

УДК 621.91

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-5-15-22

Н.А. Ворожцова, В.Ф. Макаров, А.С. Горбунов, Е.Н. Колганова

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА НЕПРЕРЫВНОГО ОБКАТНОГО ЗУБОШЛИФОВАНИЯ

Рассматривается вопрос повышения технологических возможностей метода непрерывного обкатного зубошлифования при применении комбинированного червячного круга, состоящего из двух частей с различными абразивными характеристиками. Приведены обоснования ученых о взаимосвязи долговечности зубчатой передачи с шероховатостью профиля зубьев. Рассмотрены современные методы суперфинишной обработки зубчатых колес. Выявлены противоречия обеспечения

точности и шероховатости, при обработке операций зубошлифования с последующим зубохонингованием. Проведены экспериментальные исследования по обработке авиационных зубчатых колес комбинированным червячным кругом *Reishauer AG 1-275x125x160 A80G8V0167/EK800* на станке *Reishauer RZ basic*.

Ключевые слова: зубошлифование, обкатной метод, червячный круг, степень, точность, поверхностный слой.

N.A. Vorozhtsova, V.F. Makarov, A.S. Gorbunov, E.N. Kolganova

TECHNOLOGICAL CAPACITY UPDATING OF CONTINUOUS RUN-IN GEAR GRINDING METHOD

The work purpose consists in the technological capacity updating of the method for cog-wheel continuous run-in gear grinding based on the purpose of efficient modes and characteristics of the worm disk.

The investigation methods are based on mathematical modeling and planning experiments. Machining aircraft cylindrical cog-wheels and special samples was carried out on modern NC machines, benches and plants with the use of up-to-date test equipment: coordinate inspection machine *KIM R-100 "Klingelberg"*, profile meter *MarSurf M300S "Mahr"*, optical microscope *Axiocvert 400MAT "Zeiss"*, electronic scanning microscope *Tescan Mira3 "Tescan"*, micro-hardness gage *Micro Met 5104 "Buehler"*, X-ray diffractometer

Xstress Robot "Stresstech OY", Barkhausen digital nose analyzer

Rollscan 350 "Stresstech OY", plant APOON on the well-known and developed techniques.

The research results and novelty. Special strategy and cutting modes at the required characteristics of the combined polish-grinding worm allow ensuring gear profile roughness $Ra=0.089$ mkm keeping high accuracy of a ring gear (gear profile error $Fa=1.6$ mkm) without gear honing thereby increasing productivity. The quality researches of gear surface layer give grounds for the application of the method for aircraft cog wheels.

Key words: gear grinding, run-in method, worm disk, degree, accuracy, surface layer.

Введение

Задача совершенствования технологических операций, раскрытие потенциальных возможностей оборудования применительно к комбинированным способам воздействия решена для цилиндрического зубчатого колеса планетарной передачи главного редуктора, передающего мощность от пары газотурбинных двигателей на несущий винт вертолета. Конструкторской документацией определены требования, предъявляемые к зубчатому венцу с числом зубьев $z = 29$, модулем $m = 6$, углом профиля $\alpha = 28^\circ$ и шириной $b = 48$ мм [1]. Твердость поверхностей зубьев обес-

печивается цементацией на глубину 1,5 – 1,8 мм и последующей объемной закалкой до поверхностной твердости $HRC \geq 61$. Контроль поверхности на шлифовочные прижоги травлением после операции зубошлифования. Зубчатый венец изготавливают по 5-5-4 степени точности согласно ГОСТ 1643-81. Шероховатость профилей зубьев не должна превышать $Ra \leq 0,16$ мкм. Оптимальный контакт зацепления обеспечивается за счет применения модификации профиля по головке зуба, глубина которого составляет $fKo=36...26$ мкм, длина его развернутости 3,3...4,0 мм.

