

А. В. Усов¹
М. В. Куніцин¹
Ю. Є. Сікіраш¹

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ФЕРОКЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЇХ ВИРОБНИЦТВІ

¹Національний університет «Одеська політехніка»

Відсутність досліджень по особливостям процесу зародження шліфувальних тріщин, їх формування в магістральні в залежності від способу одержання заготовок із феромагнітних матеріалів не дозволяють однозначно використовувати існуючі рекомендації по усуненню вказаних дефектів. Метою даної роботи є підвищення ефективності фінішних операцій при виробництві деталей із ферокерамічних матеріалів шляхом зниження інтенсивності тріщино- і сколоутворення за рахунок збільшення їх тріщино стійкості на етапі одержання заготовок. Побудована модель, яка описує термомеханічні процеси, які протікають при одержанні заготовок із ферокерамічних матеріалів на етапі спікання. Досліджено вплив методів спікання на інтенсивність тріщино- та сколоутворення в заготовках. Одержано критерії тріщино- та сколоутворення на прошліфованих поверхнях і встановлено їх зв'язок з технологічними характеристиками процесу шліфування. Розроблені рекомендації для оптимізації і управління термомеханічними процесами при обробці деталей із ферокерамічних матеріалів і способів спікання їх заготовок, що дозволило суттєво знизити інтенсивність тріщино- та сколоутворення на їх робочих поверхнях на фінішних операціях.

Ключові слова: тріщини, спікання заготовки, шліфування, якість поверхні, ферокерамічні матеріали.

Вступ

У сучасному приладобудуванні, апаратобудуванні, електромашинобудуванні, радіоелектроніці, засобах телекомунікацій широкого поширення набули постійні магніти з ферокерамічних матеріалів.

Виробництво постійних магнітів носить прецизійний характер і ґрунтується на оптимальних залежностях фізико-механічних властивостей магнітів від складу сплаву, способу отримання заготовок виробів, фінішних методів обробки їх робочих поверхонь та температурно-силових факторів, що супроводжують технологічні процеси виробництва виробів [1], [2].

Встановлення зв'язків між найважливішими експлуатаційними властивостями деталей з ферокерамічних матеріалів (відсутність тріщин подібних дефектів на робочих поверхнях, збереження магнітних властивостей) та технологічними параметрами – мікрорельєфом обробленої поверхні, мікротвердістю, відсутністю мікротріщин, сколів, є актуальним [3], [4].

Вивчення впливу тільки механічної обробки на експлуатаційні властивості виробів є недостатнім, так як способи отримання заготовок, роблять істотний внесок у зміну властивостей поверхневого шару, що піддається механічній обробці. Відсутність керування термомеханічним станом при отриманні заготовок та при обробці їх робочих поверхонь на фінішних операціях не дозволяє уникнути вищезгаданих дефектів на оброблюваних поверхнях готових виробів.

Результати дослідження

Вироби із ферокераміки в зв'язку з широким діапазоном магнітних властивостей в великому об'ємі використовуються в електроенергетиці – в генераторах, електроприводах, трансформаторах тощо. Завдяки унікальним поєднанням електрромагнітних властивостей ферити знаходять використання і в інших областях техніки. Об'єм їх виробництва у світовому масштабі досяг десятки мільйонів тон за рік і продовжує неперервно збільшуватись. Тому актуальним є удосконалення технологічних процесів з метою зменшення браку особливо на етапі спікання і шліфування.

На рис. 1 показана основна технологічна схема виробництва феритів і супутні йому види відходів, які можна розбити на групи: технологічні втрати, брак і технологічні відходи. Основна увага в даних

дослідженнях приділяється забезпеченню якісних характеристик феритів на фінішних методах їх обробки при мінімальних втратах на етапі спікання.

