

УДК 539.374

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ В'ЯЗКОЇ ТРІЩИНИ ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

ЛАУХІН Д. В.¹ *д-р техн. наук, проф.*,
БЕКЕТОВ О. В.² *канд. техн. наук, доц.*,
РОТТ Н. О.³ *канд. техн. наук, доц.*,
ІВАНЦОВ С. В.⁴ *канд. техн. наук, доц.*,
ТЮТЕРСВ І. А.⁵ *канд. техн. наук, доц.*,
ЛАУХІН В. Д.⁶ *мол. наук. співробітник*

¹Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

²Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

³Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-64-62, e-mail: natalyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁴Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁵Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

⁶Лабораторія експериментальних наукових досліджень, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: laukhin.vladislav@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

Анотація. *Постановка проблеми* – дослідження стадії розповсюдження в'язкого руйнування шляхом застосування теоретичних моделей формування зони пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини. *Методика.* Порівняльний аналіз існуючих теоретичних моделей формування зони пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини з експериментально розрахованими параметрами. *Наукова новизна.* Показано, що жодна теоретична модель розповсюдження пластичної деформації не дає узгодження з експериментальними даними, що зумовлено неврахуванням конкретного структурного стану та ролі зсувної компоненти деформації. *Практична значимість.* Удосконалення існуючих моделей розрахунку опору руйнуванню зварюваних будівельних металевих конструкцій, у тому числі відповідального призначення.

Ключові слова: *пластична деформація; в'язке руйнування; теоретична модель; тріщина; пора*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЯЗКОЙ ТРЕЩИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

ЛАУХИН Д. В.¹ *д-р техн. наук, проф.*,
БЕКЕТОВ А. В.² *канд. техн. наук, доц.*,
РОТТ Н. А.³ *канд. техн. наук, доц.*,
ІВАНЦОВ С. В.⁴ *канд. техн. наук, доц.*,
ТЮТЕРЕВ И. А.⁵ *канд. техн. наук, доц.*,
ЛАУХИН В. Д.⁶ *мл. науч. сотрудник*

¹Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) (0562) 47-39-56, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

²Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

³Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: natalyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁴Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁵Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

⁶Лаборатория экспериментальных научных исследований, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: laukhin.vladislav@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

Аннотация. Постановка проблемы – исследование стадии распространения вязкого разрушения путем применения теоретических моделей формирования зоны пластической деформации перед фронтом растущей трещины **Методика**. Сравнительный анализ существующих теоретических моделей формирования зоны пластической деформации перед фронтом растущей трещины с экспериментально рассчитанными параметрами. **Научная новизна**. Показано, что ни одна теоретическая модель распространения пластической деформации не дает согласования с экспериментальными данными, что обусловлено неучетом конкретного структурного состояния и роли оползневой компоненты деформации. **Практическая значимость**. Совершенствование существующих моделей расчета сопротивления разрушению сварных металлических конструкций, в том числе ответственного назначения.

Ключевые слова: пластическая деформация; вязкое разрушение; теоретическая модель; трещина; пора

INVESTIGATION OF THE VISCOUS CRACK DISTRIBUTION UNDER THE ACTION EXTERNAL LOADS

LAUKHIN D. V.¹, *Doctor of Technical Sciences, Prof.*,

BEKTOV A. V.², *Ph. D., Assos. prof.*,

ROTT N. O.³, *Ph. D., Assos. prof.*,

IVANTSOV S. V.⁴, *Ph. D., Assos. prof.*,

TYUTEREV I. A.⁵, *Ph. D., Assos. prof.*,

LAUKHIN V. D.⁶, *Junior scientist*

¹Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: d_laukhin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

²Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

³Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: natalyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁴Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

⁵Department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1224-3355

⁶Laboratory of experimental scientific research, SHEE «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: laukhin.vladislav@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6718-4639

Annotation. Goal. Investigation of the stage of propagation of viscous fracture by applying theoretical models for the formation of a zone of plastic deformation before the front of a growing crack. **Procedure.** Comparative analysis of the existing theoretical models for the formation of the zone of plastic deformation before the front of a growing crack with experimentally calculated parameters. **Scientific novelty.** It is shown that no theoretical model of the propagation of plastic deformation does not agree with the experimental data, is due to the fact that the specific structural state and the role of the landslide component of deformation are not taken into account. **Practical significance.** Improvement of existing models for calculating the resistance to fracture of welded metal structures, including critical applications.

