

УДК 67.05

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ МАНЖЕТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОРЕЛЬЕФА ШЕЙКИ ВАЛА

Мельников П.А., Пахоменко А.Н.

ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти,  
e-mail: topavel@mail.ru

Эксплуатационные характеристики изделий в значительной мере определяются технологическим процессом их изготовления. В современном машиностроении все чаще выдвигаются требования к поверхностям деталей, работающих в условиях трения, наличие регулярного микро рельефа. Наилучшие эксплуатационные характеристики уплотнений достигаются в том случае, когда поверхность трения является гладкой, но в то же время имеет масляные карманы для удержания смазки в сопряжении. Проявлению гидродинамического эффекта в сопряжении способствует нанесение на гладкую поверхность вала микро рельефа определенного вида. В данной работе предложена технология и математическая модель для расчета микро рельефа обработанной поверхности шейки вала под манжетное уплотнение, реализованная в среде математического программирования MatLab 12R. Полученные результаты моделирования полностью коррелируют с теоретическими данными. Проведение НИР осуществляется в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

**Ключевые слова:** поверхностное пластическое деформирование, микро рельеф, трение, манжетное уплотнение, поверхность детали

## IMPROVING THE RELIABILITY OF LIP SEALS BY OPTIMIZING OF SHAFT JOURNAL MICRORELIEF

Melnikov P.A., Pakhomenko A.N.

Togliatti State University, Togliatti, e-mail: topavel@mail.ru

The process of products manufacture significantly determines their performance characteristics. In modern engineering increasingly demand to the surfaces of components operating in conditions of friction, the presence of a regular microrelief. The best performance is achieved in the seal when the friction surface is smooth, but at the same time has oil pockets for retaining lubricant in conjugation. The smooth application of the shaft surface a certain kind microrelief contributes to the hydrodynamic effect in conjugation. In this paper a technology and a mathematical model for calculating the microrelief of shaft journal processed surface for lip seal, implemented in the mathematical programming environment MatLab 12R proposed. The results of modeling fully correlated with theoretical data. Realization of the research engineering is carried out within the Federal Target Program «Research and scientific-pedagogical personnel of innovative Russia» for 2009–2013 years.

**Keywords:** surface plastic deformation, micro-relief, friction, lip seal, detail surface

Эксплуатационные характеристики изделий в значительной мере определяются технологическим процессом их изготовления.

При рассмотрении узла трения «манжетное уплотнение – шейка вала» в силу значительного различия механических свойств (твердости, модуля упругости) трущихся материалов решающую роль на трение и износ резин оказывает шероховатость металлической поверхности вала [1, 2].

Согласно изложенным представлением о природе трения коэффициент трения:

$$f = F/N = (F_{\text{мол}} + F_{\text{деф}})/N = f_{\text{мол}} + f_{\text{деф}}, \quad (1)$$

где  $F$  – суммарная сила трения;  $N$  – нагрузка, создаваемая силой прижатия кромки манжеты к валу;  $F_{\text{мол}}$  и  $f_{\text{мол}}$  – молекулярно составляющая соответственно силы трения и коэффициент трения; деформационные составляющие.

Адгезионная составляющая коэффициента трения зависит от сил адгезионного взаимодействия и коэффициента упрочнения образовавшейся связи под нагрузкой:

$$f_{\text{мол}} = \tau_0/Pr + \beta, \quad (2)$$

где  $\tau_0$  – прочность фрикционной связи, возникающей на фактической площади контакта, при сдвиге;  $\beta$  – коэффициент упрочнения адгезионной связи;  $Pr$  – давление на пятне фактического контакта.

Деформационная составляющая коэффициента трения  $f_{\text{деф}}$  зависит от отношения глубины внедрения  $h$  микронеровности при скольжении к радиусу скругления ее вершины  $R$ :

$$f_{\text{деф}} = K\sqrt{h/R}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент.

Таким образом, очень гладкие поверхности (параметр шероховатости  $Ra = 0,04 \dots 0,16$  мкм) при контакте с манжетой в процессе работы за счет увеличения фактической площади контакта (следовательно, увеличивается  $\tau_0$ ) имеют большую молекулярную составляющую силы трения. Кроме того, такие поверхности не способны в процессе работы удерживать и транспортировать смазку малой вязкости в зону контакта уплотняющего элемента, в результате чего возникает большое сопротивление

сдвигу при так называемом пленочном голодании.