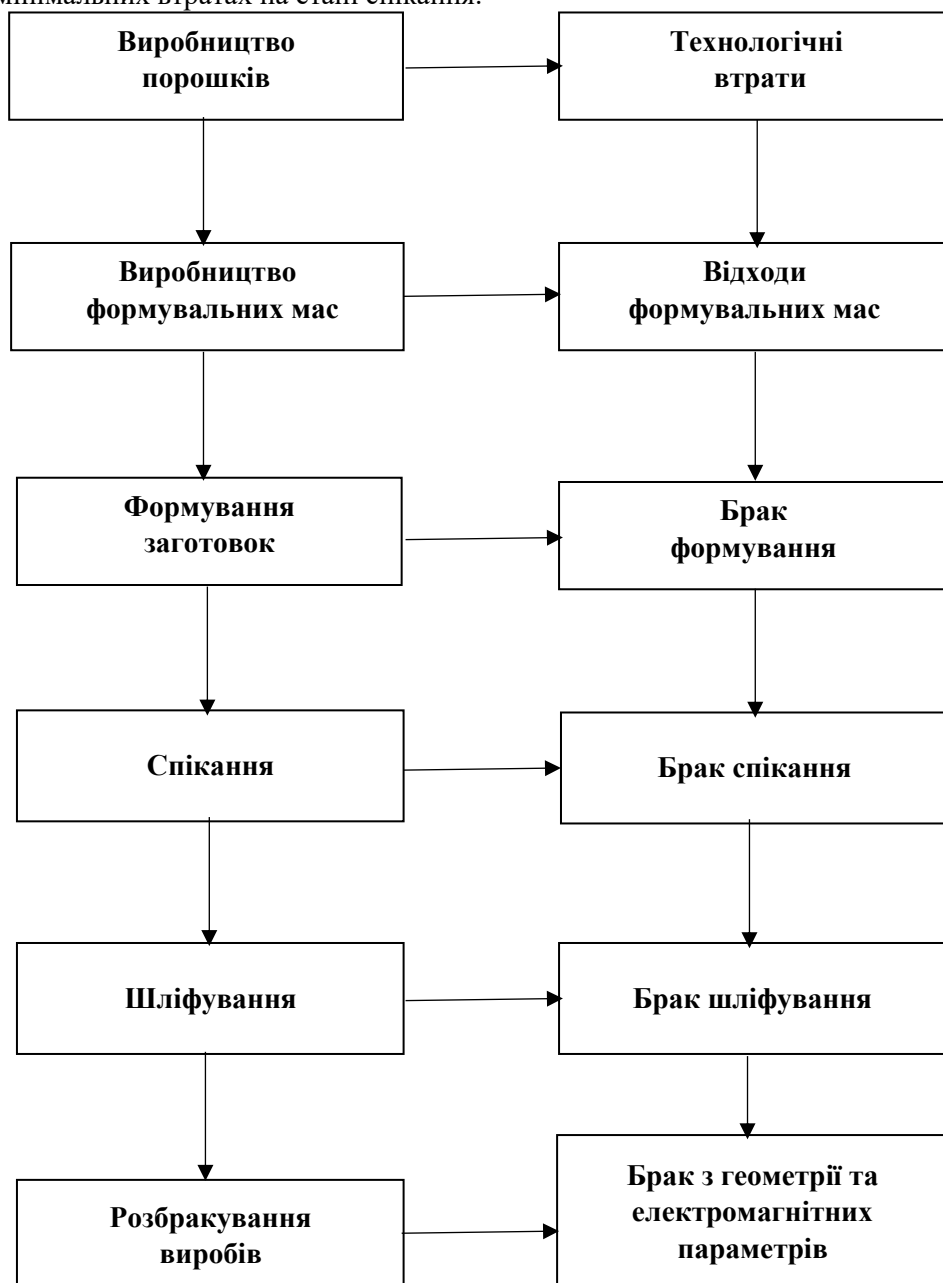


Рис.1. Основна технологічна схема виробництва феритів

Дослідження та управління термомеханічним станом робочих поверхонь виробів з ферокерамічних матеріалів як на етапі отримання заготовок так і на фінішних операціях виробів з метою усунення тріщиноутворення на оброблюваних поверхнях і складають *мету даної роботи*.

Досягнення цієї мети вимагало постановки та розв'язання наступних *основних завдань*:

1. Розробити математичні моделі, що описують термомеханічні процеси при отриманні заготовок та при обробці виробів з них на фінішних операціях, що впливають на формування шліфувальних дефектів та визначити управління технологічними параметрами для усунення зазначених дефектів

2. Розробити алгоритм вибору технологічних умов обробки виробів із зазначених матеріалів, які забезпечують максимальну продуктивність за умови забезпечення необхідних показників якості.

