

УДК 621.923.4

А. П. Минаков, М. Е. Лустенков, И. Д. Камчицкая, П. В. Афанасьев

ВОЛНИСТОСТЬ И ОЦЕНКА ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

UDC 621.923.4

A. P. Minakov, M. E. Lustenkov, I. D. Kamchitskaya, P. V. Afanasiev

WAVINESS AND ESTIMATION OF ITS EFFECT ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF MACHINE COMPONENTS

Аннотация

Рассмотрены основные параметры качества поверхности по волнистости по ГОСТ Р ИСО 4287–2014, выполнен сравнительный анализ эксплуатационных свойств поверхностей после различных видов обработки поверхностным пластическим деформированием.

Ключевые слова:

поверхностное пластическое деформирование, пневмоцентробежное полирование, параметры волнистости, поверхность, профильный метод.

Abstract

The main parameters of surface quality in terms of waviness are considered in accordance with GOST R ISO 4287–2014, and a comparative analysis of the performance properties of surfaces subjected to various types of surface plastic deformation treatment is presented.

Keywords:

surface plastic deformation, pneumatic centrifugal polishing, waviness parameters, surface, profile method.

Введение

Эксплуатационные свойства деталей машин зависят от состояния поверхностного слоя, на которое влияет способ их обработки. Качество поверхностного слоя оценивается совокупностью геометрических параметров и физико-механических свойств. Геометрические параметры, оценивающие качество поверхностного слоя, представлены в табл. 1 [1].

Из табл. 1 следует, что волнистость занимает промежуточное положение между макроотклонениями формы и шероховатостью поверхности.

Под волнистостью поверхности

понимается совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину.

Стандарта на волнистость нет. Есть рекомендации ISO, согласно которым предусмотрено два параметра: Sw – шаг волнистости, Wz – высота волнистости (рис. 1).

В настоящее время появилась необходимость более полной и разносторонней оценки и описания волнистости поверхности. Два показателя качества по рекомендации ISO уже не могут описать волнистость поверхности и оценить ее эксплуатационные свойства.



Табл. 1. Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с геометрическими характеристиками качества поверхностей

Эксплуатационное свойство	Геометрические характеристики поверхности												
	Макроотклонение		Волнистость			Шероховатость							
	H_{max}	H_p	W_a	W_{max}	S_w	Ra	Rz	R_{max}	S_m	S	t_p	r	r'
Контактная жесткость	+	+*	+	+	+	+	+	+	+	0	+*	+*	0
Износостойкость	+	+*	+	+	+	+	+	+	+	0	+*	+*	0
Трение	+	+*	+*	+	+*	+*	+	+	+*	+	+*	+*	+
Усталостная прочность	0	0	0	+*	+	+	+	+*	+	0	0	0	+*
Виброустойчивость	0	0	+	0	+	+	+	+	+*	0	+*	+*	0
Коррозионная стойкость	0	0	+*	+	+	+	+	+	+*	+	+	0	+
Герметичность соединения	+	+*	+*	+	+	+*	+	+	+	+	+*	0	0
Прочность соединения с натягом	+	+*	+	0	+	+	+	0	+	0	+*	+*	0
Прочность сцеплений покрытий	+	+	+	+	+	+	+*	+	+*	0	+	+	+
Обтекаемость газами и жидкостями	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+*	+*	+	+*

Примечание – * – основное влияние; + – оказывает влияние; 0 – не оказывает влияние

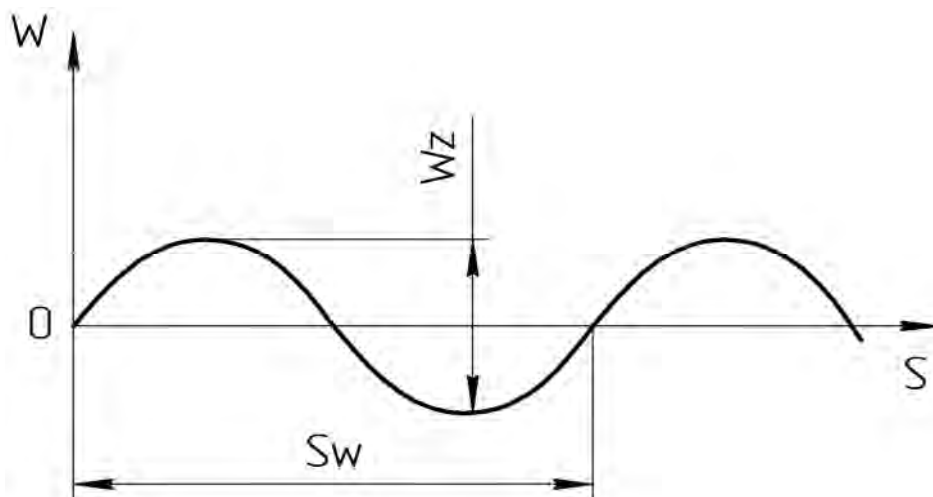


Рис. 1. Параметры волнистости

В ГОСТ Р ИСО 4287–2014 [2] волнистость рассмотрена более подробно и определяется через W -параметры (W -parameter), рассчитываемые на ос-

новании профиля волнистости.

