

УДК- 531, 537

Г. Степанов, докт. техн. наук; В. Харченко, докт. техн. наук;  
А. Котляренко; І. Мамєєв, канд. техн. наук

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАНУ

## ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ РУЙНУВАННЮ ЗРАЗКА З ТРІЩИНОЮ ВНАСЛІДОК ОБРОБКИ ІМПУЛЬСНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

**Резюме.** Наведено методику та результати експериментальних досліджень впливу обробки імпульсним магнітним полем (ІМП) на опір руйнуванню компактних зразків з попередньо вицощеною тріщиною втомки, виготовлених зі сталі 45. Перед обробкою ІМП зразки механічно навантажували розтягом до рівня напружень у вершині тріщини, при яких значення коефіцієнта інтенсивності напружень нижче за його критичне значення ( $K_c$ ). У результаті обробки ІМП у зразку відбувається релаксація напружень за рахунок пластичної течії у вершині тріщини, що призводить до її притуплення. Результати випробувань оброблених зразків показали істотне підвищення опору руйнуванню в порівнянні зі зразками в початковому стані.

**Ключові слова:** опір руйнуванню, релаксація напружень, імпульсне магнітне поле.

G. Stepanov, V. Kharchenko, A. Kotliarenko, I. Mameev

## INCREASE OF FRACTURE RESISTANCE OF A CRACKED SPECIMEN CAUSED BY PULSED MAGNETIC FIELD TREATMENT

**The summary.** Experimental technique and results of investigations of the effect of pulsed magnetic field (PMF) treatment on fracture resistance of the fatigue pre-cracked compact tension (CT) specimens are presented. Each specimen, made out of a hot-rolled sheet of medium carbon steel 45, was cut by the electric discharge machine. The initial starter notch in the specimens, perpendicular to the direction of rolling, was performed. To avoid possible residual stresses in the specimens after their manufacturing operations annealing was used. A natural sharp fatigue crack in CT specimen was created by cyclic loading. Before PMF treatment, in order to form the initial elasto-plastic stress in the crack tip and to reduce the electrical contact between its edges, treated specimen was mechanically preloaded in tension using special pool-rods. The load was carried to the stress level in the crack tip at which the value of stress intensity factor does not exceed its value on the last step of loading at growing of a natural fatigue crack in the specimen. The pulse magnetic field was provided by discharging a bank of high voltage capacitors through connected in a transmission line circuit with inductors, installed on both sides of the specimen. The parameters of current discharge were monitored using a calibrated non-contact inductive probe, called the Rogowski coil, placed around one of the current feeding wires and recorded on a personal computer (PC) with pre-installed high-frequency analog-digital card. For all specimens the same parameters of current discharge were used. According to measurements the discharge current was about 11 kA for the total duration of 10 ms. Direct measurement of the load, applied to the specimen and temperature rise in the vicinity of fatigue crack during PMF treatment were also recorded. After treatment irreversible relaxation (significant force decreasing) and negligible increase in temperature in the vicinity of the crack were observed. After testing at room temperature CT specimens in the initial state and specimens after PMF treatment, the values of maximum stress intensity factor  $K_{max}$  and strength ratio of specimen  $R_{sc}$  were obtained. Test results showed a substantial increase of the fracture resistance of the treated specimens in a comparison to the specimens in an initial state. Stress relaxation, caused by plastic flow in a vicinity of the crack, takes place due to PMF treatment and provokes a crack blunting. This fact was confirmed by increasing the value of a crack opening displacement of the treated specimen in comparison with its initial state. Increasing of fracture resistance should be mainly associated with blunting of the crack due to plastic flow in its tip, caused by the relaxation of initial elastic-plastic stress under electroplastic and magnetoplastic effects

