УДК 519.711+ 621.923.6

А.В. УСОВ, Ю.І. ЗАЙЧИК, М.В. САВІН, Ю.Є. СІКІРАШ
Національний університет «Одеська політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ДЕФЕКТІВ У ФЕРОМАГНІТНИХ ВИРОБАХ НА ЯКІСТЬ ОБРОБКИ НА ФІНІШНИХ ОПЕРАЦІЯХ

Для забезпечення якості оброблюваних поверхонь необхідно за функціональними зв'язками між фізико-механічними властивостями матеріалів і параметрами на фінішних операціях підбирати такі режими обробки й характеристики інструменту, щоб поточні значення температури шліфування T (x, y, τ) і теплового потоку q (y, τ) напружень $\sigma_{p\,max}$ і сил шліфування PY, PZ, коефіцієнта інтенсивності K1 (S, α, $\sigma_{p\,max}$) не перевищували їхніх питомих значень, для дефектів визначених геометричних розмірів, що містяться в поверхневому шарі й мають спадкоємний характер гарантувати необхідну якість робочих поверхонь виробів. У роботі розглянута математична постановка завдання з виявлення дефектів у феромагнітних деталях від попередніх операцій за їх намагнічування. Отримано математичні вирази для оцінювання геометричної форми та глибини розміщення дефекту на поверхні деталі за результатам вимірювання розподілу магнітної індукції на її поверхні. Механізм утворення технологічних тріщин на фінішних операціях поверхні деталей із фотокерамічних матеріалів розглядається з позицій гіпотези про «найслабшу» ланку, яку розуміють як спадкоємний дефект, розмір якого вибирається за критерій бездефектної обробки. Отримані аналітичні умови не розвинення структурних дефектів у магістральні тріщини, які залежать від коефіцієнта тріщиностійкості, фізико-механічних характеристик, а також від значення контактної температури ТК обробки, яка визначається режимною частиною. У результаті виконаних досліджень створено інформаційне забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення, що полягає в установленні розрахункових залежностей щодо визначення впливу спадкових дефектів, сформованих від попередніх операцій, на тріщиностійкість поверхневого шару на фінішних операціях, технологічних умов обробки з урахуванням накопичених пошкоджень і неоднорідностей у поверхневому шарі деталей із матеріалів і сплавів, особливо схильних до тріщиноутворення у процесі обробки, що має велике народногосподарське значення для зменшення дефектів на фінішних операціях і покращення експлуатаційних властивостей деталей машин.

Ключові слова: *спадкоємний дефект, тріщиноутворення, фінішна операція, феромагніти моделювання, аналітичні залежності.*

A.V. USOV, YU.I. ZAICHIK, M.V. SAVIN, YU.YE. SIKIRASCH
Odessa National Polytechnic University

MODELING THE IMPACT OF DEFECTS IN FERROMAGNETIC PRODUCTS ON THE QUALITY OF PROCESSING IN FINISHING OPERATIONS

To ensure the quality of processed surfaces, it is necessary, based on the functional relationships between the physical and mechanical properties of materials and parameters during finishing operations, to select machining conditions and tool characteristics such that the current grinding temperature values T (x, y, τ), thermal flux q (y, τ), maximum stresses $\sigma_{p\,max}$, grinding forces PY, PZ, and intensity coefficient K1 (S, α, σ_{max}) do not exceed their specific values. These values should consider defects of certain geometric dimensions located in the surface layer, having an inherited nature, thus ensuring the required quality of the product's working surfaces. This study addresses the mathematical formulation of the problem of detecting defects in ferromagnetic components resulting from previous operations during their magnetization. Mathematical expressions were derived to assess the geometric shape and depth of defect placement within the surface of a component based on measurements of magnetic induction distribution on its surface. The mechanism of technological crack formation during finishing operations on surfaces of ferro ceramic materials is considered from the viewpoint of the "weakest link" hypothesis, defined as an inherited defect whose size serves as a criterion for defect-free processing. Analytical conditions for preventing structural defects from developing into main cracks were established. These conditions depend on fracture toughness, physical and mechanical characteristics, and the contact temperature TK during processing, determined by operational parameters. As a result of the research informational support was developed for technological capabilities to achieve defect-free processing of products made from materials prone to cracking. This support involves establishing calculation dependencies to determine the influence of inherited defects formed during previous operations on the crack resistance of the surface layer during finishing operations. It includes technological processing conditions that account for accumulated damages and inhomogeneities in the surface layer of parts made from materials and alloys particularly susceptible to crack formation. This development holds significant economic importance by reducing defects in finishing operations and enhancing the operational properties of machine parts.

