

УДК 621.91

DOI: 10.30987/article\_5c486cc16b81f0.62003791

**Н.А. Ворожцова**, аспирант,  
**А.С. Горбунов**, ведущий специалист  
(АО «Редуктор-ПМ», г. Пермь, Комсомольский проспект, 93)

**В.Ф. Макаров**, д.т.н.  
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Комсомольский проспект, 93)  
E-mail: makarovv@pstu.ru

## Обеспечение качества зубчатого венца цилиндрических колес при обработке комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом

*Приведены результаты исследований технологических возможностей финишного зубошлифования зубчатого венца цилиндрических колес комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом с обеспечением геометрической точности и параметров качества поверхностного слоя. Даны сравнительные результаты экспериментальных исследований структуры поверхностной микротвердости, глубины ее залегания и поверхностных остаточных напряжений при финишной обработке зубчатых колес зубохонингованием и зубополированием.*

**Ключевые слова:** зубошлифование; зубохонингование; геометрическая точность; качество поверхностного слоя; комбинированный червячный круг.

**N.A. Vorozhtsova**, Post graduate student,  
**A.S. Gorbunov**, Leading expert,  
(PC "Reducer-PM", 93, Komsomolsky Avenue, Perm)  
**V.F. Makarov**, Dr. Sc. Tech.  
(Perm National Research Polytechnic University, 93, Komsomolsky Avenue, Perm)

## Quality assurance of ring gear in cylindrical wheels at processing with combined grinding-polishing worm disk

*The investigation results of technological potentialities in the finish gear grinding of a ring gear of cylindrical wheels with the combined grinding-polishing worm disk with the assurance of geometrical accuracy and quality parameters of a surface layer are shown. The comparative results of experimental investigations of the structure of surface micro-hardness, its depth and surface residual stresses at cog-wheels finish processing with gear honing and gear polish are given.*

**Keywords:** gear grinding; gear honing; geometrical accuracy; surface layer quality; combined worm disk.

Цилиндрические зубчатые колеса для авиационной промышленности изготавливают согласно ГОСТ 1643-81 по 5, 6, 7-й степеням точности. Рассмотрим обеспечение точности и качества поверхностного слоя зубчатого венца на примере цилиндрического колеса с числом зубьев  $z = 29$ ; модулем  $m = 6$ ; углом профиля зубьев  $\alpha = 28^\circ$ ; шириной зубчатого венца  $b = 48$  мм; диаметром делительной окружности  $d = 181,1$  мм.

Основные конструкторско-технологические требования, предъявляемые к зубчатому венцу, изготовленному по 5-й степени точности:

– допуск на погрешность профиля зуба  $Fa \leq 6$  мкм;

– допуск на погрешность направления зуба  $Fb \leq 8$  мкм;  
– радиальное биение зубчатого венца  $Fr \leq 25$  мкм;  
– модификация головки зуба  $fKo \leq 35 \pm 1$  мкм;  
– накопленная погрешность  $Fp \leq 25$  мкм;  
– шероховатость боковых поверхностей профиля зубьев  $Ra \leq 0,16$  мкм;  
– твердость цементированной поверхности  $HRC \geq 61$ .

Серийный технологический процесс с финишными операциями зубошлифования и зубохонингования обеспечивает вышеуказанные требования по 5-й степени точности. Опера-

ция зубошлифования обеспечивает точность формы и расположения рабочих профилей зубьев зубчатого венца с шероховатостью поверхностей  $Ra = 0,2 \dots 0,3$  мкм. Для достижения требуемой величины параметра шероховатости  $Ra = 0,16$  мкм выполняют операцию зубохонингования алмазным зубчатым хонем, который срезает неровности поверхности на профиле зуба, оставшиеся с предыдущей операции зубошлифования.

Однако финишная операция зубохонингования имеет недостатки: низкая производительность на устаревшем оборудовании; нестабильность качества и поставок алмазных хоней; использование в качестве смазочно-охлаждающей жидкости смеси керосина с минеральными маслами, что представляет собой опасность возгорания паров, и наносит вред здоровью персонала.