**Key words:** fracture resistance, stress relaxation, pulsed magnetic field.

**Постановка проблеми.** В даний час після виявлення в конструкції тріщини в багатьох випадках її експлуатація не припиняється. Зазвичай у такій ситуації спочатку оцінюють ступінь безпеки тріщини: з урахуванням характеристик тріщиностійкості ( $K_{Ic}$ ,  $K_c$ ,  $\delta_c$ ) визначають здатність конструкції функціонувати з наявною тріщиною. Застосування характеристик тріщиностійкості, в першу чергу  $K_{Ic}$ , в якості критеріїв міцності матеріалу дозволяє розрахувати максимальне допустиме навантаження, при якому можлива експлуатація конструкції з тріщиною відомих розмірів. Одночасно із зазначеними оцінками,

як правило, вживають заходи щодо запобігання подальшому поширенню тріщини. Наприклад, коригують режим експлуатації конструкції в бік зниження рівня її навантаженості, використовують різні конструкційні рішення, пов'язані із застосуванням на шляху тріщини елементів жорсткості й накладок із матеріалу з високою в'язкістю, виконують бар'єрні шви [1], засвердлюють у вершині тріщини так звані «розвантажуючий» отвір і т.п.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Актуальність завдання підвищення опору руйнуванню відповідальних конструкцій та їх елементів зумовлює необхідність проведення подальших досліджень з розроблення нових можливостей їх вирішення. Зокрема, практичний інтерес викликає використання для цих цілей обробки елементів конструкцій з тріщинами імпульсним електромагнітним полем. Значний доробок у цьому напрямку було зроблено в 1970–80-тих роках [2–8], проте інтерес до даних досліджень не послаблюється [9–13].

В основі зазначених досліджень лежить відомий ефект, який полягає в тому, що при обробці імпульсним електромагнітним полем електропровідного тіла з тріщиною в міру природних причин в її вершині відбувається значна концентрація електричного й магнітного полів (аналогічно концентрації механічних напружень і деформацій при навантаженні розтягом). У результаті термічної дії електричного струму (джоулевого розігріву) та електропластичного ефекту за певних умов, перш за все при достатній густині струму, може відбуватися «заліковування» тріщини – її заплавлення або, навпаки, формування кратера у вершині, тобто утворення розвантажуючого отвору аналогічно засвердлюванню.

**Метою даної роботи** є розроблення методики для дослідження впливу обробки імпульсним магнітним полем (ІМП) на притуплення тріщини попередньо навантаженого зразка та аналіз підвищення опору руйнуванню внаслідок проведення такої обробки.

**Методика дослідження.** При проведенні експериментів використовували: зразки з тріщиною для дослідження опору руйнуванню матеріалу – компактні СТ зразки (зразки для випробування позацентровим розтягом). Зразки виготовляли з листа гарячекатаної середньовуглецевої сталі 45 у стані поставки такого складу (%): 0,45 С; 0,5...0,8 Мп; < 0,25 Ні; < 0,25 Сг; < 0,05 Сu; 0,17...0,37 Si; < 0,08 Аs; < 0,035 Р и < 0,04 S).

Компактні СТ зразки виготовляли товщиною  $B = 4$  мм і шириною  $W = 14$  мм (інші геометричні розміри і пропорції задовольняли вимоги стандарту [14]). Початковий надріз у зразку виконували перпендикулярно напрямку прокатки сталевго листа. Для уникнення можливих залишкових напружень у матеріалі зразків після операцій з виготовлення використовували відпал: усі зразки у вакуумній печі нагрівали до температури  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , потім охолоджували з піччю до кімнатної температури.

Після відпалу в кожному СТ зразку вирощували втомну тріщину, керуючись вимогами, викладеними у стандарті [14]. Для навантаження використовували серво-гідравлічну випробувальну машину BiSS-202-V (BiSS, Індія). Зразки навантажували циклічним розтягом шляхом переміщення активного захвату за синусоїдальним законом із частотою 20 Гц, асиметрія циклу становила 0,1. Критерієм зупинки навантаження було досягнення довжини тріщини  $a$  співвідношення  $a/W = 0,5$ , при кінцевій довжині тріщини навантаження  $K_{max}$  не перевищувало  $24,7\text{ МПа} \cdot \sqrt{m}$ , що відповідало силі 1,21 кН. Остаточне вимірювання загальної довжини тріщини (надріз та втомна тріщина) проводили на оптичному мікроскопі Axiotech Vario (Carl Zeiss, Німеччина).

