності та довговічності промислового обладнання на родовищах природного газу, що містять сірководень" /Гаку, 1977 р./;

- на Всесоюзній конференції "Працездатність машин і конструкцій в умовах низьких температур. Холодостійкість матеріалів" /Якутськ, 1974 р./.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 47-ми друкованих працях, в тому числі 2-х монографіях і 6-ти авторських свідоцтвах на винаходи /див. список літератури/.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складалася із вступу, шести розділів, загальних висновків, бібліографії, додатка та викладена на 318 сторінках машинописного тексту, містить 143 рисунки, 42 таблиці, список літератури /457 назв/.

## З М І С Т Р О Б О Т И

У вступі обгрунтовано актуальність проблеми, наведено важливі положення з її вивчення іншими авторами, сформульовано основні розробки, що розглядається в розділах дисертаційної роботи та найбільш вагомий результат, які вислідяться на захист.

У першому розділі "Методи оцінки руйнування конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань" наведено детальний літературний огляд досліджень з проблеми крихкого та квазікрихкого руйнування конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань в умовах статичного, динамічного та втомного навантаження, виконаних за останні 70 років різними вченими та інженерами. Зокрема, стисло списано деякі теорії та критерії руйнування,

види руйнувань металевих матеріалів, методи експериментальної та теоретичної оцінки опору матеріалів крихкому, квазікрихкому і в'язкому руйнуванню в випадках статичного, динамічного та втомного навантажень. Наведено типи та конструкції лабораторних зразків і схема їх навантаження для виконання статичних, динамічних і втомних досліджень за тріщиностійкістю конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань, а також сформульована мета роботи та завдання для її реалізації.

Сформульовано основні постулати методології визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів, суть яких у наступному:

1. Напружено деформований стан в зоні передруйнування повинен змінюватися не істотно і на відносно невеликих відрізках вздовж контура тріщини дослідного зразка в процесі його випробування.

2. Розміри зони передруйнування повинні задовільняти умовам автономності.

3. Ініціювання тріщини у дослідному зразку повинно бути контрольованим і закінчуватися при регламентованій пружнопластичній ситуації в зоні передруйнування.

4. Випробування повинні здійснюватися на установках з жорстким навантаженням і контрольованим кріпленням зразка.

5. Неточності в геометрії зразків і тріщини повинні тільки збільшувати запас тріщиностійкості досліджуваного матеріалу.

6. При відповідності належних розмірів заготовок для виготовлення зразків стандартних розмірів необхідна методика оцінки, яка була б вузького діапазону зміни значень характеристики тріщиностійкості, в якому повинна знаходитись шукана величина.

У другому розділі "Методи та засоби ініціювання кільцевих тріщин в циліндричних зразках, призначених для визначення тріщиностійкості конструкційних матеріалів" [1, 2, 17, 24, 30, 32, 35, 36, 37] розглянуто методологію, направлену на розробку деяких підходів щодо виготовлення, ініціювання та контролю кільцевих тріщин у циліндричних зразках для дослідження процесів втомного руйнування конструкційних матеріалів на підготовчій стадії та дальшого використання цих зразків для статичних випробувань з метою визначення характеристики  $K_{Ic}$ , тобто характеристики опору матеріалу до поширення тріщини в процесі його руйнування.

Серія способів ефективного ініціювання кільцевих тріщин у циліндричних зразках з концентратором базується на схемі трьохточкового або консольного кругового згину з жорстко фіксованим прогини.

За цієї схеми циліндричний зразок 2 встановлюється в центрах 1,3 спеціальної втомної установки чи токарного верстата /рис.1,а/ і з допомогою спеціального пристрою /рис.1,б/, закріпленого у тримачі, в місці кільцевого надрізу підлягає радіальному навантаженню за схемою трьохточковою, або чотирьохточковою кругового згину з жорстко-фіксованою стрілою прогину і наступним циклічним деформуванням. Навантаження, що сприйняте вальніцею 4 /див. схему на рис.1,б/ через вилку 5 передається на динамометр 6 з наклеєними за мостовою схемою тензодатчиками, сигнал із якого подається через тонзопідсилювач 7 на чутливий прилад 8 /мілівольтамперметр/ [17, 29, 32, 35].

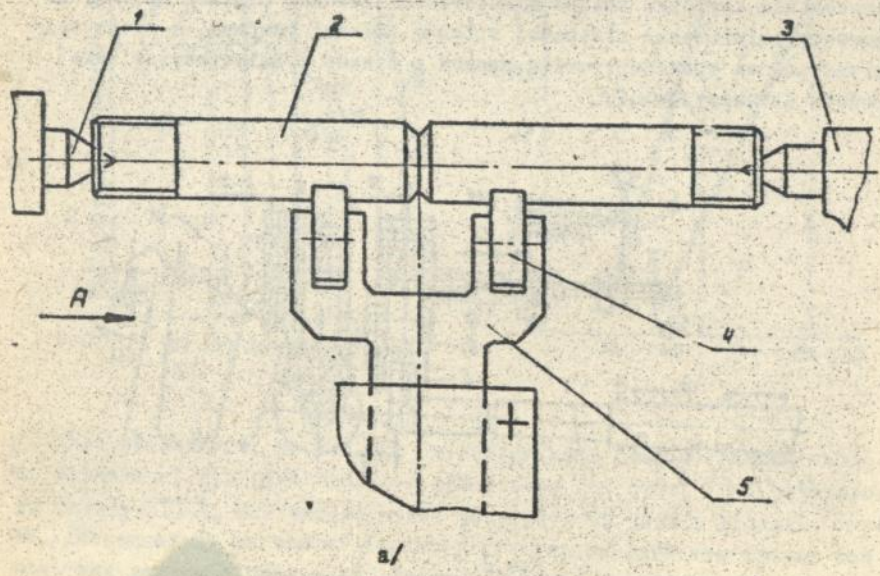
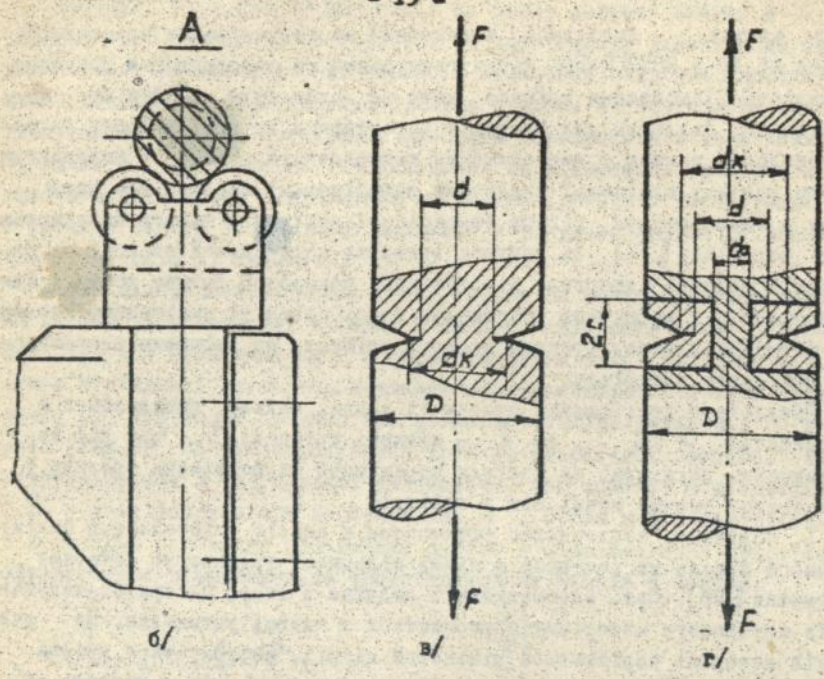
З моменту зародження кільцевої тріщини внаслідок зникнення жорсткості зразка на шкалі приладу спостерігається падіння показів. Дальший спад навантаження, за яким наступає повільне /до певного часу/ зменшення показів ресструбного приладу, показує про підростання зародженої тріщини в глибину циліндричного зразка. Запропонована методика дозволяє широко змінювати навантаження, яке контролюється від нуля до руйнування зразка, тобто ініціювати кільцеву тріщину необхідної глибини, спостерігати за кінетикою її підростання; при цьому фіксувати періоди зародження та поширення тріщини.

З метою коректного формування вихідної тріщини згідно із схемою /рис.1,а/ запропоновано імперичну формулу для підрахунку величини радіального навантаження  $Q_f$ , а саме:

$$Q_f = \frac{0,05 K_{10} \cdot d \cdot (D + d_k)^2}{(D - d)^{\frac{1}{2}} \cdot L \cdot Y(D - d / D + d_k)} \quad , \quad /1/$$

де  $L$  - загальна довжина циліндричного зразка;  $D$  - зовнішній діаметр;  $d_k$ ,  $d$  - діаметри зразка з кільцевим надрізом, і кільцевої тріщини відповідно /див. рис.1/;  $Y(D - d / D + d_k)$  - тарувальна залежність призматичного зразка для збереженого згину, виражена через діаметри циліндричного.

