

Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А., Песин М.В. Обработка зубчатых колес сборными шлифовально-полировальными кругами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 79–87. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.09

Makarov V.F., Vorozhtsova N.A., Pesin M.V. Processing gears with prefabricated grinding and polishing wheels. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 79–87. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.09

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 1, 2020

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.09
УДК 621.91

В.Ф. Макаров, Н.А. Ворожцова, М.В. Песин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ОБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС СБОРНЫМИ
ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМИ КРУГАМИ**

Посвящена технологическим возможностям комбинированного червячного круга на операции зубошлифования сателлита с обеспечением степени точности зубчатого венца 3-3 при заданной степени точности 5-4-4 и шероховатости профиля зубьев $Ra = 0,095$ при заданной шероховатости $Ra \leq 0,16$. Задачи исследования следующие: технологически обеспечить требования точности и качества на производительных режимах, установить закономерности изменения параметров точности и шероховатости, определить рациональные режимы обработки, провести лабораторные исследования качества поверхностного слоя, сделать сравнительный анализ полученных результатов. Приведены исследования характеристик червячного шлифовально-полировального круга и параметров качества поверхностного слоя – шероховатости, остаточных напряжений, микротвердости и микроструктуры зубчатого венца. Наибольшие сжимающие напряжения обнаружены на левой ножке после зубополирования и на правой ножке после зубохонингования, а наименьшие – при зубошлифовании. Наибольшие растягивающие напряжения обнаружены на левой ножке после зубохонингования. В целом распределение остаточных напряжений на образцах после зубополирования наиболее благоприятно, так как имеет минимальные растягивающие напряжения на большей глубине. Сделан вывод, что физико-механические параметры качества поверхностного слоя – остаточные напряжения, микротвердость и микроструктура – соответствуют заданным требованиям и носят благоприятный характер. Сравнительный анализ показал, что операция зубошлифования комбинированным червячным кругом по сравнению с зубохонингованием снижает погрешности изготовления зубчатого венца и шероховатость профиля; микроструктура хонингованной и полированной поверхностей не отличается, величины остаточных напряжений и микротвердости соизмеримы; применение технологии совмещенной окончательной обработки зубчатого венца обеспечивает заданную точность и качество поверхностного слоя при увеличении производительности в 1,6 раза.

Ключевые слова: зубчатый венец, сателлит, зубошлифование, зубополирование, зубохонингование, степень точности, качество поверхностного слоя, комбинированный червячный шлифовально-полировальный круг, остаточные напряжения, поверхностный слой.

V.F. Makarov, N.A. Vorozhtsova, M.V. Pesin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PROCESSING GEARS WITH PREFABRICATED GRINDING AND POLISHING WHEELS

This article presents the results of researching the technological capabilities of the satellite grinding operation with a combined worm wheel of various abrasive characteristics, ensuring: degree of accuracy of the gear rim 3-3 for a given degree of accuracy 5-4-4, roughness of the tooth profile $Ra = 0.095$ for a given roughness $Ra \leq 0.16$. The objectives of the study is – to technologically ensure the requirements of accuracy and quality in the productive modes, to establish the regularities of changing the parameters of accuracy and roughness, to determine the rational modes of processing, to conduct laboratory studies of surface layer quality, to make a comparative analysis of the results obtained. Research of characteristics of a worm grinding-polishing wheel and surface layer quality parameters – roughness, residual stresses, microhardness and toothed crown microstructure are covered. The greatest compressive stresses are found on the left leg after tooth polishing and on the right leg after tooth polishing, and the smallest – during tooth polishing. The highest tensile stresses are found on the left leg after tooth honing and on the right leg after tooth honing. In general, the distribution of residual stresses on the specimens after tooth polishing is most favorable as it has the lowest tensile stresses at greater depths. It is concluded that the physical and mechanical parameters of the surface layer quality – residual stresses, microhardness and microstructure correspond to the given requirements and have a favorable character; the comparative analysis has shown that the operation of gear grinding by the combined worm wheel in comparison with tooth honing reduces errors of manufacturing of a gear crown and roughness of a profile; the microstructure of the honed and polished surface does not differ, the values of residual stresses and microhardness are comparable; the application of these parameters is the same.

Keywords: toothed gear, satellite gear, gear grinding, tooth polishing, gear honing, gear tooth quality, quality of the surface layer, the combined worm grinding-polishing wheel, residual stresses, surface layer.

Введение

Сателлиты планетарных передач авиационных редукторов изготавливают по 3–5-й степеням точности, согласно ГОСТ 1643–81, с требуемой шероховатостью 0,1–0,32 мкм. Основные требования точности, предъявляемые к зубчатому венцу с числом зубьев $z = 29$, модулем $m = 6$, углом профиля $\alpha = 28^\circ$, шириной $b = 48$ мм, диаметром делительной окружности $d = 181,1$ мм, шероховатостью профиля зубьев $Ra \leq 0,16$ мкм, твердостью $HRC \geq 61$, приведены в табл. 1.