Шероховатые, грубые поверхности вала (параметр шероховатости  $Ra = 2,5 \dots 1,25$  мкм) удерживают смазку, но под действием нормальных и сдвиговых усилий возникают значительные деформации поверхностного слоя более мягкого материала пары. Коэффициент трения увеличивается вследствие увеличения его деформационной составляющей (т.к. увеличивается отношение  $h/R$ ). Возможен разрыв смазочной пленки. В результате возникает повышенный износ уплотнения. Шероховатость вала приводит к тому, что контактная поверхность манжеты изнашивается и также становится шероховатой. Это способствует шаржированию манжеты частицами износа и абразива. Таким образом повышенная шероховатость вала оказывает на износ манжеты «двойное» влияние, выражающееся в проявлении упомянутых явлений. Максимальная долговечность манжетного уплотнения достигается при параметре шероховатости  $Ra = 0,16 \dots 0,63$  мкм [3]. В работе [3] указывается, что шероховатость вала под герметизатором должна иметь значение  $Ra \leq 0,32$ .

Если рассмотреть пару трения «манжета-вал», то можно отметить, что износ вала также связан с тем, что в месте установки манжеты собираются продукты износа, образовавшиеся в процессе работы зубчатых передач и подшипников в редукторах, коробках передач и шпиндельных головок. Этому способствует вертикальное расположение валов (шпинделей). С другой стороны в уплотнения собираются частицы внешней среды (грязь, абразивные частицы, стружка и т.п.). Попадая в зону контакта манжеты с валом, эти частицы застревают в резине и изнашивают вал.

Вместе с этим обеспечение высокой износостойкости вала в условиях абразивного изнашивания требует повышения твердости его поверхности.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что наилучшие эксплуатационные характеристики уплотнений достигаются в том случае, когда поверхность трения является гладкой, но в то же время имеет масляные карманы для удержания смазки в сопряжении. Проявлению гидродинамического эффекта в сопряжении способствует нанесение на гладкую поверхность вала микрорельефа определенного вида.

Процесс алмазного выглаживания кинематически аналогичен точению [5], только вместо резца применяется алмазный выглаживатель, который, пластически деформируя поверхностный слой, выравнивает и упрочняет его.

По сравнению с традиционными методами финишной обработки (тонкое шлифование, хонингование, суперфиниширование, полирование) метод выглаживания имеет ряд преимуществ [3]:

- обеспечивается более эффективное снижение шероховатости заготовки, что позволяет в ряде случаев сокращать количество переходов и операций;

- обработанная поверхность характеризуется округлым профилем и относительно большой опорной поверхностью;

- поверхностный слой изделий упрочняется, формируется мелкозернистая структура, образуются благоприятные остаточные напряжения сжатия.

Указанные преимущества проявляются в улучшении эксплуатационных характеристик изделий: повышении долговечности, износостойкости и усталостной прочности.

При обработке поверхностей, работающих в условиях трения, долгое время основным параметром, описывающим требования к микрогеометрии поверхности детали, являлся параметр шероховатости  $Ra$ , мкм. Однако, как показывает тенденция развития машиностроения, в настоящее время одного параметра недостаточно, и все чаще к поверхностям деталей машин, работающих в условиях трения, предъявляются требования в виде наличия регулярного микрорельефа.

В работе [5] предложен метод алмазного выглаживания с наложением продольных колебаний (рис. 1), в результате которых на поверхности детали формируется микрорельеф.

Согласно экспериментальным и теоретическим исследованиям, приведенным в работах [1, 5], можно классифицировать получаемые микрорельефы при вибровыглаживании на несколько видов (рис. 2). При этом на практике характер микрорельефа зависит от параметров обработки и прежде всего от следующих параметров:  $S$  – подача выглаживающего индентора, мм/об;  $R$  – радиус индентора, мм;  $h$  – глубина внедрения индентора, мм;  $A$  – амплитуда колебания инструмента, мм;  $\omega$  – частота колебаний инструмента, Гц.

Для обеспечения прогнозирования получаемого микрорельефа поверхностей деталей в зависимости от указанных параметров обработки была необходима разработка математической модели.

При построении математической модели процесса обработки ППД, позволяющей моделировать рельеф обработанной поверхности в зависимости от параметров и условий обработки, необходимо рассмотреть

процесс формообразования поверхности, в котором образующей будет кривая, описывающая профиль рабочей поверхности

инструмента, а направляющей – траектория движения вершины инструмента по обрабатываемой поверхности.

