

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. О. С. Петраковською (Україна); д-ром техн. наук, проф. С. І. Головком (Україна)

Надійшла до редколегії 14.02.2016

Прийнята до друку 21.02.2016

УДК 539.375.5+539.421.5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РУЙНУВАННЯ ТА СТРУКТУРНИМИ СКЛАДОВИМИ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ МІКРОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

БОЛЬШАКОВ В. І.¹, д. т. н, проф.,
ЛАУХІН Д. В.², д. т. н, проф.,
БЕКЕТОВ О. В.^{3*}, к. т. н., доц.,
ІВАНЦОВ С. В.⁴, к. т. н., доц.,
ЛАУХІН В. Д.⁵, м. н. с.

¹ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

² Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

^{3*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: freibergerde@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁵ Лабораторія експериментальних наукових досліджень, Державний вищий навчальний заклад “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-62, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

Анотація. Постановка проблеми. Аналіз взаємозв'язку між характеристиками руйнування та структурними складовими низьковуглецевих мікролегованих сталей. **Методика.** Проведено комплекс фрактографічних досліджень із використанням растрового електронного мікроскопа. Виконано розрахунки деформаційного стану феритної складової низьковуглецевих мікролегованих сталей. **Результати.** У ході виконання роботи проведено порівняльний аналіз деформації феритної складової досліджуваних марок сталей відповідно до концепції Томассона. **Наукова новизна** полягає у визначенні залежності пластичної деформації, яка забезпечує ріст та розповсюдження в'язкого руйнування, від структури низьковуглецевих мікролегованих сталей. **Практична значимість.** Вивчення закономірностей руйнування сприятиме можливості керування процесами розповсюдження тріщин у будівельних матеріалах, і, як наслідок, підвищить надійність виробів із цих матеріалів.

Ключові слова: структурні складові; ферит; перліт; руйнування; пластична деформація; пора; тріщина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РАЗРУШЕНИЯ И СТРУКТУРНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

БОЛЬШАКОВ В. И.¹, д. т. н, проф.,
ЛАУХИН Д. В.², д. т. н, проф.,
БЕКЕТОВ А. В.^{3*}, к. т. н., доц.,
ИВАНЦОВ С. В.⁴, к. т. н., доц.,
ЛАУХИН В. Д.⁵, м. н. с.

¹ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державне вище навчальне закладення «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

² Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державне вище навчальне закладення «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

^{3*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державне вище навчальне закладення «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державне вище навчальне закладення «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: freibergde@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁵ Лабораторія експериментальних наукових досліджень, Державне вище навчальне закладення «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

Анотація. Постановка проблеми. Аналіз взаємозв'язку між характеристиками руйнування та структурними складовими низкоуглеродистих мікролегірованих сталей. **Методика.** Проведен комплекс фактографічних досліджень з використанням растрового електронного мікроскопа. Виконані розрахунки деформаційного стану ферритної складової низкоуглеродистих мікролегірованих сталей. **Результати.** В ході виконання роботи проведено порівняльний аналіз деформації ферритної складової досліджуваних марок сталей, в відповідності з концепцією Томассона. **Научна новизна** заключається в визначенні взаємозв'язку між пластичною деформацією, забезпечуючою ріст та поширення вязкого руйнування, та структурою низкоуглеродистих мікролегірованих сталей. **Практична значимість.** Вивчення закономірностей руйнування розкриває можливості управління процесами поширення тріщин в будівельних матеріалах, і, як наслідок, призводить до підвищення надійності готових будівельних конструкцій.

Ключові слова: структурні складові; феррит; перліт; руйнування; пластична деформація; пори; тріщина

INVESTIGATION OF THE RELATION BETWEEN DESTRUCTION PERFORMANCE AND STRUCTURAL COMPONENTS OF LOW-CARBON MICRO-ALLOYED STEEL

*BOLSHAKOV V.I.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
LAUKHIN D.V.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
BEKETOV A.V.^{3*}, Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.,
IVANTSOV S.V.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.,
LAUKHIN V.D.⁵, Junior researcher*

¹ Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment “Prydniprov’ska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

² Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment “Prydniprov’ska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

^{3*} Department of Materials Science, State Higher Educational Establishment “Prydniprov’ska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

⁴ Department of Materials Science, State Higher Education Establishment “Prydniprov’ska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: freibergde@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁵ Laboratory experimental research, State Higher Education Establishment “Prydniprov’ska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: mom@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

