

20. Hayun S., Paris V., Dariel M.P., et al. (2009). Static and dynamic mechanical properties of boron carbide processed by spark plasma sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 3395–3400.

УДК 621.923

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-297-303

С.В. Рябченко, канд. техн. наук

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2, 04074 м. Київ, e-mail: s.riabchenko@ukr.net

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ШЛІФУВАННЯМ КРУГАМИ ІЗ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

Зубошліфування є одним з методів фінішної обробки зубчастих коліс. Розглядається питання забезпечення якості та довговічності зубчастих коліс за рахунок використання шліфувальних кругів з кубічного нітриду бору (КНБ). В порівнянні з шліфуванням кругами з електрокорунду різного типу. Експериментальні дослідження процесу шліфування зубчастих коліс проводилися на зубошліфувальному верстаті моделі 5851. Оцінка якості обробки зубчастих коліс виконувалась по декільком критеріям. Дослідження структури поверхневого шару зубчастих коліс виконувалась за допомогою комплексної методики, що включає металографічний і рентгеноструктурний аналіз та дослідження залишкових напружень.

У зв'язку з труднощами оцінки довговічності зубчастих коліс після шліфування кругами з КНБ в реальних умовах ці дослідження проводили шляхом перевірки на зносостійкість зразків зубчастих коліс після шліфування різними шліфувальними кругами.

Аналіз результатів шліфування показав, що при фінішному шліфуванні кругами з КНБ формується поверхневий шар зубів із мікроструктурою, що практично не відрізняється від структури глибоких шарів металу. Після шліфування в тонкому поверхневому шарі зубчастих коліс виникає значне напруження стиснення.

Зносостійкість зразків зубчастих коліс після шліфування кругами із КНБ з охолодженням значно вище порівняно із зразками шліфованими кругами із КНБ без охолодження.

Обробка зубчастих коліс шліфувальними кругами із КНБ в порівнянні з кругами із електрокорунду сприяє підвищенню їх експлуатаційних властивостей.

Ключові слова: шліфування, зубчасті колеса, круги із КНБ, якість, довговічність, зносостійкість.

Вступ

Забезпечення якості та довговічності шліфування зубчастих коліс є актуальною проблемою сучасного машинобудування [1, 2].

Відомо, що підвищити якість обробки деталей і, відповідно, їх надійність і ресурс роботи можна шляхом застосування ефективних технологій шліфування, які забезпечують зниження теплової й силової напруженості процесу й підвищення продуктивності обробки.

Подальший розвиток методів шліфування зубчастих коліс значною мірою пов'язаний із застосуванням інструмента із кубічного нітриду бора (КНБ). Це викликано тим, що КНБ мають унікальну твердість, що дозволяє обробляти будь-які важкооброблювані матеріали. Шліфування кругами із КНБ у порівнянні з обробкою звичайними абразивами має свої особливості. Це висока

вартість кругів із КНБ, що суттєво підвищує загальну технологічну вартість шліфування. Вища зносостійкість кругів із КНБ, що зменшує витрати на інструмент. Підвищена якість обробки поверхневого шару кругами з КНБ (шорсткість, точність, фізико-механічні та хімічні властивості).

Дослідження процесів зубошліфування зубчастих коліс кругами із КНБ не мало системного підходу. Окремі публікації не враховували умов шліфування кругами із КНБ з урахуванням наведених вище особливостей. Таким чином, незважаючи на проведені раніше дослідження, забезпечення якості та довговічності зубчастих коліс є актуальним завданням.

Мета роботи

Зміст даної роботи полягає в проведенні дослідження структури поверхневого шару зубчастих коліс та оцінки довговічності зубчастих коліс після шліфування кругами з КНБ; у визначенні експлуатаційних властивостей поверхневого шару зубчастих коліс, а також ефективних методів обробки зубчастих коліс кругами із КНБ.

Методика проведення роботи

Для дослідження працездатності кругів при шліфуванні зубчастих коліс застосовувалися тарілчасті круги форми 12A2-20° 225-3-3-40 із КНБ марки КР зернистістю 125/100. Використовувались органічна (B2-08 та B2-08), керамічна (C10) та металева (M2-09) зв'язки. Для порівняння працездатності кругів випробовувались абразивні круги із електрокорунду білого та хромистого (рубін-корунду) однакової зернистості на керамічних зв'язках.