Keywords: plastic deformation; viscous fracture; theoretical model; crack; pore

Постановка проблеми. Згідно з даними теоретичних і експериментальних досліджень, поширення тріщини в полікристалічному матеріалі супроводжується виникненням у вершині тріщини

полів внутрішніх напружень, які викликають локальну пластичну деформацію полікристала в область руху фронту зростаючої тріщини – так звану зону пластичної деформації або зону «утяжки»

[1]. Виходячи зі структурного стану матеріалу, можливі кілька варіантів формування зони «утяжки» [2]. Проаналізувавши літературні джерела, можна виділити такі моделі розвитку зони пластичної деформації біля вершини тріщини.

J-Q-теорія [3]. Область біля вершини тріщини називається J-Q* – зоною (рис. 1). Ця зона істотно більше зони, в якій напружено-деформований стан контролюється лише одним параметром. Таким чином, розміри J-Q* – зони є функцією навантаження і не можуть залишатися постійними у разі стійкого зростання тріщини, отже, не можуть бути використані як параметри жорсткості напруженого стану в пластичній зоні біля вершини розповсюдження тріщини.

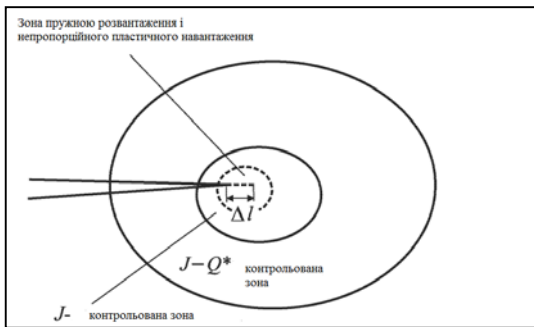


Рис. 1. Схема, яка демонструє основні поняття J-Q* теорії / A scheme that demonstrates the basic concepts of J-Q* theory

Модель еквівалентної пружної тріщини [4]. Вплив невеликої пластичної зони на напругу і переміщення в тілі перед вершиною гострої тріщини може бути наближено оцінений таким чином. Розподіл пружних напружень за плоского напруженого стану і його зміна при появі малої, порівняно з довжиною, тріщини і розмірами тіла, пластичної зони наведено на рис. 2.

Згідно з моделлю, що розглядається, для аналізу напружень вводиться концепція «умовної» пружної тріщини, розподіл напружень перед якою аналогічний розподілу у реальній тріщині з малою пластичною зоною. Таким чином, припускаючи, що вершина умовної тріщини

розташована в точці r_y , отримуємо такий розподіл пружних напруг:

$$\sigma_{11} = K^* / \sqrt{2\pi r}, \quad (1)$$

$$\text{де } K^* = \sigma \sqrt{a + r_y}. \quad (2)$$

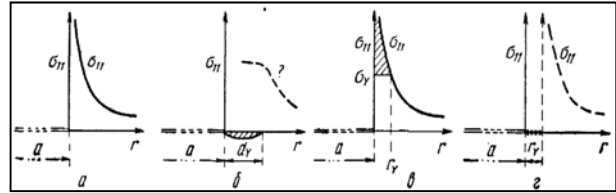


Рис. 2. Розподіл пружних напружень за плоского напруженого стану: а – розподіл пружних напруг ($\sigma_{11} = K / \sqrt{2\pi r}$); б – утворення пластичної зони; в – оцінка величини пластичної зони у першому наближенні ($\sigma_{11} = K / \sqrt{2\pi r}$); г – «умовна» пружна тріщина ($\sigma_{11} = K^* / \sqrt{2\pi r}$) / Distribution of elastic stresses in a plane stressed state: a - distribution of elastic stresses ($\sigma_{11} = K / \sqrt{2\pi r}$); b - the formation of a plastic zone; c - estimate of the value of the plastic zone in the first approximation ($\sigma_{11} = K / \sqrt{2\pi r}$); d - «conditional» elastic fracture ($\sigma_{11} = K^* / \sqrt{2\pi r}$)

Модель пластичної складової тріщини [5]. Співвідношення між прикладеною напругою, довжиною тріщини і розвитком пластичної течії при плоскому напруженому стані можуть бути отримані з функції Вестергаарда.

