

С. Беженев. Застосування методу акустичної емісії для оцінювання впливу поверхневого зміцнення на характеристики опору багатоциклової втомі залізовуглецевих сплавів / С. Беженев // Вісник ТНТУ. — 2013. — Том 71. — № 3. — С.204-215. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 539.43:620.179.16

С. Беженев, канд. техн. наук

Запорізький національний технічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОРУ БАГАТОЦИКЛОВІЙ ВТОМІ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

Резюме. Запропоновано ефективний неруйнівний спосіб оцінювання ефекту зміцнення поверхневих шарів залізовуглецевих сплавів різних класів (вуглецеві та леговані сталі), що зазнають пошкодження в умовах багатоциклової втоми. Описано теоретичні передумови практичного застосування неруйнівного методу акустичної емісії для оцінювання параметрів, які визначають процес руйнування матеріалів під дією циклічних навантажень, та фізико-механічну модель зміцнення двофазного пластично деформованого твердого тіла. Наведено методики отримання статичних та циклічних акустоемісійних характеристик матеріалів, а також результати АЕ контролю зразків досліджуваних матеріалів у різному технічному стані за різних умов навантаження. Проаналізовано отримані кореляційні залежності між характеристиками опору втомі зразків матеріалів як після нормалізації, так і після поверхневого зміцнювання, та параметрами їх статичних і циклічних АЕ характеристик.

Ключові слова: втома, деформація, локальний об'єм, поверхнєве зміцнення, акустична емісія.

S. Bezhenov

APPLICATION OF THE AE METHOD FOR ESTIMATION OF THE SURFACE HARD FACING INFLUENCE ON THE HIGH CYCLE FATIGUE RESISTANCE CHARACTERISTICS OF THE IRON-CARBON ALLOYS

Summary. The effective non-destructive method to estimate the effect of hardening of the surface layers of different class iron-carbon alloys (carbon steels and alloyed steels), which are being damaged at the high-cycle fatigue conditions has been proposed. The theoretical background of the non-destructive acoustic emission method practical application for the estimation of the parameters, which determine the material fracture process under cyclic loading, is described. The relation between the intensity of the AE radiation and the intensity of changing the stress/strain condition of the material local volume according to the model of the high-cycle fatigue, which is based on the existence of the pole of the fatigue curves of the same class materials having different technological inheritance hypothesis has been established. The physical-mechanical model of the two-phase plastic deformed solid body hardening is presented. According to this model, the power of the AE radiation is connected with the dislocation processes intensity, which is characterized by the size of local yielding zone on the material micro-yielding stage. The experimentally obtained physical-mechanical properties, as well as the fatigue resistance characteristics of the carbon steels, having different carbon content, and alloyed steels, having various alloy elements content, both in the after-normalizing state and after hard facing via plastic deformation of the surface by the steel balls, which are oscillated at the ultrasonic frequency are presented. The methods to obtain the static and cyclic acoustic emission characteristics of the materials are given. Due to experimental data of the AE monitoring under different loading conditions of the specimens of the investigated materials having various technical conditions, the peculiarities of the static and cyclic AE characteristics are analysed. The possibilities of the using the specific parameters of the AE characteristics for the estimation of the hard facing influence on the fatigue resistance characteristics are discussed. The obtained correlation dependences between the high-cycle fatigue resistance characteristics of the material specimens, both after normalizing and after hard facing, and the parameters of their static and cyclic AE characteristics are analysed.

Key words: fatigue, deformation, local volume, hard facing, acoustic emission.

Умовні позначення:

σ – макронапруження від статичного навантаження;

σ_a – середня амплітуда напружень циклу;
 σ_{-1} – границя витривалості;
 N – число циклів до руйнування (довговічність);
 N_{AE} – сумарний (підсумковий) рахунок акустичної емісії;
 \dot{N}_{AE} – швидкість рахування акустичної емісії.

Постановка проблеми. Побудова інженерно-технічних споруд, які б гарантовано виконували свої функції протягом заданого терміну роботи, вимагає достовірних відомостей про механічну поведінку матеріалів елементів конструкцій у заданих умовах експлуатації, що дозволяє під час проектування передбачати можливості руйнування та вживати заходи до його віддалення. Для підвищення роботоздатності деталей машин та зниження їх матеріалоемності у машинобудуванні широко застосовують різні методи поверхневого пластичного зміцнення, зокрема обробку кульками, які коливаються з ультразвуковою частотою (ультразвукове зміцнення, УЗЗ). Проте через відсутність спільного підходу до вивчення механізму зміцнення виникають труднощі у зіставленні результатів, і часто дані, отримані різними дослідниками, суперечливі.

Багаторічна практика показує, що переважна більшість інженерних конструкцій працює в умовах дії циклічних навантажень, коли визначальним видом руйнування є втома. Наслідки таких руйнувань можуть бути катастрофічними. Основним фактором, що стримує розв'язання задачі підвищення роботоздатності конструкцій під дією періодичних навантажень, є недосконалість сучасних методів оцінювання технічного стану конструкцій та їх залишкового ресурсу, особливо при використанні неруйнуючих методів контролю [1–3]. Такий стан проблеми зумовлений складністю визначення реального напружено-деформованого стану (НДС) локальних об'ємів матеріалу, що є відповідальними за його руйнування.