Для проведення випробування шліфувальних кругів використовували зразки зубчастих коліс: модуль $m = 6$ мм, число зубів $z = 21$, ширина вінця $B = 20$ мм. Зубчасті колеса виготовлялися із сталі ХВГ (60 HRC).

Структура поверхневого шару зубчастих коліс із загартованих сталей вивчалася за допомогою комплексної методики, що включає металографічний і рентгеноструктурний аналіз [3]. Зразки вирізали електроіскровим способом з евольвентної поверхні зуба колеса в зоні між ділильною окружністю і окружністю вершин. Виготовлення шліфів виконувалося відповідно до рекомендацій роботи [4]. Дослідження мікроструктури поверхневого шару зуба і її фотографування робили на мікроскопі «Neophot-21» (Германія) при збільшенні $\times 400$ і $\times 800$.

Рентгенографічне дослідження здійснювали на установці УРС 50И-М в залізному і мідному випромінюванні (глибина проникнення відповідно 11 і 3 мкм). Зміна структури поверхневого шару оцінювалася по інтегральній ширині рентгенівських ліній (110) і (211) - фази і зміні його фазового складу.

Дослідження тангенціальних залишкових напружень I-го роду проводилися за методом М.М. Давиденкова [5]. Визначення залишкових напружень здійснювалося на пластинках шириною 4 мм і товщиною стінки 3 мм, вирізаних по всій довжині зуба зубчастого колеса в зоні між ділильною окружністю і окружністю вершин.

У зв'язку з труднощами оцінки довговічності зубчастих коліс після шліфування кругами з КНБ в реальних умовах ці дослідження проводили шляхом перевірки на зносостійкість. Циліндричні зразки шліфувалися кругом із КНБ на органічній зв'язці. Швидкість шліфування $V_{кр} = 25$ м / с, $V_{дет} = 30$ м / хв, $S_{np} = 1,0$ м / хв, $t = 0,01$ мм. З кожного зразка знімався припуск розміром 0,2 мм, потім вироблялося виходжування. Шліфування одних зразків проводилося з охолодженням (з СОТС), інших – без охолодження (без СОТС).

Процес тертя досліджуваних поверхонь проводився за схемою «площина-циліндр» на машині тертя СМТ-1: початковий середній тиск на контактній площадці $P_{CP} = 28$ кг / мм², швидкість відносного ковзання $V_{ск} = 1$ м/с, шлях тертя $L = 19$ км і в середовищі масла «Індустріальне» І - 30А.

Режими випробувань були обрані згідно з рекомендаціями по випробуванню зубчастих коліс із загартованих сталей [6].

Після випробувань лунки зносу, що утворилися, заміряли на профілографі-профілометрі моделі 252 заводу «Калібр». Замір глибини лунок зносу проводився з точністю 0,01 мкм.

Результати дослідження

Зазвичай структура поверхневого шару сталі формується під впливом деформації та тепла, причому при шліфуванні сталі високої твердості вирішальним фактором є тепловий [7]. Тому формування поверхневої структури зубчастого колеса при шліфуванні найважливіше.

Металографічні та рентгеноструктурні дослідження поверхневого шару зубчастих коліс показали, що шліфування кругами із КНБ з охолодженням при глибині шліфування $t = 0,01$ мм призводить до формування поверхневого шару зубів з мікроструктурою, що не відрізняється від структури глибинних шарів металу. При пошаровому рентгеноструктурному аналізі у залізнаму та мідному випромінюванні градієнт концентрації залишкового аустеніту в поверхневому шарі відсутній, практично однакова і ширина рентгенівських ліній. Отже, при фінішному шліфуванні зубчастих коліс кругами із КНБ з охолодженням температура в зоні обробки значно нижча від точки A_{1c} і зміна структури не виявляється методами досліджень, що використовуються. При глибині шліфування $t = 0,03$ мм (у залізнаму випромінюванні) спостерігається зростання кількості залишкового аустеніту, а при $t = 0,05$ мм (у мідному випромінюванні) спостерігається тонкий шар металу, збагаченого аустенітом. Подальше підвищення глибини різання до $t = 0,1$ мм призводить до утворення шару вторинного загартування, що ясно видно за кількістю залишкового аустеніту (у залізнаму випромінюванні) та появою окремих ділянок шару вторинного загартування (рис 1 а).