Key words: *inherited defect, crack formation, finishing operation, ferromagnetic modeling, analytical dependencies.*

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22

Постановка проблеми

Для якісної обробки деталей із феромагнітних матеріалів на фінішних операціях необхідно мати інформацію про наявність у поверхневому шарі спадкоємних дефектів, розміри та глибина залягання яких впливають на тріщиноутворення на оброблюваних поверхнях під дією термомеханічних явищ, що супроводжують вказані операції. Магнітні методи контролю якості феромагнітних матеріалів і деталей із них є одними з найбільш поширених видів дефектоскопії [1]. У їхній основі лежить реєстрація магнітного поля на поверхні деталі внаслідок наявності дефекту. Індикаторами поля можуть бути датчики Холла, магнітні діоди, магнітна стрічка, як проміжний носій інформації. Після запису на магнітну стрічку зчитування інформації виконується за допомогою індукційних головок. Методи магнітного контролю потребують обов'язкового намагнічування деталей і пошуку на їхніх поверхнях незначних магнітних полів, що називають полями розсіювання дефекту [2; 3]. Такими засобами перевіряють феромагнітні лопатки турбін, вали, зубчасті колеса й інші відповідальні деталі машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі розглянута математична постановка завдання з виявлення дефектів у феромагнітних деталях під час їх намагнічування. Отримано математичні вирази для оцінювання геометричної форми та глибини розміщення дефекту під поверхнею деталі за результатами вимірювання розподілу магнітної індукції на її поверхні.

Під час намагнічування феромагнітних деталей змінним струмом дефект, який залягає у глибині деталі немагнітного матеріалу, спотворює картину магнітного поля і частково витісняє його над поверхнею деталі. Було поставлене таке завдання: за результатами вимірювання розподілу величини індукції магнітного поля на поверхні деталі й задання величини індукції магнітного поля намагнічування, розрахувати глибину розміщення і дати оцінку форми дефекту під поверхнею деталі.

Розглянемо математичні основи поставленого завдання. На рис. 1 схематично показано розміщення під поверхнею деталі із феромагнітного матеріалу на глибині h дефекту циліндричної форми радіусом R. Деталь намагнічується джерелом магнітного поля. Зазвичай дефекти мають форму витягнутого вздовж однієї осі еліпса. Якщо намагнічувати вздовж цієї осі, то магнітне поле розсіювання буде незначним порівняно з намагнічуванням поперек осі. Тому важливо встановити найбільш ефективний напрямок намагнічування. Опір дефекту магнітному полю намагнічування повинен бути найбільш можливим. Тому за розрахункову модель вибрано циліндр, що чинить опір магнітному полю намагнічування, розтином якого є круг (рис. 1).

Магнітна індукція магнітного поля намагнічування B_0 задається джерелом намагнічування. Магнітна проникність матеріалу деталі μ_F. Необхідно встановити розподіл індукції магнітного поля, що витісняється дефектом на поверхню деталі. Поставлене завдання описується диференціальним рівнянням Лапласа, яке в полярних координатах для векторного магнітного потенціалу $A(\varphi, r)$ має вигляд [4]:

$$\frac{\partial^2 A(\varphi, r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial A(\varphi, r)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 A(\varphi, r)}{\partial \varphi^2} = 0 . \quad (1)$$