В связи с обозначенными недостатками операции зубохонингования, выявлена задача обеспечения требуемой шероховатости профиля зубьев в процессе зубошлифования без применения дополнительной операции. Для реализации поставленной задачи был разработан специальный комбинированный червячный круг, состоящий из шлифовальной и полировальной части. Таким образом, появилась возможность объединить два процесса шлифования и полирования в один.

С целью исследования технологических возможностей финишного зубошлифования специальным комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом зубчатый венец цилиндрических колес был обработан по двум вариантам:

1) серийный технологический процесс: зубошлифование на станке Reishauer RZ basic червячным шлифовальным кругом Norton 1 300×125×160,  $m = 6$ ,  $a = 28^\circ$ , 3GG 3NQW80J8VS3 63 m/s методом обката + зубохонингование алмазным эластичным зубчатым хонем (рис. 1, а) производства г. Львов с характеристикой рабочего слоя: связка P18, марка ACM, зернистость 28/20, концентрация алмазного порошка 100% на станке 5B913;

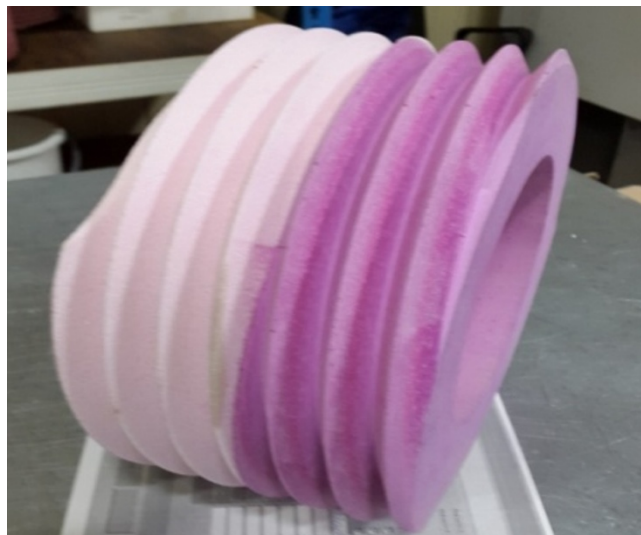
2) зубошлифование + зубополирование методом обкатного шлифования комбинированным червячным кругом Reishauer AG 1 275×125×160,  $m = 6$ ,  $a = 28^\circ$ , A 80 G 8 V 0167/EK800 72 m/s (рис. 1, б) на станке Reishauer RZ basic.

Шлифование зубчатого венца по второму варианту осуществлялось за счет ступенчатого снятия припуска и постепенного смещения зоны контакта детали с кругом от

шлифовальной к полировальной части. Параметры процесса зубошлифования представлены на рис. 2.



а)



б)

**Рис. 1. Инструменты для финишных операций:**

а – алмазный эластичный зубчатый хонь;  
б – комбинированный шлифовально-полировальный червячный круг

Если режимы резания для операции финишного зубошлифования первой частью комбинированного шлифовально-полировального червячного круга можно взять с серийной операции зубошлифования, то для полировальной части круга необходимо найти такие параметры процесса шлифования, которые бы обеспечивали достижение необходимой величины микронеровности профиля зубьев без снижения достигнутых параметров качества на стадии зубошлифования. Для решения данной задачи были определены варьируемые параметры 5-й ступени: количество ходов и сдвиг шифтинга. Остальные параметры процесса оставались

неизменными.

Полученные результаты по двум вариантам обработки зубчатого венца сведены в табл.1. Параметры точности зубьев зубчатого колеса и погрешности профилей зубьев исследовали

на координатно-измерительной машине Р-40 фирмы Klingelnberg. Исследования параметров шероховатости профилей зубьев осуществлялись с применением профилометра фирмы MAHR Surf M300 C.

