

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ

Кожевников В.А., Астраханский А.Ю.

Самарский государственный университет путей сообщения, Самара

Ключевые слова: надёжность, обработка, микрорельеф, контактирование, трение, смазка.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы образования частично-регулярного микрорельефа с целью повышения износостойкости деталей цилиндропоршневой группы. Представлен расчет геометрических параметров частично-регулярного микрорельефа по несущей поверхности контактирующих поверхностей. Представлен анализ зависимости перемещения элемента контакта по поверхности с небольшим количеством углублений и пятном контакта под ним.

HIGHLY EFFICIENT METHODS OF PROCESSING WORKING SURFACES OF PARTS OF THE CYLINDER-PISTON GROUP

Kozhevnikov V.A., Astrakhansky A.Yu.

Samara State University of Railway Transport, Samara

Keywords: reliability, processing, microrelief, contacting, friction, lubrication.

Abstract. The article deals with the formation of a partially regular microrelief in order to increase the wear resistance of parts of the cylinder-piston group. The calculation of the geometric parameters of a partially regular microrelief along the bearing surface of the contacting surfaces is presented. An analysis of the dependence of the movement of the contact element on the surface with a small number of depressions and a contact spot under it is presented.

Работоспособность и надежность работы двигателей внутреннего сгорания железнодорожных машин определяются, в основном, долговечностью работы их узлов.

Наименее низкой долговечностью обладают детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ), последние и определяют долговечность работы всего двигателя. Основная причина выхода из строя деталей ЦПГ является повышенный износ рабочих поверхностей гильзы цилиндра и поршневых колец.

Эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей в процессе изготовления и ремонта целенаправленно формируются на финишных операциях технологических процессов. В современных условиях наряду с высоким качеством обработки ставятся задачи экономической целесообразности процесса и экологической безопасности предлагаемых технологических процессов и средств технического оснащения.

Известны и широко применяется ряд технологических процессов позволяющие значительно улучшить качественные показатели рабочих поверхностей.

Одним из эффективных способов обработки является способ упрочняющей обработки с одновременным нанесением композиционных покрытий из пластичных металлов [1]. Существенное повышение эксплуатационных поверхностей достигается за счет наличия и удержания смазочного средства в

условиях граничной смазки при формировании на рабочей поверхности регулярного микрорельефа. Предлагаемый процесс позволяет снизить, за счет нивелирующего действия покрытия, силовую напряженность процесса взаимодействия поверхностей, уменьшить трение на 10...15%, повысить износостойкость на 25...30% [2]. Предлагаемый способ обработки содержит переходы нанесения покрытия и формирования частично-регулярного микрорельефа (ЧРМР). Он позволяет получить дополнительные микрокарманы на контактирующих поверхностях для повышения надежности удержания смазки, размеры и объем определяются технологическими параметрами процесса обработки.

В этом случае представляет интерес рассмотрение вопроса определения параметров регулярных микроуглублений, например, упругой рабочей поверхности гильзы цилиндра при контакте с поршневым кольцом. Варианты расчета предполагают случаи отсутствия и наличия смазочного средства на рабочих поверхностях. Вариант расчета предусматривает случаи отсутствия и наличия в регулярных углублениях твердого смазочного средства, чем является покрытие. Расчет проводится из условия обеспечения несущей способности плоской упругой поверхности при статическом внедрении в нее упругой площадки. Схема контактирования представлена на рисунке 1.

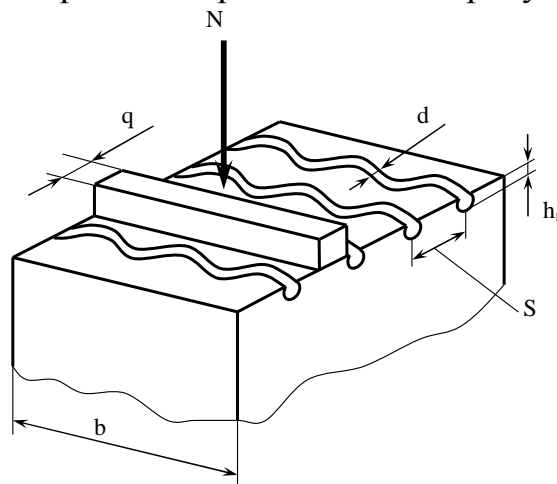


Рис. 1. Схема контактирования гладкого элемента с полупространством с регулярным микрорельефом

Здесь условно показаны параметры микрорельефа: h_k – глубина канавки (определяется силовыми параметрами процесса); S – расстояние между канавками (подача деформирующего инструмента при обработке); d – размер вдавливаемого отпечатка (зависит от свойств поверхности и диаметра деформирующего инструмента-шарика); a, b – параметры поршневого кольца, площадь контакта обозначим a_c .

