УДК 621.834

Н.В. Ліщенко, канд. техн. наук, В.П. Ларшин, д-р техн. наук, Одеса,
В.В. Нежебовський, канд. техн. наук, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ПРИ ПРОФІЛЬНОМУ ЗУБОШЛІФУВАННІ

Виконано експериментальні дослідження якості поверхневого шару зубів зубчастих коліс після профільного зубошліфування на верстаті з ЧПК при послідовному збільшенні глибини шліфування в різних западинах зубчастого колеса при інших рівних умовах. Встановлено, що по мірі збільшення параметрів, які характеризують інтенсивність шліфування і обсяг матеріалу, що видаляється і які наведені на одиницю ширини шліфувального круга, виникає і збільшується товщина шліфувального припіку. Встановлено закономірність зміни товщини припіку по висоті зубу, що дозволяє оцінювати достовірність відповідних теоретичних досліджень.

Ключові слова: профільне зубошліфування, шліфувальний припік, якість поверхневого шару.

Выполнены экспериментальные исследования качества поверхностного слоя зубьев зубчатых колес после профильного зубошлифования на станке с ЧПУ при последовательном увеличении глубины шлифования в разных впадинах зубчатого колеса при прочих равных условиях. Установлено, что по мере увеличения параметров, характеризующих интенсивность шлифования и объем удаляемого материала, приходящиеся на единицу ширины шлифовального круга, возникает и увеличивается толщина шлифовочного прижога. Установлена закономерность изменения толщины прижога по высоте зуба, позволяющая оценивать достоверность соответствующих теоретических исследований.

Ключевые слова: профильное зубошлифование, шлифовочный прижог, качество поверхностного слоя.

Experimental studies of the gear teeth surface layer quality after profile gear grinding on a CNC machine with a successive increase in the depth of grinding in different grooves of the gear are performed with all other conditions being equal. It is established that as the parameters characterizing the intensity of grinding and the volume of material removal per unit of the grinding wheel width increase, the thickness of the grinding burn arises and increases. The regularity of the change in the thickness of the burn along the height of the tooth is established, which makes it possible to evaluate the reliability of the corresponding theoretical studies.

Keywords: profile gear grinding, grinding burn, surface layer quality.

Вступ. Основним методом фінішної обробки зубчастих коліс (ЗК), виготовлених з низьковуглецевих сталей 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 18ХГТ, 20ХГТ і т.п., які цементовані та загартовані до HRC 56…65, є зубошліфування. Раніше загартовані високоточні ЗК отримували методом обкату двома тарілчастими кругами на зубошліфувальних верстатах типу МААГ без примусового охолодження. Ці верстати не були оснащені ні ЧПК, ні вбудованою вимірювальною системою, відрізнялися низькою адаптованістю до змінних умов багатономенклатурного дрібносерійного виробництва, мали високу трудомісткість обробки, налагодження та обслуговування.

© Н.В. Ліщенко, В.П. Ларшин, В.В. Нежебовський, 2018

Альтернативою верстатам типу МААГ є верстати з ЧПК для профільного зубошліфування з набагато більшими технологічними можливостями. Модулі оброблюваних ЗК становлять 0,5...35 мм, ступені точності – 3…7 тощо. Однак профільне зубошліфування при більш високій продуктивності в той же час характеризується більшою теплонапруженістю, яка може призводити до появи шліфувальних припіків та мікротріщин. Тому операція профільного зубошліфування на верстатах з ЧПК залишається найбільш трудомісткою в технологічному процесі механічної обробки загартованих ЗК.

Шліфувальні припіки є одним з факторів, який обмежує продуктивність зубошліфувальних операцій, тому що виникають у якийсь момент часу по мірі збільшення інтенсивності шліфування і зміні ріжучої здатності шліфувального круга (затуплення, засалювання тощо). Ці фактори в цей час характеризуються двома технологічними параметрами: інтенсивність шліфування (швидкість видалення припуску) $Q'_w = t_v V_f$ [у мм^3/(с·мм)] і обсяг матеріалу, який видаляється $V'_w = t_v B$ [в (мм^3/мм)], які приведені до одиниці активної ширини шліфувального круга [1-18]. У цих позначеннях t_v – вертикальна глибина шліфування в мм, V_f – осьова подача при профільному зубошліфуванні в мм/с; B – ширина зубчастого вінця в мм. По мірі росту цих параметрів збільшується продуктивність шліфування і одночасно зменшується розмірна стійкість шліфувального круга і у якийсь момент часу утворюється та збільшується шліфувальний припік.