При проведенні обробки СТ зразків, яка складається з попереднього механічного навантаження й обробки ІМП, зразок встановлювали між двома індукторами як показано на рис. 1 (ближчий індуктор на рисунку не зображено). Перед обробкою імпульсним магнітним полем за допомогою випробувальної машини зразок навантажували з метою формування початкових пружно-пластичних напружень розтягу у вершині тріщини, а також з метою зниження електричного контакту між її берегами.

У даному випадку для навантаження СТ зразка були виготовлені спеціальні тяги, які за формою повторюють вирізи на зразку, що використовуються для встановлення датчика вимірювання розкриття тріщини (рис. 1). Товщина тяг дорівнювала товщині зразка. Перед обробкою СТ зразок з попередньо вирощеною втомною тріщиною вставляли у вирізи тяг, після чого всю збірку закріплювали в механічних захватах випробувальної машини і навантажували зусиллям 1 кН, що дещо нижче рівня навантаження, яке відповідає значенню  $K_{max}$ , зареєстрованому при довжині тріщини  $a/W = 0,5$  (виходячи з відмінності місця прикладання навантаження, в разі вирощування втомної тріщини застосували коригування значення  $K_{max}$  залежно від точки прикладання сили).

Після попереднього навантаження силового ланцюга по обидва боки зразка встановлювали індуктори, забезпечуючи відповідне розташування зразка з тріщиною відносно індуктора (рис. 1).

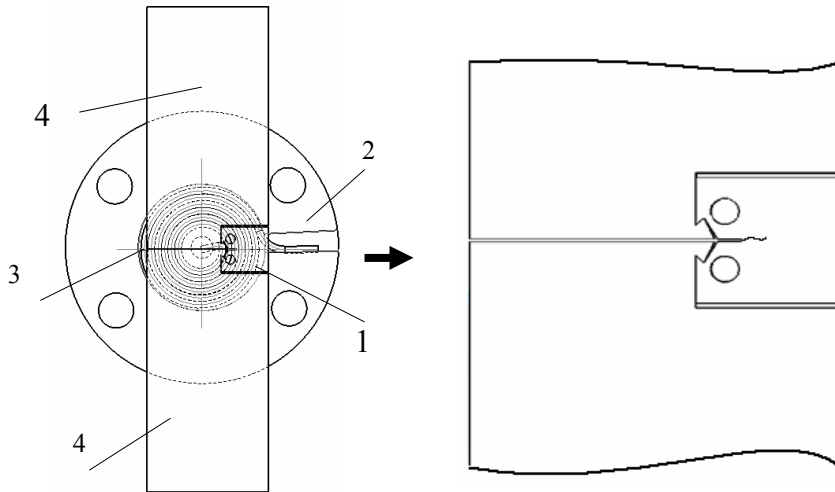


Рисунок 1. Розташування СТ зразка при обробці: 1 – зразок; 2 – корпус індуктора; 3 – витки індуктора, 4 – тяги для механічного навантаження

Figure 1. CT specimen location under treatment: 1 – specimen; 2 – inductor body; 3 – inductor coils; 4 – mechanically load pool-rods

При обробці імпульсне магнітне поле створювали при розряді попередньо зарядженої батареї конденсаторів високої напруги через послідовно з'єднані індуктори, встановлені з обох боків зразка (рис. 1) і стягнені чотирма болтами для запобігання їх зміщенню внаслідок взаємного відштовхування (струм в індукторах протікав в одному напрямку). При цьому за допомогою пояса Роговського і високочастотної аналого-цифрової плати PCI-9810 (ADLINK Technology, Тайвань), встановленої на персональному комп'ютері, реєстрували параметри струму розряду. Для всіх зразків використовували однаковий режим зарядки батареї конденсаторів: напруга  $U_0 = 3,5$  кВ, ємність  $C = 1200$  мкФ. Згідно з результатами реєстрації струм розряду становив близько 11 кА за загальної тривалості 10 мс (рис. 2).