Для обеспечения вышеуказанных требований серийной технологией, предусмотрено выполнение двух операций. Зубошлифование направлено на нивелирование коробления после химико-термической обработки и обеспечение требуемой геометрической точности зубчатого венца, толщин зубьев и погрешности профиля зубьев. Несмотря на достигаемую точность (рис. 1а), сдерживающим фактором применения зубошлифования в качестве окончательной операции является получаемая шероховатость профиля зубьев $Ra > 0,2$ мкм. Для обеспечения требуемой шероховатости $Ra \leq 0,16$ мкм выполняют зубохонингование алмазным хонем. При этом значительно ухудшается геометрическая точность эвольвенты – погрешность профиля зуба Fa и размер фланка fKo (рис. 1б). Анализ результатов измерений показал, что после операции зубохонингования погрешность профиля зуба ухудшается и в некоторых случаях может превышать допуск. Ухудшение погрешности профиля зубьев на операции зубохонингования обусловлено несовершенством профилей зубьев алмазного хона, которые переносятся на профиль зубьев, что ухудшает класс точности зубчатого венца по нормам плавности зацепления, достигнутого на операции зубошлифования. Правка алмазного хона позволяет несколько улучшить показатели погрешности профиля зубьев до $Fa = 5,8$ мкм. Однако, правка достаточно трудоемкий процесс шлифования профиля алмазного хона, который выполняется за несколько операций на основном технологическом оборудовании для обработки зубчатых колес.

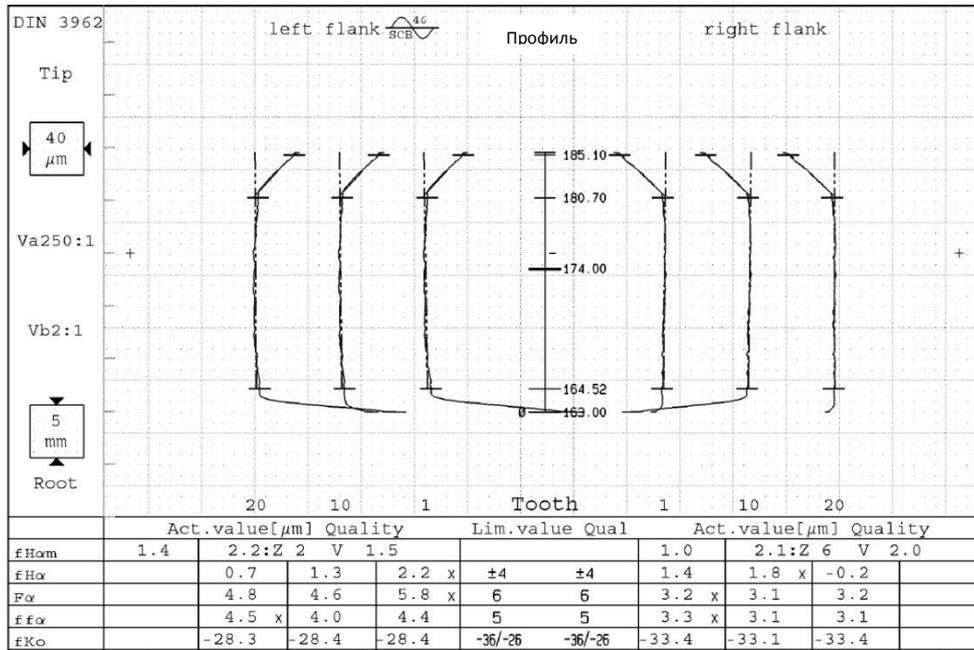
Таким образом, при изготовлении зубчатого венца цилиндрического колеса возникает два противоречия. Первое противоречие заключается в том, что процесс обратного зубошлифования позволяет достигать высокую степень точности зубчатых колес, не обеспечивая при этом требуемую шероховатость поверхности зуба. Второе противоречие заключается в том, что процесс зубохонингования позволяет обеспечить требуемую шероховатость поверхности профиля зуба, но при этом ухудшает степень точности зубчатого вен-

ца – увеличивается погрешность профиля зуба.