Більшість дослідників вважають відповідальним за виникнення шліфувальних припіків температурний фактор [19, 20, 21] і зв'язують появу припіків із критичною температурою шліфування, яка не є постійною [20]. У цьому зв'язку завдання забезпечення бездефектного високопродуктивного зубошліфування на верстатах з ЧПК відноситься до числа актуальних у технології машинобудуванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У цей час виявлення і дослідження припіків при шліфуванні відноситься до числа проблемних питань у технології машинобудуванні у зв'язку з невизначеністю умов його виникнення. Існуючі методи визначення наявності і величини припіків розділяють на дві групи: руйнуючі (вирізка мікрошліфів з деталі) і неруйнуючі (кислотне травлення, струмовихровий контроль і метод шумів Баркгаузена). Кожний із цих методів має свої переваги і недоліки. Наприклад, після застосування руйнуючих методів одна з деталей партії підлягає утилізації. Після кислотного травлення зубів знижується контактна міцність ЗК (до 20%). З неруйнуючих методів найбільше застосування знайшов метод шумів Баркгаузена, відповідно до якого виявлення припіків виконується на основі контролю змін електромагнітних властивостей матеріалу [21, 22]. Всі ці і супутні питання розглянуті у відповідній літературі

[21-30]. Як правило, шліфувальні припіки виявляють шляхом порівняння зміненої і незмінної структур матеріалу в досліджуваній області. Тому до числа розповсюджених відносять методи попереднього планування відповідних експериментів [21]. До числа виробничих методів відносять метод кислотного травлення і метод візуального контролю, модифікація якого дозволяє збільшити надійність виявлення шліфувального припіку [31, 32].

Аналіз зазначеної літератури свідчить про те, що більшість досліджень відноситься до операцій плоского і круглого шліфування. Специфіка профільного зубошліфування відбита в набагато меншій кількості літературних джерел. Наприклад, у роботі [33] показано, що при профільному зубошліфуванні на верстатах, що працюють за методом радіального врізання, припіки з'являються у верхній частині зуба. Однак у літературі відсутні дані по дослідженню топографії шліфувального припіку по висоті зуба. Немає відомостей по забезпеченню бездефектного зубошліфування в умовах невизначеності виникнення і зміни по висоті зуба шліфувального припіку.

Метою дослідження є розробка методики експериментальних досліджень шліфувального припіку і розробка технологічних рекомендацій із забезпечення умов шліфування без припіків з урахуванням зазначеної невизначеності.

Подання основного матеріалу. Дослідження якості поверхневого шару зубів після профільного зубошліфування відноситься до числа трудомістких робіт, так як передбачає порізку випробуваного ЗК в зв'язку з необхідністю подальшої вирізки і відповідної підготовки спеціальних зразків – мікрошліфів. Відомо, що шліфувальні прижоги виникають під дією температурного фактора в зоні різання, проте можливість їх виникнення залежить від великого числа параметрів. Виконаний вище літературний аналіз стану питання показав, що більшість дослідників планують відповідні експерименти шляхом послідовної зміни величини якого-небудь параметра, що виявляє вплив на температуру шліфування. В зв'язку з цим для експериментального визначення бездефектної глибини шліфування t_n проводили спеціальний експеримент при постійній осьовій подачі V_f = 5000 мм/хв із дискретною зміною глибини шліфування t_n : 0,035 мм (западина між 28 і 29 зубами); 0,050 мм (западина між 29 і 30 зубами); 0,075 мм (западина між 30 і 31 зубами); 0,090 мм (западина між 31 і 1 зубами) (рис.1), тобто маємо наступні дані:

t_n, мм……	0,035	0,050	0,075	0,090,
локалізація…….	28-29	29-30	30-31	31-1.

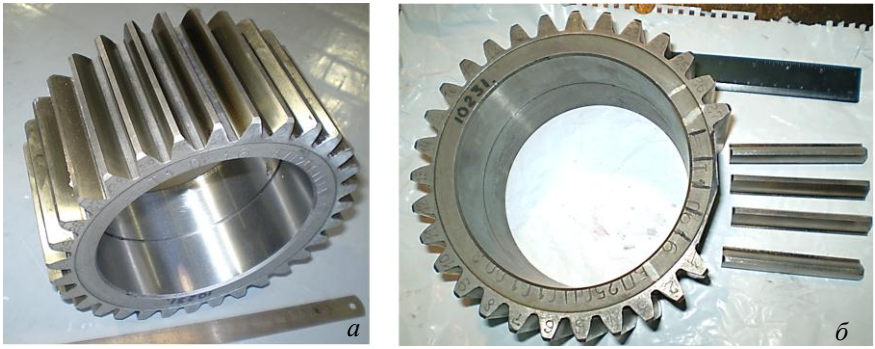


Рисунок 1 – Прошліфоване на операції зубошліфування ЗК до (*а*) і після (*б*, *в*) вирізки чотирьох зубів

Відрізку зазначених чотирьох зубів робили на електроерозійному верстаті мод. MV 2400S ADVANCE Type 2 (компанія MITSUBISHI ELECTRIC). Після вирізки зубів і їх фрагментів досліджувані поверхні підготовили на плоскошліфувальному верстаті за допомогою нескладного оснащення (рис. 2).