Протягом обробки реєстрували зусилля на зразку. На рис. 3 наведено діаграму навантаження СТ зразка на машині IP 5047-50-02 (Точприлад, Росія) з жорстким режимом навантаження. З діаграми бачимо, що після навантаження до 1 кН і зупинки активного захвату в силовому ланцюгу машини відбулася незначна природна релаксація навантаження на рівні 2...3%, а після обробки ІМП відбувся суттєвий його спад (релаксація) на величину в межах 10%.

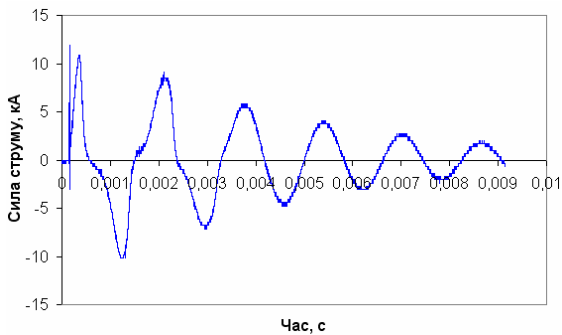


Рисунок 2. Форма імпульсу струму, що проходив через індуктори при обробці зразків  
Figure 2. The current pulse, passed through the inductors under specimen treatment

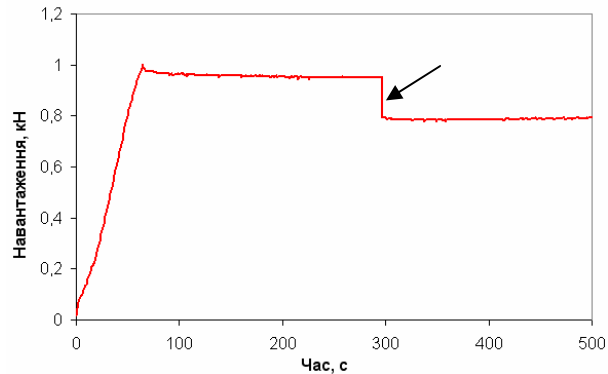


Рисунок 3. Діаграма навантаження СТ зразка при обробці  
Figure 3. СТ specimen loading diagram under treatment

Також реєстрували в околі вершини втомної тріщини приріст температури за допомогою потенціометра КСП-4 із використанням хромель-алюмелевої термопари (діаметр дрітків – 0,2 мм), яку фіксували на поверхні зразка. Для уникнення пошкодження потенціометра індуктованими струмами реєстрацію температури здійснювали через 1...2 секунди після розряду конденсаторів. У результаті обробки в області вершини тріщини було зареєстровано підвищення температури на величину близько 4 °С. Після обробки зразок повністю розвантажували.

Компактні СТ зразки у початковому стані та після обробки випробовували за кімнатної температури на випробувальній машині BiSS-202-V (BiSS, Індія). При випробуваннях реєстрували зусилля, яке прикладалося до зразка, а також розкриття тріщини, яке реєстрували датчиком Bi-06-201 (BiSS, Індія). За отриманими експериментальними даними відповідно до вимог стандарту [14] розраховували значення максимального коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{max}$  за формулою (1) і коефіцієнта міцності  $R_{sc}$  за формулою (2), що враховує геометричні пропорції, умовну межу текучості матеріалу зразка та максимальне зусилля, яке він здатний витримати без руйнування:

$$K_{max} = \frac{P_{max}}{B \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (1)$$

де

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2 + \frac{a}{W}) \cdot (0.866 + 4.64 \cdot \frac{a}{W} - 13.32 \cdot \frac{a^2}{W^2} + 14.72 \cdot \frac{a^3}{W^3} - 5.6 \cdot \frac{a^4}{W^4})}{(1 - \frac{a}{W})^{3/2}},$$

$$R_{sc} = \frac{2P_{max} \cdot (2W + a)}{B(W - a)^2 \cdot \sigma_{YS}} \quad (2)$$

У наведених формулах  $P_{\max}$  – максимальне зусилля, зареєстроване в ході експерименту;  $W$  – ширина зразка;  $B$  – товщина зразка;  $a$  – довжина тріщини;  $\sigma_{YS}$  – умовна межа текучості.

