

Ковалевський С. В.  
Семічаснова Н. С.

## ІНТЕГРАЦІЯ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНОЇ ОБРОБКИ (МРО) У ПРОЦЕСИ ВИГОТОВЛЕННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

У статті запропоновано комплексний підхід до інтеграції магнітно-резонансної обробки (МРО) у процеси гарячого та холодного штампування відповідальних деталей машин. Розроблено дванадцять аналітичних моделей, кожна з яких описує окремий етап взаємодії змінного магнітного поля з матеріалом та оснасткою: від ініціації центрів кристалізації й модифікації доменної структури до релаксації залишкових напружень, зниження густини дислокацій і мінімізації ймовірності мікроруїнувань. Показано, що безконтактне фізичне впливання МРО забезпечує локальне кероване формування дислокаційних скупчень, усунення тензорної анізотропії твердості та вирівнювання фазових неоднорідностей без необхідності додаткового термічного відпалу. Експериментальні та аналітичні результати свідчать про суттєве підвищення стабільності технологічних параметрів різання: зменшення динамічних навантажень на різучий інструмент, підвищення повторюваності розмірно-геометричних характеристик готових виробів і продовження ресурсу оснастки за рахунок уповільнення накопичення втомних пошкоджень між циклами роботи. Завдяки дії МРО до або після штампування досягається оптимальний баланс між наклепом і його релаксацією, що дозволяє підвищити пластичність матеріалу без традиційного термічного відпалу та знизити витрати на енергію. Наукова новизна полягає у поєднанні аналітичних моделей із концепцією кіберфізичних виробничих систем Індустрії 4.0. Показано, що МРО може стати ключовим елементом адаптивного виробництва: використання сенсорних даних дозволяє здійснювати кероване мікрomodифікування властивостей матеріалу в реальному часі, а цифрові моделі забезпечують прогнозування їхнього розвитку під технологічними навантаженнями. Це відкриває можливості для побудови саморегульованих технологічних ланцюгів із зворотним зв'язком, що поєднують пластичну деформацію, структурне моделювання та цифрове управління. Практична значущість роботи підтверджена можливістю значного зниження загальних виробничих витрат та енергоспоживання за рахунок скорочення термічних циклів, а також підвищення екологічної безпеки процесу. Запропонований підхід створює міцну основу для подальшої розробки інтелектуальних виробничих систем і перспективних технологій формування робочих поверхонь у машинобудуванні.

**Ключові слова:** магнітно-резонансна обробка, обробка тиском, математичне моделювання, адаптивне виробництво, інтелектуальні системи керування, Індустрія 4.0.

Необхідність підвищення якості, довговічності та структурної стабільності відповідальних деталей машин є ключовим чинником удосконалення технологічних процесів у галузі машинобудування. Серед усіх етапів виробництва саме етап формування заготовки відіграє вирішальну роль, оскільки саме на цьому етапі формуються структурно-механічні характеристики, що визначають ефективність подальшої механообробки та надійність деталі в експлуатаційних умовах [1, 2, 3].

У сучасному машинобудуванні найбільш поширеним способом формування заготовок відповідальних деталей є обробка тиском – як гаряча, так і холодна. Кожна з них має свої термомеханічні особливості та наслідки для структури матеріалу.

Традиційні методи післяформувальної обробки — нормалізація, термообробка, термомеханічне зміцнення — не забезпечують необхідної локальної керованості властивостей у критичних зонах [4]. Натомість, магнітно-резонансна обробка (МРО), що базується на дії змінного магнітного поля у резонансному режимі, є безконтактним засобом локальної модифікації мікроструктури матеріалу [5]. МРО забезпечує цілеспрямовану зміну доменної структури, густини дислокацій і фазового складу без викривлення форми або перегріву. Такий підхід відкриває нові перспективи керованого формування структури матеріалу вже під час обробки тиском.

Незважаючи на наявні публікації про вплив магнітних полів на залишкові напруження, пластичність і фазові перетворення, систематична інтеграція МРО у процеси гарячого і холодного формування залишається малодослідженою. Особливо бракує досліджень щодо створення заготовок з прогнозованими, стабільними і керованими властивостями в контексті замкнених виробничих систем.

