

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ ім. Г. В. КУРДЮМОВА

ГРИЩЕНКО ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 539.3, 539.56, 539.421



**ЗВ'ЯЗОК ЛОКАЛЬНИХ І НОМІНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ З ОЦК ГРАТКОЮ В
УМОВАХ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ**

Спеціальність 01.04.13 – фізика металів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Котречко Сергій Олексійович,
Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
завідувач відділу фізики міцності та руйнування

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Мільман Юлій Вікторович
Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича
НАН України
завідувач відділу фізики метастабільних сплавів та
руйнування високоміцних матеріалів

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Кудін Володимир Григорович,
Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,
доцент кафедри фізики металів

Захист відбудеться «__» грудня 2015р. о _____ годині на засіданні
Спеціалізованої вченої ради Д 26.168.01 в Інституті металофізики ім. Г.
В. Курдюмова НАН України за адресою:
МСП 03680, Київ-142, бульвар Вернадського 36, конференц-зал.

Відгуки на автореферат, завірені печаткою організації, у двох примірниках,
просимо надсилати за адресою:
МСП 03680, Київ-142, бульвар Вернадського 36, Інститут металофізики
ім. Г. В. Курдюмова НАН України. Вченому секретарю Спеціалізованої вченої ради
Д 26.168.01 д.т.н, проф. Лободюку В.А., тел. +38(044)422-95-57

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту
металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України за адресою:
м. Київ, бульвар Вернадського 36.

Автореферат розісланий « 27 » листопада 2015р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 26.168.01
доктор технічних наук, професор



В.А. Лободюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Для забезпечення надійної роботи конструкційних матеріалів, підвищення їх довговічності та попередження раптового крихкого руйнування необхідно мати чітке фізично обґрунтоване розуміння процесів, що відбуваються в слабких ланках будь-якої конструкції, а саме в місцях концентрації напружень – у вістрі надрізів чи гострих тріщин, оскільки здатність металів чинити опір крихкому руйнуванню в умовах неоднорідних силових полів, що створюються концентраторами напружень, характеризує метал як конструкційний матеріал.

Наука про міцність розвивається вже багато років, проте більш ніж два десятиліття тому стало зрозуміло, що для розв'язання існуючих задач використання лише методів механіки руйнування недостатньо, тому ці задачі почали розглядати з точки зору фізичних процесів, що відбуваються у вістрі концентраторів напружень, так був створений новий напрямок – Локальний підхід до руйнування. Головна ідея Локального підходу – ініціювання крихкого руйнування локалізоване в надзвичайно малому об'ємі “process zone” у вістрі концентратора $V_{pz} = 0.001 - 1 \text{ мм}^3$. Сильно неоднорідні силові поля, які виникають в околі концентраторів напружень, є причиною локалізації процесу ініціювання руйнування в гранично малих з макроскопічної точки зору об'ємах. Тому руйнування ініціюється *локальним* (а не середнім - *номінальним*) напруженням σ_{II} . В той же час, при атестації металів та сплавів, щодо їх здатності чинити опір крихкому руйнуванню, використовуються номінальні (середні) напруження, які визначаються за результатами випробувань на одновісний розтяг, динамічний згин, тощо. Крім того, саме ці характеристики використовуються при розрахунках на міцність елементів конструкцій. У зв'язку з чим розробка фізичних уявлень щодо зв'язку між локальними та номінальними характеристиками крихкого руйнування металів і конструкційних сплавів є актуальною проблемою фізики металів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Результати, що увійшли в дисертаційну роботу, були отримані в рамках наукових тематик відділу Фізики міцності та руйнування Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, а саме:

1. Відомчої тематики «Фізична природа механічної стабільності ОЦК – металів на нанорівні», 2013-2015рр., № держреєстрації 0111U002084
2. Цільової наукової тематики «Розробка методики та визначення критичних рівнів крихкої міцності опроміненого корпусного металу реакторів ВВЕР-1000 при перепризначенні їх ресурсу», 2013-2015р., № держреєстрації 0113U004838

Мета і задачі дослідження

Мета роботи – встановити закономірності та розробити фізичні уявлення щодо процесу ініціювання крихкого руйнування в локальній області у вістрі концентраторів напружень (надрізів чи тріщин) і на цій основі віднайти ключові фактори, які визначають рівень локальних характеристик руйнування та встановити зв'язок між *локальними* і *номінальними* характеристиками в конструкційних сталях. Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних задач:

1. Розробити методику визначення мінімального рівня крихкої міцності R_{MC} конструкційних сталей.
2. Віднайти критичні значення локальних напружень та деформацій при руйнуванні конструкційних сталей в умовах концентрації напружень. Встановити закономірності їх зміни та основні фактори, які визначають рівень цих величин.
3. Віднайти умови за яких існує зв'язок між локальним напруженням руйнування σ_f і критичним рівнем міцності металу σ_{2c} та розробити методику експериментального визначення критичної температури T_c , при якій цей зв'язок реалізується.
4. Встановити зв'язок між локальними та номінальними характеристиками окрихчуючої дії концентраторів напружень.
5. Встановити зв'язок між локальним напруженням руйнування σ_f і рівнем крихкої міцності R_{MC} конструкційних сталей та розробити фізичну модель, яка описує основні фактори, що визначають величину локального напруження руйнування σ_f .

Об'єкт дослідження – Типові конструкційні сталі з ОЦК граткою, після термічних обробок, які забезпечують широкий інтервал величини їх зміни міцності $\sigma_{0.2}=372 - 1530$ МПа.

Предмет дослідження – Локальні характеристики ініціювання крихкого руйнування в неоднорідних силових полях, створюваних концентраторами напружень та їх зв'язок з номінальними характеристиками руйнування зразків з концентраторами напружень та механічними властивостями металу.

Методи дослідження

При виконанні роботи використовувалися низькотемпературні серіальні випробування на одновісний розтяг гладких циліндричних зразків та зразків з концентраторами напружень, фрактографічні дослідження поверхні зламу, металографічні дослідження мікроструктури конструкційних сталей, метод скінчених елементів.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Розроблено фізичну модель, яка встановлює зв'язок між величиною локального напруження руйнування σ_f в неоднорідних силових полях, створюваних концентраторами напружень та рівнем мінімального напруження крихкого руйнування металу R_{MC} в умовах одновісного розтягу, а також дозволяє виявити основні фактори, які впливають на цей зв'язок.
2. Віднайдено умови, за яких існує однозначний зв'язок між величиною локального напруження руйнування σ_f та критичним рівнем міцності σ_{2c} металу. Розроблено і апробовано методику експериментального визначення критичної температури T_c крихкого руйнування зразків з концентраторами напружень, при якій існує цей зв'язок.

3. Встановлено зв'язок між параметром q_σ , який характеризує окрихчуючу дію концентратора напружень в околі його вершини та критичним рівнем механічної стабільності K_{msc} металу.
4. Встановлено, що ключовим ефектом, який контролює здатність конструкційних матеріалів чинити опір крихкому руйнуванню в умовах концентрації напружень, є перевищення величини локального напруження руйнування σ_f над рівнем крихкої міцності R_{MC} стандартного зразка при одновісному розтязі. В рамках розробленої моделі показано, що цей ефект обумовлений зменшенням кількості зародкових тріщин критичних розмірів в результаті локалізації процесу ініціювання руйнування в околі вістря концентратора.
5. Запропоновано нову механічну характеристику «коефіцієнт концентраторостійкості» k_v ($k_v = \sigma_f / R_{MC}$), який характеризує ефект перевищення σ_f над R_{MC} та встановлено закономірності впливу на його величину типу мікроструктури конструкційних сталей.

Практичне значення одержаних результатів

1. Розроблена методика експериментального визначення рівня крихкої міцності R_{MC} конструкційних сталей, яка не потребує проведення затратних серіальних низькотемпературних випробувань і може бути реалізована в типових умовах заводської лабораторії.