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22

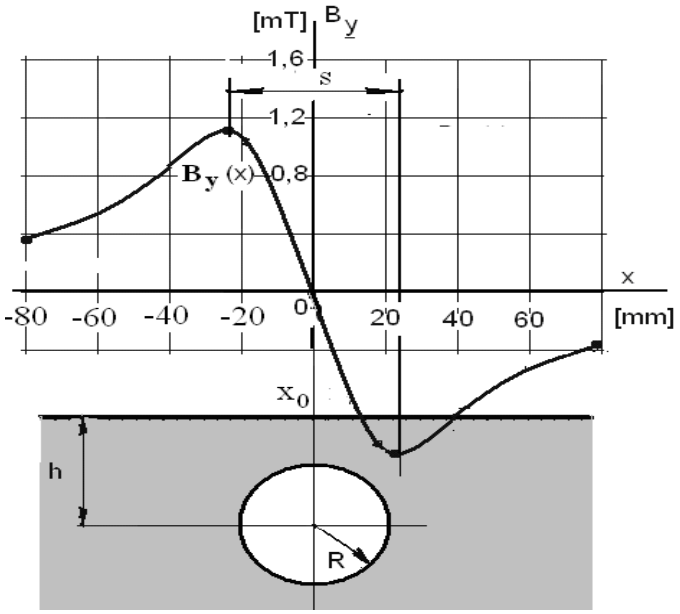

Рис. 1. Розподіл нормального складника вектора магнітної індукції $\vec{B}_y(x)[mT]$ на поверхні деталі вздовж осі $x,[mm]$ від центра дефекту

Розв'язання поставленої задачі отримано з використанням інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду та принципу дзеркальних відображень [5; 6]. Спочатку розглянемо задачу без урахування впливу поверхні деталі. Дефект циліндричної форми розташований у необмеженому феромагнітному просторі (рис. 2).

У полярних координатах вираз для векторного магнітного потенціалу будемо шукати так: $A(\varphi,r)=C(\varphi)\cdot r+\frac{D(\varphi)}{r}$, де $C(\varphi)$ і $D(\varphi)$ – невідомі функції аргументу φ. Для області, зайнятої дефектом, запишемо:

$$A_1(\varphi,r)=C_1(\varphi)\cdot r+\frac{D_1(\varphi)}{r}, \tag{2}$$

для області, зайнятої феромагнетиком:

$$A_2(\varphi,r)=C_2(\varphi)\cdot r+\frac{D_2(\varphi)}{r}, \tag{3}$$

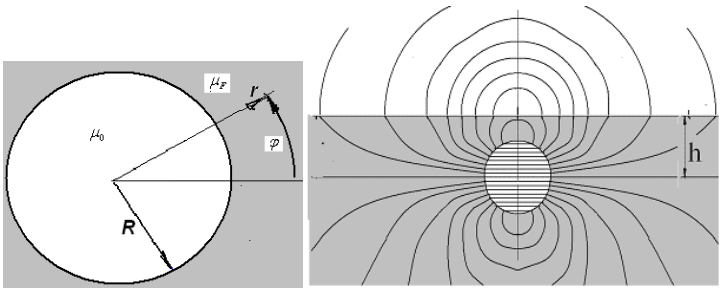

Рис. 2. Циліндричний дефект у необмеженому просторі та картина розсіювання дефектом магнітного поля у формі магнітних силових ліній

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22

Складники вектора магнітної індукції:

$$B_r(\varphi, r) = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial \varphi} = \frac{\partial C(\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial D(\varphi)}{\partial \varphi}, \tag{4}$$

$$B_\varphi(\varphi, r) = -\frac{\partial A}{\partial r} = -C(\varphi) + \frac{1}{r^2} \cdot D(\varphi), \tag{5}$$

а невідомі функції $C_1(\varphi), C_2(\varphi)$ і $D_1(\varphi), D_2(\varphi)$ для кожної з областей, відповідно, знаходяться через крайові умови з урахуванням фізичних особливостей магнітного поля в окремих точках. У точці $r = 0$ векторний магнітний потенціал не може досягати нескінченості. Тому $D_1(\varphi) = 0$. У полярних координатах складники вектора магнітної індукції будуть: $B_r = B_0 \cdot \cos\varphi$ і $B_\varphi = B_0 \cdot \sin\varphi$.

Тому в області феромагнетика: $C_{2\varphi} = B_0 \cdot \sin\varphi$. На межі розподілу двох областей мають виконуватися такі крайові умови: $B_{1r} = B_{2r}$ і $B_{1r} = B_{2r}$. Після врахування вищесказаних умов у (4) і (5) отримаємо систему рівнянь для двох невідомих функцій:

$$\frac{\partial C_1(\varphi)}{\partial \varphi} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial D_2(\varphi)}{\partial \varphi} + B_0 \cdot \cos\varphi,$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \cdot C_1(\varphi) = -\frac{1}{\mu_F} \cdot B_0 \cdot \sin\varphi + \frac{1}{\mu_F} \cdot \frac{1}{R^2} \cdot D_2(\varphi).$$

Мета дослідження

Запишемо вирази для векторного магнітного потенціалу та складників вектора магнітної індукції магнітного поля розсіювання дефектом.