У випадку дослідження матеріалів підвищеної міцності та кривкості, для яких майже неможливо виростити втомну тріщину /гартовані сталі, крихкі сплави/ ефективним є спосіб ініціювання кільцевої тріщини після попереднього наводнення області кільцевого надрізу циліндричного зразка [36, 37]. Водень, окрихивши поверхневий шар тормічно зміненого матеріалу на дні надрізу /час витримки задає глибину наряду/, облігшує в цій області процес зародження та поширення тріщини; при цьому гальмується далі її просування у вихідний матеріал, скорочується час на ініціювання втомної тріщини та виключається по-



a/  
Рис. I

ломка зразка. Дослідами, виконаними на циліндричних зразках із сталей 45, У8 і 28ХЗСНМВФА після гартування та наводнення доведено можливість ініціювання тріщини, чого не можна було досягти без наводнення. Важливим для операції вирощування втомої тріщини за запропонованою схемою є використання нейтрального рідкого середовища (3%-го розчину олеїнової кислоти у вазеліновому маслі), або азоту з температурою, рівною температурі верхнього порогу холодноломкості матеріалу [17]. За рахунок зниження поверхневої енергії в напруженій ділянці матеріалу під дією цих середовищ процес росту тріщини проходить з незначною пластичною деформацією та зменшеному наклепці, які формуються перед фронтом втомої тріщини, не змінивши властивостей вихідного матеріалу.

Результати досліджень, судячи із кривих нахилу, побудованих в координатах  $l-t$ , де  $l$  - довжина тріщини;  $t$  - час дії навантаження, показали, що періоди зародження та поширення тріщини у середовищах значно менші ніж у повітрі.

І, накінець, надзвичайно ефективним є спосіб виготовлення циліндричного зразка та контролю в ньому кільцевої тріщини на токарних автоматах [26]. Суть автоматизації полягає в тому, що зразок-заготовка із пруткового матеріалу обробляється з однієї установки. На зовнішній поверхні нарізається кільцевий надріз, деформується зразок консольним круговим згином з жорстко-фіксованого стрілов прогину до моменту ініціювання кільцевої тріщини заданої глибини, а потім відрізається та транспортується зразок в бункер і повторюється цикл роботи автомату /Рис.2/.

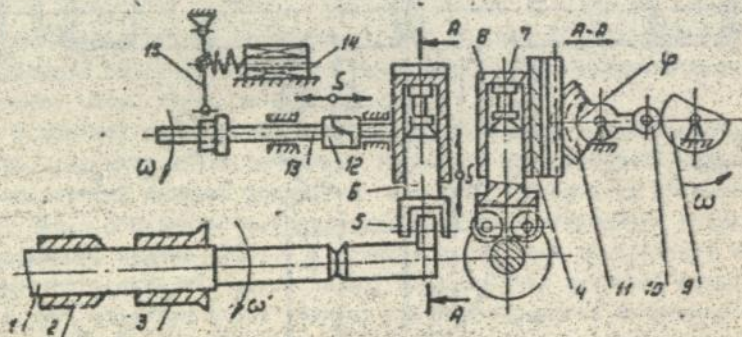


Рис.2

Пруток I /див.Рис.2/ подається на певну довжину цяглов 2 і затискається цапгов 3, обточується по зовнішньому діаметру до заданих геометричних розмірів разом із кільцевим надрізом і деформується радіальним переміщенням суорта 8 разом з закріпленням на цьому навантажувачим пристроєм. Пристрій складається з двох вальниць 5, вилки 6 і динамометра 7. Підведення та відведення пристроїв до зразка здійснюється з допомогою дискового кулачка 9 через ролик 10 і реєчний сектор II в момент змикання з'єднуючої муфти 12 розподільчого вала 13 автомату.

Фіксація радіальної сили згину зразка та запис кінетики зародження та поширення втоїної тріщини в процесі кругового згину зразка реалізується динамометром 7 і потенціометром типу КСП, контактори якого під'єднані до мережі живлення електромагніта 14, який, рухавчи ручку 15, муфти 12 змикає або розмикає розподільчий вал 13 автомата /Рис.2/ на час вирощування тріщини необхідної глибоки, яка встановлюється з таруальної залежності, побудованої в координатах  $\sigma$  - спад напруги при деформуванні  $U$ . Після цього повертається в попереднє положення поперечний супорт з навантажувачим пристроєм і завершується відрізання та транспортування зразка в бункер.

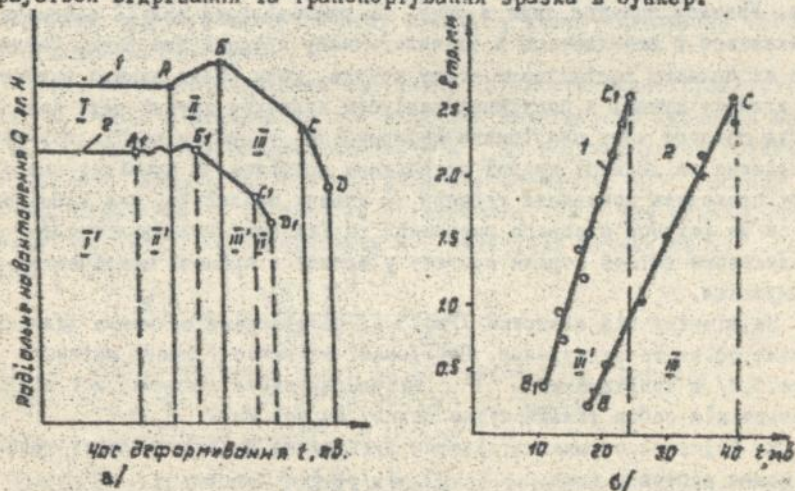


Рис. 3

Для наглядності на Рис.3,а в координатах  $Q_t - t$  /представлено характерні діаграми втоїного руйнування для сталі У8 і титанового сплаву ВТ3-І, які умовно можна розділити на чотири ділянки. Перша /максимальна за часом/ характеризує працездатність зразка без помітних деформаційних змін. Друга - ділянка зміцнення та розітнення

ня залежить від особливостей структури матеріалу, має характерні спади, підйоми при тривалому навантаженні в часі /див. точки А,Б/. Третя - ділянка зародження та повільного підростання /майже з постійною швидкістю/ тріщини зображена прямою /див. точки Б,С/. Четверта /мінімальна за часом/ характеризує катастрофічне руйнування матеріалу зразка аж до поломки /див. точки С,Д н- Рис.3/. Описана діаграма побудована для схеми консольного кругового згину зразка, коли робочий профіль дискового кулачка має постійний радіус на ділянці навантаження.

У зв'язку з тим, що на токарно-револьверних автоматах радіальний згин циліндричного зразка здійснюється від кулачкових механізмів, розроблено конструкції дискового кулачка для дослідження росту втомної тріщини з заданим значенням коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{I\sigma}$  на всьому шляху її поширення в матеріалі [24]. Його профіль має ділянку кривої постійного радіуса для навантаження зразка до моменту зародження тріщини та ділянку кривої зі спадним профілем архімедової спіралі для забезпечення плавного зменшення радіального навантаження в процесі росту тріщини. Керування роботом автомата здійснюється у відповідності за /описаною вище/ технологічною схемою. Різниця полягає лише в тому, що розподільчий вал І2 автомата вмикається і вимикається в технологічному процесі два рази. Перший раз на початку радіального згину зразка, коли ролик важеля виходить на ділянку кривої з постійним радіусом кулачка; другий раз, коли після певного часу циклічного деформування у зразку зародилась мікротріщина на ділянці кривої зі спадним профілем. В проміжку цього часу проходить поширення тріщини зі сталою швидкістю, яка забезпечується за рахунок плавного зменшення радіального навантаження  $Q_f$ , викликаного зміном стріли апрогину у зразку в процесі циклічного деформування.

На відміну від діаграми /Рис.3,а/ ці діаграми не мають ділянки катастрофічного руйнування. Побудовані залежності росту тріщини /Рис.3,б/ в координатах  $\ell - t$  підтверджуються прямими, які відрізняються між собою тільки кутом нахилу до осі X .

На підставі отриманих діаграм руйнування швидкість росту тріщини можна записати так:

$$v = dN/dt, \quad 12/$$

де  $N$  - кількість циклів;  $t$  - час деформування зразка;  $a$  - коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{I\sigma}$  у вершині тріщини, яка поширюється зі сталою швидкістю, можна виразити функцією

$$K_{I\sigma} = \varphi(\sigma, \psi, E, \lambda, C, T), \quad 13/$$

де  $\sigma_c, \psi, E$  - міцнісні та пружні властивості матеріалу;  
 $\lambda$  - деяка змінна, що характеризує його реологічні властивості /величину зерна, структуру/;  $C$  - середовище;  $T$  - температура.

Отже, вперше розроблений спосіб ініціювання кільцевої тріщини зі сталов швидкості її поширення у матеріалі можна застосувати для визначення коефіцієнта  $K_{Ic}$  з врахуванням перемінних рівняння /3/, що важливо для практики втомних випробувань.

Третій розділ "Масштабний ефект і деякі фактори, що впливають на характер крихкого руйнування матеріалів" [3,9,15,20,21,26,27,28,29,32,33,44] присвячений опису методологічних аспектів стосовно до розроблення методів оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів на різних конструкціях малогабаритних циліндричних зразків з кільцевою тріщиною з метою коректного визначення характеристики  $K_{Ic}$  матеріалу. Досліджено вплив масштабного фактора /розмірів зразка та тріщини/, а також режимів формування вихідної тріщини на величину  $K_{Ic}$ . Одержано розрахункові формули для визначення  $K_{Ic}$  матеріалів на підставі випробувань малогабаритних циліндричних зразків з тріщиною. Розроблено метод визначення критичного розкриття тріщини  $\sigma_c$  на циліндричному зразку з двома кільцевими тріщинами, рівними за глибиною.