Annotation. Raising of problem. Analysis of the relation between destruction performance and structural components of low-carbon, micro-alloyed steels. **Methodology.** It was realized the complex factual investigations using scanning electron microscope. It was calculated the deformation state of the ferrite component of low carbon micro-alloyed steels. **Results.** In the course of the work was carried out a comparative analysis of the ferrite component deformation of the test grades, in accordance with the concept of Tomasson. **Scientific novelty** consists in relation determining between the plastic deformation, ensuring the growth and spread of ductile fracture structure of hard and low carbon micro-alloyed steels. **Practical significance.** The study of destruction patterns reveals the process management capabilities of crack growth in building materials, and as a result, increases of the building structures reliability.

Keywords: structural components, ferrite, pearlite, destruction, plastic deformation, pore, crack

Вступ

Дослідження закономірностей руйнування із застосуванням методів фрактографії дозволяють сьогодні об'єднати зусилля фізики і механіки руйнування для створення єдиної теорії поведінки будівельних матеріалів в екстремальних умовах експлуатації [13].

Фрактографія як метод наукового дослідження дозволяє виявити механізми розвитку тріщини, глибинні причини дії різних чинників, зокрема, умов навантаження і властивостей матеріалу на процес руйнування [2]. У цьому випадку досліджується мікробудова поверхні зламу. Методи дослідження виду зламів на макро- і мікрорівнях доповнюють один одного, а у вирішенні конкретних питань один із них стає визначальним. Вид зламу є критерієм оцінки якості металу [10]. Саме тому керування процесом руйнування і знання його закономірностей стало актуальним науковим завданням.

Мета статті – аналіз механізмів руйнування структурних складових низьковуглецевих мікрولةгованих сталей.

Результати досліджень та їх обговорення

За даними праці [11], загальний механізм руйнування низьковуглецевих мікрولةгованих сталей для будівельних металевих конструкцій у стані постачання в'язкої, що зумовлено ферито-перлітною структурою металопрокату.

Загальна картина в'язкого руйнування зазвичай включає утворення пор навколо включень або частинок другої фази з наступним їх ростом у подовжньому і поперечному напрямках до повного злиття у разі збільшення навантаження. На цю стадію росту пор може впливати гідростатична компонента напруги, тому що поперечні головні розтягальні напруги полегшують зростання пор.

Стан при одноосьовому розтягуванні зразків досить важко аналізувати. Виникнення пор навколо частинки сильно залежить від сили зв'язку частинки з матрицею. Однак навіть якщо включення не пов'язані з матрицею хімічно, зародження пор зазвичай утруднене напруженнями укладки (виникають унаслідок різної стислості частинки і матриці при охолодженні), зумовлюють міцне захоплення частки матрицею. Якщо напруги, що виникають у включеннях, розтягальні, то частинки можуть зруйнуватися до розриву по поверхнях. Інші частинки (наприклад, оксиди металу в мідній матриці) можуть змочувати матрицю (зв'язуватися з нею). Такі частинки, як карбіди або нітриди в сталях, пов'язані з матрицею вельми міцно, і пори можуть виникати тільки при високих локальних напруженнях, зумовлених створенням великої кількості вакансійних призматичних петель на протилежних кінцях частинки. Ці петлі виникають завдяки «ковзним» дислокаційним петлям, що

залишаються навколо частинки рухаються дислокаціями. Для виникнення пор необхідні великі пластичні деформації. При цьому необхідно також, щоб частинки були некогерентні з матрицею, оскільки когерентні частинки просто перерізуються лініями ковзання. Розмір частинок може впливати на виникнення пор. Дислокаціям, що ковзають у матриці, легше обігнути область впливу частинки, якщо вони малі, шляхом повздожнього ковзання, ніж накопичуватися навколо них. При цьому для зародження пор необхідна велика деформація матриці. Ефект цей посилюється, якщо частинки при малих розмірах міцно пов'язані з матрицею. Отже, існує великий набір значень деформації, необхідної для зародження пор. Імоврно, у сталях пори виникають навколо включень при значно менших деформаціях, ніж навколо карбідів і нітридів. Виникнення пор навколо великих частинок полегшене порівняно з дрібними [4–8; 12].