Суттєвий внесок у розв'язання окресленої проблеми може дати розвиток методів, які ґрунтуються на використанні сучасних досягнень механіки руйнування та нових фізичних досліджень процесів деформування та руйнування конструкційних металевих матеріалів. Одним із таких методів, що засвідчив свої чималі потенційні можливості останніми десятиріччями, є метод акустичної емісії (АЕ), який є чутливим до внутрішньої локальної перебудови структури твердого тіла [4] і, по суті, віддзеркалює інтенсивність деформаційних процесів, що відбуваються у матеріалі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема передбачення кількісних характеристик опору втомі матеріалів у реальних конструкціях має різні аспекти, що відображається в наявності різних гіпотез втоми [5]. Один із напрямків досліджень поєднує гіпотези [6, 7], які ґрунтуються на неоднорідності структури полікристалічного матеріалу.

Теоретичні дослідження механізмів деформаційного зміцнення металу ґрунтуються на аналізі залежності напруження σ від ступеня деформації ε під час випробувань зразків на розтяг та стиск, коли параметр ε легко вимірювати [8–12]. Проте після поверхневого пластичного деформування (ППД) металу це зробити важко [13, 14], тому у переважній більшості праць, присвячених поверхневому деформаційному зміцненню металів, увагу зосереджено на впливі залишкових напружень на міцність матеріалу. Системного зв'язку між зміцненням від деформації та витривалістю матеріалів не виявлено.

При застосуванні методу АЕ, як показано різними дослідниками раніше [15–18], для гетерогенних матеріалів АЕ адекватно відображає особливості деформаційних процесів у матеріалі протягом усього процесу його деградації до самого руйнування. Проте актуальним є встановлення зв'язку між ступенем деформації конструкційного матеріалу та параметрами АЕ в заданих умовах навантаження.

Мета даної роботи – розробити новий ефективний спосіб оцінювання ефекту зміцнення поверхневих шарів залізвуглецевих сплавів, що зазнають пошкоджень в умовах багаточислової втоми (БЦВ), із застосуванням неруйнівного методу АЕ.

Теоретичні передумови розв’язання задачі. Практичне застосування методу АЕ для оцінювання параметрів, які визначають процес руйнування матеріалів під дією циклічних навантажень, потребує адекватного уявлення про процес втоми конструкційного металевих матеріалу, що має відобразитися у відповідній моделі його механічної поведінки. В роботі використано новий підхід до дослідження процесу БЦВ, який заснований на гіпотезі [19] про існування полюса кривих БЦВ матеріалів одного класу з різною технологічною спадковістю (рис. 1).

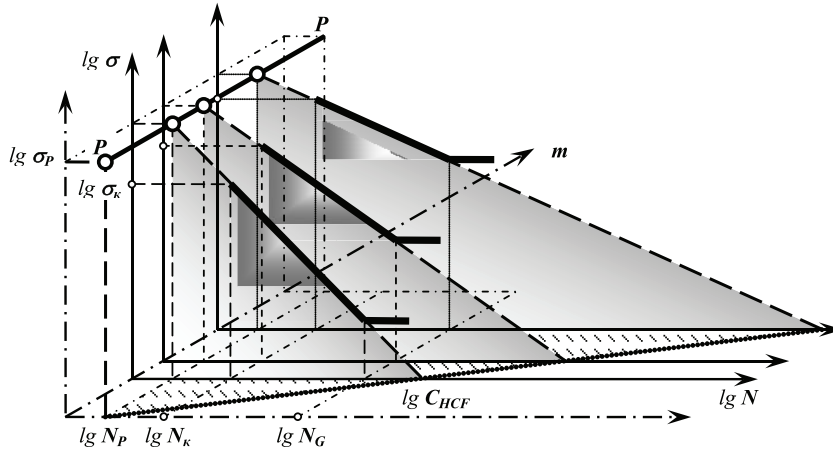


Рисунок 1. Схема кривих БЦВ у відповідності до прийнятої гіпотези

Figure 1. The scheme of the HCF curves according to the applied hypothesis

Згідно з прийнятою гіпотезою двопараметричне рівняння кривої втоми (1) [20] трансформується у рівняння (2), в якому змінними вважаються три величини: σ_a , N , а також m – показник нахилу кривої втоми, величина якого зумовлена технічним станом матеріалу виробу

$$N \cdot \sigma_a^m = C, \tag{1}$$

$$N \cdot \sigma_a^m = N_P \cdot \sigma_P^m = C_{HCF}, \tag{2}$$

де N_P и σ_P – координати полюса кривих БЦВ, які, як встановлено попередніми дослідженнями [21], є інваріантами для матеріалу певного класу; C_{HCF} – константа опору БЦВ, значення якої залежить від технічного стану матеріалу.

За такого підходу основні характеристики опору БЦВ: довговічність N та границя витривалості, можуть бути отримані з простих співвідношень (3) та (4) відповідно

$$N = N_P \cdot (\sigma_P / \sigma_a)^m, \tag{3}$$

$$\sigma_{-1} = \sigma_P \cdot (N_P / N_G)^{1/m}. \tag{4}$$

Тут значення N_G (абсциси точки зламу кривої БЦВ, або бази випробувань для деяких матеріалів) може бути прийнятим відповідно до рекомендацій стандартів [20, 22].

