

through modification of the working surface material with TiB_2 inclusions. Promising directions for further research in the field of tribomaterials science have been outlined - the use of neural networks to predict the wear of machine parts under given loading conditions and material properties in conjunction with improved materials.

Keywords: *Wear, abrasive, reliability, superhard inclusion, hardness ratio.*

Стаття надійшла 10.12.2025р.

УДК 620.17:539.4

doi.org/10.31498/2522-9990302025347058

Беженів С.О., Капустян О.Є.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛИШКОВИХ ПОВЕРХНЕВИХ МАКРОНАПРУЖЕНЬ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВУ НІКЕЛЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Стан поверхневого шару матеріалу, який визначається різними параметрами, в тому числі і залишковими поверхневими макронапруженнями є найважливішим фактором, що впливає на властивості міцності. Проте врахування дії просторових внутрішніх сил пружності є досі дуже проблематичним. Робота присвячена дослідженню зв'язку між різними параметрами залишкових поверхневих макронапружень та механічними характеристиками зразків сплаву нікелю з різною технологічною спадковістю із застосуванням неруйнівного методу акустичної емісії. Досліджували циліндричні зразки сплаву нікелю ХН77ТЮР-ВД з різною технологічною спадковістю: після точіння, шліфування, електрохімічного полірування, а також після поверхневого пластичного зміцнення сталевими кульками, які коливалися з ультразвуковою частотою. Величину осевих залишкових поверхневих макронапружень визначали за кривою деформації спеціальних зразків при поширеному травленні матеріалу. Особливості випромінювання акустичної емісії в зразках досліджували при ступінчастому навантаженні зразків за схемою триточкового вигину до рівня напружень $\sigma_{0.2}$. Механічні характеристики статичної міцності визначалися в результаті випробувань на одновісне розтягування зразків. Втомні випробування проводилися в умовах дії циклічних згинальних напружень, що виникають в результаті введення зразка в резонансні поперечні коливання на електродинамічному вібростенді. Визначалася обмежена границя витривалості зразків на базі 10^7 циклів. Наведено результати аналізу впливу різних параметрів залишкових поверхневих макронапружень на механічні характеристики сплаву нікелю з використанням методу акустичної емісії. Встановлено визначальні параметри залишкових поверхневих макронапружень, що контролюють процес багатоциклової втоми. Запропоновано спосіб їх визначення неруйнівним експрес методом акустичної емісії.

Ключові слова: Акустична емісія, багатоциклова втома, залишкові напруження, статистичний аналіз, технологічна спадковість.

Постановка проблеми. Найважливішим фактором, що впливає на властивості міцності матеріалу, є стан його поверхневого шару, який визначається різними параметрами, в тому числі і залишковими поверхневими макронапруженнями (ЗПМ). Проте досі дуже проблематичним залишається врахування дії просторових внутрішніх сил пружності, що є наслідком попередніх термічних і механічних ефектів. З'ясування природи зміцнення

матеріалу є настільки важким для вирішення завданням, що поки неможливо запропонувати конкретну і переконливу кількісну теорію цього питання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки опубліковано велику кількість робіт, присвячених окремим питанням зміцнення деталей поверхневою пластичною деформацією [1 – 4], але суттєвого просування до створення закінченої теорії зміцнення поки що не відбулося. Однією з причин такої ситуації є недостатня увага, що приділяється питанням вивчення впливу окремих зміцнювальних факторів на кінетику руйнування матеріалу, а також аналізу параметрів, які адекватно характеризують напружений стан поверхні. Більшість останніх досліджень у галузі зміцнення присвячено вирішенню часткових питань, що стосуються вивчення залежностей характеристик міцності матеріалу від видів і режимів поверхневої пластичної обробки матеріалів [5 – 8]. Досліджень, які розкривають механізм впливу параметрів зміцнення на механічні властивості матеріалів, явно замало.

Принципово нові можливості дослідження механізмів зміцнення з'являються при використанні акустичної емісії (АЕ) в механіці руйнування, оскільки в основу методу АЕ покладено дослідження пружних хвиль у твердому тілі, що виникають внаслідок локальної внутрішньої динамічної перебудови його структури [9, 10]. На відміну від тривалого та трудомісткого процесу визначення ЗПМ методом поширюваного стравлювання метод АЕ може виявитися дуже ефективним при вирішенні таких важливих питань, як експериментальне визначення напружено-деформованого стану мікрооб'єктів, що визначає властивості міцності матеріалу [11, 12].