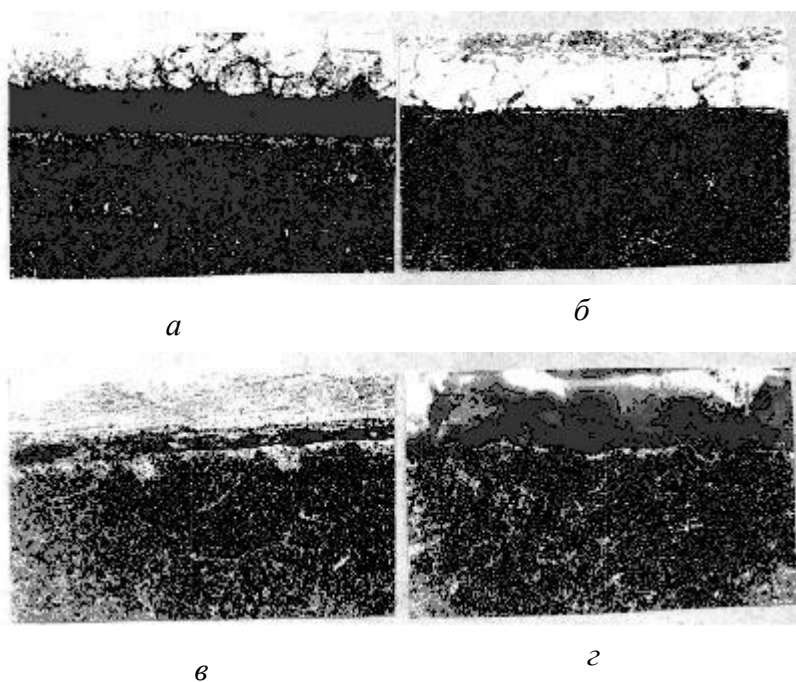


Рис. 1. Структура поверхневого шару зубчастих коліс із сталі ХВГ після обробки кругом із КНБ: а – $t = 0,01$ мм без СОТС; б – $t = 0,05$ мм без СОТС; в – $t = 0,01$ мм СОТС; г – $t = 0,1$ мм з СОТС

Характерно, що рентгенограми поверхні в залізному випромінюванні після шліфування кругами КНБ без охолодження з глибиною до $t = 0,03$ мм істотно не відрізняються від рентгенограм, знятих при роботі з охолодженням. Лише у мідному випромінюванні спостерігається помітне підвищення кількості залишкового аустеніту. Але в мікрошліфах після шліфування з глибиною різання $t = 0,05$ мм видно сліди вторинного загартування (рис 1 б).

Дослідження стану поверхні зубів після шліфування кругами з білого електрокорунду без охолодження показало, що температура на всіх режимах вище, ніж у разі обробки кругами із КНБ. При мінімальній глибині різання $t = 0,01$ мм у залізному випромінюванні спостерігається суттєве звуження рентгеновських ліній та підвищення до 25% кількості залишкового аустеніту. Шліфування зубчастих коліс кругами із хромистого (рубін-корунду) електрокорунду має менший вплив на структуру поверхневого шару в порівнянні з шліфуванням білим електрокорундом, проте вплив на структуру поверхневого шару також суттєво вище, ніж при шліфуванні кругами із КНБ.

В результаті комплексного металографічного та рентгеноструктурного аналізів поверхневого шару зубчастих коліс із загартованої сталі встановлено, що шліфування з глибиною різання $t = 0,1$ мм і більше недоцільно, оскільки глибина дефектного шару перевищує припуск на обробку і становить до 200 мкм, що не може бути видалено на наступних фінішних операціях обробки. Чорне шліфування зубчастих коліс з глибиною

різання $t = 0,05$ мм кругами із КНБ можливе із застосуванням охолодження (СОТС), оскільки дефектний шар у цьому випадку становить лише 20-30 мкм, що можна видалити при наступних фінішних операціях зубошліфування.