Отже, для опису поведінки конкретного виробу в умовах БЦВ необхідно і достатньо визначити величину комплексного параметра m , фізична суть якого впливає із запропонованої моделі БЦВ [23], в якій застосовано багаторівневий підхід [24] до дослідження процесів деформації та руйнування гетерогенного твердого тіла. Основним об’єктом моделі є локальний об’єм мезорівня структури матеріалу, критичне пошкодження якого призводить до руйнування макрооб’єму. Згідно з запропонованою моделлю параметр m визначає міру стійкості локального об’єму до зовнішнього навантаження в умовах БЦВ, яка характеризує граничний стан матеріалу, що забезпечується внаслідок спільної дії силових та часових факторів,

$$m = \left(\frac{\lg N}{\lg N_p} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_{pl}} - 1 \right) \cdot \frac{\alpha'_\sigma \cdot \sigma_a}{\sigma_d}, \quad (5)$$

де ε_a та ε_{pl} – відповідно повна та пластична деформація локального об'єму за цикл; σ_d – напруження руху дислокацій; α'_σ – локальний коефіцієнт концентрації напружень НДС локального об'єму.

З позицій запропонованої моделі інтенсивність АЕ випромінювання пов'язується з інтенсивністю змінювання НДС локального об'єму, що не суперечить відомим АЕ моделям [25 – 27].

Згідно із запропонованою в роботі [28] моделлю двофазного пластично деформованого твердого тіла, ефект зміцнення залізвуглецевих сплавів оцінюють за розміром «вільної зони» l , який, у свою чергу, визначається відстанню між твердими частинками l_0 та товщиною лісу дислокацій t_d , загальмованих навколо цих частинок (рис. 2).

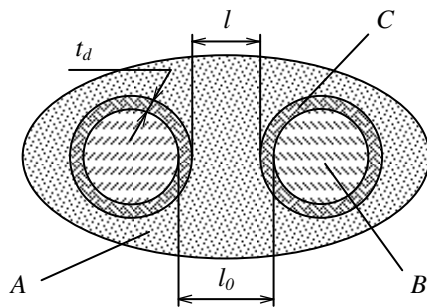


Рисунок 2. Модель двофазного твердого тіла після зміцнення [28]: *A* – м'яка фаза; *B* – тверда фаза; *C* – ліс загальмованих дислокацій

Figure 2. Model of the two-phase solid body after hard facing [28]: *A* – soft phase; *B* – hard phase; *C* – area of the stopped dislocations

Для визначення границі витривалості зміцнених двофазних залізвуглецевих сплавів запропоновано [28] застосувати формулу

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1}^{(0)} + m \cdot G \cdot b/l, \quad (6)$$

де G – модуль зсуву; b – вектор Бюргерса; $\sigma_{-1}^{(0)}$ – границя витривалості матриці сплаву (може бути прийнята як для армко-заліза).

Отже, механізм зміцнення двофазних металевих сплавів пов'язано з механізмом гальмування дислокацій частинками твердої фази. Навколо них скупчуються дислокації, що гальмують новогенеровані дислокації, які не зможуть проходити крізь тверді частинки, а будуть протискатися у «вільні» зони між ними. Це має супроводжуватися АЕ випромінюванням, потужність якого є пропорційною до розміру «вільної» зони l . Таке припущення зроблено на основі результатів попередніх досліджень [29], в яких отримано квадратичну залежність між сумарним рахунком АЕ та розміром локальної області пластичної деформації перед вершиною тріщини.

Матеріали та методики експериментальних досліджень. Досліджували циліндричні спеціальні зразки [30] вуглецевих та малолегованих сталей, хімічний склад та механічні властивості яких наведено у таблиці 1. Досліджували зразки матеріалів як у стані постачання (нормалізація), так і після УЗЗ: діаметр сталеві кульки 1,5...1,6 mm, загальна вага кульок 300 g, тривалість зміцнення 10 ± 1 s. Товщина зміцненого шару була в межах 180...200 μm .

Таблиця 1

Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних сталей після нормалізації

Сталь	Хімічний склад (%):						Механічні властивості	
	C	Mo	Si	Cr	Mn	Ni	σ_s , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
20	0,21	–	0,11	–	0,37	–	450	275

45	0,46	–	0,23	–	0,54	–	665	370
У7А	0,69	–	0,25	–	0,24	–	730	430
40Х	0,38	–	0,25	1,0	0,55	–	980	780
40ХН2МА	0,39	0,24	0,17	0,90	0,50	1,50	1060	920
30ХГСА	0,32	–	0,96	1,05	0,85	–	1080	830

Зразки навантажували як статично, так і циклічно. Статичні випробування здійснювали зосередженим навантаженням зразків (триточковий згин), яке змінювали ступінчасто від нуля до деякого значення, що перебільшувало умовну границю плинності на 20 – 30%, з витримкою на кожному рівні протягом 20 с. Крок змінювання статичних напружень був прийнятий 25-50 МПа.

Циклічні випробування здійснювали консольним згином зразків з частотою 354±4 Нз за симетричного циклу на електродинамічному вібростенді. Середню амплітуду циклу напружень σ_a оцінювали розрахунковим методом за амплітудою коливань вільного кінця зразка на підставі результатів тензометрування. Циклічне навантаження змінювали ступінчасто від нуля до деякого значення, що перебільшувало границю витривалості на 20 – 30%, з витримкою на кожному рівні протягом 10⁴ циклів. Крок змінювання циклічних напружень був прийнятий 25 – 50 МПа. Останній етап циклічного навантаження завершувався доведенням зразка до руйнування при незмінній амплітуді напружень циклу. Моментом руйнування вважали початок збільшення періоду коливань більш ніж на 5%.

