

Спирин В.А., Макаров В.Ф., Халтурин О.А. Обеспечение эффективности абразивной отделочной обработки винтовых сложнопрофильных валов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 88–94. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.10

Spirin V.A., Makarov V.F., Khalturin O.A. Ensuring the effectiveness of abrasive finishing of screw complex-profile shafts. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 88–94. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.10

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 1, 2020
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.10
УДК 621.9

В.А. Спирин, В.Ф. Макаров, О.А. Халтурин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АБРАЗИВНОЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ
ВИНТОВЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ**

Эксплуатационные свойства зубчатых передач в значительной мере определяются точностью изготовления зубчатых деталей и качеством рабочих поверхностей зубьев. В целях обеспечения эксплуатационных характеристик изделий значительное место в технологии изготовления зубчатых передач отводится чистовой (отделочной) зубообработке. Перечисленные выше требования особенно большое значение приобретают при изготовлении рабочей пары многозаходных винтовых героторных механизмов гидравлических забойных двигателей.

Для выбора оптимального процесса отделочной обработки при изготовлении сложнопрофильных валов выполнены классификация и анализ всех существующих методов и схем финишной зубообработки, а также оценка их технологических возможностей по точности и шероховатости рабочих поверхностей.

Из проведенного анализа установлено, что ни один из широкоизвестных способов отделочной обработки зубчатых поверхностей не может быть использован для реализации отделочной обработки сложнопрофильных валов, так как ряд способов, построенных по схеме обката, может быть реализован только для эвольвентных поверхностей, поскольку профиль инструмента выполнен на основе прямолинейного контура зуборезной рейки. Способы отделочной обработки, реализованные по схеме копирования, не обеспечивают высокие степени точности зубчатых поверхностей. Профиль зуба ротора винтового забойного двигателя имеет в торцевом сечении форму укороченной эпициклоиды и не может быть реализован ни по схеме кинематического обката, ни по схеме копирования из-за сложности с точным изготовлением, правкой и контролем контура инструмента. Установлено, что наибольшей универсальностью и простотой реализации в производственном процессе обладает способ абразивного глобоидного зубохонингования, который легко реализуется как по схеме кинематического обката, так и по схеме свободного обката. Способ обладает линейным контактом в зоне обработки, что повышает производительность и точность обработки благодаря особенностям зацепления и осреднения погрешностей профиля.

При правильном выборе характеристик абразивного слоя глобоидного хона схема обработки легко реализуется с помощью кинематики существующих станков без конструирования специальных нагружающих устройств.

Ключевые слова: зубшлифование, шевингование, глобоидное зубохонингование, обкатка, притирка, электрохимическая обработка, ультразвуковая обработка, суперфиниш, шероховатость поверхности, точность обработки.

V.A. Spirin, V.F. Makarov, O.A. Khalturin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ENSURING THE EFFECTIVENESS OF ABRASIVE FINISHING
OF SCREW COMPLEX-PROFILE SHAFTS**

The operational properties of gears are largely determined by the accuracy of the manufacture of gear parts and the quality of the working surfaces of the teeth. In order to ensure the operational characteristics of products, a significant place in the technology of manufacturing gears is given to finishing gear processing. The requirements listed above are especially important in the manufacture of a working pair of multi-screw helical gerotor mechanisms of hydraulic downhole motors.

To select the optimal process of finishing processing in the manufacture of complex shafts, the classification and analysis of all existing methods and schemes of finishing gear processing, as well as an assessment of their technological capabilities for the accuracy and roughness of the working surfaces, have been performed.

From the analysis, it was found that none of the well-known methods for finishing machining gear surfaces can be used to implement the finishing treatment of complex shafts, since a number of methods constructed according to the rolling pattern can be implemented only for involute surfaces, since the tool profile is based on a straight contour gear cutting slats. Finishing methods implemented according to the copying scheme do not provide high degrees of accuracy of gear surfaces. The tooth profile of the rotor of a helical downhole motor has the shape of a shortened epicycloid in the end section and cannot be implemented either according to the kinematic rolling scheme or according to the copying scheme due

to the difficulties with the exact manufacturing, editing and control of the tool contour. It has been established that the method of abrasive globoid gear honing, which is easily implemented both according to the kinematic rolling scheme and the free rolling scheme, has the greatest versatility and ease of implementation in the production process. The method has a linear contact in the processing zone, which increases productivity and high processing accuracy due to the features of engagement and averaging of profile errors.