**Результати та їх аналіз.** Результати випробувань зразків наведено в таблиці 1 та на рис. 4. Дані випробувань СТ зразків опрацьовували з використанням вищенаведених залежностей (1) для коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{\max}$  і (2) для коефіцієнта міцності  $R_{sc}$ . Необхідні для розрахунків механічні властивості матеріалу визначали за результатами одновісного розтягу. Цілком очевидно, що при товщині СТ зразка 4 мм біля вершини тріщини формується значна зона пластичних деформацій. Отже, розраховані значення в'язкості руйнування матеріалу при плоскій деформації  $K_{\max}$  є якісною оцінкою (не виконується відома вимога  $B > 2,5(K_{Ic} / \sigma_{YS})^2$ ). Проте в даному дослідженні ми все ж використовуємо цей параметр (коефіцієнт інтенсивності напружень), оскільки це найпростіший критерій з наявних, що дозволяє оцінити ефект впливу обробки на поведінку тріщини і пов'язує навантаження з довжиною тріщини для вказаного типу зразків. Також для аналізу результатів обробки на рис. 4 наведено графік зміни коефіцієнта міцності  $R_{sc}$  залежно від стану матеріалу, який відповідно до стандарту [14] рекомендується брати до уваги у разі неможливості коректного розрахунку  $K_{\max}$ .

Таблиця 1

Характеристики тріщиностійкості сталі 45 у початковому та обробленому стані

Table 1

Fracture characteristics of steel 45 before and after treatment

№ з/п	Стан	$a$ , мм	$W$ , мм	$B$ , мм	$P_{\max}$ , кН	$K_{\max}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$R_{sc}$
1	Почат.	6,69	14	4	2,46	46,96	2,12
2		7,03	14	4	2,31	47,49	2,22
3		7,26	14	4	2,12	46,04	2,20
4	Оброб.	7,07	14	4	2,47	51,31	2,60
5		7,16	14	4	2,47	52,3	2,68
6		7,25	14	4	2,4	52,01	2,68
7		7,29	14	4	2,47	53,86	2,79
8		7,2	14	4	2,5	53,50	2,74

$a$  – довжина тріщини;  $W$  – ширина зразка;  $B$  – товщина зразка;  $P_{\max}$  – максимальне навантаження, розраховане за діаграмою «навантаження–розкриття тріщини»;  $K_{\max}$  – коефіцієнт інтенсивності напружень;  $R_{sc}$  – коефіцієнт міцності

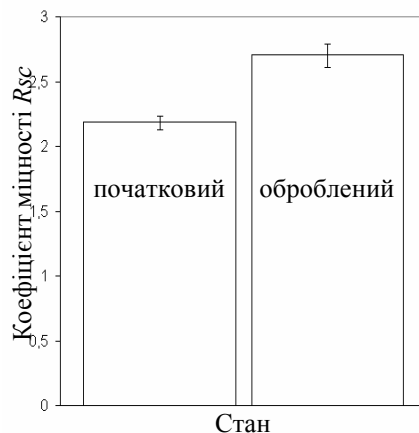


Рисунок 4. Значення коефіцієнта міцності  $R_{sc}$

Figure 4. Strength ratio value  $R_{sc}$

Результати випробувань СТ зразків вказують на суттєвий ефект впливу проведеної обробки ІМП на здатність тріщини до поширення в термінах коефіцієнта міцності  $R_{sc}$ . Підвищення опору матеріалу до поширення тріщини зросло на 24%.

Найімовірніше, основний вплив обробки на підвищення опору руйнуванню може бути пов'язаний з ефектом притуплення тріщини за рахунок пластичної течії в її вершині при обробці. Дані реєстрації, наведені на рис. 3, свідчать, що внаслідок обробки ІМП у зразку відбувається релаксація напружень. Цілком природно припустити, що основною зоною, де початкові пружно-пластичні напруження призводять до підвищення пластичної складової (релаксація напружень полягає саме в цьому) є найбільш навантажена область біля вершини тріщини.