Включення магнітно-резонансної обробки у процеси обробки тиском є критичним кроком до керування матеріалами в умовах високоточної інженерії. Це повністю відповідає цілям Індустрії 4.0 — самонавчання, інтеграція кіберфізичних систем, зворотній зв'язок [6]. Експериментальне підтвердження та впровадження концепції створюють основу для інтелектуальних, саморегульованих виробничих систем, здатних динамічно відповідати на зростаючі вимоги експлуатаційної надійності [7–10].

Наукове і прикладне обґрунтування інтеграції МРО у процес формування заготовок для відповідальних деталей машин відкриває широкі можливості. Це дозволяє підвищити повторюваність властивостей, знизити витрати на обробку та перейти до реального керування властивостями матеріалу у рамках кіберфізичних виробничих систем.

Перехід від постпроцесної корекції до динамічного структурного керування в режимі реального часу перетворює МРО з допоміжного засобу на стратегічний елемент розумного виробництва. Його здатність синхронізувати еволюцію матеріалу з процесом формування робить МРО основою майбутніх високоточних адаптивних виробничих систем.

Мета роботи – науково-обґрунтовано розробити й інтегрувати магнітно-резонансну обробку (МРО) у технологічні процеси гарячого та холодного штампування відповідальних деталей машин шляхом формалізації дванадцяти аналітичних моделей механізмів дії МРО на мікроструктурні, фазові та напружено-деформовані стани матеріалу й оснастки, а також оцінити їхній вплив на стабільність різальних процесів, ресурс інструментів та відповідність парадигмі Індустрії 4.0.

У процесі гарячого штампування сталева заготовка піддається деформації за температур від 1100 до 1250 °С (для титанових сплавів — 850–950 °С), що забезпечує високу термопластичність і дає змогу досягнути значних деформацій за рахунок термоактиваційних процесів у матеріалі. Водночас контакт із холодною оснасткою створює потужні температурні градієнти, які призводять до нерівномірного розподілу тепла й напружень у об'ємі заготовки та в робочих зонах штампів. Довготривале утримання аустенітного стану при максимальних температурах спричиняє формування грубозернистої структури, що знижує втомну міцність, ускладнює оброблюваність і прискорює знос інструменту. З метою тонкого керування розміром зерен перед деформацією застосовують магнітно-резонансну обробку (МРО), яка активує енергію зародження центрів кристалізації й стимулює утворення великої кількості дрібних зерен у зоні деформації. Нерівномірна деформація, обумовлена температурними градієнтами, призводить до неоднорідної мікроструктури, що викликає нестабільність твердості та геометричної точності виробу. Під час охолодження після штампування застосування МРО у резонансному режимі сприяє локальній релаксації структурних градієнтів, вирівнюючи енергетичний ландшафт і зменшуючи внутрішню мікроструктурну неоднорідність. Контраст між температурами оточення та поверхні заготовки створює залишкові термодформаційні напруження, які проявляються у вигляді мікротріщин, викривлень і деформацій при знятті залишкових напружень. Застосування стабілізуючої МРО після формування забезпечує спрямоване зниження внутрішніх напружень за рахунок резонансної вібрації доменів, що мінімізує післяопераційні деформації та виникнення мікротріщин. Орієнтація зерен уздовж напрямку пластичної деформації породжує механічну анізотропію, яка знижує однорідність властивостей за різних напрямків навантаження. МРО застосовують безпосередньо до або під час деформації для переорієнтації доменів і стабілізації кристалічної текстури, що вирівнює механічні властивості та підвищує стійкість матеріалу до навантажень. Робочі поверхні штампів зазнають мікротріщин і зносу через циклічні теплові та механічні навантаження, що призводить до порушення форми й нерівномірного розподілу контактних зусиль. МРО між робочими циклами інструментів знижує термонапруження та підвищує поверхневу міцність за рахунок динамічної зміни мікроструктури в приповерхневій зоні. У зонах пікових навантажень складка геометрія робочих поверхонь може деформуватися внаслідок високих термомеханічних напружень і недостатнього охолодження. Локальне застосування МРО для стабілізації структури в цих критичних ділянках запобігає геометричним відхиленням і уповільнює зношування, забезпечуючи тривалу точність роботи інструменту.

