

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17>

Повышение эффективности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес

С.Г. Емельянов¹, С.А. Чевычелов¹ ✉, Р.Н. Хомутов¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: mtio@kurskstu.ru

Резюме

Цель исследования. Повышение производительности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением.

Методы. Метод дискретного копирования, теория проектирования режущих инструментов, методы математического и компьютерного программирования.

Результаты. Анализ источников показал, что повышение производительности чистового фрезерования крупномодульных зубчатых колес за счет использования возможностей современного оборудования с программным управлением является актуальной задачей. Рассмотрены вопросы повышения производительности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением гиперболюидными фрезами, оснащенными сменными многогранными пластинами (СМП) с прямолинейной режущей кромкой, расположенной под углом λ к оси вращения инструмента. Предложен метод управления точностью формообразования поверхностей, образующая которых представляет собой участок (совокупность участков) выпуклых кривых за счет установки режущего инструмента относительно профиля эвольвенты (четвертая ось станка) и относительно направления подачи (пятая ось станка). Авторами разработан метод дискретного копирования набором гиперболюидных фрез боковой поверхности зуба крупномодульных зубчатых колес, который позволяет обеспечить 6 степень точности по параметру погрешность профиля зуба.

Заключение. Приведенные результаты исследования позволяют повысить производительность чистовой обработки зубьев крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением за счет сокращения количества проходов, необходимых для обработки одной боковой поверхности зуба, в сравнении с методами непрерывного обката и высокоскоростного концевоего фрезерования. Предложенные конструкции режущего инструмента обладают достаточной универсальностью для обработки широкой номенклатуры крупномодульных зубчатых колес, что актуально в ремонтном и мелкосерийном производстве.

Ключевые слова: крупномодульные зубчатые колеса; гиперболюидные фрезы; точность обработки; методы формообразования.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Хомутов Р.Н., 2019

Для цитирования: Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Хомутов Р.Н. Повышение эффективности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(3): 8-17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17>.

Статья поступила в редакцию 06.05.2019

Статья подписана в печать 30.05.2019

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17>

Improving the Finishing Efficiency of Coarse-Grained Gear Wheels

Sergei G. Emelianov¹, Sergey A. Chevychelov¹✉, Roman N. Khomutov¹

¹ Southwest State University, 94, 50 Let Oktyabrya str., Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: mtio@kurskstu.ru

Abstract

Purpose of research. Improving the finishing performance of coarse-grained gear wheels on software-controlled machines.

Methods. The method of discrete copying, the theory of designing cutting tools, methods of mathematical and computer programming.

Results. It is an urgent task to improve the performance of fine milling of coarse-grained gear wheels by using the capabilities of modern software-controlled equipment. Here we consider the issues of improving the finishing performance of coarse-grained gear wheels on software-controlled machines of hyperboloid mills equipped with interchangeable polyhedral plates (IPP) with a straight cutting edge located at an angle λ to the instrument axis of rotation. It is proposed a method for controlling the accuracy of shaping surfaces, generatrix of which forms a section (set of sections) of convex curves by installing a cutting tool relative to the involute profile (fourth axis of the machine) and relative to the feed direction (fifth axis of the machine). The authors have developed a discrete copying method with a set of hyperboloid cutters of tooth surface of coarse-grained gear wheels. It allows us to ensure the 6th degree of accuracy in the parameter of the tooth profile error.

Conclusion. The results of the study improve the finishing performance treatment of the teeth of coarse-grained gear wheels on software-controlled machines by reducing the number of passes required for machining one side of the tooth in comparison with the methods of continuous rolling and high-speed end milling. The proposed designs of cutting tools have sufficient versatility to handle a wide range of coarse-grained gear wheels, which is important in the repair and small-scale production.

Keywords: coarse-grained gear wheels; hyperboloid mills; processing accuracy; molding methods.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Emelianov S. G., Chevychelov S. A., Khomutov R.N. Improving the Finishing Efficiency of Coarse-Grained Gear Wheels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(3): 8-17 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-3-8-17>.

