é

#### УДК 621.923.4

### А. П. Минаков, И. Д. Камчицкая, Е. В. Ильюшина, Н. М. Юшкевич, Д. С. Кисляк

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПНЕВМОВИБРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОРЕЛЬЕФ ОБРАБОТАННЫХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО СТАНДАРТУ DIN EN ISO 13565:1998

## UDC 621.923.4

A. P. Minakov, I. D. Kamchitskaya, E. V. Ilyushina, N. M. Yushkevich, D. S. Kislyak

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF PNEUMO-VIBRO-DYNAMIC TREATMENT ON THE MICRORELIEF OF FLAT SURFACES ACCORDING TO DIN EN ISO 13565:1998

#### Аннотация

В работе рассмотрены основные параметры качества поверхности по DIN EN ISO 13565:1998, выполнен анализ эксплуатационных свойств поверхностей после импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки. Представлены математические модели параметров шероховатости и результаты исследования высотных параметров и шаговой характеристики микрорельефа поверхностей после пневмовибродинамической обработки.

### Ключевые слова:

импульсно-ударная пневмовибродинамическая обработка плоских поверхностей, параметры шероховатости, поверхность, профильный метод.

#### Abstract

The paper considers the basic parameters of surface quality according to DIN EN ISO 13565: 1998, and analyses the performance properties of surfaces after pulse-impact pneumo-vibro-dynamic treatment. Mathematical models of roughness parameters are presented, as well as the results of the investigation of height parameters and step characteristics of the microrelief of surfaces after pneumo-vibro-dynamic treatment.

### Key words:

pulse-impact pneumo-vibro-dynamic treatment of flat surfaces, roughness parameters, surface, profile method.

## Введение

Повышение надёжности изделий машиностроения неразрывно связано с улучшением качества обработки рабочих поверхностей деталей, которое может быть достигнуто различными технологическими методами.

В технической литературе каждому технологическому методу обработки соответствуют определенные диапазоны высотных значений шероховатости Ra и Rz, которых недостаточно для оценки свойств поверхности трения. Поверхности с одинаковыми значениями шероховатости Ra и Rz, полученные разными видами обработки, могут иметь различные эксплуатационные характеристики.

С развитием техники и технологии появляется необходимость более полной и разносторонней оценки и описания микрогеометрии поверхности. Шесть показателей качества, нормируемые ГОСТ 2789–73, уже не могут описать всю микрогеометрию поверхности и оценить ее эксплуатационные свойства.

© Минаков А. П., Камчицкая И. Д., Ильюшина Е. В., Юшкевич Н. М., Кисляк Д. С., 2017

Исследования и опыт эксплуатации машин свидетельствуют о том, что характер контактирования поверхностей трения друг с другом зависит от высоты микронеровностей, а также и от других параметров микрорельефа, во многих случаях в большей степени определяющих эксплуатационные свойства деталей.

В [3–5] рассмотрена и обоснована связь между топографией поверхности и ее эксплуатационными свойствами.

Для поверхностей трения, работающих в условия граничного трения, первостепенное значение имеет их износостойкость. Установлено, что 70...80 % вариаций показателей износостойкости связаны с параметрами шероховатости поверхности деталей машин [5].

Анализ микрорельефов обработанных поверхностей по действующим международным стандартам позволит установить целесообразность использования различных методов обработки.

В настоящее время в практике в большинстве случаев используют стандарты Международной организации по стандартизации (ISO), на базе которых разработаны региональные (EN) и национальные (DIN) стандарты.

Для оценки топографии поверхностей используют международный стандарт ISO 13565:1998 Геометрическая техническая характеристика изделия (GPS) – Структура поверхности: профильный метод, состоящий из трех частей:

– часть 1 – фильтры и общие условия измерений;

 часть 2 – высотные параметры, полученные на основе относительной опорной кривой профиля [1];

- часть 3 – высотные параметры, полученные на основе вероятностной кривой для поверхностей, определяемых двумя вертикальными случайными компонентами [2].