Таким чином, впровадження МРО на всіх стадіях гарячого штампування дозволяє комплексно керувати мікроструктурою, внутрішніми напруженнями та механічними властивостями матеріалу й оснастки, що суттєво підвищує якість, стабільність і довговічність технологічного циклу.

З огляду на поставлену мету – створити надійну аналітичну платформу для інтеграції МРО в технологічний цикл штампування – були сформовані дванадцять взаємопов'язаних математичних моделей, кожна з яких детально описує окремий фізико-технологічний механізм впливу резонансного магнітного поля на матеріал або інструмент. Ці моделі дозволяють кількісно оцінити, яким чином МРО забезпечує кероване формування мікроструктури, релаксацію напружень, регулювання дислокаційного стану та стабілізацію приповерхневих шарів без застосування додаткових термічних циклів. Завдяки цьому можна не тільки передбачити розвиток внутрішніх процесів у заготовці та оснастці, а й оптимізувати режими обробки з метою підвищення точності, довговічності й енергоефективності виробництва в рамках Індустрії 4.0.

Нижче наведено послідовний виклад кожної моделі з фізико-технологічним обґрунтуванням, формалізацією ключових закономірностей та інтерпретацією результатів. Такий підхід дає змогу реалізувати адаптивні виробничі системи, в яких цифрові моделі і сенсорні дані працюють у замкненому циклі керування властивостями матеріалу в реальному часі. Перша модель розкриває механізм ініціації центрів кристалізації під дією МРО перед гарячою деформацією.

При застосуванні МРО до гарячої деформації резонансна дія змінного магнітного поля активує кристалографічні дефекти (вакансії, дислокації), що призводить до зниження енергії активації зародження нових зерен під час пластичної деформації. Математично швидкість зародження центрів кристалізації  $J$  залежить від величини енергії утворення критичного зародка  $\Delta G$  і магнітного збурення  $H(t)$  і задається співвідношенням:

$$J(H) = J_0 \cdot \exp(-(\Delta G - \mu H(t)^2)/kT), \quad (1)$$

де  $J_0$  — передекспоненційний множник,  $\Delta G$  — енергія утворення критичного зародка,  $\mu$  — магнітна сприйнятливості матеріалу,  $H(t) = H_0 \cdot \sin(\omega t)$  — гармонічне магнітне поле. Реальна кількість активованих зародків визначається середнім по циклу коливань значенням  $\bar{J}$ :

$$\bar{J} = \frac{1}{T} \int_0^T J_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G - \mu H_0^2 \sin^2(\omega t)}{kT}\right) dt, \quad (2)$$

який аналітично виражається через модифіковану функцію Бесселя:

$$\bar{J} = J_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right) J_0\left(\frac{\mu H_0^2}{2kT}\right). \quad (3)$$

Оскільки функція  $J_0(\cdot)$  є монотонно зростаючою, це свідчить про істотне підвищення густини центрів кристалізації та, як наслідок, зменшення середнього розміру зерен після гарячої деформації.

Після гарячої деформації в матеріалі формуються нерівномірні структурні градієнти твердості та фазового складу, і МРО забезпечує їхню мікрівбраційну демагнітизацію з одночасним локальним вивільненням енергії для зменшення цих неоднорідностей. Фазове вирівнювання описується реакційно-дифузійним рівнянням із доданим резонансним збуренням:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \nabla^2 \phi - \frac{\partial F(\phi)}{\partial \phi} \phi + A \sin(\omega t), \quad (4)$$

де  $D$  — коефіцієнт дифузії фазового стану,  $F(\phi)$  — двогорбий потенціал Гінзбурга–Ландау, а  $A$  — амплітуда резонансного збурення. При наближенні частоти збурення до власної резонансної  $\omega \approx \omega_0$  спостерігається критичне зниження локальних енергетичних бар'єрів, що прискорює перехід системи до однорідного фазового стану та вирівнює властивості матеріалу по об'єму.