У процесі ступінчастого змінювання як статичних, так і циклічних навантажень зразків реєстрували сигнали АЕ в частотній смузі від 0,2 до 2,0 МГц. Застосовували акустичний перетворювач з практично рівномірною амплітудно-частотною характеристикою в діапазоні від 0,1 до 0,8 МГц. Коефіцієнт підсилення АЕ апаратури становив 74 dB. За інформативні параметри сигналів АЕ, що характеризують динаміку структурних перебудов конструкційного матеріалу, були прийняті: для статичних випробувань – сумарний (підсумковий) рахунок акустичної емісії, для циклічних випробувань – швидкість рахування акустичної емісії, оскільки за цих умов змінювання НДС локальних об’ємів матеріалу відбувається дуже динамічно [31].

Результати експериментальних досліджень та їх обговорення. Суттєвого системного впливу УЗЗ на механічні властивості досліджуваних матеріалів, які наведено у таблиці 1, не виявлено. Для виробів, що експлуатуються в умовах повторних періодичних навантажень, ефект зміцнення пов’язаний як із підвищенням умісту вуглецю та легуючих елементів і відповідною зміною фазового складу сталей, так і з їх ППД, чітко проявляється у збільшенні границі витривалості σ_{-1} і параметра m . Це ілюструється даними таблиці 2, де наведено характеристики опору БЦВ зразків досліджуваних залізобуглецевих сплавів після нормалізації та після УЗЗ.

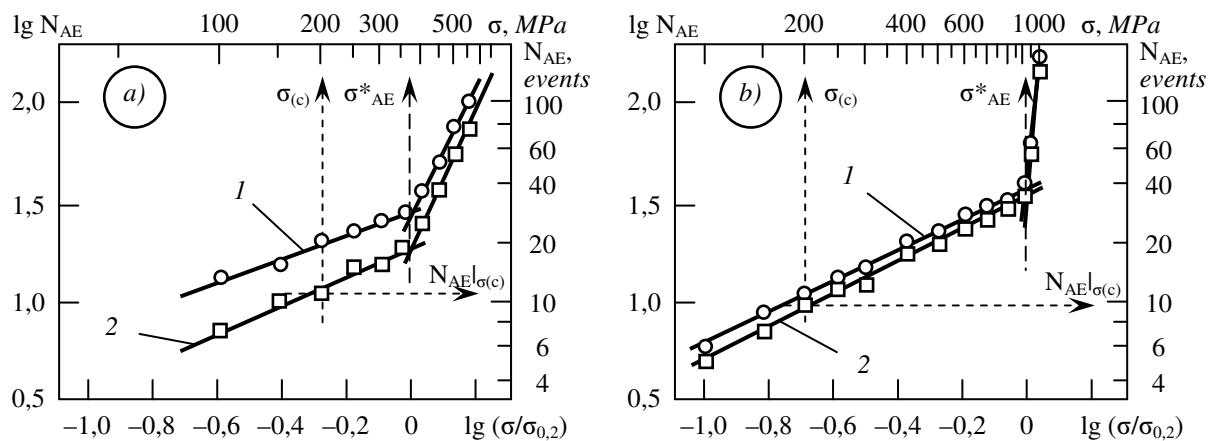
Таблиця 2

Характеристики опору втомі зразків сталей після нормалізації (I) та після поверхневого зміцнення (II)

Матеріал	Параметр m		σ_{-1} , МПа	
	(I)	(II)	(I)	(II)

Сталь 20	6,522	7,193	230	265
Сталь 45	7,594	9,132	285	355
Сталь У7А	7,905	9,495	300	370
Сталь 40Х	7,332	8,196	360	405
Сталь 40ХН2МА	7,516	8,402	370	415
Сталь 30ХГСА	7,801	10,79	385	515

На рис. 3а, б показано типовий вигляд АЕ характеристик залізовуглецевих сплавів при ступінчастому змінюванні статичних напружень (статичні АЕ характеристики), на рис. 3с, д – типовий вигляд АЕ характеристик досліджуваних матеріалів при ступінчастому змінюванні циклічних напружень (циклічні АЕ характеристики). У подвійних логарифмічних координатах залежності сумарного рахунку АЕ (N_{AE}) від відносних напружень ($\sigma/\sigma_{0,2}$) та швидкості рахування АЕ (\dot{N}_{AE}) від відносних циклічних напружень (σ_d/σ_p) мають по дві явно виражені ділянки, на кожній з яких експериментальні точки добре апроксимуються прямими лініями. Зміна інтенсивності зростання сумарного рахунку АЕ (точка зламу статичної АЕ характеристики) характеризується напруженням σ^*_{AE} . Зміна інтенсивності зростання швидкості рахування АЕ (точка зламу циклічної АЕ характеристики) характеризується напруженням σ^{**}_{AE} . Раніше проведеними дослідженнями було показано [32], що стрибкоподібне змінювання показника степені залежно $\dot{N}_{AE} \sim (\sigma_d/\sigma_p)^n$ пов'язане зі зміною механізму пошкоджуваності матеріалу на межі переходу від стадії мікроплинності до стадії деформаційного зміцнення.