Томассон [9] запропонував модель для опису злиття пор. Як показано на рисунку 1, він розглянув квадратну сітку квадратних пор у жорстко-пластичній матриці, що складається зазвичай із двох частин, при плоскій деформації. Якщо відстані між порами великі, тіло легше деформується в цілому шляхом плинності всього перерізу, ніж утворенням внутрішніх шийок між порами. Розтягування спричинює витягування пор у напрямку X_1 і зближення їх центрів у напрямку X_2 . Наприкінці, пори розташовуються так близько між собою, що виникає можливість утворення між ними внутрішніх локальних шийок. Після цього відбувається остаточне злиття пор.

Якщо середня розтягувальна напруга в напрямку X_1 , котра необхідна для плинності внутрішньої перемички, дорівнює σ_n , то загальна умова злиття пор визначається за формулою :

$$\sigma_{n(1-\sqrt{V_f})} + P < \sigma_{22} + 2\tau_f, \quad (1)$$

де σ_{22} – розтягувальна напруга, прикладена у напрямку X_2 ; P – накладений гідростатичний тиск; V_f – об'ємна частка пор.

Злиття пор не може відбутися, якщо

$$P > 2\tau + \sigma_{22}. \quad (2)$$

Томассон показав [1; 9], що при одноосьовому розтягуванні зміна поздожніх розмірів в основному відбувається шляхом однорідного подовження з малою часткою неоднорідного внутрішнього звуження.

Модель враховує вплив об'ємної частки пор на пластичність як при одноосьовому розтягуванні, так і в полі трьохосьових напружень перед гострою тріщиною. Аж до злиття пор, умови якого визначені виразом (1); зміну геометрії можна розрахувати за формулою:

$$\frac{a}{b} = \exp(2\varepsilon_{11}) \sqrt{V_f + (1-\sqrt{V_f})}, \quad (3)$$

Таблиця 2

Комплекс механічних властивостей досліджуваних сталей / Complex mechanical properties of steels investigated

	Межа плинності σ_T (Мпа)	Межа міцності σ_B (Мпа)	Відносне подовження δ_5 (%)	Ударна в'язкість КСВ ⁺²⁰ Дж/см ²
Зсп	297	449	31	154
09Г2С	377	514	30	64
10Г2ФБ	532	596	35	165

де ϵ_{11} – однорідна деформація у напрямку X_1 ; $2a$ – розмір пори; $2b$ – відстань між порами.

Деформація ϵ_{11} зростає доти, доки співвідношення a/b і відповідний коефіцієнт зтиснення σ_n / τ_y не буде задовольняти умові злиття пор. На самому початку утворення внутрішніх шийок припускають, що розвиток пластичної течії забезпечує максимальну швидкість розвантаження.

Загальне відносне зміщення двох поверхонь, необхідне для остаточного руйнування, має той же порядок, що і відстань між порами в момент утворення шийок, а це при малих об'ємних частках V_f означає, що макроскопічну деформацію в момент злиття можна прийняти за загальну деформацію, що спричинює руйнування. Ця деформація називається закритичною, тому що полягає у тому, що зразок необхідно деформувати напругою, котра перевищує тимчасовий опір розриву до виникнення тенденції до утворення внутрішніх шийок.

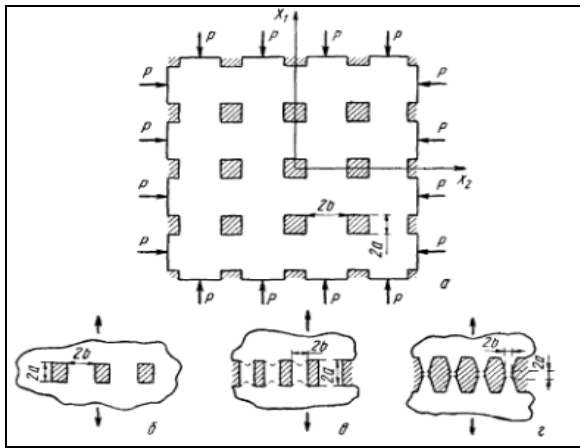


Рис. 1. Модель Томассона, коалесценція пор (а), та послідовні стадії деформації (б – г) / Model Thomasson coalescence pores (a) and successive stages of deformation (b – d)

Деформація у напрямку X_1 розраховується за формулою :

$$\epsilon_{11} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{a}{b \cdot m} \right] \quad (4)$$

