

АНОТАЦІЯ

Зайчик Ю. І. Технологічні методи забезпечення якісних характеристик виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення на фінішних операціях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». – Національний університет «Одеська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Одеса, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розробці теорії і нормативних рекомендацій по технологічним методам суттєвого зниження дефектів типу припиків і тріщин на фінішних операціях деталей із матеріалів, схильних до вказаних дефектів, поверхневий шар яких має спадкові дефекти структурного або технологічного походження.

Вивчення термомеханічних явищ, що формують якість поверхневого шару на фінішних операціях з урахуванням попередніх видів обробки виробів, встановлення їх впливу на розтріскування і припикання на основі кількісного аналізу термічного і напруженого стану складають суть даної роботи.

Існуючі функціональні зв'язки технологічних параметрів з температурою шліфування дозволяють усунути припикання на оброблюваних поверхнях виробів, які не містять конструкторських і технологічних неоднорідностей, і матеріал яких не містить значних неоднорідностей, використовуючи відповідні методики.

Однак відсутність досліджень особливостей процесу зародження шліфувальних тріщин, їх утворення в магістральні в залежності від конструктивних, технологічних і структурних неоднорідностей матеріалу виробів не дозволяє однозначно використовувати наявні рекомендації щодо усунення розглянутих дефектів.

Таким чином, необхідно виконати дослідження впливу термомеханічних явищ, що супроводжують фінішні операції над виробами із матеріалів, що мають структурні неоднорідності спадкового походження,

схильних до дефектоутворення на кінцевих операціях, для отримання технологічних умов для якісної обробки робочих поверхонь деталей і матеріалів.

У **вступі** представлено обґрунтування вибору теми дослідження, висвітлено її актуальність, сформульована мета й завдання дослідження, визначені наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, а також наведена інформація про апробацію, структуру та обсяг роботи.

В **першому розділі** проведено Аналіз стану формування якісних характеристик поверхневого шару виробів із матеріалів, схильних до дефектоутворення на фінішних операціях.

Складність процесів, що протікають в поверхневому шарі матеріалу, при механічній обробці, а також при експлуатації цих деталей робить необхідним розгляд впливу технологічної спадковості тільки на операції кінцевої обробки. Висока теплова напруженість процесів алмазно-абразивної обробки призводить до того, що теплофізика цих процесів часто є домінуючою у формуванні якісних характеристик обробленої поверхні.

Проте, лише тепловими критеріями завдання забезпечення якості робочої зони виробів не може бути вирішена. Враховуючи те, що матеріали, що йдуть на виготовлення деталей мають великий ступінь неоднорідності, слід очікувати істотних змін у розподілі температур і деформацій у зонах накопичення неоднорідностей, що у свою чергу може призвести до утворення локальних деформацій та появи тріщин на робочих поверхнях виробів, що шліфуються.

В даний час переважає феноменологічний підхід у вивченні причин утворення тріщин. В основі цього підходу іноді розглядають сили різання, що на наш погляд є недостатнім. Дійсно, механічна інтерпретація тріщино-утворення не враховує впливу теплових процесів, що є домінуючим фактором у процесі шліфування.

Дослідження причин виникнення шліфувальних тріщин з позицій структурних і фазових перетворень, що породжують відповідні їм структурні напруження - $\sigma(M, \tau)$ також мають окремий характер і не дозволяють в цілому простежити справжню картину утворення дефектів типу тріщин на

оброблюваній поверхні. Справа в тому, що як структурні, так і фазові перетворення (в обсягах, достатніх для утворення руйнівних структурних напружень), повинні приходити при відносно невеликих швидкостях, нагрівання (або охолодження) і протягом значного проміжку часу. У той час, як шліфування характеризується короткочасністю, великими швидкостями нагріву, близько $3000 * 50000$ град/с [12] і такими ж швидкостями охолодження. Це, у свою чергу, формує умови, близькі до теплового удару, при якому термічне напруження досягає дуже великих значень.

Крім того, шліфування зі структурними перетвореннями, наприклад, коли контактна температура дорівнює температурі початку розпаду мартенситу, супроводжується появою розтягуючих структурних напружень $\sigma_{p.стр}$, незначних за величиною в зоні контакту та стискаючих $\sigma_{p.стр}$ у зоні інтенсивного охолодження. Термомеханічні напруги, значно перевершують $\sigma_{p.стр}$ у цих зонах, і мають, переважно, зворотній знак. Тому структурні перетворення не можуть бути "самостійною" причиною виникнення шліфувальних тріщин. Вони можуть сприяти зростанню тріщин, що утворилися під дією теплового удару. Тим більше, що процес перетворення тимчасових термомеханічних напружень на $\sigma_{зал}$ відбувається протягом часу, достатньому для значних структурних і фазових змін у поверхневому шарі, що у свою чергу породжує $\sigma_{p.стр}$, що сприяють подальшому зростанню шліфувальних тріщин у магістральні.

