

УДК [519.711+536:621.9]

А.В. УСОВ, М.В. КУНЦИН, Ю.І. ЗАЙЧИК  
Національний університет «Одеська політехніка»**ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ  
ДЛЯ БЕЗДЕФЕКТНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ ІЗ МАТЕРІАЛІВ,  
СХИЛЬНИХ ДО ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ**

Метою роботи є інформаційне забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення, тому що їх поверхневий шар має спадкові дефекти структурного або технологічного походження. Міцність виробів і їх функціональні можливості залежать від неоднорідності й дефектності структури матеріалів, із яких вони виготовляються. У таких матеріалах є велика кількість різних мікрodefektів, які формуються в поверхневому шарі деталей по ходу технологічних операцій їх одержання. Зниження браку на фінішних операціях даних матеріалів, підвищення експлуатаційних властивостей виробів із цих матеріалів є важливим народногосподарським завданням, вирішення якого зумовлює значну економію матеріальних ресурсів, трудомісткості й собівартості виготовлення деталей. Наявні сьогодні інформаційні відомості про теплові процеси алмазно-абразивної обробки отримані в припущенні однорідності матеріалів, що шліфуються, і не враховують наявності дефектів технологічної спадковості виробів. Феноменологічний підхід у вивченні причин тріщиноутворення матеріалів, схильних до цього виду дефектів, не дає змоги розкрити механізм зародження й розвитку шліфувальних тріщин. Вибір методу дослідження механізму тріщиноутворення ґрунтується на мікродослідженнях, пов'язаних із неоднорідностями, які формуються в поверхневому шарі деталей під час попередніх технологічних операцій.

У роботі вирішено такі завдання. Вивчено механізм формування шліфувальних тріщин у поверхневому шарі матеріалів і сплавів, схильних до тріщиноутворення під час алмазно-абразивної обробки, з урахуванням попередніх операцій і спадкових неоднорідностей, що виникають при цьому. Розроблено математичну модель, яка описує термомеханічні процеси в поверхневому шарі під час шліфування деталей із матеріалів і сплавів з урахуванням їх неоднорідностей, що впливають на інтенсивність формування шліфувальних тріщин. Отримано розрахункові залежності між критерієм тріщиностійкості й основними керівними технологічними параметрами. За відомими характеристиками спадкових дефектів визначено граничні значення термомеханічних критеріїв, що забезпечують необхідну якість поверхонь виробів, що обробляються. Створено інформаційну базу для проектування технологічних операцій шліфування матеріалів, які мають спадкові неоднорідності, що забезпечують максимальну продуктивність за забезпечення необхідних показників якості. На основі отриманих критеріальних співвідношень побудовано алгоритм забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до втрати якості поверхнього шару деталей.

Ключові слова: інформаційне забезпечення, технологічні можливості, бездефектна обробка виробів, приліки, тріщиноутворення, моделі, неоднорідність.

A.V. USOV, M.V. KUNITSYN, Yu.I. ZAYCHYK  
Odesa Polytechnic National University**INFORMATION PROVISION OF TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES  
FOR DEFECT-FREE PROCESSING OF PRODUCTS MADE  
OF MATERIALS PRONE TO CRACK FORMATION**

The work aims to provide information on technological possibilities for defect-free processing of products from materials prone to cracking since their surface layer has hereditary defects of structural or technological origin. The products' strength and functionality depend on the inhomogeneity and defectiveness of the structure of the materials from which they are made. Such materials have many different micro defects formed in the surface layer of parts during the technological operations of their production. Reducing marriage in the finishing operations of these materials and increasing the operational properties of products made of these materials is an essential national and economical task, the solution of which leads to a significant saving of material resources, labour intensity and cost of manufacturing parts. The currently available information on the thermal processes of diamond abrasive processing is obtained based on the homogeneity of the polished materials. It does not consider the presence of defects in the technological heredity of the products. The phenomenological approach in studying the causes of cracking of materials prone to this type of defect does not allow to reveal the mechanism of genesis and development of grinding cracks. The choice of the method of investigation of the mechanism of crack formation is based on micro-research related to inhomogeneities, which are formed in the surface layer of parts during previous technological operations.

*The following tasks are solved in the work. The mechanism of the formation of grinding cracks in the surface layer of materials and alloys prone to crack formation during diamond-abrasive processing has been studied, taking into account previous operations and hereditary inhomogeneities that arise. A mathematical model has been developed that describes thermomechanical processes in the surface layer during grinding of parts made of materials and alloys, taking into account their inhomogeneities, which affect the intensity of the formation of grinding cracks. Calculated dependences between the crack resistance criterion and the main controlling technological parameters were obtained. According to the known characteristics of hereditary defects, the limit values of thermomechanical criteria, which ensure the necessary quality of the surfaces of the processed products, are determined. An information base has been created to design technological operations of grinding materials with hereditary inhomogeneities, ensuring maximum productivity while ensuring the necessary quality indicators. Based on the obtained criterion ratios, an algorithm was built to ensure technological capabilities for defect-free processing of products from materials prone to loss of quality of the surface layer of parts.*

*Key words: information support, technological capabilities, defect-free processing of products, cauter, cracking, models, heterogeneity.*

### Постановка проблеми

Різні технологічні операції сприяють виникненню в поверхневому шарі спадкових дефектів, до яких належать неметалеві включення, флокени, повітряні пори, мікротріщини усадкового характеру (вилавка), деформація кристалічних зерен, тріщини ліквідаційного походження (поковка, протягування) крупнозернистість, скупчення карбідів (ТО, ТМО, ХТ0), сколи, вириви, сітка поверхневих тріщин, внутрішні тріщини, відшаровування /фінішні операції/, припали.

Ці дефекти, будучи концентраторами напруження, зумовлюють тріщиноутворення як у процесі обробки матеріалу, так і під час його експлуатації.

Особливо значні втрати від браку через спадкові дефекти на фінішних операціях. Шліфування, будучи для більшості деталей остаточною операцією, що забезпечує суттєве підвищення експлуатаційних властивостей за рахунок високої точності, низької шорсткості, супроводжується високотемпературним впливом, що призводить до припикання та значного браку від виходу придатних виробів через утворення тріщин.

