

СТАТИСТИЧНА ПРИРОДА ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

З використанням статистичної моделі «навантаження - міцність» проаналізовано результати вимірів мікротвердості вихідних та оброблених імпульсним електричним струмом зразків із металічних матеріалів. Показано, що обробка струмом призводить до зменшення розсіювання мікротвердості матеріалів, що може бути в основі пояснення підвищення їх міцності, яке спостерігається при такій обробці.

Вступ. Результати досліджень дії імпульсного електричного струму (ІЕС) на конструкційні металічні матеріали свідчать про позитивний ефект такого впливу на їхні характеристики міцності та пластичності. Так, наприклад, за даними роботи [1], обробка ІЕС широкого класу алюмінієвих сплавів призводить до збільшення їхніх характеристик міцності на 10...15 % у порівнянні з традиційною термообробкою, характеристик в'язкості руйнування та ударної в'язкості – на 40...50 %, довговічності до виникнення тріщини – на 12...15 %. Аналогічні результати отримано також для титанових сплавів та сталей (див., наприклад, [2-4]).

Запропоновано різні моделі, які пояснюють фізичні механізми подібного впливу ІЕС на метали. Серед них, наприклад, градієнтно-дифузну модель [5], яка базується на явищі концентрації електромагнітного поля на дефектах структури і пов'язаних з цим дифузних процесах, які, в свою чергу, забезпечують заліковування дефектів. Дослідженню механізмів тонких структурних перетворень в матеріалі, що відбуваються під впливом електричного струму і які призводять до підвищення характеристик втоми, присвячена робота [6]. В роботі [7] зміна механічних характеристик сталей пов'язується з виділенням і ростом карбідних часток поблизу дефектів структури, а також з розчиненням включень під дією електричного струму.

Однак при розгляді впливу ІЕС на властивості металічних матеріалів недостатньо досліджена статистична природа цього явища. В даній роботі наведено деякі результати такого дослідження та їх аналіз.

Статистична модель «навантаження – міцність». На сьогодні вважається, що найбільш загальними і перспективними теоріями міцності і руйнування матеріалів є статистичні теорії [8, 9]. Вони в найбільшій мірі можуть бути основою для розрахункового визначення граничного стану реальних деталей та елементів конструкцій, які виготовлені з матеріалів, що мають природне вихідне або наведене в процесі наробітку (експлуатації) розсіювання механічних властивостей і які експлуатуються в заданому полі навантажень.

В основі зазначених підходів лежить той факт, що реальна будова будь-якого конструкційного матеріалу недосконала з точки зору його однорідності. Окремі об'єми матеріалу мають різні фізико-механічні властивості, тобто існує їхнє неконтрольоване розсіювання, яке відображає статистичну природу цих властивостей. Розсіювання властивостей конструкційних матеріалів притаманне їм на макроскопічному, мікроскопічному і субмікроскопічному (атомарному) рівнях, оскільки матеріал є неоднорідним як за будовою, так і за складом, містить велику кількість дефектів (дислокацій, імплантованих атомів, вакансій та ін.) [10]. Неоднорідність властивостей матеріалу обумовлює неоднорідність протікання процесів деформування та руйнування по його об'єму.

Для імовірнісних (статистичних) розрахунків граничного стану матеріалу недостатньо знати закон розподілення фізико-механічних властивостей, необхідна

також вичерпна інформація про діючі навантаження. Механічні навантаження на деталі машин і елементи конструкцій, як правило, також носять стохастичний характер і є випадковим процесом (див., наприклад, [11]).

У зв'язку з цим імовірнісні методи розрахунків на міцність повинні одночасно й органічно враховувати розсіювання як фізико-механічних характеристик міцності (руйнування) матеріалів, так і навантаженості елементів конструкцій. Одним з варіантів такого розрахунку може бути оцінка переходу матеріалу в граничний стан за моделлю «навантаження – міцність» [12].