У цій роботі пропонуються моделі для опису термомеханічних процесів, що формуються при спіканні заготовок з ферокерамічних матеріалів та на фінішних операціях виробів з них, які дозволять оптимізувати технологічні параметри для забезпечення якісних характеристик робочих поверхонь

готових виробів. У модель входить рівняння теплопровідності з початковими та граничними умовами [5]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad x \in (0, l), \quad y \in (-s, +s), \quad t \in (0, \infty) \quad (1)$$

$$T(x, y, 0) = T^0 = \text{const} \quad (2)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(l, t)}{\partial x} = \alpha [v(t) - T(l, t)], \quad x \in [0, l], \quad 0 < \bar{t} < \infty \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(l, t)}{\partial x} = -\frac{q}{\lambda(T)}, \quad t \in [0, \bar{t}] \quad (4)$$

Рівняння пружності Ламе у переміщеннях:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{u} = B^T \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \bar{u}(x, y) = \frac{u}{2G}, \quad \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}, \quad B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} a_k, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (6)$$

де T – температура ($^{\circ}\text{C}$); t – час; α – коефіцієнт теплоємності; ρ – щільність; $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності; l – товщина заготовки; x, y – просторові координати; α – коефіцієнт теплообміну; $v(t)$ – управління, $v(t) \in V$, $V = v = v(t)$; q – тепловий потік, що надходить на заготовку.

a_t – температурний коефіцієнт лінійного розширення; μ, G, E – постійні Лами; $v - \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ компоненти вектора переміщень точки (x, y) ; v – оператор Лапласа.

У проміжку зміни температур $[T_1, T_2]$ функція $\lambda(T)$ позитивна та в силу теплофізичних властивостей матеріалу вона має обмежену похідну по T . Крім того, припустимо, що в рамках можливих значень робочих температур $T \in [T_1, T_2]$ значення функції $\lambda(T)$ визначаються виразом:

$$0 < \beta_1 \leq \lambda(T) \leq \beta_2 \quad (7)$$

За зазначених умов система рівнянь (1)-(4) при кожному фіксованому $v(t) \in V$ має узагальнене рішення з простору $V_2^{0,1}(\Omega_i)$, де $\Omega_i = \{(x, t) : x \in (0, l), t \in (0, \bar{t})\}$.

За умовою завдання неприпустимо, щоб під дією термомеханічних процесів заготовка спекалась, при температурі якої втрачаються функціональні властивості матеріалу заготовки і на поверхні заготовок формувалися термічні тріщини.

У деталях використовуються ферокерамічні матеріали, що крихко руйнуються при нагріванні, без помітних деформацій або матеріали, що переходять під впливом термонапружень в пластичний стан.

Завдання термопружності в квазістатичній постановці і припущенні, що α_T – коефіцієнт лінійного розширення, E – модуль пружності, не залежать від температури, вирішується аналітично [6], [7]. Аналіз термічних напружень показує, що в умовах розглянутої задачі розтягувальні напруження найбільших значень досягають на глибині, а стискаючі – на поверхні заготовки. З урахуванням вищесказаного, обмеження на термічні напруження можна записати у вигляді:

$$\frac{\alpha_T E}{1-\Psi} \left(-T(0, t) + \frac{1+3\Gamma}{l} \int_0^l T(\xi, t) d\xi - \frac{6\Gamma}{l^2} \int_0^l \xi T(\xi, t) d\xi \right) \leq \sigma_1 [T(0, t)], \quad (8)$$

$$\frac{\alpha_T E}{1-\Psi} \left(T(l, t) - \frac{1-3\Gamma}{l} \int_0^l T(\xi, t) d\xi - \frac{6\Gamma}{l^2} \int_0^l \xi T(\xi, t) d\xi \right) \leq \sigma_2 [T(l, t)], \quad (9)$$

де

$$\sigma_1 [T(0, t)] = \begin{cases} \sigma_p [T(0, t)] - \text{для крихких матеріалів} \\ \sigma_{0,2} [T(0, t)] - \text{для пластичних матеріалів} \end{cases}$$

$$\sigma_2 [T(l, t)] = \begin{cases} \sigma_c [T(0, t)] - \text{для крихких матеріалів} \\ \sigma_{0,2} [T(0, t)] - \text{для пластичних матеріалів} \end{cases}$$

Ψ – коефіцієнт Пуассона; $\sigma_p(T)$, $\sigma_c(T)$, $\sigma_{0,2}(T)$ – межі міцності на розтяг, стиск та межа плинності відповідно.