Окончательными операциями серийного технологического процесса являются зубошлифование и зубохонингование. Зубошлифование выполняют методом обката на станке Reishauer RZ basic червячным шлифовальным кругом Norton 1_300×125×160 $m = 6$, $\alpha = 28^\circ$ 3GG 3NQW80J8VS3 63 м/с. Время настройки станка, правки круга и зубошлифования составляет 139,4 мин. Зубохонингование выполняют на станке 5B913 алмазным эластичным зубчатым хонем с характеристикой рабочего слоя: связка P18, марка зерна АСМ, зернистость 28/20, концентрация алмазного порошка 100 %. Время настройки станка, правки и контроля хона и зубохонингования составляет 102,38 мин. На операции зубошлифования достигается заданная степень точности, а на операции зубохонингования обеспечивается шероховатость профиля зубьев $Ra \leq 0,16$ мкм. Суммарное время обработки окончательных операций обработки зубчатого венца составляет 241,78 мин.

Таблица 1

Основные требования точности, предъявляемые к зубчатому венцу

Наименование параметра	Обозначение по ГОСТ 1643–81, (DIN 3962–78)	Значение по чертежу, мкм
<i>Нормы кинематической точности -5-</i>		
Накопленная погрешность шага колеса	F_p	≤ 25
Радиальное биение зубчатого венца	F_r	≤ 25
<i>Нормы плавности работы -4-</i>		
Погрешность профиля зуба	F_a	≤ 6
Отклонение шага	f_p	≤ 5
<i>Нормы контакта зубьев -4-</i>		
Погрешность направления зуба	F_b	≤ 8
Модификация головки зуба	f_{Ko}	36–26

Труды таких ученых, как Э.Л. Айрапетов, Д.Т. Бабичев, Э.Б. Вулгаков, В.А. Гавриленко, С.Н. Калашников, В.Н. Кудрявцев, Ф.Л. Литвин, Н.Н. Марков, Г.Г. Овумян, Б.А. Тайц, Н.Ф. Хлебалин, Г.И. Шевелева, М.Л. Фингер и других, свидетельствуют, что эксплуатационные параметры зуб-

чатых передач в значительной степени зависят от технологии изготовления зубчатых колес [1, 2]. При этом важное значение отводится экономической эффективности используемых технологических процессов [3–5]. Анализ литературы и опыт предприятий доказывают, что операция зубошлифования является наиболее производительной окончательной операцией для обработки зубчатого венца [6–8]. Обкатное зубошлифование при непрерывном делении позволяет не только существенно снизить погрешности зубчатого венца, но обеспечивает стабильность получаемой точности [9, 10]. Операция зубохонингования позволяет повысить долговечность и контактную выносливость за счет снятия тонких слоев материала на малопроизводительных режимах, при которых наводятся благоприятные остаточные напряжения и снижается шероховатость [11].

Однако с учетом проблем, связанных с нестабильностью качества алмазного эластичного хона, значительной трудоемкостью наладки станка и правки алмазного хона [12–22], ставится цель исследования – обеспечить качество и точность зубчатого венца сателлитов на операции зубошлифования с помощью комбинированного шлифовально-полировального червячного круга при повышении стабильности и производительности обработки. При обеспечении заданной точности и качества поверхностного слоя можем предположить, что эксплуатационные параметры зубчатой передачи не ухудшатся¹ [23–26]. Задачи исследования заключаются в следующем: технологически обеспечить требования точности и качества на производительных режимах, установить закономерности изменения параметров точности и шероховатости, определить рациональные режимы обработки, провести лабораторные исследования качества поверхностного слоя, сделать сравнительный анализ полученных результатов.

Методика экспериментальных исследований

Экспериментальный технологический процесс совмещенного зубошлифования и зубополирования проводился методом обката на станке Reishauer RZ basic комбинированным червячным

¹ AGMA 912-A04. Mechanisms of gear tooth failures. Alexandria, USA, 2004. 30 p.

AGMA 938-A05. Shot peening of gears. Alexandria, USA, 2005. 22 p.

AGMA 2005-C96. Design manual for bevel gears. Alexandria, USA, 1996. 104 p.

ANSI/AGMA 1010-F14. Appearance of gear teeth – terminology of wear and failure. Alexandria, USA, 2014. 89 p.

ANSI/AGMA 2003-C10. Rating the pitting resistance and bending strength of generated straight bevel, zerol bevel and spiral bevel gear teeth. Alexandria, USA, 2010. 81 p.

кругом Reishauer AG 1_275×125×160 $m = 6$, $a = 28^\circ$ A80 G 8 V 0167/EK800 72 м/с (рис. 1, а). Шлифовальная часть круга (рис. 1, б) состоит из электрокорунда нормального с размерами зерна 150–200 мкм, весьма мягкой твердостью, средней структурой № 8, керамической связкой, максимально допустимая скорость шлифования 72 м/с. Полировальная часть круга (рис. 1, в) состоит из электрокорунда белого ЕК800 с размерами зерна 10–20 мкм на вспененной полиуретановой связке, обеспечивающей полирующий эффект.

Установлена структура полировальной части при помощи сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA3: на специальную подложку из токопроводящего покрытия нанесен образец и помещен в вакуумную камеру. На рис. 2 приведены фотографии с прибора.