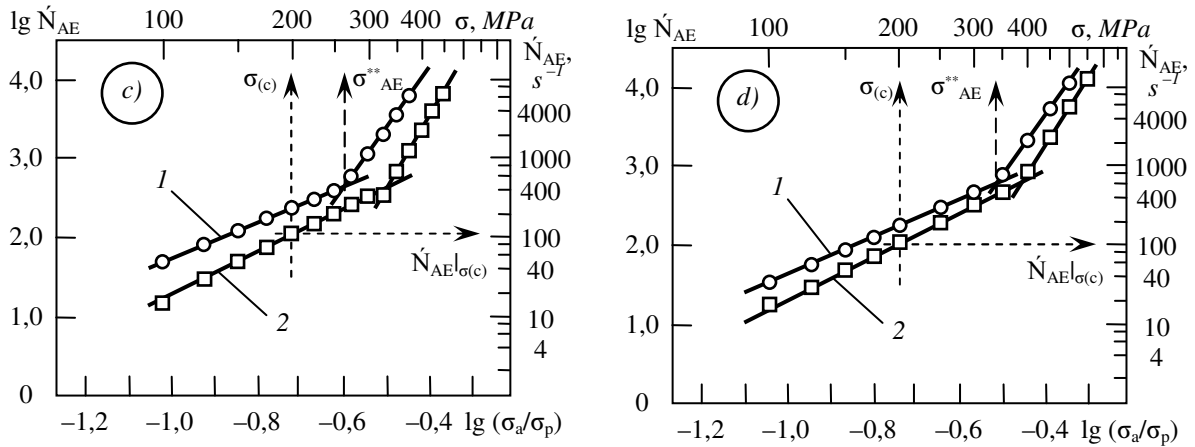


Рисунок 3. АЕ характеристики сталевих зразків:
 а), б) статичні; в), д) циклічні; а), в) сталь 45; б), д) сталь 40ХН2МА;
 1 – після нормалізації; 2 – після поверхневого зміцнення

Figure 3. The AE characteristics of the steel specimens:
 а), b) static; в), d) cyclic; а), в) steel 45; б), д) steel 40ХН2МА;
 1 – after normalizing; 2 – after surface hard facing

Слід зазначити, що під час тестування методом АЕ різних матеріалів у різному технічному стані при однакових значеннях циклічних напружень вищі значення сумарного рахунку АЕ та швидкості рахування АЕ реєстрували у тих виробів, які мали менші значення характеристик опору втомі. Це дає можливість для порівнювального аналізу результатів експериментів на зразках з різних матеріалів та різною технологічною спадковістю використовувати значення сумарного рахунку АЕ при незмінному фіксованому значенні напружень $N_{AE|_{\sigma(c)}}$ та швидкості рахування АЕ при незмінному фіксованому значенні середньої амплітуди напружень циклу $\dot{N}_{AE|_{\sigma(c)}}$. Величину напружень було встановлено на рівні $\sigma_{(c)} = 200$ МПа, що приблизно становить 20% від напруження σ_p і відповідає стадії мікроплинності матеріалу. Параметри АЕ характеристик при статичному та циклічному навантажуванні зразків досліджуваних сталей після нормалізації та після поверхневого зміцнення наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Параметри АЕ характеристик зразків сталей після нормалізації (I) та після поверхневого зміцнення (II)

Сталь	Статичне навантаження				Циклічне навантаження			
	σ^*_{AE} , МПа		$N_{AE _{\sigma = const}}$, ev.		σ^{**}_{AE} , МПа		$\dot{N}_{AE _{\sigma = const}}$, s ⁻¹	
	(I)	(II)	(I)	(II)	(I)	(II)	(I)	(II)
20	276	278	55	30	213	245	400	290
45	378	371	20	11	265	331	235	110
У7А	437	434	15	10	281	348	200	90
40Х	776	777	14	12	330	375	200	125
40ХН2МА	921	922	11	10	340	384	180	110
30ХГСА	829	828	10	8	354	484	155	30

Порівняння даних таблиць 1 та 3 показує, що для всіх досліджуваних матеріалів незалежно від їх технологічного стану характерне напруження σ^*_{AE} з достатньою точністю відповідає статистичній умовній границі плинності матеріалу.

Статичні АЕ характеристики виявилися досить інформативними для оцінювання

ефекту зміцнення залізобуглецевих сплавів за розміром локальної області пластичної деформації. Статистичний аналіз залежностей розміру «вільної» зони l від величини сумарного рахунку АЕ при незмінному фіксованому значенні напружень $N_{AE|\sigma(c)}$ виявив досить високу кореляцію між названими параметрами як для вуглецевих сталей ($r = 0,9888$), так і для легованих сталей ($r = 0,9726$), що ілюструється на рис. 4а степеневими залежностями

$$l = a \cdot (N_{AE|\sigma=const})^b, \quad (7)$$

де значення коефіцієнтів a та b для вуглецевих сталей становлять 0,17 та 0,785, а для легованих – 0,25 та 0,465 відповідно. Цей факт підтверджує гіпотезу про зв'язок між сумарним рахунком АЕ та інтенсивністю дислокаційних процесів, яка зумовлюється розміром зони локальної плинності на стадії мікропластичності матеріалу.