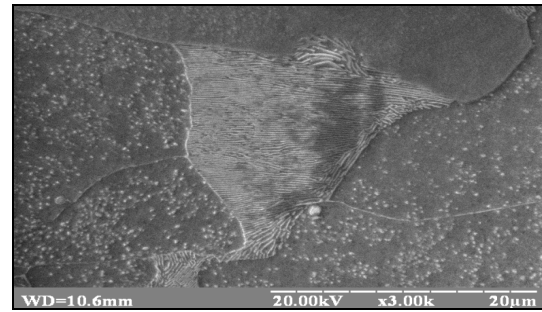
У ході виконання роботи було проведено порівняльний аналіз деформації феритної складової низьковуглецевих мікрелегованих сталей відповідно до концепції Томассона.

Хімічний склад та комплекс механічних властивостей сталей, що досліджувалися, наведено відповідно в таблицях 1 і 2. Структуру досліджуваних сталей наведено на рисунку 2.

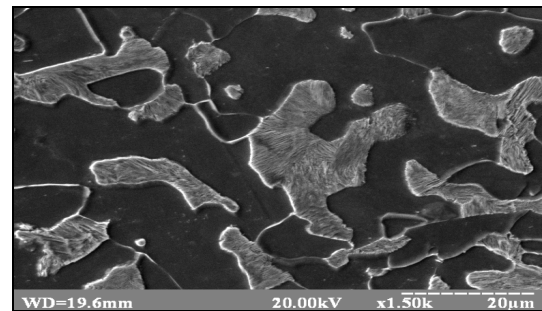
Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей / The chemical composition of the studied steels

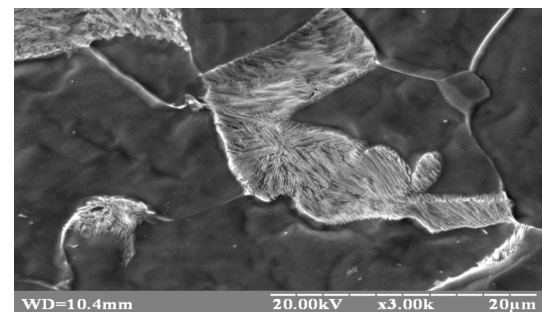
	C	Mn	Si	S	P	Cr	N	Mo	V	Nb
Зсп	0,17	0,53	0,21	0,15	0,14	0,04	0,06	0,02	0,04	0,04
09Г2С	0,10	1,41	0,57	0,13	0,17	0,04	0,06	0,03	0,09	0,06
10Г2ФБ	0,11	1,62	0,25	0,005	0,016	0,03	0,02	0,01	0,002	0,007



а



б (b)



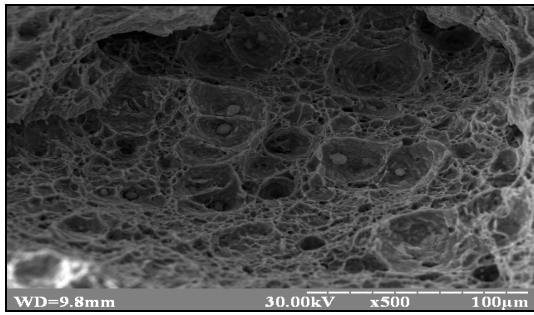
в (c)

Рис. 2. Структура досліджуваних марок сталей: а – 3сп; б – 10Г2ФБ; в – 09Г2С / The structure of the investigated steels: a – 3sp; b – 10Г2ФБ; c – 09Г2С

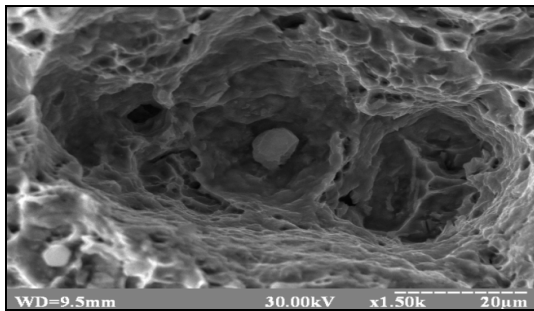
При розрахунках згідно з концепцією Томассона для усіх випадків об'ємна частка пор апроксимувалась мінімальним значенням $V_f = 0,02$ та максимальним $V_f = 0,09$. Таким чином, розрахунки згідно з рівняннями 1–4 дали значення $m = 0,16$ ($V_f = \min$), $m = 0,42$ ($V_f = \max$).