Received 06.05.2019

Accepted 30.05.2019

Введение

Формообразование профильных поверхностей, которые имеют образующую в виде выпуклой кривой, обычно осуществляется с помощью использования фасонного инструмента или дискретной обработкой стандартным инструментом. Решение такой задачи осложняется, если обрабатываемая поверхность не является открытой. В случае формообразования профиля боковой поверхности зуба крупномодульного зубчатого колеса альтернативой традиционным методам могут являться способы, основанные на использовании возможностей современного оборудования с программным управлением. Такие способы позволяют применять высокоэффективные материалы режущей части инструментов с СМП, при этом нет необходимости использования специализированного оборудования для зубообработки.

Цель данной работы: повышение производительности чистовой обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением.

Объект исследования: метод формообразования боковой поверхности зуба крупномодульных зубчатых колес сборными гиперболоидными фрезами.

Предмет исследования: точность обработки боковой поверхности зуба прямозубого зубчатого колеса сборными гиперболоидными фрезами.

На рисунке 1 представлена классификация способов формообразования боковой поверхности зубьев прямозубых цилиндрических колес на не специализированном оборудовании с программным управлением.

Метод непрерывного обката позволяет дисковой фрезой, оснащенной твердосплавными пластинками, производить чистовую обработку боковой поверхности зубьев за несколько десятков проходов в зависимости от степени точности колеса (рис. 2) [1].

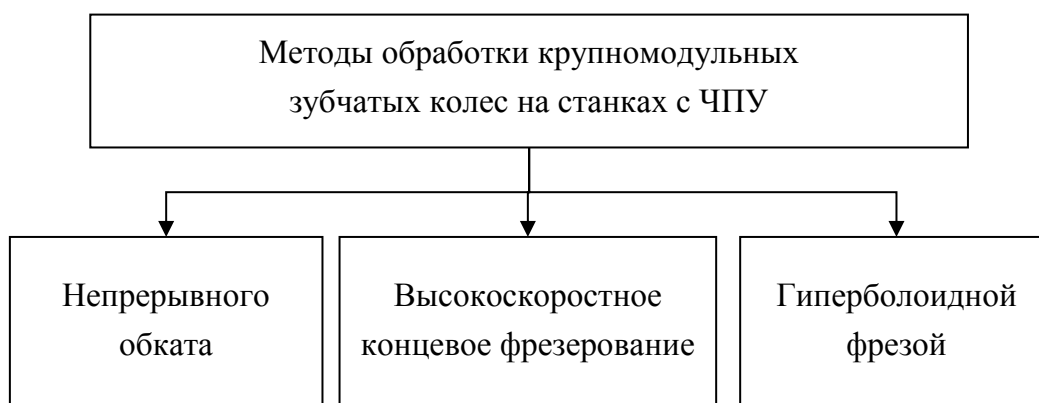


Рис. 1. Методы обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с ЧПУ

Fig. 1. Methods of processing of large-modular gear wheels on the CNC machines

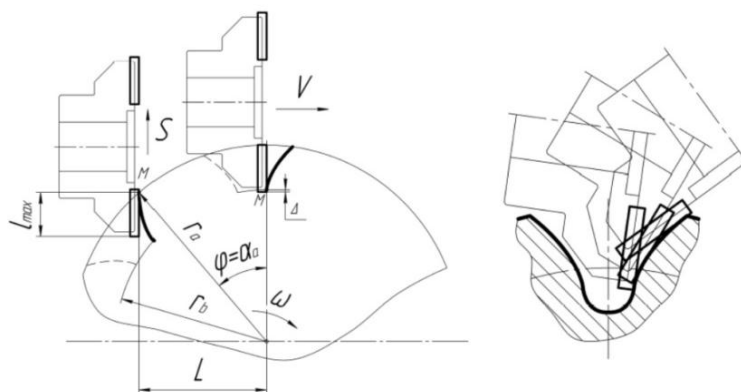


Рис. 2. Схема обработки зубчатого колеса методом непрерывного обката [1]

Fig. 2. The diagram of processing of large-modular gear by the method of continuous rolling [1]

При обработке сферической концевой фрезой на токарном обрабатывающем центре методом концевой фрезе-

рования можно применять либо горизонтальную, либо вертикальную стратегии обработки (рис. 3) [2].