Для області в середині дефекту:

$$A_1(\varphi, r) = \frac{2 \cdot \mu_0}{\mu_F + \mu_0} \cdot B_0 \cdot r \cdot \sin\varphi, \tag{6}$$

$$B_{1r}(\varphi, r) = \frac{2 \cdot \mu_0}{\mu_F + \mu_0} \cdot B_0 \cdot \cos\varphi, \tag{7}$$

$$B_{1\varphi}(\varphi, r) = -\frac{2 \cdot \mu_0}{\mu_F + \mu_0} \cdot B_0 \cdot \sin\varphi. \tag{8}$$

Для області за межами дефекту:

$$A_2(\varphi, r) = B_0 \cdot r \cdot \sin\varphi - \frac{\mu_F - \mu_0}{\mu_F + \mu_0} \cdot B_0 \cdot R^2 \cdot \frac{1}{r} \cdot \sin\varphi, \tag{9}$$

$$B_{2r}(\varphi, r) = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial A}{\partial \varphi} = B_0 \cdot \cos\varphi - \frac{\mu_F - \mu_0}{\mu_F + \mu_0} \cdot B_0 \cdot R^2 \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \cos\varphi, \tag{10}$$

$$B_{2\varphi}(\varphi, r) = -\frac{\partial A}{\partial r} = -B_0 \cdot \sin\varphi - \frac{\mu_F - \mu_0}{\mu_F + \mu_0} \cdot B_0 \cdot R^2 \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \sin\varphi. \tag{11}$$

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22

Тангенціальний складник у феромагнітній області має вигляд:

$$B_{1sx} = B_0 + \frac{(\mu_F - \mu_0) \cdot R^2 \cdot B_0 \cdot [h^2 - (x - x_0)^2]}{(\mu_F + \mu_0) \cdot [(x - x_0)^2 + h^2]^2}. \quad (12)$$

У неферомагнітній області $B_{2sx} = \frac{\mu_0}{\mu_F} \cdot B_{1sx}$ Величина цього складника буде на два, а то й на три порядки менше. Тобто зовні її впливом можна знехтувати. Проте нормальний складник нерозривний:

$$B_{2sy} = B_{1sy} = \frac{2 \cdot (\mu_F - \mu_0) \cdot (x - x_0) \cdot h}{(\mu_F + \mu_0) \cdot [(x - x_0)^2 + h^2]^2} \cdot R^2 \cdot B_0. \quad (13)$$

Аналіз виразу (13) показує, що в точці $x = x_0$ нормальний складник проходить через нуль. Максимуми нормального складника розміщуються симетрично нуля на відстані $s = \frac{2 \cdot h}{\sqrt{3}}$ один від одного. У цих точках величина нормального складника дорівнює

$$B_{xm} = \frac{(\mu_F - \mu_0)}{(\mu_F + \mu_0)} \cdot \frac{9 \cdot R^2}{8 \cdot \sqrt{3} \cdot h^2} \cdot B_0. \quad (14)$$

Результати аналізу нормального складника дозволяють оцінити глибину розміщення дефекту:

$$h = 0,5 \cdot s \cdot \sqrt{3},$$

за максимальним значенням величини нормального складника його радіус

$$R = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\mu_F + \mu_0}{\mu_F - \mu_0} \cdot \frac{B_{ym}}{B_0}} \cdot h. \quad (15)$$

Виклад основного матеріалу дослідження

Механізм утворення технологічних тріщин на оброблюваній поверхні деталей із феро-керамічних матеріалів також можна вивчати з позицій гіпотези про «найслабшу» ланку, яку розуміють як структурний параметр, розмір якого вибирається за критерій бездефектної обробки за формулою [7; 8]:

$$\mathrm{R0} < \frac{K_C^2}{\pi\left[GT_k\left(1+\nu\right)\alpha_t\right]^2}. \quad (16)$$

Формула (16) дає простий достатній критерій, за якого тріщиноподібний дефект R0 не перетвориться на основну тріщину.