Висновок про притуплені тріщини за рахунок пластичної деформації в її вершині можна зробити, виходячи із зареєстрованого розкриття її берегів. Розкриття берегів тріщини в результаті обробки добре видно з рис. 5, де наведено фотографії однієї й тієї ж тріщини на СТ зразку в початковому стані й після проведеної обробки ІМП та повного розвантаження. Різниця розкриття тріщини на відстані 30 мкм від її вершини обробленого зразка склала 5 мкм відносно початкового стану. Причому, на відміну від раніше виконаних робіт [2–13], при використаних у цій роботі параметрах ІМП відсутні будь-які сліди плавлення в околі вершини тріщини.

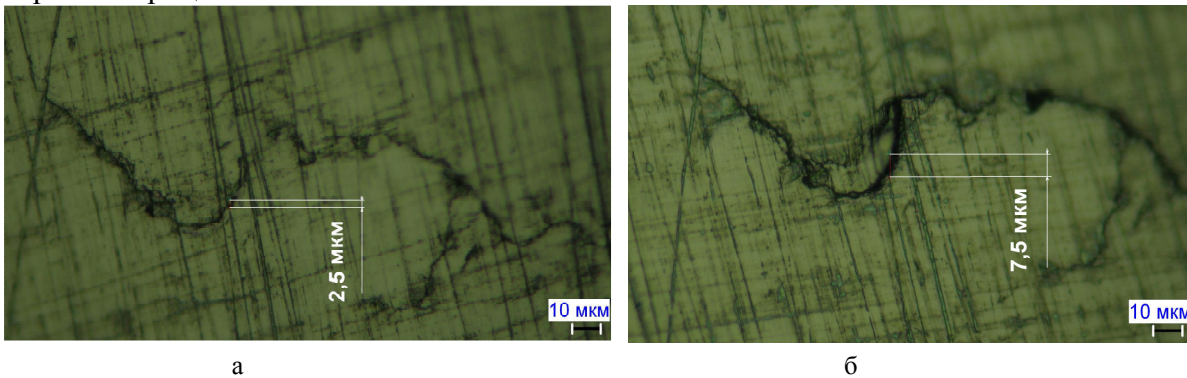


Рисунок 5. Вершина втомної тріщини (довжина тріщини 7,25 мм, рух тріщини справа наліво) до (а) і після (б) обробки

Figure 5. Fatigue crack tip (crack length 7.25 mm, crack propagation from right to left) before (a) and after (b) treatment

Аналіз природи зареєстрованої в даних експериментах релаксації напружень у вершині тріщини в результаті дії ІМП заслуговує окремого розгляду. На нашу думку, основний внесок у релаксацію напружень у даному випадку дають ефекти нетермічної природи (електропластичний ефект). Про це свідчать результати вимірювань температури біля вершини тріщини, а також відсутність кольорів мінливості на поверхні зразка (рис. 5). Отже, зареєстровану релаксацію напружень слід пов'язувати з дією електропластичного і магнітопластичного ефектів [15–19].

Разом з тим, ефект термічного знеміцнення матеріалу у вершині тріщини внаслідок дії індукваного струму і магнітного поля також не може бути повністю виключений. З метою уточнення можливого термічного впливу обробки на релаксацію напружень у вершині тріщини слід провести додаткові дослідження. Зокрема, слід виконати фрактографічні дослідження та чисельне моделювання обробки зразка з тріщиною з метою визначення розподілу індукваного струму й температури в її вершині, що є завданням подальших досліджень.

**Висновки.** Результати випробувань компактних СТ зразків вказують на істотне підвищення опору руйнуванню порівняно зі зразками у початковому стані (коефіцієнт міцності  $R_{sc}$  збільшився на 24%). Підвищення опору руйнування оброблених СТ зразків слід в основному пов'язувати з притупленням тріщини внаслідок пластичної течії в області її вершини за рахунок релаксації початкових пружно-пластичних напружень під дією електропластичного та магнітопластичного ефектів.