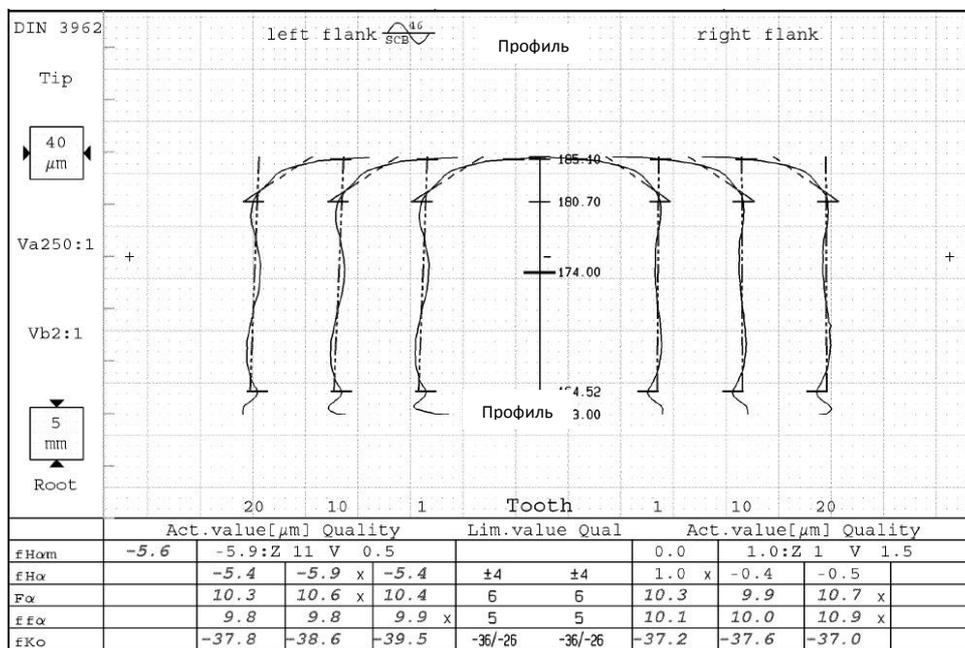
Исследования российских и зарубежных ученых отражают значимость финишной обработки [2-7]. Авторы работы [3, 4] после экспериментальных исследований доказали, что долговечность зубчатой передачи связана с толщиной масляной пленки, которая, в свою очередь, зависит от шероховатости. Уменьшение шероховатости является одним из способов увеличения удельной толщины масляной пленки. В материалах исследований [3] приводятся сведения об испытаниях на износостойкость и выносливость зубчатых колес с шероховатостью профилей $Ra=0,44$ мкм после операции зубошлифования и зубчатых колес с шероховатостью $Ra=0,07$ мкм после виброабразивной обработки. Шлифованные зубчатые колеса к концу испытаний на износостойкость имели 79% повреждения поверхности микропиттингом, отклонения формы профиля составило 28 мкм. После испытания на выносливость потеря веса этих зубчатых колес составила 129 мг. Поверхности зубьев дополнительно обработанные виброфинишированием не имели повреждений микропиттингом, отклонения формы профиля к концу испытаний на износостойкость составило 0,5 мкм. Потеря веса составила 13 мг после испытания на выносливость. В статье [4] ученые проводили исследования на износостойкость зубчатой передачи двухступенчатой коробки передач аэрокосмической отрасли. В испытании участвовали две группы зубчатых колес. Первая группа зубчатых колес обработана по технологическому процессу, включающего операции зубошлифования, дробеструйной обработки, зубохонингования. Шероховатость поверхности профиля зубьев после этой технологической цепочки составила $Ra = 0,335$ мкм. Вторая группа зубчатых колес вместо операции зубохонингования была подвергнута виброабразивной обработке, после которой шероховатость составила $Ra = 0,087$ мкм. Зубчатые колеса после виброабразивной обработки имели меньшие поверхностные повреждения после 2000 часов испытаний, чем хонингованные после 150 часов. В исследовании

[5] приводятся данные полирования зубчатых колес в среде структурно-вязкой жидкости, содержащую абразив, мультигидроксильный полимер и диспергатор. Экспериментальные результаты показали, что шероховатость может достигать $Ra=12$ нм после 25 минут полировки. Авторы [5] доказали, что этот метод улучшает качество

поверхности и механические свойства материала, снижает концентрацию напряжений у основания зуба, увеличивает сопротивление усталости. Таким образом, исследования [3-5] позволяют заключить, что снижение шероховатости увеличивает нагрузочную способность поверхностей зубьев при любой финишной обработке.