Принцип работы червячного комбинированного круга изображен на рис. 3 и заключается в снятии основного припуска шлифовальной частью при обеспечении заданной точности. Полировальная часть комбинированного круга срезает вершины оставшихся микронеровностей,

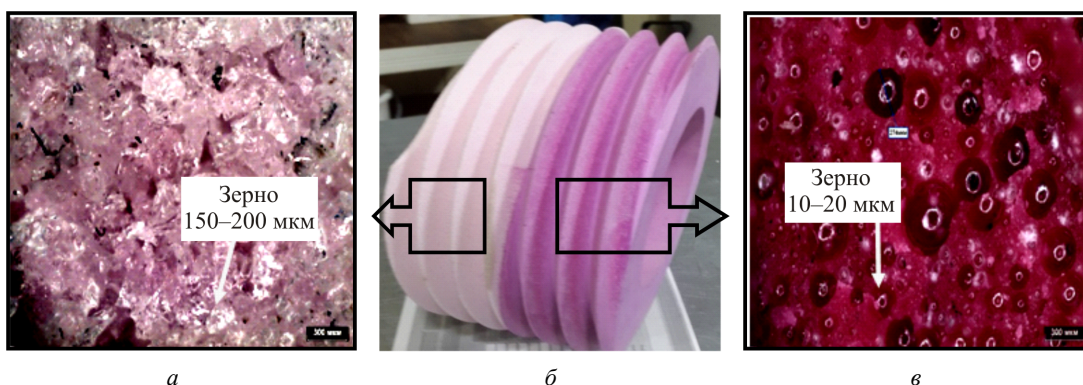


Рис. 1. Структура шлифовальной части (а); общий вид комбинированного червячного круга (б); структура полировальной части (в)

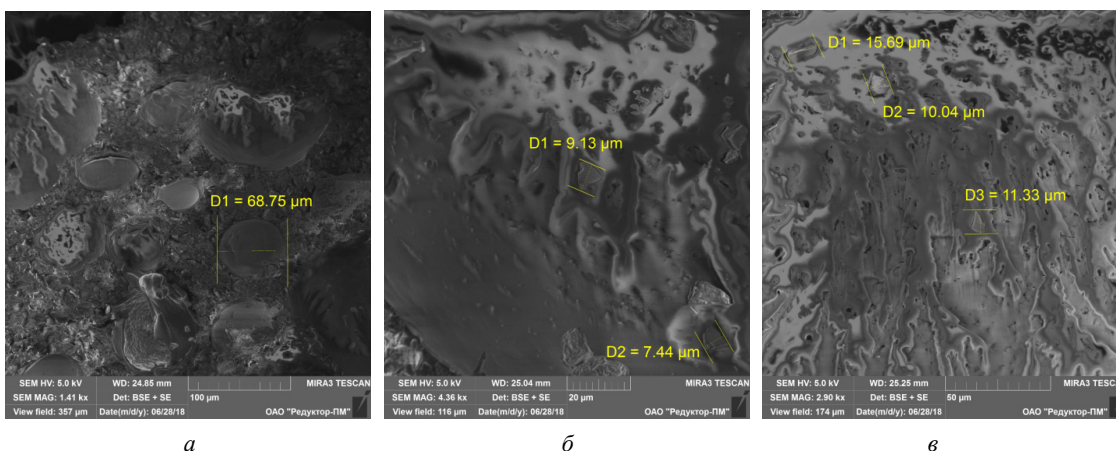


Рис. 2. Микроструктура полировальной части комбинированного круга: а – размеры пор; б, в – размеры зерен

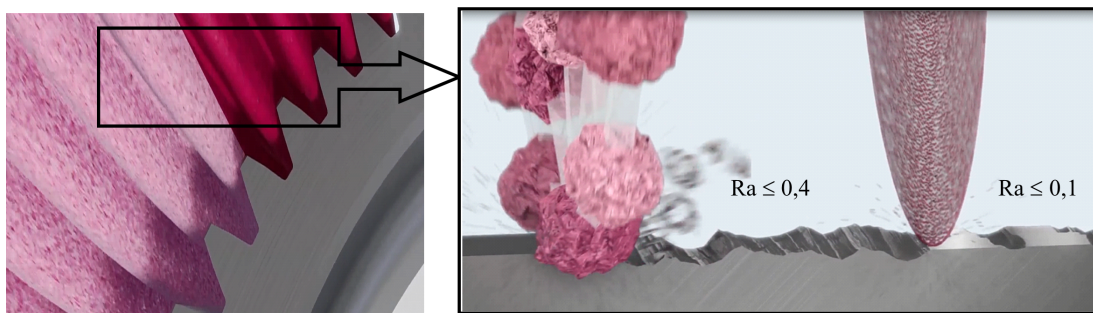


Рис. 3. Моделирование резания комбинированным кругом

обеспечивая заданную шероховатость. Время наладки станка, правки комбинированного червячного круга и совмещенной операции зубошлифования и зубополирования составляет 150 мин, что на 10,6 мин длительнее серийной операции зубошлифования. Применение комбинированного круга позволяет исключить трудоемкие операции правки и контроля алмазного зубчатого хона, доводочную операцию хонингования зубчатого венца, тем самым общее снижение времени составляет 91,78 мин. Следовательно, производительность окончательной обработки зубчатого венца увеличилась в 1,6 раза. Стратегия обработки, опробованные режимы резания, полученные на них параметры точности и шероховатости представлены в предшествующих работах.

Погрешности профиля зубьев измеряли на координатно-измерительной машине Klingelberg P-40, измерение шероховатости проводили на профилометре MAHR Surf M300C. Для сравнения микроструктуры и микротвердости зубчатых венцов, обработанных по серийному и экспериментальному технологическим процессам, вырезались зубья-образцы на электроэрозионном станке. Металлографические исследования микрошлифов осуществлены на оптическом инвертированном микроскопе Axivert 40 MAT. Оценка микротвердости проведена методом восстановленного отпечатка по шкале Виккерса с помощью микротвердомера MICROMET 5104.