With the right choice of characteristics of the abrasive layer of the globoid hone, the processing scheme is easily implemented using the kinematics of existing machines without designing special loading devices.

Keywords: gear grinding, shaving, globoid gear-honing, gear rolling, lapping, electrochemical machining, ultrasonic machining, superfinishing, surface roughness, precision machining.

Введение

Такие эксплуатационные характеристики, как долговечность, надежность, ресурс работы машин и механизмов, зависят от работы отдельных узлов и сопрягающихся пар. Особенно важно учитывать эту зависимость в связи с наметившейся тенденцией к увеличению скоростей, нагрузок и тепловой напряженности контактирующих элементов передач. В связи с этим в настоящее время большое внимание уделяется качеству изготовления сопрягающихся поверхностей деталей машин. Под качеством изготовления понимается обеспечение требуемых точности, шероховатости, физико-механических свойств поверхностного слоя, а также высоких эксплуатационных показателей. Разработка высокопроизводительных технологических процессов, повышающих эксплуатационные характеристики деталей машин, – одна из наиболее актуальных задач машиностроения. В полной мере это относится к зубчатым деталям различного профиля: цилиндрическим зубчатым колесам, шлицевым валам, сложнопрофильным винтовым валам.

Классификация отделочных процессов зубообработки

Нами выполнен анализ всех современных методов и схем отделочной обработки зубчатых деталей и составлена классификация отделочных методов обработки зубчатых поверхностей по следующим признакам:

- метод (вид) отделочной зубообработки;
- принятая схема осуществления процесса;
- конструкция инструмента;
- основные характеристики инструмента или процесса.

На рис. 1 представлены достижимые для каждого способа отделочной обработки зубчатых деталей точность и шероховатость рабочих поверхностей зубьев [1–3]. Наличие широкого разброса показателей для некоторых способов объясняется использованием различных схем обработки. Точность зубчатых деталей после операций полирования, суперфиниша, приработки остается практически неизменной (исходной). Приработка даже несколько снижает точность, при этом шероховатость снижается незначительно.

По способу съема материала зубчатых деталей все виды отделочной обработки можно объединить в следующие группы: абразивные, лезвийные, бесстружечные, электрохимические, электрофизические.

К абразивным методам относится шлифование, хонингование, притирка, абразивное полирование, суперфиниш [4–12].

Лезвийные методы: шевингование, шевинговка [13–16].

Бесстружечные: обкатка, способы поверхностно-пластического деформирования, приработка [17–22].

Электрохимические и электрофизические: ультразвуковая обработка, электрохимико-гидравлическая обработка, электрохимико-механическая обработка [23, 24].

Как видно из диаграммы, представленной на рис. 1, *а*, способ съема материала оказывает существенное влияние на точность зубчатых венцов. Наилучшие результаты по точности обработки дают абразивные способы зубоотделки, обеспечивающие снятие значительных припусков при использовании схем кинематического обката детали и инструмента. Шероховатость рабочих поверхностей зубчатых венцов (рис. 1, *б*) в значительной мере зависит от принятой схемы реализации процесса и условий обработки.

Сравнительный анализ точности обработки зубчатых венцов в зависимости от способа и схемы формообразования подтверждает возможность получения зубчатых деталей высших степеней точности только при наличии кинематической связи между инструментом и деталью и при съеме значительных припусков. Однако в силу простоты контроля и достаточной оснащенности контрольными приборами все эти зависимости выведены для эвольвентных профилей и не могут быть автоматически распространены на другие виды профилей зубчатых деталей.

При изучении влияния условий обработки на шероховатость поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя установлено, что отделочная обработка зубчатых деталей на оптимальных режимах позволяет снизить шероховатость в 2–4 раза. Физико-механические свойства поверхностного слоя ухудшаются при неправильно подобранных режимах шлифования (прижоги)