а)



б)

Рис. 1. Протокол измерения параметров погрешности профилей зубьев на зубоизмерительной машине P-40 Klingelberg после операций: а – зубшлифования; б - зубохонингования

В работе [6] приводятся данные исследовательских проектов, которые подтверждают, что зубчатые колеса после виброабразивной обработки имеют четырехкратный срок службы по сравнению с только шлифованными. А виброабразивная обработка в сочетании с дробеструйной улучшает несущую способность боковых поверхностей зубчатых колес. Кроме того, в работе [6] приведены данные сни-

Основная часть и результаты

Каждый вид финишной обработки зубчатых колес имеет свои преимущества и недостатки. В данной статье для решения выявленного противоречия, основываясь на серийности авиационного производства и имеющихся мощностях, проведены испытания комбинированного червячного круга производства *Reishauer AG 1-275×125×160A80G8V 0167/EK800*. Комбинированный червячный круг позволяет объединить две операции зубошлифования и зубополирования, за счет присоединения полировального круга к классическому червячному шлифовальному кругу. Подобные технические решения использования переменной абразивной способности в осевом направлении для повышения производительности, за счет объединения стадий черновой, чистовой и отделочной обработки на бесцентровых шлифовальных станках приводятся в работах российских ученых [8]. В работах [6, 7] автором представлены общие сведения об испытаниях комбинированного червячного круга, но не раскрыты стратегия обработки, режимы резания, характеристики абразивного круга, получаемые параметры точности зубчатого венца и шероховатости поверхностей профиля зубьев, параметры качества поверхностного слоя. Таким образом данные работ [6, 7] носят демонстрационный характер технологических возможностей комбинированного червячного круга производства *Reishauer AG*.

Появление у червячного шлифовального круга нового свойства – полирования раскрывает для существующего зубошлифовального оборудования новые

возможности при обеспечении требований точности и шероховатости поверхности зубьев. Общеизвестно, что внедрение новых технологий обработки связано с затратами [9], при этом стоимость инструмента от общих затрат составляет лишь порядка 1 %, примерно 3 % составляют затраты на СОТС, 10 % - затраты на обеспечение качества, 19 % - заработная плата рабочих, 32% - стоимость обслуживания оборудования и 35 % - стоимость оборудования. Поэтому внедрение нового инструмента считается обоснованным вложением, при обеспечении качества и повышении производительности.

Работа комбинированного червячного круга (рис.2а) заключается в снятии основного припуска шлифовальной частью круга, при обеспечении заданной точности [1], и срезании вершин микронеровностей полировальной частью (рис.2б), при этом впадины шероховатости остаются нетронутыми для удержания масляной пленки в эксплуатации зубчатых колес. Шлифовальная часть состоит из мелкокристаллических соединений зерен Al_2O_3 , смешанных с белым оксидом алюминия, размер частиц при самозатачивании не более 30 мкм (рис. 2в). Каждое отдельное зерно размером 150-200 мкм состоит из агломерата острых частиц, которые легко самозатачиваются при высокой скорости удаления материала, поддерживают устойчивый процесс. Полировальная часть круга состоит из электрокорунда белого *EK800* с размерами зерна 10-20 мкм на вспененной полиуретановой связке, обеспечивающей полирующий эффект.

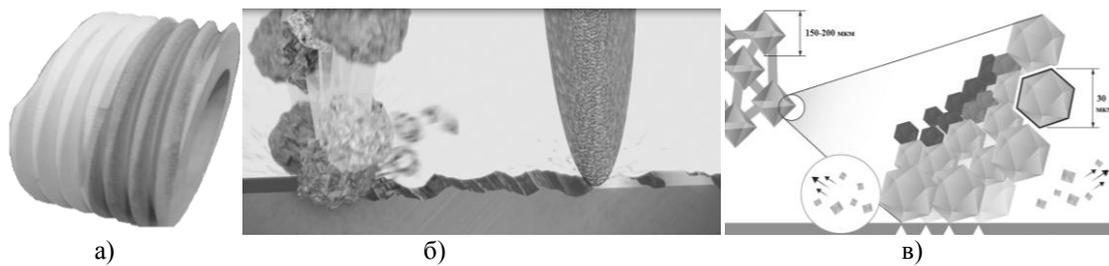


Рис. 2. Моделирование резания комбинированным кругом:
 а - комбинированный червячный круг; б - образование шероховатости
 после шлифовальной и полировальной частей; в - схема самозатачивания [6]