Існуючі функціональні зв'язки технологічних параметрів з температурою шліфування дозволяють за допомогою відповідних прийомів усувати припали на оброблюваних поверхнях виробів, які не містять конструкторсько-технологічних неоднорідностей, і матеріал яких не містить істотних неоднорідностей спадкового характеру. Дослідження умов підвищення якості оброблюваних поверхонь шляхом усунення дефектів типу тріщин проводилося в основному на рівні виявлення якісних зв'язків технологічних параметрів з фізико-механічними властивостями матеріалів, що шліфуються. Наявні кількісні зв'язки напружень з режимами обробки, носять частковий характер і не відображають загальних закономірностей напружено-деформованого стану поверхневого шару в

залежності від технологічних умов і властивостей оброблюваних матеріалів. В основному напружений стан поверхонь, що шліфуються, оцінювалося чисельними методами.

Відсутність досліджень з особливостями процесу зародження шліфувальних тріщин, їх формуванні в магістральні в залежності від конструктивних, технологічних і структурних неоднорідностей матеріалу виробів не дозволяють однозначно користуватися наявними рекомендаціями щодо усунення дефектів, що розглядаються. Основні властивості та характеристики якості поверхні - шорсткість, мікротвердість, величина і знак внутрішніх технологічних напружень, наявність включень та інших структурних недосконалостей залежать від видів і режимів термічної обробки (ТО), термомеханічної обробки (ТМО) і механічної обробки матеріалів і визначають залежність експлуатаційних якостей виробів із матеріалів від технології їх виготовлення.

Особливості фізико-механічних властивостей магнітотвердих сплавів типу ЮНДК35Т5 (висока крихкість, низька міцність, відносно низькі значення теплопровідності та температуропровідності) відносять їх до важкооброблюваних матеріалів. Тому аналіз структури технологічного процесу виготовлення магнітів є важливим етапом у виявленні резервів підвищення виходу придатних магнітів на операціях кінцевого шліфування, оскільки основні дефекти – тріщино-і сколоутворення виникають саме при кінцевій обробці даних магнітів. Для бездефектної обробки сталей і сплавів, схильних до тріщино-і сколоутворення необхідно враховувати їхню структурну неоднорідність. Наявність тріщино подібних дефектів, і включень сприяє тому, що при виборі режимів обробки і характеристик інструменту слід керуватися граничними значеннями теплового потоку, що формується.

Метою дисертаційного дослідження є забезпечення якості обробки виробів із матеріалів, які схильні до тріщиноутворення на основі дослідження технологічних можливостей процесу шліфування шляхом аналізу термомеханічних явищ та розробки технологічних критеріїв вибору, реалізація

яких дозволить технологічним параметрам суттєво знизити дефектоутворення на їх робочих поверхнях.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

1. Розробити математичну модель, що описує термомеханічні процеси в поверхневому шарі при шліфуванні деталей із матеріалів, схильних до тріщино утворення з урахуванням спадкоємних дефектів від попередніх операцій.
2. Дослідити вплив технологічної спадковості попередніх операцій на інтенсивність утворення тріщин і припиків деталей із матеріалів, схильних до вказаних дефектів при обробці шліфуванням.
3. Визначити критерії утворення тріщин і припиків і встановити їх зв'язок із досліджуваними технологічними факторами процесу шліфування робочих поверхонь деталей із матеріалів, схильних до вказаних дефектів.
4. Розробити передумови для оптимізації термомеханічного стану поверхневого шару деталей в процесі шліфування, що виключають виникнення шліфувальних дефектів типу тріщин і припиків.
5. Вивчити технологічні можливості управління якістю поверхневого шару робочих поверхонь деталей із матеріалів, схильних до тріщино утворення та забезпечення їх геометричних характеристик, необхідних для ефективної експлуатації.

У другому розділі наведені теоретичні основи дослідження формування якісних параметрів оброблюваних робочих поверхонь виробів під дією термомеханічних явищ, що супроводжують фінішні операції. Розглянуті особливості формування якісних параметрів робочих поверхонь конічних виробів при їх шліфуванні. Побудована модель термомеханічних процесів, що супроводжують фінішну обробку конічних виробів під дією яких досліджуються умови формування дефектів в поверхневому шарі, що призводить до втрати несучої здатності цих виробів у процесі їх експлуатації. Виконана перевірка адекватності побудованої моделі щодо забезпечення якісних характеристик поверхневого шару на прикладі шліфування конічних виробів із сталі

12Х2Н4ВА, робочий шар яких піддається термообробці. Аналіз результатів моделювання показує, що температура оброблюваної поверхні зростає по мірі наближення оброблюючого інструменту по конічній поверхні до меншого діаметру. Саме ця область оброблюваної поверхні конічних виробів найбільше схильна дефектоутворенню на фінішних операціях. Тому при призначенні режимів обробки таких поверхонь, їх слід вибирати з умови, що при наближенні оброблюючого інструменту до більш вузької частини конічної поверхні формується температура на ній не повинна перевищувати допустимих значень, які забезпечують необхідну якість.