Исследование остаточных напряжений проведено разрушающим методом Н.Н. Давиденкова

на установке ПИОН-2 по методике ПИ 1.4.804–84 (НИАТ – 1985 г.) электроэрозионным способом согласно схеме, изображенной на рис. 4.

Результаты исследований

Из рис. 5 видно, что погрешности геометрических параметров после зубополирования комбинированным червячным кругом меньше, чем после зубохонингования. Особенно заметным является разрыв по параметрам F_a и F_b . Снижение погрешности профиля и направления почти в 2 раза позволяет предположить, что эксплуатационные характеристики зубчатой передачи по нормам плавности и контакта также возрастут. В целом повышение точности объясняется снижением шероховатости поверхности профиля зуба до 0,095 мкм и исключением погрешности правки алмазного хона. Сателлиты, обработанные по серийному и экспериментальному технологическим процессам, прошли контроль на отсутствие шлифовочных прижогов.

Результаты исследований показали, что после операций зубошлифования, зубополирования, зубохонингования микроструктура цементованного слоя является удовлетворительной, состоит из высокоуглеродистого мелкоугольчатого мартенсита (рис. 6, б). Микроструктура сердцевины стали 18Х2Н4АШ удовлетворительная, состоит из низкоуглеродистого мелкоугольчатого мартенсита (рис. 6, в).

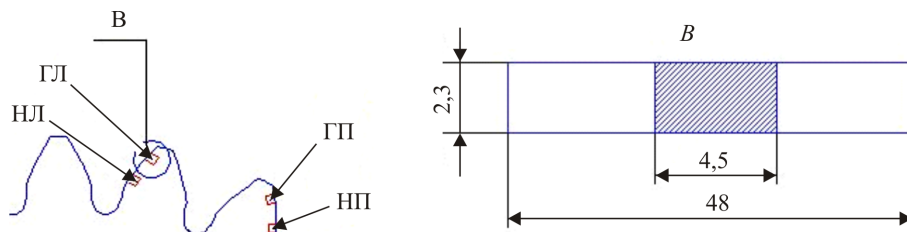


Рис. 4. Схема вырезки образцов для измерения остаточных напряжений:
Г – головка, Н – ножка, Л – левая, П – правая сторона

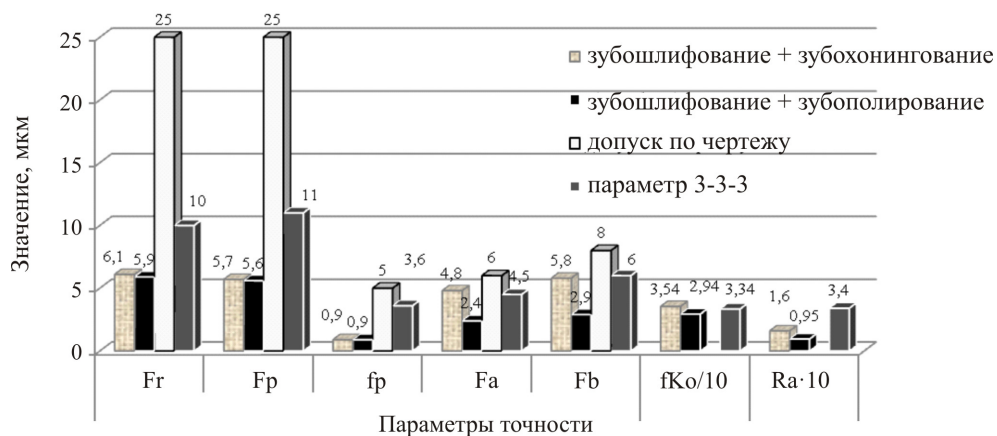


Рис. 5. Результаты измерения параметров точности и шероховатости зубчатого венца при различных способах обработки

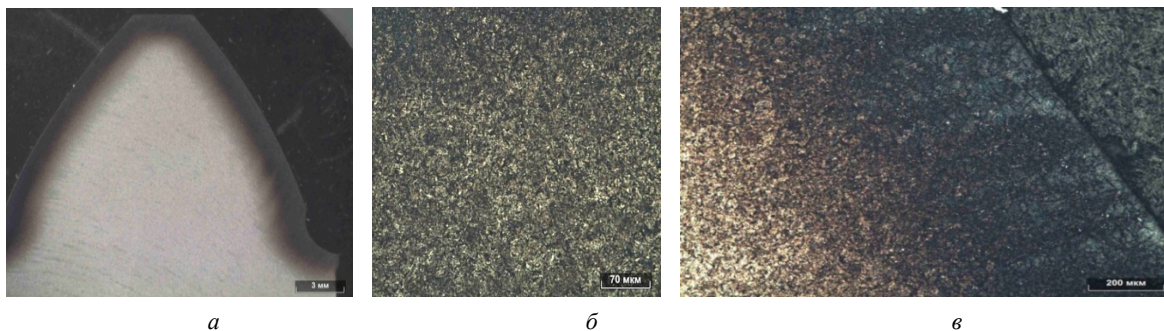


Рис. 6. Микроструктура образцов: а – общий вид; б – микроструктура цементированного слоя; в – микроструктура пограничной зоны