## Оценка качества поверхности в соответствии с международным стандартом DIN EN ISO 13565:1998

Во второй части стандарта (DIN EN ISO 13565-2:1998) [1] рассматриваются параметры формы шероховатости, получаемые из построения опорной линии поверхности:

 – параметр R<sub>Pk</sub>, характеризующий высоту выступов, быстро изнашивающихся в начальный период эксплуатации;

 – параметр Rvk, характеризующий глубину впадин профиля и, соответственно, смазывающую способность;

параметр R<sub>k</sub>, характеризующий основу профиля, которая длительное время находится в работе и является несущей площадью;

- сумма параметров R<sub>Pk</sub> + R<sub>k</sub>, характеризующая изнашиваемость рабочих поверхностей.

Снижение значения параметра R<sub>Pk</sub> позволяет уменьшить время приработки. Критерием увеличения площади фактического контакта является уменьшение суммы параметров R<sub>Pk</sub> + R<sub>k</sub>. Увеличение маслоемкости поверхности характеризуется увеличением значения параметра R<sub>Vk</sub>.

Для оценки несущей способности поверхности используется параметр M<sub>r2</sub> – относительная материальная составляющая к впадинам в процентах.

Поверхности с примерно равными по величине высотными параметрами шероховатости Ra обладают явно лучшими эксплуатационными свойствами, если они имеют заполненный материалом «закрытый» профиль вместо слегка заполненного материалом «открытого» профиля.

В третьей части стандарта (DIN EN ISO 13565-3:1998) [2] рассматривается семейство параметров R<sub>q</sub>:

 – параметр R<sub>Pq</sub> – наклон линейной регрессии, проходящей через зону «плато» обработанной поверхности;  – параметр R<sub>Vq</sub> – наклон линейной регрессии, проходящей через зону впадин обработанной поверхности;

 – параметр R<sub>mq</sub> – наклон, характеризующий высоту точки перехода зоны «плато» в зону впадин.

# Исследование топографии плоских поверхностей пар трения после импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки по DIN EN ISO 13565:1998

Одним из перспективных методов формирования качества плоских поверхностей пар трения является пневмовибродинамическая обработка. Данный метод позволяет повысить износостойкость поверхностей за счет упрочнения поверхностного слоя и создания сетки лунок для увеличения маслоемкости. Достигаемая при импульсноударной пневмовибродинамической обмикронеровностей работке высота находится в пределах Ra = 2,5...0,8 мкм и определяется сочетанием технологических факторов [6, 7]. Отличительной особенностью данного метода является обработка без использования смазочно

охлаждающих жидкостей. Поверхность детали в процессе обработки не нагревается за счет охлаждения струями сжатого воздуха, истекающего через сопла пневмонакатника.

К основным режимам обработки, влияющим на формирование топографии поверхности, относятся давление сжатого воздуха, подводимого к пневмонакатнику, Р, МПа, зазор между торцом пневмонакатника и обрабатываемой поверхностью h, мм, минутная подача стола станка S<sub>мин</sub>, мм/мин.

Давление сжатого воздуха и зазор являются технологическими факторами, определяющими эффективность работы пневмонакатника. Подача стола станка влияет на плотность расположения лунок на обработанной поверхности. В зависимости от величины подачи на поверхности образуются участки сетки лунок с требуемой степенью плотности их расположения от 15 до 100 % (рис. 1).

Параметры пневмовибродинамической обработки в настоящее время определяют экспериментально в зависимости от конкретных условий и требуемого качества поверхности [7].



Рис. 1. Вид поверхностей после шлифования с СОЖ и после импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки

Исследования топографии поверхности после пневмовибродинамической

обработки проводили при давлении сжатого воздуха, равном 0,15...0,25 МПа.

Значение подачи стола станка составляло 80 мм/мин. Применяли модельные образцы заготовок из серого чугуна СЧ20 (170...229 НВ) ГОСТ 1412–85. Исходная поверхность заготовок была предварительно обработана шлифованием со смазочно-охлаждающей жидкостью (эмулсол Э2). Для исследований использовались заготовки с исходной шероховатостью Ra 0,63 и Ra 1,25.

Изотропной считается поверхность, характеристики которой при ее измерении в любом направлении являются идентичными.

