

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-09>

УДК 621.923

¹ А. О. СКОРКІН, кандидат технічних наук

доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання

e-mail: a.o.skorkin@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-8341>

¹ О. Л. КОНДРАТЮК, кандидат технічних наук

доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання

e-mail: kondr20071@i.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0483>

² К. А. ШОФУЛ, аспірант кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати

e-mail: Shoful.k@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9527-6389>

² О. О. ІСІЧЕНКО, аспірант кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати

e-mail: shurik_i@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3419-8192>

¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

² Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова 2, м. Харків, 61002, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ШЛІФУВАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ ЦЕМЕНТОВАНИХ СТАЛЕЙ

Застосування шліфування як заключна операція при виготовленні деталей із загартованих сталевих цементованих заготовок є кращим порівняно з іншими методами механічної обробки. Загальновідомо, що такий метод обробки забезпечує отримання високої зносостійкості та точності шліфованих поверхонь при високорентабельній продуктивності процесу та економічності за рахунок заміни гарту ТВЧ суцільним гартуванням і скорочення витрат на виконання аналогічних за призначенням, інших процесів хіміко-термічної обробки (азотування, ціанування та ін.).

Однак процес шліфування загартованих цементованих сталей вивчений недостатньо глибоко. Ряд дослідників зазначає, що зношування абразивних кіл при шліфуванні цементованих заготовок істотно більше в порівнянні з обробкою однакових за твердістю високовуглецевих сталевих заготовок, а отже, забезпечується менша продуктивність при зніманні однакових припусків. Очевидно, це пов'язано з відмінностями структури поверхневого шару через наявність хрому, молібдену, нікелю та інших елементів, що легують, що збільшує теплофізичну напруженість процесу шліфування. Особливо маловивченими є аспекти впливу на продуктивність обробки різномірності фізико-механічних властивостей серцевини та поверхневого шару заготовок, ступінь короблення та пригогоутворень при термообробці та шліфуванні.

Стаття присвячена аналізу особливостей процесу шліфування деталей із цементованих сталей та взаємозв'язку основних показників якості з експлуатаційними характеристиками. Проведене дослідження підкреслює актуальність використання шліфування як фінішної операції для досягнення високої зносостійкості та точності поверхонь, незважаючи на недостатню вивченість процесу для цементованих сталей, які мають підвищену абразивну зносостійкість поверхневого шару.

Розглянуто ключові параметри, що впливають на довговічність деталей, зокрема шорсткість, хвилястість, макрогеометрію та мікротвердість поверхневого шару.

Досліджено зміни структури поверхневого шару (перетворення аустеніту в мартенсит, «ефект самогартування») під впливом високих температур і деформацій, що виникають під час шліфування.

Проаналізовано існуючі математичні та емпіричні моделі абразивного зерна та робочої поверхні шліфувального круга (ШК), що описують вплив геометричних параметрів та режимів обробки на якість поверхні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: шліфування, загартована сталь, абразивне зерно, поверхневий шар.

Як цитувати: Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Шофул К. А., Ісиченко О. О. Особливості шліфування заготовок із цементованих сталей. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 106-115. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-09>



Вступ

Процес експлуатації механізмів і машин супроводжується, як правило, поверхневим зносом рухомих елементів, що серйозно позначається на якості поверхневого шару та експлуатаційних характеристик працюючих деталей. Параметри міцнісного ресурсу деталей та їх рівень опору втомному зносу, що визначаються точністю виготовлення, шорсткістю та хвилястістю поверхні, мікротвердістю поверхневого шару та фізико-механічними характеристиками, впливають на показники надійності та довговічності механізмів та машин в цілому.

Серед перерахованих параметрів найбільш часто приділяють увагу горст-

кості поверхні, яка впливає не тільки на умови контакту елементів механізмів, що перебувають у поєднанні, а й визначає на мікрорівні напружений стан в поверхневому шарі. Формоване грубою шорсткістю недосконалість мікропрофілю поверхні можуть стати зоною вогнища освіти і подальшого розвитку різноманітних експлуатаційних дефектів, у тому числі втомних тріщин. Тому надійність і довговічність робочих деталей слід оцінювати з поліпшення якісних характеристик шорсткості поверхневого шару деталей рахунок одноразового чи багаторазового застосування послідовних технологічних методів механічної обробки заготовок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В даний час спостерігається активне застосування та розвиток методів науглерожування сталевих деталей та заготовок. Тенденція до модернізації вже наявних і розробці нових методів такого роду зміцнення обумовлена постійно змінними вимогами, що пред'являються до відповідальних деталей, через що одним з найбільш раціональних способів є поліпшення фізико-механічних властивостей за допомогою процедури цементування, термообробки та подальшого шліфування. Сучасні застосовувані методи цементації сталей при низькому тиску (LCP) по відношенню до традиційної цементації (метод якої відомий більше 200 років [1]) мають відмінні переваги, що полягають у відсутності внутрішнього окислення, мінімального жолоблення деталі або заготовки, найкращої однорідності і якості одержуваних [2-4]. Серед публікацій, присвячених питанням оцінки якості цементованого зміцненого шару після шліфування, найчастіше розглядається вакуумний метод цементації сталі [5, 6, 7], зокрема модер-