Відповідно до даної моделі можливо оцінити імовірність руйнування при досягненні деякої характеристики міцності (наприклад, межі міцності σ^* для випадку одноосного навантаження): якщо характеристика навантаженості (напруження σ) є випадковою величиною і підкоряється нормальному розподілу із середнім значенням $\bar{\sigma}$ і середньоквадратичним відхиленням S_{σ} , характеристика міцності σ^* також є випадковою величиною і підкоряється нормальному розподілу із середнім значенням $\bar{\sigma}^*$ та середньоквадратичним відхиленням S_{σ^*} , то, розташувавши щільності їхнього розподілу $\varphi(\sigma)$ і $\varphi(\sigma^*)$ в єдиній системі координат, можна оцінити перехід матеріалу в граничний стан (рис. 1, а). У випадку перетину графіків функцій $\varphi(\sigma)$ і $\varphi(\sigma^*)$ відбувається руйнування, оскільки існує область, в якій $\sigma \geq \sigma^*$. При цьому імовірність руйнування оцінюється площею під обома функціями розподілу (заштрихована область на рис. 1, а). Для її підрахунку варто ввести в розгляд нову величину $\eta_{\sigma} = \sigma^* - \sigma$, яка також підкоряється нормальному розподілу, із середнім значенням $\bar{\eta}_{\sigma} = \bar{\sigma}^* - \bar{\sigma}$ і середньоквадратичним відхиленням $S_{\eta_{\sigma}} = \sqrt{S_{\sigma^*}^2 + S_{\sigma}^2}$. Оскільки умовою руйнування є нерівність $\bar{\eta}_{\sigma} = \bar{\sigma}^* - \bar{\sigma} \leq 0$, то імовірність руйнування можна визначити відповідно до виразу (див. [12]):

$$P = P(\eta_{\sigma} \leq 0) = \int_{-\infty}^0 \varphi(\eta_{\sigma}) d\eta_{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_{\eta_{\sigma}}} \int_{-\infty}^0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\eta_{\sigma} - \bar{\eta}_{\sigma}}{S_{\eta_{\sigma}}} \right)^2 \right] d\eta_{\sigma}. \quad (1)$$

З використанням залежності (1) є можливим скорегувати умови експлуатації конструкції. Наприклад, при зареєстрованій деградації матеріалу (зменшенні $\bar{\eta}_{\sigma}$ або збільшенні $S_{\eta_{\sigma}}$), порівнюючи розрахункову імовірність руйнування чи імовірність безвідмовної роботи з відповідними обґрунтованими нормативними значеннями, забезпечують зменшення рівня її навантаження.

Таким чином, виходячи з моделі «навантаження – міцність», всі існуючі способи об'ємного зміцнення матеріалу умовно можна розділити на три групи. До першої групи (рис. 1, б) належать способи, в результаті використання яких збільшується рівень характеристик міцності $\bar{\sigma}^*$, при цьому характеристики розсіювання міцності залишаються практично незмінними ($S_{\sigma^*} \approx \text{const}$). Це призводить до того, що імовірність руйнування такого матеріалу при незмінному характері навантаження зменшиться. До другої групи (рис. 1, в) – способи зміцнюючої обробки, в результаті використання яких рівень характеристик міцності матеріалу в середньому не змінюється ($\bar{\sigma}^* \approx \text{const}$), однак відбувається зменшення ступеня їх розсіювання S_{σ^*} , що в остаточному підсумку також призводить до підвищення міцності, тому що імовірність руйнування матеріалу зменшується. До третьої групи (рис. 1, г) належать способи зміцнення, в результаті використання яких відбувається як збільшення рівня характеристик міцності $\bar{\sigma}^*$ матеріалу, так і зниження ступеня розсіювання S_{σ^*} цих характеристик. В результаті такої обробки зміцнення матеріалу досягається в найбільшій мірі тому, що імовірність руйнування при цьому знижується максимально.

