

УДК 669-1:539.382.2

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.71.10

КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ РОЗМІРУ ЗОНИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПЕРЕД ФРОНТОМ ЗРОСТАЮЧОЇ ТРІЩИНИ З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛУ (Частина 2)

БОЛЬШАКОВ В.І.¹ д.т.н., проф.,ЛАУХІН Д.В.² д.т.н., проф.,БЕКЕТОВ О.В.³ к.т.н., доц.,РОТТ Н.О.⁴ к.т.н., доц.,БАРИБІН Д.О.⁵ асп.

¹ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-07-88, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

² кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-30, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, 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, Дніпро, 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, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-64-62, e-mail: narylrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁵ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-2530-7968

Анотація. Мета. Аналіз моделей кількісної оцінки розміру зони локалізації пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини з урахуванням структурного стану. **Методика.** Теоретичні розрахунки відповідно до існуючих моделей та кількісний аналіз отриманих експериментальних даних. **Результати.** Для низьковуглецевої мікролегованої сталі 10Г2ФБ проаналізовано моделі розрахунку розміру локалізації пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини з урахуванням структурного стану. **Наукова новизна.** На підставі існуючих моделей здійснено кількісний аналіз розмірів зони локалізації пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини у низьковуглецевих мікролегованих сталях з ферито-перлітною структурою. Встановлено необхідність урахувати при розрахунках структурний стан матеріалу, а саме наявність дефектів та їх вплив на формування зони локалізації пластичної деформації. **Практична значимість.** Розробка шляхів стабілізації механічних властивостей, зокрема ударної в'язкості, товстолистового прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозв'язку параметрів структури та поверхонь руйнування.

Ключові слова: розмір зони локалізації пластичної деформації, структурний стан, кількісний аналіз.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РАЗМЕРА ЗОНЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЕРЕД ФРОНТОМ РАСТУЩИХ ТРЕЩИНЫ С УЧЕТОМ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА (Часть 2)

БОЛЬШАКОВ В.И.¹ д.т.н., проф.,ЛАУХИН Д.В.² д.т.н., проф.,БЕКЕТОВ А.В.³ к.т.н., доц.,РОТТ Н.А.⁴ к.т.н., доц.,БАРЫБИН Д.А.⁵ асп.

¹ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-07-88, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

² кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-30, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

⁴ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 46-64-62, e-mail: naralyrott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁵ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-2530-7968

Аннотация. Цель. Анализ моделей количественной оценки размера зоны локализации пластической деформации перед фронтом растущей трещины с учетом структурного состояния. **Методика.** Теоретические расчеты в соответствии с существующими моделями и количественный анализ полученных экспериментальных данных. **Результаты.** Для низколегированной микролегированной стали 10Г2ФБ проанализированы модели расчета размера локализации пластической деформации перед фронтом растущей трещины с учетом структурного состояния. **Научная новизна.** На основании существующих моделей осуществлен количественный анализ размеров зоны локализации пластической деформации перед фронтом растущей трещины в низкоуглеродистых микролегированных сталях с феррито-перлитной структурой. Установлена необходимость учитывать при расчетах структурное состояние материала, а именно наличие дефектов и их влияние на формирование зоны локализации пластической деформации. **Практическая значимость.** Разработка путей стабилизации механических свойств, в частности ударной вязкости, толстолистового проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей отечественного производства на основе установления взаимосвязи параметров структуры и поверхностей разрушения.

Ключевые слова: размер зоны локализации пластической деформации, структурное состояние, количественный анализ.

QUANTITATIVE ANALYSIS OF SIZE OF LOCALIZATION ZONE OF PLASTIC DEFORMATION BEFORE FRONT OF GROWING CRACKS WITH THE ACCOUNT OF STRUCTURAL STATE OF MATERIAL

Part 2

BOLSHAKOV V.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
LAUKHIN D.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BEKETOV A.V.³, *Ph. D., Assos. prof.*,
ROTT N.O.⁴, *Ph. D., Assos. prof.*,
BARIBIN D. A.⁵, *Post. Grad. st.*

Annotation. Goal. Analysis of models for the quantitative estimation of the size of the zone of localization of plastic deformation before the front of a growing crack with allowance for the structural state. **Methodology.** Theoretical calculations in accordance with existing models and quantitative analysis of the experimental data. **Results.** For low-alloyed microalloyed steel 10G2FB, models for calculating the size of the localization of plastic deformation before the front of a growing crack with allowance for the structural state are analyzed. **Scientific novelty.** Based on the existing models, a quantitative analysis of the size of the zone of localization of plastic deformation before the front of a growing crack in low-carbon microalloyed steels with a ferrite-perlite structure was carried out. It has been found necessary to take into account the structural state of the material, namely the presence of defects and their influence on the formation of the zone of localization of plastic deformation. **Practical significance.** Development of ways to stabilize mechanical properties, in particular impact toughness, of thick-rolled steel from low-carbon microalloyed steels of domestic production on the basis of establishing the relationship between structural parameters and fracture surfaces.