нізований на його основі метод потокового науглерожування під низьким тиском [7]. У роботі [5] як кращі і найбільш ефективні методи зміцнення вказані іонні цементація і нітроцементація, які дозволяють з високою точністю керувати процесом насичення сталі вуглецем. Серед сучасних інноваційних технологій слід зазначити метод мікронауглерещування шліфованих поверхонь виробів із сталі без застосування ХТО та термообробки [8-10]. На відміну від традиційної термообробки, науглерожування відбувається одночасно з процесом шліфування, що призводить до більш продуктивного використання енергії, що виділяється, і ефективності насичення обробленої поверхні вуглецем при одночасному збільшенні механічних властивостей матеріалу і якості поверхневого шару. Слід зазначити, що для реалізації будь-якого з вищезгаданих методів необхідно мати якісне обладнання, оснащене високопродуктивними комп'ютеризованими системами та сучасними засобами автоматизації.

Постановка проблеми

Незважаючи на очевидну ефективність застосування цементації та шліфування сталевих виробів, існує також ряд особливостей на етапі заключної обробки заготовок. При шліфуванні цементованих сталей з високим ступенем концентрації

вуглецю в поєднанні з легуючими присадками хрому, нікелю, молібдену та ін. Саме поняття «абразивна зносостійкість» широко використовується в термінології багатьма дослідниками в галузі шліфування [10-13] і пояснюється як процес опору

відділенню мікрочастинок матеріалу від поверхні, що зношується абразивними тілами під дією нормальної сили різання з частковим перетворенням зовнішнього шару в стружку. Як зазначають автори роботи [10], механізм зносостійкості матеріалу є складним процесом, який визначається не тільки силовими факторами, а й характеристиками структури самого матеріалу та його втомними властивостями. Тому процес обробки шліфуванням цементованих заготовок поряд з не цементованими набагато частіше призводить до утворення поверхневих дефектів шліфувальних внаслідок вуглецевого крихтіння. Встановлено, що у процесі шліфування цементованих сталей у зоні формоутворення нової поверхні абразивними зернами контактна температура сягає 1000-1500°C. При цьому більшість аустеніту, що знаходиться в поверхневому шарі цементованої сталі, активно перетворюється на мартенсит. У процесі дії високої температури з почерговим охолодженням відбу-

вається самозагартовування. Перетворення аустеніту на мартенсит супроводжується об'ємними змінами кристалічної решітки, що впливає на показники якості шліфованої поверхні, зокрема на залишкові напруги та мікротвердість. Мартенситний поверхневий шар важко обробити механічно.

Незважаючи на високий рівень вивченості широкого спектра питань, пов'язаних із високою якістю обробки поверхні високпористими колами, область дослідження щодо оптимізації процесів шліфування зміцнених деталей таким методом у виробництві до кінця не вивчена. Так, наприклад, у разі інноваційної технології сухого шліфування торцевих поверхонь зубчастих шестерень автомобілів перспективність методу представлена в роботі [15-17]. Експериментами показано, що висока пористість структури абразивних кіл демонструє найгірші показники якості оброблених поверхонь (з точки зору виникнення шліфувальних припалів) порівняно з менш пористими шліфувальними колами.

Викладення основного матеріалу

Розглядаючи будову поверхневого шару (ПШ) металу, слід мати на увазі, що воно різко відрізняється від основного матеріалу, так як несе на собі сліди технологічного процесу обробки, в результаті якого, як правило, утворюється дефектний шар зі спотвореною структурою. Крім того, при експлуатації виробу постійно йде процес зміни властивостей ПС через силові, температурні, окисні та інші впливи. Так, при обробці металів різанням (особливо при шліфуванні) виникнення в поверхневому шарі нових утворень відбувається в результаті дії двох протилежних процесів - зміцнення (наклепу) в результаті впливу на поверхню зусиль різання та зняття наклепу, а також зміни ПШ в результаті впливу температури різання. У різних умовах домінує вплив одного, то іншого чинника.

Загальною для контактуючих деталей є будова поверхневих шарів (рис. 1).