Після формування в заготовці виникають залишкові напруження  $\sigma_r$ , які можуть релаксуватися під дією вібромагнітного ефекту. Цей процес описується рівнянням Максвелла–Зенера для в'язко-пружного тіла з урахуванням магнітної модифікації:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau(H)} = E \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (5)$$

де:  $\tau(H) = \tau_0 \cdot \exp(-\alpha H^2)$  – час релаксації, що зменшується зі зростанням інтенсивності поля  $H$ ,  $E$  – модуль пружності,  $\varepsilon$  – деформація. Зменшення  $\tau(H)$  призводить до пришвидшеної релаксації напружень без нагрівання, а в часовому вигляді процес описується експоненціальним спадом:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau(H)}\right). \quad (6)$$

Завдяки цьому МРО підвищує швидкість переходу системи до стійкого стану.

Під час холодного деформування в матеріалі накопичується висока густина дислокацій  $\rho_d$ , що призводить до наклепу, підвищення твердості та зростання крихкості. Застосування МРО викликає автоколивання магнітних доменів, які сприяють розгортанню частини дислокацій і їх анігіляції. Еволюція миттєвої густини дислокацій  $\rho_d(t)$  описується рівнянням

$$\frac{d\rho}{dt} = \dot{\rho}_{\text{наклеп}} - \dot{\rho}_{\text{релаксація}}(H), \quad (7)$$

де  $\dot{\rho}_{\text{наклеп}} = K \cdot \varepsilon^n$  та  $\dot{\rho}_{\text{релаксація}}(H) = C \cdot \rho_d \cdot H^2 \cdot \sin^2(\omega t)$ ,  $K$  і  $n$  — константи наклепу при пластичній деформації,  $C$  — коефіцієнт релаксації,  $H(t) = H_0 \sin(\omega t)$ .

Середнє значення густини дислокацій після циклу МРО визначається як

$$\rho_d(t) = \rho_{d0} \cdot \exp\left(-\frac{CH_0^2}{2} t\right) + \frac{2K\varepsilon^n}{CH_0^2} \left(1 - \exp\left(-\frac{CH_0^2}{2} t\right)\right). \quad (8)$$

При тривалій дії поля встановлюється динамічний баланс між накопиченням наклепу та його релаксацією, причому вищі амплітуди  $H_0^2$  зменшують асимптотичну густину  $\rho_d(t)$ . Оптимальний режим МРО дозволяє значно знизити наклеп без термічної обробки, зменшуючи твердіння і підвищуючи пластичність матеріалу без фазових змін.

Поверхневі шари після холодного штампування характеризуються тензорною анізотропією твердості, що викликає небажані вібрації під час механічної обробки. Для кількісного опису вводять тензор твердості  $H$  з компонентами  $H_{ij}$ , а величина анізотропії визначається як:

$$\Delta H(t) = \sqrt{\sum_{i,j} (H_{ij} - \bar{H})^2}, \quad (9)$$

де  $\bar{H}$  — середнє значення компонент тензора. Під дією МРО відбувається демагнітизація доменів і вирівнювання мікроструктури, що призводить до експоненціального зменшення анізотропії за законом

$$\frac{d}{dt} \Delta H(t) = -\gamma \cdot H_0^2 \cdot \Delta H(t), \quad (10)$$

де  $\gamma$  — коефіцієнт ефективності резонансної релаксації,  $H_0$  — амплітуда магнітного поля. Аналітичний розв'язок цієї рівняння дає

$$\Delta H(t) = \Delta H_0 \cdot \exp(-\gamma H_0^2 t), \quad (11)$$

що свідчить про експоненціальну швидкість зниження анізотропії. Навіть короточасна дія МРО перед різанням значно підвищує стабільність процесу, зменшуючи амплітуду динамічних коливань і продовжуючи ресурс ріжучого інструменту.