**REISHAUER**

Название загот 0309 / Satellit    Инф загот 1 m6.0, EW28, z29    Инф загот 3 SLS m6.0, EW28, 3GG  
 Инф загот 2 DKS    Инф загот 4

**Параметр шлиф**

Сум подач рад: 0,480  
 норм:

Ступень активна  **Ступень V**

Дополн путь - конец положение хода

Маятниковое движение

	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	Ступень 4	Ступень 5
Число ходов	1	2	1	1	4
Число оборотов шлиф круга 1/мин	-2470	-2470	-2470	-2470	-2500
Радиальн подача на раб ход мм	0,165	0,100	0,065	0,030	0,005
Скорость радиальн подачи мм/мин	60,0	60,0	60,0	1,5	1,5
Подача Z1 мм/об	0,50	0,50	0,50	0,10	0,60
Подача Y1 мм/ммхода	-0,045	-0,040	-0,030	-0,025	0,000
Сдвиг шифтинга мм	0,000	0,000	18,000	-18,000	0,500
Охлаждающее масло %	100	100	100	100	100
Накопл радиальная подача мм	0,165	0,200	0,065	0,030	0,020

Встреч шлиф - без МОС

Рис. 2. Параметры зубошлифования комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом

1. Результаты контроля параметров точности и шероховатости профиля зубьев

Операция	Параметры процесса полирования		Параметры точности, мкм								Ra, мкм
			точности шага			погрешности про-филя			погрешности направления		
	сдвиг шифтинга, мм	кол-во проходов	Fr	Fp	fp	Fa	ffa	fKo	Fb	ffb	
з/шлифование	-	-	5,3	3,5	2,3	2,8	2,9	36	4,3	2	0,34
з/хонингование	-	-	4,2	4,2	0,7	5,1	5,1	35,4	4,7	2,7	0,16
з/шлифование + з/полирование №1	0	2	4,2	4,8	0,8	3,8	3,9	31,8	3,3	2,0	0,25
з/шлифование + з/полирование №2	0	3	5,3	3,5	2,3	1,8	1,7	36,0	1,0	0,9	0,2
з/шлифование + з/полирование №3	+0,5	3	7,6	8,1	1,1	2,8	2,0	31,7	2,6	1,9	0,14
з/шлифование + з/полирование №4	-0,5	3	7,9	8,0	0,9	4,7	2,0	32,1	1,8	1,4	0,17
з/шлифование + з/полирование №5	+0,5	4	3,8	5,8	1,2	1,6	1,6	32,9	3,2	1,8	0,095

Погрешности геометрических параметров после операции финишного зубошлифования комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом меньше чем при серийном технологическом процессе. Это объясняется снижением шероховатости поверхности профиля зуба до  $Ra = 0,095$  мкм и исключением погрешностей изготовления алмазного хона.

Для проведения исследований физико-механических параметров качества поверхностного слоя – микротвердости и микроструктуры зубчатого венца цилиндрических колес, обработанных по двум схемам, на электроэрозионном станке с ЧПУ фирмы Sodick (Япония) вырезались образцы в виде одного зуба (рис. 3).



а)



б)

**Рис. 3. Схема вырезки образцов для контроля микротвердости и микроструктуры:**

а – общий вид цилиндрического колеса; б – общий вид образца

Внешний вид исследован с помощью стереомикроскопа Stemi 2000-C. Металлографические исследования микрошлифов осуществлены на оптическом инвертированном микроскопе Axivert 40 MAT. Оценка микротвердости проведена по кривым распределения микротвердости методом восстановленного отпечатка по шкале Виккерса с помощью микротвердомера MICROMET 5104. Все приборы оснащены фотокамерой и программой анализа изображений Thixomet PRO. Также выполняли контроль прижогов методом травления и методом регистрации шумов Баркгаузена [1].

Микроструктура цементированного слоя после зубошлифования, зубополирования и зубохонингования не изменяется и является удовлетворительной, состоит из высокоуглеродистого мелкоигольчатого мартенсита. Микроструктура сердцевины 18X2H4АШ удовлетворительная, состоит из низкоуглеродистого мелкоигольчатого мартенсита. Микроструктура поверхностного слоя образцов, прошедших газовую цементацию приведена на рис. 4.