Якщо включення мають форму еліпса, то в результаті миттєвого локального нагрівання поверхневого шару магніту в зоні контакту може утворитися дископодібна тріщина. Адже під час шліфування під впливом як термопружних напружень, так і сил різання на берегах дископодібного дефекту радіусом R уздовж осі цього дефекту виникають сили P [9]:

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22

$$P = G(1+\nu)\alpha_t T_k \iint_{(S)} (\vec{n}_z, \overline{ds}) = G(1+\nu)\alpha_t T_k S_0 , \tag{17}$$

де So – площа проєкції межі дефекту на площині тріщини.

Коефіцієнт інтенсивності напружень визначається для цього випадку за формулою:

$$K_I = \frac{P}{(\pi R)^{3/2}} . \tag{18}$$

За допомогою в'язкості, руйнування феритів за знайденого радіуса дископодібного дефекту, який за дотримання умов:

$$R \le \frac{1}{\pi}\left[\frac{G(1+\nu)\alpha_t T_k S_0}{K_{1C}}\right]^{2/3} \tag{19}$$

не переросте в основну тріщину. А в разі еліпсоїдальної форми маємо:

$$S = 4ab, \quad R = \frac{1}{\pi}\left[\frac{4G(1+\nu)\alpha_t ab T_k}{K_{1C}}\right]^{2/3} . \tag{20}$$

Тут a і b – головні півосі еліпса в поперечному перерізі еліпсоїда дископодібної тріщини.

Отримані аналітичні умови (16), (19), (20) рівноваги структурних дефектів, розмір *R* (у разі «найслабшої» ланки), залежать від коефіцієнта тріщиностійкості K_{1C}, коефіцієнтів *v*, G, α_t, а також від значення контактної температури ТК, яка визначається режимною частиною на фінішних операціях.

У розробленні технологічних критеріїв управління процесом бездефектної обробки було враховано, що цей процес є багатофакторним. На якість поверхневого шару під час обробки деталей впливають фізико-механічні властивості оброблюваного металу, його структура, режими шліфування та характеристики круга, умови попередньої обробки просоченнями мастильно-охолоджувальними середовищами (далі – МОС) інструменту, а також характеристики використовуваних охолоджувальних і мастильних рідин.

Тому, щоб забезпечити якість оброблюваних поверхонь, необхідно за функціональними зв'язками між фізико-механічними властивостями матеріалів і параметрами процесу шліфування підбирати такі режими обробки, МОС і характеристики інструменту таким чином, щоб поточні значення температури шліфування T (x, y) τі теплового потоку q (y, τ) напруги $\sigma_{p\,max}$ і сил шліфування P_Y, P_Z, коефіцієнта інтенсивності K_1 (S, α, $\sigma_{p\,max}$) не перевищували їхніх питомих значень, для дефектів визначених геометричних розмірів, гарантували необхідну якість поверхневого шару [9; 10].

Розглянемо систему граничних нерівностей, які дозволяють перейти до побудови алгоритму вибору технологічних параметрів, що забезпечують необхідну якість оброблюваних поверхонь.

Під час вивчення кінетики температурного поля деталі з урахуванням особливостей різання одиничними зернами інструменту було встановлено, що вона складається з регулярних (постійних) і миттєвих (імпульсних) компонентів. Імпульсний складник – Тм описує температурний стан оброблюваної поверхні безпосередньо під ріжучим зерном. Постійний складник – Тк характеризує нагрівання поверхні виробу в зоні обробки в результаті комбінованого впливу багатьох зерен інструменту.

Незважаючи на невелику тривалість дії, миттєву температуру, на оброблювану поверхню і швидке її загасання за глибиною, вона, проте, бере участь у формуванні структурно

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22

напруженого стану тонкого поверхневого шару деталі. Тому граничні нерівності величини самої температури і глибини її поширення будуть відповідно рівні [9]:

$$T\left(x,y,\tau\right)=\frac{C}{2\pi\lambda}\sum_{k=0}^{n}H(\tau-\frac{kl}{V_{kp}})H(\frac{L+kl}{V_{kp}})\int_{\gamma_1}^{\gamma_2}f(\tau,\tau')d\tau'\le\left[T\right]_M, \tag{21}$$

$$T\left(\left[h\right],0,\tau\right)=\frac{C}{2\pi\lambda}\sum_{k=0}^{n}H(\tau-\frac{kl}{V_{kp}})H(\frac{L+kl}{V_{kp}})\int_{\gamma_1}^{\gamma_2}\psi(\tau,\tau')d\tau'\le\left[T\right]_{СП}, \tag{22}$$

де $\psi(\tau,\tau')=\exp\left[-\frac{V_\partial(kl-V_{kp}\tau')}{2a}-\frac{V_\partial^2(\tau-\tau')}{4a}-\frac{(kl-V_{kp}\tau')^2+\left[h\right]^2}{4a(\tau-\tau')}\right]$, (23)

$[T]_{ср}$ – допустима температура функціональних властивостей цього матеріалу; [h] – гранично допустима глибина втрат їхніх властивостей.