Наведену статистичну модель, яка враховує вплив параметрів розподілу характеристик міцності матеріалу на імовірність руйнування, використаємо нижче для аналізу результатів обробки ІЕС зразків із ряду металічних матеріалів.

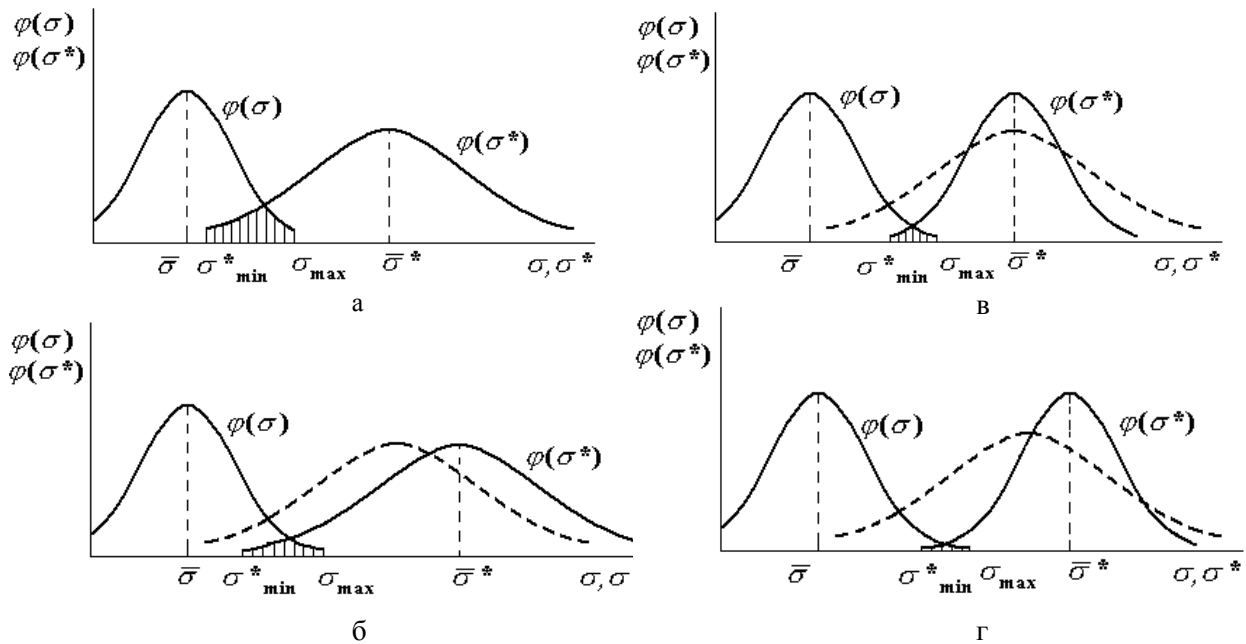


Рис. 1. Схема моделі «навантаження – міцність» (а) та її використання у випадку різних способів зміцнення матеріалу (б) – (г), площа заштрихованої області відповідає імовірності руйнування.

Пунктирною лінією показана вихідна щільність розподілення $\varphi(\sigma^*)$

Методика обробки зразків електричним струмом. Вплив ІЕС на мікротвердість матеріалу досліджували на зразках з технічного алюмінію, алюмінієвого сплаву Д16Т, міді (стан поставки та після відпалу), сталі Ст3, молибдену та танталу у вигляді смуг перетином 2×6 мм і довжиною ділянки, через яку пропускали струм, що дорівнювала 50 мм. Зразок розміщували в жорсткій діелектричній обоймі для запобігання його можливим деформаціям під час дії імпульсу струму і приєднували до виводів генератора ІЕС.