Зниження браку на фінішних операціях цих матеріалів, підвищення експлуатаційних властивостей виробів із цих матеріалів є важливим народногосподарським завданням, вирішення якого зумовлює значну економію матеріальних ресурсів, трудомісткості й собівартості виготовлення деталей.

Наукова проблема полягає в інформаційному забезпеченні технологічних можливостей щодо визначення впливу спадкових дефектів, сформованих на попередніх заготівельних операціях, операціях ТО, ТМО й нанесення покриттів на тріщиностійкість поверхневого шару під час шліфування та визначення оптимальних технологічних умов обробки, з урахуванням накопичень, матеріалів і сплавів, особливо схильних до тріщиноутворення в процесі шліфування.

Установлення закономірностей формування шліфувальних тріщин під час обробки деталей із матеріалів і сплавів, схильних до цього виду дефектів, з урахуванням спадкових мікронеоднорідностей, що виникають по всьому ходу технології їх виготовлення, починаючи зі способів отримання заготовок, і на цій основі розробка інформаційного забезпечення технологічних умов бездефектного шліфування.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Операція шліфування – основна обробна операція важко навантажених деталей із високоміцних сталей і сплавів, до яких належать зубчасті колеса, вали, штампи, елементи електричних машин, електроніки тощо. Цій операції піддаються також вироби, до робочих поверхонь яких висувають підвищені вимоги щодо точності, шорсткості, що істотно впливають на їх експлуатаційні властивості. До таких виробів належать деталі зі зносостійкими покриттями, високо коерцитивні магніти типу ЮНДКТ, які використовуються в сучасних електричних машинах, приладах, апаратах.

Схильність металів до утворення тріщин під час шліфування залежить від металургійної та структурної спадковості, яка визначається способами вилавки та ступенем розкислення,

фазовими перетвореннями в сплавах, режимами термічної, хіміко-термічної обробки тощо. При цьому параметрами, що враховують залежність напруженого стану від структурних складників, є набір механічних характеристик ( $K_{1C}$ ,  $K_C$ ,  $K_{ISC}$ ,  $K_{th}$ ) механіки руйнації.

Відмінною особливістю операції шліфування є виділення великої кількості теплоти, основна частина якої сприймається оброблюваною деталлю й викликає на окремих її ділянках структурні зміни – припіки. Ці дефекти зумовлюють зменшення вихідної твердості поверхні, утворення розтягувальних залишкових напружень, знижують контактну витривалість, втомну міцність деталей [1; 2].

Для великої групи металів і сплавів, не схильних до структурних перетворень у процесі обробки їх шліфуванням, характерним видом браку є дефекти типу тріщин, що істотно знижують експлуатаційні властивості виробів.

Характер та інтенсивність тріщиноутворення у виробках багато в чому визначаються теплофізичними властивостями оброблюваних матеріалів, їх структурою, спадковістю попередніх і подальших технологічних операцій, їх параметрами. Під час експлуатації деталей, поверхневий шар яких містить шліфувальні тріщини, руйнування виробів відбувається за місцями їх скупчення.

Якість поверхневого шару формується під впливом термомеханічних явищ, що супроводжують фінальні операції. Тому в роботах [1; 3–7] як основний показник фізико-механічного стану оброблюваних поверхонь використовується теплонапруженість алмазно-абразивної обробки. На підставі розроблених ними моделей температурних полів вивчали закономірності утворення дефектів типу припиків і технологічні можливості їх усунення залежно від теплофізичних властивостей оброблюваних матеріалів, технологічних параметрів їх обробки.

Однак наявні нині моделі теплових процесів алмазно-абразивної обробки отримані в припущенні однорідності матеріалів, що шліфуються, і не враховують наявності дефектів технологічної спадковості виробів [2; 8]. У зазначених роботах стан поверхневого шару деталі розглядається в основному з якісного боку або оцінюється в кожному окремому випадку експериментальними методами. Так, схильність магнітних сплавів до тріщиноутворення під час обробки їх шліфуванням пов'язують з особливостями їх магнітної та кристалічної структури, призначеної для отримання високих магнітних властивостей [9]. Відсутність будь-яких кількісних зв'язків тріщиностійкості магнітів з іншими властивостями не дає змоги однозначно користуватися наявною інформаційною базою бездефектної обробки шліфуванням. Є дослідження впливу структурних перетворень у сталях на утворення шліфувальних тріщин, згідно з якими наявність великої кількості аустеніту в підповерхневому шарі деталей призводить до утворення розтягувальних напружень, що реалізуються у вигляді крихких тріщин [10].

Структурні перетворення на матеріалах виробів не можна вважати «самостійною» причиною виникнення шліфувальних тріщин, оскільки структурні напруження досягають руйнівних значень, формуючись протягом значного проміжку часу. Шліфування характеризується короткочасністю, великими швидкостями нагріву й охолодження, за яких структурні зміни незначні, а термомеханічні напруження досягають граничних значень.

Механізм утворення тріщин у поверхневому шарі деталей із покриттями пояснюють дією тимчасових розтягувальних температурних напружень, що перевищують граничні значення, а відшаровування покриття від основного металу – дією залишкових напружень у поверхневому шарі [11]. Розглянуті при цьому моделі напружено-деформованого стану деталей із покриттями не враховують шматочкову неоднорідність (покриття-матриця), повністю відсутні дослідження впливу неоднорідності покриття на механізм дефектоутворення [11].

Феноменологічний підхід у вивченні причин тріщиноутворення матеріалів, схильних до цього виду дефектів, не дає можливості розкрити механізм зародження й розвитку шліфувальних тріщин. Вибір методу дослідження механізму тріщиноутворення ґрунтується на

мікродослідженнях, пов'язаних із неоднорідностями, які формуються в поверхневому шарі деталей під час попередніх технологічних операцій.