Поверхность после импульсноударной пневмовибродинамической обработки является анизотропной, т. к. параметры качества, характеризующие рельефную микроструктуру, зависят от направления трассы измерения. Поэтому исследования топографии поверхностей после пневмовибродинамической обработки, связанные с оценкой качества поверхности по стандарту DIN EN ISO 13565:1998, проводили для двух схем измерений: вдоль направления подачи и поперек.

На рис. 2–5 представлены профилограммы поверхностей после импульсноударной пневмовибродинамической обработки для различных условий экспериментов.



Рис. 2. Профилограммы поверхностей после пневмовибродинамической обработки: а – исходная шероховатость Ra 0,63, давление P = 0,15 МПа, зазор h = 0,4 мм; б – исходная шероховатость Ra 1,25, давление P = 0,15 МПа, зазор h = 0,4 мм



Рис. 3. Профилограммы поверхности после пневмовибродинамической обработки: исходная шероховатость Ra 0,63, давление P = 0,15 МПа, зазор h = 0,6 мм



Рис. 4. Профилограммы поверхности после пневмовибродинамической обработки: исходная шероховатость Ra 1,25, давление P = 0,15 МПа, зазор h = 0,6 мм





Влияние зазора между торцом пневмонакатника и обрабатываемой поверхностью и давления сжатого воздуха, подводимого к инструменту, на изменение высотных параметров шероховатости Ra и Rz и параметров семейства R<sub>k</sub> [1] после импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки представлено в табл. 1. Для исследований топографии поверхности использовался прибор фирмы «Митутойо» (Mitutoyo). В качестве параметров семейства R<sub>k</sub> принимались среднеарифметические значения пяти измерений.

Величина зазора, мм	Р, МПа	Ra <sub>исх</sub> , мкм	Ra, мкм	Rz, мкм	R <sub>Pk</sub> , мкм	<b>R</b> <sub>k</sub> , мкм	R <sub>vk</sub> , мкм	$R_{Pk} + R_k,$ MKM
Измерение вдоль подачи при обработке								
0,4	0,15	0,63	1,296	5,533	1,190	2,768	0,612	3,958
0,4	0,15	1,25	1,031	4,960	0,862	2,694	1,376	3,556
0,4	0,25	1,25	0,960	5,193	0,336	3,401	1,914	3,737
0,6	0,15	0,63	0,995	3,78	0,921	2,690	1,138	3,974
0,6	0,15	1,25	0,822	3,641	0,621	2,216	1,284	2,837
0,6	0,25	1,25	0,553	2,107	0,431	1,276	0,605	1,707
Измерение поперек подачи при обработке								
0,4	0,15	0,63	0,993	5,775	0,316	1,974	1,588	2,290
0,4	0,15	1,25	1,053	6,389	0,817	2,867	1,561	3,684
0,4	0,25	1,25	1,480	7,257	1,607	3,341	1,262	4,948
0,6	0,15	0,63	0,907	5,259	0,695	2,627	1,125	3,322
0,6	0,15	1,25	1,514	9,565	1,205	3,354	1,355	4,559
0,6	0,25	1,25	0,960	5,240	0,623	3,058	1,155	3,681

Табл. 1. Параметры качества плоской поверхности после пневмовибродинамической обработки

При анализе параметров качества поверхности семейства  $R_k$  было установлено, что рост величины зазора между торцом пневмонакатника и обрабатываемой поверхностью способствует уменьшению параметров  $R_{Pk}$  и  $R_k$  и мало влияет на параметр  $R_{Vk}$  для топографии поверхности вдоль подачи при обработке. Для микрорельефа поверхности в поперечном направлении подачи, наоборот, характерно увеличение параметров семейства  $R_k$  при увеличении зазора.

Обработка образцов заготовок с исходной шероховатостью Ra1,25 повышает параметр Rvk по сравнению с образцами с более низкой исходной шероховатостью. Для обработки с давлениями сжатого воздуха, превышающими 0,15 МПа, характерен большой разброс числовых значений параметров шероховатости изза меньшей стабильности аэродинамических процессов, происходящих в рабочей камере пневмонакатника.

