

УДК 539.3; 537.39

**Г. Степанов, докт. техн. наук; А. Бабуцький, канд. техн. наук;
О. Богиніч, докт. техн. наук**

Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАНУ, Київ, Україна

ВПЛИВ ОБРОБКИ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ НА ДЕМПФУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Наведено результати експериментального дослідження впливу обробки імпульсним струмом високої густини на демпфуючу здатність сталей Ст3 і Х17Н2 та алюмінієвих сплавів ДІ6Т і В95 при коливаннях призматичних зразків в умовах чистого згину в широкому діапазоні амплітуд циклічних напружень. Показано, що в залежності від густини електричного струму обробка викликає як підвищення демпфуючої здатності матеріалів, так і її зниження.

G. Stepanov, A. Babutsky, O. Boginich

INFLUENCE OF IMPULSE ELECTRIC CURRENT TREATMENT ON DAMPING PROPERTIES OF STRUCTURE METALS

The results of experimental investigations of impulse electric current treatment influence on damping ability St3, Kh17N2 steels and D16T, V95 aluminum alloys under pure bending of prismatic specimens at cyclic stresses of high range are presented. It is shown, that depending of electric current density the treatment causes damping ability increase as well as decrease.

Вступ. Дослідження впливу обробки імпульсним електричним струмом (ІЕС) на механічні властивості металічних матеріалів свідчать про її позитивну дію на характеристики міцності при циклічному навантаженні (втомі) [1-3]. На даний момент запропоновано різні моделі, що пояснюють цей вплив (див., наприклад, [4, 5]), однак потрібно визнати, що значного прогресу в розумінні механізму впливу ІЕС на характеристики міцності і, зокрема, втомі металічних матеріалів не досягнуто.

Дія ІЕС високої густини на матеріал супроводжується кількома ефектами. Насамперед, добре відома теплова дія струму в провіднику, що полягає в його однорідному розігріві в результаті зіткнення носіїв заряду між собою та елементами кристалічної ґратки: робота джерела струму передається електронам та кристалічній ґратці у вигляді кінетичної енергії хаотичного руху або, у відповідності до молекулярно-кінетичної теорії речовини, у вигляді теплоти [6]. При достатній тривалості дії струму і його густині матеріал може нагрітися так, що це спричинить зміну його механічних властивостей.

Крім того, за результатами численних експериментальних досліджень відома специфічна дія на метал ІЕС високої густини, що полягає в істотному зниженні його опору деформації та у релаксації напружень. Таке зниження не знаходить пояснення в підвищенні середньої температури металу, тому що вона при обробці, як правило, змінюється незначно. В літературі це явище отримало назву електропластичного ефекту [7, 8].

Природа цього ефекту – ефекту негеплової дії струму – досліджена недостатньо. Однак, виходячи з наявних літературних даних, його можна визначити як специфічна дія імпульсного струму, що призводить до змін у матеріалі внаслідок мікронеоднорідного локалізованого виділення тепла на дефектах структури [4, 9], мікронеоднорідності властивостей матеріалу і мікродеоформацій по його об'єму [10], а також внаслідок безпосередньої взаємодії електронів провідності (електронного вітру) переважно з дефектами кристалічної ґратки [11]. У випадку використання оптимальних режимів обробки ІЕС зазначені причини створюють умови для розвитку непружних

деформацій (мікросувів) в області дефектів кристалічної структури, що призводить до релаксації полів мікронапруг навколо дефектів.

На макро- і мікрорівні це проявляється у підвищенні однорідності властивостей матеріалу. Про це, наприклад, свідчать дані вимірів мікротвердості металічних зразків у вихідному стані і після обробки ІЕС, що вказують на вирівнювання твердості в зразках після обробки [10]. Наслідком такої гомогенізації матеріалу і може бути підвищення його характеристик втоми, оскільки вирівнювання властивостей металічного матеріалу по його об'єму, яке відбувається в результаті обробки ІЕС, призводить до зниження темпів накопичення в матеріалі розсіяного пошкодження, а отже, на початковій стадії циклічного навантаження (після обробки ІЕС) в ньому відсутні перенапружені мікрооб'єми, в яких при подальшому циклічному навантаженні могла б локалізуватися та накопичуватися непружна деформація.