Крім виконання нерівностей (7)-(9), вимагатимемо виконання обмеження на максимальну температуру в поверхневому шарі. Вона не повинна перевищувати, наприклад, температуру структурних перетворень T_s у матеріалі поверхневого шару, тобто:

$$T(l, t) \leq T_s \quad (10)$$

Знайдемо управління $v^\circ(t) \in V$, $t \in [0, t^\circ]$, що переводить за мінімальний час t° , $0 < t^\circ < \bar{t}$, термомеханічний стан поверхневого шару, який описується системою рівнянь (1)-(4) з початкового положення (2) в задане кінцеве теплове положення $\bar{T}(x)$ з фіксованою точністю:

$$\int_0^l [T(x, t^\circ, v^\circ) - \bar{T}(x)]^2 dx \leq \varepsilon, \varepsilon \geq 0,$$

так, щоб за всіх $t \in [\varphi, t^\circ]$, $\varphi = \text{const} > 0$, було б виконано нерівності (8)-(10).

Для вирішення поставленої задачі скористаємося методом послідовних наближень [8]. З принципу максимуму [9]:

$$m \leq T(x, t) \leq M \quad (11)$$

де

$$M = \max \left\{ \max_{t \in [0, t]} \underline{v}(t), T^\circ \right\}, \quad M = \min \left\{ \min_{t \in [0, t]} \underline{v}(t), T^\circ \right\}$$

Нехай

$$T_1 = m, T_2 = M, \quad \lambda_0 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (12)$$

Системі рівнянь (1)-(4) поставимо у відповідність наступний ітераційний процес:

$$c\rho \frac{\partial T_{k+1}}{\partial t} - \lambda_0 \frac{\partial^2 T_{k+1}}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda(T_k) - \lambda_0) \frac{\partial T_k}{\partial x} \right] \quad (13)$$

$$T_{k+1}(x, 0) = T^\circ, x \in (0, l) \quad (14)$$

$$\lambda_0 \frac{\partial T_{k+1}}{\partial x} - \alpha[v(t) - T_{k+1}(x, t)]|_{x=0} = [\lambda_0 - \lambda(T_k)] \frac{\partial T_k}{\partial x} |_{x=0} \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_{k+1}}{\partial x} |_{x=0} = -\frac{q}{\lambda(T_k)} \quad (16)$$

Розв'язання задачі (1)-(4) будемо шукати як межу розв'язків задач (8)-(13) у просторі $W_2^{0,1}(\Omega_i)$. Так як функція $\lambda(T)$ позитивна, задовольняє співвідношенню (5) і має обмежену T похідну на відрізку $[T_1, T_2]$, то при будь-якому фіксованому управлінні $v(t) \in V$ рішення T_{k+1} системи рівнянь (11)-(14) сходяться при $k \rightarrow \infty$ до вирішення системи (1)-(4) в нормі типу $W_2^{0,1}$.

Для зручності наступних викладок запишемо систему рівнянь (10)-(16) та обмеження (6)-(7) у безрозмірних одиницях:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{\lambda_0}{c\rho} & r &= \frac{x}{l} & \tau &= \frac{a_0 t}{l^2} \\ u &= \alpha_T(v - T^\circ) & u^- &= \alpha_T(v^- - T^\circ) & u^+ &= \alpha_T(v^+ - T^\circ) \\ \theta &= \alpha_T(T - T^\circ) & \sigma_1^* &= \frac{(1-\psi)\sigma_1}{E} & \sigma_2^* &= \frac{(1-\psi)\sigma_2}{E} \\ \theta_g &= \alpha_T(T_{\text{cp}} - T^\circ) & \tilde{T} &= \frac{a_0 \bar{t}}{l^2} & B_i &= \frac{\alpha l}{\lambda_0} \\ \tilde{\theta} &= \alpha_T(\tilde{T} - T^\circ) & \frac{q}{\lambda_0} &= q^* \end{aligned} \quad (17)$$