После анализа экспериментальных данных были разработаны математические модели влияния параметров режима импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки на изменения исследуемых характеристик шероховатости плоских поверхностей в виде уравнений регрессии (1)–(14). Полученные модели позволяют рассчитать значения параметров микрорельефа анизотропной поверхности (в направлениях вдоль или поперек подачи) в зависимости от сочетаний режимов обработки.

$$Ra_{\rm вдоль} = 0,126h^{0,44} \cdot P^{-1,33}; \quad (1)$$

$$Ra_{\mu 0 \mu e p e \kappa} = 0,587h^{0,978} \cdot P^{-0,873}; \quad (2)$$

$$Rq_{BIOID} = 0.141h^{0.653} \cdot P^{-1.5}; \quad (3)$$

$$Rq_{\mu 0 \mu 0} = 0,695h^{0,773} \cdot P^{-0,828}; \quad (4)$$

$$Rt_{\rm BDORD} = 0,402h^{0,198} \cdot P^{-1,778}; \quad (5)$$

$$Rt_{\text{поперек}} = 3,743h^{-0,082} \cdot P^{-0,514}; \quad (6)$$

$$Rp_{\rm BAOJE} = 0,245h^{0,532} \cdot P^{-1,44}; \quad (7)$$

 $Rp_{\text{поперек}} = 1,413h^{0,265} \cdot P^{-0,462};$  (8)

$$Rv_{\rm BAOJE} = 0,103h^{0,887} \cdot P^{-2,195}; \quad (9)$$

$$\operatorname{Rv}_{\text{поперек}} = 1,5 h^{0,252} \cdot P^{-0,774};$$
 (10)

$$Rc_{BIOUL} = 0,174h^{0,623} \cdot P^{-1,983}; \quad (11)$$

$$\text{Re}_{\text{noneper}} = 2,63\text{h}^{-0,21} \cdot \text{P}^{-0,177};$$
 (12)

$$\operatorname{Rsm}_{\text{вдоль}} = 729,238 h^{-1,175} \cdot P^{0,823};$$
 (13)

$$Rsm_{\text{поперек}} = 331,955\text{h}^{-0,448} \cdot \text{P}^{0,394}; (14)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонений профиля в пределах базовой длины; Rq – стандартное отклонение профиля; Rt – общая высота профиля; Rp – максимальная высота выступов профиля; Rv – максимальная глубина впадин профиля; Rc – средняя высота элементов профиля; RSm – средняя ширина элементов профиля.

Графические изображения математических моделей (1)–(14) представлены на рисунках 6–12.



Рис. 6. Влияние режимов обработки на изменение параметра шероховатости Ra: а – зависимость Ra = f (h); 1 – при P = 0,15 МПа (вдоль подачи); 2 – при P = 0,25 МПа (вдоль подачи); 3 – при P = 0,15 МПа (поперек подачи); 6 – зависимость Ra = f (P); 1 – при h = 0,4 мм (вдоль подачи); 2 – при h = 0,6 мм (вдоль подачи); 3 – при h = 0,4 мм (поперек подачи); 4 – h = 0,6 мм (поперек подачи); 4 – h = 0,6



Рис. 7. Влияние режимов обработки на изменение параметра шероховатости Rq: а – зависимость Rq = f(h); 6 – зависимость Rq = f(P); 1-4 - см. рис. 6



Рис. 8. Влияние режимов обработки на изменение параметра шероховатости Rt: а – зависимость Rt = f (h); б – зависимость Rt = f (P); 1–4 – см. рис. 6



Рис. 9. Влияние режимов обработки на изменение параметра шероховатости Rp: а – зависимость Rp = f(h); б – зависимость Rp = f(P); 1–4 – см. рис. 6



Рис. 10. Влияние режимов обработки на изменение параметра шероховатости Rv: а – зависимость Rv = f (h); б – зависимость Rv = f (P); 1–4 – см. рис. 6

![](_page_8_Figure_3.jpeg)

Рис. 11. Влияние режимов обработки на изменение параметра шероховатости Rc: а – зависимость Rc = f(h); 6 – зависимость Rc = f(P); 1-4 - cm, рис. 6

![](_page_8_Figure_5.jpeg)

Рис. 12. Влияние режимов обработки на изменение параметра шероховатости Rsm: а – зависимость Rsm = f (h); б – зависимость Rsm = f (P); 1–4 – см. рис. 6

При анализе графических изображений зависимостей параметров шероховатости от режимов процесса пневмовибродинамической обработки установлено, что повышение давления сжатого воздуха, подводимого к пневмонакатнику, снижает высотные параметры шероховатости Ra, Rq, Rt, Rp, Rv, Rc и увеличивает шаговую характеристику шероховатости Rsm. Наиболее чувствителен к изменению давления сжатого воздуха микрорельеф, расположенный вдоль подачи при обработке поверхности (параметры Rt, Rp, Rv, Rc).