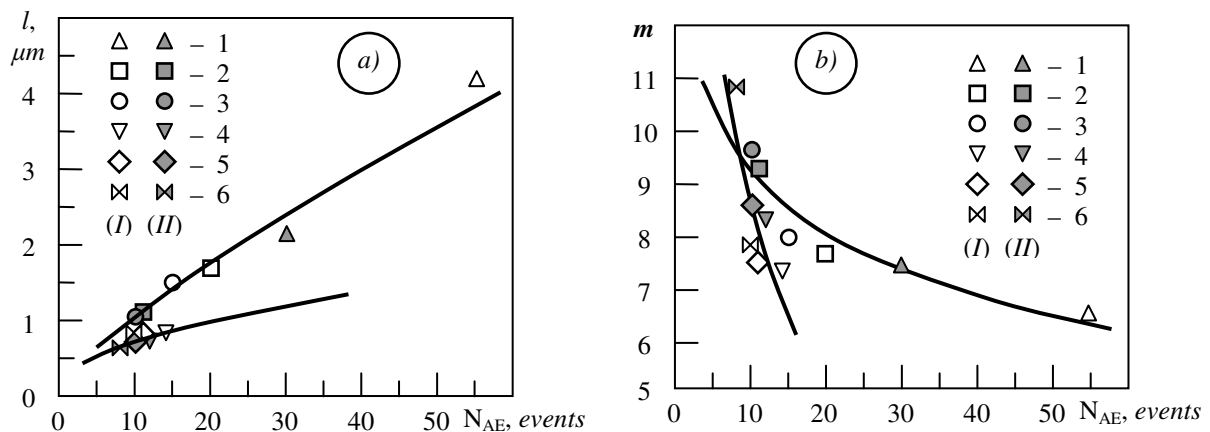


Рисунок 4. Залежності ширини «вільної» зони l (рис. а) та коефіцієнта m (рис. б) від сумарного рахунку АЕ при фіксованому значенні напружень $N_{AE|\sigma(c)}$ для сталевих зразків після нормалізації (I) та поверхневого зміцнення (II): 1 – сталь 20; 2 – сталь 45; 3 – сталь У7А; 4 – сталь 40Х; 5 – сталь 40ХН2МА; 6 – сталь 30ХГСА

Figure 4. Dependences of the “free” zone width l (fig. a) and the m factor (fig. b) on the total emission under the fixed value of stresses $N_{AE|\sigma(c)}$ for the specimens after normalizing (I) and after surface hard facing (II): 1, 2, 3 – carbon steels; 4, 5, 6 – alloyed steels

Проте прямої залежності між параметрами статичних АЕ характеристиками та характеристиками опору втомі не встановлено. На рис. 4б наведено поле експериментальних даних, що відображають емпіричний зв'язок між нахилом кривої втоми (параметр m) та сумарним рахунком АЕ при незмінному фіксованому значенні напружень $N_{AE|\sigma(c)}$. Статистичний аналіз виявив досить низьку кореляцію між названими параметрами, особливо для легованих сталей (коефіцієнти кореляції: $r = 0,9544$ – вуглецеві, $r = 0,8188$ – леговані). Оцінка границі витривалості досліджуваних матеріалів у різному технічному стані за формулою (6) з використанням кореляційних залежностей, представлених на рис. 4, дає похибку, що сягає 20%. Таким чином, не зважаючи на можливість оцінювати ефект зміцнювання матеріалу після ППД за статичними АЕ характеристиками, прогнозування механічної поведінки залізобуглецевих сплавів в умовах БЦВ за результатами їх тестування методом АЕ в умовах статичного навантаження не дає надійних результатів. Через доволі низьку точність визначення характеристик опору БЦВ за статичними АЕ характеристиками можливе лише якісне їх оцінювання.

Більш точне і надійне оцінювання ефекту зміцнення поверхневих шарів залізобуглецевих сплавів, що зазнають пошкодження в умовах БЦВ, можливе при застосуванні методу АЕ в умовах повторного періодичного навантаження об'єктів

дослідження, коли згідно зі співвідношенням (5) змінювання НДС локального об'єму забезпечується внаслідок спільної дії силових та часових факторів. Аналіз отриманих результатів показує, що абсциса точки зламу циклічної АЕ характеристики пов'язана зі значенням границі витривалості матеріалу співвідношенням

$$\sigma_{-1} = \gamma \cdot \sigma_{AE}^{**}, \quad (8)$$

де коефіцієнт пропорційності γ для різних матеріалів у різному технічному стані згідно з даними таблиць 2 та 3 набуває значення від 1,063 до 1,091.

Кореляційний аналіз виявив, що залежність між значеннями швидкості рахування АЕ при фіксованому рівні амплітуди напружень циклу ($\sigma_a \approx 0,2 \sigma_p$) та значеннями параметра m для відповідних матеріалів у відповідному технічному стані досить добре апроксимується функцією

$$m = -A \cdot \ln \dot{N}_{AE} + B, \quad (9)$$

яку графічно представлено для вуглецевих (коефіцієнт кореляції $r = 0,9915$) та легованих (коефіцієнт кореляції $r = 0,9937$) сталей на рис. 5.