1. Параметры амплитуды:

W_p – максимальная высота пика профиля Z_p в пределах базовой



длины (рис. 2);

W_v – наибольшая глубина впадины профиля Z_v в пределах базовой длины (рис. 3);

W_z – максимальная высота профиля;

W_c – средняя высота элементов профиля (рис. 4); требует различения высот и расстояний. Если не указаны требования, то различение высот по умолчанию должно составлять 10 % от значения W_z , а различение расстояний по умолчанию должно составлять 1 % от базовой длины. Должны быть соблюдены оба условия;

W_t – общая высота профиля;

W_a – арифметическое среднее отклонение оцениваемого профиля;

W_q – среднеквадратичное откло-

нение оцениваемого профиля;

W_{sk} – асимметрия оцениваемого профиля; характеризует асимметрию вероятностной плотности распределения значений ординаты W_{q3} . На этот параметр существенно влияют изолированные пики или изолированные впадины;

W_q – среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля;

W_{qu} – эксцесс оцениваемого профиля; характеризует остроту вероятностной плотности распределения значений ординаты W_{q4} .

2. Параметр расстояния:

W_{sm} – средняя ширина элементов профиля.

3. Кривые Эбботта-Файрстоуна и связанные с ними параметры.

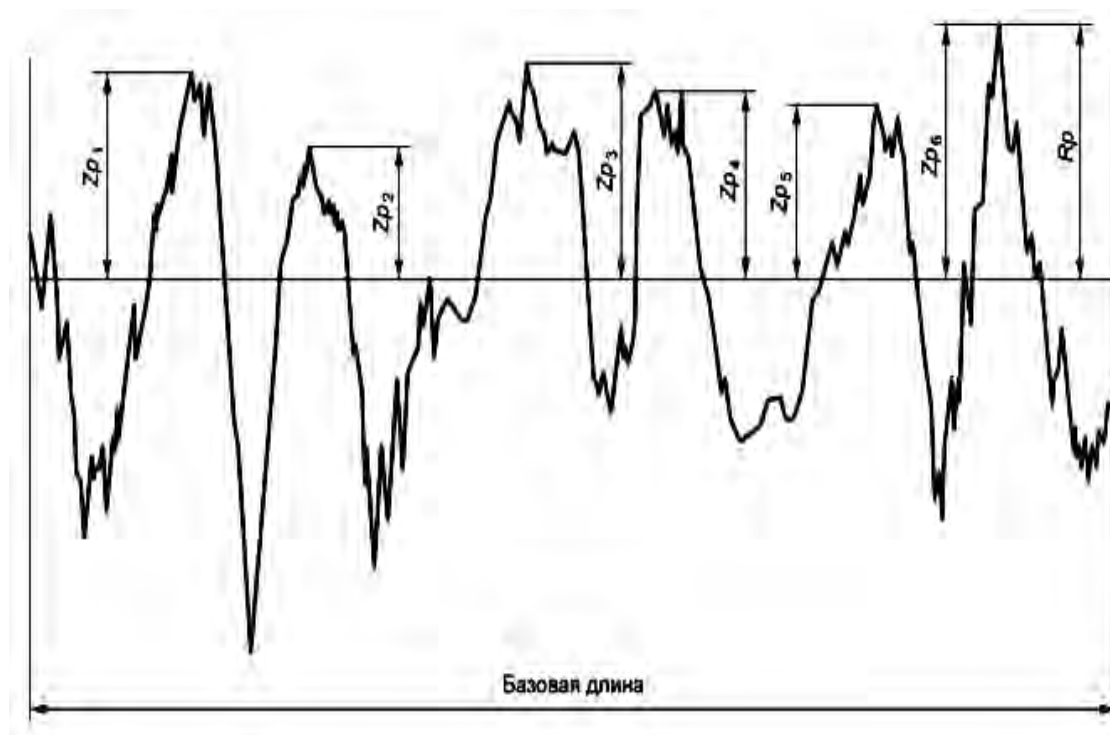


Рис. 2. Максимальная высота пика профиля

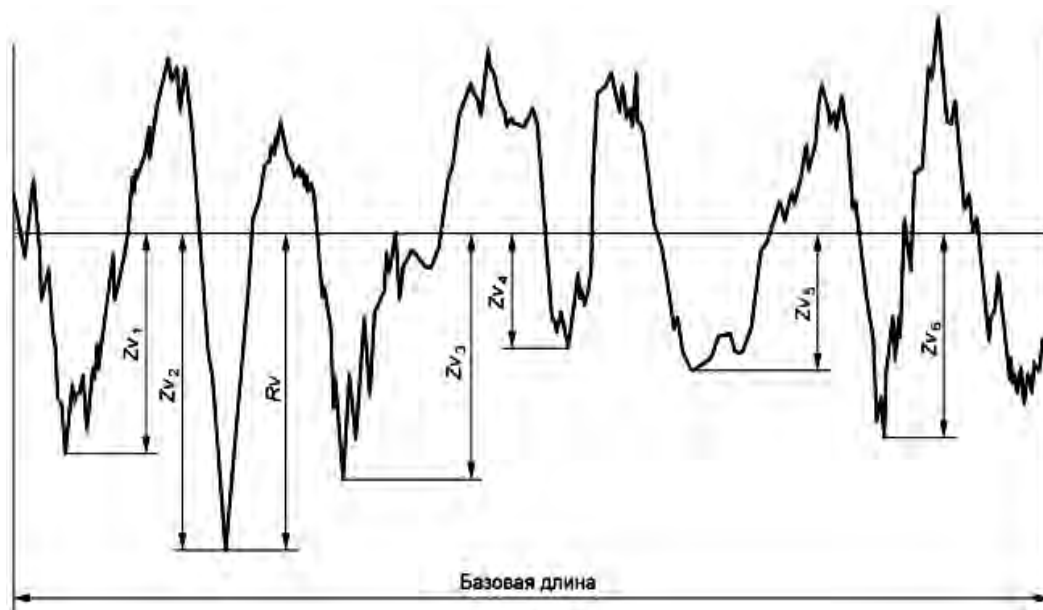


Рис. 3. Наибольшая глубина впадины профиля

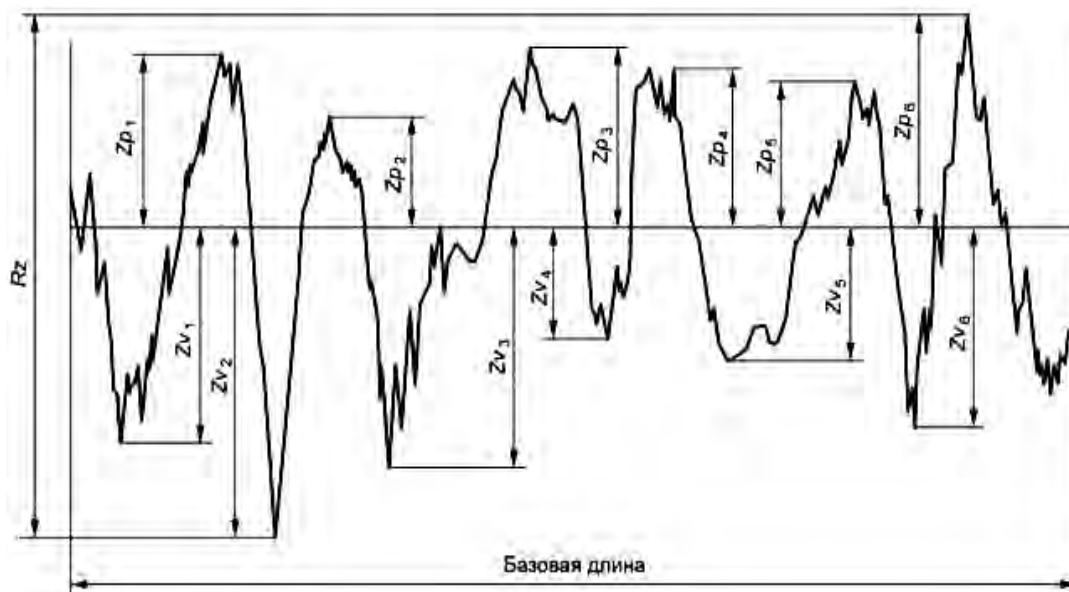