2. Запропонована нова характеристика k_v , яка на кількісному рівні дозволяє оцінити якість сталі, як конструкційного матеріалу. Розроблена методика її експериментального визначення. Отримані експериментальні значення цієї характеристики в широкому інтервалі значень міцності конструкційних сталей.

Особистий внесок здобувача

Постановка задач, обговорення та інтерпретація отриманих результатів проведені з науковим керівником д.ф.-м.н, професором Котречко С.О. Основний обсяг проведених термічних обробок, серіальних низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг, а також комп'ютерних розрахунків та обробка експериментальних і розрахункових даних були виконанні особисто здобувачем. Комп'ютерні розрахунки проведені у співпраці з к.ф.-м.н. м.н.с Мамедовим С.О., фрактографічні дослідження на електронному растровому мікроскопі проведені в співпраці з м.н.с. Синюком В.С. (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України). Автор роботи брав участь у написанні статей та звітів на основі отриманих результатів разом із співавторами.

Апробація результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи доповідались на наступних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція DFMN 2011 «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, Росія, 22-25 жовтня 2011р.; Міжнародна конференція «Одинговские чтения», Москва, Росія, 13-16 вересня 2012р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Конструкційна міцність матеріалів і ресурс обладнання АЕС», Київ, Україна, 15-19 жовтня 2012.; Сьома міжнародна конференція MSMF-7 «Materials structure & micromechanics of fracture», Брно, Чеська Республіка, 1-5 липня 2013р.; Міжнародна науково-технічна

конференція DFMN 2013 «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, Росія, 22-25 жовтня 2013р.; П'ята міжнародна науково-технічна конференція «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій», Львів, Україна, 24-27 червня 2014р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування», Тернопіль, Україна, 21-24 вересня 2015р.

Публікації

Результати дисертації опубліковані в 6 роботах, із них 4 статті в науковому фаховому виданні «Металофізика та новітні технології», одна стаття в міжнародному науково фаховому виданні «Key Engineering Materials», 1 стаття в збірнику матеріалів конференції, та 6 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 65 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 122 сторінки машинописного тексту із врахуванням 60 рисунків та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність обраної теми, сформульовані мета та задачі дослідження, показана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, наведено відомості щодо апробації роботи та публікації основних результатів.

У **Першому розділі** зроблений огляд літературних джерел щодо фізичної природи процесу ініціювання крихкого руйнування. Проаналізовано існуючі моделі утворення і втрати рівноваги зародкових тріщин в металах та конструкційних сталях. Класичні критерії крихкого руйнування матеріалів в переважній більшості описують крихке руйнування в умовах однорідного розподілу напружень при одновісному розтягуванні. У зв'язку з чим в роботі розглянуті сучасні підходи, зокрема Локальний підхід (ЛП) до руйнування, який використовує методи мікромеханіки руйнування та враховує фізичні особливості процесів утворення та втрати стабільності зародкових тріщин (ЗТ) в сильно неоднорідних силових полях, які породжуються концентраторами напружень. Проаналізована детерміністична, статистична та фізична версія Локального підходу, показана ключова роль локальної пластичної деформації в процесі ініціювання крихкого руйнування та проаналізовані закономірності зміни цієї величини від температури, типу концентратора, структурних особливостей матеріалу, геометрії зразків та інших факторів. Обґрунтована актуальність встановлення зв'язку між локальними та номінальними (середніми) напруженнями руйнування конструкційних матеріалів в умовах сильно неоднорідних силових полів, створюваних концентраторами напружень.

У **другому розділі** описані методики досліджень та наведені марки конструкційних сталей, їх хімічний склад та термообробки.

У роботі використовувались такі конструкційні сталі: Ст.3, Сталь 40, 30ХГСА, 15Х2НМФА, 12ХН3МФА. Використання таких термічних обробок як нормалізація, відпал, гартування та відпуск дозволило отримати широкий спектр структур, серед яких: ферито-перлітна структура, сорбіт, тростит та мартенсит відпуску, що забезпечило широкий інтервал значень міцності $\sigma_{0.2}=370-1530\text{МПа}$. В якості джерела неоднорідних силових полів використовувались кільцеві надрізи двох типів: I) надріз радіусом 0.25 мм та глибиною 1.4 мм з кутом розкриття 45° , що наносились на циліндричні зразки діаметром 8мм.; II) радіусом 0.25мм та глибиною 2.3мм., на циліндричних зразках діаметром 14мм. – такі зразки мали кути розкриття 120° та 45° градусів. Експериментальні дослідження передбачали проведення серіальних низькотемпературних випробувань на одновісний розтяг гладких циліндричних зразків та зразків з концентраторами напружень. Такі випробування були проведенні на розривних машинах УММ-5, МДК-025 та Instron 8802. За результатами серіальних низькотемпературних механічних випробувань гладких зразків будувались температурні залежності межі плинності $\sigma_{0.2}$, істинного напруження руйнування s_k , відносного звуження ψ_k та коефіцієнта деформаційного зміцнення n . За результатами випробувань зразків з концентраторами напружень будували температурні залежності номінального (середнього) напруження руйнування σ_{NF} та відносного звуження під концентратором ψ_N (рис.1). В програмному комплексі Abaqus будувалась осесиметрична модель зразків з кільцевими концентраторами напружень. Пружно-пластичні властивості металу, які використовувалися при моделюванні, визначались за результатами випробувань на одновісний розтяг гладких зразків. Локальні характеристики руйнування розраховувались для навантаження за якого відбувалось руйнування зразка.

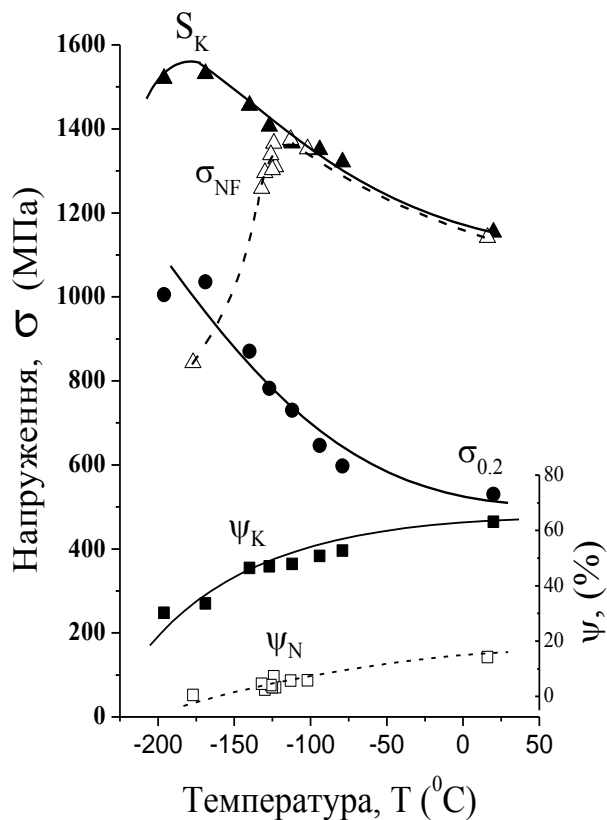


Рисунок 1. – Температурні залежності основних механічних характеристик $\sigma_{0.2}$, S_k , ψ_k сталі 40, які визначались за результатами випробувань гладких циліндричних зразків. Та температурні залежності основних характеристик руйнування циліндричних зразків з кільцевим надрізом: σ_{NF} та ψ_N .