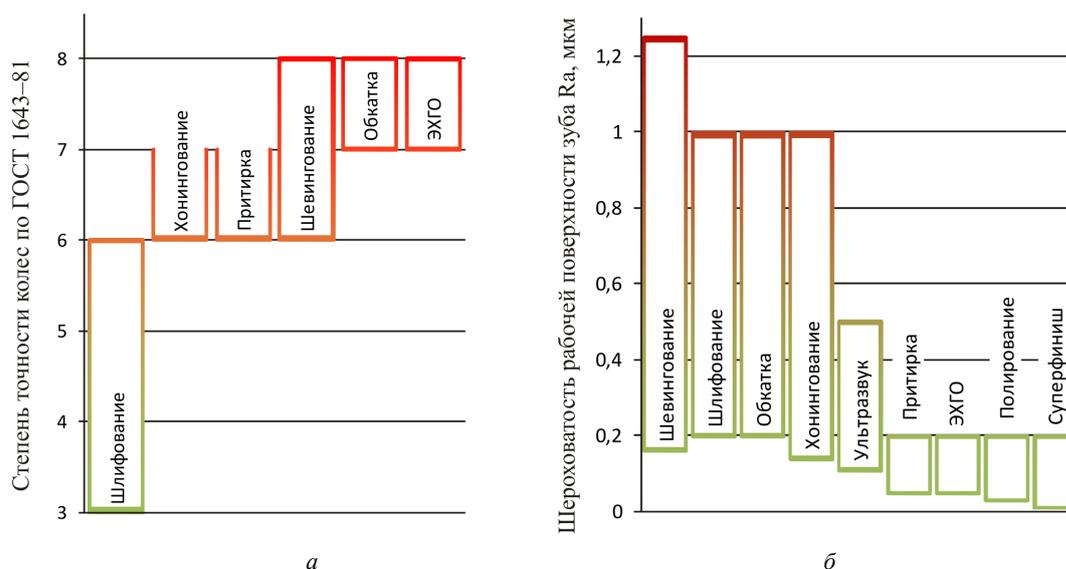


Рис. 1. Точность и шероховатость поверхностей при различных методах отделочной обработки

и улучшаются при обкатке и других способах ППД. Увеличение микротвердости может достигать 30–40 %. Остальные способы отделочной обработки зубчатых колес существенного влияния на физико-механические свойства поверхностного слоя зубчатых деталей не оказывают. Однако все эти сведения относятся к эвольвентным зубчатым колесам. В литературе отсутствуют сведения о выборе схем отделочной обработки для неэвольвентных профилей и влиянии условий контактирования инструмента и детали, а также режимах обработки на шероховатость рабочих поверхностей сложнопрофильных деталей. Отсутствуют сведения о рациональных конструкциях инструментов для обработки неэвольвентных профилей.

Рассмотренные способы снятия материала, схемы формообразования и инструменты для отделочной обработки зубчатых колес не отличаются универсальностью, что сдерживает их широкое применение в машиностроении. Способы, отличающиеся высокой точностью, не обладают высокой производительностью. А способы, обеспечивающие минимальную шероховатость, не отличаются значительными съемами и исправляющей способностью. В то же время способы, повышающие физико-механические свойства поверхностного слоя, не обеспечивают высокой степени точности зубчатой поверхности. Целесообразно ограничить круг поиска способа отделочной обработки сложнопрофильных зубчатых деталей рамками тех способов, которые обеспечивают достаточные съемы, высокую производительность, низкую шероховатость, высокую точность и неизменность физико-механических свойств. Оптимальным будет такой способ, у которого эти

параметры сочетаются наилучшим образом. Как видно из рис. 1, подходят способы абразивной отделочной обработки зубчатых венцов. Для определения рациональной схемы абразивной отделочной схемы обработки сложнопрофильных зубчатых деталей необходим анализ способов и технологических возможностей абразивной отделочной обработки.

Из разработанных к настоящему времени процессов абразивной отделочной обработки зубчатых деталей наибольшее распространение получили шлифование, хонингование, притирка и полирование. Зубошлифование – единственный способ получения зубчатых колес 3–4-й степени точности. Этот способ может быть реализован по схеме обкатки или копирования. Схема обкатки может быть реализована целой гаммой шлифовальных инструментов: тарельчатые, дисковые, плоские шлифовальные круги и абразивные червяки [4, 5]. Схема копирования может быть реализована односторонними или двухсторонними фасонными кругами. Шлифование по схеме обката обеспечивает более высокие степени точности (3–6-ю степени). В то же время схема копирования обеспечивает 6–7-ю степени точности. Шероховатость обработанных поверхностей зависит от условий обработки и находится в пределах $Ra = 0,2 \div 1,0$ мкм. Припуск под обработку 0,15–0,8 мм в зависимости от размеров обрабатываемых зубчатых деталей. Снижение точности зубошлифования при работе по методам копирования объясняется сложностями профилирования и правки криволинейного профиля абразивного инструмента. Инструмент, работающий по методу обката, имеет прямолинейный профиль и поэтому правится значительно проще, при этом правка

возможна прямо в процессе шлифования. Особое место занимает шлифование абразивными червяками, которое при точности в пределах 5–6-й степеней обладает наивысшей из всех способов зубошлифования производительностью.