Методика проведения экспериментальных исследований, стратегия и режимы резания процесса зубошлифования комбинированным шлифовально-полировальным кругом на станке *Reishauer RZ basic* отражены в работе [10]. На операцию зубошлифования цилиндрическое зубчатое колесо поступает после

химико-термических операций с шероховатостью профиля зубьев $Ra = 3,05$ мкм (рис. 3а). Шероховатость после зубошлифования первой частью комбинированного круга составляет $Ra = 0,242$ мкм (рис.3б). После обработки полировальной частью круга величина микронеровности профиля зуба составляет $Ra = 0,089$ мкм (рис. 3в).

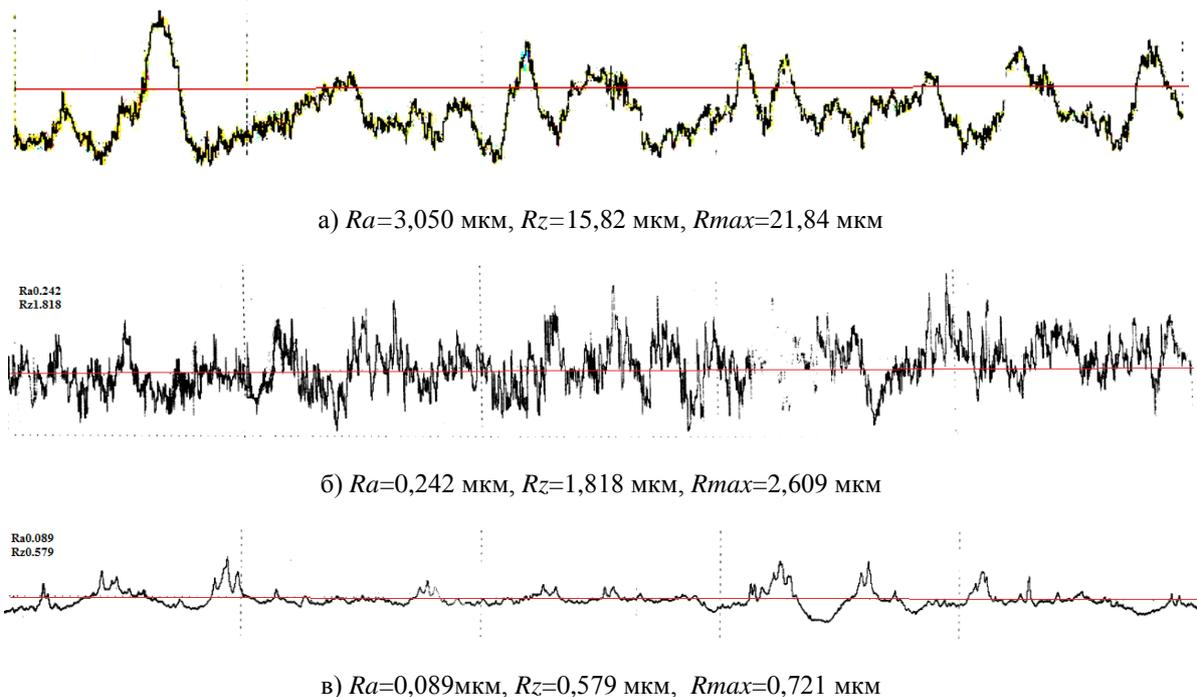


Рис. 3. Профилограммы шероховатости поверхностей после: а - химико-термической обработки;
 б - зубошлифования; в - зубополирования

Достигнутая погрешность профиля зуба после обработки комбинированным кругом составляет $F_a = 1,6$ мкм при допуске $F_a = 6$ мкм. Согласно *DIN 3962-1-1978*

первой степени точности соответствует допуск погрешности профиля зуба равный $F_a = 2,5$ мкм.