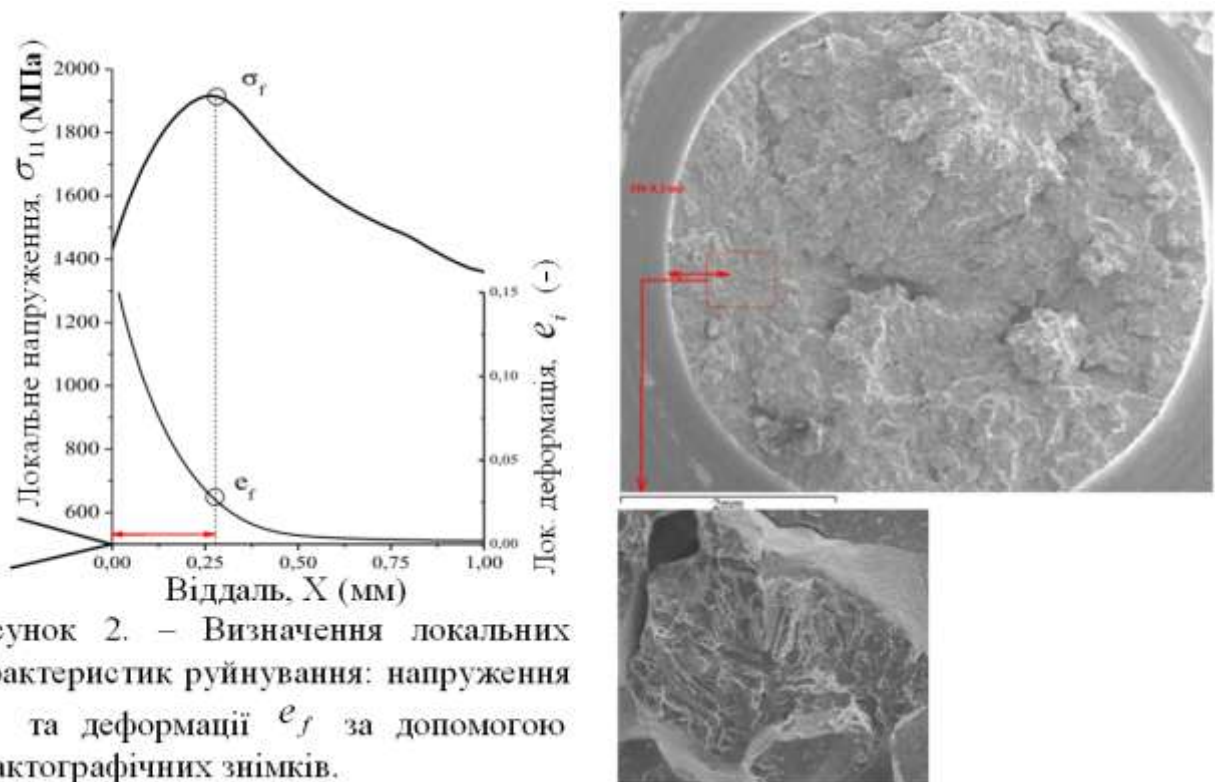


Рисунок 2. – Визначення локальних характеристик руйнування: напруження σ_f та деформації e_f за допомогою фрактографічних знімків.

Таке моделювання дозволило визначити розподіл локальних напружень та деформацій у вістрі концентратора в момент руйнування. Проведені фрактографічні дослідження дозволили ідентифікувати джерела руйнування (місця звідки почалося катастрофічне розповсюдження ЗТ), що дало змогу визначити величину локальних напружень та деформацій в момент руйнування (рис.2).

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений розробці методики визначення мінімального рівня крихкої міцності R_{MC} *конструкційних сталей з ОЦК граткою*. Відомо, що величину R_{MC} визначають за допомогою серіальних низькотемпературних випробувань на гладких циліндричних зразках, як величину мінімального напруження руйнування в області температур в'язко-крихкого переходу [1,2]. Проте на відміну від відпаленого на крупне зерно α – заліза, температура в'язко-крихкого переходу T_{B-K} якого знаходиться в області температур кипіння рідкого азоту ($T = 77\text{ K}$), для більшості конструкційних сталей ця температура лежить значно нижче (рис.3), що обумовлює необхідність використання парів гелію. У зв'язку з чим, в роботі була віднайдена така геометрія зразків з концентраторами напружень, яка з одного боку дозволяє змістити T_{B-K} в область «азотних» температур, а з іншого боку не викликає значного збільшення локального напруження руйнування в результаті локального масштабного ефекту [3,4,5]. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що розроблена методика дозволяє визначати R_{MC} за рівнем номінального напруження руйнування σ_{NF} екстрапольованого на величину 2% деформації циліндричних зразків з кільцевим концентратором напружень $\rho = 2\text{ мм}$. (рис.4).

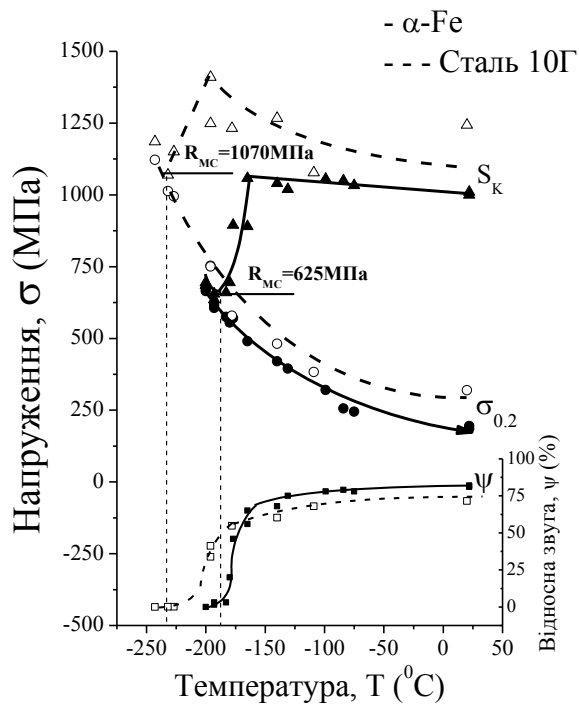


Рисунок 3. – Температурні залежності механічних характеристик $\sigma_{0.2}$, S_K , ψ $\alpha - Fe$ та Сталь 10Г.

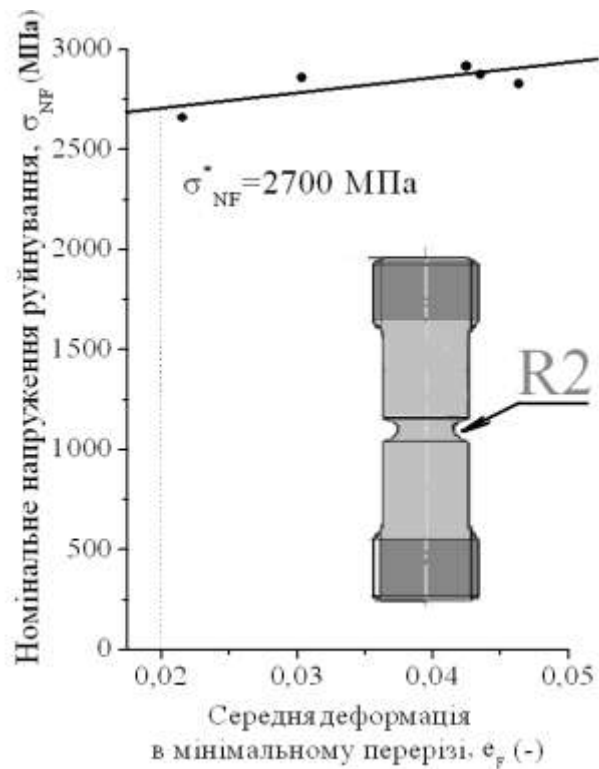


Рисунок 4. – Визначення рівня крихкої міцності R_{MC} шляхом екстраполяції значень номінального напруження руйнування σ_{NF} зразків з кільцевим концентратором напружень на величину 2% макродеформації.