Схема генератора ІЕС, який використовувався при виконанні досліджень, наведена на рис. 2, а. Генератор ІЕС включав джерело високої напруги (до 5 кВ), батарею конденсаторів, загальною ємністю до 2000 мкФ, механічний розрядник та

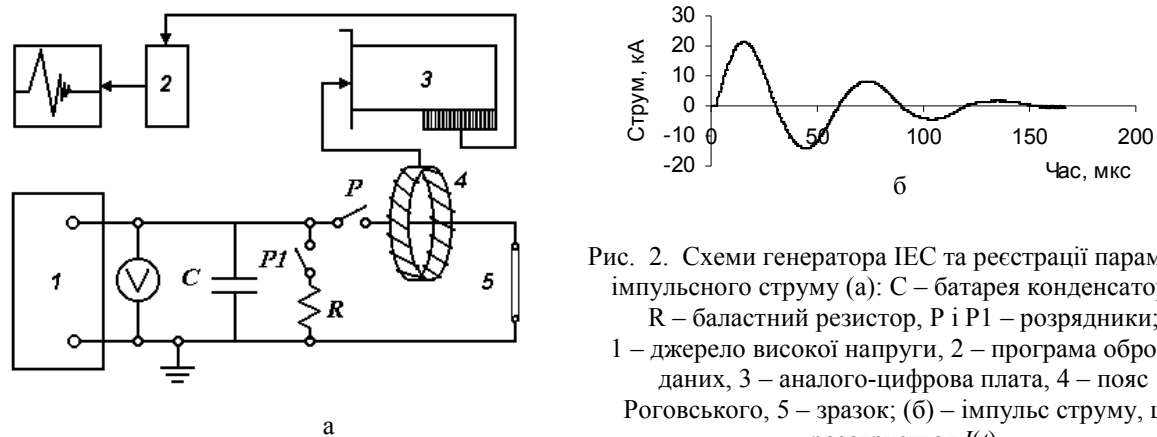


Рис. 2. Схеми генератора ІЕС та реєстрації параметрів імпульсного струму (а): С – батарея конденсаторів, R – баластний резистор, P і P1 – розрядники, 1 – джерело високої напруги, 2 – програма обробки даних, 3 – аналого-цифрова плата, 4 – пояс Роговського, 5 – зразок; (б) – імпульс струму, що реєструється $I(t)$

баластний резистор. Імпульс струму $I(t)$ в схемі розряду реєстрували з використанням поясу Роговського, сигнал з якого подавали на високошвидкісну аналого-цифрову

плату реєстрації персонального комп'ютера. При виконанні даних досліджень конденсатори ємністю $C=600$ мкФ заряджали до напруги $U=750$ В, що при розряді забезпечувало протікання через зразок імпульсного струму з амплітудою $I \approx 20$ кА (див. рис. 2, б).

Результати вимірювання мікротвердості та їх аналіз. Мікротвердість досліджуваних матеріалів до обробки ІЕС і після неї вимірювали в центральній частині зразка з однаковим кроком уздовж його осі за допомогою приладу ПМТ-3, при навантаженні на індентор 100 г. На кожному зразку проводили не менше 100 вимірів. Результати вимірювань після їхньої статистичної обробки наведено в таблиці.

Таблиця 1

Результати вимірювання мікротвердості зразків

Матеріал	Мікротвердість (H_{μ}^{100})			
	Середнє ($\bar{H}_{\mu}^{100}$)	Мінімальне ($H_{\mu \min}^{100}$)	Максимальне ($H_{\mu \max}^{100}$)	Середньоквадратичне відхилення ($S_{H_{\mu}^{100}}$)
Технічний алюміній	$\frac{342}{355}$	$\frac{265}{301}$	$\frac{428}{402}$	$\frac{29}{21}$
Алюмінієвий сплав Д16Т	$\frac{302}{380}$	$\frac{225}{317}$	$\frac{379}{416}$	$\frac{31}{14}$
Сталь Ст3	$\frac{1637}{1705}$	$\frac{1173}{1518}$	$\frac{2081}{1868}$	$\frac{191}{185}$
Мідь, стан поставки	$\frac{693}{683}$	$\frac{452}{577}$	$\frac{903}{820}$	$\frac{90}{52}$
Мідь, після відпалу	$\frac{586}{725}$	$\frac{365}{580}$	$\frac{820}{863}$	$\frac{80}{61}$
Молибден	$\frac{2091}{2390}$	$\frac{1718}{1961}$	$\frac{2515}{2818}$	$\frac{157}{161}$
Тантал	$\frac{1617}{1764}$	$\frac{1114}{1544}$	$\frac{2167}{2145}$	$\frac{191}{124}$

Примітка: в чисельнику наведено значення H_{μ}^{100} до обробки струмом, в знаменнику – після.