Рис. 4. Максимальная высота профиля

В [3–5] установлена связь между параметрами качества поверхностного слоя деталей машин и их эксплуатационными свойствами. Каждому технологическому методу обработки соответствуют свои определенные диапазоны параметров волнистости Wz и Sw , кото-

рых недостаточно для оценки свойств поверхности.

Поверхности с одинаковыми значениями волнистости Wz и Sw , которые получены различными видами обработки, могут иметь и различные эксплуатационные характеристики. Поэтому тре-



буется проведение исследований волнистости поверхностей после различных способов поверхностно-пластического деформирования (ППД) в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287–2014.

Оценка состояния поверхности по волнистости после различных видов обработки ППД

Для оценки волнистости, получаемой способами поверхностной пластической деформации, были выбраны следующие способы: алмазное выглаживание, раскатывание с применением жесткого шарикового раскатника и пневмоцентробежного полирования (ПЦП).

В качестве заготовки для последующего применения способов ППД были изготовлены модельные образцы посадочных мест корпусов гидроуси-

лителей для установки золотников – втулки из чугуна марки ВЧ-50 (НВ 187...255) с размерами: длина $L = 100...150$ мм, внутренний номинальный диаметр $d_{\text{овт}} = 40$ мм, наружный диаметр $D = 65$ мм, исходная шероховатость поверхности получена черновым хонингованием ($Ra_{\text{исх}} = 1,5...1,6$ мкм).