Отже, розглянемо питання про зміну характеристики тріщиностійкості  $K_c / K_{Ic}$  в залежності від величини зовнішнього діаметра зразка  $D$  для заданого співвідношення  $d/D$  та зміни довжини тріщини в межах  $0,3 \leq d/D \leq 0,9$  для заданого значення  $D$ , впливу робочих середовищ у зв'язку із збільшенням  $D$  для різних матеріалів [21,44]. Характеристику  $K_{Ic}$  матеріалу визначали за формулою [32]:

$$K_{Ic} = \frac{\sqrt{2} \cdot F^n}{\sqrt{\pi} \cdot d \cdot d \cdot f(\epsilon)} \quad 14/$$

Функції  $f(\epsilon)$  обчислювали також за формулою [32] вигляду:

$$f(\epsilon) = 1 - 0,5 \epsilon - 0,125 \epsilon^2 + 0,2757 \epsilon^3 - 0,2082 \epsilon^4 + 0,0663 \epsilon^5 + 0,0048 \epsilon^6 - 0,0130 \epsilon^7 \quad 15/$$

де  $\epsilon = d/D$  - відносний розмір кільцевої тріщини;  $d$  - діаметр зразка з тріщиною;  $D$  - зовнішній його діаметр;  $F^n$  - руйнівне навантаження для зразка з тріщиною.

На рис.4 наведені результати багаточисельних експериментів щодо визначення  $K_c$  для деяких матеріалів в залежності від величини зовнішнього діаметра циліндричного зразка  $D$  та різних співвідношень  $d/D$  [21]. Із Рис.4,а видно, що лінійка  $K_c$  до стабільного

значення /підйом кривих до горизонталі/ тим значніший, чим нижче міцність матеріалу. Стабільність  $K_{IC}$  при  $d/D = 0,7$  спостерігається лише після випробування зразків з  $\phi$  10 мм для титанового сплаву ВТЗ-І /крива 2/  $\phi$  15 мм для сталі У8 /крива 3/ і  $\phi$  30 мм для сталі 40Х /крива 1/. На горизонтальних ділянках кривих отримано значення  $K_{IC}$  вже як характеристики матеріалу, а не зразка / $K_{IC}$ / для цих сталей.

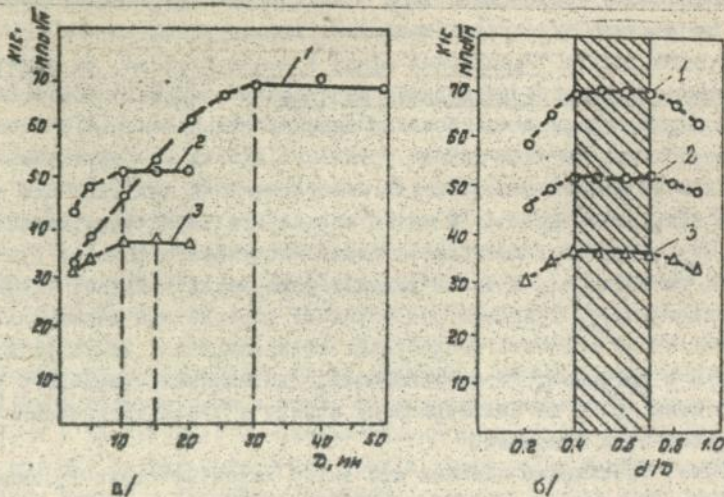


Рис. 4

Коли не виконуються ці умови /див. Рис. 4, а, пунктирні лінії/, маємо значення  $K_{IC}$  характерні лише для даного діаметра зразка.

У випадку впливу глибини кільцевої тріщини у зразку заданого діаметра для цих же сталей було виявлено, що  $K_{IC}$  практично не змінюється для співвідношень  $0,4 \leq d/D \leq 0,7$  /Рис. 4, б/. За їх межами маємо  $K_{IC}$ , підходя лінійної механіки руйнування втрачають своє правомірність, тобто  $K_{IC}$  стає недостатньою для оцінки тріщиностійкості матеріалу.

Вивчено також вплив робочих середовищ /водопровідної води та 3,5%-ного розчину  $NaCl$  /після випробувань циліндричних зразків різних діаметрів з тріщинами на машині РМ-50 зі швидкості деформування  $V = 0,006$  мм/хв в камері, де встановлено, що вплив середовища тим істотнішим, чим вище його агресивність, нижче  $K_{IC}$  та більший діаметр зразка з тріщиною.

В цьому плані досліджено також як впливає режим навантаження у процесі ініціювання тріщини на  $K_{IC}$  матеріалів середньої міцності

[21,28]. Істотне підвищення  $K_{Ic}$  в результаті ініціювання тріщини в умовах високих режимів пояснюється формуванням пластичних зон у вершині втомної тріщини. Вимірюванням мікротвердості області вершини тріщини нетравлених шліфів встановлено, що деформівна область має форму "ізокліни" з розгалуженням двох смуг від вершини тріщини під кутом  $140...145^\circ$ , які узгоджуються із формою пластичних зон, встановлених на цих зразках за другими підходами іншими авторами\*. Розміри цієї області чітко пов'язані з режимом навантаження, тобто ступенем зміцнення /наклепу/ матеріалу. Пропонується усунення наклепу для негартівних сталей відпалом або нормалізацією.

Враховуючи важливість характеристики  $K_{Ic}$  для інженерної практики, були запропоновані нові підходи до визначення цієї фундаментальної характеристики матеріалу на малогабаритних циліндричних зразках різних конструкцій та модифікацій. Наприклад, аналізуючи результати багаточисельних експериментів [20,26,27], одержаних після випробувань малогабаритних циліндричних зразків  $D=8...10\text{мм}$ , було виявлено, що при визначенні характеристики  $K_{Ic}$  на циліндричних зразках для менш крихких матеріалів потрібні зразки більшого діаметра. Приймаючи це до уваги, а також враховуючи велику кількість експериментальних даних щодо  $K_c$ , встановлених для різних класів матеріалів після випробувань малогабаритних зразків, запропонована емпірична формула для визначення  $K_{Ic}$  через значення  $K_c$  і деякий коефіцієнт зміцнення матеріалу  $n$ , а саме:

$$K_{Ic} = n \cdot K_c; \quad n = K_{Ic} / K_c. \quad /6/$$

Апробація формули /6/ потребує визначення характеристик  $K_{Ic}$  і  $K_c$  для даного матеріалу на підставі випробувань великогабаритних і малогабаритних зразків з тріщиною. На підставі таких випробувань необхідно встановити кореляційний коефіцієнт, який, взагалі кажучи, можна вважати деякою функцією від кількох змінних, тобто

$$n = f(\sigma^*, D, l) \quad /7/$$

Тут  $\sigma^* = 4F / \pi d^2$  — величина напруження для зразка з тріщиною при  $F = F^*$ ;  $\sigma_{0.2}$  — границя текучості матеріалу;  $D, l$  — діаметр циліндричного зразка та глибина тріщини відповідно.

З другого боку, якщо прийняти до уваги, що для діаметра зразка з тріщиною  $d \geq 10$  мм та  $l = 0,4...0,7 \frac{d}{D}$  добуток  $K_c$  на  $n$  є

\* Ярема С.Я., Яник З.М. — фізико-хімічна механіка матеріалів, - 1971, - № 2. - с.15-18.

стає величина /дорівнює  $K_{Ic}$ /, тобто  $\sigma = \sigma_c$ , а для малих діаметрів основний вплив на зміну тріщиностійкості зумовляє пластичне течіння матеріалу, то формулу /1/ наближено можна записати у вигляді:

$$n = f\left(\frac{\sigma^*}{\sigma_{0.2}}\right) \quad /8/$$

Підставивши /8/ у /6/ одержимо кінцеву формулу для визначення характеристики тріщиностійкості  $K_{Ic}$  матеріалу незалежну від розмірів циліндричного зразка з кільцевою тріщиною, а саме:

$$K_{Ic} = K_c \left(\frac{\sigma^*}{\sigma_{0.2}}\right) \quad /9/$$

Достовірність формули /9/ перевірено розрахунками для багатьох марок матеріалів на різних діаметрах циліндричних хрзків з тріщинами, які добре узгоджуються зі значеннями  $K_{Ic}$ , встановленими на великогабаритних зразках /див. таблицю 1/.

Таблиця 1

№ п/п	Назва матеріалу	Розміри зразка		$\sigma_{0.2}$ МПа	$\sigma^*$ МПа	$\sigma^*$ за фор- мулу /9/	$K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$	
		$D_0$ мм	$d_0$ мм				прямий експеримент	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Сталь 40Х, пруток, сталь поставки	2	1,40	460	867	1,85	59,7	71,2
		5	2,55		795	1,73	66,3	
		8	5,60		680	1,48	68,0	
		16	11,20		515	1,12	72,7	
		20	14,00		501	1,09	74,1	
		30	21,05		460	1,00	71,5	
32	22,45	455	0,99	69,4				
2.	Титановий сплав ВТЗ-1, пруток, гартування з ІІ43Ж, витримка 1 год., відпуск при 92Ж 2 год., охолодження на повітрі	2	1,45	1020	1479	1,20	47,9	52,7
		5	3,60		1132	1,11	49,8	
		8	5,75		1101	1,08	53,8	
		10	7,05		1020	1,00	52,9	
		12	8,40		999	0,98	52,8	
		15	10,55		918	0,90	52,5	
3.	Сталь У8, пруток, норма- лізація з 1053Ж, витрим- ка 2 год., охолодження на повітрі	2	2,50	520	566	1,09	34,2	37,0
		5	3,48		546	1,05	36,4	
		8	5,70		530	1,02	37,0	
		12	8,35		520	1,00	37,00	
		15	10,38		509	0,98	36,5	
		20	13,95		504	0,97	36,2	

В цьому плані запропоновано також інші підходи щодо визначення  $K_{Ic}$  квазікрихких матеріалів, для яких використання концепцій механіки руйнування є неможливим. Зокрема, це конструкції намага-

баритних циліндричних зразків з насадними різьбовими кільцями на поверхні основи, виготовлених із твердого матеріалу та таких зразків з кільцевою канавкою для наплавлення досліджуваного вязкого матеріалу [3, 15, 33, 39]. За рахунок вдалого підбору геометричних розмірів кільця і кільцевої канавки, які задовільняють умови автономності зони передруйнування, можна визначити  $K_{Ic}$  квазікрихких матеріалів, що узгоджуються з відомими в літературі.