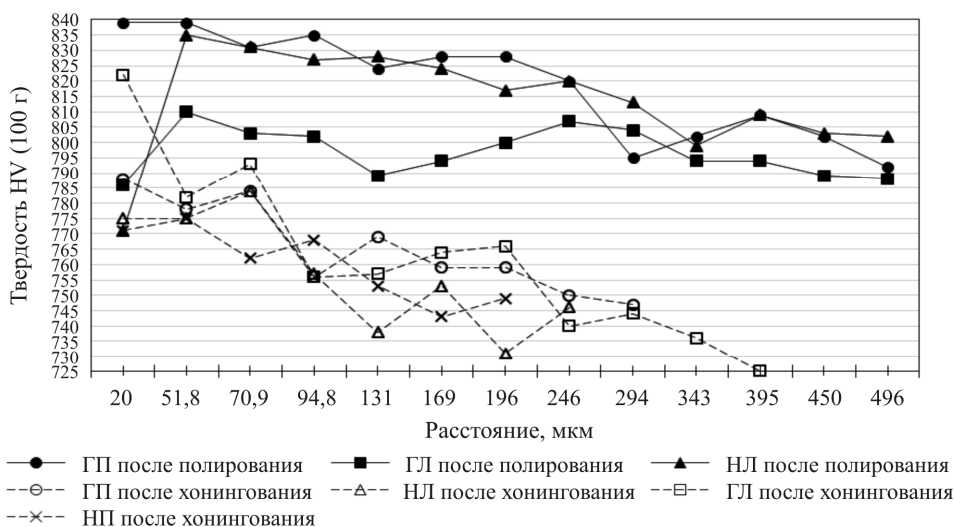


Рис. 7. Распределение значений микротвердости цементированной поверхности

Распределение значений микротвердости образцов после газовой цементации и последующей механической обработки по серийному технологическому и экспериментальному процессам приведено на рис. 7.

Несущественный разброс значений микротвердости в пределах одного образца обусловлен неоднородностью нанесения покрытия и погрешностью измерения. Перепад значений твердости образцов, обработанных по разным процессам, ожидаем, так как детали проходили химико-термическую обработку в разных партиях.

Характер распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после зубополирования и зубохонингования приведен на рис. 8.

В поверхностном слое зубьев на глубине до 10–15 мкм заложены сжимающие напряжения, переходящие в растягивающие. Существенной разницы по величине и характеру распределения остаточных напряжений между образцами головки и ножки зубьев левой и правой сторон не выявлено.

Наибольшие сжимающие напряжения обнаружены на левой ножке после зубополирования и на правой ножке после зубохонингования, а наименьшие – при зубошлифовании. Наибольшие растягивающие напряжения обнаружены на левой ножке после зубохонингования. В целом распределение остаточных напряжений на образцах после зубополирования наиболее благоприятно, так как имеет минимальные растягивающие напряжения на большей глубине.

Выводы и заключение

В результате исследования технологических возможностей операции зубошлифования сателлита комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом установлено следующее:

- 1) достигнута степень точности 3-3 при заданной 5-4-4, достигнута шероховатость $Ra = 0,095$ мкм при заданной $Ra = 0,16$ мкм;
- 2) физико-механические параметры качества поверхностного слоя – остаточные напряжения, микротвердость и микроструктура – соответствуют заданным требованиям и носят благоприятный характер;

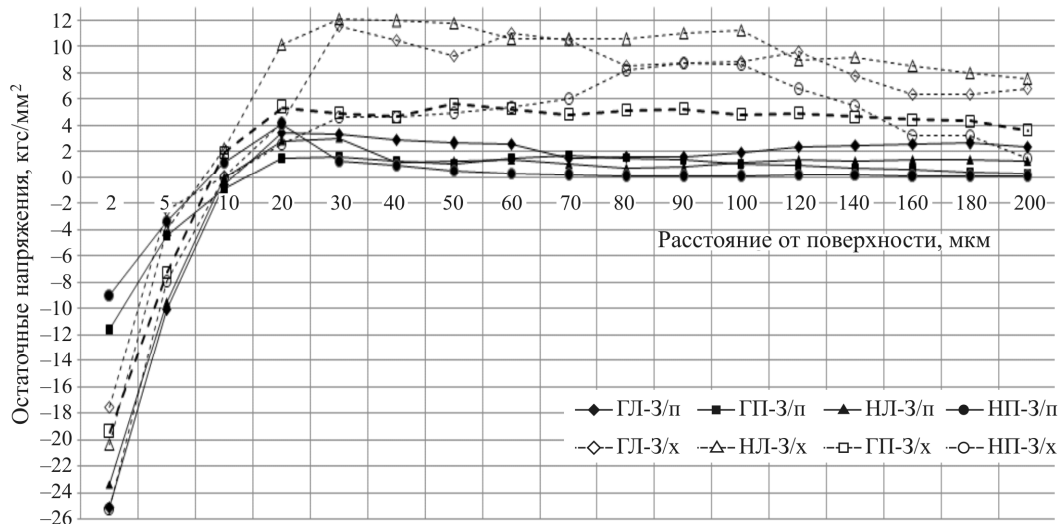


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений по глубине

3) сравнительный анализ показал, что операция зубошлифования комбинированным червячным кругом, по сравнению с зубохонингованием, снижает погрешности изготовления зубчатого венца и шероховатость профиля;

4) микроструктура хонингованной и полированной поверхностей не отличается, величины остаточных напряжений и микротвердости соизмеримы.

Таким образом, применение совмещенной технологии окончательной обработки зубчатого венца обеспечивает заданную точность и качество поверхностного слоя при увеличении производительности в 1,6 раз.

