УДК 621.9:537.6:539.4:004.9

Ковалевський С.В., докт. техн. наук, професор
Ковалевська О.С., канд.техн.наук, доцент
Сидюк Д.М., аспірант
Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, kovalevskii61@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

Попередні дослідження авторів показали, що механічні наноамплітудні вібрації зразків у рівномірному магнітному полі сильного (неодимового) магніту можуть спричинити зміни у структурі сталевих деталей та підвищити твердість матеріалів[1,2]. В роботі запропоновані математичні моделі щодо магнітно-резонансної обробки, які враховують магнітні, механічні та термодинамічні ефекти для оптимізації властивостей оброблюваних матеріалів, а також наведено експериментальне підтвердження їхньої практичної ефективності в реальних умовах.

Модель, що описує зміцнення матеріалу через впорядкування дефектів у структурі, може використовувати принцип суперпозиції стресів та їх релаксації. Вплив вібрацій можна розглядати як періодичне прикладання та зняття навантаження, що веде до поступової релаксації напружень навколо дефектів і, відповідно, до зменшення їхнього впливу на міцність матеріалу:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\beta t} cos\ (\omega t)\ , \tag{1}$$

де $\sigma(t)$ — миттєве напруження в матеріалі, σ_0 — початкове напруження, β — коефіцієнт релаксації, ω — кутова частота вібрацій.

Зменшення втоми можна моделювати, використовуючи модифіковану модель Палмгрена-Майнера для накопичення пошкоджень. Якщо припустити, що вібрації зменшують швидкість накопичення втомних пошкоджень, модель може виглядати наступним чином:

$$D(t) = \int_0^t \frac{dN}{N_f(\sigma(t'))} dt'\ , \tag{2}$$

де $D(t)$— ступінь втомного пошкодження, dN — кількість циклів навантаження, N_f— кількість циклів до руйнування при даному максимальному напруженні $\sigma(t')$.

Для неметалічних матеріалів, як-от полімерів, можна використовувати модель, яка враховує залежність в'язко-пружних властивостей від частоти вібрацій. Релаксація напружень в полімерах може бути описана через комплексний модуль пружності, що залежить від частоти:

$$\sigma(t) = E^*(\omega)\epsilon(t)\ , \tag{3}$$

де $E^*(\omega)$ — комплексний модуль пружності, який залежить від частоти вібрацій, $\epsilon(t)$ — деформація.

Комплексний модуль включає в себе як зсувну, так і в'язку складову, що дозволяє моделювати часові зміни деформації під впливом постійних вібрацій.

Модель, яка розглядає термодинамічні ефекти внаслідок вібрацій в магнітному полі, включає декілька кроків: від генерації тепла в матеріалі до впливу цього тепла на термічне розширення і напруження. Модель потрібно розглядати з урахуванням енергетичного балансу та механічної взаємодії між структурами матеріалу.

$$\dot{Q} = f(A, f, \rho, c_p, V), \tag{4}$$

де: $\dot{Q}$ — швидкість генерації тепла, A — амплітуда вібрацій, f — частота вібрацій, ρ — щільність матеріалу, c_p — теплоємність матеріалу, V — об'єм матеріалу.

Ця функція має враховувати, як вібрації в магнітному полі перетворюються на теплову енергію, що поглинається матеріалом.

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \,, \tag{5}$$

де: ΔL — зміна довжини матеріалу, α — коефіцієнт термічного розширення, L — початкова довжина, ΔT — зміна температури.

Зміна температури ΔT може бути зв'язана з генерацією тепла через:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{mc_p} \Delta t \,, \tag{6}$$

де m — маса матеріалу, а Δt — час впливу вібрацій.

$$\sigma_{thermal} = E \alpha \Delta T \tag{7}$$

де: $\sigma_{thermal}$ — термічні напруження, E — модуль Юнга (еластичність) матеріалу.

Надана схема впливу на пластини ріжучого інструменту CNMG 120508E-M рівномірного магнітного потоку, ініційованого в результаті резонансних коливань зразка, викликаних широкосмуговим впливом рівній амплітуди за допомогою генератора «білого шуму» в діапазоні 20 Гц … 20 кГц і п’єзо випромінювача для варіантів взаємного розташування елементів складання для експериментальних досліджень магніторезонансної обробки евтектоїдної сталі з хімічним складом: C = 0,8%; Si=0,15%; Mn=0,15%; P=0,012%; S=0,017%; Cr=0,10%; Al=0,009%; Cu=0,10% (рис.1).

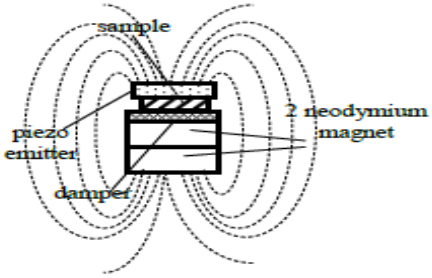

Рис. 1 – Принципові схеми розташування зразків (sample) для зміцнення, неодимових магнітів (neodymium magnet), п'єзозбудіжувача (piezo emitter) і демпфера (damper)

Додавання зразкам механічних коливань в рівномірному постійному магнітному полі дозволив максимально досягти об'ємного зміцнення зразків від 145 НВ до 197 НВ. Зразки твердого сплаву, що поміщені в магнітне поле постійного магніту, піддані резонансним коливанням, викликаним широкосмуговим впливом постійної амплітуди - «білим шумом», змінюють твердість і досягають максимального значення вже після 20…30 хвилин магніторезонансної обробки і після цього стабілізують значення твердості. Порівняльна ефективність магніторезонансної обробки зразків за представленими схемами забезпечена широкосмуговим п'єзоелектричним збудником потужністю до 5 Вт.

Список посилань

1. Ковалевський, С., Ковалевська, О. (2022). Нові можливості для обробки матеріалів у сильному магнітному полі. // Технічні науки та технології, (4(26), 7–14. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4(26)-7-14.

2. Ковалевський, С. В., Ковалевська, О. С., Пелипенко, О. О. (2022). Магніторезонансна обробка металевих немагнітних зразків матеріалів. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2022): Матеріали тез доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції (Том 2, с. 46-47). Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет. Доступно на: https://conference-chernihiv-polytechnik.com/wp-content/uploads/2023/03/Tezy-2022-Part-1-46-47.pdf .