Исследование параметров качества обработанной поверхности способами ППД и заготовок после хонингования проводили с использованием профилометра SurfTest SJ-410 Mitutoyo, который позволяет измерять помимо параметров шероховатости также и параметры волнистости.

На рис. 5 и в табл. 2 представлены характеристики исходных поверхностей заготовок после черного хонингования (исходная поверхность под ППД).

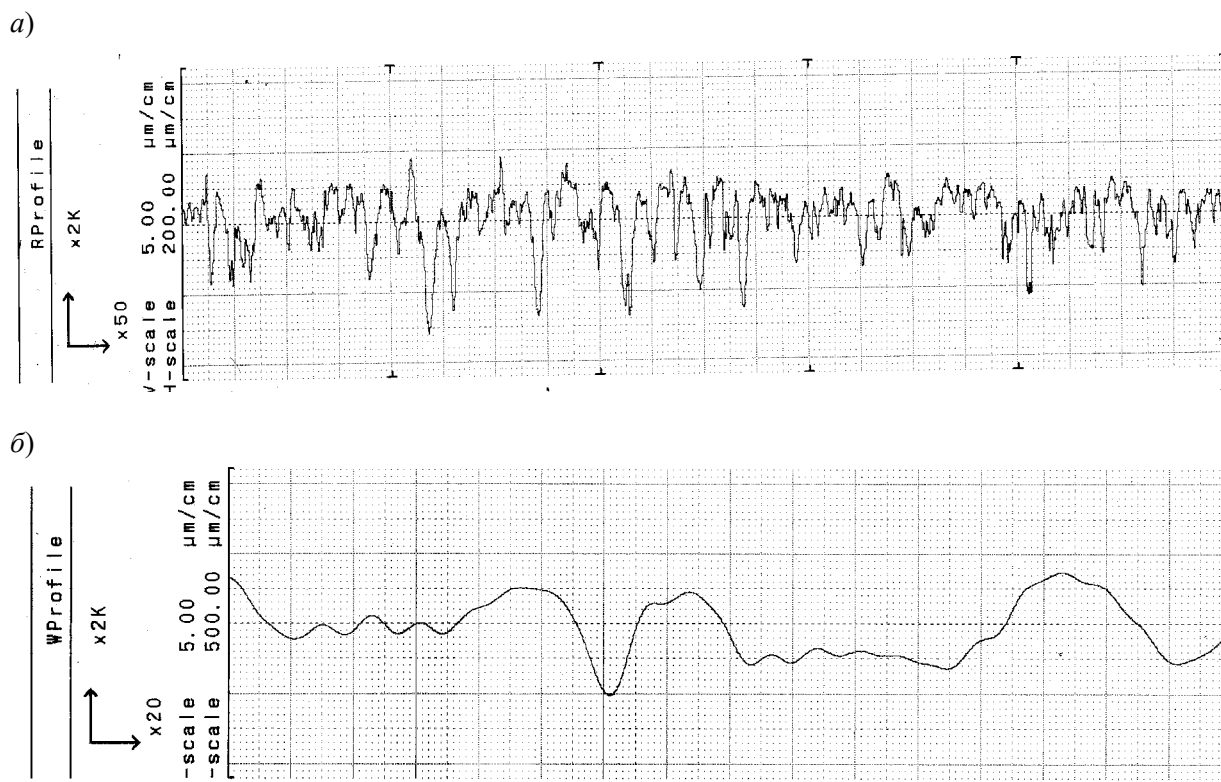


Рис. 5. Профилограммы исходных поверхностей заготовок после черного хонингования: *a* – материал: ВЧ-50 с параметром шероховатости $Ra = 1,5...1,6$ мкм; *б* – материал: ВЧ-50 с параметром волнистости $Wa = 1,8...1,9$ мкм



Табл. 2. Параметры геометрии исходной поверхности заготовок после черного хонингования

Заготовка для дальнейшей обработки	Параметры шероховатости			Параметры волнистости		
	Ra, мкм	Rsm, мкм	Rc, мкм	Wa, мкм	Wsm, мкм	Wc, мкм
Материал: ВЧ-50	1,5...1,6	105,0	5,566	1,8...1,9	2310,0	6,034

Примечание – Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости; Wa – среднее арифметическое отклонение профиля волнистости; Rsm – средняя ширина элементов профиля шероховатости; Wsm – средняя ширина элементов профиля волнистости; Rc – средняя высота элементов профиля шероховатости; Wc – средняя высота элементов профиля волнистости

Обработка заготовок после черного хонингования из чугуна ВЧ-50 алмазным выглаживателем. Условия проведения эксперимента: применение алмазного наконечника с номинальным размером R сферы алмаза – 2,5 мм, установка алмазного наконечника в жесткую оправку. Режимы выглаживания: подача – 0,06 мм/об, скорость – 50 м/мин. Число проходов – один. На рис. 6 представлены профилограммы поверхностей заготовок после алмазного выглаживания.