Key words: size of the zone of plastic deformation localization, structural state, quantitative analysis.

¹ department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 47-07-88, e-mail: bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

² department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (056) 756-34-30, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

⁴ department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 46-64-62, e-mail: naralryott@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

⁵ department of Material Science and Treatment of Materials, SHEE “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24^A, Chernishevskogo str., Dnipro, Ukraine, +38 (0562) 46-93-72, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: ORCID ID:0000-0003-2530-7968

Вступ

Згідно з даними теоретичних і експериментальних досліджень, зародження та розповсюдження руйнування відбувається у декілька стадій:

- перша – локалізація пластичної деформації біля включень (зародження пор);
- друга – повільне зростання тріщини (об'єднання пор);
- третя – розповсюдження тріщини в матеріалі.

При цьому слід зазначити, що поширення тріщини (друга та третя стадії) в полікристалічному матеріалі супроводжується виникненням у вершині тріщини полів внутрішніх напружень, які призводять до локалізації пластичної деформації в області руху фронту зростаючої тріщини – так звану зону пластичної деформації [1, 2]. Виходячи з загальних концепцій механіки руйнування (див. наприклад [2]) було запропоновано формування цієї зони. При цьому найбільше поширення при теоретичних дослідженнях набули моделі еквівалентної пружної тріщини, модель пластичної складової тріщини, модель Панасюка-Леонова-Дагдейла.

Модель еквівалентної пружної тріщини [3].

З урахуванням наявності «умовної» пружної тріщини, розподіл напружень перед якою подібний до розподілу біля реальної тріщини з малою пластичною зоною, можливо отримати:

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

де: K^* – коефіцієнт інтенсивності напруги; σ_{11} – механічна напруга перед фронтом зростаючої тріщини; r – радіус зростаючої тріщини.

Модель пластичної складової тріщини (модель Дагдейла) [4]. Співвідношення між прикладеною напругою, довжиною тріщини і розвитком пластичної течії при плоскому напруженому стані можуть бути отримані з функції Вестергаарда.

Напружений стан поблизу тріщини може бути представлено трьома складовими:

- розтягування в напрямку, ортогональному осі тріщини;
- зміщення у площині X_1X_2 ;
- зміщення у площині X_1X_3 .

За умови, що форма функції Вестергаарда відповідає навантаженням, що діють у пластичній зоні, можливо розрахувати переміщення на кінцях тріщини.

Модель Панасюка-Леонова-Дагдейла [5]. Модель використовується в якості ефективної розрахункової схеми при аналізі локалізації пластичних деформацій у вершині тріщини нормального відриву в

пружноідеальнопластичному тілі в умовах плоского напруженого стану.

У рамках цієї моделі тріщина розглядалась на атомарному рівні, тобто нелінійна взаємодія сконцентрована лише між двома атомними рівнями (рис. 1).

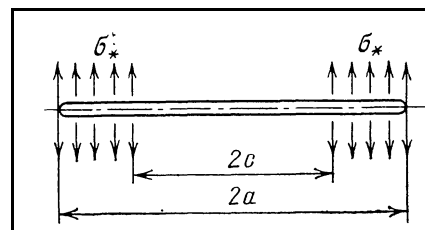


Рис. 1. Схематична інтерпретація моделі Панасюка-Леонова-Дагдейла / Schematic interpretation of the Panasyuk-Leonov-Dagdale model

Таким чином, частка поверхні тріщини ($x_1 < c$) вільна від напруги, а інша – навантажена постійно діючою силою σ^* . Навколо цієї області матеріал залишається пружним.

Усі проаналізовані моделі мають один загальний недолік – вони не враховують структурний стан матеріалу перед фронтом зростаючої тріщини.

Мета

Аналіз моделей кількісної оцінки розміру зони локалізації пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини з урахуванням структурного стану.

Методика та результати дослідження

У якості матеріалу дослідження було використано низьковуглецеву мікролеговану сталь 10Г2ФБ товщиною 40 мм, хімічний склад якої наведено в табл. 1.

Механічні властивості сталі представлені в табл. 2.