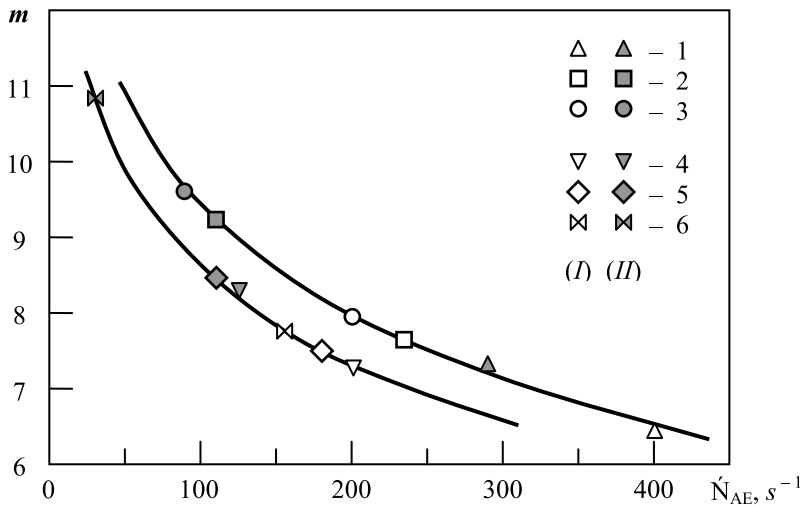


Рисунок 5. Залежність коефіцієнта m від швидкості рахування АЕ при фіксованому значенні напружень $\dot{N}_{AE|\sigma(c)}$ для сталевих зразків після нормалізації (I) та поверхневого зміцнення (II): 1 – сталь 20; 2 – сталь 45; 3 – сталь У7А; 4 – сталь 40Х; 5 – сталь 40ХН2МА; 6 – сталь 30ХГСА

Figure 5. Dependences of the m factor on the acoustic emission count rate under the fixed value of stresses $\dot{N}_{AE|\sigma(c)}$ for the steel specimens after normalizing (I) and after surface hard facing (II): 1, 2, 3 – carbon steels; 4, 5, 6 – alloyed steels

Отримані залежності (9) можуть бути використаними для оцінювання впливу поверхневого зміцнення на характеристики опору втомі матеріалу певного класу, зокрема границі його витривалості, без проведення тривалих й трудомістких випробувань. Оцінювання можна здійснити на підставі формул (3) та (9) за результатами АЕ контролю досліджуваних виробів при їх ступінчастому циклічному навантаженні на стадії мікроплинності. Підставивши (9) у (3), маємо

$$\sigma_{-1} = \sigma_P \cdot (N_P / N_G)^{1/(-A' \cdot \lg \dot{N}_{AE} + B)}, \quad (10)$$

де $A' = 2,303 \cdot A$. Значення емпіричних коефіцієнтів A та B , які залежать від фізичних властивостей матеріалу та умов АЕ контролю, за результатами проведеного кореляційного аналізу становлять відповідно: для вуглецевих сталей – 2,10 та 19,10, а для легованих сталей – 1,83 та 17,04.

Розраховані за формулою (10) значення границі витривалості досліджуваних матеріалів у різних технічних станах відрізняються від експериментальних даних, зазначених у таблиці 2, не більше, ніж на 2%.

Висновки. Встановлено, що АЕ характеристики, отримані в результаті статичного ступінчастого навантаження зразків залізобуглецевих сплавів, несуть інформацію про ширину «вільної» зони між частинками твердої фази, в яку протискаються рухомі дислокації при деформуванні локального об'єму. Це дає

можливість якісно оцінити ефект зміцнення матеріалу при виборі режиму поверхневої обробки матеріалу. Прямого зв'язку між параметрами статичних АЕ характеристик і характеристиками опору БЦВ не встановлено. Інформацію про механічну поведінку залізобуглецевих сплавів в умовах БЦВ несуть АЕ характеристики, отримані в результаті ступінчастого навантаження зразків циклічними напруженнями, тривалість дії яких на кожному рівні навантаження не перебільшує тривалості інкубаційного періоду втомного руйнування при критичних напруженнях. Напруження, що відповідає точці зламу циклічної АЕ характеристики певного матеріалу у певному технічному стані, є пропорційним його границі витривалості. Оцінювати характеристики опору БЦВ залізобуглецевих сплавів можливо також за величиною швидкості рахування АЕ, яку фіксують при певному значенні амплітуди напружень циклу на стадії мікроплинності матеріалу.

Conclusions. There has been experimentally found that the AE characteristics, obtained at the static step loading of the iron-carbon alloys specimens, possess the information about the width of the “free” zone between the hard phase particles, into which the moveable dislocations are pushed at the deformation of the local volume. It makes possible to estimate qualitatively the effect of material hardening, when choosing the regime of hard facing. The direct inter-dependence of the static AE characteristic parameters and the high-cycle fatigue resistance characteristics has not been obtained. The information on the mechanical behaviour of the iron-carbon alloys under high-cycle fatigue conditions can be found from the AE characteristics, obtained at the step loading of the specimens with each stress level duration being less than the incubate period of the fatigue failure under the critical stresses. The stress that corresponds to the break point of the cyclic AE characteristic of the certain material in the certain technical condition is proportional to its endurance limit. It is also possible to estimate the high-cycle fatigue resistance characteristics of the iron-carbon alloys by means of the total AE rate value being fixed at the certain cycle stress amplitude on the material micro-yielding stage.