Якщо для матеріалів середньої та низької міцності критерії лінійної механіки руйнування  $/K_{Ic}/$  виявляються недостатніми при оцінці їх міцності в заданих умовах експлуатації, то в таких випадках застосовують методи нелінійної механіки руйнування, зокрема КРТ-критерій /критичне розкриття тріщини/. В роботі запропоновано метод визначення критичного розкриття тріщини на циліндричному зразку з двома паралельними /ідентичними/ кільцевими надрізами /тріщинами/ рівними за глибиною [29]. Вважається, що в процесі розтягу зразка у площині другого перетину, де пройшло руйнування, розкриття досягає максимального значення " $\delta_c$ ", яке можна виміряти, наприклад, приладом /катетометром/ різницею кінцевих і початкових даних між берегами тріщини, або між фіксованими точками надрізу. Коректність цього підходу перевірена контрольними випробуваннями зразків з однією кільцевою тріщиною після вимірювання розкриття датчиком-шупом, вмонтованим своїми наконечниками на дні кільцевого надрізу.

В обох випадках значення " $\delta_c$ " виявились близькими між собою. Наприклад: для нормалізованих сталей 20; 45; 65Г; У8; У9 воно складає /в мм/ - 0,19; 0,15; 0,07; 0,02; 0,02 у зразку з двома кільцевими тріщинами та 0,198; 0,157; 0,078; 0,029; 0,026 - у зразку з однією кільцевою тріщиною відповідно. Вивчено також зміну  $\delta_c$  в залежності від глибини кільцевої тріщини  $0,3 \leq d/D \leq 0,8$  в матеріалі циліндричних зразків із сталей 45 і У9. Встановлено, що стабільність значень  $\delta_c$  від глибини тріщини знаходиться в межах  $0,3 \leq d/D \leq 0,6$ , які дорівнюють 0,074 мм для сталі 45 і 0,026 мм для У9. Їх слід розглядати як фактичні значення  $\delta_c$  для цих сталей.

У четвертому розділі "Тріщиностійкість деяких конструкційних матеріалів і керування значенням  $K_{Ic}$ " [1, 2, 4, 14, 19, 23, 25, 41, 45-47] наведено результати експериментів зі статичної тріщиностійкості  $K_{Ic}$  для різних конструкційних, пружинних, високоміцних і в'язких сталей, титанових і алюмінієвих сплавів в залежності від впливу покриття, дії середовища, текстури матеріалу, низьких температур, способів виплавлення та термічного оброблення. Сформульовано рекомендації щодо оптимального вибору конструкційних матеріалів для інженерної практики. Окремі результати досліджень лабораторних зраз-

ків підтверджено натурними експериментами. Характеристику  $K_{Ic}$  визначали після випробувань циліндричних зразків з кільцевою тріщиною і використання формул /4/ і /9/.

Зокрема, досліджено вплив покриття на основі олова, свинцю і кадмію, нанесеного електролітичним шляхом із борфтористих електролітів [2,14,25,45,46] у вершині кільцевої тріщини зразків із термічно зміцнених сталей 10X11H20T3P, 14X17H2 і титанового сплаву BT3-1. Виявлений приріст  $\Delta K_{Ic}$  для цих сталей як у повітрі, так і в середовищі водного розчину 3,5% NaCl пояснюється з одного боку притупленням вершини тріщини за рахунок хемосорбційної взаємодії атомів комплексного покриття заданого складу з вентильними поверхнями в процесі електролізу, а з другого - практично повним усуненням адсорбційно-розклинювального ефекта в зоні максимальних розтягуючих напружень, що зумовлює дифузійне формування зміцнених шарів металу. Хемосорбційні металеві плівки /смуги/ ізолюють основний метал від дії корозійного середовища, а їх глибина тісно пов'язана з розміром пластичної зони, сформованої після ініціювання втомної тріщини. В такій послідовності одержано приріст характеристики  $\Delta K_{Ic}$ . Таке закінчення сформульовано на підставі електронно-фрактографічних досліджень зломів поверхонь з допомогою двоступеневих реплік /целюлоза-вуглець/, знятих на електронному мікроскопі УЕМ-100.

Досліджено вплив прокатування на схильність до крихкого руйнування мостових сталей 10XCHД, 15Г2АФДпс і 16Г2АФ після втомних і статичних випробувань. Встановлено істотну зміну тріщиностійкості  $K_{Ic}$  від анізотропії сталей [19,47]. Наведено комплекс результатів за тріщиностійкістю  $K_{Ic}$  в умовах низьких температур від 293 до 77К для високоміцної сталі 28ХЗСНМВФА звичайного виплавлення та вакуумно-дугового переплаву, вогнетривких сталей 10X11H20T3P, 13X12H2BMФ, титанових сплавів BT3-1, BT-14 і алюмінієвих сплавів В-2243, Ал-23-1, Ал-4Д після певних режимів їх термічного оброблення 23. В результаті видано ряд рекомендацій щодо надійного використання цих матеріалів в інженерній практиці, чого не можна було встановити на підставі експериментальних значень стандартних механічних характеристик міцності та ударної в'язкості.

Важливим фактором для інженерної практики є вплив режимів термічного оброблення сталей на зміну їх тріщиностійкості  $K_{Ic}$ . Досліджено тріщиностійкість конструкційних сталей 40X і 7X2 після гартування із швидкістю нагрівання  $\dot{T}_H = 1$  град/с та швидкістю нагрівання  $\dot{T}_H = 8$  град/с, а також пружинних сталей 60C2A і 65Г після гартування із швидкістю нагрівання  $\dot{T}_H = 1$  град/с в залежності від

температури відпуску [2]. Встановлено, що швидкісне гартування підвищує  $K_{IC}$  за рахунок формування оптимальної гетерогенності аустеніту більш складної морфології зі збільшеною протяжністю границь, тобто одержання специфічної структури мартенситу особливо для відпуску сталей до 593Ж. Дальше підвищення температури відпуску не впливає на приріст  $\Delta K_{IC}$  незалежно від режиму гартування.

Для пружинних сталей встановлено [1], що сталь 65Г у порівнянні зі сталлю 60С2А має підвищену /до 60%/ тріщиностійкість  $K_{IC}$  після відпуску в межах від 493 до 693Ж. А для температури відпуску 743Ж опір руйнування сталі 65Г у два рази вищий, ніж для сталі 60С2А. Достовірність цих результатів перевірено втомними випробуваннями натурних циліндричних пружин двох типорозмірів із сталі 60С2А / $\phi$  12 мм,  $\phi$  80 мм і  $L = 372$  мм / і / $\phi$  16 мм,  $\phi$  120 мм і  $L = 377$  мм / після гартування з 1063Ж та відпуску 493 і 743 К відповідно [4, 41].

Було проведено спеціальні натурні випробування на довговічність гладких і надрізаних /на третьому витку з концентратором  $\alpha = 45^\circ$ , шириною 4 мм, глибиною 3 мм і радіусом закруглення дна  $\rho = 2$  мм / пружин. Досліди виконано на багатопозиційній установці [5], розробленій на базі двигуна внутрішнього згорання вантажного автомобіля ЗІЛ-131. При цьому визначали час циклічного деформування до повної поломки пружин з відповідною термічною обробкою. Одержані результати натурних випробувань підтвердили лабораторні дослідження для цієї сталі 60С2А.

П'ятий розділ "Тріщиностійкість матеріалів в умовах динамічного /ударного / навантаження розтягом" [1, 2, 22, 27, 30] містить методологічні розробки реалізації динамічних випробувань ударним розтягом циліндричних зразків з кільцевою тріщиною на стандартному маятниковому копрі, оснащеному спеціальним молотом і захоплювачами для закріплення випробувального зразка, які були вперше запроєктовані у попередніх наших роботах.\* В даному випадку методику доповнено записом діаграм руйнування на осцилографічному оснащенні. На цій підставі встановлені динамічні характеристики залежності КСТ від впливу низьких температур, текстури матеріалу, режимів термічного оброблення.

Зокрема доведено, що найбільш якісною є діаграма, зафіксована осцилографом від тензодатчиків, наклеєних на поверхню зразка. Підраховані в цьому випадку значення КСТ добре узгоджуються зі значен-

\* Когут Н.С. Исследование трещиностойкости конструкционных материалов при статическом и динамическом растяжении цилиндрических образцов. - Автореф. дисс. канд. техн. наук. - Львов. - 1974. - 16 с.