Обработка заготовок после черного хонингования из чугуна ВЧ-50

жестким роликовым раскатником. Условия проведения эксперимента: инструмент – жесткий многошариковый раскатник (по ГОСТ 17573–72 и ГОСТ 17574–72) с количество шаров – 6 шт., диаметр шаров – 10,319 мм, материал шаров – ШХ15.

Режимы раскатывания: осевая подача – 0,3 мм/об, частота вращения заготовки – 150 мм/об. Число проходов – два. На рис. 7 представлены профилограммы поверхностей заготовок после раскатывания жестким шариковым раскатником.

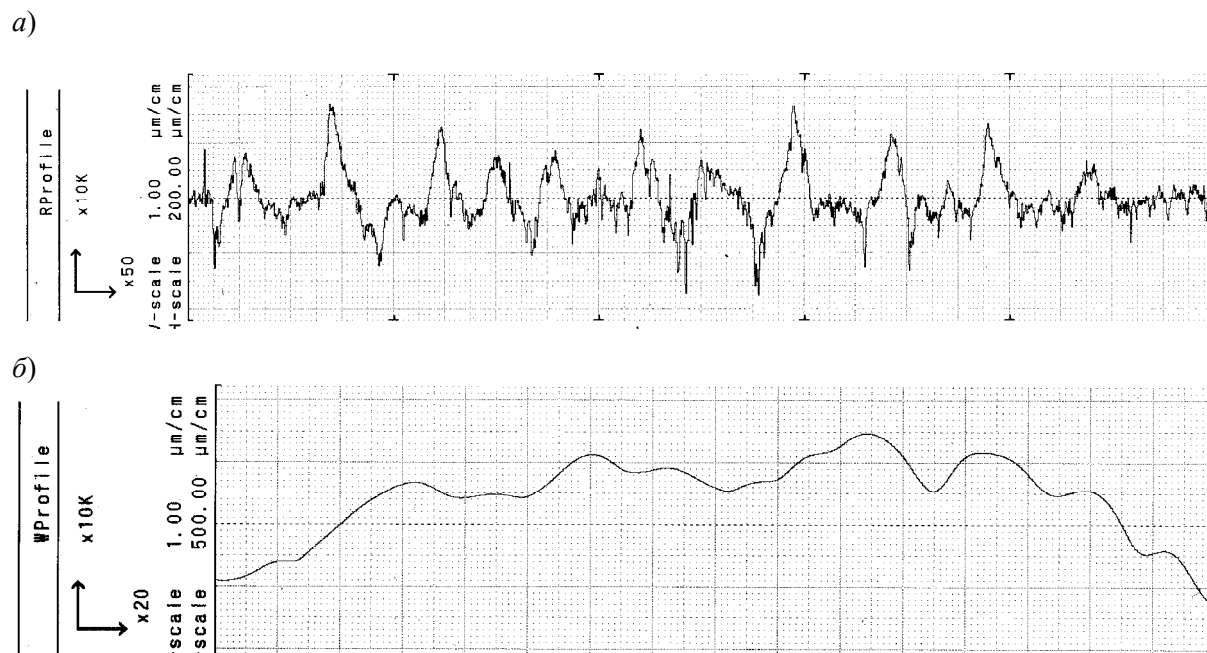
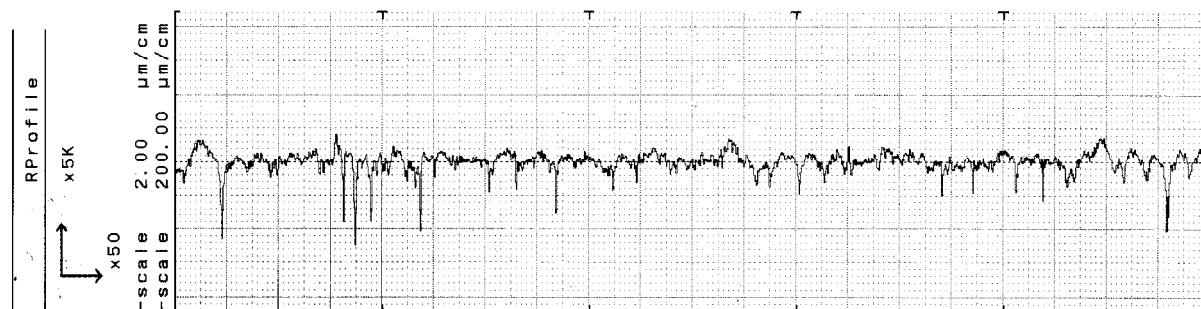


Рис. 6. Профилограммы поверхностей заготовок после алмазного выглаживания: а – материал ВЧ-50 с параметром шероховатости Ra = 0,3...0,4 мкм; б – материал ВЧ-50 с параметром волнистости Wa = 0,7...0,75 мкм



а)



б)