Несущая способность поверхности характеризуется максимально допустимым давлением в контакте, поэтому при контактировании с поверхностью, имеющей регулярный микрорельеф (ЧРМР), необходимо знать закон распределения давления в контактной зоне и значение наибольшего давления.

Решение осесимметричной контактной задачи об упругом вдавливании площадки в полупространство с граничным измененным (шероховатым) слоем.

Решение этой задачи сведено к уравнению, аналогичному предложенному И.Я. Штаерманом:

$$\frac{1}{2}(k_1 + k_3) \int_F p dF + Cp = \delta - f(r). \quad (1)$$

Результат численного решения и анализ уравнения показали, что с ростом коэффициента C увеличивается роль измененного слоя в формировании пятна контакта, размеры которого увеличиваются, а значение максимального давления в центре площадки уменьшается. Однако аналитическое выражение для коэффициента C в зависимости от топографических характеристик измененного слоя неизвестно.

В нашем случае деформационные свойства поверхностного слоя в ЧРМР отличаются от свойств шероховатого слоя, поскольку поверхность с регулярным микропрофилированным рельефом образована не выступами, а углублениями, в общем случае не связанными между собой. Поэтому для решения контактной задачи с ЧРМР в виде углублений воспользуемся подходом, изложенным в работе, представляя поверхность с ЧРМР в виде гомогенного слоя с измененными свойствами. (Для случая ЧРМР в виде выступов, видимо, можно воспользоваться методикой расчета М.А. Короткова.)

Расчетная схема представлена на рисунке 2. Полупространство с ЧРМР представлено в виде основания с упругими характеристиками E_3 и μ_3 и поверхностным измененным слоем толщиной, h , обладающим своими упругими характеристиками E_n и μ_n , E_c и μ_c . Величины E_1 , μ_1 соответствуют упругим характеристикам материала основы.

Полагаем, что для рассматриваемого контакта применимо герцевское решение и распределение давления в контакте определяется известной зависимостью:

$$p_c = p_c^0 \left(1 - \frac{r^2}{a_c^2}\right)^{1/2}. \quad (2)$$

Индекс «с» здесь и далее в тексте относится к параметрам, характеризующим контактную задачу для рассматриваемой схемы контактирования, т.е. с измененным поверхностным слоем.

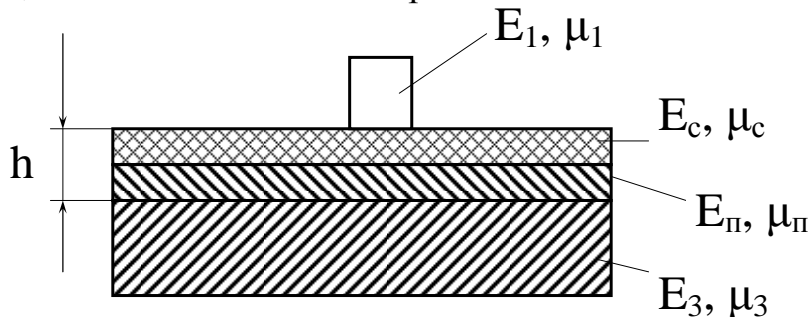


Рис. 2. Расчетная схема контакта

В связи с тем что слой смазки и слой покрытия имеют одно и тоже назначение – разделительный слой между контактирующими поверхностями, Для упрощения решения задачи принимаем, в первом приближение, что E_2, μ_2 и k_2 являются обобщенными показателями смазки и покрытия представляются:

$$E_2=f(E_n+E_c); \mu_2=f(\mu_n+\mu_c); k_2=f(k_n+k_c) \quad (3)$$

Представим полупространство, на поверхности которого имеется слой с ЧРМР, в виде однородного полупространства с упругими характеристиками, определяемыми обобщенной упругой постоянной k' . Логично предполагать, что эта постоянная функционально зависит от упругих констант: E_3 , μ_3 и переменных параметров: толщины слоя ЧРМР (h) и параметров, характеризующих упругие свойства измененного слоя E_n и μ_n , E_c и μ_c , которые в свою очередь зависят от коэффициента заполнения ЧРМР (η). Под коэффициентом η понимается доля контурной площади контакта (пятна контакта), занятая углублениями. Аналитическое выражение этой функции неизвестно, однако оно полагается таким, что при его использовании параметры напряженно-деформированного состояния адекватно описывают контакт по расчетной схеме (рис. 2) и приводят к уравнению (1).

Возможные границы варьирования геометрического размера (h) измененного поверхностного слоя позволяют выявить интервалы изменения геометрических и силовых параметров контакта кольца с полупространством, имеющим на поверхности ЧРМР.

Так, при $h=0$, т.е. в отсутствие ЧРМР: $k'=k_3$, т.е. реализуется задача Герца для упругих однородных тел, обладающих упругими характеристиками k_1 и k_3 .

При $h \rightarrow \infty$ или по крайней мере при $h \geq 10a_c$ влияние основы несущественно. Следовательно, $k'=k_2$ и решение в этом случае также аналогично известному решению задачи Герца.

В интервале $0 < h < 10a_c$ параметры контакта определяются видом зависимости k' от h , a_c , k_1 и k_3 . Авторам не известны работы, которые содержали бы решение такой или аналогичной задачи. Однако имеется ряд работ, в которых рассмотрены и получены решения осесимметричных контактных задач для слоистых тел. Верхний слой, представляемый в виде накладки или покрытия, жестко связан с упругим основанием значительно большей толщины. Применение предлагаемых в этих работах решений сопряжено со значительными математическими сложностями, что затрудняет их использование в инженерной практике.

Известна эмпирическая зависимость, которая с достаточной для практике точностью отражает механизм взаимодействия поверхностей, где взаимосвязь обобщенной упругой постоянной k' и упругими параметрами k_3 и k_2 выражается зависимостью:

$$\frac{k'}{a_c} = \frac{k_3}{a_3} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a_c}\right)^2}} \right) \left(1 - \frac{k_2 a_3}{k_3 a_2} \right) \right], \quad (4)$$

полученной путем анализа структуры уравнения, определяющего в общем виде деформацию двухслойного тела в виде суммы деформации каждого, с учетом известных результатов решения этого уравнения при крайних значениях толщины измененного поверхностного слоя ($h \rightarrow 0$ и $h > 10a_c$).

Возвращаясь к расчетной схеме (рис. 2), можно показать, как обобщенная упругая постоянная поверхностного измененного слоя зависит от коэффициента η .

Так, из условия аддитивности для самого общего случая использования ЧРМР можем записать:

$$E_2 = E_3(1 - \eta) + E_4\eta. \quad (5)$$

При $E_4=0$, т.е. если углубления не заполнены смазочным материалом, $E_2=E_3(1-\eta)$.

С определенным допущением можно записать

$$\frac{E_2}{1 - \mu_2^2} = \frac{E_3}{1 - \mu_3^2}(1 - \eta) + \frac{E_4}{1 - \mu_4^2}\eta$$

или в виде

$$\frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_3}(1 - \eta) + \frac{1}{k_4}\eta.$$

Выражая k_4 и k_3 через k_1 и a_2 , a_3 через a_3 и k_3 как $k_4=nk_1$; $k_3=mk_1$;

$\frac{a_2}{a_3} = \left(\frac{k_2}{k_3}\right)^{1/3}$, уравнение (4) можно представить в виде:

$$k' = mk_1\Phi, \quad (6)$$

где

$$\Phi = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a_c}\right)^2}} + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a_c}\right)^2 \left[(1 - \eta) + \frac{m}{n}\eta \right]^{4/3}}} \right) \times \frac{1}{\left[(1 - \eta) + \frac{m}{n}\eta \right]^{2/3}} \right]^{3/2} \quad (7)$$