В цьому розділі досліджується вплив термомеханічних явищ на утворення шліфувальних дефектів на робочих поверхнях деталей із складно оброблюваних матеріалів. Різні технологічні операції сприяють виникненню в поверхневому шарі спадкових дефектів, до яких відносяться неметалеві включення, флокени, повітряні пори, мікротріщини усадкового характеру (виправка), деформація кристалічних зерен, тріщини ліквіаційного походження (поковка, протягування) крупнозернистість, скупчення карбідів, сколи, вириви, сітка поверхневих тріщин, внутрішні тріщини, відшаровування, припали.

Дані дефекти, будучи концентраторами напруження, сприяють тріщиноутворенню, як у процесі обробки матеріалу, так і при експлуатації деталей із цих матеріалів.

Зниження браку на фінішних операціях даних матеріалів, підвищення експлуатаційних властивостей виробів із цих матеріалів є важливим народно-господарським завданням, вирішення якого призводить до значної економії матеріальних ресурсів, трудомісткості та собівартості виготовлення деталей.

Якість поверхневого шару формується під впливом термомеханічних явищ, що супроводжують фінальні операції. Тому як основний показник фізико-механічного стану оброблюваних поверхонь використовується тепло напруженість алмазно-абразивної обробки. Для управління якістю деталі під час шліфування досліджувались закономірності формування термомеханічного стану поверхневого шару з урахуванням його неоднорідності.

Високопродуктивне бездефектне шліфування матеріалів, чутливих до тріщино утворення, розглядалось з урахуванням наслідкових дефектів на граничних режимах, при збереженні рівноважного стану. На основі побудованої моделі вивчено механізм виникнення шліфувальних тріщин із позицій впливу геометрії та фізичних властивостей α -фази та її орієнтації по відношенню до напрямку шліфування магнітів у високо коерцитивному стані. При цьому використані також умови рівноваги структурних складових залежно від домінуючих факторів процесу шліфування і в'язкості руйнування K_{1c} магніту, виконання яких не призводить до виникнення тріщин на оброблюваній поверхні.

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

Якість оброблюваних поверхонь буде забезпечено, якщо за допомогою керуючих технологічних параметрів підібрати такі технологічні умови обробки (режими, мастильно-охолоджувальні середовища та характеристики інструменту), що поточні значення температури шліфування, теплового потоку, напружень і коефіцієнта K_{1c} не перевершуватимуть своїх граничних значень, при яких формується утворення тріщин. На основі отриманих критеріальних співвідношень побудовано алгоритм забезпечення якості поверхневого шару деталей при шліфуванні з урахуванням максимальної продуктивності обробки. На прикладі шліфування постійних магнітів, схильних до тріщино утворення розв'язувалась задача оптимізації умов їх бездефектної обробки. Дослідження впливу попередніх видів обробки на процес тріщино утворення при шліфуванні високо коерцитивних магнітів проводилося на основі таких критеріїв, які одночасно служили характеристикою механічних властивостей матеріалу в цілому та відображали вплив морфології самих сплавів. Такий підхід дозволяє виявити додаткові резерви підвищення механічних властивостей магнітів на кожній з технологічних операцій, що передують шліфування і встановити власне вплив абразивної обробки на виникнення тріщин. Проведено аналіз причин

тріщиноутворення при шліфуванні магніто-твердих сплавів залежно від технології їх виготовлення та структурної неоднорідності, що супроводжують по ходу технологічного процесу, на механізм зародження мікротріщин і розвитку їх у магістральні. Встановлено також вплив морфології та неметалевих включень на інтенсивність появи шліфувальних тріщин. Для цього отримано залежності в сукупності з експериментальними дослідженнями, які дозволили теоретично визначити області поєднань технологічних параметрів, що забезпечують необхідну якість, поверхонь, що обробляються, і побудований алгоритм вибору цих параметрів з умови максимальної продуктивності процесу шліфування. Для розробки технологічних критеріїв з управління процесом бездефектного шліфування враховувалося, що цей процес є багатофакторним. На якість поверхневого шару при шліфуванні деталей впливають фізико-механічні властивості металу, що обробляється, його структура, режими шліфування і характеристики інструменту, умови попередньої обробки імпрегнуючими складами інструменту, а також характеристики застосовуваних МОС.

У третьому розділі перевірялась ефективність розроблених технологічних критеріїв для керування процесом бездефектного шліфування виробів із складно оброблюваних матеріалів. Досліджено вплив конструктивних параметрів інструменту на якісний стан робочих поверхонь шліфувальних виробів. Встановлено, що інтенсивність теплового потоку від ріжучих зерен шліфувального круга є домінуючим фактором в процесі мікро руйнування оброблюваної поверхні. На формування в поверхневому шарі напружень від радіальної та тангенціальної сил різання суттєво впливає тертя між абразивом і оброблюваним матеріалом. Із збільшенням коефіцієнта тертя відбувається переміщення максимально напруженої зони до поверхні оброблюваної деталі. Це переміщення надає вплив на утворення шліфовочних тріщин. Із режимів шліфування визначальною в появі шліфовочних тріщин, є глибина різання. Коефіцієнт інтенсивності напружень також змінюється зі зміною глибини шліфування. Мастильно охолоджуючі середовища понижують температуру

шліфування, сили тертя між кругом і оброблюваним матеріалом, тим самим зменшуючи інтенсивність тріщино утворення в поверхневому шарі.