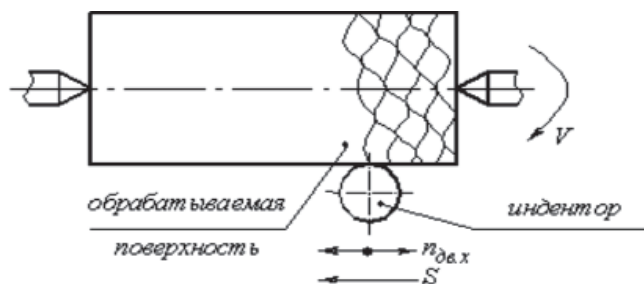


Рис. 1. Схема нанесения микрорельефа алмазным выглаживанием

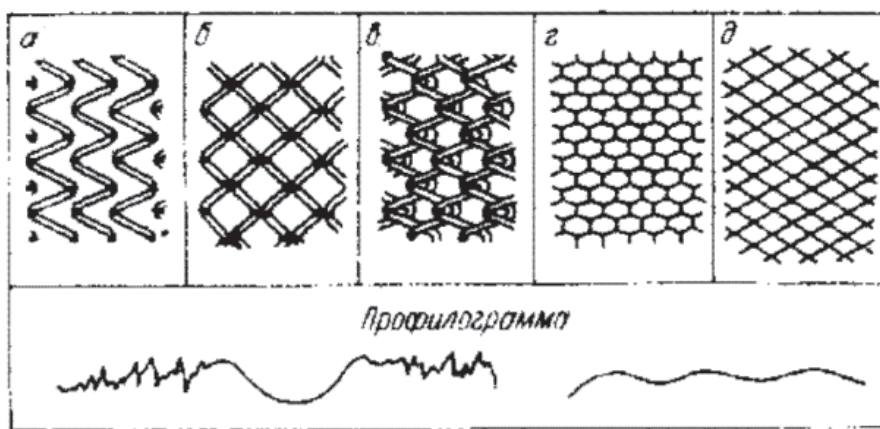


Рис. 2. Схемы и профилограммы поверхностей с системами канавок (а, б, в) и полностью новым регулярным микрорельефом (г, д), регламентированные ГОСТ 24773-81 поверхности с регулярным микрорельефом

Для того чтобы произвести процесс моделирования обработки, предлагается следующий подход к решению данной задачи [4]:

– обрабатываемую цилиндрическую поверхность, например шейку вала, разбить на  $K_x$  точек вдоль оси  $x$  и на  $K_y$  точек по окружности детали (рис. 3, а);

– далее для упрощения расчета произвести развертку цилиндрической поверхности (рис. 3, б).

Для того чтобы получить геометрию поверхности, необходимо рассчитать координаты каждой точки модели, представленной на рис. 3, б.

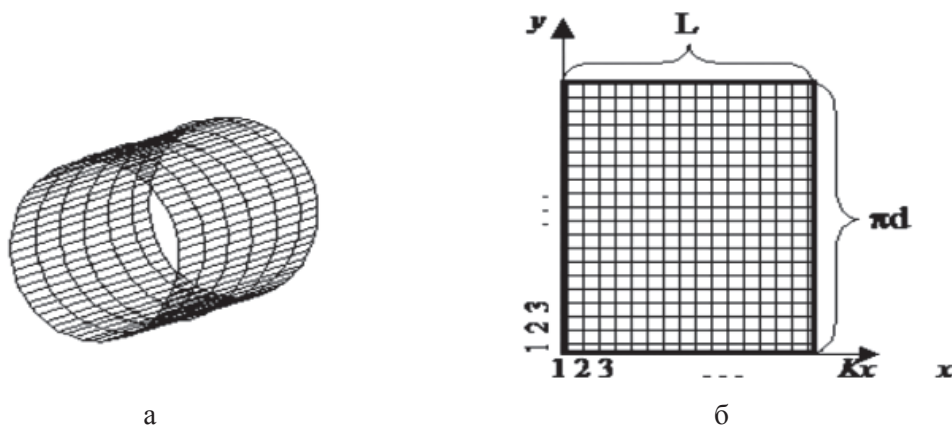


Рис. 3. Интерполяция обрабатываемой поверхности: а – модель обрабатываемой поверхности; б – разработка модели обрабатываемой поверхности

Для более наглядной интерпретации результатов расчета целесообразнее представить результат в виде матрицы размером  $Kx \times Ky$ , где каждый элемент матрицы будет численно выражать высоты микронеровностей поверхности по оси  $Z$ .