Шлифование методами обкатки дает эффективные результаты при обработке эвольвентных профилей за счет совершенной системы деления и правки шлифовальных кругов. При обработке фасонных профилей использование методов копирования нерационально, так как они не обеспечивают высокой точности и производительности.

Притирка – процесс отделочной обработки зубчатых поверхностей, сущность которого заключается в искусственном и регулируемом по величине износе зубьев детали при помощи притира и свободного абразива при взаимном перемещении детали и притира. Обеспечивает 6–7-ю степени точности шероховатость поверхности $Ra = 0,08 \div 0,32$ мкм. В качестве инструмента используются зубчатые колеса 5-й степени точности и выше, изготовленные из чугуна HB 180–200, припуск под обработку не оставляется, так как величина снимаемого слоя 0,02–0,05 мм. Притирка выполняется одним или несколькими притирами при параллельных осях или при скрещивающихся под углом 10° – 20° осях. Процесс притирки строится на принципах свободного обката при отсутствии кинематической связи между деталью и притиром. Низкая производительность, сложность изготовления сложнопрофильных притиров высокой точности, шаржирование рабочих поверхностей ограничивают использование процесса притирки для обработки зубчатых деталей неэвольвентных профилей.

Зубохонингование (абразивное шевингование) обеспечивает точность зубчатых деталей в пределах 6–8-й степеней, шероховатость зависит от условий обработки, в первую очередь от зернистости абразива, и достигает $Ra = 0,16 \div 1,0$ мкм. Производительность зубохонингования много выше, чем производительность зубошлифования, так как перед этим процессом ставится задача снижения шероховатости. Припуск под обработку оставляется в пределах 0,01–0,03 мм. Хонингование осуществляется по методу свободного обката и реализуется на специальных зубообрабатывающих станках. Схемы осуществления процесса зубохонингования аналогичны схемам зубошевингования и могут быть осуществлены при однопрофильном и двухпрофильном зацеплениях. В соответствии с этим применяются различные схемы нагружения и типы инструментов. В качестве инструментов при зубохонинговании используются дисковые зубчатые хоны, хон-рейки, хоны на основе цилиндрического червяка, глобoidные червячные хоны. Наибольшее распростране-

ние получило зубохонингование дисковыми хонами в силу простоты осуществления процесса. Однако использование принципа свободного обката, точечное зацепление между профилями инструмента и детали, значительные значения частоты вращения инструмента (так как скоростью резания является скорость скольжения профилей), сложность изготовления зубчатых хонов высокой точности и их правки, подрезание головки и ножки детали в процессе обработки не позволяют использовать дисковое зубохонингование в качестве процесса для повышения точности обработки до высших степеней. То же самое отличает зубохонингование хон-рейками и хонами на основе цилиндрического червяка [7].

Зубохонингование глобoidными зубчатыми хонами отличается широкими технологическими возможностями, которые обеспечиваются преимуществами глобoidного зацепления: линейный контакт в зоне резания, значительная протяженность контакта инструмента и детали, высокая исправляющая способность, простота осуществления процесса на универсальном и специальном оборудовании, скоростью резания является скорость вращения инструмента, что приводит к снижению частот вращения инструмента и появлению возможности реализации выбранных режимов обработки на невысоких частотах вращения.

Особенности выбора глобoidного зубохонингования определяются профилем зубчатого венца винтового забойного двигателя (рис. 2). Наличие циклоидообразных профилей исключает возможность использования схем и оборудования для обработки эвольвентных профилей. Кинематика глобoidного зубохонингования представлена на рис. 3.