Наукова новизна отриманих результатів. Розв'язана наукова задача по встановленню розрахункових залежностей, які визначають вплив спадкоємних дефектів від попередніх операцій на тріщиностійкість робочих поверхонь деталей із матеріалів, схильних до тріщино утворення при шліфуванні, створенню оптимальних технологічних умов їх обробки з урахуванням спадкоємних дефектів та неоднорідностей у поверхневому шарі. Окрема увага була приділена деталям з конічною формою, тому що термічні ефекти у конічних поверхнях під час фінішних операцій недостатньо вивчені.

При цьому одержані наступні наукові результати:

1. Уперше розроблена математична модель по визначенню термомеханічного стану при шліфуванні деталей із матеріалів, схильних до тріщино утворення. На основі цієї моделі визначені функціональні зв'язки критеріїв тріщиностійкості з керуючими технологічними параметрами операції шліфування для запобігання тріщино- та сколоутворення на оброблюваних поверхнях;
2. Отримав подальший розвиток метод шліфування робочих поверхонь деталей із матеріалів, схильних до тріщино утворення, який забезпечує необхідні геометричні і якісні характеристики їх робочих поверхонь, що дозволило підвищити їх ефективність в експлуатації;
3. Удосконалено модель динаміки процесу шліфування робочих поверхонь деталей із матеріалів, схильних до тріщино утворення, що сприяло раціональному вибору характеристик інструменту, режимів шліфування та мастильно охолоджуючих середовищ, які забезпечують необхідну якість оброблюваних поверхонь.

Практична цінність. На основі проведених теоретично-експериментальних досліджень розв'язана задача підвищення експлуатаційних властивостей виробів із матеріалів, схильних до тріщино утворення за рахунок зменшення дефектоутворення на фінішних операціях. Розроблено:

1. Практичні рекомендації до вибору технологічних умов обробки деталей із матеріалів, схильних до тріщино утворення, які забезпечують необхідні параметри якості їх робочих поверхонь;
2. Визначено ефективні інструменти для шліфування деталей із матеріалів, схильних до тріщино утворення, які суттєво знижують тріщино утворення на їх робочих поверхнях;
3. Окремі матеріали дисертаційної роботи впроваджені на ТОВ «Холдингова компанія «Мікрон».
4. Результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедр вищої математики і моделювання систем, цифрових технологій в інжинірингу, динаміки машин та механічної інженерії та автомобільного транспорту і логістики

Ключові слова: фінішні операції, спадкоємні дефекти, припіки, тріщино утворення, моделювання термомеханічних явищ, якість обробленої поверхні, складно оброблювані матеріали, бездефектна обробка, технологічні критерії.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Наукові роботи, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Усов, А. В., Куніцин, М. В., & Зайчик, Ю. І. (2021). Моделювання технологічних можливостей по забезпеченню якісних характеристик поверхневого шару конічних виробів на фінішних операціях//. Прикладні питання математичного моделювання, 4(1), 231–239. <https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/ppmm/article/view/237> (Фахове видання). *(Автору належить проведення розрахунків та перевірка адекватності побудованої моделі)*
2. Usov, A. V., Kunitsyn, M. V., & Zaychik, Y. I. (2021). Design of technological possibilities on providing of quality descriptions of superficial layer of conical wares on finish operations. Applied Questions of Mathematical Modeling, 4(1), 231–239. <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.1.25> (Фахове видання). *(Автору належить проведення розрахунків та перевірка адекватності побудованої моделі)*

3. Usov, A. V., Kunitsyn, M. V., & Zaychyk, Y. I. (2022). Management of the quality characteristics of the working surfaces of complex profile products during mechanical processing. Proceedings of XVI International Conference Measurement and Control in Complex System (MCCS-2022). 16th IC Measurement and Control in Complex Systems, Vinnytsia, Ukraine. <https://doi.org/10.31649/mccs2022.09> (Фахове видання). *(Автору належить проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)*
4. Kunitsyn, M., Usov, A., Zaychyk, Y. (2023). Control of Thermomechanical Conditions for Working Surfaces of Products Made of Heterogeneous Materials at Finishing Operations. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_13 (Scopus). *(Автору належить дослідження термомеханічних параметрів поверхневого шару шліфуваних гетерогенних матеріалів)*
5. 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: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel, J. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_26 (Scopus). *(Автору належить створення інформаційної технології, яка враховує вплив неоднорідностей у матеріалах, що оброблюються фінішними методами на функціонально-градієнтні властивості виробів)*
6. А.В. Усов, М.В. Куніцин, Ю.І. Зайчик Інформаційне забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення//Ж. ППММ Т. 6, № 1, 2023–С. 134-146, <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-15>. *(Автору належить визначення механізму формування шліфувальних тріщин у поверхневому шарі матеріалів і сплавів при алмазно-абразивній обробці)*