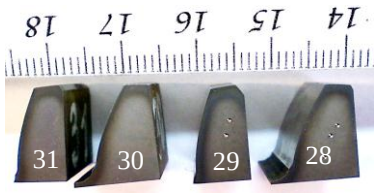
Рисунок 2 – Підготовка мікрошліфів на вирізаних фрагментах зубів (зразках): закріплення зразка в пристосуванні (*а*) і на столі верстата (*б*)

Дослідження мікроструктури зразків 28-31 виконували на мікрошліфах (рис. 3) після травлення їх поверхні розчином 2-3% азотної кислоти в спирті.

Мікротвердість по глибині поверхневого шару визначали за допомогою приладу ПМТ-3 (рис. 4, *а*), металографічні дослідження мікрошліфів виконували на мікроскопі мод. Альтами МЕТ-5 (рис. 4, *б*).

На поверхні мікрошліфів 28 (рис. 5) і 29 (рис. 6) спостерігається цементований шар і припіки не виявлено. На поверхні мікрошліфів 30 (рис. 7) і 31 (рис. 8) спостерігаються структурно-фазові перетворення, які підтверджуються також зміною мікротвердості по глибині поверхневого шару (рис. 9).

а



б

Рисунок 3 – Мікрошліфи із косим (*а*) і прямим (*б*) зрізами на фрагментах зубів (зразки 28-31)

а

б

Рисунок 4 – Твердомір мод. ПМТ-3 (*а*) і мікроскоп мод. Альтами МЕТ-5 (*б*)

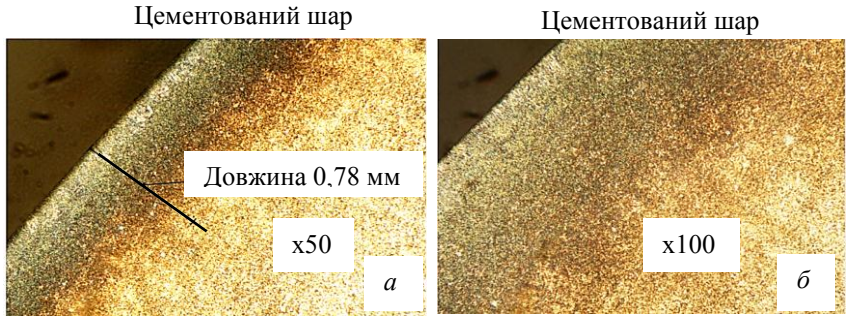


Рисунок 5 – Мікроструктура поверхні мікрошліфа зуба 28 при збільшенні х50 (*а*) і х100 (*б*)

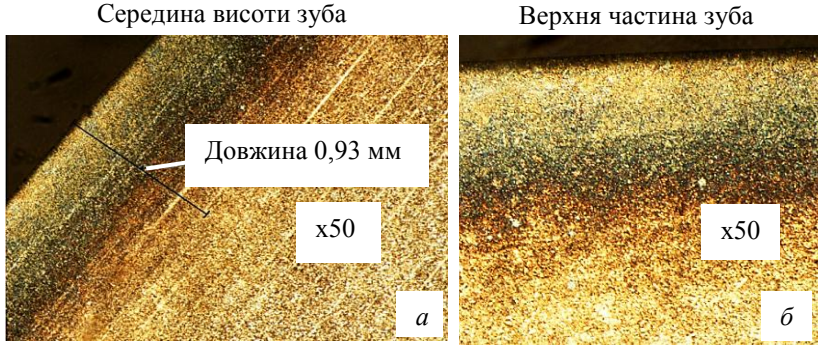


Рисунок 6 – Мікроструктура поверхні мікрошліфа зуба 29 в середній (*а*) і верхній (*б*) частинах зуба

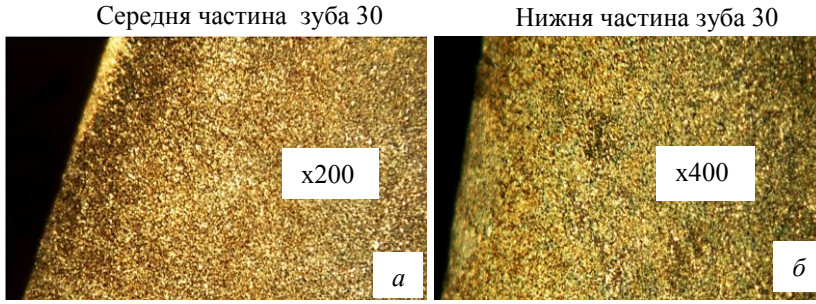


Рисунок 7 – Мікроструктура поверхні мікрошліфа зубу 30 в середній (*а*) і в нижній його частині (*б*)