Інтенсивність появи тріщин багато в чому визначається наявністю різноманітних неоднорідностей, що виникають у поверхневому шарі по ходу технології виготовлення деталі. Особливо небезпечними з погляду зародження тріщин є такі спадкові дефекти, як флокени, гострі порожнини, домени, сторонні вclusions. Тому побудова теорії тріщиноутворення під час шліфування з використанням критеріїв механіки руйнування можлива лише на основі поглибленого вивчення механізму зародження тріщин у вершинах концентраторів, якими є металургійні, структурні й технологічні дефекти.

Для управління якістю деталі під час шліфування необхідно вивчити закономірності формування термомеханічного стану поверхневого шару з урахуванням його неоднорідності. Високопродуктивне бездефектне шліфування матеріалів, чутливих до тріщиноутворення, необхідно здійснювати з урахуванням наслідних дефектів на граничних режимах за збереження рівноважного стану, що ще не викликають утворення тріщин. Досі немає інформаційного забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення.

Під час постановки завдання підвищення якості фінішних операцій деталей виникає проблема оцінювання впливу неоднорідностей, вибору технологічних параметрів, які виключають дефектоутворення на оброблюваних поверхнях. Широка номенклатура матеріалів, схильних до тріщиноутворення, різноманіття їх властивостей, розміри, орієнтація, розміщення й розподіл спадкових дефектів сприяли тому, що сьогодні відсутні рекомендації з усунення шліфувальних тріщин під час обробки поверхонь виробів. У зв'язку із цим необхідно розробити інформаційне забезпечення оптимізації термомеханічного стану поверхневого шару виробів з урахуванням спадкових дефектів, що унеможливають виникнення дефектів типу тріщин і припиків на фінішних операціях.

Тому завдання визначення інформаційного забезпечення технологічних умов бездефектного шліфування виробів, матеріали яких схильні до дефектоутворення, є актуальним.

### **Мета дослідження**

Метою дослідження є розробка інформаційного забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів, матеріали яких схильні до тріщиноутворення, з урахуванням їх неоднорідностей, що формуються в поверхневому шарі деталей по ходу їх виготовлення.

Досягнення цієї мети вимагало постановки й вирішення таких основних завдань:

1. Вивчити механізм формування дефектів у поверхневому шарі деталей із матеріалів і сплавів, схильних до тріщиноутворення під час обробки їх шліфуванням із урахуванням попередніх операцій і спадкових неоднорідностей, що виникають при цьому.

2. Розробити математичну модель, яка описує термомеханічні процеси в поверхневому шарі під час шліфування деталей із матеріалів і сплавів з урахуванням їх неоднорідностей, що впливають на формування шліфувальних припиків і тріщин, і визначити критерії дефектоутворення.

3. Створити алгоритм забезпечення технологічних умов шліфування матеріалів, які мають спадкові неоднорідності, що забезпечують максимальну продуктивність за умови забезпечення необхідних показників якості.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Під час вибору й обґрунтуванні математичної моделі враховували, що процес шліфування деталей супроводжується як тепловими, так і механічними явищами. Однак переважний вплив на напружено-деформований стан поверхневого шару надають температурні поля. З огляду на те що основна маса поверхневого шару металу під час шліфування знаходиться в пружному стані,

можна скористатися моделлю термопружного тіла, що відображає взаємозв'язок механічних і теплових явищ при кінцевих значеннях теплових потоків. Так як для дослідження термомеханічного стану прошліфованих поверхонь важливою є інформація про поширення температур і напружень за глибиною та напрямом руху інструменту, то розглядається плоска задача.

Під час складання розрахункової схеми (рис. 1) допускається, що деталь типу заготовок може бути подана у вигляді кусково-однорідних умовних шарів з різними властивостями, розташованих на основному матеріалі-матриці, що дає змогу вивчати термомеханічні процеси під час шліфування деталей із кількома типами покриттів, завтовшки  $\Delta a_k$ , нанесених на основний матеріал. Така схема визначає теплові та деформаційні умови сполучення шарів за межами їх розділу –  $a_k$ .

Вплив неоднорідностей у вигляді фазових перетворень нестійких структур, міжзеренних плівок, меж контуру спадкових аустенітних зерен, карбідної строчечності, неметалевих включень, раковин, флокінів та інших дефектів, що виникають у поверхневому шарі, наявності в поверхневому шарі включень і дефектів у вигляді умовних тріщин (рис. 1).

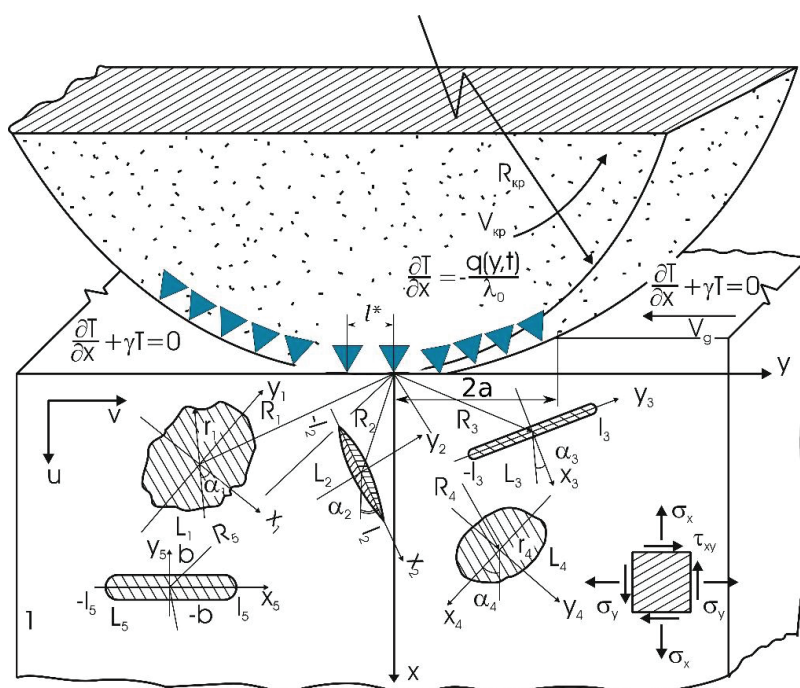


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення термомеханічного стану на фінішних операціях під час обробки виробів з багат шаровими покриттями, верхній шар яких має спадкоємні дефекти

Система рівнянь, що визначають тепловий і напружено-деформований стан під час шліфування поверхні деталей із покриттями, верхній шар яких має неоднорідності типу включень і тріщин, містить таке [3]:

Рівняння нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \begin{matrix} 0 \leq x < \infty; \\ -\infty < y < \infty. \end{matrix} \quad (1)$$

Рівняння пружності Ламе в переміщеннях:

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

$$\frac{\partial \Theta}{\partial y} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}; B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} a_k; \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (3)$$

де  $T(x, y, \tau)$  – температура в точці з координатами  $(x, y)$  і в будь-який момент часу  $\tau$ ;  $a$  – температуропровідність матеріалу;  $a_t$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення;  $\mu, G$  – постійні Ламе;  $u, v$  – компоненти вектора переміщень точки  $(x, y)$ ;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – оператор Лапласа.