нями КСТ, встановленими за шкалов копра. Використовуючи цей підхід, на м'ятниківому копрі ЖК-75 встановлювали значення КСТ, і на цій основі виявляли вплив низьких температур на опір крихкому руйнуванню сталі Ст.ЖІІ в залежності від температури відпау; для трубних сталей 08Г2НБФ, 08Г2НБФ, 08Г2СФ і 17ГС в залежності від режимів термічного оброблення; для пружинних сталей 60С2А і 65Г - від режимів гартування та відпуску в межах 493...723 К. На цій основі запропоновані рекомендації щодо оптимального вибору матеріалів для експлуатації в умовах динамічного навантаження деталей машин [1, 2, 22].

Запропонована [24, 30] важлива кореляційна залежність між динамічною та статичною тріщиностійкістю /КСТ-  $\gamma$  /, для різних класів матеріалів в умовах 77К після випробувань циліндричних зразків / $D = 8...10$  мм/ із швидкістю деформування / $V = 5000$  мм/с/ для динамічного розтягу та / $V = 0,02$  мм/с/ для статичного розтягу:

$$KCT = \eta(T) \cdot \gamma, \quad /10/$$

де  $\eta(T)$  - коефіцієнт, як функція температури  $T$ .

Проведені експериментальні дослідження /див. таблицю 2/ показали, що при  $T = 77K$  коефіцієнт  $\eta(T)$  можна прийняти рівним 100. Тоді формулу /10/ можна записати у вигляді:

$$KCT = 100 \cdot \gamma. \quad /11/$$

Для випробувань в умовах кімнатної температури /293 К/ аналогічно як і для статичного розтягу, значення КСТ матеріалу можна визначити за такої формули:

$$KCT = \eta_* \cdot (KCT)_m = (KCT)_m \cdot \frac{\sigma_*}{\sigma_{02}}, \quad /12, a/$$

де / $KCT$ ,  $m$  - значення динамічної характеристики, встановленої за шкалов копра після ударного розтягу малогабаритного циліндричного зразка з тріщиною  $a/D = 0,7$ ;  $\eta_* = \sigma_* / \sigma_{02}$  - коефіцієнт зміцнення матеріалу;  $\sigma_*$ ,  $\sigma_{02}$  - рухливі напруження для малогабаритного зразка з тріщиною та границя текучості матеріалу відповідно.

Наведені значення КСТ після випробувань великогабаритних зразків з тріщиною і згідно підрахунків за формулою /12/ /див. таблицю 2/ узгоджуються між собою, що підтверджує коректність запропонованого підходу. Також, для порівняння, представлено значення сумарної характеристики опору поширення тріщини  $\gamma^*$ , одержаної шляхом статичного розтягу циліндричних зразків з кільцевою тріщиною аналогічних розмірів для досліджуваних матеріалів.

Таблиця 2

№ п/п	Назва матеріалу	Розміри зразка		б <sub>0,2</sub> МПа	б <sub>1</sub> МПа	б <sub>2</sub> н=б <sub>0,2</sub>	КСТ, Дж/см <sup>2</sup> для T=293K		КСТ, Дж/см <sup>2</sup> для T=77K	
		D, мм	d, мм				за формул /12/	прямий експеримент	для T=77K	для T=77K
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Сталь 40Х, пруток, стан поставки	30	21,6	460	460	1,00	1670	1655	4,2	0,40
2.	Сталь 45, нормалізація з ПІЗЖ, витримка 30хв. охолодження на повітрі	35	23,3	430	430	1,00	1580	1551	3,3	0,45
3.	Сталь 20Х, нормалізація з ПІ4Ж, витримка 30 хв. охолодження на повітрі	50	33,5	370	385	1,04	1540	1648	3,0	0,30
4.	Титановий сплав ВТЗ-І, гартування з ПІ4Ж, витримка 1 год. відпуск при 92Ж, 2 год. охолодження на повітрі	15	10,50	1020	918	0,90	1310	1520	31,0	2,95

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
5.	Стель 14X17H2, гартуван- ня з 126Ж, витримка 1 год. відпуск при 85Ж, 2 год. схожден- ня на по- вітрі	20	14,30	840	915	1,09	2130	2300	20,5	2,03

Шостий розділ "Тріциностійкість трубчастих виробів зі зварними з'єднаннями" [1, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 18, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 42, 43] є найбільшим за обсягом і присвячений теоретико-експериментальним дослідженням надійності та довговічності трубчастих виробів зі зварними з'єднаннями з внутрішнім дефектом - кільцевою тріщиною. В ньому списані підходи щодо визначення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  для силової схеми розтягу трубчастого зразка з кільцевою тріщиною довільних розмірів, яка виходить на внутрішню стінку труби, а також для трубчастого зразка з внутрішньою кільцевою тріщиною. Розроблено методики утворення внутрішньої кільцевої тріщини в суцільному та збірному трубчастому зразках. Визначена тріциностійкість профільних зварних з'єднань і зварних з'єднань в умовах високого тиску. Розроблено промислову установку для автоматичного зварювання однорідних і неоднорідних зварних з'єднань з метою їх ранжування за тріциностійкістю. Досліджено також тріциностійкість пришовної області зварних з'єднань для нових алюмінієвих і титанових сплавів від способу зварювання та режимів термічного оброблення.

Розв'язок задачі розтягу трубчастого зразка з кільцевою тріщиною, що виходить на внутрішню стінку, зводиться до розгляду пружного пустотілого циліндра зовнішнього діаметра  $D$  та внутрішнього діаметра  $D_1$ , який послаблений в центральному перетині внутрішньою кільцевою тріщиною діаметра  $d$  /Фиг.5, а/ [1, 18]. Циліндр розтягується зусиллям  $F$ . Необхідно визначити значення  $K_I$  в околі контуру кільцевої тріщини.

При рішенні цієї задачі за методом граничної інтерполяції знайдено значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  для розтягу пустотілого циліндра з внутрішньою кільцевою тріщиною довільного розміру:

$$K_1 = \frac{F}{D\sqrt{P}} \cdot Y(\epsilon_1, \epsilon), \quad /12/$$

де

$$Y(\epsilon_1, \epsilon) = \frac{56248(1-\epsilon_1)(1-0,736 \cdot \frac{1-\epsilon}{1-\epsilon_1}) \cdot \sqrt{\epsilon - \epsilon_1}}{[\pi(1-\epsilon)(1+\epsilon) \cdot \sqrt{(\epsilon - \epsilon_1)(1-\epsilon)} + (1-\epsilon)^2(1-0,736 \cdot \frac{1-\epsilon}{1-\epsilon_1})^2]} \quad /13/$$

Для труби діаметром  $D = 25$  мм,  $D_1 = 11$  мм безрозмірна функція  $Y(\epsilon_1, \epsilon)$  представлена кривою на Рис. 5, а.

Для розв'язку задачі розтягу трубчастого зразка з внутрішньою кільцевою тріщиною /Рис. 5, б/, розташованою по середині поперечного перетину, тобто  $(d-D)/2 = (D-d_2)/2$  за аналогічним підходом одержано формулу для підрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$  з внутрішньої закритої кільцевої тріщини:

$$K_I = \frac{P}{D\sqrt{D}} \cdot Y(\epsilon_1, \epsilon), \quad /14/$$

де

$$Y(\epsilon_1, \epsilon) = \frac{1,128\sqrt{\epsilon}}{[(1+\epsilon_1)\sqrt{(1+\epsilon)(1-\epsilon)(1+1,4673\epsilon)}]} \quad /15/$$

Залежність /15/ при  $\epsilon_1 = 0,5$  показана на Рис. 5, б.

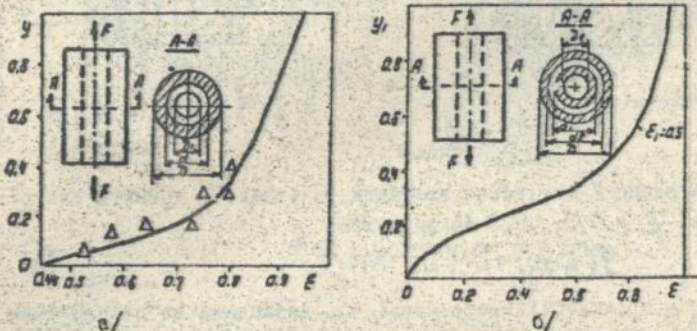


Рис. 5

Практична реалізація формул /12/, /14/ вимагає розробки способу ініціювання внутрішньої кільцевої тріщини у трубчастому зразку [11, 12]. Запропонована наступна технологічна послідовність виготовлення такого зразка. Із пруткового матеріала виготовляється суцільний циліндричний стержень з кільцевим надрізом /Рис. 6, а/, із верхньої якого вляхом кругового згину зв'язком /див. розділ II/ ініціюють глибоку кільцеву тріщину. Потім заплывляють кільцевий надріз, висверд-

лють перетин в площині кільцевої тріщини та обробляють зовнішню поверхню; в результаті одержуть трубчастий зразок з внутрішньою кільцевою тріщиною /Рис.6,б/, який придатний для визначення тріщиностійкості металу шва зварного з'єднання.