Одночасно з металографічними та рентгенографічними дослідженнями вивчався розподіл залишкових напруг по глибині поверхневого шару зубчастих коліс із загартованих сталей. Показано, що величина та знак напруги залежать від характеру структурних змін поверхневого шару при механічній обробці. Враховуючи, що використовувана в експериментах апаратура для визначення залишкових напруг давала достовірні дані, починаючи з глибини шару 4-5 мкм, можна говорити лише про тенденцію зміни напруг у першій зоні епюри, а не про кількісні величини цієї зміни

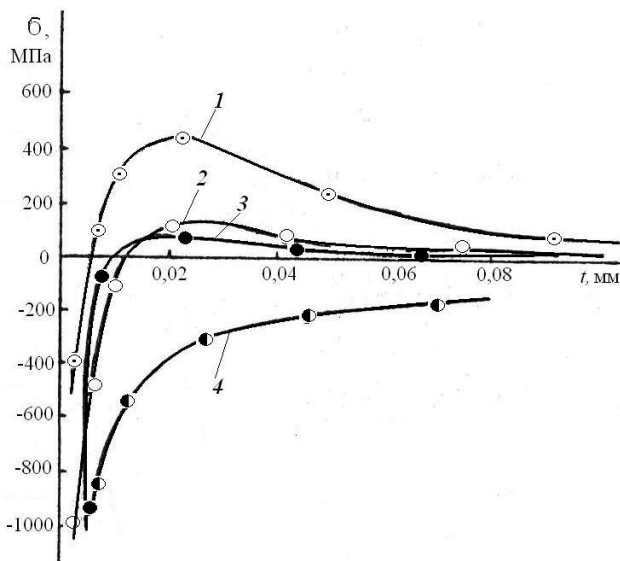


Рис. 2. Залишкові напруги у поверхневому шарі зубчастого колеса: 1 – круг із електрокорунду білого; 2 – круг із КНБ на органічній зв'язці В2-08; 3 – круг із КНБ на металевій зв'язці М2-09; 4 – до шліфування

залежно від умов шліфування. У той же час можна кількісно характеризувати величини напруг і характер їх розподілу в другій і третій зонах епюри (рис. 2).

В результаті досліджень встановлено, що в тонкому поверхневому шарі зубчастих коліс із загартованих сталей після термообробки утворюються залишкові напруження стиснення, що досягають $850-900 \pm 10$ Мпа. На глибині понад 0,08 мм вони зменшуються до 150 ± 10 Мпа. Після шліфування в тонкому поверхневому шарі (1–5 мкм) виникають значні напруження стиснення. При обробці кругами з електрокорунду вони досягають 300 ± 10 Мпа, а в разі застосування кругів

із КНБ - 1000 ± 10 Мпа. При шліфуванні без охолодження залишкові напруги зменшуються до 20% і становлять для кругів із електрокорунду 250 ± 10 Мпа, а для кругів із КНБ на органічних зв'язках - 800 ± 10 Мпа. Зниження залишкових напруг стиснення у разі шліфування зубчастих коліс без охолодження пояснюється підвищеним тепловим потоком, що сприяє утворенню розтягуючих залишкових напруг і тим самим зменшує частку залишкових напруг стиснення. Однак точність визначення залишкових напруг на такій дає достовірні результати.

Встановлено, що на глибині 5-8 мкм стискаючі залишкові напруги переходять у розтягуючі, і на глибині 20 мкм вони дорівнюють $100-400 \pm 10$ Мпа. Глибина поширення розтягуючих залишкових напруг становить $70-100 \pm 10$ Мпа. Характер розподілу напруг при шліфуванні зазначеними кругами однаковий, проте їх абсолютні значення різні. Максимальні розтягуючі залишкові напруги в поверхневому шарі зубчастих коліс виникають у разі обробки інструментом із електрокорунду без охолодження, а мінімальні – кругами із КНБ на металевій зв'язці. В останньому випадку знижується інтенсивність теплового потоку, що впливає на деталь, за рахунок рясного охолодження та відведення частини тепла у зв'язці круга. Слід зазначити, що при шліфуванні кругами із КНБ на органічній зв'язці розтягуючі залишкові напруги у поверхневому шарі на 10-15% вище, ніж при шліфуванні кругами на металевій зв'язці.