Четвертий розділ присвячений аналізу абсолютних значень та закономірностей зміни локальних характеристик руйнування в умовах концентрації напружень.

У *Першому параграфі* четвертого розділу проведено співставлення експериментальних (визначених за допомогою фрактографічних досліджень) та розрахункових (отриманих шляхом комп'ютерного моделювання) даних локальної деформації крихкого руйнування (рис.5). Встановлено, що незважаючи на широкий інтервал значень e_i , викликаний градієнтом локальних деформацій в межах області “process zone”, найбільш ймовірні значення локальної деформації знаходяться в області 1-3%, ці дані також підтверджуються обробкою літературних джерел [6] та справедливі, як до надрізів, так і гострих тріщин. Це дозволило зробити висновок, що середня величина локальної деформації в момент руйнування близька до 2%.

Другий параграф четвертого розділу присвячений закономірностям зміни локального напруження руйнування в широкому інтервалі температур, що передбачало проведення серіальних низькотемпературних випробувань гладких циліндричних зразків та зразків з двома різними кутами розкриття кільцевого концентратора ($\omega = 45^\circ$ та $\omega = 120^\circ$), що дозволило змінювати значення жорсткості j напруженого стану в околі концентратора напружень. Результати серіальних випробувань в широкому інтервалі температур ($T = -196 \dots +20^\circ C$) та комп'ютерне

моделювання на базі отриманих експериментальних даних дозволили встановити монотонне зменшення рівня локального напруження руйнування σ_f з ростом температури (рис.6).

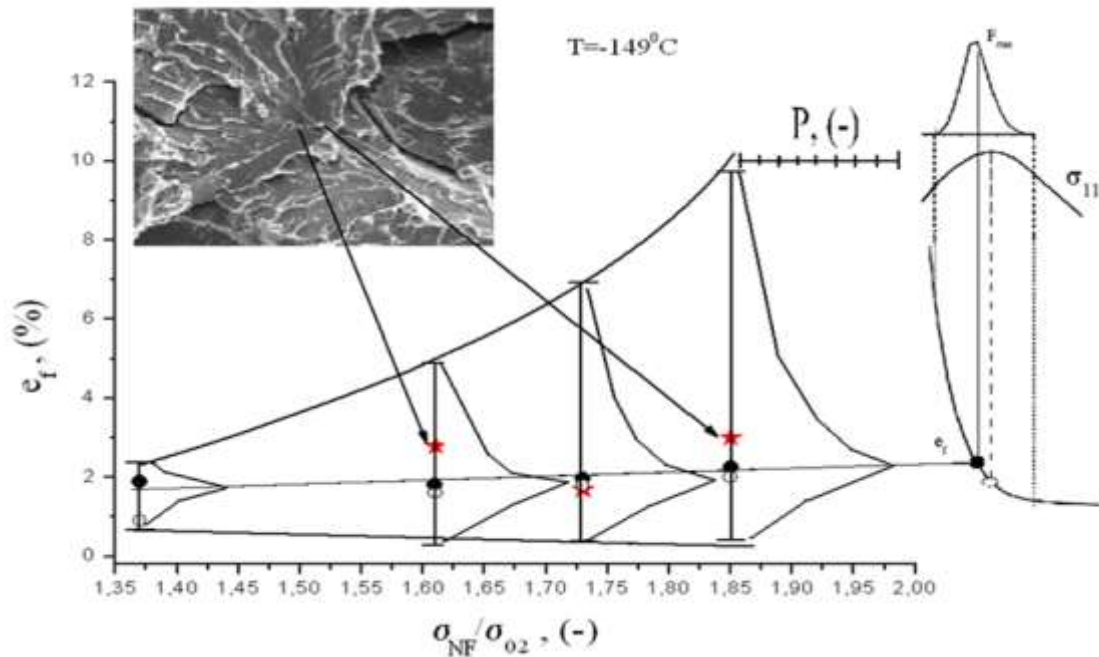


Рисунок 5. – Залежність локальної критичної деформації ініціювання крихкого руйнування від нормованої величини номінального напруження руйнування σ_{NF} до величини межі плинності $\sigma_{0.2}$.

Проведене комп'ютерне моделювання показало, що це обумовлено локалізацією процесу ініціювання крихкого руйнування в гранично малих об'ємах у вістрі концентратора напружень, де ключову роль відіграє кількість зародкових тріщин. З одного боку величина σ_f повинна зростати з підвищенням температури, оскільки при цьому зменшується густина ЗТ, проте ріст температури обумовлює збільшення самої області “process zone”, результатом чого є зростання кількості тріщин, відповідно до отриманих результатів – другий ефект є превалюючим.

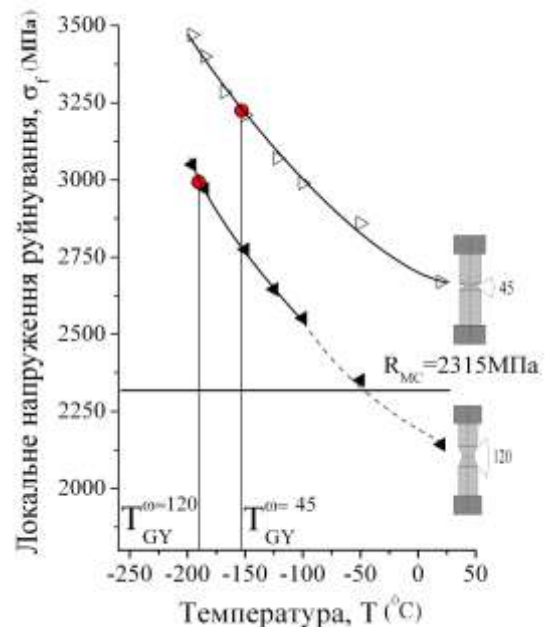


Рисунок 6. – Температурні залежності локального напруження руйнування зразків з кутами розкриття концентратору $\omega = 45^\circ$ та $\omega = 120^\circ$.

У п'ятому розділі на основі локального критерію ініціювання крихкого руйнування в області концентрації напружень віднайдені умови за яких можливо встановити однозначний зв'язок між локальними та номінальними характеристиками руйнування. Показано, що такий зв'язок можливий за умови постійної величини жорсткості напруженого стану у вістрі концентратора, що обумовило необхідність розробки методики визначення критичної температури крихкості T_c , за якої така

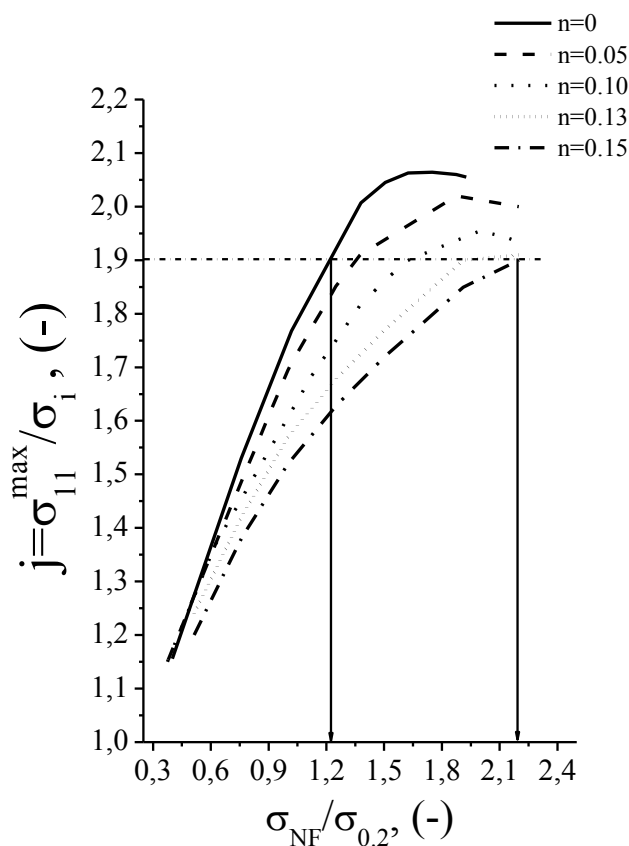


Рисунок 7. – Залежність величини жорсткості від нормованої величини прикладеного навантаження.