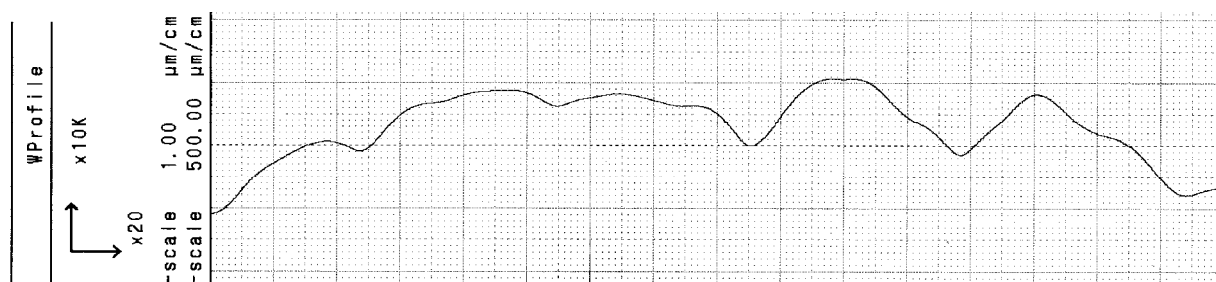


Рис. 7. Профилограммы поверхностей заготовок после раскатывания жестким шариковым раскатником: а – материал: ВЧ-50 с параметром шероховатости $R_a = 0,20 \dots 0,25$ мкм; б – материал: ВЧ-50 с параметром волнистости $W_a = 0,55 \dots 0,6$ мкм

Обработка модельных образцов заготовок корпуса гидрораспределителя после чернового хонингования из чугуна ВЧ-50 пневмоцентробежным полированием (ПЦП). Инструмент для финишного пневмоцентробежного полирования, разработанного на основе финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки [6], дополнительную частоту вращения деформирующих шаров осуществляет за счет вращения корпуса инструмента, приводимого во вращение реактивными струями сжатого воздуха.

Такое выполнение инструмента обеспечивает увеличение центробежной силы шаров и сохранения условий их автоколебаний по отношению к обрабатываемой поверхности.

На рис. 8 изображен общий вид инструмента в сечении вдоль осевого канала. Раскатник состоит из обоймы 1 с осевым каналом 7 и заглушкой 2, образующих кольцевую камеру расшире-

ния со свободно размещенными в ней деформирующими элементами – шарами 6. Для предупреждения выпадения шаров 6 и регулировки величины вылета шара из кольцевой камеры предусмотрена резьбовая втулка с козырьком 5. Фиксация втулки выполняется за счет винта 13. Обойма 1 жестко закреплена с корпусом 3 с сужающимися к обрабатываемой поверхности соплами, имеющей подшипник качения 4, который посажен на оправку 12. Для регулировки частоты вращения приводной втулки предусмотрена резьбовая втулка 11, фиксация которой выполняется за счет винта 14.

Инструмент работает следующим образом. Раскатник подводят к обрабатываемой поверхности заготовки 10, установленной на станке в установочном приспособлении. Осевым перемещением резьбовой втулки 5 настраивают нужный вылет шаров и фиксируют винтом 13. Осевым пере-



мещением резьбовой втулки 11 настраивают нужную частоту враще-

ния и фиксируют винтом 14.