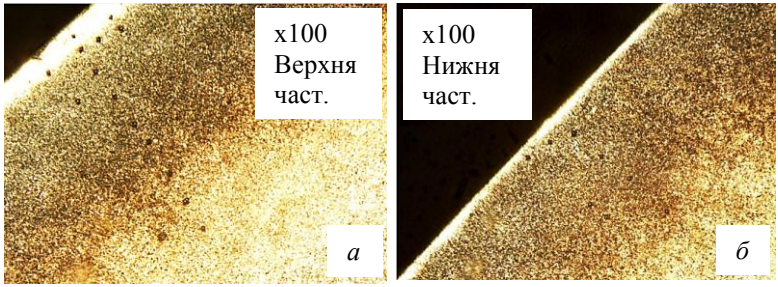


Рисунок 8 – Мікроструктура поверхні мікрошліфа зуба 31 в верхній (*а*) і в нижній (*б*) частинах зубу

Вимірювання мікротвердості проводили у верхній, середній і нижній частинах зуба (рис. 9).

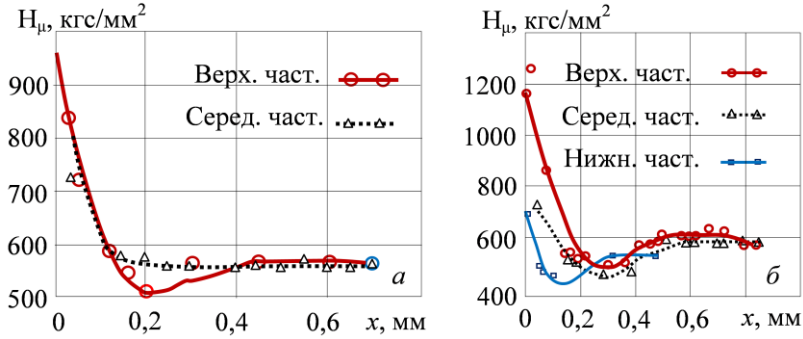


Рисунок 9 – Зміна мікротвердості по глибині поверхневого шару зубів 30 (*а*) і 31 (*б*) на різних частинах зуба по його висоті (верхня, середня і нижня)

По мірі збільшення нормальної глибини різання t_n від 0,035 мм до 0,09 мм при постійній осьовій подачі V_f =5000 мм/хв в поверхневому шарі виникає і збільшується шліфувальний припік: криві $h_{б.ш.}$ і $h_{д.ш.}$ на рис. 10. Одночасно збільшуються параметри Q'_w і V'_w.

Точки A_1 і B_1 відповідають експлуатаційним характеристикам Q'_w і V'_w звичайного шліфувального круга 25AF46L6V. В свою чергу точки A_2 і B_2 відповідають високопоруватим кругам, наприклад, кругам 3SG46Hs12Vs і 54A80F15VPMF604H. Зі збільшенням глибини шліфування t_n послідовно виникає і збільшується дефектний шар припіку $h_{д.ш.}$, що складається з

«білого» шару вторинного загартування $h_{б.ш.}$ і відпущеного шару вторинного відпуску (на рис.10 не показаний).

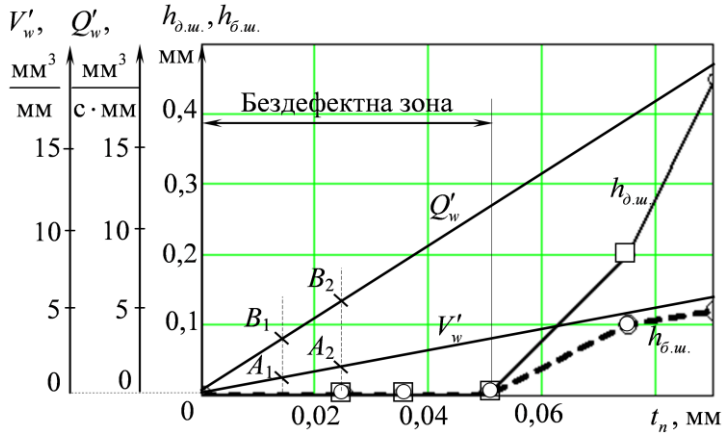


Рисунок 10 – Вплив нормальної глибини шліфування t_n на товщину виникаючого «білого» шару $h_{б.ш.}$, загальну глибину дефектного шару $h_{д.ш.}$, а також на параметри Q'_w і V'_w.