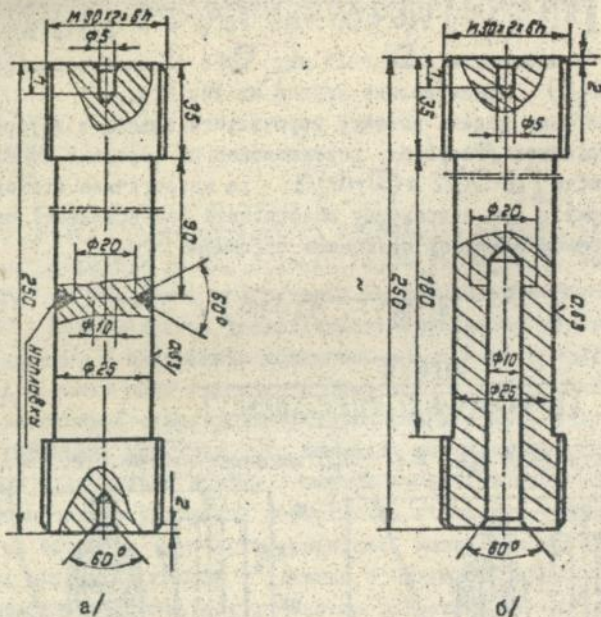


Рис.6

Наведене К-тарування зварених із сталі 45 зразків для різних значень  $\epsilon = 0,5 \dots 0,8$  за формулою:

$$Y(\epsilon_1, \epsilon) = D \cdot \sqrt{D} \cdot K_{Ic} / F^*, \quad /16/$$

де  $K_{Ic}$  - тріщиностійкість сталі 45, визначена на стандартних зразках з зовнішньою кільцевою тріщиною / $K_{Ic} = 36,7 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ ;  $F^*$  - руйнівне навантаження для трубчастого зразка з тріщиною;  $D$  - зовнішній його діаметр;  $Y(\epsilon_1, \epsilon)$  - поправочна функція на відносну глибину тріщини, показале /див.Рис.5,а/, що теоретичні та експериментальні дані добре узгоджуються між собою.

В розвиток цих досліджень визначено тріщиностійкість шва профільних зварених з'єднань /Рис.7,а/ з внутрішнім круговим дефектом за їх рівновеликою площею нетто-перетину [13,40,42], тобто круга, квадрата, трикутника, для яких  $S = \pi D_0^2 / 4 = B^2 = \frac{1}{2} B \cdot H$

відповідно. Тут  $D_0$  - зовнішній діаметр зразка;  $B$  - сторона квадрата та трикутника відповідно;  $H$  - висота трикутника. Для підрахунку  $K_{Ic}$  використано теоретичні рішення задачі осьового розтягу призматичних брусків з круговими тріщинами.\*

На зразках із сталі 45 /основа/, надріз яких заповнено сталлю Ст.3 /Рис.7, а/, одержано близькі значення  $K_{Ic}$  профільних з'єднань:  $K_{Ic} = 77,4; 72,8; 65,1$  МПа  $\sqrt{м}$  для трикутного, квадратного та круглого перетинів відповідно. Деяке підвищення  $K_{Ic}$  у зв'язку з формою профілю перетину пов'язано із зміною жорсткості та податливості зразків в процесі руйнування.

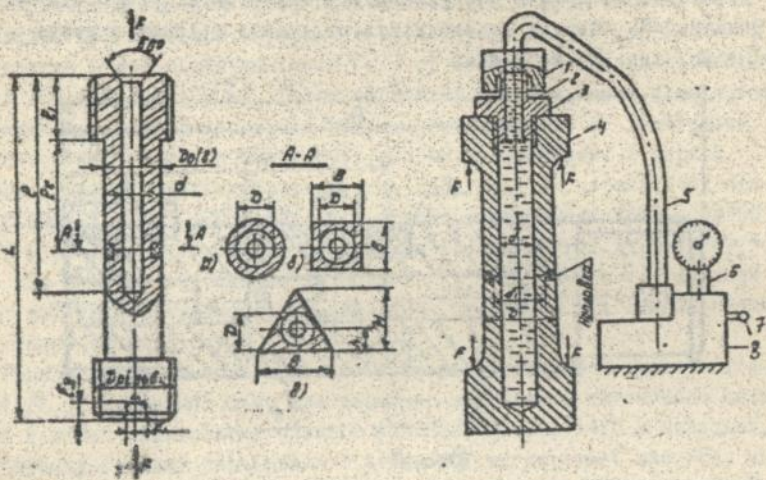


Рис.7

Заслужовує на увагу дослідження тріщиностійкості звів у трубопроводах високого тиску /до 50 МПа/ [34]. Методика визначення  $K_{Ic}$  полягає в тому, що у циліндричний корпус 4 з глухим отвором /Рис.7, б/ заганяють штуцер 2 з мідною шайбою 3. До штуцера накидують гайков 1 під'єднують шланг високого тиску 5, а другий його кінець - до гідропідсилювача 8. Тиск в системі контролюють манометром 6.

\* Андреев А.Е., Панасек В.В., Стадник М.М. - Проблеми міцності. - 1972. - № 10. - С.37-41.

метром біт ручков 7. Після навантаження у внутрішню порожнину елії /МС-20/ та створення необхідного тиску, зразок руйнується осьовим розтягом, де фіксують зусилля  $F^*$ .

Зусилля  $F^*$  підраховується за формулою:

$$F^* = F + p \cdot \frac{\pi D_0^2}{4}, \quad /17/$$

де  $F$  - складова навантаження за шкалою розривної машини;

$p \cdot \pi D_0^2 / 4$  - величина внутрішнього тиску в момент руйнування зразка.

За формулами /12/ і /13/ підраховують  $K_{Ic}$  шва. Одержано практично однакові значення тріщиностійкості:  $K_{Ic} = 66,7 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  для  $P_0 = 50 \text{ МПа}$  і  $K_{Ic} = 68,4 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ , коли  $P_0 = 0$ .

Доказано, що колові напруження від внутрішніх тисків впливають на зниження  $K_{Ic}$  шва, а на швидкість поширення тріщини в ньому  $/\Delta t = 2c/$  для  $P_0 = 50 \text{ МПа}$ .

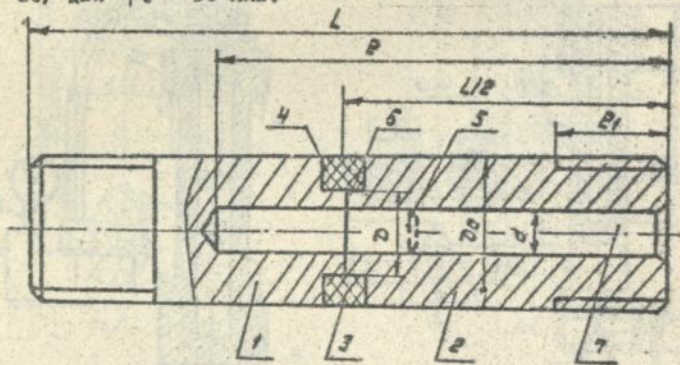


Рис. 8

З метою руйнування однорідних і неоднорідних зварних з'єднань за  $K_{Ic}$ , а також скорочення тривалості технологічного процесу, утворення внутрішньої кільцевої тріщини запропоновано конструкцію збірного трубчастого зразка [12,35,43]. Його основу /Рис.8/ виготовляють із двох частин 1,2, які з'єднують між собою по спряжених поверхнях виступу 5 і отвору 7 до змикання середніх торцевих поверхонь 4,6. В результаті зовнішня поверхня цих частин формує кільцеву канавку 3 для наплавлення, а діаметри торцевих поверхонь - глибину внутрішньої кільцевої тріщини. Після заповнення канавки необхідним матеріалом, висвердлювання отвору у другій частині в межах  $/D_0 + b \leq l \leq 3D_0 + b/$  і кінцевого оброблення зовнішнього діаметра, одержували трубчастий зразок з внутрішньою кільцевою тріщиною, придатний для визначення  $K_{Ic}$  шва.

Апробація методики здійснено на спеціальній установці [2], розробленій на базі зварювального автомата А-825 М. Результати досліджень однорідних зварних з'єднань із нормалізованих сталей 40Х, 30ХГСА і 40Х після гартування та відпуску 773К показали, що для трьох марок сталей метал шва /зварний дріт Св-08Г2С  $\phi$  1,6 мм/ після аргону-дугового зварювання має практично однакові значення тріщиностійкості:  $K_{Ic} = 74,2; 74,5; 77,1$  МПа $\sqrt{м}$  відповідно.

Для неоднорідних зварних з'єднань із 12-ти варіантів конструкційних сталей з певними комбінаціями /40Х, 30ХГСА після нормалізації, гартування та відпуску, сталь Ст.3 після нормалізації та сталь 35 після гартування/ встановлено різну тріщиностійкість шва від варіанта з'єднання. Вона максимальна для варіанта сталі Ст.3 зі сталлю 30ХГСА після гартування та відпуску / $K_{Ic} = 47,4$  МПа $\sqrt{м}$ / і мінімальна - для варіанта сталі Ст.3 зі сталлю 40Х після нормалізації / $K_{Ic} = 19,3$  МПа $\sqrt{м}$ /. Решта варіантів з'єднань мала проміжкові значення  $K_{Ic}$ . Для двох партій збірних зразків /Рис.8/ досліджено тріщиностійкість шва в залежності від марки присадки. У першій партії в якості присадки використано електроди із нержавіючої сталі І2Х18Н10Т /ГОСТ 10052-62/, а у другій - електроди УОНІ - І3/55 /ГОСТ 9488-75/. Встановлено переваги з'єднань другої партії / $K_{Ic} = 67,5$  МПа $\sqrt{м}$ / по відношенню до першої / $K_{Ic} = 52,3$  МПа $\sqrt{м}$ /, що дещо нижче від тріщиностійкості  $K_{Ic}$  вихідних сталей Ст.3 і 30ХГСА після гартування та відпуску.