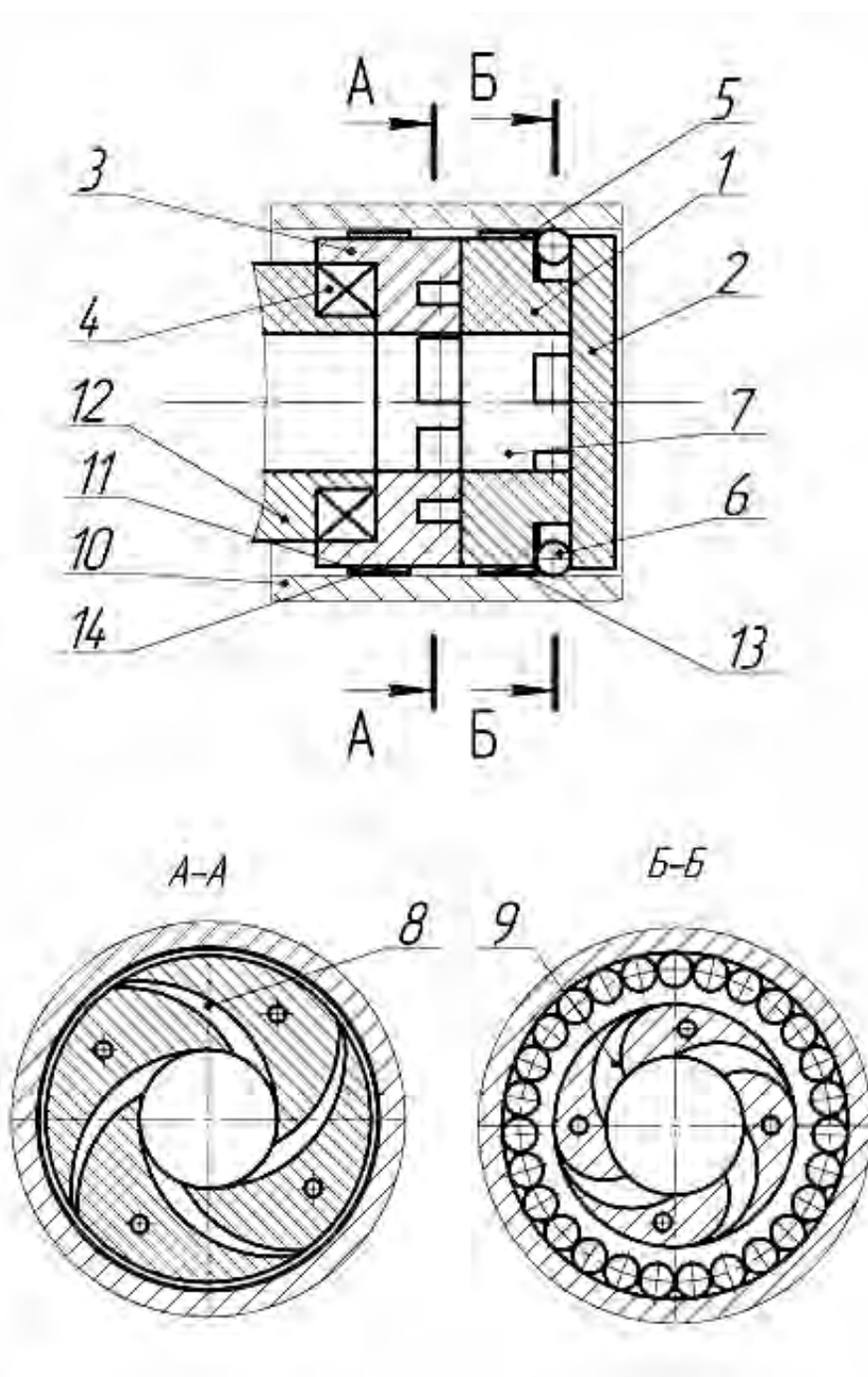


Рис. 8. Упрощенная конструктивная схема инструмента для ПЦП

Включают подвод сжатого воздуха и сообщают инструменту поступательное перемещение вдоль оси цилиндрической обрабатываемой поверхности. Под действием сжатого воздуха,

подводимого от системы питания через осевой канал 7 инструмента и сопел 9, шары 6 начинают совершать орбитальное движение относительно оси обрабатываемой поверхности и под действием



силы деформации осуществлять ее обработку. Также в момент включения сжатого воздуха через осевой канал 7 инструмента и сопел 8 приводная втулка 3 приводит во вращение корпус 1, что увеличивает центробежную силу деформирующих элементов – шаров.

Условия проведения эксперимента: инструмент – пневмоцентробежный раскатчик. Диаметр шаров – 4 мм, материал шаров – ШХ15.

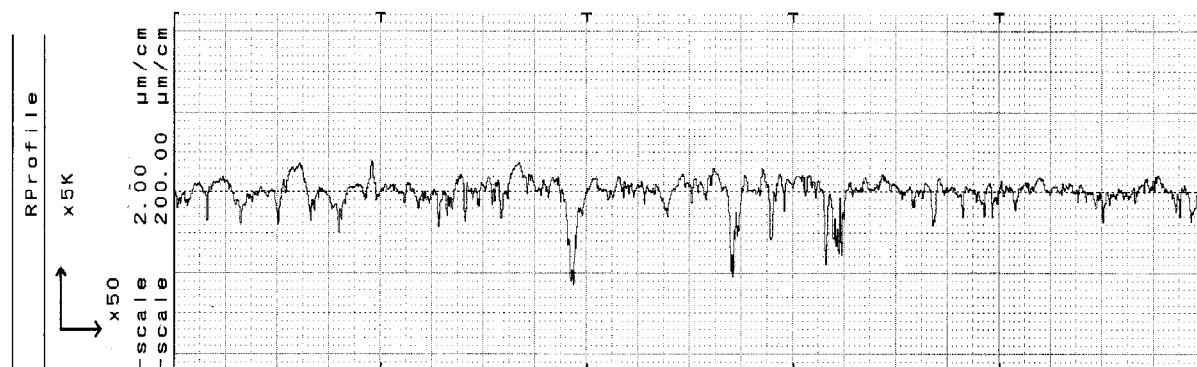
Режимы раскатывания: давление

сжатого воздуха для вращения шаров: $P = 0,30 \dots 0,35$ МПа, давление сжатого воздуха для вращения корпуса инструмента $P = 0,30 \dots 0,35$ МПа. Число проходов – один. Осевая подача – 50 мм/мин.

На рис. 9 представлены профилограммы поверхностей заготовок после раскатывания инструментом для ПЦП.