Мета досліджень. Метою даної роботи є дослідити зв'язок між різними параметрами залишкових поверхневих макронапружень та механічними характеристиками зразків сплаву нікелю з різною технологічною спадковістю із застосуванням неруйнівного методу АЕ.

Основний матеріал дослідження. Матеріали та методики експериментальних досліджень. Досліджували циліндричні зразки сплаву нікелю ХН77ТЮР-ВД ($\text{Ni} - 21\text{Cr} - 2,6\text{Ti} - 0,6\text{Al} - 0,46\text{Fe} - 0,37\text{Cu} - 0,31\text{Si} - 0,29\text{Mn}$) з різною технологічною спадковістю, що мали різні епюри ЗПМ. Досліджували зразки після точіння (Т), шліфування (Ш), електрохімічного полірування (ЕХП), а також після поверхневого пластичного зміцнення сталевими кульками, які коливалися з ультразвуковою частотою (ультразвукове зміцнення, УЗЗ). Величину осьових ЗПМ визначали за кривою деформації спеціальних зразків при поширеному травленні матеріалу за методикою Давиденко [13]. Особливості випромінювання акустичної емісії в зразках досліджували за допомогою приладів АФ-15 і АЕ-100 при ступінчастому навантаженні зразків за схемою триточкового вигину до рівня напружень $\sigma_{0,2}$ за методикою [14]. Фіксували сумарний рахунок сигналів АЕ ($N_{\text{АЕ}}$), їх загальну енергію ($E_{\text{АЕ}}$) та максимальне середньоквадратичне значення амплітуди ($\bar{A}_{\text{max}}$). Застосовували перетворювач з практично рівномірною амплітудно-частотною характеристикою в діапазоні від 0.1 до 0.8 МГц. Дослідження виявили, що змінювання інтенсивності сигналів АЕ від початку навантаження мають експоненціальний характер, тому інтервал реєстрації сигналів АЕ без суттєвої втрати точності складав 10 с. Механічні характеристики статичної міцності визначалися в результаті випробувань на одновісне розтягування зразків з діаметром робочої частини 6 мм і об'ємом 2.26 см^3 на випробувальній машині УМЕ-10ТМ при швидкості переміщення рухомої частини 0.167 мм/с. Втомні випробування проводилися в умовах дії циклічних згинальних напружень, що виникають в результаті введення зразка в резонансні поперечні коливання на електродинамічному вібростенді ВЕДС-400. Оскільки встановлення горизонтальної ділянки кривої багатоциклової втоми потребує довготривалих випробувань, то визначалася обмежена границя витривалості зразків на базі 10^7 циклів.

На рис. 1 показано розподіли середніх значень осьових залишкових макронапружень у поверхневому шарі зразків з різною технологічною спадковістю. Більшість епюр ЗПМ є схожими немонотонними увігнутими кривими у вигляді "гачка". Винятком є еюра зразка

після шліфування, що має опуклу форму. Аномальність властивостей поверхневого шару після шліфування пояснюється дією великих градієнтів температур при обробці.

Оскільки розподіл середніх значень осьових ЗПМ σ_o в поверхневому шарі матеріалу являють собою складні криві з максимумом на деякій глибині під поверхнею, виникає питання встановлення характерного параметра цих епюр, що має визначальний вплив на властивості міцності матеріалу. Зазвичай таким параметром вважають максимальне значення $\sigma_{o \max}$, хоча воно не має фізичного зв'язку з будь-якою загальноприйнятою концепцією руйнування. Досить поширеним є припущення, що руйнація починається з поверхні. У цьому випадку визначальним має бути залишкове напруження σ_n на поверхні об'єкта, що досліджується. Ще однією поширеною гіпотезою руйнування є положення про те, що процес руйнування контролюється максимальними напруженнями, що розтягують $\sigma_{p \max}$, які в даному випадку є результатом накладання залишкових напружень σ_o на діючі від зовнішнього навантаження напруження σ_a : $\sigma_{p \max} = (\sigma_o + \sigma_a)_{\max}$. При простих схемах навантаження розрахунок напружень σ_a труднощів не викликає. Однак прямих і надійних методів визначення повної епюри залишкових напружень дослідники поки не мають, тому це завдання доцільно спростити. Оскільки в відносно вузькій зоні "гачка" діють стискаючі напруження значної величини, то вони повинні врівноважуватися порівняно слабкими напруженнями, що розтягують, розподіленими в решті відносно великої області перерізу зразка. З рівності площ епюр напружень, що стискають і розтягують випливає, що величина останніх у матеріалі зразка не перевищує 2 % від $\sigma_{0.2}$. Отже, з достатньою точністю можна вважати, що $\sigma_{p \max}$ дорівнюють напруженню від зовнішнього навантаження, що діє на деякій глибині h_0 від поверхні зразка, де $\sigma_o \approx 0$.