Таким чином, поліпшення експлуатаційної характеристики шліфувального круга (сукупність параметрів Q'_w і V'_w) дозволяє збільшувати глибину шліфування в бездефектній зоні (рис. 10).

Тенденція зміни глибини дефектного шару по висоті профілю така, що найбільша його товщина знаходиться у верхній частині висоти профілю на деякій відстані від краю зони контакту (рис.10). Відомо, що на краю зони контакту температура шліфування в два рази нижче, ніж в середині цієї зони навіть при однаковій щільності теплового потоку [34]. Цей експериментально виявлений факт підтверджує доцільність визначення температури шліфування за одновимірнім рішенням диференціального рівняння теплопровідності, в якому щільність теплового потоку постійна в межах зони контакту і дорівнює середньому її значенню в межах зазначеної зони.

Безперервному збільшенню параметрів $Q'_w(t_n)$ і $V'_w(t_n)$ відповідають «порогові залежності» $h_{д.ш.}(t_n)$ і $h_{б.ш.}(t_n)$ з рівнем порогу t_n=0,05 мм (рис. 10). Це на рівні ділильної окружності відповідає вертикальній глибині шліфування $t_v = \dfrac{t_n}{\sin\alpha}$ = 0,146 мм, де α – кут профілю вихідного контуру).

Виконані експериментальні дослідження підтверджують положення точок на евольвентному профілі (рис. 11), в яких визначають температуру шліфування за одновимірним рішенням диференціального рівняння теплопровідності [35].

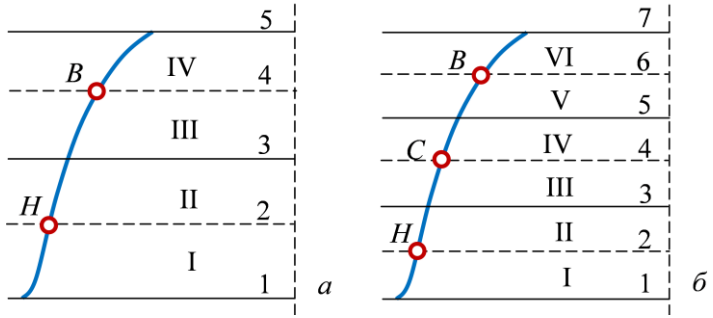


Рисунок 11 – Точки *H* і *B* (*а*) і також точки *H*, *C* і *B* (*б*) на евольвентному профілі для теоретичного визначення температури шліфування

Положення цих точок (рис. 11) визначають середні по висоті профілю значення температури шліфування, що послаблює вплив краю контактної зони, де має місце великий градієнт температури, який майже вдвічі знижує температуру на краю цієї зони.

Висновки

1. Дефектний шар, обумовлений припіком при профільному зубошліфуванні, залежить від великої кількості факторів і може з'явитися при певній критичній температурі в зоні різання, яка не є постійною величиною, а залежить від індивідуальних фактичних умов шліфування.

2. За інших рівних умов дефектний шар з'являється по мірі збільшення будь-якого фактора, наприклад, глибини шліфування. Для обліку невизначеності умов виникнення і збільшення товщини дефектного шару бездефектне зубошліфування слід проводити з деяким запасом по глибині шліфування (допуском), в якому враховується зазначена невизначеність (температурний градієнт за часом, час дії критичної температури тощо).

3. По мірі зменшення припуску, якій залишився, зону допуску по глибині бездефектного зубошліфування необхідно збільшувати, наприклад за рахунок відповідного зменшення глибини зубошліфування. У цьому сенсі розумно розглянути новий підхід до умови розподілу припуску по етапах і робочих ходах, відповідно до якого глибину шліфування по мірі зменшення припуску, якій залишився, вибирають не з умови зменшення величини дефектного шару в межах припуску, який залишився, а з умови зменшення ймовірності утворення дефектного шару.