Початкові умови для цього завдання можна взяти у вигляді:

$$T(x, y, 0). \tag{4}$$

Граничні умови для температурних і деформаційних полів, що враховують теплообмін із поверхні поза зоною контакту інструменту з деталлю й інтенсивного тепловиділення в зоні обробки, мають вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(y, \tau)}{\lambda}, |y| \left\langle a^*, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma T = 0, |y| \right\rangle a^*, \tag{5}$$

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=0} = \tau_{xy}(x, y, \tau)|_{x=0} = 0, \tag{6}$$

де  $q(y, \tau)$  – інтенсивність теплового потоку, що формується в результаті взаємодії кола з деталлю;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, що шліфується;  $2a^*$  – довжина зони контакту кола з оброблюваною поверхнею;  $\gamma$  – коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем;  $\sigma_x, \tau_{xy}$  – нормальні та дотичні напруження.

Умови сполучення шарів (покриттів):

- для температурних полів

$$T^{k-1}(a_k - 0, y, \tau) = T^k(a_k + 0, y, \tau); \lambda_{k-q} \frac{\partial T^{k-1}}{\partial x}(a_k - 0, y, \tau) = \lambda_k \frac{\partial T^k}{\partial x}(a_k + 0, y, \tau); \tag{7.1}$$

- для деформаційних полів

$$v_j^{k-1}(a_k - 0, y) = v_j^k(a_k + 0, y); \sigma_x^{k-1}(a_k - 0, y) = \sigma_x^k(a_k + 0, y); \tau_{xy}^{k-1}(a_k - 0, y) = \tau_{xy}^k(a_k + 0, y), \tag{7.2}$$

де  $\lambda_k$  – теплопровідність  $k$ -го шару;  $a_k$  – товщина  $k$ -го шару;  $v_j^k$  – компоненти переміщень в  $k$ -му шарі.

Для поверхневих шарів, що мають структурні й технологічні неоднорідності, умови розривності рішення залежно від типу дефекту будуть:

- на включеннях

$$\bar{u} = 0, \sigma_x \neq 0; \bar{v} = 0, \tau_{xy} \neq 0; \tag{8.1}$$

- на тріщиноподібних дефектах

$$\sigma_x = 0, \bar{u} \neq 0; \tau_{xy} = 0, \bar{v} \neq 0. \tag{8.2}$$

Гранично рівноважний стан поверхневого шару, що деформується, оцінювався класичними критеріями міцності.

З наявних критеріїв руйнування, які враховують локальні фізико-механічні властивості неоднорідних матеріалів, найбільш прийнятними для цього випадку є критерії силового підходу, пов'язані з використанням поняття коефіцієнта інтенсивності напруження (КІН) [7; 12; 13]. Коли навантаження призводить до того, що інтенсивність напружень  $K_I$  стає рівною граничному значенню  $K_{Ic}$ , то тріщиноподібний дефект перетворюється на магістральну тріщину.

Моделювання впливу вихідної шматкової однорідності матеріалів, що шліфуються (деталей із покриттями), на термомеханічні процеси здійснюється методом розривних рішень [5; 6; 14]. Під ними розуміються такі рішення, які задовольняють рівнянню теплопровідності Фур'є та пружності Ламе всюди, крім меж дефектів. У разі переходу через кордон неоднорідностей поля зміщень і напруження зазнають розриви I роду, тобто з'являються їх стрибки  $\langle v \rangle, \langle v \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$ .

Застосування узагальнених перетворень Фур'є за змінними  $x, y$  до рівнянь (1)–(7) з урахуванням (8) дає змогу отримати рекурентні співвідношення, що зв'язують зміщення й напруження в  $k$ -му шарі з напруженнями та зсувами, що формуються в першому шарі під дією нестационарних температурних полів.

Вплив неоднорідностей у поверхневому шарі сталей і сплавів на інтенсивність тріщиноста сколоутворення під час шліфування досліджується так. В умовах нерівномірного нагріву в поверхневому шарі виникають теплові деформації, які спричиняють температурне напруження. Під дією цих напружень, що концентруються в місцях розташування дефектів, і відбувається утворення шліфувальних тріщин.

Найбільший інтерес становить поведінка напружень в околі вершин дефектів типу тріщин, гострих включень, структурних недосконалостей, тобто особливостей напружень за  $y \rightarrow \pm l_k$ . Характер поля напружень у безпосередній близькості від кінця дефекту, отриманого в рамках класичної теорії пружності, визначається коефіцієнтами інтенсивності напружень  $K_I = iK_{II}$  [5; 6; 13; 15].

Так, дослідження інтенсивності напружень у вершинах дефекту довжиною  $2l$ , розташованого на глибині  $a^*$ , коли на поверхні тіла ( $x = 0, |y| \leq a^*$ ) заданий тепловий потік  $q$ , дало змогу встановити граничне значення цього потоку  $q^*$ , за якого вказаний дефект починає розвиватися в магістральну тріщину:

$$q^* = \frac{2\sqrt{3}\lambda(1-\nu)K_{4C}}{\alpha_2 E l \sqrt{\pi l} \sigma^*}. \quad (9)$$

Взаємний вплив дефектів на інтенсивність напружень виявляється в разі розташування їх із відривом один від одного трохи більше  $a^* = 1/3$ . При цьому найменша тріщиностійкість матеріалу досягається, якщо дефекти орієнтовані щодо один одного під кутом  $\phi = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4}$ . Геометрія і властивості включень можуть створювати умови як гальмування, так і розвитку шліфувальних тріщин. Якщо тепловий потік спрямований паралельно більшій осі еліптичного включення і прямолінійної термоізолюваної тріщини, то при коефіцієнті лінійного температурного розширення  $\alpha_i^B$  включення більшого, ніж основного, матеріалу  $\alpha_i^M$  ( $\alpha_i^B > \alpha_i^M$ ), збільшення жорсткості до зростання  $K_I$  щодо різних відносин коефіцієнтів теплопровідності, складників матеріалу.