Зона 1 – адсорбована плівка газів, вологи та мастильно-охолоджувальної рідини, яка видаляється нагріванням деталі у вакуумі; зона 2 - деформований, сильно роздроблений метал з спотвореною решіткою кристалів і з безуглицевими під дією високих температур при шліфуванні ділян-

ками; в ньому знаходяться оксиди та нітриди, порожнечі та надриви, а також тріщини; зона 3-зерна, сильно деформовані під дією тиску шліфувального кола і дотичних напруг при шліфуванні; у зоні містяться структури вільного цементиту, що утворився під дією високих температур; зона 4 - метал з вихідною структурою.

У процесі шліфування від впливу абразивного кола на поверхні металу заготовки залишаються гребінці та западини. Структура ПШ змінюється. Поверхневий шар зазнає пластичних деформацій, утворюється наклеп, його твердість збільшується, виникають технологічні залишкові напруги.

Ступінь наклепу металу та глибина проникнення пластичних деформацій залежать від методу обробки та елементів режиму різання (подачі, глибини та швидкості різання). При підвищенні подачі та глибини різання товщина наклепаного шару збільшується, а зі збільшенням швидкості різання, навпаки, зменшується. При легких режимах різання товщина наклепаного шару виражається в сотих частках міліметра, а при важких (при великій подачі та глибині різання) – у десятих частках міліметра.

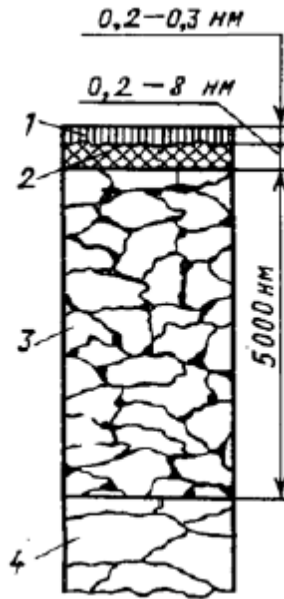


Рис. 1. – Схема будови поверхнього шару металу
Fig. 1. – Diagram of the structure of the surface layer of metal

При шліфуванні заготовок із загартованих високовуглецевих і легуваних сталей (у тому числі - цементованих) відбувається часткова відпустка поверхнього шару з утворенням змішаної структури та зменшенням твердості, а також вторинна загартування металу, що знаходиться на відпущеному м'якшому шарі, який поступово проходить через всі етапи відпустки. У зв'язку з цим при шліфуванні загартованих високовуглецевих і цементованих сталей виходять багатшарові структурні утворення, які утворюються внаслідок послідовної передачі тепла різним обсягам металу. Структурним і фазовим перетворенням поверхнього шару при шліфуванні схильні лише попередньо загартовані сталі, що залежить від швидкостей нагрівання та охолодження обсягів матеріалу, що входять до зони контакту кола із заготівлею. Швидкість нагріву металу досягає в цьому випадку тисячі градусів за секунду. Вихідна перлітна структура відпаленої сталі при таких швидкостях нагріву може не перетворитися на аустеніт, оскільки дифузійний характер перетворення потребує деякого проміжку часу. Якщо перлітна структура сталі при нагріванні не перетворитися на аустеніт, то і після її охолодження вона залишиться колишньою. Якщо ж перліт перетвориться на аустеніт, то структура після охолодження змінюється по глибині і відповідає швидкості охолодження металу (мартенсит, трооститомартенсит, троостит, сорбіт, дрібнопластинчастий перліт, крупнопластинчастий перліт).

Якщо здійснювати шліфування заготовок із цементованої сталі з мартенситною структурою, то її перехід в аустеніт вимагатиме незначного часу для дифузійних процесів, і аустеніт перетворюється на мартенсито-аустеніт.

Збільшення температурного впливу при шліфуванні на заготівлю з цементованих сталей (наприклад, внаслідок підвищення продуктивності обробки) призводить до формування поверхніх шарів із сильно зміненим структурно-фазовим станом, які чітко виділяються після травлення мікрошліфів у вигляді темних ділянок цементованих сталей. Цей процес супроводжується фазовими перетвореннями, пов'язаними з розпадом вихідних поверхніх метастабільних структур, наприклад мартенситних, і створенням нових структур під час вторинного загартування. Товщина зміцненого поверхнього шару в цих умовах досягає декількох десятків міліметра і залежить від глибини нагріву матеріалу до температур вище критичних точок. Слід зауважити, що величини критичних точок значною мірою визначаються деформацією структури металу, швидкістю його нагрівання та охолодження в ході абразивної обробки.