Багаторазові термомеханічні цикли спричиняють накопичення мікропошкоджень у матрицях і пуансонах, тоді як застосування МРО дозволяє релаксувати внутрішні напруження та зміцнювати приповерхневу зону інструменту. Акумуляване пошкодження  $D(t)$  описується рівнянням:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{N_f(\sigma)} - \eta(H_0^2) \cdot D(t), \quad (12)$$

де  $N_f(\sigma)$  – кількість циклів до руйнування при навантаженні  $\sigma$ , а  $\eta(H_0^2)$  – швидкість зворотного процесу відновлення, пропорційна квадрату амплітуди поля. Аналітичний розв’язок цього рівняння має вигляд:

$$D(t) = D_0 \cdot \exp(-\eta H_0^2 t) + (1 - \exp(-\eta H_0^2 t)) \cdot \frac{1}{\eta H_0^2 N_f}. \quad (13)$$

Завдяки цьому часткова «відкатка» пошкоджень між циклами забезпечує суттєве продовження ресурсу оснастки без її демонтажу, що є принципово новим підходом до експлуатаційного зміцнення.

У холодному штампуванні заготовки піддаються пластичній деформації при температурах, що зазвичай не перевищують 20–200 °С (тобто менше 0,3 температури плавлення матеріалу), що значно обмежує їхню пластичність і призводить до накопичення наклепу та перенаклепу. Оскільки в таких умовах не відбуваються фазові перетворення, початкова метастабільна мікроструктура зберігається, однак висока густина дислокацій, що виникає без рекристалізації, викликає значне підвищення твердості та крихкості заготовки й утруднює подальшу механообробку.

Внаслідок нерівномірного розподілу пластичних напруг у товщі матеріалу формуються залишкові напруження, що призводять до тріщин і погіршення оброблюваності поверхонь. Локальні мікрodefekти — пори, ламання зерен — виникають через перевищення меж локальної пластичності, підвищують ризик руйнування при експлуатаційному навантаженні. Підвищений контактний тиск і тертя в зоні формоутворення спричиняють поверхневе зміцнення за рахунок наклепу, що, своєю чергою, породжує вібрації та нестабільність при наступному різанні. Інструментальна оснастка на низьких температурах піддається багаторазовим механічним циклам, що викликають втомне руйнування, тріщини у зонах концентрації напруг та аварійні відмови, а також мікропошкодження поверхні (злипання, мікрозрізання, знос), які знижують точність виготовлення заготовок.

Застосування магнітно-резонансної обробки (МРО) у процесі холодного штампування дозволяє комплексно усунути ці проблеми: у ході або безпосередньо після формування заготовки МРО сприяє зниженню густини дислокацій, що зменшує наклеп і підвищує пластичність без додаткового термічного відпалу; послідовне застосування МРО після штампування викликає релаксацію залишкових напружень за рахунок локальної вібромагнітної деформації, усуваючи тріщини і покращуючи оброблюваність; попередня МРО стабілізує матеріал, мінімізуючи ймовірність мікроруйнувань і зменшуючи дефектність; перед механообробкою МРО вирівнює тензорну анізотропію поверхневого шару, знижуючи вібрації й підвищуючи стабільність різального процесу; періодична МРО для оснастки запобігає накопиченню втомних пошкоджень, продовжуючи ресурс пуансонів і матриць без демонтажу; а локальне МРО робочих поверхонь інструменту покращує адгезію функціональних покриттів, зменшує знос і забезпечує високу точність наступних операцій. Таким чином, інтеграція МРО в холодне штампування відкриває шлях до створення адаптивних виробничих систем із високою довговічністю, стабільністю та енергоефективністю.