Таким образом, если для герцевского контакта однородной сферы с однородной поверхностью $k_2=k_1+k_3=k_1(1+m)$, то для контакта площадки с измененной поверхностью

$$k_c = k_1 + k' = k_1(1 + m\Phi).$$

Можно представить математически вклад ЧРМР в изменение деформационных и силовых параметров упругого контакта площадки с полупространством, имеющим на поверхности ЧРМР, по сравнению с аналогичным герцевским контактом сферы с плоской гладкой поверхностью:

$$\frac{a_c}{a_r} = \sqrt[3]{\frac{1 + m\Phi}{1 + m}}, \quad \frac{\delta_c}{\delta_r} = \sqrt[3]{\frac{(1 + m\Phi)^2}{(1 + m)^2}}, \quad \frac{p_c^0}{p_r^0} = \sqrt[3]{\frac{(1 + m)^2}{(1 + m\Phi)^2}}. \quad (8)$$

За критерий работоспособности сопряжения с ЧРМР примем несущую способность поверхности с ЧРМР. Здесь под несущей способностью понимается максимально возможная нагрузка, обеспечивающая отсутствие пластической деформации поверхности ЧРМР при обеспечении максимального значения коэффициента заполнения η . Последнее не требует, по-видимому, специальных доказательств, так как очевидно, что такое условие обеспечивает максимальный объем смазочного материала в зоне контакта.

Критерием перехода от чисто упругого контакта к упругопластическому может служить величина критического сближения. На поверхности контактной площадки пластическая деформация возникает, согласно теории трения, при среднем контактном давлении, равном $\sim 1,1\sigma_T$, что приводит к величине критического сближения [3]:

$$\varepsilon = 6,9\sigma_T^2 k_c^2 R \quad (9)$$

Этому сближению соответствует нагрузка

$$N_T = 24\sigma_T^3 k_c^2 R \quad (10)$$

Таким образом, зная предельную величину сближения, геометрические размеры сопряжения, физико-механические характеристики контактирующих материалов, можно определить параметр Φ , характеризующийся в основном коэффициентом заполнения и глубиной ЧРМР. По величине Φ можно выбрать оптимальное значение η и h . Методика выбора значений указанных величин приводится ниже. Вначале проанализируем характер влияния η на параметр Φ для некоторого ряда дискретных значений h/a_c , перекрывающего диапазон из возможных величин, т.е. от одного предельного значения $h=0$ до другого $h \geq 10a_c$. При этом отношение m/n может изменяться в диапазоне от значений, близких к нулю, до значений, не превышающих единицу. Хотя отношение $\frac{m}{n}$ реально может быть и больше единицы, такие условия принадлежат уже другой контактной задаче, где несущая способность определяется не материалом основы, а материалом, заполняющим углубление, т.е. смазочным материалом. Если же оценить значения модулей Юнга наиболее известных твердосмазочных материалов, таких, как Ag, Cu, Pb, MoS₂, то предельное значение отношения $\frac{m}{n}$ значительно меньше единицы (наибольшее значение $\sim 0,5$) [3].

Таким образом, имеем:

а) для случая $\frac{m}{n} \rightarrow 0$:

$$\Phi = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a_c}\right)^2}} + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a_c}\right)^2}} \right) \times \frac{1}{(1 - \eta)^{2/3}} \right]^{3/2}$$

б) для случая $\frac{m}{n} = 1$; $\Phi = 1$;

в) для случая $\frac{m}{n} = 0,5$:

$$\Phi = \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a_c}\right)^2}} + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{a_c}\right)^2 (1 - 0,5\eta)^{4/3}}} \right) \times \frac{1}{(1 - 0,5\eta)^{2/3}} \right]^{3/2}.$$

Характер влияния на параметр Φ при $\frac{m}{n} \rightarrow 0$ для некоторого ряда дискретных значений $\frac{h}{a_c}$ представлен на рисунке 3, построенном в полулогарифмических координатах. На этом графике также представлена зависимость Φ от η для $\frac{h}{a_c} = 1$ при $\frac{m}{n} = 0,5$ (т.е. $\frac{E_4}{E_3} = 0,5$). Анализ представленных на рисунке 3 зависимостей показывает, что более эффективное влияние на параметр Φ оказывает природа смазочного материала, чем глубина ЧРМР.