Обширні експерименти виконано в плані дослідження тріщиностійкості / $K_{Ic}$ / привовної зони для термічно-зміцненого титанового сплаву ВТЗ-І і нових алюмінієвих сплавів АМг6НПП, І201 і І420 у випадках, коли втомну тріщину ініціювали в з'єднанні по середині шва /ш/, на межі зони сплавлення /ЗС/, зони термічного впливу /ЗТВ/ і у вихідному матеріалі сплаву. Заготовки сплавів з'єднували електронно-променевим зварюванням /ЕПЗ/\*. Виявлено, що для сплаву ВТЗ-І привовна зона має майже рівномірну тріщиностійкість, тобто  $K_{Ic} = 46,4$  МПа м для /ЗС/ і  $K_{Ic} = 50,1$  МПа $\sqrt{м}$  для вихідного сплаву. Також же привовна зона і для алюмінієвого сплаву АМг6НПП / $K_{Ic} = 22,8$  МПа $\sqrt{м}$ / для /ЗС/ і / $K_{Ic} = 25,9$  МПа $\sqrt{м}$ / для вихідного матеріалу.

У сплавів І201 і І420 виявлено більшу розбіжність значень  $K_{Ic}$  привовної зони:  $K_{Ic} = 22,5$  і  $21,1$  МПа $\sqrt{м}$  відповідно для /ЗС/ і

\* Зварювання алюмінієвих сплавів виконано в Інституті електрозварювання ім. С.О.Патона.

$K_{Ic} = 32,6$  і  $27,7$  МПа  $\sqrt{м}$  для вихідного матеріалу. Тріщиностійкість /Ш/ і /ЗТВ/ у всіх випадках є вищою від /ЗС/ і нижчою від вихідного матеріалу.

Для сплава І420 з найменшою питомою вагою додатково досліджено вплив способів зварювання: електронно-променевого /ЕПЗ/ та аргоно-дугового /АДЗ/ після різних режимів термічного оброблення. Встановлено максимальну тріщиностійкість  $K_{Ic}$  сплава після /ЕПЗ/ і гартування та відпуску на протязі 3 год. Разом з тим тріщиностійкість всіх зон зварного з'єднання занижена до 30% по відношенню до вихідного сплаву. Для зразків, виготовлених АДЗ виявлено майже до двох разів зниження тріщиностійкості  $K_{Ic}$  металу окремих зон у порівнянні з вихідним металом. На підставі цих результатів видано рекомендації щодо застосування нових алюмінієвих сплавів у практику.

### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Сформульована методологія та розроблено ряд нових методів і відповідних технічних засобів щодо визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів у випадках втомних, статичних і динамічних навантажень.

2. Розроблена технологія виготовлення циліндричного зразка з контрольованою кільцевою тріщиною, яка на відміну від існуючих базових схем руйнування зразків з тріщинами з урахуванням обґрунтованих постулатів забезпечує виконання умов плоскої деформації вздовж всього контура кільцевої тріщини, що повністю відповідає розрахунковій моделі Гріффітса-Ірвіна.

3. На базі розроблених способів ініціювання втомних тріщин у циліндричних зразках з кільцевим надрізом побудовано діаграми втомного руйнування конструкційних матеріалів на стадіях зародження та поширення тріщини в залежності від схеми навантаження, дії робочих середовищ тощо. Встановлено умови поширення втомної тріщини зі сталою швидкістю та заданому коефіцієнті інтенсивності напружень  $K_I$  для досліджуваних матеріалів.

4. Для різних класів матеріалів досліджено вплив масштабного фактора на крихке та квазікрихке руйнування конструкційних матеріалів з урахуванням розмірів циліндричного зразка та тріщини, дії активних середовищ. Встановлено умови автономності зони передруйнування для коректного визначення характеристики  $K_{Ic}$  матеріалу. Показано, що на відміну від випадку досліджень плоских зразків для силової схеми розтягу циліндричного зразка з кільцевою тріщиною зменшення діаметра зразка призводить до зменшення

ного тріщиностійкості.

5. Для широкого класу конструкційних матеріалів з різною міцністю  $16\sigma = 360...1750 \text{ МПа}$  вперше запропоновано та експериментально підтверджено кореляційну залежність щодо підрахунку фатичних значень характеристики  $K_{Ic}$  через  $K_{Ic}$  і деякий коефіцієнт зміцнення матеріалу  $/R/$ .

6. Запропоновано модифіковані конструкції циліндричних зразків шляхом введення конструктивних елементів /різвих насадок або кільцевої канавки для заплавлення досліджуваного матеріалу/, які забезпечують умови самодеформативної зони передруйнування для коректного визначення  $K_{Ic}$ . Одержані  $K_{Ic}$  узгоджуються із  $K_{Ic}$  після випробувань великогабаритних зразків з тріщиною або зразків з тріщиною в тонкому шарварку.

7. Розроблено метод визначення критичного розкриття тріщини  $\delta_c$  на циліндричному зразку з двома кільцевими тріщинами регламентованої глибини. Встановлено, що коректні значення  $\delta_c$  отримуються в певному діапазоні відносної глибини кільцевої тріщини  $1/d/2 = 0,3...0,6/$ .

8. Визначено значення тріщиностійкості  $K_{Ic}$  для ряду конструкційних, пружинних сталей, титанових і алюмінієвих сплавів з урахуванням впливу покриття, текстури, низьких температур, термічної обробки. Показано, що для високоміцних сталей їх релаксацію стосовно до опору втомному руйнуванню можна проводити на базі оцінок статичної тріщиностійкості  $K_{Ic}$ , що підтверджено натурними випробуваннями на втомну довговічність деяких деталей машин на спеціальній промисловій установці.

9. Розроблено метод визначення динамічної тріщиностійкості  $K_{IcT}$  шляхом ударного розтягу циліндричного зразка з кільцевою тріщиною на стандартних маятникових копрах для дослідження різних класів конструкційних матеріалів з залежності від впливу низьких температур, структури матеріалу, режимів термічної обробки. Для визначення опору поширення тріщини в конструкційних матеріалах запропоновано кореляційні залежності між характеристиками динамічної та статичної тріщиностійкості  $/K_{IcT}$  і  $K_{Ic}$  / після виробувань циліндричних зразків з тріщиною в умовах низької  $/77K/$  і кімнатної  $/293K/$  температур. Надано визначальне значення встановленої такої кореляції тільки за характеристиками тріщиностійкості для досліджуваного матеріалу.

10. Розроблено теоретико-експериментальну методику оцінки міцності трубчастих виробів зі зварними з'єднаннями /трубопроводами, посудини тиску/ на базі випробувань трубчастих зразків з внутрішньої кільцевої тріщини у металі шва. Методика передбачає використання промислової установки для автоматичного зварювання трубчастих зразків з можливостями одержання неоднорідних зварних з'єднань і, як наслідок, ранжувати їх за тріщиностійкістю в залежності від структури зварювальних матеріалів, їх міцності та марки присадки для зварювання.

11. Вперше на циліндричному зразку з кільцевою тріщиною, ініційованою в різних зонах зварного з'єднання методами механіки руйнування, детально досліджено пришовну область зварних з'єднань із нових алюмінієвих сплавів і встановлено значне зниження тріщиностійкості  $K_{Ic}$  зони сплавлення за рахунок температурного впливу та дифузійних процесів, які відбуваються у розплавленій ванні під час зварювання.

З метою підвищення  $K_{Ic}$  пришовної області запропоновано ефективні способи зварювання /наприклад, електронно-променевий замість аргонно-дугового/ та оптимальні режими термічної обробки.

12. На підставі розробленої методології та відповідного технічного оснащення створена база оцінки міцності конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань за тріщиностійкістю, що дозволило окремі результати роботи застосувати для вирішення важливих завдань інженерної практики. Вони впроваджені зі значним економічним ефектом у виробництво науково-дослідних організації і підприємств трубої, автотракторної та авіаційної галузей промисловості, хімічного та енергетичного машинобудування. Окремі важливі розробки увійшли в нормативні документи: методичні вказівки РД-50-260-81; Державний стандарт - ГОСТ 25.506-85.

#### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Когут Н.С., Шахматов М.В., Врофеев В.З. Пасудая способность сварных соединений. - Львов, Изд-во "Світ", 1991. - 164 с.
2. Когут Н.С. Трещиностойкость конструкционных материалов. - Львов, Изд-во "Вища школа", 1986. - 160 с.
3. Когут М.С. Визначення тріщиностійкості  $K_{Ic}$  на малогабаритних циліндричних зразках з насадними різьбовими кільцями. - Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні. Вісник ДНУ.- Львів.- 1992.-265. -3.20-23.