умова реалізується.

У першому параграфі п'ятого розділу викладена фізично-обґрунтована методика визначення T_c . Шляхом комп'ютерного моделювання процесу одновісного розтягу зразка з концентратором напружень були отримані залежності значення жорсткості напруженого стану в точці максимуму локальних розтягуючих напружень, від нормованої величини прикладеного навантаження. Моделювання проводилось для сталей із різною схильністю до деформаційного зміцнення (рис.7). Отримані залежності дозволяють для конструкційних сталей з різною схильністю до деформаційного зміцнення (параметр n) віднайти рівні відносного навантаження $\sigma_{NF} / \sigma_{0.2}$, для яких при руйнуванні виконується умова $j = const$. Показано, що для типових конструкційних сталей доцільно зафіксувати величину жорсткості на рівні $j = 1.9$.

Методологія визначення T_c зводиться до пошуку такої температури на температурній залежності основних механічних властивостей за якої реалізується вказане відношення $\sigma_{NF} / \sigma_{0.2}$. В другому параграфі встановлено співвідношення між величиною критичної температури T_c та значенням критичної температури крихкого руйнування в момент загальної плинності T_{GY} зразка з концентратором, запропонованої Дж.Ноттом [7]. В цьому параграфі аналізується вплив величин межі плинності $\sigma_{0.2}$ та коефіцієнта деформаційного зміцнення n на величину жорсткості j при температурі T_{GY} . Показано, що при визначенні локального напруження руйнування за методикою Дж. Нотта не виконується умова сталості величини жорсткості j .

Третій параграф п'ятого розділу присвячений вирішенню важливої прикладної задачі, яка полягає в прогнозуванні окрихчуючої дії концентраторів напружень без проведення складних розрахунків методом скінченних елементів. В цьому параграфі проведений порівняльний аналіз окрихчуючої дії концентраторів, визначеної за допомогою локальних характеристик q_σ та номінальних K_{msc} . Встановлено, що значення коефіцієнта механічної стабільності за критичної температури T_c дає нижню оцінку окрихчення, при цьому ступінь недооцінки окрихчуючої дії концентратора не перевищує 11%.

У шостому розділі приведена фізична модель ініціювання крихкого руйнування металу в околі концентратора напружень, яка ґрунтується на аналізі процесів утворення та втрати стабільності зародкових тріщин в полікристалічному металі. Як відомо, несумісність мікропластичних деформацій є причиною утворення зародкових тріщин при пластичній деформації кристалічних твердих тіл. В полікристалі така несумісність виникає на межах зерен, або на міжфазних границях. В даній роботі в якості моделі джерела ЗТ використовувались дислокаційні скупчення. При цьому, на відміну від класичних моделей враховувалась дія мікронапружень, які є стохастичними за своєю природою:

$$CL [\bar{\sigma}(k_\sigma t - M) + \xi_\tau]^2 \geq \tau_c, \quad (1)$$

де C - константа, що визначається пружними постійними ґратки; L - довжина дислокаційного скупчення; $\bar{\sigma}$ - інтенсивність дотичних мікронапружень; k_σ - коефіцієнт; t - безрозмірна величина дотичних напружень ξ_{ns} , "прикладених" до дислокаційних скупчень ($t = \xi_{ns} / \sqrt{D_{\xi_{ns}}}$); M - орієнтаційний фактор; τ_c - критичний рівень дотичних напружень утворення зародкової тріщини.

В залежності (1) ξ_τ - визначає рівень дотичних мікронапружень, що виникають в результаті взаємодії зерна середньої орієнтації M з пластично деформованою матрицею. При деформації $\bar{e} \leq e_c$:

$$\xi_\tau = k_{\tau 1} \cdot \sqrt{\frac{\bar{e}}{d}}. \quad (2)$$

при $\bar{e} > e_c$:

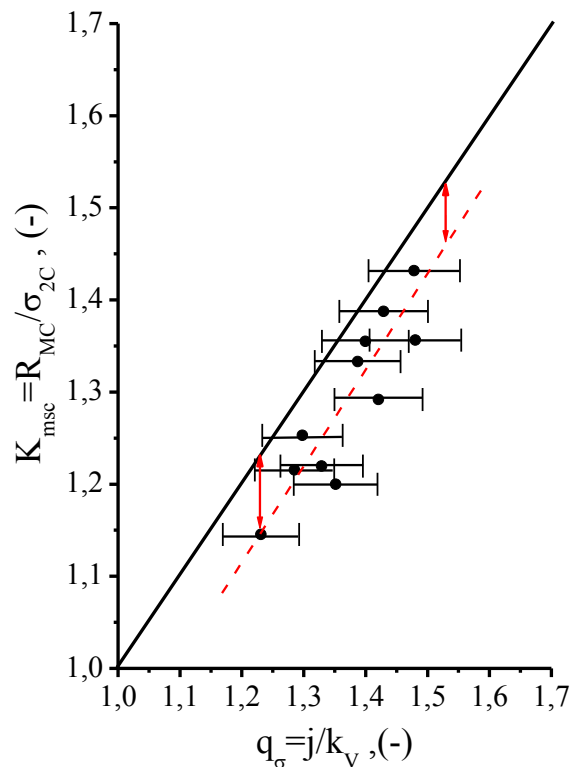


Рисунок 8. – Співставлення окрихчуючої дії концентратора напружень визначеної за допомогою локальних q_σ та номінальних K_{msc} величин.

$$\xi_{\tau} = k_{\tau 1} \cdot \sqrt{\frac{\bar{e}}{d}} - k_{\tau 2} \left(\frac{\bar{e}}{e_c} - 1 \right), \quad (3)$$

де $k_{\tau 1}$ та $k_{\tau 2}$ - коефіцієнти.

Величина флуктуацій напружень в системі ковзання, де формуються дислокаційні скупчення, визначається $\bar{\sigma} \cdot (k_{\sigma} t - M)$.

Умова утворення заблокованого дислокаційного скупчення має вигляд:

$$\sqrt{\frac{L}{r}} [\bar{\sigma} \cdot (k_{\sigma} t - M) + \xi_{\tau}] \leq m \tau_Y, \quad (4)$$

де r - відстань від границі зерна до джерела дислокацій в сусідньому зерні ($r < L$); τ_Y - критичне дотичне напруження початку роботи такого джерела; m - орієнтаційний фактор дислокаційного джерела.

Якщо знехтувати флуктуацією r , вираз ймовірності утворення дислокаційного скупчення можна представити наступним чином:

$$P_{nuc} = 2 \int_{t_c}^{t_{\max}} g(t) \left[\int_m^{m_{\max}} g(m) dm \right] dt, \quad (5)$$

де:

$$m = [\bar{\sigma} \cdot (k_{\sigma} t - M) + \xi_{\tau}] / [\tau_Y \cdot \sqrt{r/L}]. \quad (6)$$

Функція розподілу густини $g(m)$ визначається розподілом орієнтацій границь зерен. В відповідності з виразом (1) критичне значення t_c визначається залежністю:

$$t_c = \frac{1}{k_{\sigma}} \left[M + \frac{1}{\bar{\sigma}} \cdot \left(\sqrt{\frac{\tau_c}{CL}} - \xi_{\tau} \right) \right]. \quad (7)$$

В загальному випадку, інтенсивність генерування зародкових тріщин в одиниці об'єму можна записати як:

$$\rho = k_{\rho} \cdot P_{nuc}, \quad (8)$$

де k_{ρ} - коефіцієнт.

