ISSN 2079–1836
2022, вип. 35

DOI 10.15421/4222216
УДК 539.3

А. Г. Пацюк, канд. техн. наук,
А. П. Дзюба, д-р техн. наук,
О. А. Дзюба

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛУ В ЗОНІ КОНЦЕНТРАТОРУ НАПРУЖЕНЬ ВІД ШВИДКОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ В ЗРАЗКАХ ІЗ ПОЛІКАРБОНАТУ

Наведено результати експериментальних досліджень по визначенню температури в зоні концентраторів напружень в зразках з полікарбонату при згинанні. Енергія теплового імпульсу вимірювалась приладом калориметричного типу ИКТ-1н і двопроменевого осцилографа С1-69. Тривалість дії теплового потоку фіксувалась осцилографом С1-69. Реєстрація напружено-деформованого стану в околі отворів-концентраторів проводилась методом каустик. Побудовані залежності величини температури в зоні концентратору від швидкості навантаження. Наведені картини температури, які отримані за допомогою тепловізора. Результати можуть бути корисними для побудови методики неруйнівного контролю конструктивних елементів.

Ключові слова: *експеримент; температура; теплове випромінювання; зразки з полікарбонату; концентратори напружень; згинання.*

Вступ. Задача прогнозування несучої здатності тонкостінних конструкцій та неруйнівного контролю їх міцністної надійності належить до актуальних задач механіки. Руйнування деформівних тіл ініціюється, як правило, появою тріщин в зонах підвищених градієнтів напружень. Зважаючи, що кінетика розвитку тріщин є катастрофічно швидкою і, як наслідок руйнівною для відповідного елементу конструкції, надзвичайно важливим є моделювання процесів деформування в околі концентраторів напружень, з метою більш достовірного прогнозування критичних руйнуючих навантажень.

Відповідно до критерію Гріффітса (1920 р.) в деформованому крихкому тілі тріщина починає рости при такому напруженому (критичному) стані, коли швидкість вивільнення енергії пружної деформації тіла під час її зростання перевищує приріст поверхневої енергії тіла на поверхні тріщини, що утворюються внаслідок її розкриття. Для цілого ряду інших матеріалів, зокрема для сталей, цей критерій не відповідає дійсності. Так, Дж. Ірвін (1948 р.) і Е. Орована (1955 р.) звернули увагу, що у квазікрихких матеріалах перед краєм тріщини з'являється певна зона плас-

© А. Г. Пацюк, А. П. Дзюба, О. А. Дзюба, 2022

тичних деформацій, що інтенсивно поглинає вивільнену енергію і цим уповільнює рух тріщини [9, 19, 20].

Зважаючи на актуальність, дослідженню цієї проблеми присвячена значна кількість наукових робіт [1, 2, 10, 11, 13, 15, 16]. Із аналізу отриманих результатів випливає, що руйнування складається із сукупності явищ, які можуть починатись значно раніше, ніж з'являються перші візуально помітні тріщини, причинами появи яких можуть бути неоднорідності та дефекти в структурі матеріалу, мікропорожнини, включення, раковини, корозійні ураження та інші пошкодження.

Відомо [8, 12, 13, 18], що при навантаженні зразка, у якого є поверхневі або внутрішні дефекти, в областях поблизу цих зон формується пластична деформація, яка супроводжується виділенням тепла. Розповсюдження тепла у зразках призводить до того, що на його поверхні виникає температурне поле. Зафіксувавши це поле і вирішивши обернену задачу температурної теплопровідності, можливо встановити розподіл джерела тепла, а потім і положення, і розмір дефекту.

Виявлення температури в кристалічних матеріалах з дефектами в районах цих зон зазначено в [19], динаміка температурного поля в металах при пластичних деформаціях в околі тріщини вивчалась в [8], експериментальні дослідження генерації тепла в зоні втомленої тріщини проводились в [1, 12, 13]. При цьому, в більшості випадків досліджувались матеріали з металу. Для полімерних матеріалів таких досліджень було значно менше, хоча вплив температури в зоні концентрації напружень була більш суттєвою для міцності і несучої здатності таких матеріалів [13, 14].

Можливим є і інший підхід до вирішення цієї проблеми. Як відомо, в останній час J-інтеграл дуже часто пов'язують з критерієм руйнування [3]. Знаючи критичне значення J-інтегралу для даного матеріалу, а також залежність J-інтегралу від температури, можна розробити спосіб неруйнівного теплового контролю надійності конструкції, а у випадку тонкостінної конструкції визначити її несучу здатність неруйнівними методами.