Тоді завдання оптимального нелінійного нагріву поверхневого шару виробу з обмеженнями на термонапруження і найбільшу температуру зводиться до вирішення системи лінійних звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx}{d\tau} = A(\tau)x + B(\tau)u + D(\tau), \quad \tau \in [0, T], \quad x(0) = x_0 \neq 0_{RN} \quad (18)$$

з обмеженнями на фазові змінні та управління

$$F_i(x, u, \tau) \leq 0, \quad i = \overline{1, s} \quad (19)$$

де $x = x(\tau) = (x_1(\tau), \dots, x_N(\tau))$ - N -вимірний вектор, $A(\tau), B(\tau), D(\tau)$ - відомі матриці розмірності відповідно $(N \times N)$, $(N \times 1)$, $(N \times 1)$ с шматково-безперервними коефіцієнтами; $u = u(\tau) \in U$ - управління до вирішення нелінійної задачі теплопровідності з обмеженнями був апробований при перевірці на адекватність керування термомеханічним станом заготовок з ферокерамічних матеріалів. температура 1100 °С. Гранично допустима температура у ній не повинна перевищувати

720 °C за мінімальний час з урахуванням обмежень на термонапруження та температуру заготовки, що спікається. Температура в зоні спікання змінювалася в діапазоні [720 °C - 1100 °C].

На рис. 2 наведено графіки залежностей від часу оптимального управління, температур поверхні та основного матеріалу виробу після 6 ітерацій. На рис. 3 та рис. 4 наведені відповідно графіки залежності меж міцності на стиск і розтяг, а також стискаючих і розтягують термонапружень від часу при оптимальному режимі обробки. Як видно із рис. 3 швидкість зростання температури в зоні обробки обмежують не тільки розтягуючі, але й стискаючі термонапруження. Традиційно активними вважалися лише розтягувальні термонапруження та обмеження на температуру оброблюваної поверхні.

Розробку критеріїв для управління процесом бездефектного шліфування можна здійснювати на базі встановлення функціональних зв'язків між фізико-механічними властивостями оброблюваних матеріалів та основними технологічними параметрами при розв'язку задачі (1)-(6) з додатковими граничними умовами на тріцино подібних дефектах, які розташовані в поверхневому шарі деталі перед її шліфуванням:

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=0} = \tau_{xy}(x, y, \tau)|_{x=0} = 0, \quad (20)$$

Для поверхневого шару оброблюваного виробу, що має структурні та технологічні неоднорідності, умови розривності рішення залежно від типу дефекту будуть:

на включеннях	на тріциноподібних дефектах	
$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \sigma_x \rangle \neq 0$	$\langle \sigma_x \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$	(21)
$\langle \bar{v} \rangle = 0, \langle \tau_{xy} \rangle \neq 0$	$\langle \tau_{xy} \rangle = 0, \langle \bar{v} \rangle \neq 0$	

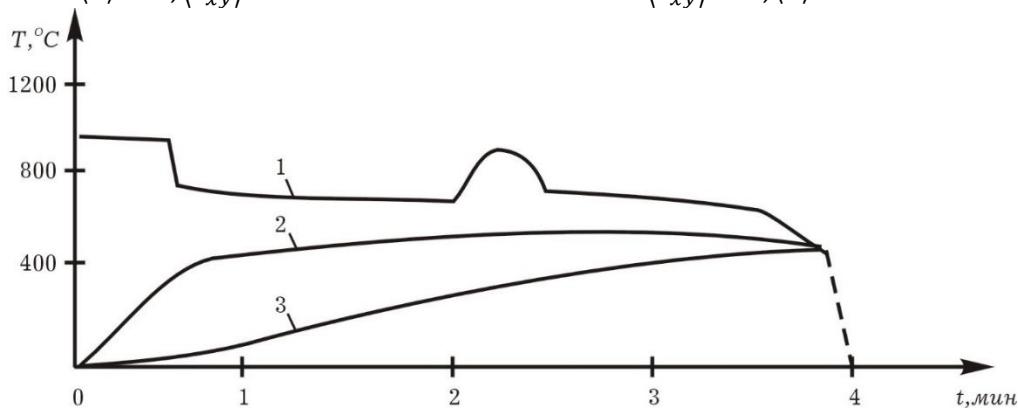


Рис.2. Графіки залежностей від (1) часу оптимального керування, (2) температур поверхні та (3) центру заготовки після шостої ітерації