Список використаних джерел: 1. *Лищенко Н.В.* Определение производительности профильного шлифования на станке с ЧПУ / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.Н. Ковальчук // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 11. – С.150 – 162. **2.** *Лищенко Н.В.* Определение интенсивности зубошлифования на основе аналитического уравнения эвольвенты / Н.В. Лищенко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць.– Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 11. – С. 137–149. **3.** *Jeffrey A. Badger* Microfracturing ceramic abrasive in grinding / Jeffrey A. Badger // ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2012, June 4-8. – Notre Dame, Indiana, USA, 2012. – pp. 1 – 9. **4**. *Klocke Fritz*. Manufacturing Process 2. Grinding, Honning, Lapping / Fritz Klocke; translated by Aaron Kuchle. – Springer – Verlad Berlin Heidrlberg, 2009. – 433 p. **5**. *Turich A.* Innovative concepts for grinding wind power energy gear / A. Turich C.Kobialka, D.Vucetic // Gear technology (June 2009). – pp. 39 – 44. **6.** *Undewiss Sascha* Grinding large module gears / Sascha Undewiss, Bill Miller // Gear solution. – 2010. – pp. 35 – 45. **7.** *Christof Golgels* Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December). – 2006. – pp. 34 – 40. **8.** *Smith Patriscia S.* A killer combination for ideal grinding conditions [Електронний ресурс] / Patriscia S.Smith.–1998. – Режим доступу: http://americanmachinist.com / machining - cutting / killer - combination - ideal - grinding - conditions. **9.** *Попов С.А.* Алмазно-абразивная обработка металлов и твёрдых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. **10.** Superior Strength Expected Precision. Cubitron II 3M [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://multimedia.3m.com/mws/media/926787O/3m-cubitron-ii-conventional-wheels-for-gear-grinding-lo-res.pdf. **11.** Atlantic Gear tooth profile grinding [Електронний ресурс]. – Режим доступу:http://www.atlantic-schlifkrugi.ru/fileadmin/redaktion/bilder / downloads / kurzinformationen/EN_Zahnflankenprofilschleifen_01.pdf. **12.** *Brecher Christian* Local simulation of the specific material removal rate for generating gear grinding / Christian Brecher, Fritz Klocke, Marcus Brumm, Florian Hubner // Gear technology (September/October). – 2015. – pp. 86 – 91. **13.** Principles of grinding [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.naxos-discus.com. **14.** *Klocke Fritz* Surface Damage Caused by gear profile grinding and its effects on flank grinding and its effects on flank load carrying capacity / Fritz Klocke, Heiko Schlattmeier // Gear technology (September/October). – 2004. – pp. 44 – 53. **15.** *Samuel B. McSpadden Jr.* A systematic method for grinding wheel performance evaluation [Електронний ресурс] / Samuel B. McSpadden Jr., Gay R.Hughes: Режим доступу: http://www.indabook.org/d/Abrasive-Grinding-Wheel.pdf. **16**. Руководство по зубошлифованию. Reishauer-Winterthur / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.winterthur technology.com. **17.** *Harroun David* Grind Talk: MiraIce – cooler grinding for large gears / David Harroun, Steve Claessens, Dennis Brown // Gear Solutions (may 14).– 2015. – pp. 57 – 62. – Режим доступу: http://www.gearsolutions.com/article/detail/6542. **18.** *Nishimura Yukihisa* Gear grinding processing developed for high-precision gear manufacturing / Yukihisa Nishimura, Toshifumi Katsuma, Yuji Ashizawa, Yoshikoto Yanase, Koichi Masuo // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2008. – Vol. 45 No. 3. – pp. 33 – 38. **19.** Качество изготовления зубчатых колёс / [Якимов А.В. [и др]. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с. **20.** *Евсеев Д.Г.* Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. — Саратов.: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 128 с. **21.** *Sundarrajan Kiruthika Devi* Study Of Grinding Burn Using Design Of Experiments Approach And Advanced Kaizen Methodology: a thesis … the Degree of Master of Science. – Lincoln, Nebraska, 2017. – p. 65. **22.** *Wojtas A.S.* Detection of Thermal Damage IN Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method / A.S. Wojtas, L. Suominen; B.A Shaw, J.T. Evans [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/041/041.htm. **23.** *Zaborowski Tadeusz* Grinding Burns In The Technological Surface Of The Gear Teeth Of The Cylindrical Gears / Tadeusz Zaborowski, Ryszard Ochenduszko // MECHANIK NR. – Vol. 10. – 2017. **24.** *G. Blake* Gear Failure Analysis Involving Grinding Burn / G. Blake, M. Margetts, W. Silverthorne // Gear technology (January/February). — 2009. – pp. 62 – 66. **25.** *Crow Jonathan R.* Standard Samples for Grinder Burn Etch Testing / Jonathan R. Crow, Michael A. Pershing // Gear technology (June). – 2018. – pp. 54 – 56. **26.** No Compromising