В зв'язку з цим важливо виявити зв'язок температури з напруженнями в зонах концентраторів напружень, що пов'язані з можливим формуванням і розвитком тріщин. Такий підхід може бути одним із можливих варіантів неруйнівного контролю вказаних конструкцій.

Постановка задачі. Експериментальні дослідження. Визначення температури в зоні концентраторів напружень проводилась на зразках [6] при згинанні. Для проведення експерименту були виготовлені прямокутні моделі (рис. 1) з полікарбонату (*Macrolon*) наступних геометричних розмірів: довжина $14 \cdot 10^{-2}$ *м* , ширина $45 \cdot 10^{-3}$ *м*, товщина $6 \cdot 10^{-3}$ *м*. В якості концентраторів напружень були отвори в зразках діаметром 8×10^{-3} *м*. Дана величина отвору дозволяла отримати значні пружно-пластичні деформації в зоні концентратора напружень до початку руйнування зразків [5].

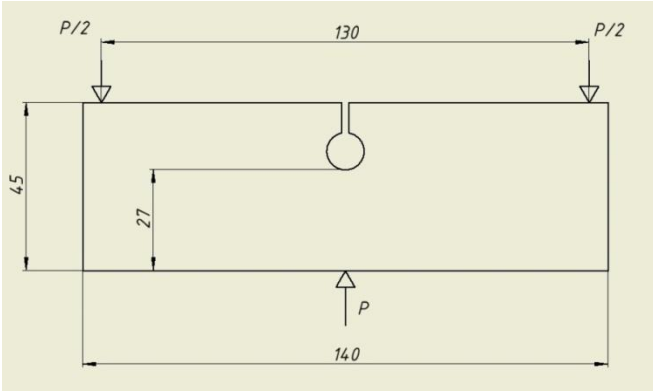


Рис. 1 – **Зразок для випробувань**

Вважаючи, що будь-яке тіло з температурою вище за нуль градусів Кельвіна (0°К) має теплове випромінювання, випромінювальна здатність якого ε дорівнює коефіцієнту поглинання α при заданій температурі і довжині хвилі. Потужність, яку випромінює тіло, визначається законом Стефана – Больцмана [17]

$$P = \eta \varepsilon A T^4,$$

де P – потужність випромінювання (вт); $\eta = 5{,}67 \times 10^{-8}\ вт/\left(м^2 K^4\right)$; A – площа випромінювальної поверхні; T – температура поверхні тіла яка випромінює.

Звідки

$$T = \sqrt[4]{P/\left(\eta \varepsilon A\right)}. \qquad (1)$$

Задача полягає в дослідженні залежності температури поверхні матеріалу в зоні концентратору напружень від швидкості навантаження в зразках з полікарбонату.

Алгоритм визначення температури в зразках з полікарбонату був наступним. Температура в зоні концентраторів напружень визначалась двома способами. Перший – покроково у декілька етапів: з початку визначалось мінімальне навантаження на зразок, яке дозволяло зареєструвати енергії теплового випромінювання і її тривалість. Дані операції здійснювались за допомогою калориметричного вимірювача ИКТ-1н і двопроменевого осцилографа С1-69 [6]. Другий – за допомогою термореєстратора GTC 400C фірми BOSH. По картині каустик відомими способами [4, 5] визначався коефіцієнт інтенсивності напружень K_1, а потім знаходився радіус r пластичної зони. По визначених параметрах енергії теплового потоку E і його тривалості t визначалась потужність теплового потоку $P = E/t$. За площу випромінювання приймалась площа поверхні пластичної зони з подвійним радіусом r, отриманого за допомогою кое-

фіцієнту інтенсивності напружень K_1, визначеного на момент основних замірів $r = K_1^2 \Big/ \left(2\pi\sigma_0^2\right)$, де σ_0 – межа текучості матеріалу (рис. 2). Більш детальна методика реєстрації температури в зоні концентратора напружень описана в [6].

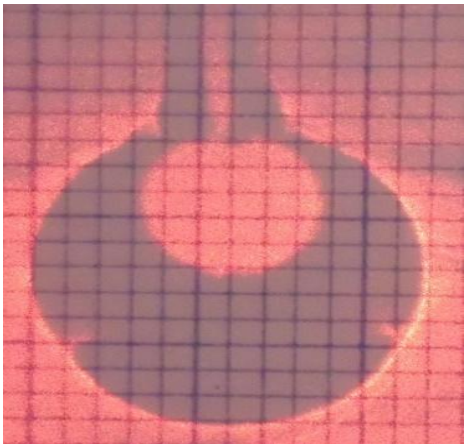


Рис. 2 – **Типова картина каустик, за якою визначається площа пластичної зони**

За наведеною формулою (1) знаходилась температура пластичної зони в околі концентратора. В експерименті вона змінювалась в діапазоні (0,3÷1,6)^{o}C в залежності від величини навантаження.