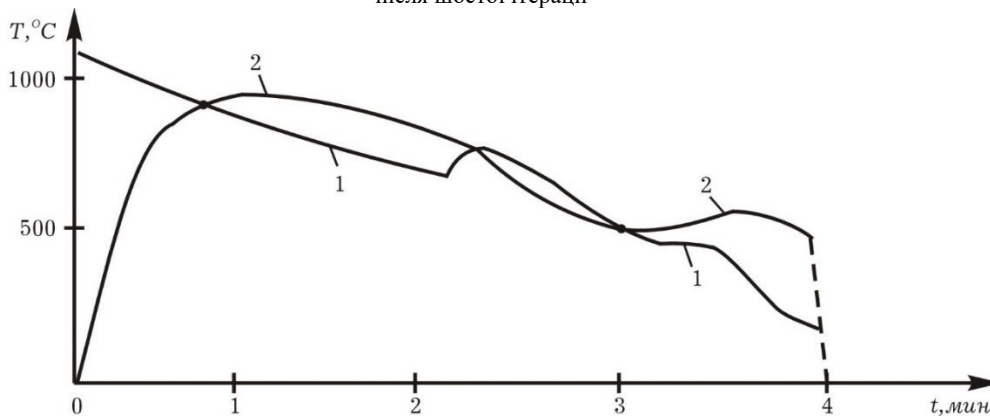


Рис.3. Графіки залежностей меж міцності на (1) стиск та (2) розтягання від часу при оптимальному режимі спікання заготовки

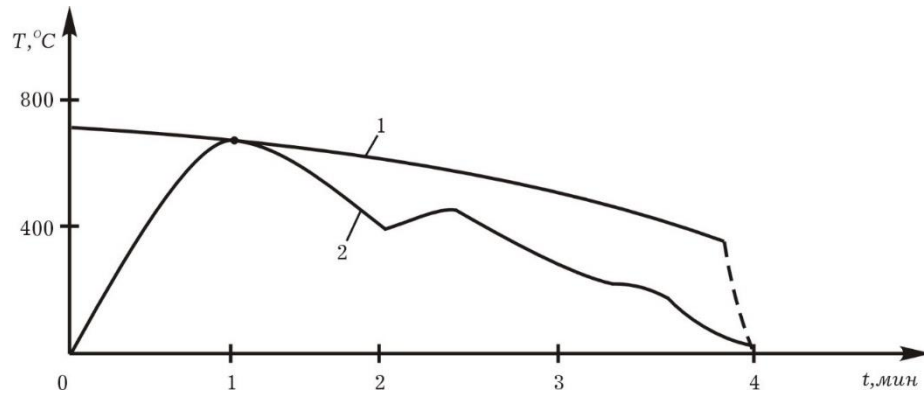


Рис. 4. Графіки залежностей (1) стискаючих та (2) розтягуючих термонапружень від часу при оптимальному режимі спікання.

Розв'язок задачі (1)-(4) з граничними умовами (20)-(21) [10] дозволив одержати критеріальні співвідношення у вигляді системи обмежуючих нерівностей за величинами самої температури, напруження, коефіцієнта інтенсивності напружень K та граничного значення теплового потоку q , коефіцієнта тріщиностійкості K_{Ic} , реалізація яких забезпечить необхідну якість оброблених поверхонь виробів із ферокерамічних матеріалів:

$$T_k^{max}(L, 0) = \frac{Cv_{kp}\alpha}{\lambda v_q^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_q \sqrt{Dt_{gr}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T] \quad (22)$$

$$\sigma_{max}(x, \tau) = 2G \frac{1+v}{1-v} \alpha_t T_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_i] \quad (23)$$

$$K = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-e}^e \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \sigma_x, \sigma_y dt \leq K_{Ic} \quad (24)$$

$$q^* = \frac{P_z v_{kp} \alpha_s}{\sqrt{Dt_{gr}}} \leq \frac{\sqrt{3}\lambda K_{Ic}}{Hl\sqrt{\pi l}\sigma} \quad (25)$$

Наведені нерівності можуть бути інформаційною базою [11], [12] для визначення зв'язків температурного та силового полів із керуючими, технологічними параметрами V_{kp} , V_q , D , t_{gr} , C . Вони задають область поєднань цих параметрів, які відповідають отриманим термомеханічним критеріям. При цьому враховуються властивості матеріалу, що обробляється, і гарантуються забезпечення необхідної якості виробів.