При разбиении цилиндрической развертки на точки ( $Kx \times Ky$ ) следует учесть, что необходимо учесть возможность расчета геометрии после нескольких оборотов, тогда исходя из рис. 3, б, точки (1, 1... $Kx$ ) совпадут с точками ( $Ky$ , 1... $Kx$ ), поэтому разбиение целесообразнее производить так, как показано на примере, представленном на рис. 4.

На рис. 4 показан пример графической интерпретации матрицы размером  $4 \times 4$ . Очевидно, что для представления микропрофиля поверхности разбиение на такое количество точек неэффективно, значения  $Kx$  и  $Ky$  должны как минимум быть на порядок выше, но следует также учесть, что увеличение количества рассчитываемых точек приводит к более громоздким расчетам.

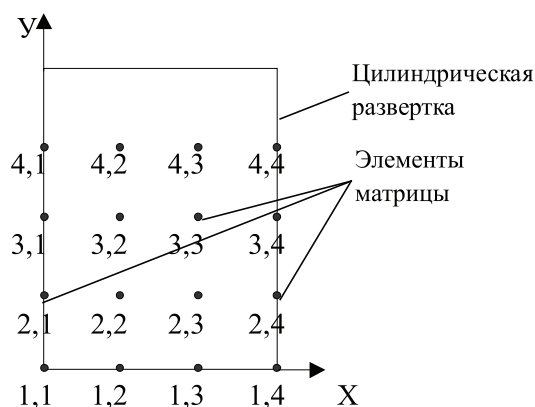


Рис. 4. Пример представления цилиндрической развертки в виде матрицы

Детальность расчета микропрофиля можно оценить величинами:

$$dx = L_p / (Kx - 1); \quad (4)$$

$$dy = \pi d / Ky, \quad (5)$$

где  $L_p$  – ширина обрабатываемого участка, мм;  $Kx$  – количество точек рассчитываемых по оси  $x$ ;  $Ky$  – количество точек рассчитываемых по оси  $y$ ;  $d$  – диаметр обрабатываемой детали;  $dx$ ,  $dy$  – интервал между рассчитываемыми точками по оси  $x$ ,  $y$  соответственно, мм.

При этом уравнение, описывающее рабочую поверхность выглаживающего инструмента в математической модели примет вид:

$$z(x, y) = R - \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} - h, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус индентора, мм;  $h$  – глубина внедрения индентора, мм.

При этом положение инструмента по оси  $X$  можно определить по формуле:

$$X_{instr} = S \cdot N, \quad (7)$$

где  $S$  – подача выглаживающего индентора, мм/об;  $N$  – число совершенных оборотов детали, за время обработки.

Для обеспечения регулярного микрорельефа на поверхности детали [5] при усложнении кинематики движения инструмента (придания в процессе выглаживания индентору возвратно-поступательных колебаний вдоль оси обрабатываемой детали), в математическую модель необходимо внести изменения, обеспечивающие изменение траектории движения индентора, описываемое уравнением:

$$\Delta X_{instr} = \frac{1}{2} A \sin(2\pi \cdot \omega t), \quad (8)$$

где  $\Delta X_{instr}$  – корректировка положения инструмента в процессе обработки с учетом совершения колебательных движений, мм;  $A$  – амплитуда колебания инструмента, мм;  $\omega$  – частота колебаний инструмента, Гц.

С использованием выражений (4–8) была построена математическая модель, реализованная в среде математического программирования MatLab 12R, позволяющая моделировать микрорельеф обработанной поверхности.

Как показали результаты моделирования (рис. 5), результаты адекватны и полностью коррелируют с теоретическими данными, представленными на рис. 2.

При проведении дальнейших исследований, предполагается внести в математическую модель ряд алгоритмов, учитывающих микрорельеф исходной поверхности обрабатываемой детали, получаемой на предыдущих операциях и алгоритмов, учитывающих упруго-пластические свойства обрабатываемой поверхности.

Проведение НИР осуществляется в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-6076.2013.8.

#### Список литературы

1. Бобровский Н.М. Повышение долговечности наружных поверхностей валов методом выглаживания широким самоустанавливающимся инструментом: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – М., 1999. – 16 с.
2. Исследование влияния режимов обработки на шероховатость поверхности закаленных валов в условиях массового производства / Н.М. Бобровский, П.А. Мельников, И.Н. Бобровский, А.В. Ежелев, А.А. Лукьянов // Современные проблемы науки и образования, 2011. URL: www.science-education.ru/99-4791 (дата обращения: 17.09.2013).