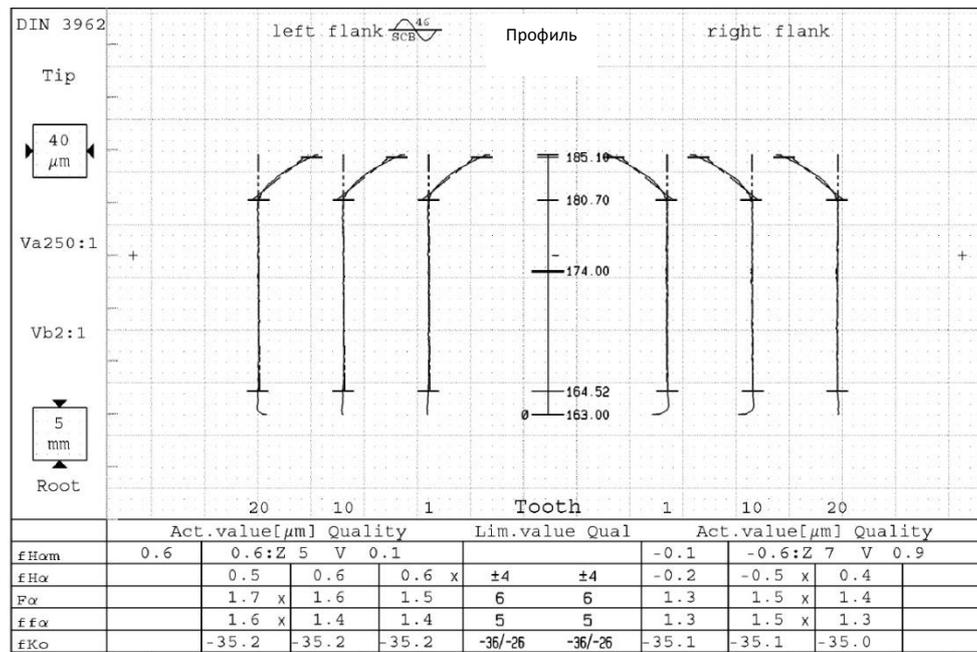


Рис. 4. Протокол измерения параметров погрешности профилей зубьев после зубошлифования комбинированным кругом

Заключение

На основании полученных результатов исследований, можно сделать вывод о том, что применение комбинированного шлифовально-полировального червячного круга на станке *RZ basic* обеспечивает высокую степень точности $F_a = 1,6$ мкм и шероховатости поверхности $Ra=0,089$ мкм. А значит снимаются противоречия, выявленные при зубохонинговании. Анализ исследования остаточных напряжений, микроструктуры и микротвердости, в ранее проведенных исследованиях [11], дает ос-

нования для использования комбинированного червячного круга на авиационных зубчатых колесах. Таким образом, комбинированный червячный шлифовально-полировальный круг повышает технологические возможности метода непрерывного обкатного зубошлифования без значительных вложений - обработка производится на том же зубошлифовальном станке, при этом повышается производительность и исключаются затраты, связанные с дополнительной операцией зубохонингования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ворожцова, Н. А.** Повышение производительности обработки сателлитов путем совмещения операций зубошлифования и зубополирования / Н. А. Ворожцова, А. С. Горбунов, В. Ф. Макаров // Инновации в машиностроении: сб. тр. X Междунар. науч.-практич. конф./ Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева; под ред. В. Ю. Блюменштейна. - Кемерово, 2019. - С.23-29.
2. **Тамаркин, М. А.** Анализ современного состояния финишных методов обработки в среде свободных абразивов деталей, имеющих малые пазы и отверстия / М. А. Тамаркин, Е. В. Смоленцев, Е. Н. Колганова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2019. - № 1. - С.122-129.
3. **Winkelmann, L.** The effect of superfinishing on gear micropitting / L. Winkelmann, O. El-Saeed, M. Bell. - Текст : электронный // Gear technology : электронный журнал. - 2009. URL: http://geartechnology.com/articles/0309/The_Effect_of_Superfinishing_on_Gear_Micropitting (дата обращения: 01.02.2021).
4. **Blake, G.** Case study involving surface durability and improved surface finish / G. Blake, J. Reynolds. - Текст : электронный // Gear technology : электронный журнал. - 2012. URL: <https://www.geartechnology.com/issues/0812x/blake.pdf> (дата обращения: 01.02.2021).
5. **Duc-Nam Nguyen.** Machining parameter optimization in shear thickening polishing of gear surfaces / Duc-Nam Nguyen, Thanh-Phong Dao, Chander Prakash [и др.]. - Текст : электронный // Jmr&T. Elsevier: электронный журнал. - 2020. URL: http://researchgate.net/publication/339814754_Machining_Parameter_Optimization_in_Shear_Thickening_Polishing_of_Gear_Surfaces (дата обращения: 01.02.2021).