Анализ качества поверхности по критериям волнистости и шероховатости трех способов ППД представлен в табл. 3.

a)



b)

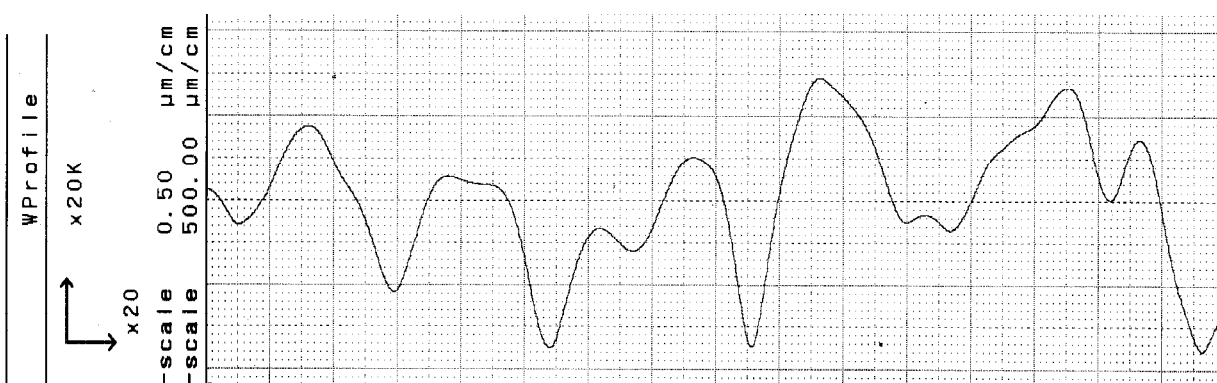


Рис. 9. Профилограммы поверхностей заготовок после раскатывания инструментом для ПЦП: а – материал ВЧ-50 с параметром шероховатости $Ra = 0,20 \dots 0,25$ мкм; б – материал: ВЧ-50 с параметром волнистости $Wa = 0,3 \dots 0,35$ мкм

Табл. 3. Геометрические параметры поверхностного слоя деталей машин после различных способов обработки ППД

Способ обработки и вид материала	Параметры шероховатости			Параметры волнистости		
	Ra, мкм	Rsm, мкм	Rc, мкм	Wa, мкм	Wsm, мкм	Wc, мкм
Хонингование черновое. Материал: ВЧ-50	1,5...1,6	105,0	5,566	1,8...1,9	2310,0	6,034
Алмазное выглаживание. Материал: ВЧ-50	0,3...0,4	104,5	1,616	0,7...0,75	2520,0	3,245
Раскатывание жестким шариковым раскатником. Материал: ВЧ-50	0,20...0,25	153,6	1,252	0,55...0,6	1845,0	1,614
Раскатывание инструментом для ПЦП. Материал: ВЧ-50	0,20...0,25	149,8	1,199	0,3...0,35	2101,7	1,041

Предварительные экспериментальные исследования показали, что после обработки в результате получения качественной поверхности по параметру шероховатости не всегда гарантируется получение качественного параметра по волнистости. Также очевидно, что применение ПЦП как способа обработки ППД показывает самые лучшие результаты по параметрам волнистости.

Выводы

1. Снижение значений шага волнистости S_w и высотного параметра W_z для поверхностей, прошедших

ПЦП, по сравнению с показателями волнистости после хонингования, позволяет сделать вывод о предпочтительности использования ПЦП для повышения контактной жесткости поверхностей пар трения корпусов гидрораспределителей и других деталей.

2. Применение ПЦП в качестве дополнительной операции механообработки позволяет увеличить жизненный цикл изделия в сравнении с традиционной технологией обработки посадочных мест основных поверхностей отверстий корпусов гидроусилителей, повышая их надежность и обеспечивая уменьшение количества запчастей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Сулов, А. М. Дальский. – Москва: Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 18 с.
3. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов; под ред. Н. А. Табачниковой. – Санкт Петербург: Политехн. ун-т, 2007. – 136 с.
4. Анализ международной практики профильной и трехмерной оценки шероховатости поверхности / В. М. Давыдов [и др.] // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – Т. 4, № 4. – С. 1061–1074.
5. Технологические основы обеспечения качества машин / К. С. Колесников [и др.]; под общ. ред. К. С. Колесникова. – Москва: Машиностроение, 1990. – 256 с.



6. **Минаков, А. П.** Технологические основы финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей в машиностроении / А. П. Минаков [и др.]. - Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 251 с.

Статья сдана в редакцию 22 июня 2020 года

Анатолий Петрович Минаков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Михаил Евгеньевич Лустенков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Ирина Дмитриевна Камчицкая, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Тел.: +375-297-47-99-29. E-mail: i_kam@tut.by.

Павел Викторович Афанасьев, инженер, филиал ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ–ХОЛДИНГ» – «Могилевский автомобильный завод имени С. М. Кирова».

Anatoly Petrovich Minakov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Mikhail Evgenyevich Lustenkov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Irina Dmitriyevna Kamchitskaya, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

Tel.: +375-297-47-99-29. E-mail: i_kam@tut.by.

Pavel Viktorovich Afanasiev, engineer, Affiliate of OJSC BELAZ – Management Company of Holding BELAZ-HOLDING – S. M. Kirov Mogilev Autoworks.