За результатами вимірів мікротвердості її середнє значення $\bar{H}_{\mu}^{100}$ для всіх матеріалів, за винятком міді в стані поставки, в результаті обробки ІЕС підвищується (на 4...26 % в залежності від матеріалу). Середньоквадратичне відхилення $S_{H_{\mu}^{100}}$, яке характеризує ступінь розсіювання величини мікротвердості, для всіх матеріалів, за винятком молибдену, знижується (на 28...56 % в залежності від матеріалу). Таким чином, в результаті обробки ІЕС властивості матеріалу (в даному випадку мікротвердість) стають більш однорідними. На рис. 3 наведено розподіл мікротвердості по довжині зразка з сплаву Д16Т до обробки струмом та після.

За результатами обробки експериментальних даних, наведеними в таблиці, маємо можливість для кожного матеріалу побудувати функції нормального розподілу мікротвердості, яка задається у вигляді:

$$\varphi(H_{\mu}^{100}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_{H_{\mu}^{100}}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H_{\mu}^{100} - \bar{H}_{\mu}^{100}}{S_{H_{\mu}^{100}}} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

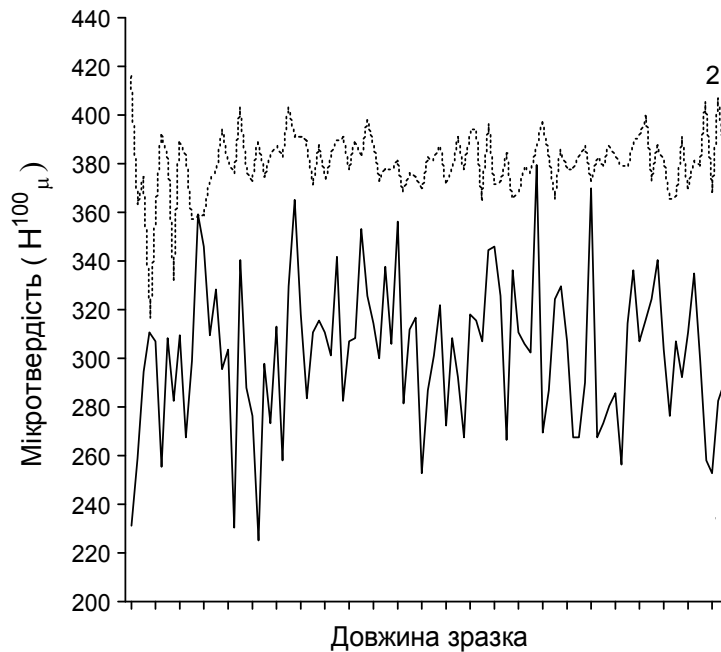


Рис. 3 Розподіл мікротвердості по довжині зразка із сплаву Д16Т: залежність 1 – до обробки, 2 – після обробки ІЕС

Такі функції для досліджених матеріалів до пропускання ІЕС та після наведено на рис. 4.

Якщо однозначно пов'язувати зміну мікротвердості матеріалу зі зміною його міцності, то з аналізу отриманих експериментальних даних з врахуванням розглянутої вище статистичної моделі, випливає, що для всіх досліджених матеріалів обробка ІЕС призводить до підвищення їхньої міцності, що відповідає даним [1 – 4]. Причому для міді (стан поставки) це є переважно наслідком зменшення розсіювання характеристик міцності (див. залежності на рис. 4, г і модель на рис.1, в), для молибдену – наслідком підвищення загального рівня міцності (див. залежності на рис. 4, е і модель на рис.1, б), а для решти матеріалів – наслідком як зменшення розсіювання характеристик міцності, так і підвищення їхнього загального рівня (див. залежності на рис. 4, а-в, д,є та модель на рис.1, г).