На основі отриманих критеріальних співвідношень побудовано алгоритм забезпечення якості поверхневого шару деталей при шліфуванні з урахуванням максимальної продуктивності обробки (Рис. 5).

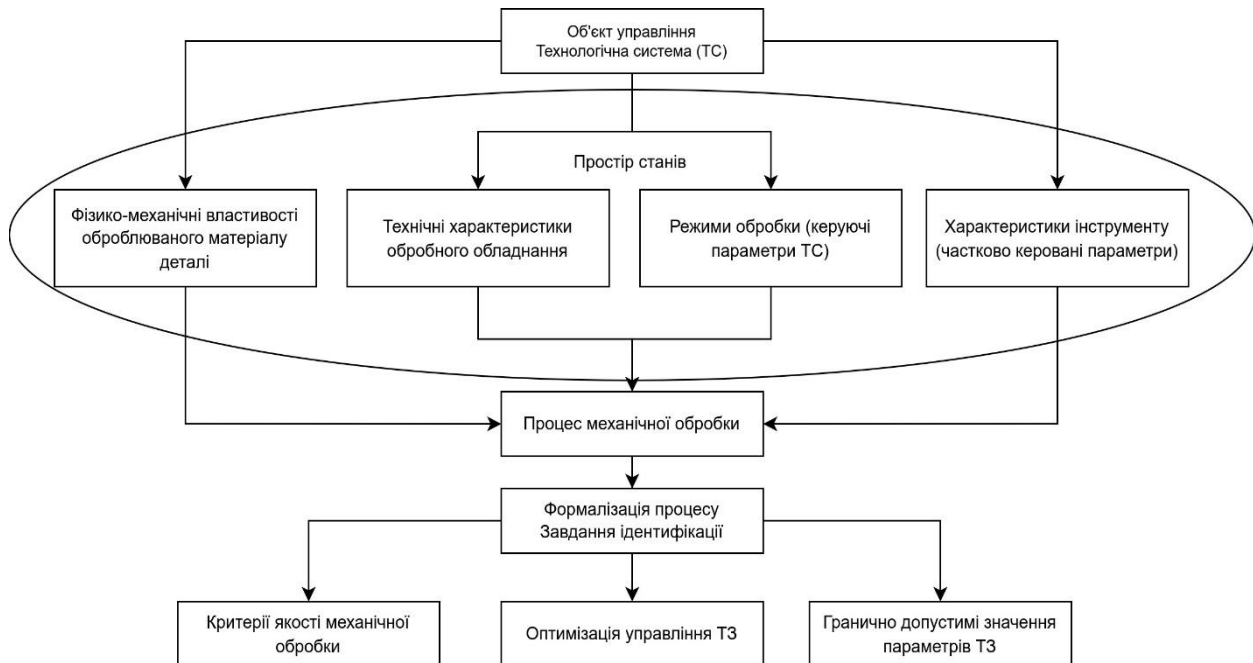


Рис. 5. Алгоритм забезпечення якості механічної обробки виробів із ферокерамічних матеріалів за оптимально допустимих параметрів технологічної системи

Висновки

Побудовано модель управління термомеханічним станом заготовок з ферокерамічних матеріалів, аналіз якої показує шляхи зниження шлюбу при їх спіканні.