6. **Walter, G.** Polish grinding of gears for higher transmission efficiency / G. Walter. - Текст : электронный // *Gear solutions* : электронный журнал. - 2016. URL: <http://gearsolutions.com/features/polish-grinding-of-gears-for-higher-transmission-efficiency> (дата обращения: 01.02.2021).
 7. **Walter, G.** Шлифование и полирование зубчатых колес / G. Walter - Текст : электронный // Ритм машиностроения : электронный журнал. - 2016. URL: <https://ritm-magazine.ru/ru/public/shlifovanie-i-polirovanie-zubchatyh-koles> (дата обращения: 10.05.2020).
 8. **Патент № 2240913 Российская Федерация, МПК В24В 5/18 (2006.01), В24В 1/00 (2006.01).** Способ бесцентрового шлифования : № / 2303108147/02 заяв. 24.03.2003 : опубл. 27.11.2004 / Свищев В.И., Флегентов В.К., Макаров В.Ф., Подборнов И В. заявитель ОАО "ПАО Инкар". - 4 с.
 9. **Ермолаев, В. К.** Точность, классификация и стоимость зубошлифования / В. К. Ермолаев - Текст : электронный // Ритм машиностроения : электронный журнал. - 2018. URL: <https://ritm-magazine.ru/en/node/2515> (дата обращения: 19.05.2020).
 10. **Ворожцова, Н. А.** Обработка зубчатых колес сборными шлифовально-полировальными кругами / Н. А. Ворожцова, В. Ф. Макаров, М. В. Песин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. - 2020 - №1. С.79-87.
 11. **Ворожцова, Н. А.** Обеспечение качества зубчатого венца цилиндрических колес при обработке комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом / Н. А. Ворожцова, А. С. Горбунов, В. Ф. Макаров // Научно-технические технологии в машиностроении. - 2019. - № 2. С.22-28.
1. **Vorozhtsova, N. A.** Productivity increase at satellite processing through gear grinding and gear polishing mix / N. A. Vorozhtsova, A. S. Gorbunov, V. F. Makarov // *Innovations in Mechanical Engineering: Proceedings of the X-th Inter. Scientif-Tech. Conf.* / Gorbachyov State Technical University of Kuzbass; under the editorship of V.Yu. Blumenstein. - Kemerovo, 2019. - pp. 23-29.
 2. **Tamarkin, M. A.** Analysis of finishing current state in free abrasive environment of parts with small grooves and holes / M. A. Tamarkin, E. V. Smolentsev, E. N. Kolganova // *Bulletin of Voronezh State Technical University* - 2019. - No.1. - pp. 122-129.
 3. **Winkelmann, L.** The effect of superfinishing on gear micropitting / L. Winkelmann, O. El-Saeed, M. Bell. - Text: electronic // *Gear Technology*: electronic journal - 2009. URL: http://geartechnology.com/articles/0309/The_Effect_of_Superfinishing_on_Gear_Micropitting (address date: 01.02.2021).
 4. **Blake, G.** Case study involving surface durability and improved surface finish / G. Blake, J. Reynolds. - Text: electronic // *Gear Technology*: electronic journal - 2012. URL: <https://www.geartechnology.com/issues/0812x/blake.pdf> (address date: 01.02.2021).
 5. **Duc-Nam Nguyen.** Machining parameter optimization in shear thickening polishing of gear surfaces / Duc-Nam Nguyen, Thanh-Phong Dao, Chander Prakash [et al.]. - Text: electronic // *Jmr&T. Elsevier*: electronic journal. - 2020. URL: http://researchgate.net/publication/339814754_Machining_Parameter_Optimization_in_Shear_Thickening_Polishing_of_Gear_Surfaces (address date: 01.02.2021).
 6. **Walter, G.** Polish grinding of gears for higher transmission efficiency / G. Walter. - Text: electronic // *Gear Solutions*: electronic journal. - 2016. URL: <http://gear-solutions.com/features/polish-grinding-of-gears-for-higher-transmission-efficiency> (address date: 01.02.2021).
 7. **Walter, G.** Gear grinding and polishing / G. Walter - Text: electronic // *Rhythm of Mechanical Engineering*: electronic journal. - 2016. URL: <https://ritm-magazine.ru/ru/public/shlifovanie-i-polirovanie-zubchatyh-koles> (address date: 10.05.2020).
 8. **Patent No. 2240913 the Russian Federation, IPC В24В 5/18 (2006.01), В24В 1/00 (2006.01).** Centerless Grinding Method: No. / 2303108147/02 claimed: 24.03.2003; published: 27.11.2004 / Svitshev V.I., Flegentov V.K., Makarov V.F., Podbornov I.V., applicant: J-S Co. "PAO Inkar". - pp. 4.
 9. **Yermolaev, V. K.** Accuracy, classification and value of gear grinding / V. K. Yermolaev - Text: electronic // *Rhythm of Mechanical Engineering*: electronic journal. - 2018. URL: <https://ritm-magazine.ru/en/node/2515> (address date: 19.05.2020).
 10. **Vorozhtsova N. A.** Gear processing with complex grinding-polish disks / N. A. Vorozhtsova, V. F. Makarov, M. V. Pesin // *Bulletin of PNIPU. Mechanical Engineering, Material Science*. - 2020 - No.1. pp. 79-87.
 11. **Vorozhtsova, N. A.** Gear ring quality support for cylindrical wheels at processing with combined finish-grinding worm disk / N. A. Vorozhtsova, A. S. Gorbunov, V. F. Makarov // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. - 2019. - No.2. pp. 22-28.