График распределения микротвердости образцов после газовой цементации и последующей механической обработки по серийному технологическому процессу и экспериментальному варианту приведен на рис. 5.

В результате исследования микротвердости цементированной поверхности зубчатого венца установлено, что требование  $HRC \geq 61$  выполнено для двух вариантов обработки. Минимальное значение по шкале Виккерса не менее  $HV \geq 715$ . Твердость при зубохонинговании начинает приближаться к минимальному значению на расстоянии 395 мкм от поверхности. Микротвердость образцов после зубохонингования (головки правой и головки левой) на расстоянии 20 мкм от поверхности отличается на 40 единиц. Микротвердость правой и левой ножки на этом же расстоянии от поверхности отличается на 5 единиц.

Если сравнить микротвердость на правых головках после зубохонингования и зубополирования, то после зубополирования микротвердость не больше 55 единиц. В то же время как левая головка после зубохонингования на 40 единиц больше чем после зубополирования. Несущественный разброс значений микротвердости в пределах одного образца обусловлен неоднородностью нанесения покрытия и погрешностью измерения. Наиболее заметный перепад



значений твердости образцов, обработанных с различной финишной операцией, ожидаем, так как детали из которых они вырезаны проходили химико-термическую обработку в разных партиях. Поэтому можно сделать

вывод, что отличие твердости на образцах по двум маршрутам обработки не является существенным и объясняется тем, что детали проходили процесс цементации в различных партиях.