Розроблено технологічні критерії для управління процесом бездефектного шліфування виробів з ферокерамічних матеріалів, що реалізуються на базі встановлених функціональних зв'язків між фізико-механічними властивостями оброблюваних матеріалів та основними технологічними параметрами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] W. Grzesik and P. Nieslony, "Physics based modelling of interface temperatures in machining with multilayer coated tools at moderate cutting speeds," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 9, pp. 889–901, Jul. 2004, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.02.014.
- [2] E.-G. Ng, T. I. El-Wardany, M. Dumitrescu, and M. A. Elbestawi, "Physics-based simulation of high speed machining," *Machining Science and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 301–329, Dec. 2002, doi: 10.1081/MST-120016248.
- [3] A. Ruban, V. Pasternak, and N. Huliieva, "Prediction of the structural properties of powder materials by 3d modeling methods," *MSF*, vol. 1068, pp. 231–238, Aug. 2022, doi: 10.4028/p-18k386.
- [4] V. Pasternak, L. Samchuk, N. Huliieva, I. Andrushchak, and A. Ruban, "Investigation of the properties of powder materials using computer modeling," *MSF*, vol. 1038, pp. 33–39, Jul. 2021, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.33.
- [5] S. Forest and E. C. Aifantis, "Some links between recent gradient thermo-elasto-plasticity theories and the thermomechanics of generalized continua," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 47, no. 25–26, pp. 3367–3376, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2010.07.009.
- [6] D. Riccobelli, P. Ciarletta, G. Vitale, C. Maurini, and L. Truskinovsky, "Elastic instability behind brittle fracture," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 132, no. 24, p. 248202, Jun. 2024, doi: 10.1103/PhysRevLett.132.248202.
- [7] S. Deswal, K. K. Kalkal, and S. S. Sheoran, "Axi-symmetric generalized thermoelastic diffusion problem with two-temperature and initial stress under fractional order heat conduction," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 496, pp. 57–68, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.physb.2016.05.008.
- [8] N. Liu, P. Plucinsky, and A. E. Jeffers, "Combining load-controlled and displacement-controlled algorithms to model thermal-mechanical snap-through instabilities in structures," *J. Eng. Mech.*, vol. 143, no. 8, p. 04017051, Aug. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001263.
- [9] B. A. Boley and J. H. Weiner, *Theory of Thermal Stresses*. in Dover Civil and Mechanical Engineering. Dover Publications, 2012. [Online]. Available: https://books.google.com.ua/books?id=ANSn1%5C_BUilYC
- [10] A. Alesina and M. Venturini, "Solid-state power conversion: A Fourier analysis approach to generalized transformer synthesis," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 319–330, Apr. 1981, doi: 10.1109/TCS.1981.1084993.
- [11] C. Klemm and P. Vennemann, "Modeling and optimization of multi-energy systems in mixed-use districts: A review of existing methods and approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110206, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110206.
- [12] N. Kheir, *Systems modeling and computer simulation*. Routledge, 2018.

A. V. Usov¹
M. V. Kunitsyn¹
Y. I. Sikirash¹

Quality control of machined surfaces of parts made of ferro-ceramic materials in their production

¹Odesa Polytechnic National University

Information support of technological capabilities for defect-free machining of products made of magnetically hard alloys prone to cracking is proposed, which consists in establishing calculation dependencies for determining the influence of inherited defects formed from previous operations on the crack resistance of the surface layer during grinding. The technological conditions of machining are investigated, taking into account the accumulated damage and inhomogeneities of magnetically hard materials, especially those prone to cracking during grinding, which is of great economic importance for reducing defects in finishing operations and improving the operational properties of machine parts. A mathematical model has been developed that describes thermomechanical processes in the surface layer during grinding of magnetically hard alloy parts, taking into account their heterogeneities that affect the formation of grinding cracks. At the same time, for the first time, the calculated dependencies between the criterion of crack resistance and the main controlling technological parameters were obtained. Based on the known characteristics of hereditary defects, the limit values of the heat flux that ensure the required quality of the ground surfaces were determined. The obtained theoretical and experimental functional relationships of the thermomechanical state of the machined surfaces of magnetically hard alloy products with technological parameters were used to build a control for selecting technological conditions that ensure the required quality of the surface layer of parts during their grinding, taking into account the maximum processing performance.

Keywords: finishing operations, inherited defects, crack formation, modeling of thermomechanical phenomena, machined surface quality, magnetically hard alloys, defect-free machining, technological control criteria.

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.

Куніцин Максим Володимирович – к. т. н., доцент кафедри інтегрованих технологій управління Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: m.v.kunitsyn@op.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1764-8922.

Сікіраш Юлія Євгенівна – аспірантка кафедри вищої математики та моделювання систем Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: u.e.sikirash@op.edu.ua ORCID: 0000-0003-0853-582X.