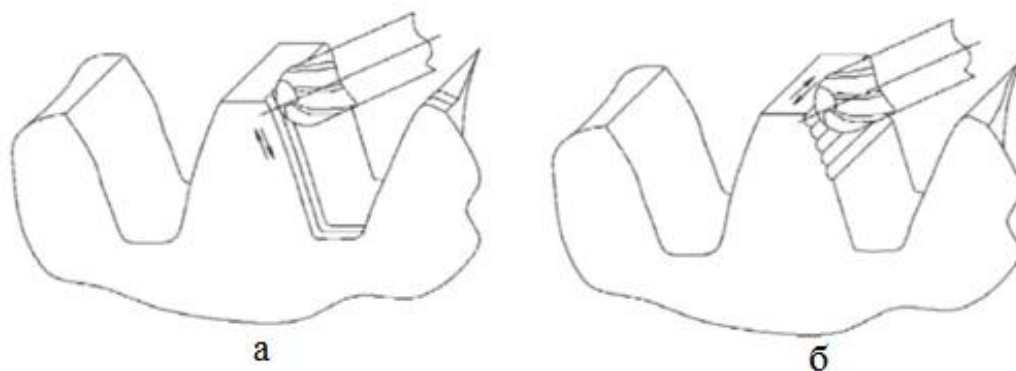


Рис. 3. Схема обработки методом высокоскоростного концевой фрезерования: а – вертикальная стратегия обработки; б – горизонтальная стратегия обработки

Fig. 3. Processing diagram by high speed end milling:
a – vertical processing strategy; b – horizontal processing strategy

Материалы и методы решения задачи

Повышения производительности данного процесса можно достичь использованием гиперболоидных фрез, оснащенных СМП с прямолинейной режущей кромкой, расположенной под углом λ к оси вращения инструмента [3-8]. В случае крупносерийного производства целесообразно проектировать

специальные гиперболоидные фрезы, которые позволяют производить формообразование боковой поверхности зуба за один проход, т.е. обеспечить максимальную производительность процесса [9-14]. В то же время, если зуб гиперболоидной фрезы будет состоять из одной СМП с заданной длиной режущей кромки l , то таким инструментом можно будет получать разные участки про-

филя обрабатываемой поверхности за счет установки фрезы (рис. 4) относительно профиля эвольвенты ψ° (4 ось станка) и относительно направления подачи ζ° (5 ось станка) [15-17].

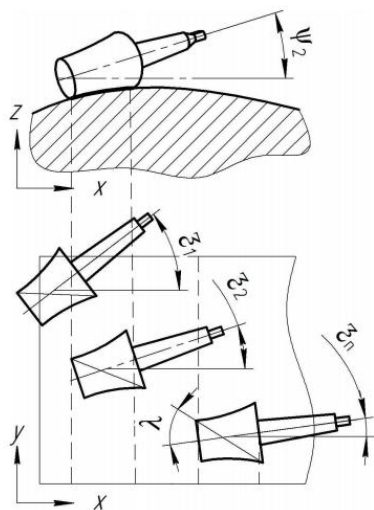


Рис. 4. Углы установки инструмента и производящей линии

Fig. 4. The angles of the tool and the generating line

Количество зубьев такой фрезы определяется возможностью размещения их на заданном диаметре фрезы, который, в свою очередь, определяется размерами впадины зубчатого колеса [13,14,16].

Значения параметров, влияющих на процесс формообразования боковой поверхности зуба прямозубого колеса ($m=12, z=12$)

Values of parameters affecting the process of forming the lateral surface of the gear of the spur wheel ($m=12, z=12$)

	фреза 1		фреза 2	
проход	1	2	3	4
λ°	25		25	
l , режущей кромки СМП, мм	9,30		4,00	
R , радиус фрезы, мм	10,00		7,00	
ψ°	38,79	27,42	19,98	11,12
ζ°	18,70	34,61	36,30	50,63

При использовании стандартной СМП с длинной режущей кромки 9 мм. для обработки одной боковой поверхности зуба понадобится всего несколько проходов. Формирование участков эвольвенты с различной кривизной обеспечивается изменением угла установки фрезы относительно направления подачи ζ [18-19].

Результаты и их обсуждение

Таким образом, для прямозубого колеса с параметрами $m=12, z=12$ понадобится комплект из 2 гиперболоидных фрез, каждая из которых совершит по 2 прохода. В этом случае погрешность формирования бокового профиля фрезы не превысит 0,008 мм (рис. 5) [16, 20]. Это позволяет обеспечить 6 степень точности по параметру – погрешность профиля зуба ($f_{fr} \leq 0,016$ мм).

В таблице приведены параметры этого комплекта фрез и технологические параметры установки относительно профиля эвольвенты ψ° и относительно направления подачи ζ° .