У низці випадків втрата якості поверхневого шару стає значною тільки за поширення структурних перетворень на деяку глибину, величина якої визначається умовами експлуатації виробів і, можливо, побічно, задається технічними умовами. Граничні значення цієї глибини визначаються зоною більш глибоких прогрівів, тобто постійним складником температурного поля. Граничні нерівності в даному разі полягають у такому [9]:

$$T_k(o,y,\tau)=\frac{CV_{kp}}{\pi\lambda l\sqrt{V_g}}\int_0^{\tau}\int_{-e}^{e}\frac{x(r,t)e^{-\frac{(y-r)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}}\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-t)}}+\gamma e^{y^2(\tau-t)}\left[1+\Phi(\gamma\sqrt{\tau-t})\right]\right\}drdt\le T_{стр}, \tag{24}$$

$$T_k(\left[h\right],0)=\frac{CV_{kp}}{\pi\lambda l\sqrt{V_g}}\int_0^{\sqrt{Dt_{шл}}}\sqrt{\left[h\right]^2+y'^2}\,e^{-\frac{V_\partial y'}{2a}}K_{1/2}\left(\frac{V_\partial}{2a}\sqrt{y'^2+\left[h\right]^2}\right)dy'\le\left[T\right]_{пр}, \tag{25}$$

$$T_k^{\max}(L,0)\frac{CV_{kp}a}{\lambda lV_g^2}\sqrt{\frac{a}{\pi}}\left[1-\exp\left(-\frac{V_\partial\sqrt{Dt_{шл}}}{a}\right)\right]\le\left[T\right]c.n.. \tag{26}$$

В останній нерівності як граничний коефіцієнт використовується гранична температура на поверхні (X = 0).

Формування шліфувальних тріщин залежить від величини тимчасових напружень, що утворюються в поверхневому шарі під впливом термомеханічних явищ, що супроводжують цей процес. Максимальні напруги виникають у зоні інтенсивного охолодження. Тому структура керівної нерівності для бездефектної обробки в даному разі буде такою [10; 11]:

$$\sigma_{\max}(x,\tau)=2G\frac{1+\nu}{1-\nu}\alpha_t T_k^{\max}erf\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)\le\left[\sigma\right]_{пч}. \tag{27}$$

Феноменологічний підхід до оцінювання явищ крекінгу металу під час шліфування не враховує багатьох технологічних чинників, зокрема, впливу режимів термічної обробки цих металів і дефектності їхньої структури, пов’язаної з попередніми видами механічної обробки. Тому необхідна наявність більш «чутливого» граничного параметра, структура якого включала б функціональні зв’язки технологічних параметрів алмазно-абразивної обробки і враховувала технологічну спадковість [12].

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22

Як такий можна використовувати обмеження коефіцієнта інтенсивності напружень, за встановлених його співвідношеннях з технологічними параметрами, основним критерієм тріщиностійкості металів – коефіцієнтом K_{1C}, тобто [11; 12]:

$$K_1 = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-l}^{l} \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \left\{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}\right\} dt \le K_{1C} \ , \tag{28}$$

де 2l – характерний лінійний розмір конструктивного дефекту.

Бездефектна обробка матеріалів із низькими механічними характеристиками можлива, якщо обмежити ріжучі зусилля, зокрема тангенціальний складник – P_Z і знизити коефіцієнт тертя інструменту з оброблюваним металом – ρ.