Це призводить до зниження тріщиностійкості поверхневого шару. Для дефектів типу тріщин, що в шарі з меншим коефіцієнтом  $\alpha_i$ , орієнтація дефекту сильно впливає на величину КІН.

У разі значного видалення тріщини, розташованої в більш жорсткому шарі від лінії розділу, КІН  $K_I$  приймає максимальні значення, коли дефект орієнтований паралельно цій лінії, а з наближенням тріщини до межі розділу максимум  $K_I$  досягається, коли вона стає перпендикулярною цій межі. Якщо ж тріщина знаходиться в менш жорсткому матеріалі, то максимум  $K_I$  досягається, коли перпендикулярна тріщина лінії розділу. Коефіцієнт  $K_{II}$  стає максимальним при кутах між лінією розділу шарів, близьких до  $\pi/6$ , незалежно від відносної жорсткості шарів.

Для бездефектної обробки сталей і сплавів, що мають тріщиноподібні дефекти та включення, під час вибору режимів обробки й характеристик інструменту варто керуватися граничними значеннями теплового потоку, що формується в процесі шліфування, щоб спадкові дефекти не вийшли з рівноважного стану.

Насправді поверхневий шар шліфованих матеріалів містить неоднорідності й дефектність спадкового походження, що володіють тим чи іншим ступенем випадковості. Особливо істотна стохастичність мікронеоднорідностей у сплавах ЮНДКТ, цементованих сталях, різноманітних покриттях. У цьому разі використовують гіпотезу найслабшої ланки – дефекту з найбільшим геометричним розміром.

Вплив конструктивних параметрів інструменту на термомеханічний стан поверхневого шару визначався за допомогою модельної задачі (1)–(5) і граничних умов у вигляді:

$$q(y, \tau) = \frac{c\sqrt{\tau}}{\lambda} \left[ H(y) - H(y - 2a^*) \right] \sum_{k=0}^n \sigma(y + kl - v_{kp}\tau), \quad (10)$$

де  $H(y)$  – функція Хевісайда;  $\sigma(y)$  – дельта-функція Дірака;  $n$  – кількість зерен, що проходять у зоні контакту за час  $\tau = \frac{\sqrt{\pi t_{\text{шл}}}}{v_{kp}}$ ;  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу виробу;  $c\sqrt{\tau}$  – тепловий

потік від одиничного зерна;  $v_g, v_{kp}, t_{\text{шл}}$  режими шліфування,  $2a^*$  – довжина дуги контакту кола з деталлю;  $l^*$  – відстань між ріжучими зернами. Отримані теоретично й підтверджені експериментально максимальні значення миттєвої температури  $T_M$  від одиничних зерен до постійного складника –  $T_K$ , які використані надалі як критеріальні під час прогнозування умов утворення дефектів типу припиків і глибини їх залягання.

Вплив технологічної спадковості на тріщиностійкість металів під час шліфування вивчали за допомогою параметра механіки руйнування  $K_{lc}$ , що враховує залежність напружено-деформованого стану від структурних складників поверхневого шару.

Підвищення міцності сталей зі зростанням умісту вуглецю або зниження температури відпустки після загартування закономірно призводить до спаду  $K_{lc}$ , а отже, до посилення процесу тріщиноутворення під час їх шліфування. Для досягнення належного рівня тріщиностійкості цілком виправданим є використання високої відпустки й покращення таких сталей перед фінішними операціями. Такі заходи дають змогу усунути схильність цих сталей до появи шліфувальних тріщин.

Сталі в стані оборотної відпускнуої крихкості особливо схильні до інтенсивного виникнення шліфувальних тріщин. Дослідження поверхонь руйнування зразків зі сталі в цьому стані показали, що збільшення тривалості відпустки викликає суттєві зміни в мікробудуванні. У незахищеній сталі тріщини розвиваються по в'язкому мікромеханізму, а в стані оборотної відпускнуої крихкості переважаючим ставало руйнування шляхом міжзеренного сколу й розтріскування карбідних частинок.

Вплив домішок на тріщиностійкість сталей і сплавів є значним.

Так, зокрема, встановлено негативний вплив умісту сірки (0,008–0,009 %) у високоміцних сталях типу 18X2H4BA на їх тріщиностійкість. На підставі фактографічних досліджень показано, що осередками мікроруйнування в цих сталях є сульфідні включення.

Легування сталей, що супроводжується подрібненням зерна, сприяє певною мірою зростанню  $K_{lc}$ .

Підвищення чистоти сплавів по домішках завжди поєднує з одночасним зростанням тріщиностійкості й короткочасної міцності. Таким же сприятливим фактором у зниженні схильності сталей до тріщиноутворення під час їх шліфування є обробка поверхневого шару на наддрібне зерно. Подрібнення зерна сталі шляхом циклічної електротермічної обробки від 15 – бала (I-2 мкм) забезпечує підвищення  $K_{lc}$  на 40–50 % і вихід придатних виробів із матеріалів, що особливо чутливі до шліфувальних тріщин, збільшується у 2,5–3 рази.

Усунення зернограничної крихкості, до якої схильні високоміцні сплави, можна здійснити підвищенням температури відпустки або високотемпературною термомеханічною обробкою, що сприяє деформації меж аустенітного зерна, унаслідок чого гладкі межі піддаються фрагментації й набувають специфічної зубчатості. Це призводить до зростання міцності границь та усунення зернограничного руйнування під час шліфування таких сплавів.