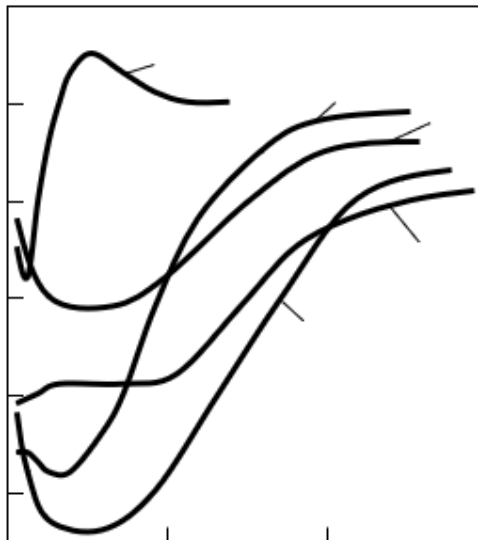


Рисунок 1 – Розподіл осьових залишкових макронапружень по глибині поверхневого шару зразків з різною технологічною спадковістю: 1 – Ш, 2 – Ш+УЗЗ, 3 – ЕХП, 4 – Т, 5 – ЕХП+УЗЗ.

Більш плідним виявляється підхід, коли дослідники пов'язують зміцнення матеріалу з його структурою, вплив якої на характеристики міцності більш за все проявляється при циклічних схемах навантаження. У роботі [15] наголошується, що на стадії інкубаційного періоду багатоциклової втоми спостерігається інтенсивніша пластична деформація поверхневого шару металу глибиною порядку розміру одного зерна. При цьому поверхневий шар матеріалу зазнає пластичної деформації, більшої, ніж внутрішні його об'єми. Якщо зміцнити поверхневий шар глибиною кілька зерен, то можна створити умови, за яких

пластичне деформування на поверхні і в середині матеріалу відбуватиметься одночасно, і обмежена границя витривалості при цьому підвищуватиметься. Виходячи з цього, характерним може вважатися результуюче напруження, що розтягує в поверхневому шарі на глибині одного зерна σ_z . Мікроструктурний аналіз матеріалів зразків із різними епюрами ЗПМ показав ідентичність їхньої структури. Середній розмір зерен у поверхневому шарі матеріалу становив близько 30 мкм. Саме на цій глибині визначалися напруження σ_z ЗПМ зразків.

Усі значення характерних параметрів ЗПМ та механічних властивостей зразків з різною технологічною спадковістю наведені у таблиці 1. Аналіз результатів показує, що залишкові поверхневі напруження практично не впливають на $\sigma_{0.2}$ і σ_B (коефіцієнти варіації $v = 0,017$ і $v = 0,008$ відповідно), але вони істотно впливають на границю витривалості σ_{-1} (коефіцієнт варіації $v = 0,180$). Таким чином, встановлено, що параметри статичної міцності виявилися менш чутливими до змін напруженого стану поверхневого шару, ніж характеристики опору втоми.