4. Когут Н.С. Сопротивление усталости цилиндрических пружин из стали 60С2А. - Физико-химическая механика материалов. - 1992. - № 3. - С.119-120.
5. Когут Н.С., Боженко Л.И., Кукляк Н.Л., Шадыло Я.С., Когут Н.Н. Установка для натуральных испытаний цилиндрических пружин. - Физико-химическая механика материалов. - 1992. - № 6. - С.74-75.
6. Когут Н.С., Іщенко А.Я., Лабур Т.М., Штавра С.П., Третяк М.Г. Трещиностійкість високоміцних алюмінієвих сплавів АМг6НПП, І20І, І420 і їх зварних з'єднань. - Фізико-хімічна механіка матеріалів. - 1990. - № 3. - С.122-123.
7. Лабур Т.М., Іщенко А.Я., Когут Н.С., Гурей В.М. Статическая трещиностойкость сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов АМг6НПП, І20І, І420. - Автоматическая сварка. - 1990. - № 3. - С.75-79.
8. Когут Н.С., Кукляк М.Л., Боженко Л.И., Суєтин Д.О., Москвичев В.М. Про трещиностійкість зварних з'єднань трубчатих зразків. - Фізико-хімічна механіка матеріалів. - 1990. - № 4. - С.108-109.
9. Когут Н.С., Москвичев В.Н., Кукляк Н.Д., Боженко Л.И., Суєтин Д.А. Трещиностойкость конструкционных сталей при статическом и усталостном нагружении. - Проблемы прочности. - 1990. - № 7. - С.28-31.
10. Когут Н.С. Способ испытания сварных соединений сосудов давления на трещиностойкость. - Физико-химическая механика материалов. - 1989. - № 1. - С.116-118.
11. Когут Н.С. Трубчатый образец для определения трещиностойкости трубопроводов. Информ. листок УкрНИИЦТИ. - Львов. - 1988. - № 88-010. - 4 с.
12. Когут Н.С. Сборный трубчатый образец для определения трещиностойкости вязких материалов сварных соединений. - Заводская лаборатория. - 1986. - № 2. - С.76-78.
13. Когут Н.С. Образец с внутренней кольцевой трещиной для изучения трещиностойкости профильных сварных соединений. - Физико-химическая механика материалов. - 1986. - № 3. - С.116-120.
14. Когут Н.С., Буяна Е.В. Трещиностойкость конструкционных сталей в воздухе и сероводородосодержащей среде после покрытия. - Физико-химическая механика материалов. - 1986. - № 4. - С.98-100.
15. Когут Н.С., Преображенский И.Н., Ланько И.Н., Когут И.С. Методика определения  $K_{Ic}$  вязких материалов на цилиндрических образцах с кольцевой выточкой для наплавки. - Проблемы прочности. - 1986. - № 6. - С.22-25.

16. Когут Н.С. Трещиностойкость зон сварного соединения. - Физико-химическая механика материалов. - 1985. - № 1. - С.95-96.
17. Когут Н.С. Методы и средства образования кольцевых трещин в цилиндрических образцах, предназначенных для изучения трещиностойкости материалов. - Проблемы прочности. - 1985. - № 3. - С.30-39.
18. Когут Н.С., Панько И.Н. Применение трубчатого образца для определения трещиностойкости материала сосудов давления и сварных соединений. - Физико-химическая механика материалов. - 1984. - № 1. - С.62-67.
19. Когут Н.С. Влияние направления прокатки на трещиностойкость листовых сталей. - Проблемы прочности. - 1984. - № 2. - С.9-12.
20. Когут Н.С. Об одном подходе к определению  $K_{Ic}$  материала на малогабаритных цилиндрических образцах. - Физико-химическая механика материалов. - 1984. - № 5. - С.115-117
21. Когут Н.С. О выборе диаметров цилиндрического образца для определения  $K_{Ic}$  материала. - Заводская лаборатория. - 1980. - № 3. - С.277-279.
22. Когут Н.С. Сопротивление хрупкому разрушению трубных материалов при низких температурах и ударных нагрузках. - Химическое и нефтяное машиностроение. - 1979. - № 6. - С.40-41.
23. Когут Н.С. Сопротивление разрушению некоторых конструкционных материалов при низких температурах. - Металловедение и термическая обработка металлов. - 1979. - № 7. - С.49-51.
24. Когут Н.С., Тагиров М.З., Когут И.С. К вопросу об автоматизации методики образования и контроля глубины кольцевых трещин в цилиндрических образцах. - Проблемы прочности. - 1978. - № 4. - С.123-124.
25. Когут Н.С., Старчак В.Г. О повышении вязкости разрушения металлических материалов путем нанесения в устье трещины покрытия на основе свинца и кадмия. - Проблемы прочности. - 1978. - № 4. - С.96-98.
26. Когут Н.С., Колодийчук А.К. О влиянии углерода на сопротивление сталей хрупкому разрушению. - Заводская лаборатория. - 1978. - № 7. - С.873-878.
27. Когут Н.З., Лисня В.К. О корреляционных зависимостях между характеристиками трещиностойкости  $\gamma$  и КСТ материалов. - Заводская лаборатория. - 1978. - № 11. - С.1379-1382.
28. Когут Н.С., Тагиров М.З., Бердиков С.В. Влияние условия предварительного нагружения при нанесении трещины на величину трещиностойкости материалов. - Заводская лаборатория. - 1977. - № 6. - С.734-737.

29. Когут Н.С., Тагиров М.З., Финкельштейн Б.И. О применении цилиндрического образца с двумя кольцевыми трещинами для определения критического раскрытия трещины. - Проблемы прочности. - 1977. - № 7. - С.77-81.
30. Когут Н.С., Тагиров М.З., Когут И.С. О динамическом растяжении цилиндрических образцов с кольцевыми трещинами. - Заводская лаборатория, - 1977. - № 9. - С.1141-1143.
31. Гинь И.П., Когут Н.С., Бушко С.В. О способе создания кольцевых усталостных трещин в цилиндрических образцах. - Физико-химическая механика материалов. - 1977. - № 1. - С.108-110.
32. Панасюк В.В., Ковчик С.В., Когут Н.С. О применении цилиндрического образца с кольцевой трещиной для определения сопротивления материала хрупкому разрушению. - Физико-химическая механика материалов. - 1973. - № 1. - С.69-75.
33. Когут Н.С. А.с. № 1827576. Образец для определения трещиностойкости  $K_{Ic}$  вязких материалов. - Открытия, изобретения..., - 1993. - № 26.
34. Когут Н.С., Мигус В.Д., Божняк В.С. А.с. № 1631350. Способ определения прочности соединения наварного шва с цилиндром. - Открытия, изобретения..., - 1991. - № 8.
35. Когут Н.С., Книш В.Г., Бортник М.С. А.с. № 1422077. Способ изготовления трубчатого образца для определения трещиностойкости сварных соединений. - Открытия, изобретения..., - 1988. - № 33.
36. Когут Н.С., Панько И.Н., Когут И.С., Васильев И.П. А.с. № 1157392. Способ изготовления цилиндрического образца для испытания конструкционных материалов и их сварных соединений на трещиностойкость. - Открытия, изобретения..., - 1985. - № 19.
37. Когут Н.С., Хавенсон А.Л. А.с. № 1099237. Способ образования начальной кольцевой трещины в цилиндрическом образце. - Открытия, изобретения..., - 1984. - № 23.
38. Когут Н.С., Когут И.С. А.с. № 1060984. Способ образования кольцевой трещины в цилиндрическом образце с надрезом. - Открытия, изобретения..., - 1983. - № 46.
39. Когут Н.С. Оцінка тріщиностійкості зварних з'єднань на трубчастих зразках з внутрішніми кільцевими тріщинами. Праці Першої міжнародної конф. Конструктивні та функціональні матеріали. - Львів. - 1993. - С.16-17.

40. Когут Н.С., Шабайкович В.А. Трещиностойкость конструкционных материалов и их сварных соединений. Тр. Восьмой международной конф.: Механика разрушения конструкционных материалов. - Киев. - 1993. - Т.2. - С.603-604.
41. Когут Н.С., Рыбак Т.И., Щадло Я.С., Когут Н.Н. Исследование усталостной прочности цилиндрических пружин из стали 60С2А. Тр.Шестого всесоюзного симпозиума: Малоцикловая усталость конструкционных материалов. - Кивинев. - 1991. - С.37-38.
42. Когут Н.С. Образец с внутренней кольцевой трединой для определения трещиностойкости материала профильных сварных соединений. Тр. конф. Надежность труб и трубопроводов. - Челябинск. - 1985. - С.39-40.
43. Когут Н.С., Паилко И.Н. Образец для определения трещиностойкости трубопроводов. Тр.конф. Применение методов механики разрушения в расчетах строительных металлических конструкций на хрупкую прочность и долговечность. - Красноярск. - 1984. - С.82-83.
44. Когут Н.С., Хавенсон А.Д., Кравченко В.М. К вопросу о выборе размеров цилиндрического образца для определения трещиностойкости материала. Тр.конф. Проблемы повышения надежности конструкций. - Куйбышев. - 1980. - С.39-40.
45. Коваль В.П., Когут Н.С., Старчак В.Г. О повышении трещиностойкости конструкционных материалов в сероводородсодержащих средах. Тр.конф. Пути повышения надежности и долговечности газо-промышленного оборудования на месторождениях природного газа, содержащих сероводород. - Баку. - 1977. - С.37-39.
46. Коваль В.П., Когут Н.С. Влияние сероводородсодержащей среды на трещиностойкость низколегированных конструкционных сталей. Тр.конф. Пути повышения надежности и долговечности газопромышленного оборудования на месторождениях природного газа, содержащих сероводород. - Баку. - 1977. - С.11-12.
47. Панаски В.В., Ковчик С.Е., Когут Н.С., Нагирный Л.В. О методах оценки склонности конструкционных материалов к хрупкому разрушению. Тр.конф. Работоспособность машин и конструкции в условиях низких температур. Хладостойкость материалов. Т.2 - Якутск. - 1974. - С.19-46.

*Handwritten signature*

Підп. до друку 24.05.94 Боржат 60х84<sup>I</sup>/16  
Папір друк. № 2. Офс. друк. Умовн. друк. арк.  
Умовн. фарб.-відб. Умовн. видав. арк. 2,5  
Тираж 100 прим. Зам. 75%. Безплатно

ДУЛП 290645 Львів-ІЗ, Ст. Бандери, 12

Дільниця оперативного друку ДУЛП  
Львів, вул. Городоцька, 286

457743

AB 3037

**AB 30.379**