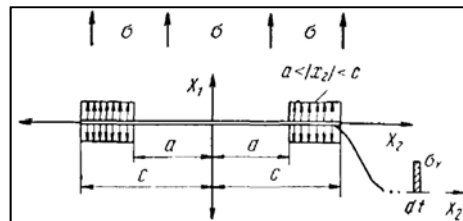


Рис. 3. Розвиток пластичних зон від тріщини (в області $a < |x_2| < c$ напруга дорівнює межі текучості) / Development of plastic zones from the crack (In the region $a < |x_2| < c$ the voltage is equal to the yield point)

Розглянемо, коли на тріщину довжиною $2a$ впливає нормальна складова напруги (рис. 3). Нехай пластична зона поширюється від кінців тріщини на відстань $c - a$.

Напружений стан поблизу тріщини може бути представлений трьома складовими:

- розтягування в напрямку, ортогональному осі тріщини;
- зміщення у площині $X_1 X_2$;
- зміщення у площині $X_1 X_3$.

За умови, що форма функції Вестергаарда відповідає навантаженням, що діють у

пластичної зони, можливо розрахувати переміщення на кінцях тріщини. Це переміщення називається розкриттям тріщини:

$$\Delta = 8/\pi * \sigma_y / E * a \ln[\sec(\pi\sigma/2\sigma_y)]. \quad (3)$$

Модель Білбі – Коттрелла – Суїндена [6].

Застосування моделі дозволяє отримувати аналітичні вирази для переміщення у вершини тріщини.

У цій концепції тріщина і, відповідно зона пластичної деформації у її вершині, подаються у вигляді рядів дислокацій (рис. 4).

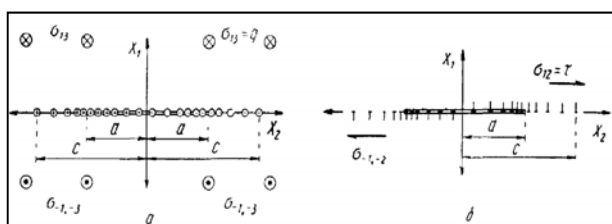


Рис. 4. Зони пластичності у вигляді рядів дислокацій: а – антиплоскі зрушення по типу III ($\sigma_{13}=n$); б – поздовжні зрушення по типу II ($\sigma_{13}=\tau$); n, τ – нормальна та зсувна компоненти навантаження відповідно / The zones of plasticity in the form of series of dislocations: a – antiplane shifts of type III ($\sigma_{13}=n$); b – longitudinal shifts of type II ($\sigma_{13}=\tau$); n, τ – is the normal and shear loading components, respectively

При отриманні градієнта переміщень, що змінюються від високих значень (біля вершини тріщини) до низьких (на пружно-пластичній границі) ряди дислокації повинні мати форму «зворотних» плоских скупчень, в яких найбільша щільність спостерігається біля вершини тріщини, а найменша – у протилежному кінці зони пластичності.

Модель Панасюка – Леонова – Дагдейла [7]. Модель використовується як ефективна розрахункова схема для аналізу локалізації пластичних деформацій у вершини тріщини нормального відриву в пружно ідеально пластичному тілі в умовах плоского напруженого стану.

Навантаження тріщини нормального відриву в умовах плоского напруженого стану в поле залишкових напружень (пов'язаних із попереднім циклом навантаження) може викликати утворення двох зародків пластичної течії (двостонна

локалізація пластичних деформацій): безпосередньо біля кінчика тріщини і в зоні максимального залишкового розтягування, яке в разі циклічного навантаження досягає однієї третини межі текучості.

Загальний недолік приведених моделей – це відсутність взаємозв'язку між параметрами, які характеризують розповсюдження пластичної деформації, та структурним станом матеріалу. Разом із цим, наявність у структурі матеріалу елементів, які мають підвищений рівень вільної енергії, істотно впливає на розповсюдження пластичної і, як наслідок, на формування зони «утяжки» перед фронтом зростаючої тріщини.

Мета статті – дослідити стадію розповсюдження в'язкого руйнування шляхом застосування теоретичних моделей формування зони пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини.

Методика та результати досліджень. Основним матеріалом для дослідження обрано низьковуглецеву мікролеговану сталь 10Г2ФБ товщиною 40 мм, хімічний склад якої наведено в таблиці 1, механічні властивості у таблиці 2.

Низьковуглецева мікролегована сталь 10Г2ФБ після контрольованої прокатки має феритно-перлітну структуру (рис. 5).

Структура має змішаний поліедричний тип за загальною класифікацією типів структур. В аустеніті зароджується ферит та цементит за відносно малого переохолодження. Аустеніт у рівновазі з феритом має один склад, а з цементитом інший. Різниця концентрацій вуглецю на границях аустеніту з феритом та цементитом зумовлює дифузію вуглецю, а, у зв'язку із цим, подальше утворення фериту і цементиту. Колонії перліту мають цементитний каркас стрічкоподібної форми.