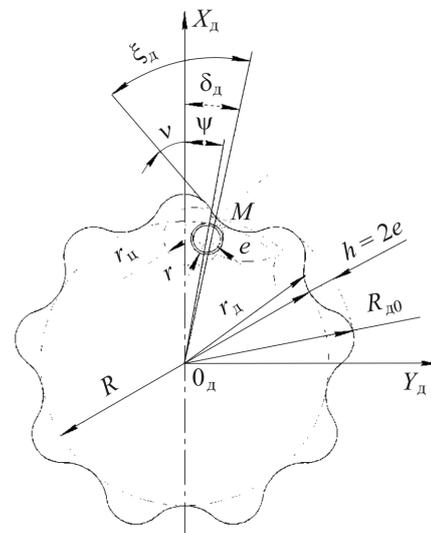


Рис. 2. Торцевой профиль ротора

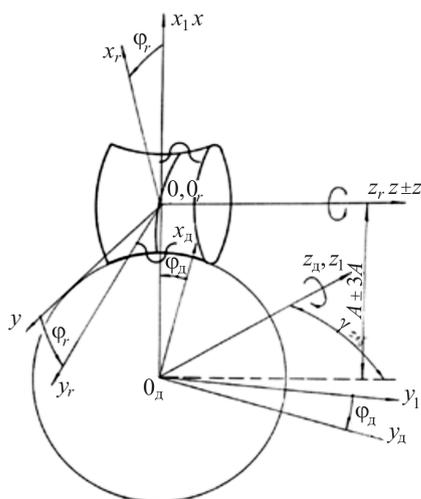


Рис. 3. Кинематика глобоидного зубохонингования

Однако нерешенность вопросов выбора характеристик абразивного слоя глобоидных хонов, а также вопросов изготовления инструментов, неизученность теоретических особенностей глобоидного зацепления не позволяли внедрять процесс глобоидного зубохонингования в производство. Использование глобоидного хона на эластичных каучукосодержащих связках [8, 25] позволило решить вопросы изготовления инструмента, повышения его точности с помощью правки и внедрения этого процесса для обработки сложнопрофильных деталей. Это определило необходимость проведения комплекса исследований по определению характеристик глобоидного инструмента и процесса в целом.

Для выбора оптимальной схемы процесса глобоидного зубохонингования сложнопрофильных валов необходимо исследовать влияние кинематики процесса на качество зубчатых поверхностей и выполнить ряд работ по прогнозированию условий обработки и характеристик абразивного слоя глобоидного инструмента при расчете необходимых технологических параметров на этапе проектирования технологического процесса.

Заключение

Глобоидное зубохонингование кинематически легко реализуется при обработке любых зубчатых профилей, не требует специального оборудования, обеспечивает высокие показатели по точности и шероховатости обработанных поверхностей. После всестороннего изучения особенностей процесса глобоидное зубохонингование внедрено на ряде предприятий нефтегазовой отрасли.

Список литературы

1. Серебренник Ю.Б., Спирин В.А. Финишные методы обработки цилиндрических зубчатых колес: метод. указ.

зания к курс. и диплом. проектированию для студ. машиностр. спец. / Перм. политех. ин-т. – Пермь, 1985. – 32 с.

2. Бабичев А.П., Лебедев В.А. Методы обработки деталей абразивно-алмазным инструментом и свободным абразивом / Ин-т с.-х. маш.-я. – Ростов н/Д, 1980. – 53 с.

3. Валиков Е.Н., Белякова В.А. Комбинированные методы финишной обработки зубчатых колес // Тр. ВНТК. Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии / Липец. гос. техн. ун-т. – Липецк, 2006. – Ч. 1. – С. 52–55.

4. Березин Б.П., Думченко Н.И., Мосолов К.В. Зубошлифовальные работы: учеб. пособие для проф.-техн. училищ. – М.: Высш. шк., 1972. – 261 с.

5. Спирин В.А. Повышение качества обработки сложнопрофильных зубчатых деталей: дис. ... канд. техн. наук / Перм. политех. ин-т. – Пермь, 1988. – 216 с.

6. Ханукаев И.Н. Зубошлифование червячными абразивными кругами: учеб. пособие для студ. II–VI курсов мех. спец. / Всесоюз. заоч. инж.-строит. ин-т. – М., 1975. – 57 с.

7. Пейсахович И.В. Зубохонингование закаленных цилиндрических колес алмазно-абразивными рейками // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1980. – № 2. – С. 70–74.

8. Цепков А.В., Спирин В.А., Серебренник Ю.Б. Финишная обработка роторов винтовых забойных двигателей // Пути повышения производительности и качества механообработки деталей на машиностроительных предприятиях Урала: тез. докл. зональной науч.-техн. конф., г. Свердловск, 3–5 апр. 1984 г. – Свердловск, 1984. – С. 74–75.

9. Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Влияние способов зубошлифования на качество поверхности слоя зубьев колес. Надежность и качество зубчатых колес. – М., 1969. – 143 с.