Під час холодного штампування без рекристалізації в сталі накопичується висока густина дислокацій  $\rho_d$ , що спричиняє наклеп, підвищену крихкість і погіршену оброблюваність. Магнітно-резонансна обробка викликає автоколивання магнітних доменів, які стимулюють розслаблення дислокаційних структур. Еволюція миттєвої густини дислокацій описується рівнянням:

$$\frac{d\rho_d}{dt} = K \cdot \dot{\epsilon} - C \cdot \rho_d \cdot H_0^2 \cdot \sin^2(\omega t), \quad (14)$$

де  $K \cdot \dot{\varepsilon}$  — швидкість накопичення дислокацій під дією пластичної деформації, а  $C \cdot \rho_d \cdot H_0^2 \cdot \sin^2(\omega t)$  — швидкість їхньої релаксації під впливом МРО з амплітудою поля  $H_0$ . Інтегроване рішення для середнього значення густини дислокацій має вигляд:

$$\langle \rho_d(t) \rangle = \rho_{d0} \cdot e^{-\frac{CH_0^2 t}{2}} + \frac{2K\dot{\varepsilon}}{CH_0^2} \left( 1 - e^{-\frac{CH_0^2 t}{2}} \right). \quad (15)$$

Зі зростанням інтенсивності поля  $H_0$  динамічний баланс між накопиченням наклепу та його релаксацією досягається швидше, що дозволяє керувати твердінням матеріалу без застосування традиційного термічного відпалу.

Після холодного штампування в заготовці виникають залишкові напруження через нерівномірний розподіл пластичних зусиль, і магнітно-резонансна обробка дозволяє їх ефективно зменшити без застосування нагріву. Релаксацію напружень описує модифіковане рівняння Зенера–Максвелла для в'язко-пружного середовища з магнітною залежністю часу релаксації:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau(H)} = E \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (16)$$

де  $\tau(H) = \tau_0 \cdot e^{-\alpha H_0^2 t}$  — час релаксації, який зменшується зі зростанням інтенсивності поля  $H_0$ ,  $E$  — модуль пружності,  $\varepsilon$  — деформація. Для випадку сталої деформації рішення рівняння набуває вигляду експоненційного закону:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau(H)}}. \quad (17)$$

Зниження  $\tau(H)$  під дією змінного магнітного поля прискорює релаксацію залишкових напружень, що дозволяє уникнути традиційного термічного відпалу та забезпечує стабільність геометричних розмірів і покращення механічних властивостей без додаткових енерговитрат.

Перед холодним штампуванням локальні мікрodefекти (пори, нестійкі зерна) підвищують ризик утворення тріщин, тоді як попередня МРО здатна структурно стабілізувати матеріал до деформації. Позначивши  $P_d(t)$  як ймовірність виникнення критичного дефекту, динаміку дефектності описує рівняння

$$\frac{dP_d}{dt} = \lambda \cdot (1 - P_d) - \beta H_0^2 \cdot P_d, \quad (18)$$

де  $\lambda$  — швидкість накопичення дефектів у вихідному матеріалі, а  $\beta H_0^2$  — швидкість їхньої релаксації під дією МРО. Аналітичне рішення цієї моделі має вигляд

$$P_d(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \beta H_0^2} + \left( P_{d0} - \frac{\lambda}{\lambda + \beta H_0^2} \right) e^{-(\lambda + \beta H_0^2)t}. \quad (19)$$

Застосування МРО до початку деформації знижує початкову ймовірність руйнування, вирівнюючи мікроструктуру матеріалу та мінімізуючи порогові дефекти.

Після холодного формування поверхневий тензор твердості  $H$  часто має значну анізотропію, що ускладнює стабільне проведення механообробки. Динаміка зменшення цієї анізотропії описується диференціальним рівнянням

$$\frac{d\Delta H}{dt} = -\gamma \cdot H_0^2 \cdot \Delta H, \quad (20)$$

де  $\Delta H$  — міра тензорної анізотропії,  $H_0$  — амплітуда магнітного поля, а  $\gamma$  — коефіцієнт ефективності резонансної релаксації. Розв'язок цього рівняння має вигляд

$$\Delta H(t) = \Delta H_0 \cdot e^{-\gamma H_0^2 t}, \quad (21)$$

що демонструє експоненційне зменшення анізотропії під дією МРО. Такий механізм вирівнювання жорсткості поверхневого шару істотно підвищує стабільність різального процесу та знижує амплітуду навантажувальних коливань інструменту.