Оскільки шліфування є процесом контактної взаємодії заготівлі та інструменту переважно використовувати моделі ріжучої кромки а.з.(абразивне зерно) параметри, що характеризують специфіку цього фізичного процесу. Оскільки як інтегральна характеристика РП абразивного

інструменту обрана відносна опорна поверхня, пропонується форму ріжучої кромки моделювати за допомогою аналогічної функції. За допомогою CAD систем зробимо моделювання ріжучої кромки а.з. об'ємною фігурою другого

порядку (рис. 2) з твірною, яка описується математичною залежністю:

$$x^2 + z^2 = b_p y^{2\nu_p} \quad (1)$$

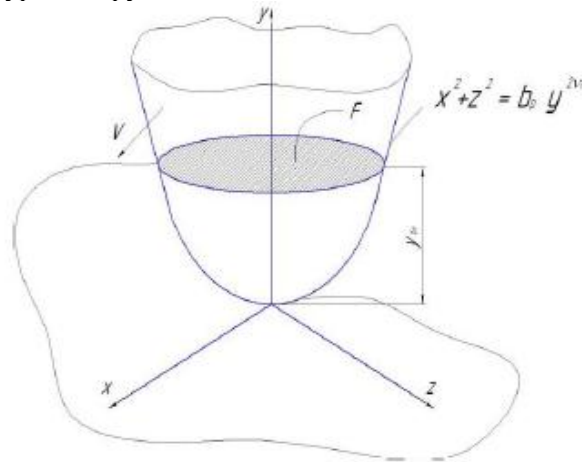


Рис. 2 - Ріжуча кромка а.з. у вигляді поверхні обертання другого порядку
Fig. 2 – Cutting edge of the a.z. in the form of a second-order surface of revolution

Вісь x направимо у бік вектора швидкості різання, вісь y – до нормально оброблюваної поверхні, вісь z – перпендикулярно до цих осей, початок координат « o » помістимо у вершину ріжучої кромки а.з. Розглянемо роботу ріжучої кромки а.з. в процесі шліфування (наприклад - заготовок з цементованих сталей) з постійною окружною швидкістю V і глибиною його впровадження в поверхню, що обробляється $y_{\text{вн}}$. У теорії різання слід вважати усталеною об'ємну модель зерна (сфера, піраміда, конус, еліпс, циліндр та інших.), отже, необхідно враховувати розподіл складових сили шліфування за деякою наближеною площиною, а, по передній частині бічної поверхні ріжучої кромки а.з. Параметр b_p характеризує швидкість наростання профілю перерізу ріжучої кромки в залежності від глибини її впровадження в оброблюваний матеріал, а параметр ν_p – форму твірної ($\nu_p < 1$ – кромка опукла, $\nu_p = 1$ – кромка конусоподібна, $\nu_p > 1$ – кромка лійкоподібна). Вісь спрямована від вершини вглиб зерна. Вісь симетрії утворює кромки нормальна до оброблюваної поверхні. У процесі шліфування абразивне зерно заглиблюється на певну глибину оброблюваного матеріалу. Параметр $y_{\text{вн}}$ характеризує висоту частини одиничної ріжучої кромки, яка впроваджується в заготовку та здійснює процес мікроподрипин.

Значення глибини впровадження зерна в оброблюваний матеріал:

$$y_{\text{вн}} = S_p \cdot \frac{n_{\text{заг}}}{n_{\text{кр}}} \quad (2)$$

де S_p - врізна подача шліфувального кола на обертт заготовлі, мм/об;

$n_{\text{заг}}$ - число оборотів шпинделя заготовки за хвилину, об/хв;

$n_{\text{кр}}$ - кількість обертів шпинделя кола за хвилину, об/хв.

Будь-яка технологічна операція абразивної обробки шліфуванням поверхні металевої заготовки, як було зазначено раніше, є складним процесом мікрорізання, що відрізняється від інших способів механічної обробки. Застосування процедури шліфування на фінішній стадії формоутворення ускладнюється підвищеними вимогами до точності розмірів і якості обробленої поверхні. При цьому, якщо на майбутніх шліфувальних операціях допустиме коригування геометричних розмірів, форми, шорсткості, хвилястості та інших параметрів, то на стадії фінішної обробки у зв'язку з малими значеннями припусків, що видаляються, така можливість або має ряд обмежень, або неприпустима зовсім. З цієї причини обумовлюється неможливість усунення шліфувальних дефектів, які, як правило, утворюються через неправильно підібрані режими різання та переводять практично готову деталь у виробничий