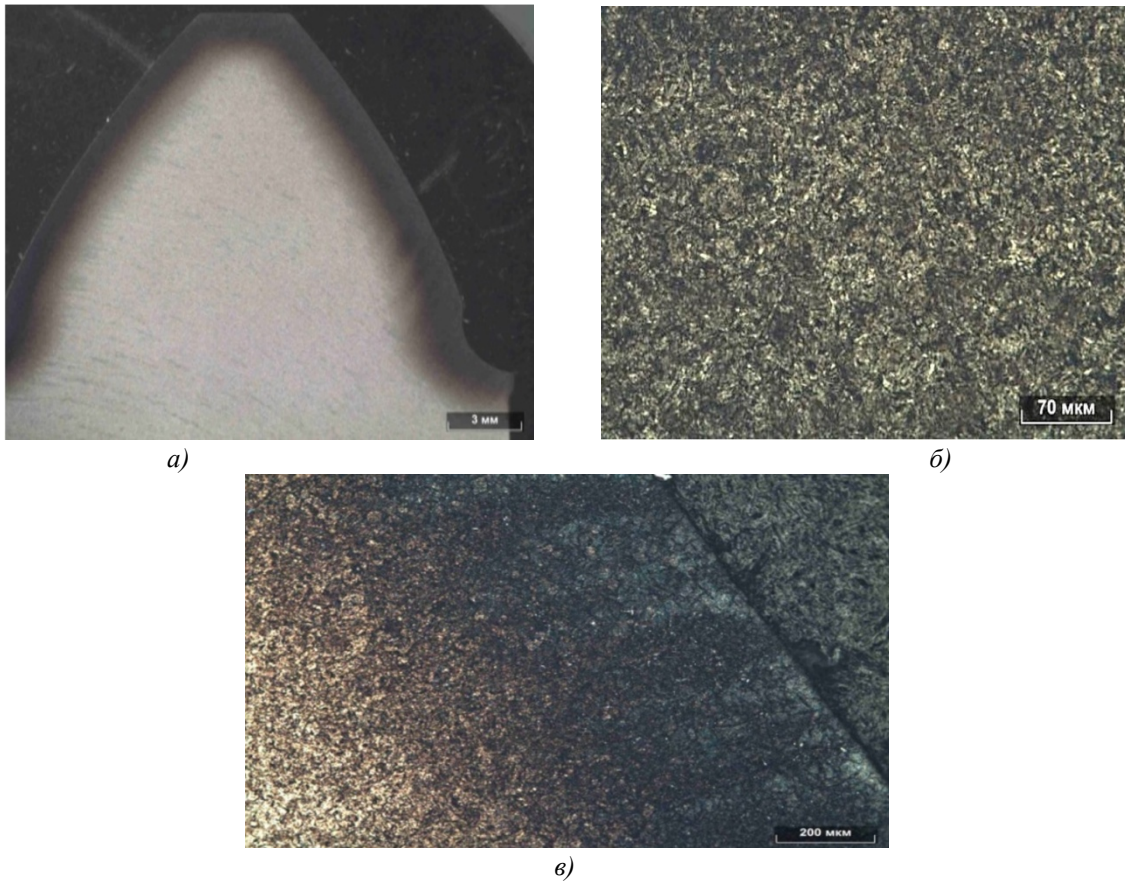


Рис. 4. Микроструктура образцов:

а – общий вид; б – микроструктура цементированного слоя; в – микроструктура пограничной зоны

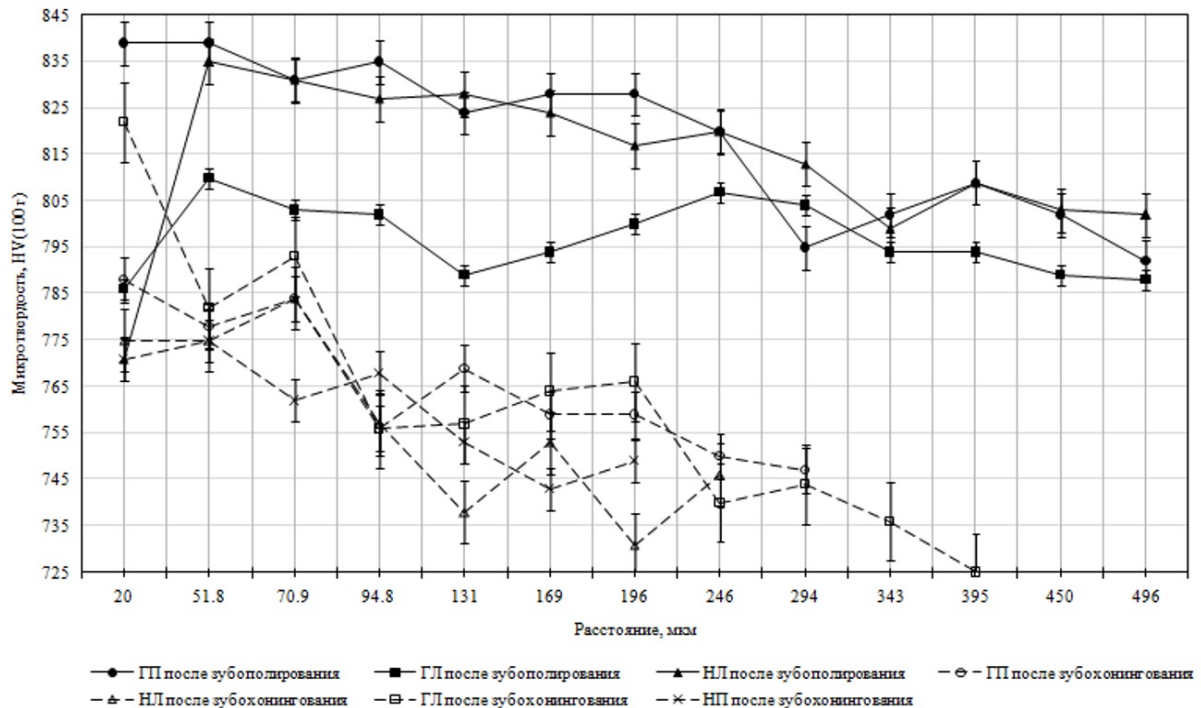


Рис. 5. График распределения микротвердости цементированной поверхности зуба

Для исследования остаточных напряжений разрушающим методом Н.Н. Давиденкова на установке ПИОН-2 по методике ПИ 1.4.804-84 (НИАТ-1985 г.) вырезались образцы из

боковых эвольвентных поверхностей зубьев электроэрозионным методом согласно схеме, изображенной на рис. 6.