Інструментальна оснастка в процесі експлуатації піддається багаторазовим механічним навантаженням, внаслідок чого в ній накопичуються втомні пошкодження. Періодичне застосування МРО дозволяє відновлювати структуру приповерхневої зони та уповільнювати цей процес. Акумулятивне пошкодження  $D(t)$  описується рівнянням

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{N_f(\sigma)} - \eta H_0^2 \cdot D, \quad (22)$$

де  $N_f(\sigma)$  — число циклів до руйнування при навантаженні  $\sigma$ ,  $\eta H_0^2$  — швидкість відновлення, пропорційна квадрату амплітуди магнітного поля. Аналітичне рішення цього рівняння має вигляд:

$$D(t) = D_0 \cdot e^{-\eta H_0^2 t} + (1 - e^{-\eta H_0^2 t}) \cdot \frac{1}{\eta H_0^2 N_f}. \quad (23)$$

Регулярна дія МРО зменшує швидкість накопичення пошкоджень, що сприяє значному продовженню ресурсу оснастки без необхідності її демонтажу.

Зношення та мікрорізи порушують цілісність поверхонь штампів, тоді як застосування МРО покращує мікроструктуру приповерхневого шару та підвищує адгезійні властивості функціональних покриттів. Позначивши  $A(t)$  як коефіцієнт адгезії, його розвиток у часі описується рівнянням:

$$\frac{dA}{dt} = \kappa H_0^2 \cdot (1 - A), \quad (24)$$

де  $\kappa$  — константа ефективності магнітної релаксації,  $H_0$  — амплітуда магнітного поля.

Аналітичне рішення цього рівняння має вигляд:

$$A(t) = 1 - (1 - A_0) \cdot e^{-\kappa H_0^2 t}, \quad (25)$$

що показує, що чим вища інтенсивність МРО, тим швидше поверхня досягає максимальної адгезійної здатності до функціонального покриття.

Інтеграція магнітно-резонансної обробки у технологічні процеси виготовлення відповідальних деталей машин відкриває нову парадигму цілеспрямованого формування мікроструктури та фізико-механічних властивостей у ході як гарячого, так і холодного штампування. У режимі гарячого штампування резонансна дія змінного магнітного поля активує утворення центрів кристалізації за рахунок зниження енергії активації  $\Delta G$ , що математично описується законом (1). Це сприяє формуванню дрібнозернистої структури, посиленню втомної міцності та стабільності геометрії деталі. Паралельно в фазових системах із неоднорідною структурою процес вирівнювання фазових градієнтів описується реакційно-дифузійним рівнянням із резонансним збуренням (4), що забезпечує однорідний фазовий стан у матеріалі.

У холодному штампуванні накопичується надмірна густина дислокацій  $\rho_d$ , яка обумовлює наклеп та зниження пластичності. МРО стимулює релаксацію дислокацій через доменні автоколивання, що описується рівнянням (14). Такий механізм дозволяє знизити твердість без термічного відпалу та покращити оброблюваність. Зниження ймовірності мікроруйнувань досягається також попереднім впливом МРО за моделлю (18), що вирівнює мікроструктуру й мінімізує порогові дефекти.

Припливи МРО істотно продовжують ресурс оснастки: релаксація втомних напружень та модифікація приповерхневої структури описуються моделлю акумуляції пошкодження (22) з рішенням (23), що дозволяє відновлювати структурну цілісність без демонтажу інструмента.

Ключовим аспектом є також модифікація поверхневого шару матеріалу перед чи після деформації: усунення тензорної анізотропії твердості відбувається за формулами (20) і (21), що забезпечує стабільність різального процесу та зниження коливань. Релаксація залишкових напружень після холодного штампування підкоряється модифікації рівняння Зенера-Максвелла (16) з рішенням (17), що унеможливорює нагрівальні цикли та підвищує точність остаточної геометрії.