Наведені в статті експериментальні дані мають на меті підтвердити висновок про гомогенізуючу дію імпульсного струму у випадку обробки при оптимальних параметрах. Для цього було виконано дослідження з вивчення впливу обробки ІЕС на демпфуючу здатність сталей Ст3 і X17H2 та алюмінієвих сплавів Д16Т і В95, враховуючи, що остання є однією з найбільш структурночутливих характеристик конструкційних матеріалів [12, 13].

Методики обробки матеріалів ІЕС та визначення характеристик демпфування коливань. Визначення впливу ІЕС на характеристики демпфування вільних згинних коливань плоских зразків виконували з використанням методики [14]. В якості характеристики демпфуючої здатності матеріалу був прийнятий логарифмічний декремент коливань, який визначали за методом затухаючих коливань [12, 13]: спочатку збуджували резонансні згинні коливання зразка, а потім реєстрували їх затухання (рис.1). Коливальна система складалася із зразка 1 з досліджуваного матеріалу, який за допомогою клинів жорстко закріплювався в інерційних масах 2 з колонками 3 та кронштейнами 4, і які, в свою чергу, вільно підвішувались у вузлах коливань на довгих тонких сталевих струнах 5, чим забезпечувався низький рівень втрат енергії при коливаннях і, тим самим, підвищувалась точність отримуваних результатів. Розташовані на кронштейнах 4 електромагніти 6, взаємодіючи з жорстко закріпленими елементами 7 (сталевими дисками), навантажували коливальну систему, поперемінно вмикаючись протягом кожного періоду коливань. В результаті в

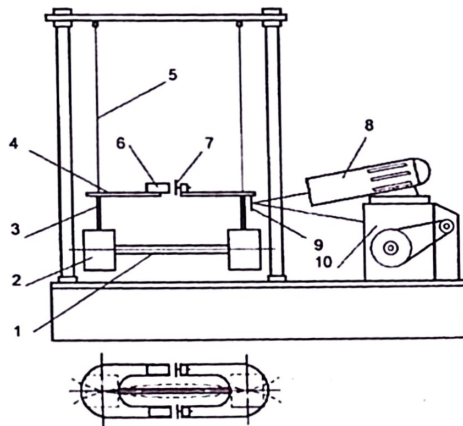


Рисунок 1 - Схема вібраційної системи для дослідження демпфування згинних коливань плоских зразків: 1 – зразок; 2 – інерційна маса; 3 – колонка; 4 – кронштейн; 5 – струна; 6 – електромагніт; 7 – сталевий диск; 8 – освітлювач; 9 – дзеркало; 10 – записуючий пристрій.

горизонтальній площині виникали циклічні, протилежні за напрямком крутильні моменти відносно осей інерційних мас (вузлів коливань), які викликали чистий циклічний згин випробуваного зразка. Живлення електромагнітів 6 здійснювалося імпульсами електричного струму з використанням відповідної схеми управління.

При проведенні експериментів амплітуду коливань зразка доводили до заданого рівня (до границі витривалості), потім збудження відключали і зразок виконував вільні згасаючі коливання за першою формою, тобто з однією півхвилею (див. нижній малюнок на рис. 1).

Ресстрацію резонансних і вільних коливань вібраційної системи проводили безконтактним способом з використанням однодзеркальної системи, що складалась з освітлювача 8, закріпленого на одній з інерційних мас дзеркала 9 та записуючого пристрою 10. Промінь світла з нерухомого освітлювача спрямовувався на дзеркало, що коливалось разом з інерційною масою і, віддзеркалившись від нього, попадав в прийомну щілину записуючого пристрою. В результаті коливальний процес ресструвався на фотопaperі, який переміщувався з заданою швидкістю в записуючому пристрої. За отриманими віброграмами вільних затухаючих коливань знаходили значення логарифмічного декременту коливань, який характеризує демпфуючу властивість випробуваного зразка в залежності від амплітуди циклічних деформацій (або напружень). Методи визначення логарифмічного декременту затухаючих коливань докладно описані в роботах [12, 13]. Максимальні амплітуди циклічних напружень, що задаються у зразку, розраховувалися за формулою:

$$\sigma = \frac{Eh}{2L} \cdot \frac{a}{R},$$

де h і L – товщина та довжина робочої частини плоского зразка, E – модуль Юнга матеріалу зразка, a – відхилення (амплітуда коливань) променя світла на віброграмі, R – відстань від дзеркала до поверхні фотопaperу в записуючому пристрої.