Список використаної літератури

1. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов [Текст] / В.Ф. Терентьев. – М.: Наука, 2002. – 248 с.
2. Прочность материалов и конструкций: Т.2. Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия [Текст] / В.Т. Трошенко, Г.В. Цыбанев, Б.А. Грязнов, Ю.С. Налимов. – К.: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2009. – 664 с.
3. Мак-Ивили, А.Дж. Анализ аварийных разрушений [Текст] / А.Дж. Мак-Ивили. – М.: Техносфера, 2010. – 416 с.
4. Грешников, В.А. Акустическая эмиссия [Текст] / В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. – М.: Стандарты, 1976. – 202 с.
5. Коцаньда, С. Усталостное растрескивание металлов [Текст] / С. Коцаньда; пер. с польск. под ред. С.Я. Яремы. – М.: Металлургия, 1990. – 622 с.
6. Вагапов, Р.Д. Вероятностно-детерминистская механика усталости [Текст] / Р.Д. Вагапов. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
7. Котречко, С.А. Статистическая модель хрупкого разрушения феррито-перлитных сталей [Текст] / С.А. Котречко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2001. – Т. 23, № 1. – С. 103 – 122.
8. Mecking, H. Kinetics of flow and strain-hardening [Text] / H. Mecking, U.F. Kocks // Acta Metallurgica. – 1981. – Vol. 29. – P. 1865 – 1875.
9. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов [Текст] / В.В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1986. – 229 с.
10. Конева, Р.А. Физическая природа стадийности пластической деформации [Текст] / Р.А. Конева, Э.В. Козлов // Изв. вузов. Физика. – 1990. – № 2. – С. 89 – 106.
11. Малыгин, Г.А. Анализ деформационного упрочнения кристаллов при больших пластических деформациях [Текст] / Г.А. Малыгин // Физика твердого тела. – 2001. – 43, вып. 1. – С. 1832 – 1838.
12. Мышляев, М.М. О механизмах деформации субмикроструктурного титана [Текст] / М.М. Мышляев, С.Ю. Миронов // Физика твердого тела. – 2002. – 44, вып. 4. – С. 711 – 716.
13. Мэтсон, Р.Л. Усталость, остаточные напряжения и упрочнение поверхностного слоя наклепом [Текст] / Р.Л. Мэтсон // Усталость металлов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – С. 333 – 351.

14. Петухов, А.Н. Особенности формирования свойств поверхностного слоя основных деталей ГТД при применении традиционных и современных методов упрочнения [Текст] / А.Н. Петухов // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 20 – 24.
15. Авербух, И.И. Зависимость акустической эмиссии от деформации в разных материалах [Текст] / И.И. Авербух, В.Е. Вайнберг // Дефектоскопия. – 1971. – № 4. – С. 25 – 32.
16. Иванов, В.И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений [Текст] / В.И. Иванов, В.М. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
17. Wadley, H.N.G. A study of deformation and fracture processes in low-alloy steel by acoustic emission transient analysis [Text] / H.N.G. Wadley, C.B. Scruby // Acta met. – 1981. – Vol. 27, No 4. – P. 113 – 125.
18. Скальський, В.Р. Оцінка об'ємної пошкоженості матеріалів методом акустичної емісії [Текст] / В.Р. Скальський, О.Є. Андрейків. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. – 330 с.
19. Беженев, С.А. О некоторых методологических проблемах теории усталостного разрушения конструкционных материалов [Текст] / С.А. Беженев // Надійність і довговічність машин і споруд. – 2008. – Вип. 30. – С. 6 – 14.
20. ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на усталость [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 32 с.
21. Беженев, С.А. Методические аспекты проблемы оценки характеристик сопротивления усталости металлических материалов [Текст] / С.А. Беженев // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 1. – С. 27 – 31.
22. ГОСТ 25.507-85 Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 32с.
23. Беженев, С.А. Модель механического поведения металлических материалов в условиях многоциклового усталости [Текст] / С.А. Беженев // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. Праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2012. – Вип. 20. – С. 66 – 73.
24. Панин, В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел [Текст] / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 226 с.
25. Dunegan, H.L. Fracture Analysis by Use of Acoustic Emission [Text] / H.L. Dunegan, D.O. Harris, and C.A. Tatro // Eng. Fract. Mech. – 1968. – Vol. 1, No 1. – P. 105 – 122.
26. Liptai, R.G. Acoustic emission technique in materials research [Text] / R.G. Liptai, D.O. Harris, R.B. Engle, and C.A. Tatro // Int. J. Nondestr. Test. – 1971. – No 3. – P. 215 – 275.
27. Tetelman, A.S. Acoustic emission testing and microcracking processes [Text] / A.S. Tetelman, R. Chow // Acoustic emission, ASTM STP 505. – Baltimore, 1972. – P. 30 – 40.
28. Беженев, С.О. Механізм поверхневого зміцнення конструкційних вуглецевих сталей [Текст] / С.О. Беженев, Г.А. Бялік, О.І. Беженев // ФХММ. – 2009. – № 1. – С. 81 – 87.
29. Palmer, I.G. Acoustic emission measurement on reactor pressure vessel steel [Text] / I.G. Palmer // Mater. Sci. and Eng. – 1973. – Vol. 11, No 4. – P. 227 – 236.
30. Беженев, С.О. Методика дослідження поверхневого шару конструкційних матеріалів методом акустичної емісії [Текст] / С.О. Беженев // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні. – 1999. – № 1. – С. 16 – 19.
31. Андрейків, О.Є. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування: монографія [Текст] / О.Є. Андрейків, В.Р. Скальський, Г.Т. Сулим. – Львів.: СПОЛОМ, 2007. – 480 с.
32. Беженев, С.А. Применение АЭ контроля для оценки характеристик сопротивления многоциклового усталости конструкционных материалов в условиях неоднородного напряженного состояния [Текст] / С.А. Беженев // Втома та термовтома матеріалів і елементів конструкцій: Тези допов. Міжнародної науково-техн. конф.; за ред. В.О. Стрижало. – К.: Ін-т проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України, 2013. – С. 12 – 14.

Отримано 19.08.2013