У кінцевому підсумку МРО виступає інтелектуальним мікромодифікатором, який синхронізує зміни мікроструктури з технологічними етапами, забезпечуючи комплексне поліпшення якості заготовок і ефективність наступних операцій. Такий підхід дозволяє створювати саморегульовані виробничі ланцюги з цифровим зворотним зв'язком і реалізувати концепцію Smart Manufacturing у межах Індустрії 4.0.

## ВИСНОВКИ

У цьому дослідженні досягнуто поставленої мети — науково обґрунтувати та реалізувати кероване формування мікроструктури заготовок машинобудівних деталей через інтеграцію магнітно-резонансної обробки (МРО) у процеси гарячого і холодного штампування. Для цього було розроблено й детально проаналізовано дванадцять аналітичних моделей, які описують ключові фізичні механізми МРО: активацію центрів кристалізації, релаксацію залишкових напружень, регулювання густини дислокацій, зниження ймовірності мікроруйнувань, вирівнювання тензорної анізотропії твердості та уповільнення накопичення втомних пошкоджень в оснастці. Запропоновані моделі дозволяють передбачати вплив МРО на кожному технологічному етапі, забезпечуючи цілеспрямовану модифікацію властивостей матеріалу без застосування додаткового нагріву та термічного відпалу.

Експериментальні й аналітичні результати підтвердили, що МРО суттєво знижує структурні й механічні дефекти (залишкові напруження, наклеп і фазову неоднорідність) та підвищує стабільність процесів різання, зменшує зусилля й знос інструменту, а також підвищує повторюваність розмірно-геометричних характеристик готових виробів. Застосування МРО перед і після пластифікації та перед механообробкою забезпечує точніше контрольований баланс між наклепом і його релаксацією, вирівнювання поверхневої анізотропії й оптимальне зниження залишкових напружень, що разом підвищує довговічність як заготовок, так і інструменту.

Інтеграція МРО у виробничий цикл відповідає вимогам Індустрії 4.0, адже поєднує цифрові моделі з сенсорним зворотним зв'язком для адаптивного керування властивостями матеріалу в реальному часі. Отримані результати закладають міцну теоретичну та практичну основу для подальшої розробки інтелектуальних виробничих систем, здатних самостійно регулювати параметри штампування й обробки з метою забезпечення високої ефективності, енергоощадності й екологічної безпеки сучасного машинобудування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. He X., Welo T., Ma J. In-process monitoring strategies and methods in metal forming: A selective review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. 138, pp. 100–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.011>.
2. La Monaca A., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte D. A., Hardy M. C., Clare A. T. Surface integrity in metal machining. Part II: Functional performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. 164. Article 103718. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2021.103718>.
3. Ma J., Tang X., Hou Y., Li H., Lin J., Fu M. W. Defects in metal-forming: formation mechanism, prediction and avoidance // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2025. 207. Article 104268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2025.104268>.
4. Zhao J., Jiang Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*. 2018. 94, pp. 174–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.01.006>.
5. Kovalevskyy S. V., Kovalevska O. S., Sidiuk D. M. Modeling the effects of magnetic resonance processing of materials and its experimental validation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI," Series: Technologies in Mechanical Engineering*: 2024. 2 (10), pp. 9–14. DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.2\(10\).02](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.2(10).02). (in Ukrainian).
6. Mourtzis D., Angelopoulos J., Panopoulos N. 3.02 – Industry 4.0 and smart manufacturing. *Comprehensive Materials Processing*. 2nd ed. / ed. by Saleem Hashmi. Elsevier. 2024, pp. 14–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00010-8>.
7. Chen J., Zhang Z., Wang L., Tang D., Cai Q., Chen K. Self-adaptive production scheduling for discrete manufacturing workshop using multi-agent cyber physical system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. 150. Article 110638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110638>.
8. Kosse S., Betker V., Hagedorn P., König M., Schmidt T. A semantic digital twin for the dynamic scheduling of Industry 4.0-based production of precast concrete elements. *Advanced Engineering Informatics*. 2024. 62. Part B. Article 102677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102677>.