Увеличение зазора между торцом пневмонакатника и обрабатываемой поверхностью способствует росту всех исследуемых высотных параметров шероховатости микрорельефа, расположенного вдоль подачи. Для микрорельефа, расположенного поперек подачи, при увеличении значений зазора высотные параметры Rt и Rc снижаются (см. рис. 8, a; 11, а).

Шаговые характеристики шероховатости Rsm при увеличении зазора, напротив, снижаются как в продольном, так и в поперечном направлении подачи. Наиболее заметно идет снижение шаговых характеристик микрорельефа в направлении подачи (рис. 12, а).

#### Выводы

1. Результаты изучения топографии обработанной поверхности после импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки позволяют сделать вывод о том, что после обработки следы от деформирующих шаров на поверхности произвольно изменяют свое направление. На обработанной поверхности формируются расположенные случайным образом выступы и впадины.

2. Поверхность после импульсноударной пневмовибродинамической обработки плоских поверхностей является анизотропной.

3. Установлено, что импульсноударная пневмовибродинамическая обработка плоских поверхностей с более грубой исходной шероховатостью способствует повышению несущей площади поверхности по критерию R<sub>Pk</sub> + R<sub>k</sub> и повышению маслоемкости поверхности по критерию R<sub>Vk</sub>.

4. Разработанные математические модели высотных параметров и шаговой характеристики шероховатости позволят оптимизировать параметры режимов импульсно-ударной пневмовибродинамической обработки в зависимости от качественных требований и эксплуатационных характеристик обрабатываемых поверхностей деталей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ISO 13565-2:1998.** Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: profile method. Surfaces having stratified functional properties – Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve. – International Organization for Standardization. Geneva. Switzerland, 1998.

2. **ISO 13565-3:1998.** Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties – Part 3: Height characterization using the material probability curve. – International Organization for Standardization. Geneva. Switzerland, 1996.

3. **Табенкин, А. Н.** Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов ; под ред. канд. техн. наук Н. А. Табачниковой. – СПб. : Политехн. ун-т, 2007. – 136 с.

4. Анализ международной практики профильной и трехмерной оценки шероховатости поверхности / В. М. Давыдов, В. В. Заев, П. Н. Паночевный, Ю. А. Козаченко, О. В. Прохорец // Ученые заметки ТОГУ (электронное издание). – Хабаровск : Тихоокеан. гос. ун-т, 2013. – Т. 4, № 4. – С. 1061–1074.

5. Технологические основы обеспечения качества машин / К. С. Колесников [и др.] ; под общ. ред. К. С. Колесникова. – М. : Машиностроение, 1990. – 256 с.

6. **Камчицкая, И. Д.** Упрочняющая технология восстановления направляющих станин станков на основе лезвийной и пневмовибродинамической обработки : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Камчицкая Ирина Дмитриевна. – М., 2006. – 129 л.

Технология финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких дета-7. лей : монография / А. П. Минаков [и др.]; под общ. ред. проф. А. П. Минакова. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 294 с.

Статья сдана в редакцию 30 ноября 2016 года

Анатолий Петрович Минаков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-291-11-91-84.

Ирина Дмитриевна Камчицкая, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: i kam@tut.by.

Елена Валерьевна Ильюшина, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-45-25-55.

Надежда Михайловна Юшкевич, преподаватель, Белорусско-Российский университет. Дмитрий Сергеевич Кисляк, студент, Белорусско-Российский университет.

rsir, i. f. Belar Prof. Belar in University. Anatoly Petrovich Minakov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-291-11-91-84 Irina Dmitriyevna Kamchitskaya, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

Belarusian-Russian University.