Статья подготовлена в рамках освоения курса повышения квалификации преподавателей «Профессионально-ориентированный английский язык для научно-педагогических работников Пермского национального исследовательского университета по направлениям “Машиностроение” и “Технологии материалов”». Авторы выражают благодарность ПНИПУ за повышение квалификации по дополнительному профессиональному образованию.

Список литературы

1. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: справ. / под ред. Э.Б. Вулгакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии / ИЦ ДГТУ. – Ростов н/Д, 2008. – 694 с.
3. Безъязычный В.Ф., Водолагин А.Л. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и явление технологической наследственности: учеб. пособие. – Рыбинск, 2011. – 87 с.
4. Безъязычный В.Ф., Водолагин А.Л. Исследование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин с учетом техно-

логической наследственности // Вестник РГАТА. – 2008. – № 1. – С. 15–20.

5. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, А.М. Дальский, Ю.М. Золотаревский, А.И. Кондаков; под ред. А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.

6. Васильев А.С. Статистическая модель трансформации свойств изделий в технологических средах // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 13–20.

7. Применение различных методов упрочняющей обработки деталей с целью повышения сопротивления усталостному разрушению / А.С. Горбунов, В.Ф. Макаров, С.П. Никитин, М.В. Песин // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 9 (204). – С. 28–31.

8. Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Влияние последовательности обработки спирально-конических шестерен на распределение остаточных напряжений и величину наклепа поверхностного слоя зубьев // Технология машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 9–12.

9. Горбунов А.С., Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А. Формирование параметров качества поверхностного слоя зубьев спирально-конических шестерен с учетом влияния технологической наследственности // Научное наследие в машиностроении. – 2015. – № 4 (46). – С. 40–47.

10. Горбунов А.С., Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А. Современные методы исследования наследственных технологических остаточных напряжений зубьев спирально-конических шестерен и их взаимосвязи с усталостной прочностью // Справочник. Инженерный журнал. – 2015. – № 10 (223). – С. 56–61.

11. Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А., Горбунов А.С. Повышение усталостной прочности спирально-конических зубьев шестерен // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 3 (42). – С. 114–131.

12. Макаров В.Ф., Горбунов А.С. Исследование влияния технологической наследственности при обработке зубьев шестерен на качество поверхностного слоя и усталостную прочность // Надежность и качество: тр. междунар. симп. – 2013. – Т. 2. – С. 158–161.

13. Дальский А.М. Аналитическое и графическое описание механизма технологического наследования // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1996. – № 3. – С. 29–35.
14. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурич И.П. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. – М.: Высш. шк., 2001. – 496 с.
15. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.
16. Калашников А.С. Технология изготовления зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
17. Киричек А.В., Федонин О.Н., Петрешин Д.И. Технологическое повышение эксплуатационных свойств деталей машин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 4 (82). – С. 43–48.
18. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А. Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 8 (74). – С. 30–35.
19. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справ. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
20. Мамонтов В.А., Рубан А.Р. Влияние шероховатости впадин и переходных поверхностей зубьев колес, упрочняемых цементацией, на характеристики выносливости // Вестник АГТУ. – 2006. – № 2 (31). – С. 242–245.
21. Макаров В.Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: моногр. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 440 с.
22. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. – СПб.: Лань, 2013. – 320 с.
23. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 356 с.
24. Перов Э.Н., Евсин Е.А. Рациональные статистические методы обеспечения качества / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1986. – 113 с.
25. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
26. Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю. Концепция инженерии поверхностного слоя в категориях пластичности и технологического наследования // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 4. – С. 17–20.
27. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
28. Сулима А.М., Носков А.А., Серебряков Г.З. Основы технологии производства газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1996. – 408 с.
29. Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Памфилов Ю.В. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 260 с.
30. Суслов А.Г., Михайлов А.Н. Разработка наукоемких функционально-ориентированных технологий в машиностроении // Научно-технические технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.
31. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Друппов В.В. Формирование параметров качества поверхностного слоя при центробежно-ротационной обработке в среде абразива // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 10. – С. 19–24.
32. Тамаркин М.А., Мельников А.С. Инженерное обеспечение качества машин: монография / ДГТУ. – Ростов-н/Д, 2011. – 231 с.
33. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев [и др.]; под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
34. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 226 с.
35. Шапочкин В.И., Семенова Л.М., Малыхин А.Т. Повышение долговечности деталей при высокотемпературной нитроцементации с повышенным азотным потенциалом // Двигателестроение. – 1983. – № 1. – С. 37–38.
36. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. – М.: Станкин, 1999. – 494 с.
37. Ящерицин П.И., Фельдштейн Б.Э., Корниевич М.А. Теория резания: учеб. – Минск: Новое знание, 2005. – 511 с.
38. David W. Application of laser peen process to turbine engine components // Air Force Research Laboratory. 10th Conference HCF. – 2005.
39. Stadtfeld H.J., Rochester N.Y. The optimal high speed cutting of bevel gears. – USA, 2006. – 26 p.
40. Butler T., Kerner K. Us army research laboratory // 9th conference HCF. – 2004.