У ході проведення досліджень здійснено випробування на ударний вигин. Результати проведених досліджень наведено у таблиці 2, приклад поверхонь зламу – на рисунку 6.

Аналіз рисунка 6, показує, що руйнування зразків відбулося за в'язким механізмом, про що свідчить наявність порожнин на поверхні зламу.

Таблиця 1
Хімічний склад досліджуваної сталі /
The chemical composition of the investigated steel

Сталь	Вміст елементів, (масс.) %						
	C	Mn	Si	S	P	V	Nb
10Г2ФБ	0,10	1,83	0,18	0,005	0,015	0,088	0,022

Таблиця 2
Механічні властивості досліджуваної сталі /
Mechanical properties of the investigated steel

Марка сталі	Межа плинності σ_T , МПа	Відносне подовження δ , %	Ударна в'язкість KCV, Дж/см ² при +20°C
10Г2ФБ	575	36	165

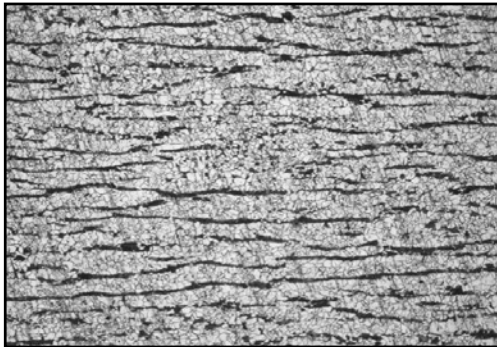
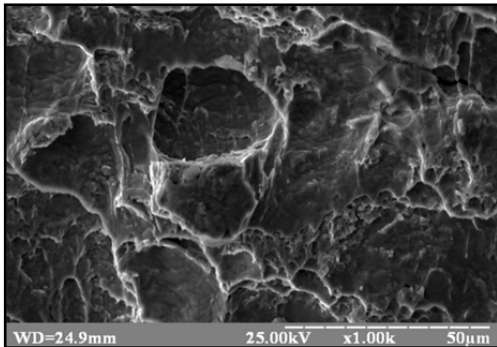
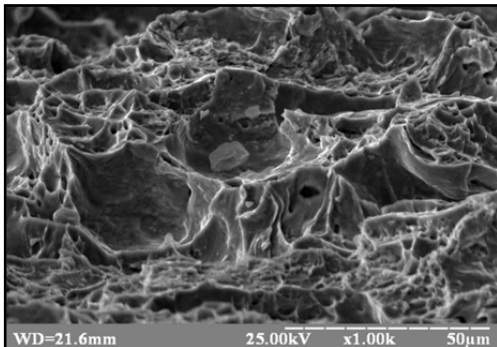


Рис. 5. Структура сталі 10Г2ФБ після штатної контрольованої прокатки / Structure of steel 10G2FB after full-time counter-rolled rolling



а



б

Рис. 6. Поверхня руйнування зразків сталі 10Г2ФБ / The surface of the destruction of steel samples 10G2FB

Для кількісного аналізу розмірів «русла» розповсюдження пластичної деформації зростаюча пора розглядалась як центральна тріщина радіуса a в нескінченному тілі [8]. Виходячи з цього припущення, відношення коефіцієнта інтенсивності напруження до прикладеного навантаження можливо подати у вигляді:

$$\frac{K}{\sigma} = 2\sqrt{\frac{a}{\pi}}, \quad (4)$$

де a – радіус тріщини (половина довжини пори); K – коефіцієнт інтенсивності напруги; σ – нормальна складова напруги.

Формули, згідно з якими проводилися розрахунки, узагальнено та наведено у таблиці 3.

Таблиця 3
Формули для розрахунку розміру зони пластичної деформації / Formulas for calculating the size of the zone of plastic deformation

Модель	Рівняння для розрахунку
Модель еквівалентної пружної тріщини	$d_\gamma = \frac{4a}{\pi^2}$
Модель пластичної складової тріщини	$d_\gamma = \frac{a^2}{8}$
Модель Панасюка – Леонова – Дагдейла	$d_\gamma = \frac{a}{2}$

де: d_γ – розмір зони пластичної деформації; a – половина довжини пори.

Фрактографічний аналіз показав, що формування пор у сталі 10Г2ФБ відбувається на частках другої фази розмірами 28...32 мкм та 17...25 мкм, відповідні розміри пор наведено у табл. 4.