on Quality at Allison Transmission // Gear technology (July). – 2014. – pp. 22 – 24. **27.** *Gorgels Christof* Influence of Grinding Burn on Pitting Capacity / Christof Gorgels, Fritz Klocke, Tobias Schröder // Gear technology (August). – 2008. – pp. 58 – 63. **28.** *Korn Derek* Applying Inductive Technology to Detect Grinding Burn [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.mmsonline.com/articles/applying-inductive-technology-to-detect-grinding-burn. **29.** *Klocke Fritz* Surface Damage Caused by Gear Profile Grinding and Its Effects on Flank Load Carrying Capacity / Fritz Klocke, Heiko Schlattmeier // Gear technology (September/October). – 2004. – pp. 44 – 53. **30.** *André de Lima* The use of cylindrical grinding to produce a martensitic structure on the surface of 4340 Steel / André de Lima, Luiz Sérgio Gâmbaro, Milton Vieira Junior, Elesandro Antonio Baptista [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782011000100005. **31.** Пат. 15688 України, МПК B24 B 51/00 Спосіб визначення режимів шліфування, при яких утворюється шліфувальний припік / В.П. Ларшин, Н.В. Ліщенко, О.В. Якимов, А.В. Ларшина. – № u 2006 00066; заявл. 03.01.2006; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7. – 2 с.: іл. **32.** Пат. 17085 України, МПК B24 B 51/00 Спосіб керування шліфуванням / В.П. Ларшин, Н.В. Ліщенко, О.В. Якимов, А.В. Ларшина. – № u 2006 02142; заявл. 27.02.2006; опубл. 15.09.2006, Бюл. № 9. – 4 с.: іл. **33.** *Golgels Christof* Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December). – 2006. – pp. 34 – 40. **34.** *Ліщенко Н.В.* Дослідження наступності аналітичних рішень для визначення температури шліфування / Н.В. Ліщенко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – №1 (43). – С.78–87. **35.** *Лищенко Н.В.* Определение температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании / Н.В. Лищенко // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. Технічні науки. — Х., 2011. – Вип.115. – С.136 – 143.

Bibliography (transliterated): 1. *Lishhenko N.V.* Opredelenie proizvoditel'nosti profil'nogo shlifovaniya na stanke s CHPU / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, A.N. Koval'chuk // Suchasni tekhnologiï v mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'. – KHarkiv: NTU «KHPI», 2016. – Vip. 11. – S.150 – 162. **2.** *Lishhenko N.V.* Opredelenie intensivnosti zuboshlifovaniya na osnove analiticheskogo uravneniya ehvol'venty / N.V.Lishhenko // Suchasni tekhnologiï v mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'.– KHarkiv: NTU «KHPI», 2016. – Vip. 11. – S. 137–149. **3.** *Jeffrey A.* Badger Microfracturing ceramic abrasive in grinding / Jeffrey A. Badger // ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2012, June 4-8. – Notre Dame, Indiana, USA, 2012. – pp. 1 – 9. **4.** *Klocke Fritz* Manufacturing Process 2. Grinding, Honning, Lapping / Fritz Klocke; translated by Aaron Kuchle. – Springer – Verlad Berlin Heidrlberg, 2009. – 433 p. **5.** *Turich A.* Innovative concepts for grinding wind power energy gear / A. Turich C.Kobialka, D.Vucetic // Gear technology (June 2009). – pp. 39 – 44. **6.** *Undewiss Sascha* Grinding large module gears / Sascha Undewiss, Bill Miller // Gear solution. – 2010. – pp. 35 – 45. **7.** *Golgels Christof* Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December). – 2006. – pp. 34 – 40. **8.** *Smith Patriscia S.* A killer combination for ideal grinding conditions [Elektronnyi resurs] / Patriscia S.Smith.–1998. – Rezhym dostupu: http://americanmachinist.com / machining - cutting / killer - combination - ideal - grinding - conditions. **9.** *Popov S.A.* Almazno-abrazivnaya obrabotka metallov i tvyordykh splavov / S.A. Popov, N.P. Malevskij, L.M. Tereshhenko. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 263 s. **10.** Superior Strength Expected Precision. Cubitron II 3M [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://multimedia.3m.com/mws/media/926787O/3m-cubitron-ii-conventional-wheels-for-gear-grinding-lo-res.pdf. **11.** Atlantic Gear tooth profile grinding [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.atlantic-schlifkrugi.ru/fileadmin/redaktion/bilder / downloads / kurzinformationen/EN_Zahnflankenprofilschleifen_01.pdf. **12.** *Brecher Christian* Local simulation of the specific material removal rate for generating gear grinding / Christian Brecher, Fritz Klocke, Marcus Brumm, Florian Hubner // Gear technology (September/October). – 2015. – pp. 86 – 91. **13.** Principles of grinding [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.naxos-discus.com. **14.** *Klocke Fritz* Surface Damage Caused by gear profile grinding and its effects on flank grinding and its effects on flank load carrying capacity / Fritz Klocke, Heiko Schlattmeier // Gear technology (September/October). – 2004. – pp. 44 – 53. **15.** *Samuel B.McSpadden Jr.* A systematic method for