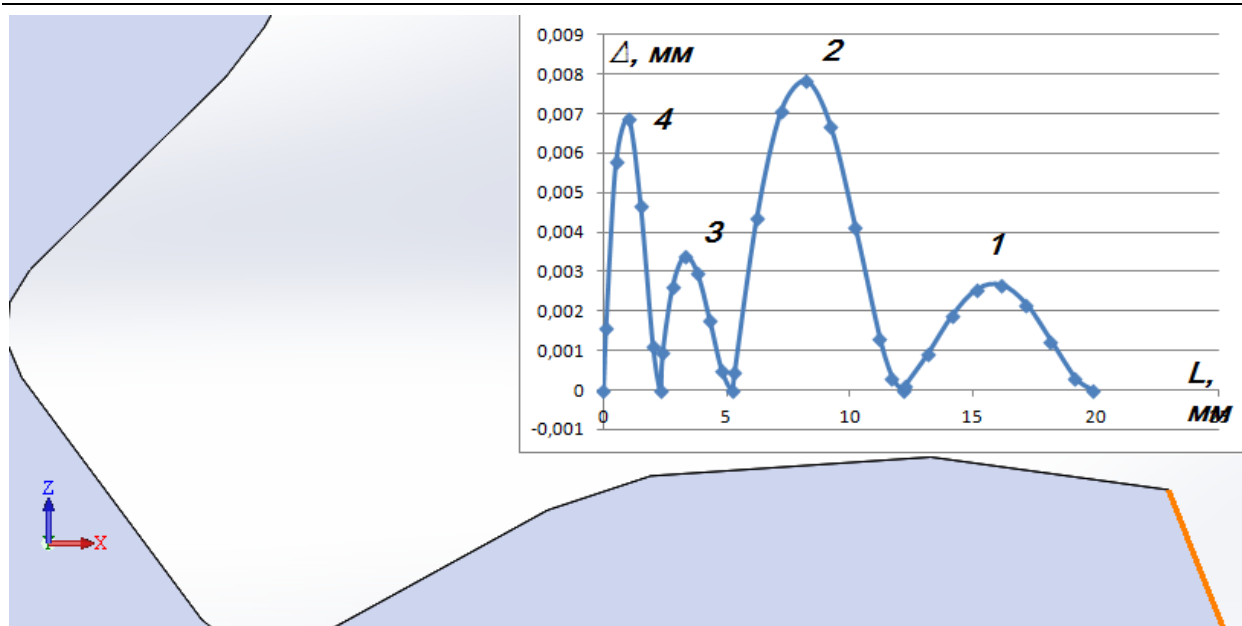


Рис.5. Погрешность профиля зуба, формируемого комплектом гиперboloидных фрез

Fig. 5. The inaccuracy of the gear wheel profile, which is formed by a set of hyperboloid cutters

Выводы

Приведенные результаты исследования позволят повысить производительность чистовой обработки зубьев крупномодульных зубчатых колес на станках с программным управлением за счет сокращения количества проходов, необходимых для обработки одной бо-

ковой поверхности зуба, в сравнении с методами непрерывного обката и высокоскоростного концевой фрезерования.

Предложенные конструкции режущего инструмента обладают достаточной универсальностью для обработки широкой номенклатуры крупномодульных зубчатых колес, что актуально в ремонтном и мелкосерийном производстве.

Список литературы

1. Отт О.С. Сборные дисковые зуборезные фрезы и процесс механической обработки крупномодульных зубчатых колес на станках с ЧПУ // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2011. № 1 (11). С. 174-177.
2. Басова Е.В., Добротворский С.С. Кинематика формообразования эвольвентной и трохойдальной поверхностей при высокоскоростном концевом фрезеровании // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2011. № 2. С.132-137.
3. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Чистяков П.П. Разработка САПР гиперboloидных фрез для обработки эвольвентных профилей // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 4 (205). С. 42-46.