Отже, з досліджень впливу сил різання на напружений стан поверхневого шару можна побудувати ще одну додаткову умову бездефектної обробки [11]:

$$P_z \le \frac{\pi\sqrt{Dt_{шл}}}{KP^2 \sin \pi\theta} \left[[\tau]_C - \frac{E\rho\sqrt{Rt}}{2\left(1-\nu^2\right)\sqrt{R}} \right], \tag{29}$$

де [τ] – граничне значення дотичного напруження зсуву; $\theta = \frac{1}{\pi} arctg \frac{1-2\nu}{2\rho(1-\nu)}$, ρ – мінімально можливе значення коефіцієнта тертя між абразивом і оброблюваним металом, що забезпечується застосуванням теплоносія та імпрегнуючих речовин; K – коефіцієнт співвідношення $\frac{P_Y}{P_Z}$.

Отримані нерівності пов'язують граничні характеристики температурного та силового полів із керівними технологічними параметрами. У них визначається діапазон комбінацій технологічних параметрів (режими, МОС, характеристики інструменту), що забезпечують необхідну якість робочих поверхонь виробів із ферокерамічних матеріалів [13; 14].

Висновки

У результаті виконаних досліджень створено інформаційне забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення, що полягає в установленні розрахункових залежностей щодо визначення впливу спадкових дефектів, сформованих від попередніх операцій, на тріщиностійкість поверхневого шару на фінішних операціях, технологічних умов обробки, з урахуванням накопичених пошкоджень і неоднорідностей у поверхневому шарі деталей із матеріалів і сплавів, особливо схильних до тріщиноутворення у процесі обробки, що має велике народногосподарське значення для зменшення дефектів на фінішних операціях і підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин.

Список використаної літератури

1. Фрайден Дж. Сучасні датчики : довідник. Київ : Техносфера, 2005. 589 с.
2. Ксюнин А.Г., Свеколкін Ф.Л. Розрахунок поля дефекту сталевої стрічки за її поздовжнього намагнічування. *Електромеханіка.* 1979. № 7. С. 573–576.
3. Троїцький В.А., Радько В.П., Демидко В.Г. Дефекти зварювальних з'єднань і методи їх виявлення. Київ : Вища школа, 1983. 144 с.
4. Корн Г., Корн Т. Довідник з математики для наукових робітників та інженерів. Київ : Наукова думка, 2010. 832 с.
5. Тозоні О.В. Розрахунок електромагнітних полів на обчислювальних машинах. Київ : Техніка, 2007. 324 с.
6. Savin N.W. Einige mathematische Verfahren zur Berechnung elektrischer und magnetischer Felder. Berichte des Rechenzentrum Graz. 1984. Bericht № 102. 105 s.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22

7. Кит Г.С., Кривцун М.Г. Площинні задачі термопружності для тіл із тріщинами. Київ : Наукова думка, 2003. 280 с.
8. Usov A., Tonkonogy V., Rybak O. Modelling of Temperature Field and Stress-Strain State of the Workpiece with Plasma Coatings during Surface Grinding. *Machines.* 2019. Vol. 7, № 1. Article 20. DOI: 10.3390/machines7010020.
9. Моделювання систем : монографія / Г.О. Оборський та ін. Одеса : Астропринт, 2013. 664 с.
10. Davim J.P. Modern mechanical engineering: Research, development and education. Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-45176-8.
11. Popov G.Ya. Selected works. Vol. 1–2. Odessa : VMV, 2007.
12. Ladopoulos E.G. Singular integral operators method for two-dimensional plasticity problems. *Computers & Structures.* 1989. Vol. 33, № 3. P. 859–865. DOI: 10.1016/0045-7949(89)90260-5.
13. Kunitsyn M., Usov A., Zaychyk Y. Information technologies of the analysis for models to ensure quality characteristics of the working surfaces during mechanical processing. Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI / Ed. by V. Ivanov et al. Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. P. 274–285. DOI: 10.1007/978-3-031-32767-4_26.
14. Bhargava G.K., Sharma P., Bhardwaj S., Sharma I. An introduction to hard ferrites: From fundamentals to practical applications. Materials Research Forum LLC, 2023.