grinding wheel performance evaluation [Elektronnyi resurs] / Samuel B.McSpadden Jr., Gay R.Hughes: Rezhym dostupu: http://www.indabook.org/d/Abrasive-Grinding-Wheel. pdf. **16**. Rukovodstvo po zuboshlifovaniyu. Reishauer-Winterthur / [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.winterthur technology.com. **17.** *Harroun David* Grind Talk: MiraIce – cooler grinding for large gears / David Harroun, Steve Claessens, Dennis Brown // Gear Solutions (may 14).– 2015. – pp. 57 – 62. – Rezhym dostupu: http://www.gearsolutions.com/article/detail/6542. **18.** *Nishimura Yukihisa* Gear grinding processing developed for high-precision gear manufacturing / Yukihisa Nishimura, Toshifumi Katsuma, Yuji Ashizawa, Yoshikoto Yanase, Koichi Masuo // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2008. – Vol. 45 No. 3. – pp. 33 – 38. **19.** Kachestvo izgotovleniya zubchatykh kolyos / [YAkimov A.V. [i dr]. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 191 s. **20.** *Evseev D.G.* Formirovanie svojstv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoj obrabotke / D.G. Evseev. — Saratov.: Izd-vo Saratov. un-ta, 1975. – 128 s. **21.** *Sundarrajan Kiruthika Devi* Study Of Grinding Burn Using Design Of Experiments Approach And Advanced Kaizen Methodology: a thesis … the Degree of Master of Science. – Lincoln, Nebraska, 2017. – p. 65. **22.** *Wojtas A.S.* Detection of Thermal Damage IN Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method / A.S. Wojtas, L. Suominen; B.A Shaw, J.T. Evans [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://www.ndt.net/article/ecndt98/aero/041/041.htm. **23.** *Zaborowski Tadeusz* Grinding Burns In The Technological Surface Of The Gear Teeth Of The Cylindrical Gears / Tadeusz Zaborowski, Ryszard Ochenduszko // MECHANIK NR. – Vol. 10. – 2017. **24.** *Blake G.* Gear Failure Analysis Involving Grinding Burn / G. Blake, M. Margetts, W. Silverthorne // Gear technology (January/February). — 2009. – pp. 62 – 66. **25.** *Crow Jonathan R.* Standard Samples for Grinder Burn Etch Testing / Jonathan R. Crow, Michael A. Pershing // Gear technology (June). – 2018. – pp. 54 – 56. **26.** No Compromising on Quality at Allison Transmission // Gear technology (July). – 2014. – pp. 22 – 24. **27.** *Gorgels Christof* Influence of Grinding Burn on Pitting Capacity / Christof Gorgels, Fritz Klocke, Tobias Schröder // Gear technology (August). – 2008. – pp. 58 – 63. **28.** *Korn Derek* Applying Inductive Technology to Detect Grinding Burn [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://www.mmsonline.com/articles/applying-inductive-technology-to-detect-grinding-burn. **29.** *Klocke Fritz* Surface Damage Caused by Gear Profile Grinding and Its Effects on Flank Load Carrying Capacity / Fritz Klocke, Heiko Schlattmeier // Gear technology (September/October). – 2004. – pp. 44 – 53. **30.** *André de Lima* The use of cylindrical grinding to produce a martensitic structure on the surface of 4340 Steel / André de Lima, Luiz Sérgio Gâmbaro, Milton Vieira Junior, Elesandro Antonio Baptista [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: http://www.scielo.br/scielo.php?script =sci_arttext&pid=S1678-58782011000100005. **31.** Pat. 15688 Ukraïni, MPK V24 B 51/00 Sposib viznachennya rezhimiv shlifuvannya, pri yakikh utvoryuєt'sya shlifuval'nij pripik / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, O.V. YAkimov, A.V. Larshina. – № u 2006 00066; zayavl. 03.01.2006; opubl. 17.07.2006, Byul. № 7. – 2 s.: il. **32.** Pat. 17085 Ukraïni, MPK V24 B 51/00 Sposib keruvannya shlifuvannyam / V.P. Larshin, N.V. Lishhenko, O.V. YAkimov, A.V. Larshina. – № u 2006 02142; zayavl. 27.02.2006; opubl. 15.09.2006, Byul. № 9. – 4 s.: il. **33.** *Golgels Christof* Optimization of the gear profile grinding process utilizing an analogy process / Christof Golgels, Heiko Schlattmeier, Fritz Klocke // Gear technology (November/December). – 2006. – pp. 34 – 40. **34.** *Lishchenko N.V.* Doslidzhennia nastupnosti analitychnykh rishen dlia vyznachennia temperatury shlifuvannia / N.V. Lishchenko // Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii: zbirnyk naukovykh prats. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – №1 (43). – S.78–87. **35.** *Lishhenko N.V.* Opredelenie temperatury i glubiny defektnogo sloya pri shlifovanii / N.V. Lishhenko // Visnyk Khark. nats. tekhn. un-tu silsk. hosp-va im. Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. — Kh., 2011. – Vyp.115. – S.136 – 143.

Поступила в редколлегию 25.06.2018