В роботі [5] було показано, що рівень перевищення σ_f над R_{MC} обумовлений залежністю ймовірності руйнування від кількості ЗТ ($\rho \cdot v$), що генеруються в “process zone”. Для аналізу факторів, що контролюють цей ефект доцільно використовувати розподіл Вейбула [8]. В роботах [9,10] було показано, що цей розподіл може використовуватись для апроксимації крихкого руйнування полікристалічних металів. В даному випадку розподіл Вейбула можна записати у вигляді:

$$F_n(\sigma_f) = 1 - \exp[-c \rho V (\sigma_f - \sigma_{th})^m], \quad (9)$$

де $F_n(\sigma_f)$ - ймовірність руйнування при рівні напружень σ_f ; σ_{th} - порогове напруження; ρ - густина ЗТ; v - об'єм “process zone”; $\rho V = N$ - кількість ЗТ; c та m - константи.

Відповідно, розглядаючи σ_f як найбільш ймовірне локальне напруження руйнування, із (9) отримаємо:

$$\sigma_f = \sigma_{th} + \left[\frac{1}{c \rho V} \right]^{1/m} \left(1 - \frac{1}{m} \right)^{1/m}. \quad (10)$$

При цьому, значення m практично не залежить від розміру зерна, а визначається неоднорідністю зеренної структури. Величина c зменшується з подрібненням зерна та залежить від ступеню неоднорідності зеренної структури. В широкому інтервалі розмірів зерен $d = 5 - 120 \text{ } \mu\text{m}$, для типових розподілів розмірів зерен c змінюється в межах: $1 \times 10^{-12} - 2.5 \times 10^{-7}$.

Густина ρ ЗТ залежить від температури, котра впливає на величину τ_y , при досягненні якої відбувається розблокування дислокаційного скупчення в результаті початку роботи дислокаційного джерела. Залежність величини τ_y можна виразити наступним чином:

$$\tau_y = \tau_a + \tau_{th}, \quad (11)$$

де τ_a - атермічна складова дотичних напружень, величина котрої залежить від параметрів джерела Франка-Ріда в вершині заблокованого дислокаційного скупчення; τ_{th} - термічно залежна складова.

Таким чином, вираз величини локального напруження руйнування можна представити у вигляді:

$$\sigma_f = \alpha R_{mc} + \left[\frac{1}{c \rho(\tau_y) V} \right]^{1/m} \left(1 - \frac{1}{m} \right)^{1/m}, \quad (12)$$

де $\rho(\tau_y)$ - залежність густини ρ ЗТ від величини дотичних напружень τ_y .

Вираз (12) дозволяє в явному вигляді віднайти ключові параметри, що визначають величину локального напруження руйнування, проте при аналізі експериментальних значень величини локального напруження руйнування σ_f слід враховувати, що σ_f визначається за критичної температури T_c . Умова ініціювання руйнування в вершині концентратора:

$$\sigma_{11} = \sigma_f, \quad (13)$$

де σ_{11} - максимально величина розтягуючих напружень в PZ.

Відповідно:

$$\sigma_{11} \approx j[\sigma_a + 2\tau_{th}(T_c)], \quad (14)$$

де j - жорсткість напруженого стану в вершині концентратора [11, 7];

σ_a - атермічна складова границі плинності; $\tau_{th}(T_c)$ - величина термічної складової дотичних напружень за критичної температури T_c .

Підставляючи (12) в (14) з врахуванням (13) отримаємо:

$$\alpha R_{MC} + [\frac{1}{c\rho(\tau_a + \tau_{th}(T_c))V}]^{1/m} (1 - \frac{1}{m})^{1/m} = j[\sigma_a + 2\tau_{th}(T_c)]. \quad (15)$$

Вираз (15) являє собою нелінійне рівняння відносно $\tau_{th}(T_c)$. Нажаль неможливо отримати розв'язок цього рівняння в явному вигляді, проте вираз дозволяє встановити основні механічні характеристики, котрі впливають на величину локального напруження руйнування σ_f

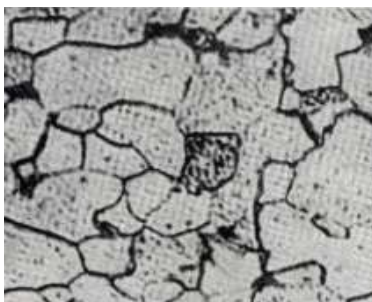
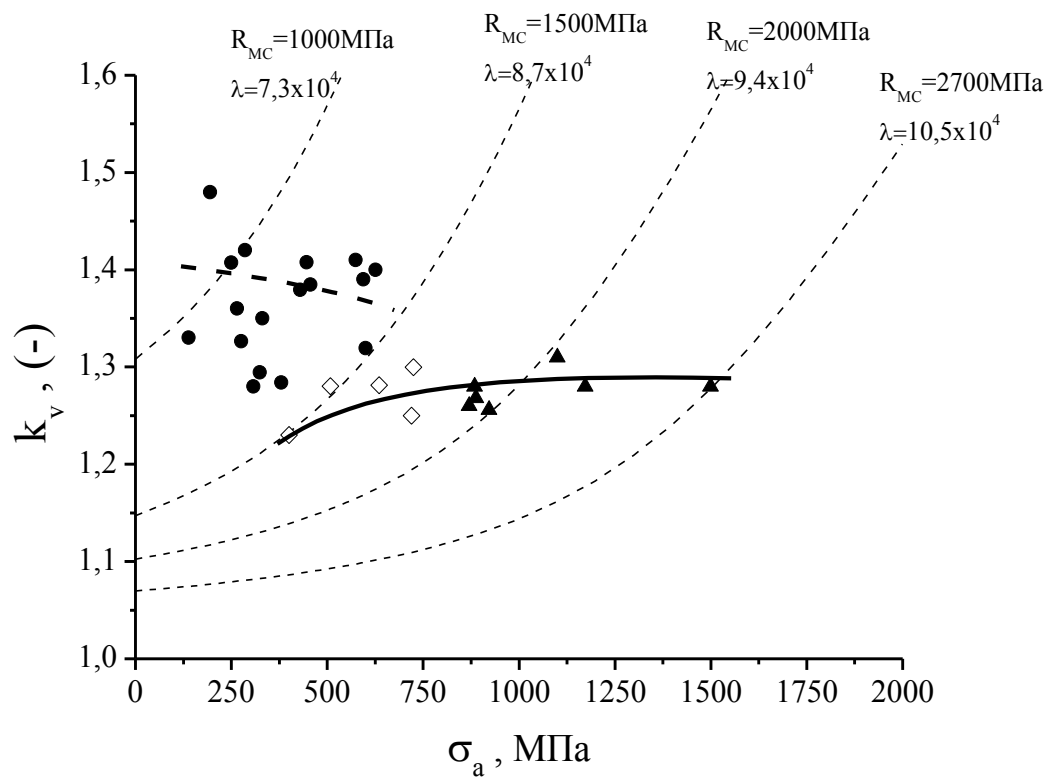
$$\sigma_f = \alpha R_{MC} + f(c, m, \sigma_a, j). \quad (16)$$

Для якісного аналізу залежність (16) можна представити в явному вигляді, якщо другий член в рівності (16) апроксимувати виразом типу $\frac{\lambda}{\tau_{th}(T_c)}$, що є допустимим для низьких температур. Для цих температур в першому наближенні членом τ_a в залежності (11) можна знехтувати. В цьому випадку:

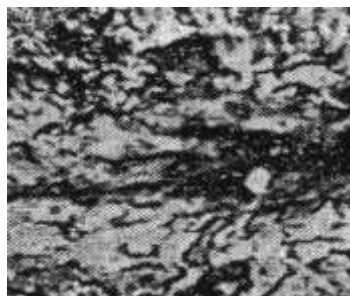
$$\sigma_f = \alpha R_{MC} + \frac{4j\lambda}{(\alpha R_{MC} - j\sigma_a + \sqrt{(j\sigma_a - \alpha R_{MC})^2 + 8j\lambda})}. \quad (17)$$

Залежність (17) дозволяє встановити основні фактори, що впливають на величину локального напруження ініціювання крихкого руйнування в околі концентратора напружень довільної геометрії, включаючи гострі тріщини. Відповідно до (17) «вихідний» рівень σ_f задається величиною крихкої міцності R_{MC} та корегується в бік збільшення у випадку, якщо об'єм v “process zone” у вершині концентратора зменшується та спадає інтенсивність генерування ЗТ в результаті підвищення температури.