4. Emelyanov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P., Chevychelov I.N. Optimization of parameters for hyperbolic railhead profile // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015*. Tomsk, 2015. С. 1-4.
5. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. The dimensional analysis at modular tool design // *Modern materials and technologies*. 2009. № 1. С. 219-224.
6. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Чистяков П.П. Схемы формообразования гиперболоидными инструментами // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 8-1. С. 133-140.
7. Чевычелов С.А., Гладышкин А.О. Определение параметров производящей поверхности гиперболоидных фрез // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2012. № 2-3. С. 113-115.
8. Чевычелов С.А., Чевычелов И.Н. Особенности проектирования гиперболоидных инструментов // *Современные материалы, техника и технологии*. 2015. № 3 (3). С. 260-264.
9. Чевычелов С.А., Чистяков П.П., Олексюк В.С. Повышение производительности обработки зубчатых колес // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2015. № 2. С. 148-151.
10. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. Повышение качества обработанной поверхности путем выбора рациональной схемы формообразования // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2004. № 3. С. 86-88.
11. Чевычелов С.А. Определение параметров гиперболического профиля головки рельсов // *Известия Курского государственного технического университета*. 2010. № 4 (33). С. 72-75.
12. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. Методика проектирования гиперболических фрез для репрофилирования старогодных рельсов // *Известия Тульского государственного университета. Серия: Технологическая системотехника*. 2005. № 4. С. 32-35.
13. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Бобрышев Д.А. Влияние начального радиуса сборных гиперболических фрез на параметры точности корпуса инструмента // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2011. № 2 (51). С. 27-29.
14. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. Анализ влияния начального радиуса гиперболической фрезы на ее выходные параметры // *Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Машиностроение. Приборостроение*. 2006. № 2. С. 36-41.
15. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Бобрышев Д.А. Влияние угла поворота сборных гиперболических фрез относительно оси симметрии рельса на параметры точности корпуса инструмента // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. № 3-4 (287). С. 9.
16. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. Анализ влияния начальных данных на выходные параметры процесса проектирования гиперболических фрез // *Известия Тульского государственного университета. Серия: Технология машиностроения*. 2006. С. 138-140.
17. Емельянов С.Г., Чевычелов С.А., Бобрышев Д.А. Влияние угла поворота сборных гиперболических фрез относительно оси симметрии рельса на параметры точно-

сти корпуса инструмента // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 4-3 (288). С. 9-13.

18. Emelyanov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. A method of processing of involute profiles of large-module gear wheels // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 698. P. 546-551.

19. Чевычелов С.А. Оптимизация параметров гиперболических фрез // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2-1. С. 98-100.

20. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Errors of profile formed by hyperbolic mills. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 31-34.

Reference

1. Ott O.S. Sbornye diskovye zuboreznye frezy i protsess mekhanicheskoi obrabotki krupnomodul'nykh zubchatykh koles na stankakh s ChPU [Teams disc gear cutter and the machining process of coarse-grained gear wheels on CNC machines]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI = Proceedings of Moscow state technical University MAMI*, 2011, no. 1 (11), pp. 174-177 (In Russ.).

2. Basova E.V., Dobrotvorskii S.S. Kinematika formoobrazovaniya evol'ventnoi i trokhoidal'noi poverkhnosti pri vysokoskorostnom kontsevom frezerovanii [Kinematics of formation of involute and trochoidal surfaces at high-speed end milling]. *Novi materiali i tekhnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 2011, no. 2, pp.132-137 (In Russ.).

3. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. Razrabotka SAPR giperboloidnykh frez dlya obrabotki evol'ventnykh profilei [The development of CAD hyperboloid of milling cutters for machining of involute profiles]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem = The Directory. Engineering journal with the app*, 2014, no. 4 (205), pp. 42-46 (In Russ.).

4. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P., Chevychelov I.N. Optimization of parameters for hyperbolic railhead profile // *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015*. Tomsk, 2015. С. 1-4.

5. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. The dimensional analysis at modular tool design. *Modern materials and technologies*, 2009, no. 1, pp. 219-224.

6. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. Skhemy formoobrazovaniya giperboloidnymi instrumentami [Schemes of formation of hyperboloid instruments]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Tula state University. Technical science*, 2017, no. 8-1, pp. 133-140 (In Russ.).

7. Chevychelov S.A., Gladishkin A.O. Opredelenie parametrov proizvodnyashchei poverkhnosti giperboloidnykh frez [Determination of the parameters of the producing surface of hyperboloid mills]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya:*

Tekhnika i tekhnologii = *Proceedings of Southwest State University. Series: Engineering and technology*, 2012, no. 2-3, pp. 113-115 (In Russ.).