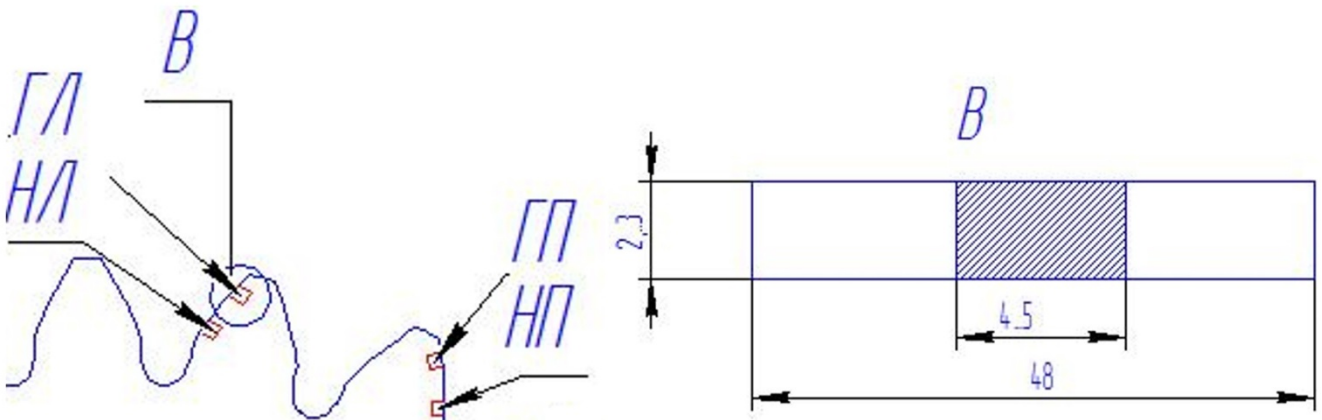


Рис. 6. Схема вырезки образцов для измерения остаточных напряжений:

Г – головка; Н – ножка; Л – левая; П – правая сторона

На рис. 7 изображены эпюры остаточных напряжений образцов головки и ножки с правой и левой сторон после зубополирования и зубохонингования.