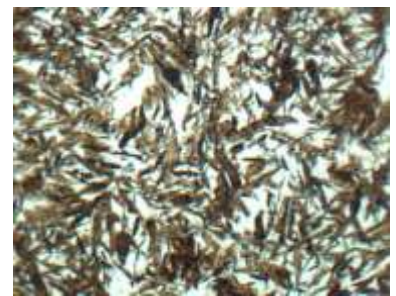
Явище перевищення величини локального напруження руйнування σ_f над рівнем крихкої міцності R_{MC} має принципово важливе значення, оскільки саме здатність металу чинити опір крихкому руйнуванню в умовах концентрації напружень є основним показником високого рівня його службових характеристик та може розглядатись як коефіцієнт «концентраторостійкості». Тому в роботі досліджено закономірності зміни ступеню перевищення σ_f над R_{MC} (що описується коефіцієнтом k_v) від міцності конструкційних матеріалів (в наведеній залежності по вісі абсцис відкладалась величина атермічної складової, оскільки вона дає основний вклад у величину міцності конструкційних сталей) (рис.9).



●
Ферито-перлітні
структури



◇
Структури
Сорбіту/Трооститу



▲
Структури Мартенситу
відпуску

Рисунок 9. – Залежність ступеню перевищення локального напруження руйнування σ_f над рівнем крихкої міцності R_{MC} (параметр k_v) від атермічної складової межі плинності σ_a .

ВИСНОВКИ

1. Процес ініціювання крихкого руйнування в неоднорідних силових полях, створюваних концентраторами напружень є стохастичним за своєю природою, в результаті чого величина локального напруження σ_f ініціювання руйнування залежить не лише від розмірів зародкових тріщин, але - і від їх кількості в локальній області в околі вістря концентратора.
2. Саме вплив кількості зародкових тріщин на величину σ_f є основним фактором, що обумовлює температурну залежність σ_f , а також є причиною перевищення σ_f над рівнем крихкої міцності R_{MC} стандартного зразка при одновісному розтязі.
3. Критичне значення локальної пластичної деформації є стохастичною характеристикою, величина якої може змінюватися в межах “process zone” більш ніж на порядок, при цьому для типових конструкційних сталей величина найбільш ймовірної критичної деформації знаходиться в околі 2%.
4. Для сталей після гартування та відпуску спостерігається тенденція зменшення величини локального напруження руйнування σ_f із збільшенням температури, що обумовлено впливом кількості ЗТ в “process zone” на величину σ_f .
5. Ключовою умовою встановлення зв'язку між локальними та номінальними характеристиками крихкого руйнування є стале значення величини жорсткості напруженого стану $j = const$, що забезпечується в розробленій методиці визначення критичної температури крихкості T_c .
6. Величина коефіцієнта механічної стабільності K_{ms} за критичної температури T_c може використовуватися для оцінки ступеня окрихчення конструкційних сталей в умовах концентрації напружень.
7. Ступінь перевищення величини локального напруження крихкого руйнування σ_f над мінімальним рівнем крихкої міцності R_{MC} (параметр $k_v = \sigma_f / R_{MC}$) характеризує здатність конструкційних матеріалів чинити опір руйнуванню в умовах неоднорідних силових полів, створюваних концентраторами напружень, та може розглядатися як показник якості конструкційних сталей. Величина цього перевищення $k_v = \sigma_f / R_{MC}$ залежить від кількості зародкових тріщин, які утворюються в “process zone”.
8. В широкому інтервалі міцності конструкційних сталей $\sigma_{02} = 370 \dots 1530$ МПа, ступінь перевищення σ_f над R_{MC} (параметр $k_v = \sigma_f / R_{MC}$) лежить в межах 1,28–1,40 та має тенденцію до зниження із підвищенням рівня міцності сталей. Це можна пояснити не однаковою інтенсивністю генерування зародкових тріщин в сталях з різною структурою, зокрема в ферито-перлітних та мартенситних сталях.
9. Використання концентратора напружень у вигляді кільцевого надрізу радіусом 2 мм. та глибиною 1,4 мм. на гладких циліндричних зразках діаметром 8 мм. дозволяє визначити рівень крихкої міцності конструкційних сталей за величиною номінального напруження руйнування. Це суттєво спрощує методику експериментального визначення мінімального рівня крихкої міцності R_{MC} та дозволяє відмовитись від трудоемких і вартісних серіальних низькотемпературних випробувань з використанням парів гелію.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мешков Ю. Я. Структура металла и хрупкость стальных изделий / Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко. – Киев: Наукова думка, 1985. – 220 с.
2. Котречко С. А. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции / С. А. Котречко, Ю.Я. Мешков. – Киев: Наук думка, 2008 – 295с.
3. Kotrechko S. Transferability of Fracture Mechanical Characteristic/, S. Kotrechko, I. Dlouhy // NATO Science Series. – 2008. – №78. – С. 135–150.
4. Котречко С.А. Локальный подход к анализу хрупкого разрушения и его физическая интерпретация/ С.А. Котречко. // Проблемы прочности. – 2003. – №4. – С. 14–31.
5. Котречко С.А. Локальный масштабный эффект при хрупком разрушении металлов/ С. А. Котречко, С.А. Мамедов. // МФиНт. – 2011. –Т.33, №5. – С. 687–705.
6. Chen J. Fracture behavior of C-Mn steel and weld metal in notched and precracked specimens: Part I. fracture behavior / J. Chen, G. Wang. // Metallurgical Transactions. – 1990. – №21. – С. 321–330.
7. Нотт Д. Основы механики разрушения / Дж Нотт. – Москва: Металлургия, 1978. – 256 с.
8. Витвицкий М. П. Прочность и критерий хрупкого разрушения стохастически дефектных тел / М. П. Витвицкий, С. Ю. Попина. – Киев: Наукова думка, 1980. – 244 с.
9. Компьютерное моделирование влияния параметров распределения размеров зерен на характеристики прочности поликристаллического железа в хрупком состоянии/ [Г. П. Зими́на, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков та ін.]. // МФиНт. – 2001. – Т.23, №6. – С. 811–821.
10. Зими́на Г. П. Компьютерное моделирование влияния величины пластической деформации металла на значение параметров распределения Вейбула/ Г. П. Зими́на, С. А. Котречко. // МФиНт. – 2004. – Т.26, №4. – С. 457–467.
11. Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – Киев: Наукова думка, 1976. – 302 с.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Interrelation between local and global characteristics of cleavage fracture / [W.M.Grishchenko, S.A.Kotrechko, S.A. Mamedov and others.]. // Key Engineering Materials. – 2014. – №10. – p. 221–224.
2. Физическое обоснование экспериментального определения хрупкой прочности R_{MC} конструкционных сталей по результатам испытания образцов с концентратором напряжений / С.А. Котречко, Ю.А. Полушкин, В.Н. Грищенко, С.А. Мамедов. // МФиНт. – 2013. – Т.35, №11. – С. 1517–1526.
3. Залежність величини критичної температури при випробуваннях на ударну в'язкість від параметрів мікроструктури мартенситних маловуглецевих сталей / С.О. Котречко, Ю.Я. Мешков, Р.В. Тельович, В.М. Грищенко. // МФиНт. – 2014. – Т.36, №4. – С. 461–476.