References

1. Aviatsionnye zubchatye peredachi i reduktory: sprav. [Aircraft Gears and Gearboxes]. Ed. E.B. Vulgakova. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 374 p.
2. Babichev A.P., Babichev I.A. Osnovy vibratsionnoi tekhnologii [Basics of Vibration Technology]. ITs DGTU. Rostov n/D, 2008, 694 p.
3. Bez"iazychnyi V.F., Vodolagin A.L. Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv detalei mashin i iavlenie tekhnologicheskoi nasledstvennosti: ucheb. Posobie [Technological maintenance of operational properties of machine parts and the phenomenon of technological heredity]. Rybinsk, 2011, 87 p.
4. Bez"iazychnyi V.F., Vodolagin A.L. Issledovanie vlianiia tekhnologicheskikh uslovii obrabotki na ekspluatatsionnye svoystva detalei mashin s uchetom tekhnologicheskoi nasledstvennosti [Study of the influence of technological conditions of processing on the operational properties of machine parts, taking into account technological heredity]. Vestnik RGATA, 2008, no. 1, pp. 15–20.
5. A.S. Vasil'ev, A.M. Dal'skii, Iu.M. Zolotarevskii, A.I. Kondakov. Napravlennoe formirovanie svoystv izdelii mashinostroeniia [Directed formation of properties of mechanical engineering products]. Ed. A.I. Kondakova. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 352 p.
6. Vasil'ev A.S. Statisticheskaia model' transformatsii svoystv izdelii v tekhnologicheskikh sredakh [Statistical model of transformation of product properties in technologi-

cal environments]. *Vestnik MGTU. Mashinostroenie*, 1997, no. 4, pp. 13–20.

7. Gorbunov A.S., Makarov V.F., Nikitin S.P., Pessin M.V. Primenenie razlichnykh metodov uprochniayushchei obrabotki detalei s tsel'iu povysheniia soprotivleniia ustalostnomu razrusheniui [Application of different methods of hardening treatment of parts to increase fatigue fracture resistance]. *Izvestiia Volgograd. gos. tekhn. universiteta*, 2017, no. 9 (204), pp. 28–31.

8. Gorbunov A.S., Makarov V.F. Vliianie posledovatel'nosti obrabotki spiral'no-konicheskikh shesteren na raspredelenie ostatochnykh napriazhenii i velichinu naklepa poverkhnostnogo sloia zub'ev [Influence of the treatment sequence of spiral bevel gears on the residual stress distribution and the size of the tooth surface layer riveting]. *Tekhnologiya mashinostroeniia*, 2012, no. 3, pp. 9–12.

9. Gorbunov A.S., Makarov V.F., Vorozhtsova N.A. Formirovanie parametrov kachestva poverkhnostnogo sloia zub'ev spiral'no-konicheskikh shesteren s uchetom vliianiia tekhnologicheskoi nasledstvennosti [Formation of quality parameters of the surface layer of spiral bevel gear teeth taking into account the influence of technological heredity]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroeni*, 2015, no. 4 (46), pp. 40–47.

10. Gorbunov A.S., Makarov V.F., Vorozhtsova N.A. Sovremennye metody issledovaniia nasledstvennykh tekhnologicheskikh ostatochnykh napriazhenii zub'ev spiral'no-konicheskikh shesteren i ikh vzaimosviazi s ustalostnoi prochnost'iu [Modern methods of investigation of hereditary technological residual stresses of spiral bevel gear teeth and their relationship with fatigue resistance]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2015, no. 10 (223), pp. 56–61.

11. Makarov V.F., Vorozhtsova N.A., Gorbunov A.S. Povysenie ustalostnoi prochnosti spiral'no-konicheskikh zub'ev shesteren [Increasing the fatigue strength of spiral bevel gear teeth]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaiia tekhnika*, 2015, no. 3 (42), pp. 114–131.

12. Makarov V.F., Gorbunov A.S. Issledovanie vliianiia tekhnologicheskoi nasledstvennosti pri obrabotke zub'ev shesteren na kachestvo poverkhnostnogo sloia i ustalostnuiu prochnost' [Investigation of the influence of technological heredity in the processing of gear teeth on the surface layer quality and fatigue resistance]. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simp.*, 2013, vol. 2, pp. 158–161.

13. Dal'skii A.M. Analiticheskoe i graficheskoe opisaniie mekhanizma tekhnologicheskogo nasledovaniia [Analytical and graphical description of the technological inheritance mechanism]. *Vestnik MGTU. Mashinostroenie*, 1996, no. 3, pp. 29–35.

14. Eliseev Iu.S., Krymov V.V., Nezhurin I.P. Proizvodstvo zubchatykh koles gazoturbinykh dvigatelei [Manufacture of gears of gas turbine engines]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001, 496 p.

15. Zinchenko V.M. Inzheneriia poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimikotermicheskoi obrabotki [Gear surface engineering by chemical and thermal treatment methods]. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 2001, 303 p.

16. Kalashnikov A.S. Tekhnologiya izgotovleniia zubchatykh koles [Gear manufacturing technology]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 480 p.

17. Kirichek A.V., Fedonin O.N., Petreshin D.I. Tekhnologicheskoe povysenie ekspluatatsionnykh svoystv detalei mashin [Technological improvement of machine parts operational properties]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroeni*, 2018, no. 4 (82), pp. 43–48.

18. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Silant'ev S.A. Tekhnologiya kombinirovannogo uprochneniia volnoi deformatsii i tsementatsiei konstruktsionnykh nizkolegirovannykh stalei [Technology of combined hardening by deformation wave and cementation of structural low-alloy steels]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroeni*, 2017, no. 8 (74), pp. 30–35.

19. Kuznetsov N.D., Tseitlin V.I., Volkov V.I. Tekhnologicheskie metody povysheniia nadezhnosti detalei mashin: sprav [Technological methods to increase reliability of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 304 p.