10. Беляев А.Н. Экспериментальные исследования процесса зубохонингования // Станки и инструмент. – 1981. – № 1. – С. 22–24.

11. Бунтов В.Н., Завин В.В., Курищук А.В. Алмазное зубохонингование в производстве зубчатых колес. – Киев: [б. и.], 1974. – 6 с.

12. Журавлев В.Л. Технология изготовления глобоидных передач. – М.: Машиностроение, 1965. – 152 с.

13. Деформирующее шевингование зубчатых колес / Е.Н. Валиков [и др.] // СТИН. – 2002. – Вып. 3. – С. 16.

14. Калашников С.Н., Калашников А.С. Шевингование зубчатых колес. – М.: Высш. шк., 1985. – 224 с.

15. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Шевингование-прикатывание цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2008. – Вып. 2. – С. 69–76.

16. Коганов И.А. Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. – Тула, 1970. – 181 с.

17. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес. – Львов: Вища школа, 1977. – 168 с.

18. Производство зубчатых колес: справ. / С.Н. Калашников [и др.]; под общ. ред. Б.А. Тайца. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.

19. Сухоруков Ю.Н., Евстигнеев Р.И. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката. – Киев: Техника, 1983. – 120 с.

20. Юликов М.И. Отделочные методы обработки зубьев зубчатых колес // Станки и инструмент. – 1986. – № 1. – С. 15–16.

21. Гинзбург Е.Г., Халебский Н.Т. Производство зубчатых колес. – Ленинград: Машиностроение, 1978. – 134 с.

22. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – М.: Машиностроение, 1984. – 311 с.

23. Борисов Б.Я. Электроконтактное нарезание зубьев методом обкатки // Станки и инструменты. – 1967. – № 2. – С. 19–21.

24. Валиков Е.Н., Татаринов И.В. Чистовая алмазно-электрохимическая обработка цементованных цилиндрических зубчатых колес // СТИН. – 2004. – № 2. – С. 19–22.

25. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584 с.

References

1. Serebrennik Iu.B., Spirin V.A. Finishnye metody obrabotki tsilindricheskikh zubchatykh kolez [Finishing of spur gears]. Perm. politekh. in-t. Perm', 1985, 32 p.

2. Babichev A.P., Lebedev V.A. Metody obrabotki detalei abrazivno-almaznym instrumentom i svobodnym abrazivom [Methods of the parts machining with an abrasive-diamond tool and a free abrasive]. Institut s.-kh. mashinostroeniia. Rostov n/D, 1980, 53 p.

3. Valikov E.H., Beliakova V.A. Kombinirovannye metody finishnoi obrabotki zubchatykh kolez [Combined methods of gear wheel finishing]. Trudy VNTK. Progressivnye tekhnologii i oborudovanie v mashinostroenii i metallurgii. Lipets. gos. tekhn. un-t, 2006, pp. 52–55.

4. Berezin B.P., Dumchenko N.I., Mosolov K.V. Zuboshlifovalnye raboty [Grinding works: training manual for vocational schools]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1972, 261 p.

5. Spirin V.A. Povyshenie kachestva obrabotki slozhnoprofil'nykh zubchatykh detalei [Improvement of the processing quality of the complex-profile gear details]. PhD. Thesis. Perm', 1988, 216 p.

6. Khanukaev I.N. Zuboshlifovanie cherviachnymi abrazivnymi krugami [Gear grinding by the worm abrasive circles: textbook for students. II–VI mechanical special courses]. Vsesoiuz. zaoch. inzh.-stroit. institut. Moscow, 1975, 57 p.

7. Peisakhovich I.V. Zubokhoningovanie zakalennykh tsilindricheskikh kolez almazno-abrazivnymi reikami [Zubokhoningovanie hardened cylindrical wheels with diamond and abrasive laths]. *Almazy i sverkhтвердые материалы*, 1980, no. 2, pp. 70–74.

8. Tsepkov A.V., Spirin V.A., Serebrennik Iu.B. Finishnaia obrabotka rotorov vintovykh zaboinykh dvigatelei [Finish processing of screw downhole motor rotors]. *Puti povysheniia proizvoditel'nosti i kachestva mekhanoo-brabotki detalei na mashinostroitel'nykh predpriiatiakh Urals: tez. dokl. zonal'noi nauch.-tekhn. konf., g. Sverdlovsk*, 1984, pp. 74–75.