Виходячи з існуючих теоретичних концепцій (див. наприклад, [9]), стадію зародження пори біля частки другої фази можливо розглядати як модельну тріщину, яка була сформована за дії зовнішнього навантаження і буде зростати у напрямку дії пластичної деформації, тобто у напрямку формування зони «утяжки».

Виходячи із цього припущення, розмір зони пластичної деформації в напрямку дії нормальної компоненти напруги (враховувалася тільки нормальна компонента напруги, оскільки жодна з

моделей не враховує зсувну компоненту напруги), можливо визначити як:

$$d_{\gamma} = \frac{c}{2} - \frac{a}{2}. \quad (5)$$

Результати відповідних розрахунків наведено у таблиці 4.

Таблиця 4

Результати кількісного аналізу розміру зони пластичної деформації / Results of quantitative analysis of the size of the zone of plastic deformation

Розмір частинки, мкм	Розмір зони пластичної деформації, мкм			Експериментальні результати	
	Модель еквівалентної пружної тріщини	Модель пластичної складової тріщини	Модель Панасюка - Леонова - Дагдейла	Розмір пор, мкм	Розмір зони пластичної деформації (розраховано за рівнянням (5))
14	2,8	24,5	3,5	64	25,0
26	5,3	84,5	6,5	87	30,5
32	6,5	128,0	8,0	107	48,0
38	7,7	180,5	9,5	131	71,3

Порівнюючи дані, наведені в таблиці 4, можливо зробити висновок, що жодна теоретична модель розповсюдження пластичної деформації не дає узгодження з експериментальними даними, особливо відносно проміжних та осаджених частинок. Неузгодженість теоретичних та експериментальних даних у першу чергу зумовлена неврахуванням конкретного структурного стану, в якому здійснюється розповсюдження пластичної деформації, і, як наслідок, руйнування.

Виходячи з отриманих результатів, можливо припустити, що у зародженні та розповсюдженні в'язкого руйнування зсувна компонента деформації відіграє не менш важливу роль, ніж нормальна, тобто розтягувальна складова.

Висновки

1. Виконаний аналіз моделей розповсюдження тріщини у полікристалічному матеріалі дозволив установити: J-Q* – модель дозволяє теоретично виявити залежність в'язкості руйнування від геометрії зразків та елементів конструкцій; модель еквівалентної пружної тріщини можливо застосовувати тільки у випадку тріщини з малою пластичною зоною, що не завжди спостерігається у реальних матеріалах; математичні моделі (пластичної складової тріщини та поліноміальної функції напруги) можливо застосовувати для практичних розрахунків тільки за наявності низьких граничних умов, які в більшості випадків важко досягаються при розгляді реальних полікристалічних агрегатів; моделі Білбі – Коттрелла – Суїндена та Панасюка – Леонова – Дагдейла можливо використовувати тільки для розрахунків поведінки тріщин у тонких металевих шарах.
2. Усі проаналізовані моделі мають один загальний недолік – вони не враховують структурний стан матеріалу перед фронтом зростаючої тріщини, а, отже, їх досі важко застосовувати для розрахунків опору реальних металевих конструкцій розповсюдженню руйнування.
3. Результати порівняння теоретичних та експериментальних даних стосовно розміру зони пластичної деформації показали, що жодна теоретична модель розповсюдження пластичної деформації не дає узгодження з експериментальними даними. Неузгодженість теоретичних та експериментальних даних зумовлена неврахуванням конкретного структурного стану, в якому відбувається розповсюдження пластичної деформації, і, як наслідок, руйнування та ролі зсувної компоненти деформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Новые методы оценки сопротивления хрупкому разрушению : [сб. статей] : пер. с англ. / под ред. ак. Ю. И. Работнова. – Москва : Мир, 1972. – 440 с. – Режим доступа: <http://www.mexanik.ru/0924/ann0924.htm>.
2. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения / Ю. Н. Работнов. – Москва : Наука, 1987. – 80 с. – Режим доступа: http://www.studmed.ru/rabotnov-yun-vvedenie-v-mehaniku-razrusheniya_87e6114a91e.html.
3. Левин В. А. Избранные нелинейные задачи механики разрушения / В. А. Левин, Е. М. Морозов, Ю. Г. Матвиенко. – Москва : Физматлит, 2004. – 408 с. – Режим доступа: http://www.studmed.ru/levin-va-morozov-em-matvienko-yug-izbrannye-nelineynye-zadachi-mehaniki-razrusheniya_6952faaa6fc.html.
4. Черепанов Г. П. Механика разрушения композиционных материалов / Г. П. Черепанов. – Москва : Наука, 1983. – 296 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/233025/>
5. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – Москва : Metallurgiya, 1970. – 229 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/103478/>.
6. Пластичность и разрушение : науч. узд. / под ред. В. Л. Колмогорова. – Москва : Metallurgiya, 1977. – 336 с. – Режим доступа: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/K/KOLMOGOROV_Vadim_Leonidovich/_Kolmogorov_V.L..html
7. Партон В. З. Динамика хрупкого разрушения / Партон В. З., Борисковский В. Г. – Москва : Mashinostroyeniye, 1988. – 240 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/72923/>.
8. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения / Дж. Ф. Нотт ; пер. с англ. Д. В. Лаптева ; под ред. В. Г. Кудряшова. – Москва : Metallurgiya, 1978. – 256 с. – Режим доступа: <http://lib-bkm.ru/load/114-1-0-924>.
9. Иванцов С. В. Вплив параметрів структури на кінетику руйнування мікролегованих будівельних сталей: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.01 Матеріалознавство / Иванцов Сергій Вікторович ; Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – Дніпропетровськ, 2015. – 141 с. – Режим доступа: <https://mydisser.com/ru/catalog/view/552/591/83341.html>.