Таблиця 1

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

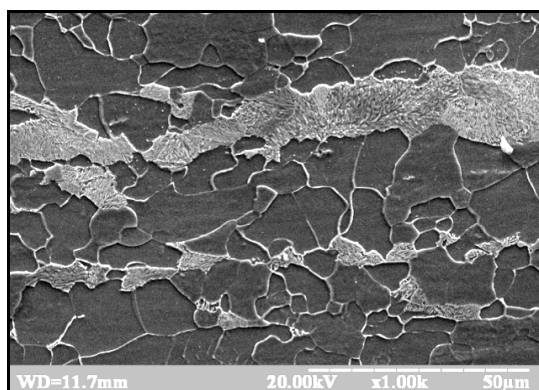
Вміст елементів, (мас.%) %						
C	Mn	Si	S	P	V	Nb
0,10	1,83	0,18	0,005	0,015	0,088	0,022

Таблиця 2

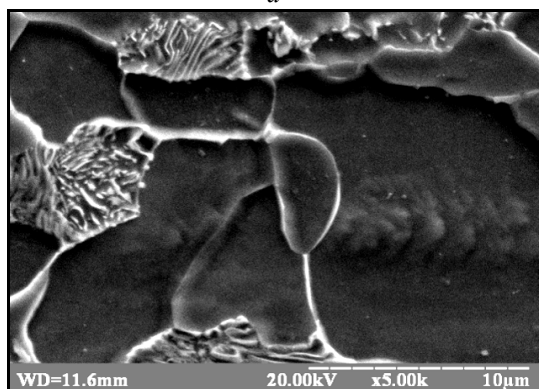
**Механічні властивості досліджуваної сталі /
Mechanical properties of the investigated steel**

Границя плинності σ_T , МПа	Відносне подовження δ , %	Ударна в'язкість КСV, Дж/см ² при +20°C
575	36	165

Низьковуглецева мікролегована сталь 10Г2ФБ після контрольованої прокатки має ферито-перлітну структуру (рис. 2). Структура має змішаний полідричний тип за загальною класифікацією типів структур [6].



a



b

Рис. 2. Структура сталі 10Г2ФБ після штатної контрольованої прокатки / Structure of steel 10G2FB after standard controlled rolling

Фрактограми поверхні руйнування вивчали за допомогою растрового електронного мікроскопу. Результати проведеного комплексу фактографічних досліджень наведено на рис. 3.

Аналіз поверхонь руйнування сталі 10Г2ФБ показує, що характер зламу майже повністю в'язкий.

Для оцінки впливу пластичної деформації на другій та третій стадії в'язкого руйнування зростаюча пора розглядалась як центральна тріщина радіуса a в нескінченному тілі [7].

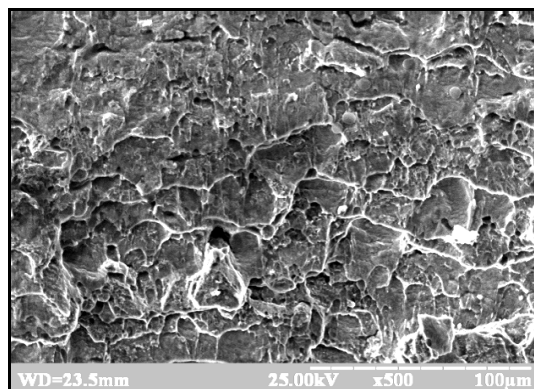


Рис. 3 Приклад поверхні руйнування зразків сталі 10Г2ФБ / An example of a surface of the destruction of steel samples 10G2FB

Виходячи з цього припущення, відношення коефіцієнту інтенсивності напруги до прикладеного навантаження можна надати у вигляді:

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

де a – радіус тріщини (половина довжини пори у напрямку дії нормальної складової напруги); K – коефіцієнт інтенсивності напруги; σ – нормальна складова напруги.

Виходячи з запропонованих апроксимацій, розглянуті у роботі моделі можливо надати у вигляді, який наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Рівняння для розрахунку / Equation for calculation

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	$d_\gamma = \frac{a}{2}$

Кількісний фактографічний аналіз показав, що формування пор в сталі 10Г2ФБ відбувається на частках другої фази розмірами 28...32 мкм та 17...25 мкм. Враховуючи особливості формування пор біля часток другої фази, а саме модель Броека та розрахунки згідно теорії Орована-Ешелбі (див. наприклад роботи [8, 9]) можливо виконати орієнтовний кількісний аналіз формування зони розповсюдження пластичної деформації на другій та третій стадіях розповсюдження в'язкої тріщини. Приведені розрахунки узагальнено та наведено у табл. 4.