Висновки:

1. Зміцнення елементів конструкцій з металічних матеріалів, яке спостерігається під дією ІЕС, варто пов'язувати не тільки із збільшенням абсолютного значення характеристик міцності матеріалу, але також із зниженням величини розсіювання цих характеристик.

2. За результатами досліджень широкого класу металічних матеріалів пропускання через матеріал ІЕС високої густини призводить до підвищення рівня мікротвердості та зменшення ступеня її розсіювання.

3. Задачею подальших досліджень є вивчення впливу ІЕС на розсіювання характеристик міцності, пластичності та руйнування конструкційних металічних матеріалів.

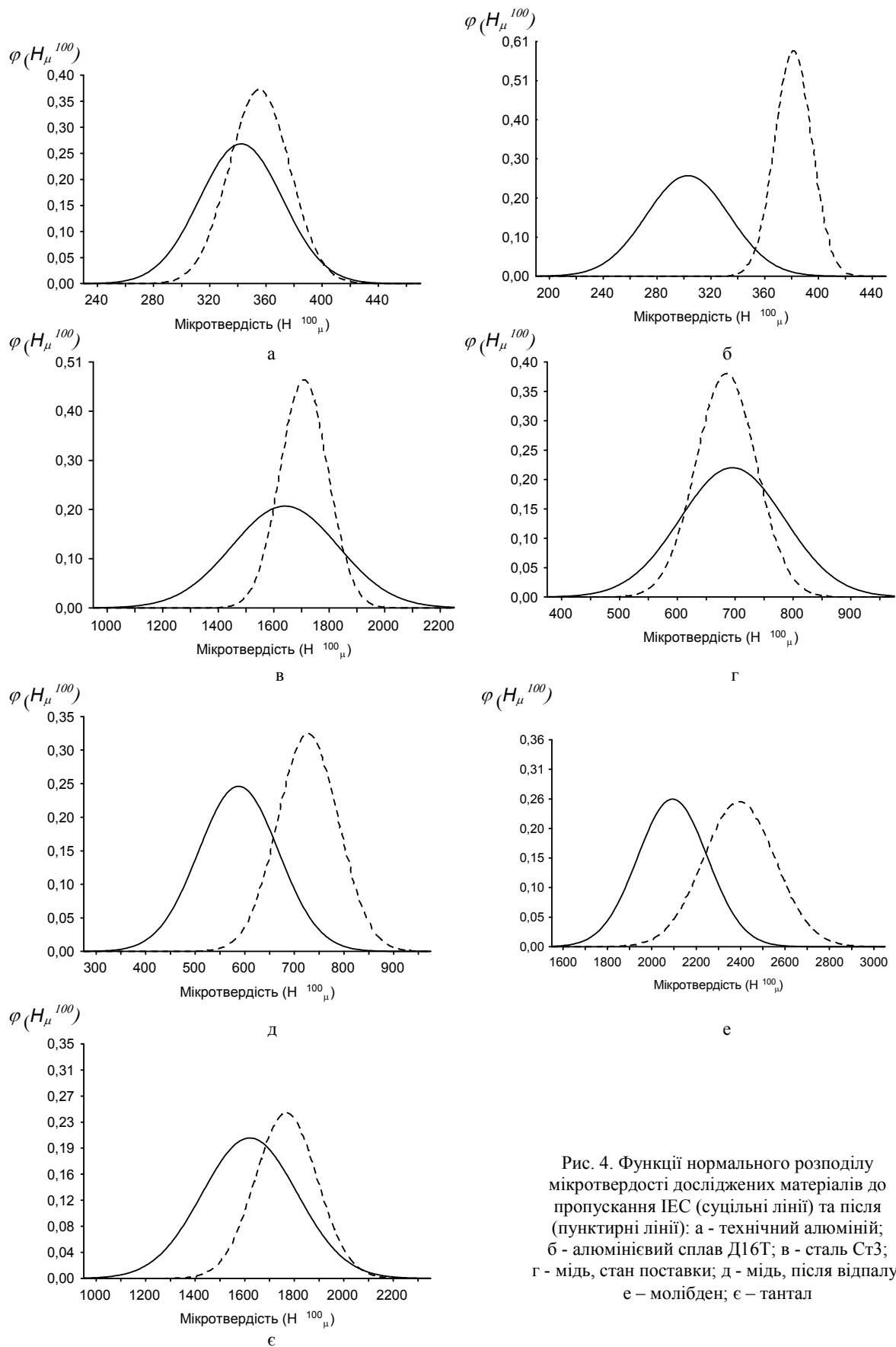


Рис. 4. Функції нормального розподілу мікротвердості досліджених матеріалів до пропускання ІЕС (суцільні лінії) та після (пунктирні лінії): а - технічний алюміній; б - алюмінієвий сплав ДІ6Т; в - сталь Ст3; г - мідь, стан поставки; д - мідь, після відпалу; е - молибден; є - тантал

The results of micro hardness measurements of the initial and electric current treated specimens from series of metals were analyzed using the statistical model "loading – strength". It is shown, that electric current treatment leads to the reduction of micro hardness scattering. This can be a reason of their strength enhancing which accompanies above treatment.

Література

1. Доронин Ю.Л. Исследование возможностей повышения конструкционных и эксплуатационных характеристик деталей летательных аппаратов импульсным воздействием высокоэнергетического электромагнитного поля // Автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук.- Москва, 1992.- 18 с.