4. Котречко С.А. Корреляционная связь между уровнем хрупкой прочности и пределом текучести конструкционных сталей / С.А. Котречко, Ю.А. Полушкин, В.Н. Грищенко. // МФиНт. – 2015. – Т.37, №6. – С. 857–864.
5. Котречко С.А. Факторы, определяющие уровень чувствительности конструкционных сталей к концентрации напряжений / С.А. Котречко, В.Н. Грищенко, С.А. Мамедов. // МФиНт. – 2015. – Т.37, №5. – С. 649–663.

АНОТАЦІЯ

Грищенко В.М. Зв'язок локальних і номінальних характеристик руйнування конструкційних сталей з ОЦК граткою в умовах концентрації напружень – на правах рукопису. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.13 – фізика металів. – Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ, 2015.

Дисертаційна робота присвячена встановленню закономірностей процесу ініціювання крихкого руйнування в сильно неоднорідних силових полях, створюваних концентраторами напружень та віднаходженню, на цій основі, зв'язку між локальними та номінальними характеристиками крихкого руйнування конструкційних сталей з ОЦК граткою. В роботі за результатами експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання віднайдені закономірності зміни величини локальних характеристик ініціювання крихкого руйнування – критичної величини локального напруження σ_f та критичної деформації ϵ_f в широкому температурному інтервалі $T = -196...+20^{\circ}\text{C}$. Запропонована мікроскопічна модель ініціювання крихкого руйнування в околі концентратора напружень. Встановлено, що ключовим ефектом, який контролює здатність конструкційних матеріалів чинити опір крихкому руйнуванню в умовах концентрації напружень є перевищення величини локального напруження руйнування σ_f над рівнем крихкої міцності R_{MC} стандартного зразка при одновісному розтязі. Цей ефект обумовлений зменшенням кількості зародкових тріщин критичних розмірів в результаті локалізації процесу ініціювання руйнування в гранично малому об'ємі в околі вістря концентратора.

Віднайдені умови за яких можливий однозначний зв'язок між локальними і номінальними характеристиками руйнування, та розроблена методика визначення критичної температури крихкості за якої такі умови реалізуються. На основі встановленого зв'язку запропоновані методики експериментально визначення ступеня окрихчення конструкційних сталей в умовах концентрації напружень та оцінки їх якості, як конструкційного матеріалу.

Ключові слова: крихке руйнування, зародкові тріщини, локальний підхід до руйнування, окрихчення, міцність, критична температура крихкості.

АНОТАЦИЯ

Грищенко В.Н. Связь локальных и номинальных характеристик разрушения конструкционных сталей с ОЦК решеткой в условиях концентрации напряжений. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 – физика металлов. – Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев, 2015.

Диссертационная работа посвящена установлению закономерностей процесса инициирования хрупкого разрушения в сильно неоднородных силовых полях, которые создаются концентраторами напряжений, установлению на этой основе связи между локальными и номинальными характеристиками хрупкого разрушения конструкционных сталей с ОЦК решеткой.

Для этого впервые разработанная методика экспериментального определения базовой номинальной характеристики – уровня хрупкой прочности R_{MC} конструкционных сталей, которая позволяет отказаться от сериальных низкотемпературных испытаний в парах гелия. Методика предусматривает испытание 5 цилиндрических образцов с кольцевым концентратором напряжений радиусом 2 мм и определение уровня R_{MC} путем экстраполяции значений номинального напряжения разрушения σ_{NF} на величину 2% деформации.

Основываясь на результатах экспериментальных исследований и компьютерного моделирования, установлены закономерности изменения величин локальных характеристик инициирования хрупкого разрушения – критического значения локального напряжения σ_f и критической деформации e_f в широком температурном диапазоне $T = -196...+20^{\circ}\text{C}$. Показано, что уровень локального напряжения разрушения σ_f имеет тенденцию к монотонному уменьшению с ростом температуры, это обусловлено локализацией процесса инициирования хрупкого разрушения в предельно малом объеме V_{PZ} (“process zone”) у острия трещины, где ключевую роль играет количество зародышевых трещин. Поскольку количество зародышевых трещин определяется двумя факторами, а именно плотностью зародышевых трещин в пределах области “process zone” и объемом V_{PZ} этой области, имеют место две противоположные тенденции. С одной стороны уровень σ_f с повышением температуры должен расти, поскольку при этом уменьшается плотность зародышевых трещин, но температура оказывает влияние на размер самой области “process zone”, существенно увеличивая ее размеры, проведенные

исследования показали, что этот эффект является превалирующим. В тоже время установлено, что локальная деформация инициирования хрупкого разрушения e_f в широком температурном интервале, и независимо от типа концентратора и его остроты находится в достаточно узком интервале значений 1-3%. Показано, что наиболее вероятная величина локальной критической деформации конструкционных материалов составляет 2%.

Определены условия, при которых существует однозначная связь локальных и номинальных характеристик разрушения конструкционных материалов. Показано, что ключевое условия существования такой связи есть постоянная величина жесткости напряженного состояния в момент разрушения образца с концентратором напряжений. В работе разработана методика определения критической температуры хрупкости, при которой указанный критерий осуществляется.

Установленная связь локальных и номинальных характеристик разрушения при критической температуре хрупкости впервые позволила оценить меру охрупчиваемости материала, вызванной концентрацией напряжений, при помощи интегральных показателей без проведения сложных компьютерных расчетов.

В работе показано, что ключевым эффектом, который контролирует способность конструкционных материалов сопротивляться хрупкому разрушению в условиях концентрации напряжений есть превышение величины локального напряжения разрушения σ_f над уровнем номинальной характеристики – хрупкой прочности R_{MC} стандартного образца при одноосном растяжении. Этот эффект обусловленный уменьшением количества зародышевых трещин критических размеров в результате локализации процесса инициирования разрушения в предельно малом объеме у острия концентратора.

Ключевые слова: хрупкое разрушение, зародышевые трещины, локальный подход к разрушению, охрупчивание, критическая температура хрупкости.

ABSTRACT

Grishchenko V. M. Interrelation between local and nominal characteristics of fracture of structural steel with bcc lattice under conditions of stress concentration. – Manuscript.

Thesis of the Doctor of Philosophy degree (Candidate of science in Physics and Mathematics) in specialty 01.04.13 – Physic of metal. – G. V. Kurdumov Institute for Metal Physics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2015.

Thesis is dedicated to research laws of the process of initiating brittle fracture in a highly non-uniform force fields created by stress concentrators. And for finding, on this basis, interrelation between local and nominal characteristics of brittle fracture of structural steel with bcc lattice. In this paper the results of experimental studies and computer modeling uncovered patterns of change in the value of local characteristics initiation of brittle fracture - critical value of local stress σ_f and critical deformation e_f in a wide temperature range $T = -196 \dots + 20^\circ\text{C}$.

It was proposed microscopic model of brittle fracture initiation in a neighborhood stress concentrators. It was established that the key effect which controls the ability of structural materials resist to brittle fracture under conditions of stress concentration is exceeding the value of the local stress fracture σ_f above the brittle strength R_{MC} of a standard sample under uniaxial stretch. This effect is due to a decrease in the number of nuclear cracks critical dimensions as a result of the localization process fracture initiation in a very small volume in the vicinity of the concentrator tip.

Discovered conditions under which a possible unambiguous link between local and nominal characteristics destruction, and developed a method of determining the critical temperature at which the fragility of these conditions are realized. Based on the established communication methods offered experimentally determine the degree of embrittlement of structural steels in conditions of stress concentration and assessment of their qualities as construction material.

Keywords: brittle fracture, nuclear cracks, local approach to fracture, embrittlement, strength, critical temperature.