Таблиця 4

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

Розмір частки, мкм	Розмір зони пластичної деформації, мкм		
	Модель еквівалентної пружної тріщини	Модель пластичної складової тріщини	Модель Панасюка-Леонова-Дагдейла
17	2,8	24,5	3,5
25	5,3	84,5	6,5
28	6,5	128	8,0
32	7,7	180,5	9,5

З метою порівняльного аналізу отриманих результатів було здійснено кількісну обробку експериментально отриманих даних. При цьому, розрахунки виконувалися згідно умови [10]: розмір зони пластичної деформації (d_p) в напрямку дії нормальної компоненти напруги буде визначитися як:

$$d_p = \frac{c}{2} - \frac{a}{2} \quad (3)$$

де: c – довжина тріщини; a – радіус тріщини.

Результати проведених розрахунків узагальнено та наведено у вигляді табл. 5.

Таблиця 5

Результати розрахунку розміру зони пластичної деформації за даними експериментальних результатів / Results of calculation of the size of the zone of plastic deformation on the basis of experimental results

Розмір частки, мкм	Експериментальні результати	
	Розмір пор, мкм	Розмір зони пластичної деформації, мкм
17	64	25
25	87	30,5
28	107	48
32	131	71,3

Порівнюючи данні, представлені у табл. 4 та табл. 5 можливо зробити висновок, що жодна теоретична модель розповсюдження пластичної деформації не дає узгодження з експериментальними даними.

Неузгодженість теоретичних та експериментальних даних в першу чергу обумовлена наявністю в реальних умовах навантаження тріщини, яке обумовлює появу разом з нормальною зсувної складової напруги, тобто має місце нерівномірний напружено-деформаційний стан.

Цей факт обумовлює локалізацію у вершині тріщини пластичної зони і, як наслідок, активізацію процесу звільнення прихованої вільної енергії, пов'язаної з присутністю дефектів (наприклад внутрішньофазних та міжфазних границь) в межах пластичної зони. Вивільнювана енергія є основним

джерелом розвитку пошкодженості в зонах локалізації необоротних залишкових деформацій. Поле напруг, яке формується внаслідок цього процесу, змінює геометрію локалізованих зон, впливаючи, таким чином, на стан тріщини.

Результати

Для низьковуглецевої мікрولةгованої сталі 10Г2ФБ проаналізовано моделі розрахунку розміру локалізації пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини з урахуванням структурного стану.

Наукова новизна та практична цінність

На підставі існуючих моделей здійснено кількісний аналіз розмірів зони локалізації пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини у низьковуглецевих мікрولةгованих сталях з ферито-перлітною структурою. Встановлено необхідність враховувати при розрахунках структурний стан матеріалу, а саме наявність дефектів та їх вплив на формування зони локалізації пластичної деформації. Розробка шляхів стабілізації механічних властивостей, зокрема ударної в'язкості, товстолистового прокату з низьковуглецевих мікрولةгованих сталей вітчизняного виробництва на основі встановлення взаємозв'язку параметрів структури та поверхонь руйнування.

Висновки

1. Виконано порівняльний аналіз моделей формування зони локалізації пластичної деформації перед фронтом зростаючої тріщини.
2. Для низьковуглецевої мікрولةгованої сталі 10Г2ФБ у ферито-перлітному структурному стані виконано кількісний аналіз розміру зони локалізації пластичної деформації.
3. Результати порівняння теоретичних та експериментальних даних стосовно розміру зони пластичної деформації показали, що жодна теоретична модель не дає узгодження з експериментальними даними.
4. Неузгодженість теоретичних та експериментальних розрахунків обумовлена наявністю в структурі сталі дефектів (внутрішньофазних та міжфазних границь, субграниць, тощо) які оказують істотний вплив на розповсюдження і, як наслідок, на локалізацію пластичної деформації навколо фронту зростаючої тріщини.
5. Напружено-деформований стан, який виникає внаслідок взаємодії пластичної деформації та полів напруг біля дефектів призводить до зміни форми зони локалізації пластичної деформації і, як наслідок, може призвести до зміни напрямку розповсюдження самої тріщини. Цей факт необхідно враховувати при розрахунках тріщиностійкості зварних будівельних конструкцій, особливо відповідально призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Новые методы оценки сопротивления хрупкому разрушению. Перевод с английского, под редакцией академика Ю.И. Работнова, «Мир», Москва 1972.-440. – Режим доступа: <http://www.mexanik.ru/0924/ann0924.htm>
2. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. М.: Машиностроение, 1988. – 240 с. Режим доступа: <https://www.ozon.ru/context/detail/id/33473081/>
3. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов.- М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983.-296 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/233025/>
4. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. Изд-во «Металлургия», 1970, с. 229. Режим доступа: <https://lib-bkm.ru/10020>
5. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. М.: Наука, 1987. – 80 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/473828/>
6. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. –М.: Металлургия, 1976. – 271 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/201942/>
7. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения / Нотт Дж.Ф.; пер. с англ. Д.В. Лаптева. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/70036/>
8. Іванцов С.В. Вплив параметрів структури на кінетику руйнування мікролегованих будівельних сталей: дис.....канд. техн. наук: 05.02.01 / захищена 16.04.2015 / Іванцов Сергій Вікторович; Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». – Дн-вськ, 2015. – 141 с. Режим доступа: <http://library.pgasa.dp.ua/index.php/en/>
9. О.В. Бекетов Дослідження взаємозв'язку між характеристиками руйнування та структурними складовими низьковуглецевих мікролегованих сталей // Большаков В.І., Лаухін Д.В., Бекетов О.В., Іванцов С.В., Лаухін В.Д. / Металознавство та термічна обробка металів. Науков. та ін форм. бюл./ ПДАБА. – Дн-ськ: 2016. – № 1 (72). – С. 53-58. Режим доступа: <http://mtom.pgasa.dp.ua/issue/view/4010>
10. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел / Надаи А.; пер. с англ. Г.С. Шапиро. – М.: Из-во иностранной литературы, 1954. – 647 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/342377/>