Приклади пор, взятих до розрахунку, наведено на рисунку 3, а-в.

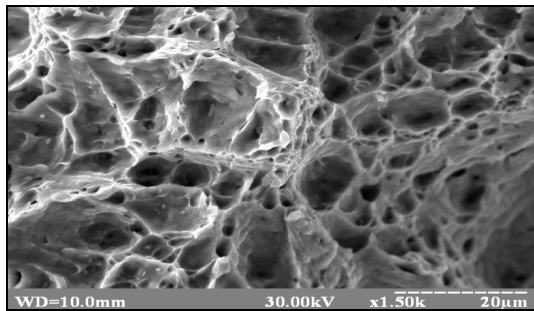
Таблиця 3



а



б (b)



в (c)

Рис. 3. Поверхні зламів досліджуваних марок сталей: а – Ст3сп; б – 10Г2ФБ; в – 09Г2С / Surface breaks investigated steels: a – Ст3сп; b – 10Г2ФБ; c – 09Г2С

Для розрахунку деформації фериту вимірюємо відстань між двома порами та розмір однієї пори. Виміряні значення наведено у таблиці 3.

Для кожної марки сталі здійснювали вимірювання понад 30 зазначених параметрів.

Дані щодо розрахунків деформації фериту узагальнено та наведено у таблиці 4.

Середнє значення вимірних параметрів / Average value of the measured parameters

Марка сталі	Відстань між порами (2b), мм	Величина однієї пори (2a), мм
09Г2С	8,69	4,34
10Г2ФБ	10,43	7,82
Ст 3сп	5,2	3,47

Таблиця 4

Значення деформації феритної складової досліджуваних марок сталей / Determination of deformation ferritic steels studied component

Марка сталі	Деформація ε_{f1} при $V_f = 0,02$ (min)	Деформація ε_{f1} при $V_f = 0,09$ (max)
09Г2С	0,56	0,08
10Г2ФБ	0,74	0,25
Ст3сп	0,71	0,22

Аналіз проведеного комплексу досліджень показав, що пластичність біля вершини критичної тріщини при зародженні в'язкого руйнування залежить від декількох факторів, а саме :

- знижується із зростанням вмісту включень (зменшення міжчастинкової відстані для даного розміру частинок);
- знижується із зменшенням коефіцієнта деформаційного зміцнення;
- знижується з підвищенням поперечної компоненти напруги.

Висновки

1. Металографічний аналіз показав, що сталі Ст3сп, 10Г2ФБ, 09Г2С мають ферито-перлітну структуру.

2. Загальний механізм руйнування досліджуваних сталей – в'язкий.

3. Як модель для аналізу пластичної деформації, яка відбувається в процесі руйнування феритної складової низьковуглецевих мікролегованих сталей, обрано модель Томассона.

4. Проведено порівняльний аналіз деформації феритної складової досліджуваних марок сталей, відповідно до концепції Томассона.

5. Розраховано деформацію феритної складової для сталей Ст3сп, 10Г2ФБ, 09Г2С.

6. Установлено, що пластична деформація біля вершини критичної тріщини під час зародження в'язкого руйнування залежить від кількості та розподілу пор та ступеня деформації феритної складової.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации : монография / У. Браун, Дж. Сроули. – Москва : Мир, 1972. – 246 с.