20. Mamontov V.A., Ruban A.R. Vliianie sherokhovatosti vpadin i perekhodnykh poverkhnostei zub'ev koles, uprochniayemykh tsementatsiei, na kharakteristiki vynoslivosti [Influence of Cemented Wheel Teeth Roughness and Transition Surfaces on Endurance Performance]. *Vestnik AGTU*, 2006, no. 2 (31), pp. 242–245.

21. Makarov V.F. Optimizatsiia protiyagivaniia trudnoobrabatyvaemykh materialov: monogr. [Optimization of pulling of hard-to-machine materials]. Staryi Oskol: TNT, 2014, 440 p.

22. Makarov V.F. Sovremennye metody vysoko-effektivnoi abrazivnoi obrabotki zharoprochnykh stalei i splavov [Modern methods of highly effective blasting of heat-resistant steels and alloys]. Saint-Petersburg, Lan', 2013, 320 p.

23. Odintsov L.G. Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 356 p.

24. Perov E.N., Evsin E.A. Ratsional'nye statisticheskie metody obespecheniia kachestva [Sound statistical methods of quality assurance]. Perm. gos. tekhn. un-t, 1986, 113 p.

25. Smelianskii V.M. Mekhanika uprochneniia detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Mechanics of parts hardening by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 300 p.

26. Smelianskii V.M., Bliumenshtein V.Iu. Kontseptsii inzhenerii poverkhnostnogo sloia v kategoriakh plastichnosti i tekhnologicheskogo nasledovaniia [The concept of surface layer engineering in the categories of plasticity and technological inheritance]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2001, no. 4, pp. 17–20.

27. Starkov V.K. Shlifovanie vysokoporistymi krugami [High-circle grinding]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 688 p.

28. Sulima A.M., Noskov A.A., Serebriakov G.Z. Osnovy tekhnologii proizvodstva gazoturbinykh dvigatelei [Basics of gas turbine engine technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1996, 408 p.

29. Suslov A.G., Bez'iazychnyi V.F., Pamfilov Iu.V. Inzheneriia poverkhnosti detalei [Surface Engineering of Parts]. Ed. A.G. Suslova. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 260 p.

30. Suslov A.G., Mikhailov A.N. Razrabotka naukoemkikh funktsional'no-orientirovannykh tekhnologii v mashinostroeni [Development of science-intensive function-oriented technologies in mechanical engineering]. Nau-

koemkie tekhnologii v mashinostroenii. Ed. A.G. Suslova. Moscow: Mashinostroenie, 2012, 528 p.

31. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Drupov V.V. Formirovanie parametrov kachestva poverkhnostnogo sloia pri tsentrobezno-rotatsionnoi obrabotke v srede abraziva [Formation of the surface layer quality parameters at the centrifugally-rotational treatment in the abrasive medium. *Uprochniaushchie tekhnologii i pokrytiia*, 2007, no. 10, pp. 19–24.

32. Tamarkin M.A., Mel'nikov A.S. Inzhenernoe obespechenie kachestva mashin: monografiia [Engineering quality assurance of machines: monograph]. DGTU. Rostov-n/D, 2011, 231 p.

33. A.M. Dal'skii, B.M. Bazrov, A.S. Vasil'ev et al. Tekhnologicheskaiia nasledstvennost' v mashino-stroitel'nom proizvodstve [Technological Heredity in Machine-Building Production]. Ed. A.M. Dal'skogo. Moscow: Izdatelstvo MAI, 2000, 364 p.

34. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Tiunov V.V. Tekhnologicheskie ostatochnye napriazheniia i ikh vliianie na dolgovechnost' i nadezhnost' metalloizdelii [Technological Residual Stresses and their Influence on Durability and Reliability of Metal Products]. Perm': Izdatelstvo Perm. nats. issled. politekhn. universiteta, 2012, 226 p.

35. Shapochkin V.I., Semenova L.M., Malykhin A.T. Povyshenie dolgovechnosti detalei pri vysokotemperaturnoi nitrotsementatsii s povyshennym azotnym potentsialom [The increase of parts durability at high-temperature nitro cement with increased nitrogen potential]. *Dvigatelistroenie*, 1983, no. 1, pp. 37–38.

36. Sheveleva G.I. Teoriia formoobrazovaniia i kontakta dvizhushchikhsia tel [Theory of formation and contact of moving blocks]. Moscow: Stankin, 1999, 494 p.

37. Iashcheritsin P.I., Fel'dshtein B.E., Kornievich M.A. Teoriia rezaniia: ucheb [Theory of Cutting: Teaching]. Minsk: Novoe znanie, 2005, 511 p.

38. David W. Application of laser peen process to turbin engine components [Application of laser peen process to turbin engine]. *Air Force Research Laboratory. 10th Conference HCF*. 2005.

39. Stadtfeld H.J., Rochester N.Y. The optimal high speed cutting of bevel gears [Us army research laboratory]. USA, 2006, 26 p.

40. Butler T., Kerner K. Us army research laboratory // 9th conference HCF. – 2004.

Получено 17.02.2020

Опубликовано 25.03.2020

Сведения об авторах

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

Ворожцова Наталья Андреевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: makarovv@pstu.ru.

Песин Михаил Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, и.о. декана механико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: m.pesin@mail.ru.

About authors

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

Natalia A. Vorozhtsova (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: makarovv@pstu.ru.

Mikhail V Pesin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, the Dean of Mehaniko-Technological Faculty, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: m.pesin@mail.ru.