В цілому можна відзначити, що при зубошліфуванні кругами із КНБ розтягуючі залишкові напруги в 2 рази менше, ніж при обробці кругами з електрокорунду. При зубошліфуванні на фінішних режимах при глибині різання $t = 0,1$ мм кругами із КНБ формуються залишкові напруги стиснення величиною до 200 ± 10 Мпа.

Стан і властивості поверхневого шару суттєво впливають на контактну витривалість зубчастих коліс, що зрештою впливає на їх довговічність. Однак, оцінка довговічності зубчастих коліс у реальних умовах є трудомісткою і вимагає великих капітальних витрат, що й змусило вдаватися до модельних досліджень зносостійкості зразків.

Порівняльні випробування на зношування зразків зубчастих коліс проводилися на машині тертя за схемою «площина-циліндр» і показали в цілому збільшення зносостійкості зразків після їх шліфування кругами із КНБ з охолодженням.

Порівняння зносостійкості зразків зубчастих коліс вироблялося за величинами площ поперечного перерізу лунок зносу. На рис. 3 наведено фотографії зразків після тертя, де чітко видно лунки зносу.

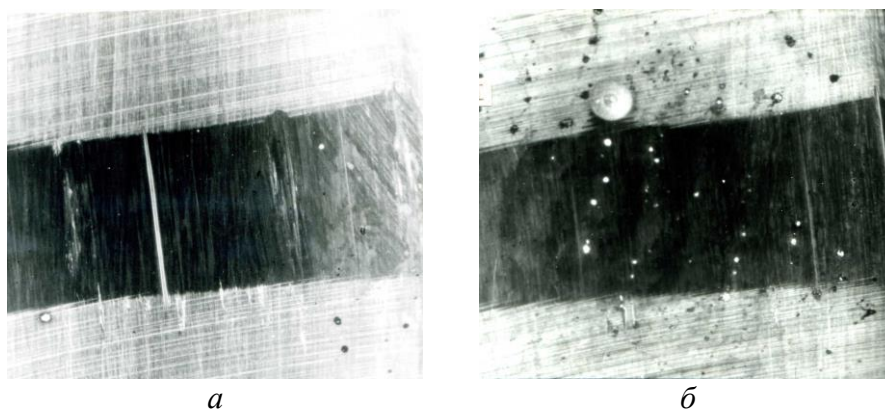


Рис. 3. Зразки поверхні зубчастих коліс після випробування на зносостійкість ($\times 20$): а – зразок шліфований кругом із КНБ без охолодження; б – зразок шліфований кругом із КНБ з охолодженням

Аналіз результатів випробувань зразків зубчастих коліс на зносостійкість показав, що після шліфування кругами із КНБ з охолодженням зношування зразка менше на 10-15% порівняно зі зносом зразка після шліфування кругами із КНБ без охолодження.

Висновки

Встановлено, що при фінішному шліфуванні ($t = 0,01$ мм) кругами із КНБ з охолодженням формується поверхневий шар зубів з мікроструктурою, що не відрізняється від структури глибинних шарів металу, а шліфування глибиною різання більше $t = 0,05$ мм недоцільно, оскільки глибина дефектного шару перевищує припуск на обробку (близько 200 мкм), який не може бути видалений на наступних фінішних операціях обробки.

Встановлено, що після шліфування кругами із КНБ в тонкому поверхневому шарі (1-5 мкм) зубів формуються значні напруги стиску, які на глибині 5-8 мкм переходять у розтягуючі і на глибині 20 мкм дорівнюють $100-400 \pm 10$ Мпа.

Випробування зразків зубчастих коліс на зносостійкість показали, що шліфування кругами із КНБ з охолодженням сприяє підвищенню їхньої зносостійкості до 10%.