9. Ryzhov M.A., Ryzhov N.M. Vliianie sposobov zuboshlifovaniia na kachestvo poverkhnosti sloia zub'ev kolez. Nadezhnost' i kachestvo zubchatykh kolez [Influence of methods of gear grinding on quality of a surface of a layer of teeth of wheels]. Moscow, 1969, 143 p.

10. Beliaev A.N. Eksperimental'nye issledovaniia protsessa zubokhoningovaniia [Experimental research of the gear-grinding process]. *Stanki i instrument*, 1981, no. 1, pp. 22–24.

11. Buntov V.N., Zavin V.V., Kurishchuk A.V. Almaznoe zubokhoningovanie v proizvodstve zubchatykh kolez [Diamond gear-hooning in manufacture of gear wheels]. Kiev, 1974. 6 p.

12. Zhuravlev V.L. Tekhnologiia izgotovleniia globoidnykh peredach [Technology of manufacturing of the globoid gears]. Moscow: Mashinostroenie, 1965, 152 p.

13. E.H. Valikov et al. Deformiruiushchee shevingovanie zubchatykh kolez [Deformation motions of the gear wheels]. *STIN*, 2002, iss. 3, pp. 16.

14. Kalashnikov S.N., Kalashnikov A.C. Shevingovanie zubchatykh kolez [Shevingovanie gears]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1985, 224 p.

15. Malikov A.A., Sidorkin A.B. Shevingovanie-prikatyvanie tsilindricheskikh kolez s krugovymi zub'iami [Chevring-rolling of spur gears with circular teeth]. *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2008, iss. 2., pp 69–76.

16. Koganov I.A. Progressivnaia obrabotka zubchatykh profilei i fasonnykh poverkhnostei [Progressive processing of the tooth profiles and the shaped surfaces]. Tula, 1970, 181 p.

17. Gulida E.N. Tekhnologiia otdelochnykh operatsii zuboobrabotki tsilindricheskikh kolez [Technology of the finishing operations of the cylindrical wheels tooth treatment]. L'vov: Vishchaia shkola, 1977, 168 p.

18. S.N. Kalashnikov et al. Proizvodstvo zubchatykh kolez: sprav. [Production of Gears: reference]. Ed. B.A. Taitsa. 3rd. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 464 p.

19. Sukhorukov Iu.N., Evstigneev R.I. Instrumenty dlia obrabotki zubchatykh kolez metodom svobodnogo obkata [Evstigneev R.I. Tools for processing of gears by free rolling method]. Kiev: Tekhnika, 1983, 120 p.

20. Iulikov M.I. Otdelochnye metody obrabotki zub'ev zubchatykh kolez [Finishing Methods of Gear Teeth Processing]. *Stanki i instrument*, 1986, no. 1, pp. 15–16.

21. Ginzburg E.G., Khalebskii N.T. Proizvodstvo zubchatykh kolez [Gear wheel production]. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 134 p.

22. Iakimov A.V. Abrazivno-almaznaia obrabotka fasonnykh poverkhnostei [Abrasive and diamond processing of the shaped surfaces]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 311 p.

23. Borisov B.Ia. Elektrokontaktnoe narezanie zub'ev metodom obkatki [Electrical contact tooth cutting by the run-in method]. *Stanki i instrument*, 1967, no. 2, pp. 19–21.

24. Valikov E.H., Tatarinov I.V. Chistovaia almazno-elektrokhimicheskaia obrabotka tsementirovannykh tsilindricheskikh zubchatykh kolez [Pure diamond and electrochemical processing of the cemented spur gears]. *STIN*, 2004, no. 2, pp. 19–22.

25. Litvin F.L. Teoriia zubchatykh zatseplenii [Gear gearing theory]. Moscow: Nauka, 1968, 584 p.

Получено 14.02.2020
Опубликовано 25.03.2020

Сведения об авторах

Спирин Владимир Алексеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук; e-mail: tms@pstu.ru.

Макаров Владимир Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель завкафедрой инновационных технологий в машиностроении Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: makarovv@pstu.ru.

Халтурин Олег Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: oleg-x@pstu.ru.

About the authors

Vladimir A. Spirin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences; e-mail: tms@pstu.ru.

Vladimir F. Makarov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Chair of Department of Innovative Technologies in Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: makarovv@pstu.ru.

Oleg A. Khalturin (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: oleg-x@pstu.ru.