брак. При здійсненні процесу шліфування важливо приділяти належну увагу не тільки одержуваним в результаті обробки деталям, а й абразивним інструментам. Як і інших ріжучих інструментів, їх застосування у виробничому циклі нерідко супроводжується випадками передчасного виходу з ладу, через що необхідний контроль ступеня абразивного зносу. Враховуючи, що технологія шліфування супроводжується високими робочими швидкостями шліфувального кола, у разі його непередбаченого руйнування виникає ризик як пошкодження заготовлі деталі, що обробляється, і шліфувального обладнання, так і механічного травмування людини, що неприпустимо. Слід зазначити, що вищевикладені та інші завдання, які вирішуються в рамках деталізації процесу шліфування, у більшості випадків є досить трудомісткими і складно реалізованими навіть при проведенні експериментальних досліджень (як, наприклад, аналіз процесу формоутворення стружки при різанні). Нині широко використовуються чисельні методи цифрового моделювання процесів шліфування. Для цієї мети широко використовуються спеціальні програмні пакети комп'ютерного кінцево-

елементного аналізу типу ANSYS, Solidworks, Abaqus, MSC.Patran-Nastran, LS-DYNA та ін. При цьому отримані результати імітаційного моделювання та емпіричні дані реальних процесів абразивної обробки добре узгоджуються між собою. Загальний підхід до розгляду переважної кількості завдань математичного опису шліфування зводиться до моделювання різання матеріалів одиничними абразивними зернами різної геометричної форми [16]. Макромасштабні моделі враховують взаємодію кола та заготовлі в цілому, тоді як мікромасштабні моделі дозволяють сфокусуватися на окремих взаємодіях зерна та заготовлі. В останньому випадку процедура мікро-різання-шліфування одиничним а.з. розглядається як однолезова фрезерна обробка окремою ріжучою кромкою зі зняттям стружки. Особлива увага при мікромасштабному вивченні процесу шліфування приділяється впливу на виникаючі у вершині одиничного зерна тангенціальні (або дотичні) F_T і нормальні F_N складові сили різання (рис. 3), режимів різання, сил тертя, структури оброблюваного матеріалу заготовки і кола.

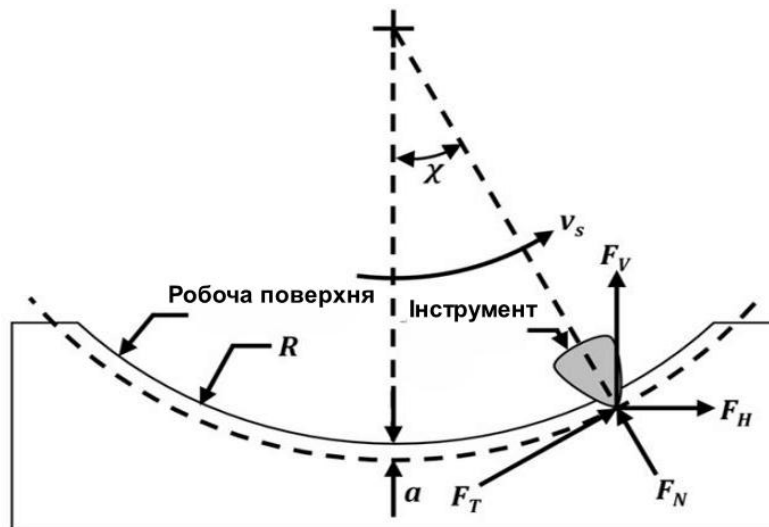


Рис. 3 – Схематичне представлення сил різання, що виникають.

Fig. 3 - Schematic representation of the resulting cutting forces.

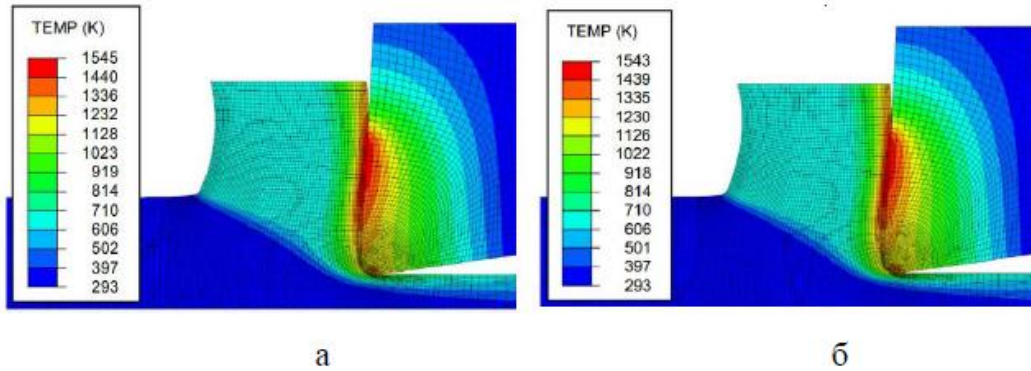


Рис. 4 – Оцінка розподілу температури в області контакту вершини ріжучої кромки із заготовкою зі сплаву AISI 4340 у програмі Abaqus/Explicit: при $\tau_p = 500$ МПа (а) та при 700 МПа (б)