Вимірювання температури першим способом було більш тривалим и його умовно можна назвати статичним. Інтервал між силовим навантаженням з кроком 500 *Н* становив 60 – 65 *с* , а повне навантаження до значення 4 *кН* тривало майже 600 *с*.

Другий спосіб дозволив збільшити динаміку навантажень у 10 разів. та отримати залежність температури в зоні концентратора напружень від швидкості навантаження. Швидкість навантаження була збільшена за рахунок перебудови преса на режим переміщень за допомогою редуктора з динамометром, вставленого в систему переміщення зразка.

В результаті проведених досліджень встановлено залежності температури в зоні концентратора напружень від величини навантажень в зразках з полікарбонату при згинанні (рис. 3).

При статичному навантаженні отримано лінійну залежність від навантаження (лінія 1 на рис. 3). При збільшенні швидкості навантаження за час 100 *с* отримана аналогічна залежність, яка має нелінійний характер (лінія 2 на рис. 3). Подальше збільшення швидкості навантаження, в 10 разів у порівнянні зі статичним навантаженням, відповідає лінії 3 на рис. 3.

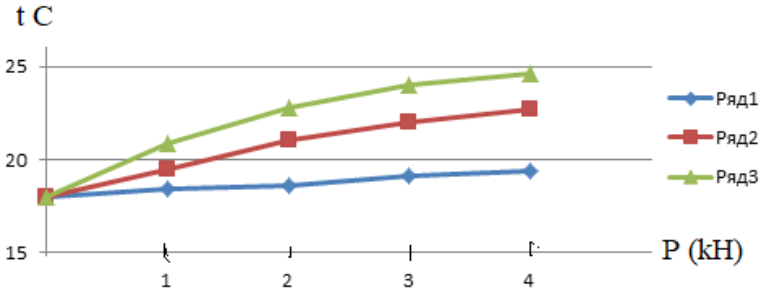


Рис. 3 – **Залежності температури в зоні концентратора напружень від навантаження**

Аналіз результатів, наведених на рис. 3, показав, що на лінійну залежність температури від навантаження впливає значний час між навантаженнями зразка, тобто за цей час зона концентратора напружень встигає вирівняти температуру зразка з температурою навколишнього середовища. Типові картини розподілу температури в зоні концентратора, які отримані за допомогою тепловізійного реєстратора, наведено на рис. 4.

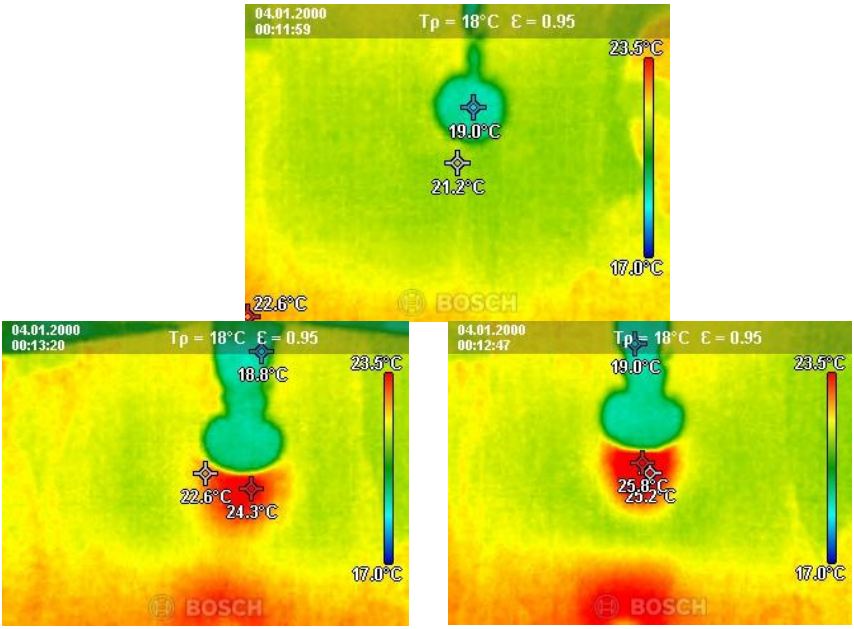


Рис. 4 – **Картини розподілу температури в зоні концентратора**

Слід зазначити, що лінійна залежність спостерігається на незначній температурній ділянці, і тому виникають ускладнення прогнозування поведінки зразків на більшому інтервалі температур.