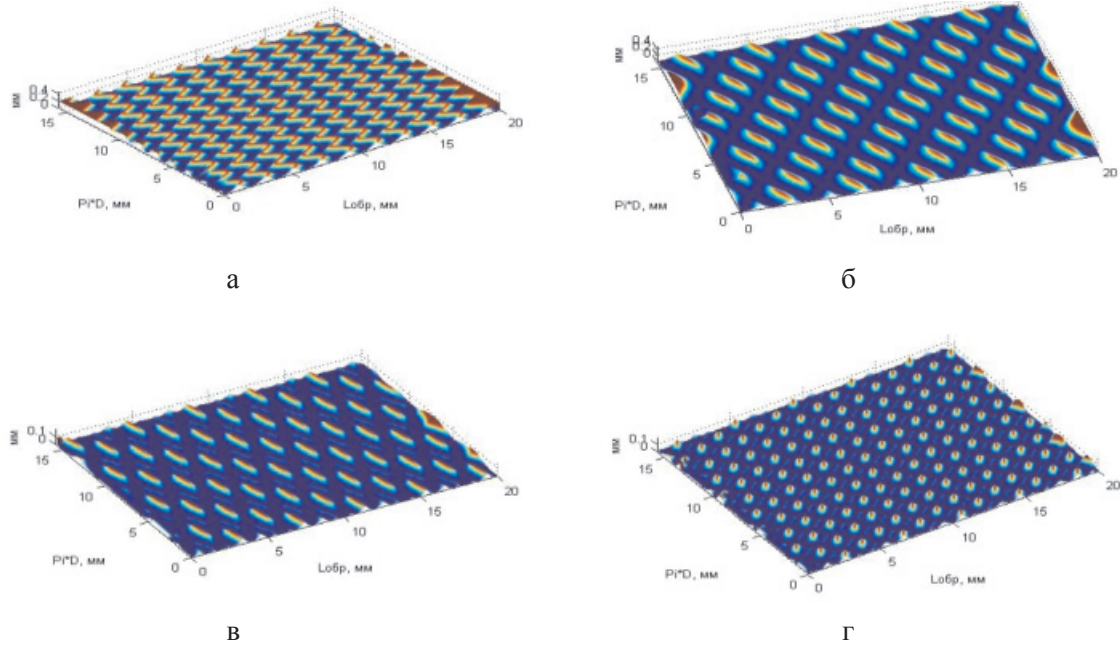


Рис. 5. Результаты моделирования поверхностей с системами канавок (а, б, в) и полностью новым регулярным микрорельефом (г), регламентированные ГОСТ 24773-81 поверхности с регулярным микрорельефом

3. Бобровский Н.М., Мельников П.А. Оптимизация параметров процесса выглаживания в производственных условиях с целью получения поверхности, пригодной для работы в условиях гидродинамического трения // Вектор науки ТГУ. – 2011. – № 2(16). – С. 65–67.

4. Дьяконов В.П. Matlab: Современ. средство мат. моделирования процессов: учеб. курс. – СПб. [и др.]: Питер, 2001. – 553 с.

5. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: справочник. – СПб.: Политехника, 1998. – 413 с.

3. Bobrovskiy N.M., Melnikov P.A. Process parameters optimization of smoothing in a production environment in order to obtain a suitable surface for working in hydrodynamic friction – Vector science TSU, 2011, no. 2(16), pp. 65–67.

4. Dyakonov V.P. Matlab: Modern mean of mathematical processes modeling: training course, St. Petersburg : Piter, 2001, p. 553.

5. Shneider Yu.G. Technology of finishing pressure : reference book, St. Petersburg: Politehnika, 1998, p. 413.

**References**

1. Bobrovskiy N.M. Increase of shafts exterior surfaces durability by smoothing with wide spherical tool : author’s dissertation ... Candidate of Technical Sciences : 05.02.08, Moscow, 1999, pp. 16.

2. Bobrovskiy N.M., Melnikov P.A., Bobrovskiy I.N., Ezhelev A.V., Lukyanov A.A. The research of the effect of processing modes on the hardened shafts surface roughness in mass production – Modern problems of science and education, 2011. URL: www.science-education.ru/99-4791 (access date: 17.09.2013).

**Рецензенты:**

Васильев А.В., д.т.н., профессор, директор Института химии и инженерной экологии Тольяттинского государственного университета, г. Тольятти;

Горшков Б.М., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электротехнические комплексы и системы», ГОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», г. Тольятти.

Работа поступила в редакцию 20.09.2013.