**Conclusions.** Test results of compact CT specimens show a significant increase of fracture resistance compared with specimen in the initial state (strength ratio  $R_{sc}$  increases by 24%). Increasing the resistance to fracture treated CT specimen should be mainly associated with blunting of the crack due to plastic flow in its tip by the relaxation of initial elasto-plastic stress under electroplastic and magnetoplastic effects.

### Список використаної літератури

1. Разрушение. – Т. 5: Расчет конструкций на хрупкую прочность [Текст]; под ред. Г. Либовица. – М.: Машиностроение, 1977.
2. Финкель, В.М. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока [Текст] / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, А.А. Слетков // Докл. Акад. наук СССР. – 1976. – Т.227, № 4. – С.848–851.
3. Финкель, В.М. Испытания труб и локализация разрушения в них электродинамическим способом [Текст] / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, А.А.Слетков // Заводская лаборатория. – 1976. – № 7. – С.861–865.
4. Головин, Ю.И. Влияние импульсов тока на кинетику распространения трещин в кремнистом железе [Текст] / Ю.И. Головин, В.М. Финкель, А.А. Слетков // Проблемы прочности. – 1977. – № 2. – С.84–89.
5. Финкель, В.М. Разрушение вершины трещины сильным электромагнитным полем [Текст] / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, А.А. Слетков // Докл. Акад. наук СССР. – 1977. – Т.237, № 2. – С.325–327.
6. Финкель, В.М. Образование кратера в вершине трещины под действием мощного локального электромагнитного поля [Текст] / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, А.А. Слетков // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 3. – С.18–23.
7. Финкель, В.М. Залечивание трещин в металлах скрещенными электрическим и магнитным полями [Текст] / В.М. Финкель, Ю.И. Головин, В.М. Иванов // Проблемы прочности. – 1983. – №4. – С.53–60.
8. G. G. S. Doelp. Experimental and currents and electromagnetic blunting of cracks in thin plates / MS Thesis, Cornell University, 1984.
9. Satapathy S. Crack tip behavior under pulsed electromagnetic loading / S. Satapathy, F. Stefani, A. Saenz / IEEE TransMagn 41, 2005. – PP.226–230.
10. Gallo F. Melting and cavity growth in the vicinity of crack tips subjected to short-duration current pulses / F. Gallo, S. Satapathy, K. Ravi-Chandar // IEEE Trans Magn 45, 2009. – PP.584–586.
11. Liu T.J.C. Thermo-electro-structural coupled analyses of crack arrest by Joule heating / T.J.C. Liu // Theor. Appl. Fract. Mech., 2008. – Vol. 49. – PP.171–184.
12. Liu T.J.C. Crack repair performance of piezoelectric actuator estimated by slope continuity and fracture mechanics / T.J.C. Liu // Eng. Fract. Mech., 2008. – Vol. 75. – PP.2566–2574.
13. Gallo F. Melting and crack growth in electrical conductors subjected to short-duration current pulses / F. Gallo, S. Satapathy K. Ravi-Chandar // Int. J. Fract., 2011. – Vol. 167. – PP.183–193.
14. E399-90(1997) Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. In Annual Book of ASTM Standards.
15. Спицын, В.И. Электропластическая деформация металлов [Текст] / В.И. Спицын, О.А. Троицкий. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
16. Sprecher A.F. On the mechanisms for the electoplastic effects in metals / A.F. Sprecher, S.L. Mannan, H. Conrad // Acta metal. – 1986. – Vol.34. – No.7. – P.1145–1162.
17. Анализ процесса релаксации растягивающих напряжений под действием импульса электрического тока [Текст] / Г.В. Степанов, А.И. Бабуцкий, И.А. Мамеев, А.Н. Олисов // Проблемы прочности. – 2006. – №1. – С.116–127.
18. Степанов, Г.В. Оценка влияния импульсного электрического тока высокой плотности на скорость пластической деформации металлов [Текст] / Г.В. Степанов, А.И. Бабуцкий // Проблемы прочности. – 2006. – №2. – С.105–113.
19. Головин, Ю.И. Магнітопластическіе ефекти в кристаллах [Текст] / Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов // Известия РАН (серия физическая). – 1997. – Т. 61, № 5. – С.850–859.

Отримано 02.03.2012