Fig. 4 – Assessment of the temperature distribution in the area of contact of the tip of the cutting edge with the workpiece and AISI 4340 alloy using the Abaqus/Explicit program: at $\tau_p = 500$ MPa (a) and at 700 MPa (b)

При моделюванні задачі в програмі Abaqus/Explicit, в умовах підвищених швидкостей різання і малої інтенсивності тертя відбувається ковзання стружки, що викликає перегрів понад 1000 °С в зоні різання (рис. 4) і надмірне зношування ріжучого інструменту (внаслідок значного рівня дотичних напруг $\tau_p = 500 \dots 700$ МПа), що значно знижує його ресурс і може призвести до руйнування. З цієї причини цю проблему слід розглядати в рамках

термомеханічного аналізу моделей інструменту та заготівлі із застосуванням методу кінцевих елементів.

В результаті було встановлено, що нормальні сили різання збільшуються зі зростанням швидкості різання через деформаційне зміцнення заготівлі в зоні шліфування, а тангенціальні сили зменшуються через зниження тертя між інструментом і заготівлею.

Висновки

Таким чином, враховуючи все перераховане вище, можна сформулювати наступні висновки. По-перше, контроль силового впливу (особливо сил різання) з боку різального абразивного інструменту (одиночного зерна) по відношенню до оброблюваної заготівлі є основним критерієм при віртуалізації процесів шліфування з позиції механіки контактної взаємодії, що дозволяє вирішити переважну кількість завдань у галузі шліфування. По-друге, комплексний підхід до розгляду та вирішення завдань у цій галузі неможливий без застосування технології цифрового комп'ютерного моделювання, що базується

в основному на методі кінцевих елементів, зважаючи на підвищену обчислювальну складність, урахування великої кількості всьляких факторів та стохастичності описуваних процесів. І по-третє, застосування програмного забезпечення, що постійно вдосконалюється, для реалізації інтегрованих методів шліфування надасть можливість значною мірою спростити вирішення завдань з оптимізації режимів різання, періоду стійкості абразивних інструментів, отримання мікро- і макропараметрів поверхонь оброблених заготовок та інших динамічно розширюваних у цьому напрямку питань.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Arrazola P. J., Ozel T. Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining. *International journal of mechanical sciences*. 2010. Vol. 52 (1). Pp. 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.10.001>