Залежності, які показані на рис. 3 (лінія 2 і лінія 3), вказують вплив на температуру інтервалу часу між навантаженням зразка. На початковому етапі, коли навантаження зразка є незначним, в зоні концентратора напружень також спостерігається лінійна залежність між температурою і величиною навантаження зразка. Якби цей фактор був основним, то зі збільшенням величини навантаження повинно було б більш різке збільшення температури, в той час, як в експерименті спостерігається уповільнене зростання температури. Це говорить про те, що імовірно існує інший важливий фактор, який впливає на зміну температури при навантаженні і потребує додаткових досліджень.

Аналіз залежностей J-інтегралу від навантаження [3] для аналогічних зразків показав подібну залежність при навантаженні. В пружній області J-інтеграл лінійно залежить від навантаження, а в пластичній зоні спостерігається менше збільшення J-інтегралу від навантаження. Іншими словами зростання пластичної області в зоні концентратора напружень уповільнюється при зростанні навантаження.

Висновки. Розроблено способи реєстрації температури в зоні концентрації напружень при навантаженні зразків із оптично активного матеріалу. Побудовані картини розподілу температур в зоні концентраторів напружень у вигляді кругового отвору в зразках із полікарбонату та залежності температури від швидкості навантажень. Виявлено їх зв'язок зі значеннями J-інтегралу.

Отримані результати можуть бути корисними для побудови методики неруйнівного контролю міцністної надійності силових конструктивних елементів.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. ***Банников М.В.**, Терёхина Л.И., Плехов О.А*. Экспериментальное исследование особенностей процесса генерации тепла в вершине усталостной трещины // Вестник Ин-та механіки сплошных сред. УрОРАН. 2011. №1/17. С. 14–27.

2. ***Броек Д***. Основы механики разрушения. Пер с англ. М.: Высшая школа, 1980. 386 с.

3. ***Дзюба А.П.**, Пацюк А.Г.*Експериментальне моделювання процесу виникнення тріщини на контурі отвору з включенням // Пробл. обчисл. мех. і міцност конструкцій: зб. наук. праць. 2021. Вип. 33. С. 55–65.

4. ***Дзюба А.П.**, Пацюк А.Г., Полішко О.М.* Спосіб визначення пластичної складової енергії деформування в зразках з полікарбонату. Патент на корисну модель № 148715 від 08.09.2021.

5. ***Дзюба А.П.**, Пацюк А.Г., Полішко О.М.* Спосіб визначення пружної та пластичної складових енергії деформування в околі тріщини в зразках з полікарбонату на згин. Патент на корисну модель № 151117 від 08.06.2022.

6. ***Дзюба А.П.**, Пацюк А.Г., Полішко О.М.* Спосіб визначення температури в зоні концентратора напружень при навантаженні зразків з полікарбонату. Патент на корисну модель № 151120 від 08.06.2022.

7. ***Лобода В.В.*** *та ін.* Проблеми механіки руйнування композитів з тріщинами на меж розподілу матеріалів. В кн. Актуальні проблеми механіки руйнування: монографія / під ред. В.М. Полякова. Д.: Ліра. 2018. С. 277–308.

8. ***Мойсейчик Е.А.*** Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом // Прикл. мех. и техн. физика. 2013. Т. 54. С. 134–143.

9. ***Моссаковский В.И.,*** *Рыбка М.Т.* Обобщение критерия Гриффица – Снеддона на случай неоднородного тела // Прикл. математика и механика. 1964. Т. 28. № 6. С. 1061–1069.

10. ***Панасюк В.В.*** Предельное равновесие хрупких тел. С трещинами. К.: Наукова думка, 1968. 248 с.

11. ***Пестриков В.М.,*** *Морозов Е.М.* Механика разрушения твердых тел: курс лекцій. Санкт-Петербург: Профессия, 2002. 320 с.

12. ***Терехов А.И***., *Банников М.В., Плеханов О.А., Плеханова Э.В.* Экспериментальное исследования генерации тепла в вершине усталостной трещины // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 16. С. 9–15.