В дослідженнях використовували плоскі зразки, що складаються з робочої (товщиною 2 мм) і захватної (товщиною 10 мм) частин. Вивчали поведінку зразків з робочою частиною двох видів: у вигляді суцільної смуги довжиною 190 мм, перетином 2×20 мм (у випадку сталі X17H2) та у вигляді двох паралельних смуг довжиною 190 мм, перетином 2×5 мм кожна і віддалених одна від одної на 10 мм (у випадку сталі Ст3 і алюмінієвих сплавів Д16Т, В95).

При обробці ІЕС через зразок пропускали імпульси струму шляхом розряду батареї конденсаторів відповідно до методики, описаної в роботі [10]. Параметри обробки: ємність батареї 300...600 мкФ, напруга зарядки 2,5...4 кВ. Перед обробкою струмом зразок з приєднаними інерційними масами фіксували в масивній обоймі з текстоліту для запобігання можливих деформацій зразка внаслідок взаємодії струмів у ланцюзі розряду генератора.

Результати випробувань та їх аналіз. Результати випробувань зразків у вихідному стані та після обробки ІЕС наведено на рис. 2 і 3. З залежностей впливає висновок про неоднозначність впливу імпульсного струму на величину логарифмічного декременту коливань δ . Так, зразок зі сталі X17H2 після обробки струмом з максимальною амплітудою в імпульсі $I_{\max} \approx 52,2$ кА (максимальна густина струму $j_{\max} \approx 1,3$ кА/мм²) показав зниження величини δ в діапазоні напружень згину $\sigma = 40...100$ МПа, в той час, як зразок з алюмінієвого сплаву Д16Т після обробки імпульсами з $I_{\max} \approx 59,2$ кА ($j_{\max} \approx 3$ кА/мм²) показав збільшення δ в діапазоні $\sigma = 10...50$ МПа.

Перша обробка зразка зі сталі Ст3 імпульсами струму з $I_{\max} \approx 41,7$ кА ($j_{\max} \approx 2$ кА/мм²) призводить до зниження δ в діапазоні напружень $\sigma = 20...100$ МПа, повторна обробка більш потужними імпульсами струму з $I_{\max} \approx 47$ кА

($I_{\max} \approx 2,3 \text{ кА/мм}^2$) призводить до відновлення величини декременту до рівня вихідних значень. Після третьої обробки імпульсами струму з амплітудою, що відповідає первісній обробці, тобто з $I_{\max} \approx 41,7 \text{ кА}$, знову відбувається деяке зпигнення величини декременту затухаючих коливань δ в діапазоні досліджених значень амплітуди циклічних напружень згинних коливань.

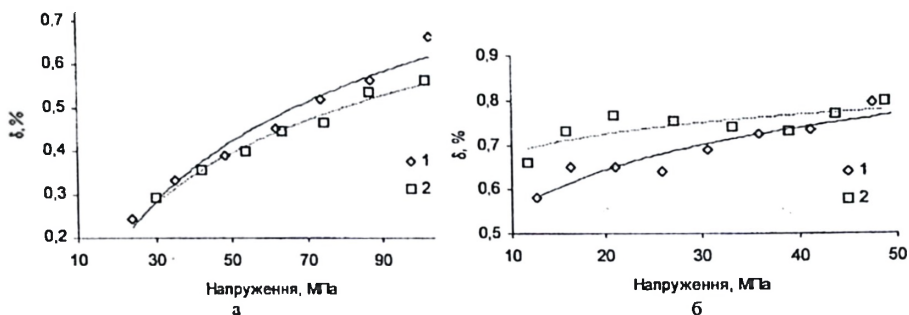


Рисунок 2 - Значення логарифмічного декременту δ в залежності від напружень для сталі X17H2 (а) і алюмінієвого сплаву Д16Т (б) при коливаннях чистого згину: 1 – вихідний стан; 2 – після обробки ІЕС.