REFERENCES

1. *Novyye metody otsenki soprotivleniya hrupkomu razrusheniyu*. Perevod s angliyskogo, pod redaktsiey akademika Yu.I. Rabotnova, «Mir», Moskva 1972.-440. Available at: <http://www.mexanik.ru/0924/ann0924.htm>
2. Patron V.Z., Boriskovskiy V.G. *Dinamika hrupkogo razrusheniya*. -M.: Mashinostroenie, 1988.-240 s. Available at: <https://www.ozon.ru/context/detail/id/33473081/>
3. Cherepanov G.P. *Mehanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov*.- M.: Nauka, Glavnaya redavtsiya fi-ziko-matematicheskoy literatury, 1983.-296 s. Available at: <https://www.twirpx.com/file/233025/>
4. Kolmogorov V.L. *Napryazheniya, deformatsii, razrushenie*. Izd-vo «Metallurgiya», 1970, s. 229. Available at: : <https://lib-bkm.ru/10020>
5. Rabotnov Yu.N. *Vvedenie v mehaniku razrusheniya*. – M.: Nauka. Gl.red. fiz.-mat. lit., 1987. – 80 s. Available at: <https://www.twirpx.com/file/473828/>
6. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya*. –M.: Metallurgiya, 1976. – 271 s. Available at: <https://www.twirpx.com/file/201942/>
7. Nott Dzh.F. *Osnovy mehaniki razrusheniya* / Nott Dzh.F.; per. s angl. D.V. Lapteva. – M.: Metallurgiya, 1978. – 256 s. Available at: <https://www.twirpx.com/file/70036/>
8. Ivantsov S.V. *Vpliv parametriv strukturi na kInetiku ruynuvannya mlkrolegovanih budIvelnih staley*: dis.....kand. teh.. nauk: 05.02.01 / zahischena 16.04.2015 / Ivantsov Sergiy Viktorovich; Derzhavniy vischiy navchalniy zaklad «PridnIprovskaya derzhavna akademiya budIvnitstva ta arhItekturi». – Dn-vsk, 2015. – 141 s. Available at: <http://library.pgasa.dp.ua/index.php/en/>
9. O.V. Beketov *DoslIdzhennya vzaEmozv'yazku mlzh karakteristikami ruynuvannya ta strukturnimi sklado-vimi nizkovugletsevih mlkrolegovanih staley* // Bolshakov V.I., Lauhin D.V., Beketov O.V., Ivantsov S.V., Lauhin V.D. / Metaloznavstvo ta termIchna obrobka metalliv. Naukov. ta In form. byul./ PDABA. – Dn-sk: 2016. – # 1 (72). – S. 53-58. Available at: <http://mtom.pgasa.dp.ua/issue/view/4010>
10. Nadai A. *Plastichnost i razrushenie tverdyyih tel* / Nadai A.; per. s angl. G.S. Shapiro. – M.: Iz-vo inostrannoy literatury, 1954. – 647 s. Available at: <https://www.twirpx.com/file/342377/>

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Д.В. Лаухіним (Україна), д-ром техн. наук, проф. Г.Д. Сухомліним (Україна)