References

1. Fryden, J. (2005). Suchasni datchyky [Modern sensors]. Tekhnosfera. [in Ukrainian].
2. Ksyunin, A.G., & Svekolkin, F.L. (1979). Rozrakhunok polya defekta stal'noi lenty pry prodol'nomu namagnichuvani [Calculation of defect field in steel tape under longitudinal magnetization]. *Elektromekhanika,* 7, 573–576 [in Ukrainian].
3. Troitskyi, V.A., Radko, V.P., & Demydko, V.G. (1983). Defekty zvaryuval'nykh z'yednan' i metody yikh vyyavlennya [Defects of welded joints and methods for their detection]. Vyshcha shkola. [in Ukrainian].
4. Korn, G., & Korn, T. (2010). Dovidnyk po matematytsi dlia naukovykh robitnykiv i inzheneriv [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Naukova dumka. [in Ukrainian].
5. Tozoni, O.V. (2007). Rozrakhunok elektromahnitnykh poliv na obchyslyuval'nykh mashynakh [Calculation of electromagnetic fields on computers]. Tekhnika. [in Ukrainian].
6. Savin, N.W. (1984). Einige mathematische Verfahren zur Berechnung elektrischer und magnetischer Felder [Some mathematical methods for calculating electric and magnetic fields]. *Berichte des Rechenzentrum Graz – Reports from the Graz Computing Center,* Bericht № 102 [in German].
7. Kyt, H.S., & Kryvtsun, M.H. (2003). Ploshchynni zadachi termopruzhnosti dlia til z trishchynamy [Plane thermoelasticity problems for bodies with cracks]. Naukova dumka [in Ukrainian].
8. Usov, A., Tonkonogy, V., & Rybak, O. (2019). Modelling of temperature field and stress-strain state of the workpiece with plasma coatings during surface grinding. *Machines,* 7 (1), Article 20. https://doi.org/10.3390/machines7010020 [in English].
9. Oborskyi, H.O., Dashchenko, O.F., Usov, A.V., & Dmytryshyn, D.V. (2013). Modeliuvannia system [System modeling]. Astroprynt [in Ukrainian].
10. Davim, J.P. (2014). Modern mechanical engineering: Research, development and education. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45176-8 [in English].
11. Popov, G.Ya. (2007). Selected works (Vols. 1–2). VMV. [in Ukrainian].
12. Ladopoulos, E.G. (1989). Singular integral operators method for two-dimensional plasticity problems. *Computers & Structures,* 33 (3), 859–865. https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90260-5 [in English].
13. Kunitsyn, M., Usov, A., & Zaychyk, Y. (2023). Information technologies of the analysis for models to ensure quality characteristics of the working surfaces during mechanical

processing. In V. Ivanov, J. Trojanowska, I. Pavlenko, E. Rauch, & J. Piteľ (Eds.), *Advances in Design, Simulation and Manufacturing* VI (pp. 274–285). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_26 [in English].

14. Bhargava, G.K., Sharma, P., Bhardwaj, S., & Sharma, I. (2023). An introduction to hard ferrites: From fundamentals to practical applications. *Materials Research Forum LLC.* [in English].

Усов Анатолій Васильович – д.т.н., професор, завідувач кафедри вищої математики та моделювання систем Національного університету «Одеська політехніка». E-mail: usov_a_v@op.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3965-7611.

Зайчик Юрій Ігорович – аспірант кафедри вищої математики та моделювання систем Національного університету «Одеська політехніка». E-mail: yuriy.zaichik@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8577-1095.

Сікіраш Юлія Євгеніївна – аспірант кафедри вищої математики та моделювання систем Національного університету «Одеська політехніка». E-mail: u.e.sikirash@opu.ua, ORCID: 0000-0003-0853-582X.

Савін Микола Васильович – к.т.н., інженер-електрофізик, Комунальне некомерційне підприємство «Дитяча міська поліклініка № 6» Одеської міської ради. E-mail: Savin.Nirolai1950@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6343-5535.

Usov Anatolii Vasylovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics and System Modeling of the Odessa National Polytechnic University. E-mail: usov_a_v@op.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3965-7611.

Zaichyk Yurii Ihorovych – Postgraduate Student at the Department of Higher Mathematics and System Modeling of the Odessa National Polytechnic University. E-mail: yuriy.zaichik@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8577-1095.

Sikirash Yuliia Yevheniivna – Postgraduate Student at the Department of Higher Mathematics and System Modeling of the Odessa National Polytechnic University. E-mail: u.e.sikirash@opu.ua, ORCID: 0000-0003-0853-582X.

Savin Mykola Vasilyovych – Candidate of Technical Sciences, Electrophysics Engineer, Municipal Non-profit Enterprise “Children’s City Clinik № 6” Odessa city Council. E-mail: Savin.Nirolai1950@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6343-5535.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-22