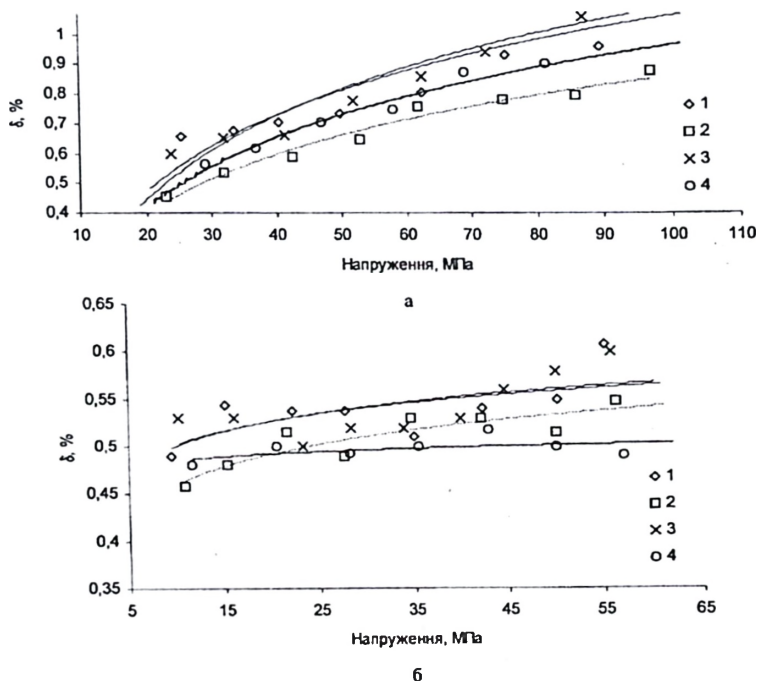


Рисунок 3 - Значення логарифмічного декременту δ в залежності від напружень для сталі Ст3 (а) і алюмінієвого сплаву В95 (б) при коливаннях чистого згину: 1 – вихідний стан; 2 – після 1-ої обробки ІЕС; 3 – після 2-ої обробки ІЕС; 4 – після 3-ої обробки ІЕС.

Поведінка зразка з алюмінієвого сплаву В95 після обробки ІЕС у дослідженому діапазоні параметрів струму аналогічна поведінці зразка зі сталі Ст3: перша обробка з $I_{\max} \approx 38,3$ кА ($j_{\max} \approx 1,9$ кА/мм²) призводить до зниження величини δ в діапазоні напружень $\sigma = 5 \dots 65$ МПа, повторна обробка більш потужними імпульсами струму з $I_{\max} \approx 45,2$ кА ($j_{\max} \approx 2,26$ кА/мм²) призводить до відновлення величини декременту оливоан до рівня початкових значень, третя обробка імпульсами струму з амплітудою, що відповідає первісній обробці, тобто з $I_{\max} \approx 38,3$ кА, викликає зниження декременту затухаючих коливань δ навіть трохи сильнішому, ніж після першої обробки. Відповідно до існуючих даних про фізичну природу розсіювання енергії при коливаннях вважається, що основним джерелом такого розсіювання в металевому полікристалічному матеріалі при його загальному деформуванні в межах пружності є локальні пластичні деформації мікрооб'ємів матеріалу, що виникають під дією напружень другого роду [12]. Такі мікропластичні деформації, що призводять до незворотних процесів, пов'язаних з втратою енергії в матеріалі при його циклічному деформуванні, в остаточному підсумку і викликають затухання вільних коливань. З точки зору дислокаційної теорії внутрішнього тертя вважається, що цей вид розсіювання енергії в матеріалі пов'язаний з рухом дислокацій.

Таким чином, чим вище ступінь затухання коливань (вище логарифмічний декремент коливань), тим більший об'єм матеріалу залучається до локального пластичного деформування. І навпаки, чим нижча величина δ , тим більший об'єм матеріалу деформується пружно, без розсіювання енергії в кристалічній ґратці, тобто без локальних зсувів у ній.

Якщо мова йде про один і той же матеріал, підданий певній обробці, то можна стверджувати, що факт зниження логарифмічного декременту коливань δ в результаті цієї обробки свідчить про впорядкування структури матеріалу, підвищення однорідності властивостей і зниження ступеня його локального мікропластичного деформування. З огляду на однозначний зв'язок між мікропластичним деформуванням матеріалу і його характеристиками втомі [15], можна зробити висновок, що такий матеріал буде краще чинити опір циклічним навантаженням.