7. Usov A.V., Kunitsyn M.V., Zaychyk Yu. I. An information model concept for a thermomechanical process in grinding//Herald of Advanced Information Technology 2023; Vol. 6 No3:250-262. <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.17>.
(Автору належить побудова алгоритму вибору технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до втрати якості поверхневого шару деталей)
8. A. Usov, DSc, Prof., M. Kunitsyn, PhD, Assoc. Prof., Yu. Zaychyk// Theoretical and experimental recommendations for the elimination of grinding cracks during the processing of permanent magnets. Proceedings of Odessa Polytechnic University, 2023, [2]68: 5 – 18. DOI: 10.15276/OPU.2.68.2023.01. (Вирішено задачу визначення напружено-деформованого стану поверхневого шару полірованих магнітів у високо коерцитивному стані, ослабленому системою включень)
9. Anatoliy Usov, Yuriy Zaychyk. Studying the influence of thermomechanical phenomena on grinded surface quality parameters of products made from hard-to-process materials // ISSN 2078-7405 Cutting & Tools in Technological System, 2023, Edition 99. Doi: 10.20998/2078-7405.2023.99.13. (Автором розроблено оптимальні технологічні параметри обробки металів та сплавів, які суттєво схильні до появи дефектів типу тріщин, сколів, припиків у поверхневому шарі)

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та схвалені на Міжнародних наукових конференціях: XXII, XXI Міжнародних конференціях з математичного моделювання (Херсон, 2020, 2021), XVI Міжнародній конференції «Контроль, управління складними системами» (Вінниця, ВНТУ 2022), Міжнародна конференція з передових виробничих процесів Inter Partner - 2021 (Одеса, 2021), V, VI Міжнародні конференції Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE -2022, DSMIE -2023)

ABSTRACT

Zaychyk Y.I. Technological methods for providing quality characteristics of the products from the materials prone to crack occurrence during the final machining operations.– Qualification scientific work on rights of manuscript.

Dissertation for acquiring Doctor of Philosophy grade by the specialization 131 “Applied mechanics”. – National University «Odeska politechnika» Ministry of education and science of Ukraine, Odesa, 2024.

Dissertation is dedicated to the developing a theoretical framework and normative recommendations for implementing technological methods aimed at significantly reducing defects like burns and cracks during the final machining operations on the products made from materials prone to the mentioned defects and which surface layer contains heredity defects of structural or technological origin.

The objectives of this work are twofold: the first involves studying thermo-mechanical phenomena that shape the quality of the surface layer during the final machining operations considering the preceding stages of product processing; the second objective is determining the influence of thermo-mechanical phenomena on crack occurrence and the appearance of burns based on the quantitative analysis of the thermal and strained state.

The existing functional connections between technological parameters and grinding temperature enable the prevention of burns on the processed surfaces of products which don't have constructional or technological heterogeneities and their material doesn't exhibit significant inhomogeneities. This can be achieved through the application of appropriate methodologies.

However, the insufficient research of the peculiarities of grinding-induced crack formation and their progression into main cracks depending on constructional, technological, and structural heterogeneities of product's material hinders the unequivocal use of existing recommendations for preventing these defects.

Therefore, there is the need to investigate the influence of thermo-mechanical phenomena that accompany final machining operations on products made from materials with hereditary structural heterogeneities, which are prone to crack

occurrence during these operations. This exploration can lead to the establishment of technological conditions for high-quality processing of the working surfaces of both products and materials.

In the **introduction** choice for the research topic is outlined, also its relevance is emphasized. The research objectives and the tasks are formulated, and the scientific novelty and practical significance of the research results are determined. Additionally, information regarding testing, the research structure and the amount of work are given.

In the first section an analysis of the formation quality characteristics of the surface layer in products made from materials prone to defect occurrence during the final machining operations was conducted.

Processes that flow inside the surface layer of the material during machining or product operation are rather sophisticated. That's why the consideration of technological heredity influence during the final machining is required. High heat stress of the diamond-abrasive machining leads to the fact that thermophysics of these processes is often the dominating factor during the formation of quality characteristics of the processed surface.

However, relying only on thermal criteria for achieving the required quality of the working zone of the products is insufficient. Taking into account that materials used for manufacturing the products have high grade of heterogeneity, we shall expect significant variations in temperature and deformation distributions in zones of heterogeneity concentration. These variations, in turn, can lead to development of local deformations and occurrence of cracks on the working surfaces of the grinded products.

Nowadays the phenomenological approach for studying the reasons of crack occurrence is prevailing. In the base of this approach sometimes only the cutting forces are considered, which from our point of view is insufficient. Really, mechanical interpretation of crack occurrence doesn't consider the influence of thermal processes which is the dominating factor during grinding.

Studying the causes of grinding-induced cracks from the positions of structural and phase transformations which generate corresponding structural stresses with local character $\sigma(M,\tau)$ doesn't provide the comprehensive understanding of the actual

development of crack-like defects on the processed surface. The point is that structural and phase transformations (in amounts sufficient for creating destructive structural stresses) must run at relatively low rates of heating (cooling) over long time periods. In contrast, grinding is a rapid operation with high rates of heating (approximately 3000 to 50000 grad/s [12]) and cooling. This, in turn, creates the conditions close to thermal shock during which thermal stress reaches high values.