13. ***Терёшин Д.А.*** Развитие длинных усталостных трещин в стальних образцах под действием движущихся теплових полей // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Машиностроение 2006. Вып.8. № 11. С. 47–53.

14. ***Филипенко А.А.,*** *Будадин О.Н., Хузин Р.К* Тепловой контроль концентраторов напряжений в конструкциях из полимерно-конструкционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2011. № 3. С. 44–45.

15. ***Черепанов Г. П***. Механика разрушения. Ижевск: Ин-т комп'ютерних исследований. 2012. 872 с.

16. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ. /Под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990. 612 с.

17. ***Kuchling H.*** Physik Von Fachschuldozent. Veb Fachbuchverlag Leipzig, 1980. 142 p.

18. ***Rittel D.*** Thermomechanical aspects of dynamic crack imitation // International Journal of Fracture. 2004. Vol. 99. P. 201–212.

19. ***Weichert R.,*** *Schoenert K.* Heat generation at the tip of a moving crack // J. Mech. Phys. 1978. Vol. 26. P. 151–161.

20. ***Wells A.A.*** The mechanics of notch brittle fracture // Weld. Res. 1953. Vol. 7. No 2. P. 34–56.

UDC 539.3

A. G. Patzyuk PhD (Tech.)
ORCID ID 0000-0003-3675-7913

A. P. Dzyuba Dr. Sci. (Tech.)
ORCID ID 0000-0001-6331-7783

O. A. Dzyuba
ORCID ID 0000-0002-7750-9935

RESEARCH OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE MATERIAL SURFACE IN THE AREA OF THE STRESS CONCENTRATION FROM THE SPEED OF LOAD AT THE SAMPLES FROM POLYCARBONATE

The results of experimental studies on determining the temperature in the zone of stress concentrators in polycarbonate samples during bending are given. The energy of the thermal pulse was measured by a calorimetric device of the ICT-1n type and a two-beam oscilloscope C1-69. The duration of the heat flow was recorded

by the C1-69 oscilloscope. Registration of the stress-strain state in the vicinity of concentrator holes was carried out by the caustic method. The dependences of the temperature in the concentrator zone on the load speed are plotted. Temperature pictures obtained with the help of a thermal recorder are given. The obtained results can be useful for building a method of non-destructive control of structural elements.

Keywords: *experiment; temperature; thermal radiation; polycarbonate samples; stress concentrators; bending.*

The problem of forecasting the bearing capacity of thin-walled structures and non-destructive control of their strength reliability belongs to the actual tasks of mechanics/ The destruction of deformable bodies is initiated, as a rule, by the appearance of cracks in zones of increased stress gradients. Considering that the kinetics of crack development is catastrophically fast and, as a result, destructive for the corresponding structural element, it is extremely important for modeling deformation processes around stress concentrators with the aim of more reliable prediction of critical destructive loads. The results of experimental researches on determining the temperature in the zone of stress concentrators in polycarbonate samples during bending are given.

It is known [8, 12, 13, 18] that when a sample with surface or internal defects is loaded, plastic deformation is formed in the regions near these zones, which is accompanied by the release of heat. The distribution of heat in the samples leads to the fact that a temperature field appears on its surface. Having fixed this field and solved the inverse problem of temperature thermal conductivity, it is possible to establish the distribution of the heat source, and then the position and size of the defect.

Determination of temperature in the zone of stress concentrators was carried out on samples [6] during bending. To conduct the experiment, rectangular models were made from polycarbonate (Macrolon) with the following geometric dimensions: length is 14×10^{-2} *m*, width is 45×10^{-3} *m*, thickness is 6×10^{-3} *m*. Holes in the samples with a diameter of 8×10^{-3}*m* were used as stress concentrators. This size of the opening made it possible to obtain significant elastic-plastic deformations in the zone of the stress concentrator before the beginning of the destruction of the samples [5].

The energy of the thermal pulse was measured by a calorimetric device of the ICT-1n type and a double-beam oscilloscope C1-69. The duration of the heat flow was recorded by the C1-69 oscilloscope. Registration of the stress-strain state in the vicinity of concentrator holes was carried out by the caustic method. Methods of temperature registration in the zone of stress concentration during loading of optically active material samples have been developed. The pictures of temperature distribution in the zone of stress concentrators in the form of a circular hole in polycarbonate samples and the dependence of the temperature on the load speed was plotted. Their connection with the values of the J-integral was revealed.

The obtained results can be useful for building a technique for non-destructive control of strength reliability of power structural elements.