Ссылка для цитирования:

Ворожцова, Н.А. Повышение технологических возможностей метода непрерывного обкатного зубошлифования / Н.А. Ворожцова, В.Ф. Макаров, А.С. Горбунов, Е.Н. Колганова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 5. – С. 15 - 22. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-5-15-22.

Статья поступила в редакцию 09.02.21.
Рецензент: д.т.н., профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета, Соловьёв Д.Л., член редсовета журнала «Вестник БГТУ». Статья принята к публикации 26.04.21.

Сведения об авторах:

Ворожцова Наталья Андреевна, аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального политехнического исследовательского университета, тел.: 8-912-980-59-22, e-mail: vorozhtsova-natalya@yandex.ru.

Макаров Владимир Федорович, д.т.н., профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального политехнического исследовательского университета, тел.: 8-982-242-23-95, e-mail: makarovv@pstu.ru.

Vorozhtsova Nataliya Andreevna, Post graduate student of the Dep. “Innovation Technologies of Mechanical Engineering”, Perm National Polytechnic Research University, phone: 8-912-980-59-22, e-mail: vorozhtsova-natalya@yandex.ru.

Makarov Vladimir Fyodorovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Innovation Technologies of Mechanical Engineering”, Perm National Polytechnic Research University, phone: 8-982-242-23-95, e-mail: makarovv@pstu.ru.

Горбунов Александр Сергеевич, к.т.н., вед. специалист АО «Редуктор-ПМ», г. Пермь, тел. 8-912-883-01-06, e-mail: gorbunov-as@reductor-pm.com.

Колганова Елена Николаевна, ст. преподаватель кафедры «Технологии машиностроения» Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, тел.: 8-909-430-95-99, e-mail: elenkolg@list.ru.

Gorbunov Alexander Sergeevich, Can. Sc. Tech., Leading specialist of J-S Co “Reducer-PM”, Perm, phone: 8-912-883-01-06, e-mail: gorbunov-as@reductor-pm.com.

Kolganova Helen Nikolaevna, Senior lecturer of the Dep. “Engineering Technique”, Don State Technical University, Rostov-upon-Don, phone: 8-909-430-95-99, e-mail: elenkolg@list.ru.