REFERENCES

1. Rabotnov Yu.I. *Novye metody ocenki soprotivleniya xrupkomu razrusheniyu* [New methods for assessing brittle fracture resistance]. Moskva: Mir, 1972, 440 p. Available at: <http://www.mexanik.ru/0924/ann0924.htm>. (in Russian).
2. Rabotnov Yu.N. *Vvedenie v mexaniku razrusheniya* [Introduction to fracture mechanics]. Moskva: Nauka, 1987, 80 p. Available at: http://www.studmed.ru/rabotnov-yun-vvedenie-v-mehaniku-razrusheniya_87e6114a91e.html. (in Russian).
3. Levin V.A., Morozov E.M. and Matvienko Yu.G. *Izbrannye nelinejnye zadachi mexaniki razrusheniya* [Selected nonlinear problems of fracture mechanics]. Moskva: FIZMATLIT, 2004, 408 p. Available at: http://www.studmed.ru/levin-va-morozov-em-matvienko-yug-izbrannye-nelineynye-zadachi-mehaniki-razrusheniya_6952faaa6fc.html. (in Russian).
4. Cherepanov G.P. *Mexanika razrusheniya kompozicionnyx materialov* [Mechanics of fracture of composite materials]. Moskva: Nauka, 1983, 296 p. – Available at: <http://www.twirpx.com/file/233025/>. (in Russian).
5. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya, deformatsii, razrushenie* [Stresses, deformations, fractures]. Moskva: Metallurgiya, 1970, 229 p. Available at: <http://www.twirpx.com/file/103478/>. (in Russian).
6. Kolmogorov V.L. *Plastichnost' i razrushenie* [Plasticity and destruction]. Moskva: Metallurgiya, 1977, 366 p. Available at: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/K/KOLMOGOROV_Vadim_Leonidovich/_Kolmogorov_V.L..html. (in Russian).
7. Parton V.Z. and Boriskovskij V.G. *Dinamika xrupkogo razrusheniya* [Dynamics of brittle fracture]. Moskva: Mashinostroyeniye, 1988, 240 p. Available at: <http://www.twirpx.com/file/72923/>. (in Russian).
8. Nott Dzh.F. *Osnovy mexaniki razrusheniya* [Fundamentals of fracture mechanics]. Moskva: Metallurgiya, 1978, 256 p. Available at: <http://lib-bkm.ru/load/114-1-0-924>. (in Russian).
9. Ivantsov S.V. *Vplyv parametriv struktury na kinetyku ruinovannia mikrolehovanykh budivelnnykh stali: dys. kand. tekhn. nauk: 05.02.01 Materialoznavstvo* [The influence of structural parameters on the kinetics of the destruction of microlized building steel: Dissertation of Candidate of Technical Sciences: special. 05.02.01 Materials Science]. Prydnipr. derzh. akad. bud-va ta arkhitektury [Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk, 2015, 141 p. Available at: <https://mydisser.com/ru/catalog/view/552/591/83341.html>. (in Ukrainian).

Рецензент: Большаков В. И., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 20.09.2017 р.

Прийнята до друку: 27.09.2017 р.