Кількісні оцінки тріщиностійкості магнітотвердих сплавів проводили залежно від способів отримання заготовок (рис. 2) і подальшої їх термообробки на  $\gamma$ -фазу, термомагнітної обробки на  $a + a'$  фазу за різних режимів відпустки і швидкості охолодження. Контрольованими параметрами при цьому були значення напруження вигину  $\sigma_{\text{виг}}$ , розтягування  $\sigma_p$ , коефіцієнта  $K_{lc}$



і характеристики магнітних властивостей – коерцитивна сила матеріалу по намагніченості  $h_c$  і залишкова індукція  $B_r$ . Експериментальні дані свідчать, що значення  $K_{lc}$  різні для моно- й полікристалів ЮНДКТ у стадії заготівлі. Це пояснюється тим, що відсотковий уміст неметалевих включень у сплавах, отриманих різними способами, змінюється в межах. Фазовий склад цих сплавів змінює значення коефіцієнта  $K_{lc}$ . Так для полікристалів у вихідному стані  $K_{lc} = 30$  МПа м, тоді як наявність  $\gamma$ -фази підвищує  $K_{lc}$  до 97 МПа м. Установлено, що  $\gamma$ -фаза, будучи пластичнішою, порівняно з основною матрицею цього сплаву сприяє гальмуванню мікротріщин.

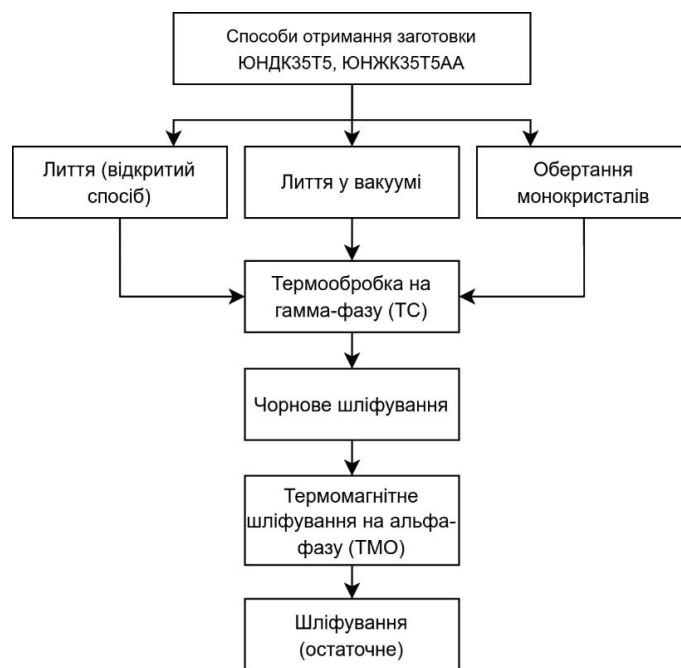


Рис. 2. Структура технологічного процесу виробництва магнітів ЮНДКТ

Тому аналіз структури технологічного процесу виготовлення магнітів є важливим етапом у виявленні резервів підвищення виходу придатних магнітів на операціях остаточного шліфування, так як основні дефекти – тріщино- і сколоутворення – виникають саме під час остаточної обробки цих магнітів.

Заготовки постійних магнітів зі сплавів алніко й тикональ одержують переважно методом лиття. Сьогодні використовують такі способи лиття – відкритий і вакуумний. Найбільш поширеним відкритим способом лиття є плавка [9].

Фрактографічний аналіз зламів у стані  $\gamma$ -фази виявляє, що зона руйнування має інтеркристалічний характер із вираженими лініями ковзання. Однак наявність цієї фази в сплаві ЮНДКТ знижує коерцитивну силу на 40%, залишкову магнітну індукцію – на 15–20%, максимальну магнітну енергію більше ніж на 60%. Тому ці сплави піддаються надалі термомагнітній обробці. Особливістю структури високо коерцитивного стану сплавів, що розглядаються, є періодичне чергування еліптично образних частинок  $a'$ -фази, оточених матрицею  $a$ -фази. Подальша обробка цих сплавів шліфуванням викликає формування дефектів типу тріщин у поверхневому шарі. Причому інтенсивність тріщиноутворення пов'язана з режимами термообробки, які, у свою чергу, впливають на розміри частинок  $a'$ -фази й напрям ТМО щодо поздовжньої подачі під час шліфування. Домінуючими технологічними параметрами, що впливають на тріщиностійкість і контактну температуру, є глибина шліфування та характеристики кола. Так, у разі шліфування з різною глибиною алмазними колами тріщиностійкість вимірюється незначно, на відміну від діапазону зміни  $K_{lc}$  під час обробки колами 24A25CM18K5. Контактна температура в першому випадку істотно нижча, ніж у другому.

На основі побудованої моделі вивчено механізм виникнення шліфувальних тріщин із позицій впливу геометрії та фізичних властивостей  $a'$ -фази та її орієнтації щодо напрямку шліфування цих магнітів у високо коерцитивному стані. При цьому використані також умови рівноваги структурних складників  $a'$ -фази залежно від домінуючих факторів процесу шліфування й в'язкості руйнування  $K_{lc}$ , магніту, виконання яких не призводить до виникнення тріщин на оброблювальній поверхні.

Розробка технологічних критеріїв для управління процесом бездефектного шліфування здійснена на базі встановлених функціональних зв'язків між фізико-механічними властивостями оброблюваних матеріалів та основними технологічними параметрами.

Якість оброблюваних поверхонь буде забезпечено, якщо за допомогою керівних технологічних параметрів підібрати такі технологічні умови обробки (режими, мастильно-охолоджувальні середовища й характеристики інструменту), що поточні значення температури шліфування  $T(x, y, \tau)$ , теплового потоку  $q(y, \tau)$ , напружень  $\sigma(M)$  і коефіцієнта  $K_{lc}$  не перевершують своїх граничних значень.