Таблиця 1 – Характерні параметри залишкових напружень, механічні властивості та значення сумарного рахунку АЕ для зразків із сплаву ХН77ТЮР-ВД з різними формами епюр ЗПМ

Параметр σ , МПа	Номер епюри ЗПМ (рис. 1)				
	1	2	3	4	5
σ_0	+35	-280	-200	-300	-360
$\sigma_{p \max}$	820	740	720	730	710
σ_{Π}	-120	-380	-130	-295	-250
σ_z	-50	-380	-180	-295	-380
σ_{-1}	495	645	395	530	595
σ_B	1200	1205	1195	1190	1205
$\sigma_{0.2}$	815	820	825	810	835
Параметр N_{AE} , імп.	650	400	550	450	250

У таблиці 2 наведено значення коефіцієнтів кореляції параметрів ЗПМ з обмеженою границею витривалості для двох вибірок. У першу (вибірка А) увійшли усі досліджені зразки. З другої (вибірка Б) було вилучено зразки з опуклою формою епюр ЗПМ. Вищі значення коефіцієнтів кореляції другої вибірки свідчать про суттєвий вплив аномальності епюри ЗПМ зразків після шліфування на характеристики втоми. Привертає увагу практично детермінований зв'язок між ЗПМ на глибині одного зерна і границею витривалості зразків, що підтверджує дієвість механізму зміцнення, описаного в роботах [15, 16]. Відсутність досить тісного зв'язку між границею витривалості зразків з різною технологічною спадковістю та максимальним рівнем ЗПМ у них не підтверджує правомірність прийняття напруження $\sigma_{0 \max}$ за основний параметр ЗПМ, що визначає характеристики опору втоми матеріалу.

Таблиця 2 – Коефіцієнти кореляції параметрів ЗПМ з обмеженою границею витривалості (σ_{-1}) та сумарним рахунком АЕ (N_{AE})

Параметр для встановлення кореляції	Вибірка	Параметри залишкових напружень			
		$\sigma_{0 \max}$	$\sigma_{p \max}$	σ_{Π}	σ_z
границя витривалості σ_{-1}	А	-0,467	-0,124	-0,843	-0,730
	Б	-0,735	0,340	-0,902	-0,982
сумарний рахунок АЕ N_{AE}	А	0,899	0,743	0,651	0,928
	Б	0,938	0,362	0,421	0,864

Науковий та практичний інтерес представляє аналіз залежностей між параметрами АЕ та ЗПМ. Результати акустоемісійних досліджень показано на рис. 2, з якого видно, що рівні загальної енергії АЕ (E_{AE}) і максимальних середньоквадратичних значень амплітуди ($\bar{A}_{max}$) при деформуванні різних зразків практично не відрізняються. І лише зразок із опуклою формою епюр ОПМ показав вищі значення параметру E_{AE} (рис. 2а). Відсутність відмінностей у залежностях $\lg E_{AE} = f(\sigma/\sigma_{0.2})$ для зразків з увігнутими епюрами ЗПМ пояснюється малими відмінностями результуючих напружень у відповідних об'ємах і лише різні форми епюр ЗПМ суттєво відрізняють напружений стан матеріалу у процесі його деформування.

Значно інформативнішими виявилися залежності $\lg N_{AE} = f(\sigma/\sigma_{0.2})$, які показано на рис. 2б. Значення сумарного рахунку АЕ та коефіцієнтів кореляції параметрів ОПМ з N_{AE} також представлені в таблицях 1 і 2 відповідно. З рисунку 2б видно, що всі АЕ характеристики мають дві явно виражених ділянки. Перша (полога) – спільна для всіх видів зразків. Друга (крутіша) – відмінна для зразків з різними епюрами ЗПМ. Точки перегину АЕ характеристики у зразків із різним напруженим станом поверхневого шару також різні. Початкова ділянка навантаження характеризується низькою АЕ активністю і, очевидно, відповідає пружній деформації всього об'єму матеріалу. Значне збільшення активності АЕ на другій ділянці АЕ характеристики, очевидно, зумовлено активними процесами пластичної деформації мікрооб'ємів поверхневого шару матеріалу. Згідно з таким підходом, точка перегину функції $\lg N_{AE} = f(\sigma/\sigma_{0.2})$ визначає зміну напружено-деформованого стану мікрооб'ємів поверхневого шару порівняно з матрицею матеріалу. В роботах [17, 18] показано, що рух дислокацій при втоми металів має спільні риси зі статичним навантаженням. Тоді процес втоми матеріалу можна уявити як циклічно діючий ефект Баушингера в поверхневому шарі матеріалу, напруженість мікрооб'ємів якого стає більшою, ніж напруженість матеріалу матриці. Пояснюється таке положення блочністю структури полікристалічного матеріалу, в якому при навантаженні діє дислокаційний механізм, що призводить до зміни напруженого стану окремих елементів структури матеріалу.