8. Chevychelov S.A., Chevychelov I.N. Osobennosti proektirovaniya giperboloidnykh instrumentov [Design features of hyperboloid tools]. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* = *Modern materials, engineering and technology*, 2015, no. 3 (3), pp. 260-264.

9. Chevychelov S.A., Chistyakov P.P., Oleksjuk V.S. Povyshenie proizvoditel'nosti obrabotki zubchatykh koles [Increase of productivity of gears processing]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii* = *Actual problems in mechanical engineering*, 2015, no. 2, pp. 148-151 (In Russ.).

10. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Povyshenie kachestva obrabotannoi poverkhnosti putem vybora ratsional'noi skhemy formoobrazovaniya [Improving the quality of the treated surface by choosing a rational scheme of shaping]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* = *Problems of engineering and automation*, 2004, no. 3, pp. 86-88 (In Russ.).

11. Chevychelov S.A. Opredelenie parametrov giperbolicheskogo profilya golovki rel'sov [Determination of the parameters of the hyperbolic profile of the rail head]. *Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of the Kursk state technical University*, 2010, no. 4 (33), pp. 72-75 (In Russ.).

12. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Metodika proektirovaniya giperbolicheskikh frez dlya reprofilirovaniya starogodnykh rel'sov [Methods of designing hyperbolic mills for reprofiling old-fashioned rails]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnologicheskaya sistemotekhnika* = *Proceedings of the Tula State University. Series: Process system engineering*, 2005, no. 4, pp. 32-35 (In Russ.).

13. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. Vliyanie nachal'nogo radiusa sbornykh giperbolicheskikh frez na parametry tochnosti korpusa instrumenta [Influence of the initial radius of precast hyperbolic cutters on the accuracy parameters of the tool body]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Processing (technology, equipment, tools)*, 2011, no. 2 (51), pp. 27-29 (In Russ.).

14. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Analiz vliyaniya nachal'nogo radiusa giperbolicheskoi frezy na ee vykhodnye parametry [Analysis of the influence of the initial radius of the hyperbolic mill on its output parameters]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie. Priborostroenie* = *Izvestiya Orel State Technical University. Series: Mechanical Engineering. Instrument making*, 2006, no. 2, pp. 36-41 (In Russ.).

15. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. Vliyanie ugla povorota sbornykh giperbolicheskikh frez otnositel'no osi simmetrii rel'sa na parametry tochnosti korpusa instrumenta [The influence of the angle of rotation of hyperbolic milling cutters with respect to the axis of symmetry of the rail on the accuracy parameters of the tool body]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* = *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2011, no. 3-4 (287), pp. 9 (In Russ.).

16. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Analiz vliyaniya nachal'nykh dannyykh na vykhodnye parametry protsessa proektirovaniya giperbolicheskikh frez [Analysis of the influence of initial data on the output parameters of the design process of hyperbolic mills]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnologiya mashinostroeniya. News of Tula state University. Series: Mechanical engineering technology*, 2006, pp. 138-140 (In Russ.).
17. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Bobryshev D.A. Vliyanie ugla povorota sbornyykh giperbolicheskikh frez otnositel'no osi simmetrii rel'sa na parametry tochnosti korpusa instrumenta [The influence of the angle of rotation of hyperbolic milling cutters with respect to the axis of symmetry of the rail on the accuracy parameters of the tool body]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2011, no. 4-3 (288), pp. 9-13 (In Russ.).
18. Emelianov S.G., Chevychelov S.A., Chistyakov P.P. A method of processing of involute profiles of large-module gear wheels. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 698, pp. 546-551.
19. Chevychelov S.A. Optimizatsiya parametrov giperboloidnykh frez [Optimization of the parameters of the hyperboloid cutters]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University, Series: Engineering and Technologies*. 2012, no. 2-1, pp. 98-100 (In Russ.).
20. Emelianov S.G., Chevychelov S.A. Errors of profile formed by hyperbolic mills. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 31-34.

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергей Геннадьевич Емельянов, доктор технических наук, профессор, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rector@swsu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>

Sergei G. Emelianov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Rector, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: rector@swsu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3012-0383>

Сергей Александрович Чевычелов, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mtio@kurskstu.ru

Sergey A. Chevychelov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: mtio@kurskstu.ru

Роман Николаевич Хомутов, преподаватель, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: korshun_87@mail.ru

Roman N. Khomutov, Senior Lecturer, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: korshun_87@mail.ru