Реалізація системи обмежувальних нерівностей за величинами самої температури й глибини її поширення у вигляді:

$$T(x, y, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) \times H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} f(x, y, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_M; \quad (11)$$

$$T([h], 0, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) \times H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \psi(x, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_{c.n.}; \quad (12)$$

$$T_k(0, y, \tau) = \frac{Cv_{kp}}{\pi\lambda l \sqrt{v_g}} \int_a^\tau \int_{-e}^e \frac{\chi(\eta, t) e^{\frac{(y-\eta)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}} \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-1)}} + \gamma e^{\gamma^2(\tau-t)} [1 + \Phi(\gamma\sqrt{\tau-t})] \right\} d\eta dt \leq [T]; \quad (13)$$

$$T_k^{\max}(L, 0) = \frac{Cv_{kp}\alpha}{\lambda l v_q^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{v_q \sqrt{Dt_{gr}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T] \quad (14)$$

дає змогу уникнути утворення шліфувальних припіків і може послугувати основою для проектування циклів шліфування за тепловим критерієм.

Обробку матеріалів і сплавів без шліфувальних тріщин можна забезпечити, якщо обмежити граничними значеннями, що формуються в зоні інтенсивного охолодження напруження:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2G \frac{1+v}{1-v} \alpha_i T_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_i]. \quad (15)$$

У разі домінуючого впливу спадкової неоднорідності на інтенсивність утворення шліфувальних тріщин необхідно користуватися критеріями, до структури яких входять детерміновані зв'язки технологічних параметрів і властивості самих неоднорідностей. Як такі можна використовувати обмеження коефіцієнта інтенсивності напружень:

$$K = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-e}^e \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \sigma_x, \sigma_y dt \leq K_{lc} \quad (16)$$

або забезпечення за допомогою керівних технологічних параметрів граничного значення теплового потоку, за якого зберігається рівновага структурних дефектів:

$$q^* = \frac{P_z v_{kp} \alpha_s}{\sqrt{Dt_{gr}}} \leq \frac{\sqrt{3}\lambda K_{lc}}{Hl\sqrt{\pi l \sigma}}. \quad (17)$$

Умови бездефектного шліфування можна реалізувати, використовуючи інформацію про структуру матеріалу, що обробляється. Так, у разі превалюючого характеру структурних недосконалостей

довжиною  $2l$ , їх регулярного розташування щодо зони контакту інструменту з деталлю можна як критеріальне співвідношення використовувати умову рівноваги дефекту у вигляді:

$$l_0 < \frac{K_C^2}{x [GT_k (1 + \nu) \alpha_t]^2} \quad (18)$$

У цій формулі технологічна частина міститься у зв'язку з величиною контактної температури  $T_k$  з умовами обробки.

Наведені нерівності можуть бути інформаційною базою для визначення зв'язків температурного й силового полів із керівними технологічними параметрами. Вони задають ділянку поєднань цих параметрів, які відповідають отриманим термомеханічним критеріям. При цьому враховуються властивості матеріалу, що обробляється, і гарантується забезпечення необхідної якості виробів.

На основі отриманих критеріальних співвідношень побудовано алгоритм забезпечення якості поверхневого шару деталей під час шліфування з урахуванням максимальної продуктивності обробки (рис. 3).

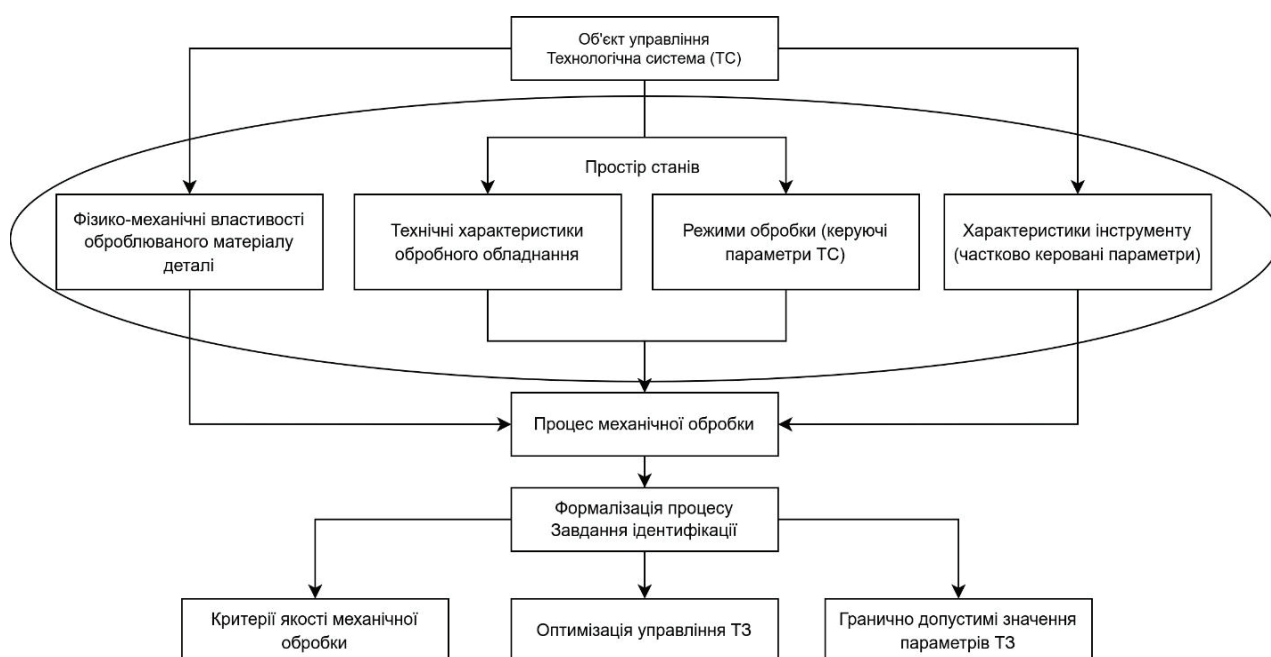


Рис. 3. Алгоритм забезпечення якості механічної обробки за оптимально допустимих параметрів технологічної системи

### 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 під час шліфування, технологічних умов обробки з урахуванням накопичених пошкоджень і неоднорідностей матеріалів і сплавів, особливо схильних до тріщиноутворення в процесі шліфування, що має вагоме народногосподарське значення для зниження браку на фінішних операціях і підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин.