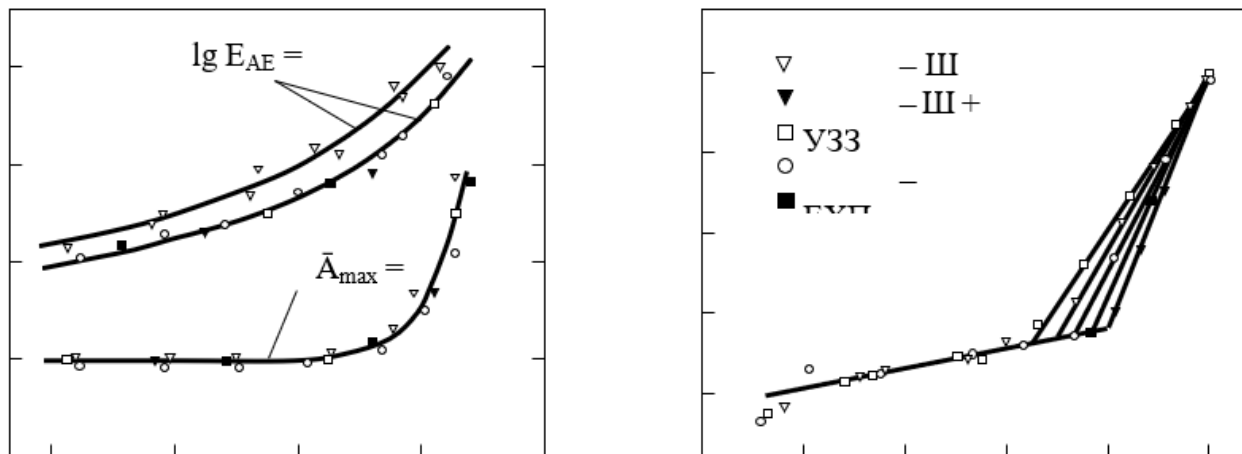


Рисунок 2 – Залежності параметрів акустичної емісії від прикладених відносних напружень:
 а) – загальної енергії АЕ та максимальних середньоквадратичних значень амплітуди,
 б) – сумарний рахунок сигналів АЕ

Аналіз даних таблиці 2 показує, що між усіма параметрами ЗПМ і сумарним рахунком АЕ у повній вибірці зразків (вибірка А) спостерігається досить стійкий ймовірнісний зв'язок, більш високий ніж у неповній вибірці (вибірка Б). При цьому найбільш тісна кореляція спостерігається між сумарним рахунком актів АЕ та напруженням σ_z . У вибірці зразків з винятком аномальної епюри ОПМ спостерігається найтісніший зв'язок між σ_{0max} і N_{AE} . Дещо

менший коефіцієнт кореляції між σ_z та N_{AE} у повній вибірці зразків свідчить про те, що інтенсивність актів АЕ визначається максимальними значеннями ЗПМ, проте деструктивні процеси втомного руйнування контролюються ЗПМ на глибині одного зерна.

ВИСНОВКИ

Поверхневі залишкові макронапруження у зразках практично не впливають на границю міцності та умовну границю плинності, але істотно впливають на обмежену границю витривалості при циклічному навантаженні згинальними напруженнями.

Величина ЗПМ на глибині одного зерна практично детерміновано пов'язана з його границею витривалості та сумарним рахунком сигналів АЕ.

Особливості зміни сумарного рахунку сигналів АЕ у процесі статичного навантаження матеріалу характеризують напружений стан мікрооб'ємів його поверхневого шару, що зумовлює зміну механізму деструктивного процесу в них при циклічному деформуванні.

Встановлена корельованість параметрів АЕ та ЗПМ дозволяє здійснювати оцінку напруженого стану поверхні та механічних характеристик матеріалів неруйнівним експрес методом АЕ.