Таким чином, з огляду на викладений вище зв'язок логарифмічного декременту коливань з характеристиками втомі матеріалу, результати виконаних досліджень (рис. 2 і 3) вказують на те, що існує принципова можливість впливати обробкою імпульсним електричним струмом певних параметрів на характеристики втомі конструкційних металічних матеріалів.

В результаті проведених досліджень впливу обробки ІЕС на демпфуючу здатність ряду металічних конструкційних матеріалів в умовах вільних згинних коливань та їх аналізу можна зробити наступні висновки:

1. При обробці імпульсним електричним струмом величина логарифмічного декременту коливань може, як збільшуватись, так і зменшуватись, в залежності від параметрів обробки струмом (наприклад, густини струму).
2. Зниження логарифмічного декременту коливань для металічних конструкційних матеріалів в результаті обробки імпульсним електричним струмом може свідчити про підвищення характеристик опору втомі матеріалів, експериментальне підтвердження чого є завданням подальших досліджень.

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. Коновалов С.В., Соснин О.И. и др. Повышение надежности изделий из среднесугеродистых сталей импульсным токовым воздействием // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2002, №3. - С.19-23.
4. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. Влияние локально неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Металлы. - 1984, №4. - С.184-187.
5. О.В.Соснин, В.Е.Громов, Э.В.Козлов. Электростимулированная малоцикловая усталость. - М.: Недра Коммуникационс Лтд, 2000. - 208 с.
6. Кузьминцев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К.Тартаковский. - Киев: Наук. думка, 1989. - 864 с.
7. Спицин В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. - М.: Наука, 1985. - 160 с.
8. Ю.В.Баранов, О.А.Троицкий, Ю.С.Авраамов, А.Д.Шляпин. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. - М.: МГИУ, 2001. - 844 с.
9. Баранов Ю.В. Физическая модель структурных изменений металлических материалов при воздействии импульсного электрического тока // Пробл. машиностр. и надежности машин. - 2000, №4. - С.57-65.
10. Степанов Г., Бабуцкий А., Чижик Г. Статистична природа впливу імпульсного електричного струму на механічні властивості металів // Вісник Тернопільського державного технічного університету. - 2005. - №2. - С. 11-17.
11. Кравченко В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // Журнал эксп. и теор. физики. - 1966, т. 51, вып. 6(12). - С. 1677-1688.
12. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник. - К.: Наукова думка. - 1971. - 375 с.
13. Писаренко Г.С., Матвеев В.В., Яковлев А.П. Методы определения характеристик демпфирования колебаний упругих систем. - К.: Наукова думка. - 1976. - 86 с.
14. Г.С.Писаренко, А.П.Яковлев, О.Е.Богинич. Методика определения характеристик демпфирования колебаний тонколистовых конструкционных материалов с вибропоглощающими слонстыми покрытиями. - Институт проблем прочности АН УССР: Информационное письмо № 102 1981. - 9 с.
15. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Ч.2 (Отв. ред. В.Т.Трошенко). - К.: Наукова думка. - 1994. - 701 с.

Одержано 27.12.2006 р.

УДК 531.3

Dr. engineering Stanislav Noga

Rzeszow University of Technology

INVERSE KINEMATICS OF A TWO WHEELED MOBILE ROBOT

In this paper the inverse kinematics problem of the two-wheeled mobile robot is considered. The sinusoidal and the circular trajectory is analyzed. The kinematic equations for arbitrary chosen point of the system are given by using classical equations of the theoretical mechanics. The kinematic parameters of motion from the solution of inverse kinematics problem are obtained.

Станіслав Нога

Технологічний університет, Жешов, Польща

ОБЕРНЕНА КІНЕМАТИКА ДВОКОЛІСНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Розглянуто обернену задачу кінематики двоколісного мобільного робота. Проаналізовано синусоїдальну і кругову траєкторії. Подано кінематичні рівняння для довільно вибраної точки системи з розв'язку оберненої задачі кінематики. Одержано кінематичні параметри руху від