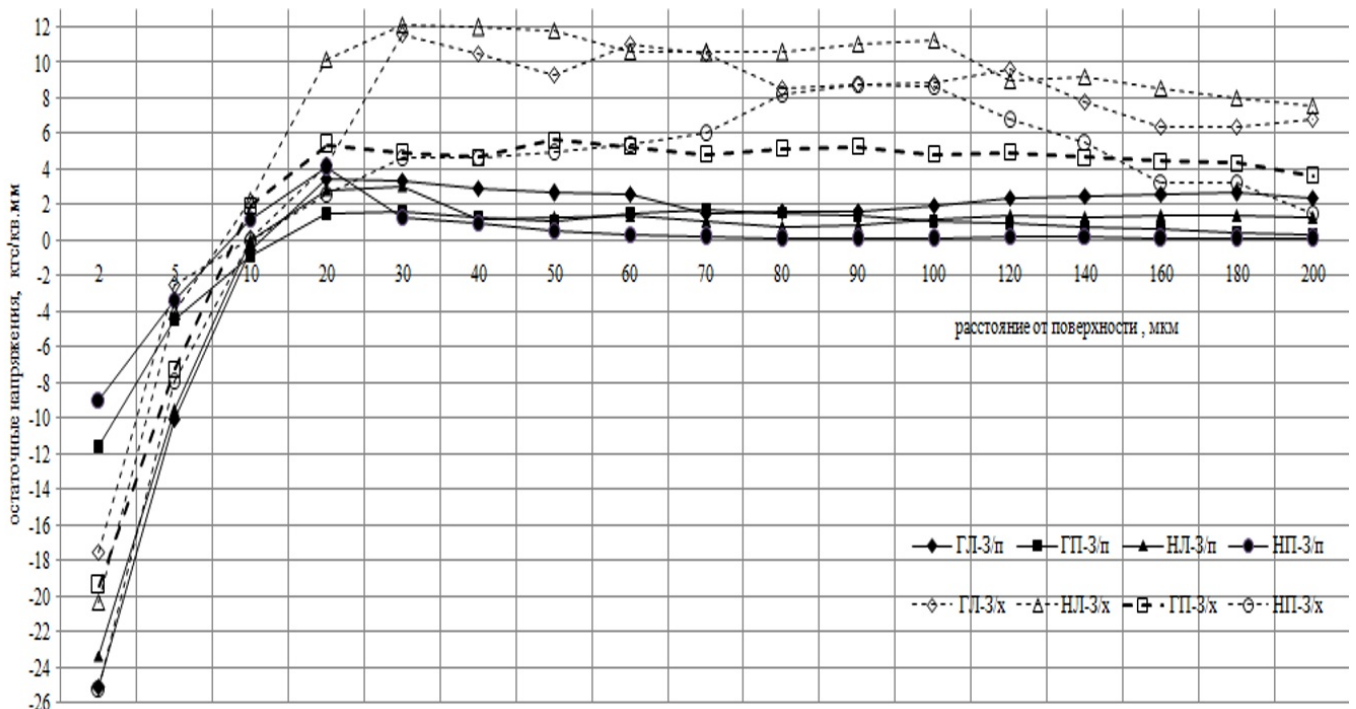


Рис. 7. Эпюры распределения остаточных напряжений на образцах

В поверхностном слое зубьев образуются сжимающие напряжения не зависимо от финишной операции. Существенной разницы по величине и характеру распределения остаточных напряжений по глубине между образцами на головке и ножке зубьев с левой и правой стороны не выявлено. Наибольшие

сжимающие напряжения обнаружены на левой ножке после зубополирования и на правой ножке после зубохонингования, а наименьшие – при операции зубошлифования. Наибольшие растягивающие напряжения обнаружены на левой ножке после зубохонингования. В целом распределения

остаточных напряжений на образцах с одного зуба после операции зубополирования наиболее благоприятны, так как имеют минимальные растягивающие напряжения на большем расстоянии от поверхности.

В результате исследования технологических возможностей финишного зубошлифования зубчатого венца цилиндрических колес комбинированными шлифовально-полировальными червячными кругами получены требуемые параметры качества поверхностного слоя и геометрической точности.

Процесс зубошлифования комбинированными шлифовально-полировальными кругами позволяет снизить  $Fa$  погрешность профиля с 5,1 до 1,6 мкм, в том числе за счет снижения величины шероховатости с  $Ra = 0,16$  мкм до  $Ra = 0,095$  мкм. При этом физико-механические параметры качества поверхностного слоя – остаточные напряжения, микротвердость и микроструктура соответствуют заданным требованиям. Таким образом, применение новой технологии чистовой обработки будет способствовать повышению надежности и долговечности работы цилиндрических зубчатых колес.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбунов, А.С., Макаров, В.Ф., Ворожцова, Н.А. Формирование параметров качества поверхностного слоя зубьев спирально-конических шестерен с учетом влияния технологической наследственности // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 4(46). – С. 40-47.
2. Ширяев, А.А., Макаров, В.Ф., Горбунов, А.С. Исследование возможности контроля прижогов в шестернях методом регистрации шумов Баркгаузена // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – № 2. – С.82-87.

## REFERENCES

1. Gorbunov, A.S., Makarov, V.F., Vorozhtsova, N.A. Quality parameter formation in surface layer of helical-bevel gear teeth taking into account technological heredity impact // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. - 2015. - No.4 (46). - pp. 40-47.
2. Shiryaev, A.A., Makarov, V.F., Gorbunov, A.S. Investigation of burn control possibility in gears through Barkhausen methods of noise recording // *Dynamics of Systems, Machinery and Mechanisms*. - 2018. - No.2. - pp. 82-87.

Рецензент д.т.н. В.И. Свирицев

### Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

**Обращайтесь в редакцию! E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)**