Список використаних джерел

1. *Breslavsky D.V.* Consideration the influence of residual stresses and creep strains on rolling the steel sheets / *D.V. Breslavsky, V.O. Mietielov* // Вісник НТУ "ХПІ": Серія "Динаміка та міцність машин". – 2016. – № 46. – С. 77–80. <http://dx.doi.org/10.20998/2078-9130.2016.46.88054>
2. *Сичов Ю. С.* (мол.) Вплив залишкових напружень на втомну міцність бурильних труб / *Ю.С. Сичов (мол.)* // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2014. – № 2. – С. 97–110. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2014_2_13
3. *Roberts Jeffrey Lynn* Residual Stress Effects on Fatigue Life via the Stress Intensity Parameter, K. PhD diss. / *Roberts Jeffrey Lynn* // University of Tennessee. – 2002.
4. *Chiocca A.* Residual stresses influence on the fatigue strength of structural components / *A. Chiocca, F. Frendo, L. Bertini*. // *Procedia Structural Integrity*, Volume 38, 2022, P. 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.045>.
5. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням : навч. посіб. / *І.С. Афтаназієв*, [та ін.] ; – Житомир: ЖІТІ. – 2001. – 516 с.
6. *Дудніков А.А.* Відновлення деталей поверхневим пластичним деформуванням / *А.А. Дудніков, В.В. Дудник, О.А. Бурлака та ін.* // Вісник ПДАА. – 2020. – № 4. – С. 251–258. DOI: 10.31210/visnyk2020.04.32
7. *Jong-Hwa Hong* Effect of the residual stress induced by surface severe plastic deformation on the tensile behavior of an aluminum alloy/ *Jong-Hwa Hong, Hyeonil Park, Jinsu Kim, Moo-Young Seok, Hyunsung Choi, Yong Nam Kwon, Dong Jun Lee*. // *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, May–June 2023. – P. 7076–7090. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.018>.
8. *Samara Fayeze.* Influence of the Plastic Deformation Process on the Residual Stresses and Hardness of an Al-5Mg Alloy / *Fayeze Samara, Viorel Goanta, Bogdan Istrate, Layth Alkisswani, Corneliu Munteanu and Roxana Cosau* // *Materials* 2024. – 17(14). – 3593. <https://doi.org/10.3390/ma17143593>
9. *Скальський В.Р.* Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії / *В.Р. Скальський, О.Є. Андрійків*; Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка. – 2006. – 330 с.
10. *Гудрамович В.С.* Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних

конструкцій і матеріалів / В.С. Гудрамович, В.Р. Скальський, Ю.М. Селіванов. Львів: Простір-М. – 2017. – 492 с.

11. *Evans A.G.* Residual Stress Measurement Using Acoustic Emission / *A.G. Evans* // Journal of the American Ceramic Society. – June 2006. – 58(5/6), pp. 239 – 243.

12. *Chen Y.* Effects of normal stress on shear properties and acoustic emission characteristics of bonded rock-concrete interfaces / *Y. Chen, J. Yang, J. Wang, Z. Hou* // Sci Rep. – 2025. – 15, 29081. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14445-7>

13. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин /Ред. Сулима А.М. и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

14. *Беженов С.О.* Методика дослідження поверхневого шару конструкційних матеріалів методом акустичної емісії / *С.О. Беженов* //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1999. – № 1. – С. 16 – 19.

15. *Иванова В.С.* Природа усталости металлов / *В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев.* – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

16. *Троценко В.Т.* Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению металлов и сплавов. Сообщение 2. Продолжительность стадий зарождения и развития усталостных трещин. / *В.Т. Троценко, Л.А. Хамаза* // Проблемы прочности. – 2014. – № 4. – С. 5–20. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PPT_2014_4_3

17. *Kuhlman-Wilsdorf D.* Dislocation behavior in fatigue / *D. Kuhlman-Wilsdorf, G. Laird* // Mater. Sci. and Eng. – 1977. – Vol. 27. – P. 137 – 156. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(77\)90166-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(77)90166-5)

18. *Tsyban'ov G.V.* A Study of Fatigue Crack Growth Rate in Steels in Relation to Crack-Tip Plastic Deformation and Fracture. Part 2. Parametric Relation between Fatigue Crack Growth and Plastic Strains / *G.V. Tsyban'ov, A.I. Novikov, Yu.P. Kurash* // Strength of Materials. – 2020. – Vol. 52. – no. 6. – pp. 908–918. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00244-8>

Bezhenov S.A., Kapustian O.Ye.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RESIDUAL SURFACE MACROSTRESS PARAMETERS ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF NICKEL ALLOY USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