Furthermore, grinding accompanied by structural transformation, for example, when contact temperature equals the temperature at which martensite begins to dissolve, results in emergence of minor tensile structural stresses $\sigma_{s\text{ str}}$ in contact zone and compressive stresses σ_{sq} in rapidly cooling zone. Thermo-mechanical stresses in these zones significantly surpass σ_{str} and are predominantly of the opposite sign. Therefore structural transformations alone can't be the sole cause of grinding-induced cracks formation. Instead, they can contribute to the development of cracks which are induced under the influence of thermal shock. Moreover, the process of temporal thermo-mechanical stresses transformation σ_{oct} occurs over a duration sufficient for significant structural and phase changes in surface layer. This, in turn, creates σ_{str} which leads to further evolution into main cracks.

Existing functional connections between technological parameters and grinding temperature allow for the mitigation of burn defects from surface layers of products through specialized methods. Such products shall not have constructional and technological heterogeneities and their material shall not exhibit significant hereditary inhomogeneities. The research of conditions for increasing quality of processed surfaces involving the approach of removing crack-like defects implies exploration of quality connections between technological parameters and physical and mechanical properties of grinded materials. Existing quantitative connections between stresses and processing modes are localized and do not reflect broader patterns of the stress-strained state in the surface layer (depending on technological conditions and properties of processed materials). Assessment of the strained state of the surfaces is primarily conducted through numerical methods.

The lack of research of grinding-induced cracks formation process properties and their evolvement into main cracks (contingent on constructional, technological and structural heterogeneities of the products) prevents from unequivocal application of recommendations for eliminating mentioned defects. Main properties and characteristics of the surface are roughness, microhardness, the magnitude and sign of internal technological stresses, the presence of inclusions and, other structural imperfections. These properties depend on types and modes of thermal treating (TT), thermomechanical processing (TMP), and material machining. They define the dependency between operational qualities of products and their manufacturing technology.

The peculiarities of physical and mechanical properties of hard magnetic alloys of type UNDKT35T5 (high fragility, low durability, relatively low values of thermal conductivity and temperature conductivity) bring them to difficult-to-process materials. Analyzing the manufacturing process of magnets during final grinding becomes a pivotal stage in optimizing the production of flawless items. This significance arises from the fact that main defects like cracks and chips tend to appear primarily during final machining of magnets. To ensure the impeccable production of steel and alloys prone to cracks and chips occurrence it is imperative to consider their structural inhomogeneity. The existence of crack-like defects and inclusions explains that limit values of the thermal flow shall be used to determine operational modes and instrument characteristics.

The objective of the dissertation research is to propose an approach for ensuring the required quality in machining of products made from materials prone to crack occurrence. This approach hinges on a comprehensive exploration of the technological capabilities of the grinding process, with a specific focus on analyzing the thermomechanical phenomena and the development of technological criteria for selecting proper parameters. The implementation of this approach allows a significant decrease of defects in working surfaces.

To obtain the defined objective we need to implement the following tasks:

6. To develop a mathematical model that describes thermomechanical processes in the surface layer of products subjected to grinding. These products are made from materials prone to crack formation. In the modeling process heredity defects originating from previous machining stages shall be considered.
7. To study the influence of technological heredity from previous machining stages on cracks and burns formation intensity in the products made from the materials that are known to be prone to mentioned defects during grinding.
3. To define the criteria for cracks and burns formation and determine the connection between them and technological factors of grinding process of working surfaces.
4. To develop the preconditions for optimization of the thermomechanical state in the surface layer of products during grinding. These preconditions shall exclude the possibility for cracks and burns formation.
5. To study technological possibilities for controlling the quality of the surface layer in products made from the materials prone to crack formation. And to ensure the geometrical characteristics required for effective operation of these products.

In the second section we present the theoretical foundations for studying quality parameters in the processed surfaces of products during final machining. The focus is made on thermomechanical phenomena that accompanies machining operations. The peculiarities of quality parameters of working surfaces in conical-shaped products during grinding are described. A mathematical model of the thermomechanical processes that follow final machining of conical-shaped products has been built. We have studied the conditions of defects formation during these processes. These defects lead to loss of load-bearing capacity of the products during their operation. Mathematical model adequacy was verified on conical products made from steel 12X2H4BA. Surface layer of these products was subjected to thermal treating. The analysis of modeling results reveals that the temperature of processed surface increases when the instrument approaches the region with smaller diameter of the conical surface. This zone of the conical-shaped product is prone to defect formation during final machining. That's why when setting up the machining modes it is crucial to select them in a way that ensures the temperature in narrow part of the conical product does not exceed the acceptable values.