2. Mechanical behavior and modeling of grinding force: A comparative analysis / Li L., Zhang Ya., Cui X., Said Z., Sharma Sh., Liu M., Gaoa T., Zhou Z., Wang Xi., Li Ch. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 102. Pp. 921–954. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.074>
3. Influence of the geometrical features of the cutting edges of abrasive grains on the removal efficiency of the Ti6Al4V titanium alloy / Rupina L., Lipinski D., Banaszek K., Kacalak W., Szafraniec F. *Materials*. 2022. Vol. 15. Pp. 6189-1–6189-21. <https://doi.org/10.3390/ma15186189>
4. Doman D. A., Warkentin A., Bauer R. Finite element modeling approaches in gridding. *International journal of machine tools and manufacture*. 2009. Vol. 49 (2). Pp. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.10.002>
5. Anderson D., Warkentin A., Bauer R. Experimental and numerical investigations of single abrasive-graincutting. *International journal of machine tools & manufacture*. 2011. Vol. 51 (12). Pp. 898–910. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.006>
6. Finite element analysis on single abrasive grinding Ti6Al4V alloy / HuoW., Zhang X., Dong Q., Shao J. *Key engineering materials*. 2018. Vol. 764. Pp. 184–193. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.764.184>
7. Surface integrity evaluation within dry grinding process on automotive gears / Lerra F., Grippo F., Landi E., Fortunato A. *Cleaner engineering and technology*. 2022. Vol. 9. Pp. 100522-1–100522-9. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100522>
8. The influence of grinding wheel type on microhardness and residual stresses in vacuum-carburised 20MnCr5 steel using the single-piece flow method / Zgorniak P., Wolowiec-Korecka E., Januszewicz B., Sikora M., Rosik R. *IOP conference series : materials science and engineering*. 2020. Vol. 743. Pp. 012049-1–012049-7. https://doi.org/10.1088/1757-899X/743/1/012049?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
9. Dubovska R., Majerik J., Chochlikova H. Physico-chemical state stabilization of high strength steels machined surface. *Proceedings in manufacturing systems*. 2011. Vol. 6 (2). Pp. 75–80.
10. Dubovska R., Jambor J., Majerik J. Qualitative aspects of machined surfaces of high strength steels. *Procedia engineering*. 2014. Vol. 69. Pp. 646–654. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.038>
11. Surface strengthening mechanism of the active grinding carburization /Sun C., Hong Yu., Xiu Sh., Liang M., Wang D., Xua Ch., Feng W. *Tribology international*. 2023. Vol. 185, no. 108569.
12. Grinding residual stress optimization under the micro-carburizing effect / Hong Yu., Sun C., Xiu Sh., Xua Ch., Liang D., Deng Ya. *Tribology international*. 2023. Vol. 188, no. 108807. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108807>
13. Quality evaluation of carburized surfaces of steels used in military technology / Dobrocky D., Joska Z., Studeny Z., Pokorny Z. *Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 20, no. 2. Pp. 152–161. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.028>
14. Stachurski W., Januszewicz B., Sawicki J. The influence of the depth of grinding on the condition of the surface layer of 20MnCr5 steel ground with the minimum quantity lubrication (MQL) method. *Materials*. 2022. Vol. 15 (4). Pp. 1336-1–1336-20. <https://doi.org/10.3390/ma15041336>
15. Sawicki J., Kruszynski B., Wojcik R. The influence of grinding conditions on the distribution of residual stress in the surface layer of 17CRNI6-6 steel after carburizing. *Advances in science and technology research journal*. 2017. Vol. 11 (2). Pp. 17–22. <https://doi.org/10.12913/22998624/67671>
16. Wojcik R., Sawicki J. Effects of thermo-chemical treatment and grinding process of external cylindrical surfaces on residual stresses in 13CrMo4-5 steel. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. 2023. Vol. 120 (1). Pp. 10–21 <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9621>
17. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2/1 (98). P. 60–69 (in Ukraine).

Отримано: 02.02.2026 / Переглянуто: 16.03.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**SKORKIN A.**, PhD

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding,
e-mail: a.o.skorkin@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-8341>

¹**KONDRATYUK O.**, PhD

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding,
e-mail: kondr20071@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0483>

²**SHOFUL K.**, Postgraduate Student

Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines
e-mail: Shoful.k@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9527-6389>

²**ISICHENKO O.**, Postgraduate Student

Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines
e-mail: shurik_i@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3419-8192>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University,*

16 Universytetska St., Kharkiv, 61003, Ukraine.

²*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",*

2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine

FEATURES OF GRINDING OF BLANKS FROM CEMENTED STEEL

The use of grinding as a final operation in the manufacture of parts from hardened steel cemented blanks is preferable compared to other methods of mechanical processing. It is well known that this processing method provides high wear resistance and accuracy of ground surfaces with highly cost-effective process productivity and cost-effectiveness due to the replacement of high-temperature hardening with continuous hardening and reducing the cost of performing other chemical-thermal treatment processes similar in purpose (nitriding, cyanidation, etc.).

However, the grinding process of hardened cemented steels has not been studied in sufficient depth. A number of researchers note that the wear of abrasive wheels when grinding cemented workpieces is significantly greater compared to the processing of high-carbon steel workpieces of the same hardness, and therefore, lower productivity is provided when removing the same allowances. Obviously, this is due to differences in the structure of the surface layer due to the presence of chromium, molybdenum, nickel and other alloying elements, which increases the thermophysical stress of the grinding process. Particularly poorly studied are the aspects of the influence on the processing performance of the heterogeneity of the physical and mechanical properties of the core and the surface layer of the workpieces, the degree of warping and scorching during heat treatment and grinding.

The article is devoted to the analysis of the features of the grinding process of parts made of cemented steels and the relationship between the main quality indicators and operational characteristics. The conducted research emphasizes the relevance of using grinding as a finishing operation to achieve high wear resistance and surface accuracy, despite the insufficient study of the process for cemented steels, which have increased abrasive wear resistance of the surface layer.

The key parameters that affect the durability of parts are considered, in particular, roughness, waviness, macrogeometry and microhardness of the surface layer.

Changes in the structure of the surface layer (austenite transformation into martensite, "self-hardening effect") under the influence of high temperatures and deformations that occur during grinding are studied.

Existing mathematical and empirical models of abrasive grain and the working surface of a grinding wheel (GW) are analyzed, describing the influence of geometric parameters and processing modes on the surface quality.

KEYWORDS: grinding, hardened steel, abrasive grain, surface layer.