The state of the surface layer of the material, which is determined by various parameters, including residual surface macrostresses, is the most important factor affecting the strength properties. However, it still remains very problematic to take into account the action of spatial internal elastic forces, which are a consequence of previous thermal and mechanical effects. The work is devoted to the study of the relationship between various parameters of residual surface macrostresses and mechanical characteristics of nickel alloy samples with different technological heredity using the non-destructive acoustic emission method. Cylindrical samples of nickel alloy KhN77TYUR-VD with different technological heredity were studied: after turning, grinding, electrochemical polishing, and also after surface plastic strengthening with steel balls oscillating at ultrasonic frequency. The magnitude of axial residual surface macrostresses was determined from the deformation curve of special samples during layer-by-layer etching of the material. The features of acoustic emission radiation in the samples were studied under stepwise loading of the samples according to the three-point bending scheme to the stress level $\sigma_{0.2}$. The mechanical characteristics of static strength were determined as a result of uniaxial tensile tests of samples. Fatigue tests were carried out under conditions of cyclic bending stresses arising from the introduction of the sample into resonant transverse vibrations on an electrodynamic vibration table. The limited endurance limit of the samples was determined based on 10^7 cycles. The results of the analysis of the influence of

various parameters of residual surface macrostresses on the mechanical characteristics of a nickel alloy using the acoustic emission method are presented. The determining parameters of residual surface macrostresses that control the process of multi-cycle fatigue are established. A method for their determination by the non-destructive express method of acoustic emission is proposed.

Keywords: Acoustic emission, multi-cycle fatigue, residual stresses, statistical analysis, technological heredity.

Стаття надійшла 10.12.2025р.

УДК 621.873:620.179.17

doi.org/10.31498/2522-9990302025347060

Сидоренко М.В., Капустян О.Є., Кравченко Є.О., Фролов Р.О., Козак Д.С.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ КІНЦЕВИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Акустична емісія стає все більш розповсюдженим методом для оцінки стану, якості та міри пошкодженості металоконструкцій та матеріалів. Основна теоретична база методів оцінки параметрів якої викладена у працях Скальського В.Р. та Недосеки А.Я. Механічна міра об'ємної пошкодженості матеріалу визначається як відношення суми новоутворених дефектів до об'єму, в якому вони утворилися. Механічна та акустико-емісійна міри об'ємної пошкодженості лінійно залежать від дійсної деформації полікристалічних тіл. У даній роботі забезпечували досягнення значень рівномірної деформації, отриманої попередньо при розтягуванні циліндричних зразків. Було досліджено партію зразків, що піддавались втомному навантаженню з різними коефіцієнтами асиметрії циклу 0, -100, -200 МПа. Робоча смуга частот реєстрованих сигналів становила: 0,2...0,5 МГц. Застосована теоретична модель акустико-емісійного вимірювання об'ємної пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні. Проведені дослідження сигналів акустичної емісії від країв втомної тріщини та від пластичної деформації у вершині втомної тріщини для сталей S235 та S355. Підтверджена гіпотеза про те, що амплітуди сигналів пропорційні площі тріщини. При оцінці швидкості зростання тріщини за параметрами акустичної емісії виникають складнощі, пов'язані з існуванням ефекту Кайзера. Після незначних перевантажень буде спостерігатися велика кількість пасивних циклів, тобто таких, в яких рівень сигналів АЕ буде нижче порогового рівня апаратури, що реєструє. Встановлено, що для досліджуваних сталей перші сигнали від пластичної деформації у вершині тріщини виникають при перевантаженні до 10%. Вони можуть спостерігатися раніше реєстрації монотонно зростаючої амплітуди, яка передуює початку росту тріщини і служить якісним підтвердженням наявності дефекту, що розвивається. Запропоновано методики визначення залишкової довговічності кінцевих балок мостових кранів: на етапі зародження тріщини за сигналами акустичної емісії, що виникають при вдавлюванні індентора, та на етапі розвитку тріщини за під час проведення динамічних випробувань. Контроль тріщин, що розвиваються в кінцевих балках, за сигналами акустичної емісії під час експлуатації можливий, при застосуванні сучасної апаратури з низьким рівнем власних шумів.

Ключові слова: Акустична емісія, кінцева балка, неруйнівний контроль, активні дефекти, об'ємна пошкоджуваність, індентор.

Постановка проблеми. Акустико-емісійний контроль вантажопідйомних кранів проводиться переважно з метою локації дефектів з подальшим визначенням їх параметрів