In this section we explore the influence of thermomechanical phenomena on the formation of grinding-induced defects in working surfaces of products made from hard-to-process materials. Different technological operations are responsible for the emergence of heredity defects in the surface layer. These defects encompass non-metallic inclusions, flocks, air pores, microcracks of sedimentary origin (melting), deformation of crystalline grains, cracks of liquid origin (forging, drawing), coarse grains, carbide concentrations, chips, surface cracks grids, internal cracks, exfoliation, burn marks. These defects, being stress concentrators, contribute to cracks formation during material machining and also during operation of products made from these materials.

Reducing the number of defective parts during final operations for specific materials and improving the operational properties of products made from these materials are crucial objectives for the national economy. Achieving these goals leads to resource savings, reduced labor expenses, and a decrease in the overall manufacturing cost of products.

The quality of the surface layer is influenced by thermomechanical phenomena that accompany final machining. Therefore, the thermal tension of diamond-abrasive processing serves as main physical and mechanical state indicator. In order to control product quality during grinding we conducted research to understand the patterns of thermomechanical state formation in the surface layer considering its heterogeneity. We investigated high-productivity defect-free grinding of the materials that are sensitive to crack occurrence, while considering hereditary defects at the limit modes keeping the balanced state. The mechanism of grinding-induced crack occurrence was studied based on a developed mathematical model from the positions of geometrical characteristics influence and physical properties of α -phase and its orientation with respect to the direction of magnets in high-coercivity state. We also applied balance conditions for structural components depending on the dominating factors of grinding process and fracture toughness of K_{1C} magnet. Adhering to these conditions helps prevent the appearance of cracks in the surface layer.

The development of technological criteria for controlling a defect-free grinding process was implemented using established functional connections between physical and mechanical properties of processed materials and primary technological parameters.

The processed surface quality will be ensured if we adjust technological parameters to comply with required technological conditions for machining operations. Such conditions encompass equipment modes, lubricative coolants, and instrument characteristics. By achieving this we aim to bring the values of current grinding temperature, thermal flow, stresses, and coefficient K_{1C} do not exceed their limit values (where crack initiation begins). We have built the algorithm for providing surface layer quality during grinding based on the established criterial relationships. Looking at the examples of grinding of permanent magnets prone to crack formation we solved the quality optimization problem. The research of preceding machining operations influence on the process of crack occurrence during grinding of high-coercivity magnets was conducted using the criteria that served as a mechanical properties characteristic of material and reflected the morphology of alloys. Such approach enabled us to find the additional resources for increasing mechanical properties of magnets during each of technological operations preceding grinding and determine the influence of abrasive processing on crack formation. We conducted the analysis of crack occurrence reasons during grinding of hard magnet alloys considering dependency between manufacturing technology and structural heterogeneity that accompany technological process and mechanism of microcrack formation and their development into main cracks. The influence of morphology and non-metallic inclusions on the intensity of crack formation was also defined. Our findings, combined with experimental research allowed us to delineate theoretically the areas of concentrations for technological parameters. They, in turn, provide the required quality for processed surface and parameter selection algorithm with conditions for maximum grinding productivity. For developing technological criteria of defect-free grinding we consider that this is a multifactor process. Physical and mechanical properties of metal affect the quality of the surface layer. They include metal structure, instrument

characteristics, conditions of the preliminary processing with impregnating compounds and cutting fluid characteristics.

In the third section we verified the effectiveness of developed technological criteria for controlling defect-free grinding of hard-to-process. We have studied the influence of instrument's constructional parameters on the quality of processed surfaces during grinding. We have established the fact that thermal flow intensity from instrument's cutting grains is the dominating factor during micro destruction of processed surface. Stress formation in the surface layer from radial and tangential cutting forces is significantly affected by the friction between abrasive and processed material. When the friction coefficient ascends, then the displacement of maximum stressed zone to the surface of processed product happens. This displacement influences the process of crack formation. Cutting depth is the pivotal factor for grinding-induced cracks occurrence among the modes of grinding process. Cutting fluids decrease the temperature of grinding, friction forces between the grinding wheel and processed material. This also decreases crack formation intensity in the surface layer.

Science novelty of the obtained results. We have solved the scientific problem for determining calculational dependencies that define the influence of hereditary defects from preceding machining operations on crack resistance of working surfaces of products made from the materials prone to crack formation during grinding. This solution also implies the creation of optimal technological conditions for processing with hereditary defects and heterogeneities being considered. Particular emphasis was placed on products with conical shapes because thermal effects in conical surfaces during final machining operations are not well studied.

The following scientific results were obtained:

1. The mathematical model for defining thermomechanical state during grinding of products made from crack-prone materials was developed for the first time. Using this mathematical model, we determined functional connections between crack resistance criteria and control of technological

parameters of grinding operation for preventing cracks and chips appearance in processed surfaces.

2. The method for grinding working surfaces of products made from materials prone to crack formation has been further refined. This method guarantees required geometrical and quality characteristics, thereby enhancing operational effectiveness of products.
3. The dynamic model of the grinding process has been improved for cases with products made from crack-prone materials. This led to rational choice of characteristics for instruments, operational modes, cutting fluids which provide required quality of working surfaces.