- Режим доступа: <http://ntb.misis.ru:591>
2. Вишняков Я. Д. Современные методы исследования структуры деформированных кристаллов : монография / Я. Д. Вишняков. – Москва : Metallurgiya, 1975. – 480 с.
Режим доступа: <http://catalog.orenlib.ru>
3. Вязкость разрушения алюминиевых сплавов : монография / В. Г. Кудряшов, В. И. Смоленцев. – Москва : Metallurgiya, 1976. – 296 с.
Режим доступа: <http://www.lib.unn.ru>
4. Кудряшов В. Г. Прикладные вопросы вязкости разрушения : монография / В. Г. Кудряшов. – Москва : Мир, 1968. – 546 с.
Режим доступа: <http://www.lib.unn.ru>
5. Прикладная механика : монография / М. Я. Леонов, В. В. Панасюк. – Москва : Мир, 1959. – 391 с.
Режим доступа: <http://www.twirpx.com>
6. Вязкость разрушения высокопрочных материалов : монография / Г. Г. Либовиц. – Москва : Мир, 1973. – 304 с.
Режим доступа: <http://mechmath.ipmnet.ru>
7. Пластичность и разрушение твердых тел : монография / А. Надаи. – Москва, 1954. – 311 с.
Режим доступа: <http://www.twirpx.com>
8. Жесткость и прочность стальных деталей : монография / Я. Немец. – Москва : Машиностроение, 1970. – 528 с.
Режим доступа: <http://irbis.dalga.ru>
9. Основы механики разрушения : монография / Дж. Нотт. – Москва : Metallurgiya, 1978. – 256 с.
Режим доступа: <http://lib-bkm.ru>
10. Модели и критерии механики разрушения : монография / Ю. Г. Матвиенко. – Москва : Физматлит, 2006. – 328 с.
Режим доступа: <http://www.twirpx.com>
11. Проблемы динамики разрушения твердых тел : монография / Н. Ф. Морозов. – Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского университета, 1997. – 132 с.
Режим доступа: <http://www.read.in.ua>
12. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами : монография / В. В. Панасюк. – Киев : Наукова думка, 1968. – 248 с.
Режим доступа: <http://www.twirpx.com>
13. Механика разрушения композиционных материалов : монография / Г. П. Черепанов. – Москва : Наука, 1983. – 296 с.
Режим доступа: <http://techliter.ru>

REFERENCES

- Braun U. and Srouli Dzh. *Ispytaniya vyisokoprochnykh metallicheskih materialov na vyazkost razrusheniya pri ploskoy deformatsii* [Tests on metallic materials of high toughness plane strain]. Moscow : Peace Publ., 1972, 246 p. (in Russian).
- Vishnyakov Ya.D. *Sovremennyye metody issledovaniya struktury deformirovannykh kristallov* [Modern methods of studying the structure of deformed crystals]. Moscow : Metallurgy Publ., 1975, 480 p. (in Russian).
- Kudryashov V.G. and Smolentsev V.I. *Vyazkost razrusheniya alyuminiyevykh splavov* [The fracture toughness of aluminum alloys]. Moscow : Metallurgy Publ., 1976, 296 p. (in Russian).
- Kudryashov V.G. *Prikladnyye voprosy vyazkosti razrusheniya* [Applied Fracture Toughness]. Moscow : Peace Publ., 1968, 546 p. (in Russian).
- Leonov M.Ya. and Panasyuk V.V. *Prikladnaya mehanika* [Applied mechanics]. Moscow : Peace Publ., 1959, 391 p. (in Russian).
- Libovits G.G. *Vyazkost razrusheniya vyisokoprochnykh materialov* [Fracture toughness of high-strength materials]. Moscow : Peace Publ., 1973, 304 p. (in Russian).
- Nadai A. *Plastichnost i razrushenie tverdyykh tel* [Plasticity and fracture of solids]. Moscow, 1954, 311 p. (in Russian).
- Nemets Ya. *Zhestkost i prochnost stalnykh detaley* [Rigidity and strength of steel components]. Moscow : Machine Construction, 1970, 528 p. (in Russian).
- Nott Dzh. *Osnovy mehaniki razrusheniya* [Basics of fracture mechanics]. Moscow : Metallurgy Publ., 1978, 256 p. (in Russian).
- Matvienko Yu.G. *Modeli i kriterii mehaniki razrusheniya* [The models and criteria of fracture mechanics]. Moscow : Fizmatlit Publ., 2006, 328 p. (in Russian).
- Morozov N.F. *Problemy dinamiki razrusheniya tverdyykh tel* [The problems of the dynamics of destruction of solids]. Saint-Petersburg : Saint-Petersburg's University Publ., 1997 132 s. (in Russian).
- Panasyuk V.V. *Predelnoe ravnovesie hrupkikh tel s treschinami* [Limit equilibrium of brittle bodies with cracks]. Kiev : Naukova Dumka Publ., 1968, 248 p. (in Russian).
- Cherepanov G.P. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Fracture Mechanics of Composite Materials]. Moscow : Science Publ., 1983, 296 p. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлином (Україна); докт. техн. наук, проф. В. С. Вахрушевою (Україна)

Надійшла до редколегії 14.01.2016 р.

Прийнята до друку 23.01.2016 р.