2. Попов О.В., Таненберг Д.Ю., Власенков С.В., Вепрев А.А. Влияние обработки импульсным электрическим током на прочностные и пластические свойства титановых сплавов // Тез. докл. на II Всесоюзной конф. «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов». Ч.1.- Николаев: РИО Облполиграфиздата, 1990.- С.6.
3. Володин В.Л., Бадьина М.И., Сарычев В.Л., Кудашкина А.Н. Исследование структуры и свойств высокомарганцовистых сталей после воздействия импульсных электрических токов // Известия ВУЗов. Черная металлургия.- 1992, №6.- С.98-99.
4. Коновалов С.В., Соснин О.И. и др. Повышение надежности изделий из среднеуглеродистых сталей импульсным токовым воздействием // Ремонт, восстановление, модернизация.- 2002, №3.- С.19-23.
5. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. Влияние локального неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Металлы.- 1984, №4.- С.184-187.
6. О.В.Соснин, В.Е.Громов, Э.В.Козлов Электростимулированная малоцикловая усталость.- М.: Недра Коммуникайшенс Лтд, 2000.- 208 с.
7. Баранов Ю.В. Физическая модель структурных изменений металлических материалов при воздействии импульсного электрического тока // Пробл. машиностр. и надежности машин.- 2000, №4.- С.57-65.
8. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Ч.2 (Отв. ред. В.Т.Трощенко).- Киев: Наук. думка, 1994.- 701 с.
9. Л.А.Сосновский Статистическая механика усталостного разрушения.- Мн.: Наука и техника, 1987.- 288 с.
10. Л.В.Кукса Механика структурно-неоднородных материалов на микро- и макроуровнях.- Волгоград: ВолгГАСА, 2002.-160 с.
11. Сосновский Л.А., Воробьев В.В. Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали // Пробл. прочности.-2000.-№6.-С.44-53.
12. Л.А.Сосновский Основы трибофатики. Ч.1.-Гомель: БелГУТ, 2003.-246 с.

Одержано 11.01.2005 р.