REFERENCES

1. ***Bannikov M.V.,*** *Terekhina L.I., Plekhov O.A.* Experimental study of the features of the process of heat generation at the tip of a fatigue crack // Bulletin of the Institute of Continuum Mechanics. UrBRAN. 2011. No. 1/17. P. 14–27. (in Russian).
2. ***Broek D.*** Fundamentals of fracture mechanics. Per from English. Moscow: Vysshaya shkola, 1980. 386 p. (in Russian).
3. ***Dzyuba A.P.,*** *Patsyuk A.G.* Experimental modeling of the process of the formation of a crack at the contour of a hole with an inclusion // Probl. of compunational mechanics and strength of structures: coll. of science works. 2021. Vol. 33. P. 55–65. (in Ukrainian).
4. ***Dzyuba A.P.,*** *Patsyuk A.G., Polishko O.M.* The method of determining the plastic component of deformation energy in polycarbonate samples. Utility model patent No. 148715 dated 09/08/2021. (in Ukrainian).
5. ***Dzyuba A.P.,*** *Patsyuk A.G., Polishko O.M.* The method of determining the elastic and plastic components of deformation energy around a crack in polycarbonate specimens for bending. Utility model patent No. 151117 dated 06/08/2022. (in Ukrainian).
6. ***Dzyuba A.P.,*** *Patsyuk A.G., Polishko O.M.* The method of determining the temperature in the zone of the stress concentrator during loading of polycarbonate samples. Utility model patent No. 151120 dated 06/08/2022. (in Ukrainian).
7. ***Loboda V.V.*** *et al.* Problems of the mechanics of ruining composites with cracks between materials. In the book. Actual problems of the mechanics of ruining: monograph / ed. by M.V. Polyakov. Dnipro: Lira. 2018. P. 277–308. (in Ukrainian).
8. ***Moiseichik E.A.*** Investigation of heat formed and fracture initiation in a stretched steel plate with a structural and technological defect. Prikl Mekh. and tech. physics. 2013. Vol. 54. P. 134–143. (in Russian).
9. ***Mossakovsky V.I.,*** *Rybka M.T.* Generalization of the Griffitz - Cn criterion to the case of an inhomogeneous body // Appl. mathematics and mechanics. 1964. Vol. 28. No. 6. P. 1061–1069. (in Russian).
10. ***Panasyuk V.V.*** Limit equilibrium of fragile bodies with cracks. Kyiv: Naukova dumka, 1968. 248 p. (in Russian).
11. ***Pestrikov V.M.,*** *Morozov E.M.* Fracture Mechanics of Solids: a course of lectures. St.- Petersburg: Profession, 2002. 320 p. (in Russian).
12. ***Terekhov A.I.,*** *Bannikov M.V., Plekhanov O.A., Plekhanova E.V.* Experimental study of heat generation at the tip of a fatigue crack // Letters to ZhTF. 2012. Vol. 38. No. 16. P. 9–15. (in Russian).
13. ***Tereshin D.A.*** Development of long fatigue cracks in steel specimens under the action of moving thermal fields. Vestnik SUrSU. Ser.: Mashinostroenie 2006. Iss. 8. No. 11. P. 47–53. (in Russian).
14. ***Filipenko A.A.,*** *Budadin O.N., Khuzin R.K.* Thermal control of stress concentrators in structures made of polymer-constructive materials // Technical diagnostics and nondestructive testing. 2011. No. 3. P. 44–45. (in Russian).
15. ***Cherepanov G.P.*** Fracture Mechanics. Izhevsk: Institute of Computer Research. 2012. 872 p. (in Russian).
16. Experimental mechanics: In 2 books: Book 1. Trans. from English. Under the editorship of A. Kobayashi. Moscow: Mir, 1990. 612 p. (in Russian).
17. ***Kuchling H.*** Physik Von Fachschuldozent. Veb Fachbuchverlag Leipzig, 1980. 142 p.
18. ***Rittel D.*** Thermomechanical aspects of dynamic crack imitation // International Journal of Fracture. 2004. Vol. 99. P. 201–212.
19. ***Weichert R.,*** *Schoenert K.* Heat generation at the tip of a moving crack // J. Mech. Phys. 1978. Vol. 26. P. 151–161.
20. ***Wells A.A.*** The mechanics of notch brittle fracture // Weld. Res. 1953. Vol. 7. No 2. P. 34–56.

Дніпровський національний
університет імені Олеся Гончара,
Дніпро, Україна

Надійшла до редколегії 14.11.2022