S.V. Riabchenko

V.N. Bakul Institute for Super hard Materials NAS of Ukraine, 04074, Kyiv Avtozavodska Street, 2

ENSURING THE QUALITY AND DURABILITY OF GEAR WHEELS BY GRINDING WITH CUBIC BORON NITRIDE CIRCLES

Tooth grinding is one of the methods of finishing gear wheels. The question of ensuring the quality and durability of gears due to the use of cubic boron nitride (CBN) grinding wheels is considered. Compared to grinding with different types of electrocorundum circles. Experimental studies of the gear grinding process were carried out on a gear grinding machine model 5851. The evaluation of the quality of gear processing was carried out according to several criteria. The study of the structure of the surface layer of gears was carried out using a complex methodology, which includes metallographic and X-ray structural analysis and the study of residual stresses.

Due to the difficulties of assessing the durability of gear wheels after grinding with CBN wheels in real conditions, these studies were carried out by checking the wear resistance of gear wheel samples after grinding with different grinding wheels.

The analysis of the grinding results showed that the surface layer of the teeth with a microstructure that practically does not differ from the structure of the deep layers of the metal is formed during the final grinding with CBN wheels. After grinding, significant compressive stress occurs in the thin surface layer of the gears.

The wear resistance of gear wheel samples after grinding with wheels from CBN with cooling is significantly higher compared to samples ground with wheels from CBN without cooling.

The processing of gear wheels with grinding wheels made of CBN, in comparison with wheels made of electrocorundum, helps to increase their operational properties.

Key words: *grinding, gear wheels, CBN wheels, quality, durability, wear resistance.*

Література

1. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. Киев: Наук. думка, 1994. 180 с.
2. Рябченко С.В. Шлифование зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ. *Сверхтвердые материалы*. 2014. № 6. С. 81–89.
3. Рябченко С.В. Обеспечение качества обработки зубчатых колес при зубошлифовании кругами из КНБ. *Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та*

- якість поверхні деталей машин. Зб. наук. праць. – К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2009. С. 80–87.
4. Кример Б.И. Лабораторный практикум по металлографии и физическим свойствам металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1966. 248 с.
 5. Давиденков Н.Н. Об измерении остаточных напряжений. *Заводская лаборатория*. 1950. № 2. С. 18–24.
 6. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1982. 232 с.
 7. Калашников А. С. Современные методы чистовой обработки зубьев цилиндрических колес. *Металлообработка*. 2009. № 6. С. 38–42.

Надійшла 31.07.24

References

1. Ryzhov, E.V., Klimenko, S.A., & Gutsalenko, O.G. (1994). Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detalei s pokritiyami [Technological quality assurance of parts with coatings]. *Nauk. Dumka* [in Russian].
2. Riabchenko, S. V. (2014). Shlifovani zubchatykh koles tarelchatymi krugami iz STM [Grinding of gears with STM disc wheels]. *Sverkhverdye materialy, – Superhard materials*. 6, 81–89 [in Russian].
3. Riabchenko, S. V. (2009). Obespechenie kachestva obrabotky zubchatykh koles pri zuboshlifovanii kruhami iz KNB [Ensuring the quality of processing of gear grinding with wheels made of CBN]. *Suchasni protsesy mekhanichnoyi obrobky instrumentamy z NTM ta yakist poverkhni detalei mashyn – Modern processes of machining with NTM tools and surface quality of machine parts*. (pp 80-87). INM im.V.M.Bakulya NAN Ukrayiny [in Russian].
4. Krimer, B.I. (1966) *Laboratornyi praktikum po metallografii i fizicheskim svoistvam metallov i splavov* [Laboratory practical training on metallography and physical properties of metals and alloys]. Metallurgiya [in Russian].
5. Davydenkov, N.M. (1950). Ob izmerenii ostatocnykh napriazhenii [On the measurement of residual stresses]. *Zavodskaya laboratoriya*, 2, 18–24 [in Russian].
6. Henkin, M.D., Ryzhov, M.A., & Ryzhov, N.M. (1982). *Povyshenie nadezhnosti tiazelonahruzhennykh zubchatykh peredach* [Increasing the reliability of heavily loaded gears]. Mashynostroenye [in Russian].
7. Kalashnikov A. S. (2009). Sovremennye metody chistovoi obrabotki zubev tsilindricheskikh koles [Modern methods of finishing teeth of cylindrical gears] *Metalloobrabotka – Metalworking*, 6, 38–42. [in Russian].