In cites: Skorkin A., Kondratyuk O., Shoful K., Isichenko O. (2026). Features of grinding of blanks from cemented steel. *Engineering*, (37), 106-115. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-09> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Arrazola, PJ & Ozel, T 2010, 'Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining', *International journal of mechanical sciences*, Vol. 52 (1), Pp. 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.10.001>
2. Li, L, Zhang, Ya, Cui, X, Said, Z, Sharma, Sh, Liu, M, Gaoa, T, Zhou, Z, Wang, Xi, Li, Ch 2023, 'Mechanical behavior and modeling of grinding force: A comparative analysis', *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 102, Pp. 921–954. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.074>
3. Rupina, L, Lipinski, D, Banaszek, K, Kacalak, W & Szafraniec, F 2022, 'Influence of the geometrical features of the cutting edges of abrasive grains on the removal efficiency of the Ti6Al4V titanium alloy', *Materials*, Vol. 15, Pp. 6189-1–6189-21. <https://doi.org/10.3390/ma15186189>
4. Doman, DA, Warkentin, A & Bauer, R 2009, 'Finite element modeling approaches in gridding', *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 49 (2), Pp. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.10.002>
5. Anderson, D, Warkentin, A & Bauer, R 2011, 'Experimental and numerical investigations of single abrasive-graincutting', *International journal of machine tools & manufacture*, Vol. 51 (12), Pp. 898–910. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.006>
6. Huo, W, Zhang, X, Dong, Q & Shao, J 2018, 'Finite element analysis on single abrasive grinding Ti6Al4V alloy', *Key engineering materials*, Vol. 764, Pp. 184–193. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.764.184>
7. Lerra, F, Grippo, F, Landi, E & Fortunato, A 2022, 'Surface integrity evaluation within dry grinding process on automotive gears', *Cleaner engineering and technology*, Vol. 9, Pp. 100522-1–100522-9. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100522>
8. Zgorniak, P, Wolowiec-Korecka, E, Januszewicz, B, Sikora, M & Rosik, R 2020, 'The influence of grinding wheel type on microhardness and residual stresses in vacuum-carburised 20MnCr5 steel using the single-piece flow method', *IOP conference series : materials science and engineering*, Vol. 743, Pp. 012049-1–012049-7. https://doi.org/10.1088/1757-899X/743/1/012049?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
9. Dubovska, R, Majerik, J & Chochlikova, 2011, 'Phisico-chemical state stabilization of high strength steels machined surface', *Proceedings in manufacturing systems*, Vol. 6 (2), Pp. 75–80.
10. Dubovska, R, Jambor, J & Majerik, J 2014, 'Qualitative aspects of machined surfaces of high strength steels', *Procedia engineering*, Vol. 69, Pp. 646–654. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.038>
11. Sun, C, Hong, Yu, Xiu, Sh, Liang, M, Wangc, D, Xua, Ch & Feng, W 2023, 'Surface strengthening mechanism of the active grinding carburization', *Tribology international*, Vol. 185, no. 108569.
12. Hong, Yu, Sun, C, Xiu, Sh, Xua, Ch, Liang, D & Deng, Ya 2023, 'Grinding residual stress optimization under the micro-carburizing effect', *Tribology international*, Vol. 188, no. 108807. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108807>
13. Dobrocky, D, Joska, Z, Studeny, Z & Pokorny, Z 2020, 'Quality evaluation of carburized surfaces of steels used in military technology', *Manufacturing Technology*, Vol. 20, no. 2. Pp. 152–161. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.028>
14. Stachurski, W, Januszewicz, B & Sawicki, J 2022, 'The influence of the depth of grinding on the condition of the surface layer of 20MnCr5 steel ground with the minimum quantity lubrication (MQL) method', *Materials*, Vol. 15 (4), Pp. 1336-1–1336-20. <https://doi.org/10.3390/ma15041336>
15. Sawicki, J, Kruszynski, B & Wojcik, R 2017, 'The influence of grinding conditions on the distribution of residual stress in the surface layer of 17CRNI6-6 steel after carburizing', *Advances in science and technology research journal*, Vol. 11 (2), Pp. 17–22. <https://doi.org/10.12913/22998624/67671>
16. Wojcik, R & Sawicki, J 2023, 'Effects of thermo-chemical treatment and grinding process of external cylindrical surfaces on residual stresses in 13CrMo4-5 steel', *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, Vol. 120 (1) Pp. 10–21 <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9621>
17. Skorkin, A, Kondratyuk, O, Lamnauer, N & Burdeinaya, V 2019, 'Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 2/1 (98), P. 60–69 (in Ukraine).

Submission received: 02.02.2026/Revised: 03.16.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026