The practical value. We have solved the problem of operational properties improvement for the products made from materials prone to crack occurrence. This was achieved based on theoretical and experimental research and due to a decrease of defects emerge during final machining operations.

What was developed:

1. Practical recommendations for selecting technological conditions of machining of products made from materials prone to cracking. These recommendations ensure required quality requirements for the working surfaces.
2. We have delineated effective instruments for grinding products made from materials prone to cracking that significantly decrease crack formation in the working surfaces.
3. Particular materials of the dissertation were implemented in “Micron holding company”.
4. Research results are being used in the educational process of “High Mathematics and systems modelling”, “Digital technologies in engineering”, “Machines dynamics and mechanical engineering”, and “Automobile transport and logistics” departments.

Keywords: final machining operations, hereditary defects, burns, burn marks, cracks, crack formation, modeling of thermomechanical phenomena, processed surface quality, hard-to-process materials, defect-free processing, technological criteria.

AUTHOR'S PUBLICATIONS BY DISSERTATION TOPIC:

Scientific works in which main dissertation results are published:

1. Usov. A.V., Kunitsyn M.V., Zaychyk Y.I (2021). Modelling of technological capabilities for ensuring quality characteristics of the surface layer in conical-shaped products during final machining operations. Applied tasks for mathematical modelling, 4(1), 231-239. <https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/ppmm/article/view/237> (professional edition). *(The author's contribution is making calculations and model adequacy verification)*
2. Usov, A. V., Kunitsyn, M. V., & Zaychik, Y. I. (2021). Design of technological possibilities on providing of quality descriptions of superficial layer of conical wares on finish operations. Applied Questions of Mathematical Modeling, 4(1), 231–239. <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.1.25> (professional edition). *(The author's contribution involves making calculations and verifying model adequacy).*
3. Usov, A. V., Kunitsyn, M. V., & Zaychyk, Y. I. (2022). Management of the quality characteristics of the working surfaces of complex profile products during mechanical processing. Proceedings of XVI International Conference Measurement and Control in Complex System (MCCS-2022). 16th IC Measurement and Control in Complex Systems, Vinnytsia, Ukraine. <https://doi.org/10.31649/mccs2022.09> (professional edition). *(The author's contribution is conducting experiments and processing experiment results).*
4. Kunitsyn, M., Usov, A., Zaychyk, Y. (2023). Control of Thermomechanical Conditions for Working Surfaces of Products Made of Heterogeneous Materials at Finishing Operations. In: Tonkonogyi, V.,

- Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_13 (Scopus). *(Author's contribution involves the research of thermo-strained parameters of the surface layer of grinded heterogeneous materials).*
5. 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: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel', J. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32767-4_26 (Scopus). *(The author created information technology that takes into account the influence of heterogeneities within materials on the functional gradient properties of products during final machining).*
 6. Usov A.V. Information supply of technological capabilities for defect-free processing of products prone to crack forming// Usov A.V., Kunitsyn M.V., Zaychyk Y.I./ PPM journal, #1, 2023, pp. 134-146 KhNTU. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-15>. *(The author has studied the mechanism of grinding cracks forming within the surface layer of the materials and alloys during diamond-abrasive processing).*
 7. Anatoly V. Usov, Maksim V. Kunitsyn, Yuriy I. Zaychyk An information model concept for a thermomechanical process in grinding//HERALD OF ADVANCED INFORMATION TECHNOLOGY. Vol. 6 No. 3: 250-262 NaukaITekhnika2023DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.17>. *(The author has developed the algorithm for selecting technological parameters for defect-free processing of the products made from defect-prone materials).*

8. A. Usov, DSc, Prof., M. Kunitsyn, PhD, Assoc. Prof., Yu. Zaychyk// Theoretical and experimental recommendations for the elimination of grinding cracks during the processing of permanent magnets. Proceedings of Odessa Polytechnic University, 2023, [2]68: 5 – 18. DOI: 10.15276/OPU.2.68.2023.01. *(The author has contributed to solving the problem of defining deformation-strained state of the surface layer of ground magnets in high coercivity state weakened by the inclusions).*
9. Anatoliy Usov, Yuriy Zaychyk STUDYING THE INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL PHENOMENA ON GRINDED SURFACE QUALITY PARAMETERS OF PRODUCTS MADE FROM HARD-TO-PROCESS MATERIALS ISSN 2078-7405 Cutting & Tools in Technological System, 2023, Edition 99 DOI: 10.20998/2078-7405.2023.99.13. *(The author has contributed to defining optimal technological parameters for grinding metals and alloys prone to mechanical and thermal defects within their surface layer).*

Scientific works that confirm the dissertation materials implementation:

Main aspects of dissertation work were reported and approved at international scientific conferences: XXII, XXI International mathematical modelling conferences (Kherson, 2020, 2021), XVI International conference “Control in complex systems” (Vinnytsia, VNTU 2022), International conference for leading production processes “Inter Partner 2021” (Odessa, 2021), V, VI International conferences “Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange” (DSMIE-2022, DSMIE-2023).