1. Вивчено механізм формування дефектів у поверхневому шарі деталей із матеріалів і сплавів, схильних до тріщиноутворення під час обробки їх шліфуванням, з урахуванням попередніх операцій до спадкових неоднорідностей, що виникають при цьому. Установлено, що шліфувальні тріщини мають теплову природу, тому як критерії бездефектної обробки необхідно вибирати теплові критерії.

2. Розроблено математичну модель, яка описує термомеханічні процеси в поверхневому шарі під час шліфування деталей із матеріалів і сплавів з урахуванням їх неоднорідностей, що впливають на формування шліфувальних тріщин. При цьому вперше отримано розрахункові залежності між критерієм тріщиностійкості й основними керівними технологічними параметрами. За відомими характеристиками спадкових дефектів визначено граничні значення теплового потоку, що забезпечують необхідну якість шліфованих поверхонь.

3. На основі отриманих критеріальних співвідношень побудовано алгоритм забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до втрати якості поверхневого шару деталей, з урахуванням максимальної продуктивності обробки.

### Список використаної літератури

1. Davim J.P. Modern mechanical engineering: Research, development and education. Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-45176-8
2. Теплофізика механічної обробки : підручник / А.В. Якимов та ін. Одеса : Астропринт, 2000. 256 с.
3. Kheir N. Systems modeling and computer simulation. Routledge, 2018.
4. Моделювання та оптимізація систем : підручник / В.М. Дубовой. Вінниця : ПП «ТД Едельвейс», 2017. 804 с.
5. Nesetova V., Lajtai E.Z. Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1973. № 10(4). P. 265–284. doi: 10.1016/0148-9062(73)90038-7
6. McMeeking R.M. Electrostrictive stresses near crack-like flaws. *ZAMP Journal of Applied Mathematics and Physics*. 1989. № 40(5). P. 615–627. doi: 10.1007/BF00945867
7. Kunitsyn M., Usov A., Zaychyk Y. Information technologies of the analysis for models to ensure quality characteristics of the working surfaces during mechanical processing. doi: 10.1007/978-3-031-32767-4\_26.
8. Avila S.H.J., Chen C. Strength of materials. United Kingdom : IntechOpen, 2020.
9. Bhargava G.K., Sharma P., Bhardwaj S., Sharma I. An introduction to hard ferrites: From fundamentals to practical applications. *Materials Research Forum LLC*. 2023.
10. Hansen P.F. The science of construction materials. Germany : Springer Berlin Heidelberg, 2009.
11. An open modular architecture controller based online chatter suppression system for cnc milling / Z. Han et al. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. doi: 10.1155/2015/985837
12. Zisis V.A., Ladopoulos E.G. Two-dimensional singular integral equations exact solutions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1990. № 31(2). P. 227–232. doi: 10.1016/0377-0427(90)90165-V
13. Freiman S.W., Jr J.J.M. The fracture of brittle materials: Testing and analysis. John Wiley & Sons, 2019.
14. Popov G.Y. New Integral Transformations and Their Applications to Some Boundary-Value Problems of Mathematical Physics. *Ukrainian Mathematical Journal*. 2002. № 54(12). P. 1992–2005.
15. Sih G.C. Methods of analysis and solutions of crack problems. Springer Science & Business Media, 1973.

### References

1. Davim, J.P. (2014). Modern mechanical engineering: Research, development and education. Springer. doi: 10.1007/978-3-642-45176-8 [in English]
2. Yakymov, A.V., Usov, A.V., Slobodanyk, P.T. & Iorhachov, D.V. (2000). Теплофізика механічної обробки – [Thermal physics of mechanical processing]. Odessa : Astroprynt.
3. Kheir N. (2018). Systems modeling and computer simulation. Routledge. [in Ukrainian]

4. Dubovoi, V.M., Kviatnyi, R.N., Mykhalov, O.I. & Usov, A.V. (2017). Modeliuvannia ta optymizatsiia system – [Modeling and optimization of systems]. Vinnytsia : PP “TD Edelveis”. [in Ukrainian]
5. Nesetova, V. & Lajtai, E.Z. (1973). Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 10(4). P. 265–284. doi: 10.1016/0148-9062(73)90038-7 [in English]
6. McMeeking, R.M. (1989). Electrostrictive stresses near crack-like flaws. *ZAMP Journal of Applied Mathematics and Physics*. Vol. 40(5). P. 615–627. doi: 10.1007/BF00945867 [in English]
7. 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. doi: 10.1007/978-3-031-32767-4\_26 [in English]
8. Avila S.H.J. & Chen, C. (2020). Strength of materials. United Kingdom : IntechOpen [in English]
9. 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]
10. Hansen, P.F. (2009). The science of construction materials. Germany : Springer Berlin Heidelberg. [in English]
11. Han, Z., Jin, H., Li, M. & Fu, H. (2015). An open modular architecture controller based online chatter suppression system for cnc milling. *Mathematical Problems in Engineering*. P. 1–13. doi: 10.1155/2015/985837 [in English]
12. Zisis, V.A., Ladopoulos, E.G. (1990). Two-dimensional singular integral equations exact solutions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Vol. 31(2). P. 227–232. doi: 10.1016/0377-0427(90)90165-V [in English]
13. Freiman, S.W., Jr J.J.M. (2019). The fracture of brittle materials: Testing and analysis. John Wiley & Sons. [in English]
14. Popov, G.Y. (2002). New Integral Transformations and Their Applications to Some Boundary-Value Problems of Mathematical Physics. *Ukrainian Mathematical Journal*. Vol. 54(12). P. 1992–2005. [in English]
15. Sih, G.C. (1973). Methods of analysis and solutions of crack problems. Springer Science & Business Media. [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.

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

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.

Usov Anatolii Vasylovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics and System Modeling of the Odesa National Polytechnic University, e-mail: usov\_a\_v@op.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3965-7611.

Kunitsyn Maksym Volodymyrovych – PhD, Associate Professor at the Department of Integrated Management Technologies, Deputy Director of the Institute of Training of Foreign Citizens of the Odesa National Polytechnic University, e-mail: m.v.kunitsyn@op.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1764-8922.

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