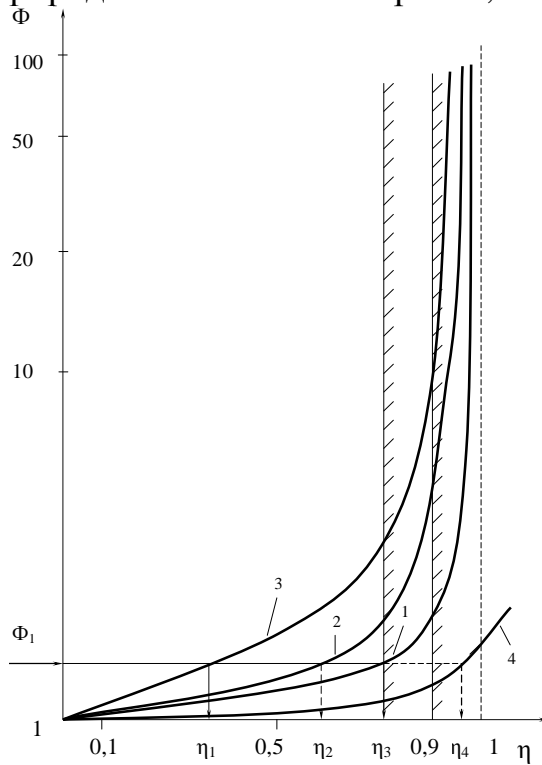


Рис. 3. Зависимость параметра Φ от η при различных значениях $\frac{h}{a_c} : 1 - \frac{m}{n} \rightarrow 0, \frac{h}{a_c} = 0,1;$

$$2 - \frac{m}{n} \rightarrow 0, \frac{h}{a_c} = 1; 3 - \frac{m}{n} \rightarrow 0, \frac{h}{a_c} = 10; 4 - \frac{m}{n} = 0,5, \frac{h}{a_c} = 1$$

Таким образом, вычислив Φ по значению ϵ , находят a_c и определяют (например, графически, см. рис. 3 для Φ_1) диапазон предпочтительных значений глубины ЧРМР h и соответствующие им коэффициенты заполнения η .

Установленные диапазоны значений коэффициента заполнения η и глубины ЧРМР не содержат информации о форме, размерах и взаимном расположении

углублений, создающих рисунок регулярного микрорельефа. При определенном значении η на одной и той же площадке контакта можно разместить разное количество углублений ЧРМР.

Чем нужно руководствоваться при выборе количества углублений ЧРМР? Анализ показывает, что при перемещении сферы по поверхности с небольшим количеством углублений на ней под пятно контакта попадает разное количество углублений. Такая ситуация приводит к изменению (флуктуации) давления при трении (рис. 4). При этом будут изменяться и площадь пятна контакта и сила трения. С увеличением количества углублений, приходящихся на номинальную площадку контакта, флуктуация давления при перемещении сферы уменьшается. Следовательно, целесообразно применять микрорельеф с минимально возможными размерами углублений в плане, обеспечивающими наличие в контактной зоне максимально возможного количества углублений.

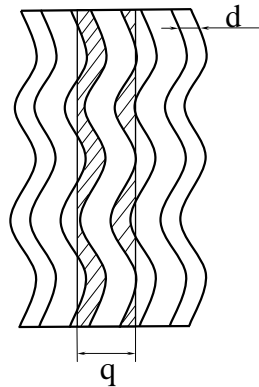


Рис. 4. Схема возможного расположения контактной зоны на поверхности с ЧРМР

Расчет проводился для случая частично-регулярного микрорельефа (рис.4). Штриховой линией выделены площадки, эквивалентные по площади пятну контакта площадки с плоскостью. Заштрихованные области представляют собой характерные единичные элементы площадок, при i -кратном увеличении которых можно заполнить площадь пятна контакта.

Обеспечение на практике превышения предельных значений коэффициента заполнения создает поверхностный слой, состоящий из углублений и выступов.

Ниже приводятся методика и пример расчета параметров ЧРМР для случая контактирования площадки с плоской поверхностью, имеющей частично-регулярный микрорельеф.

Примем для простоты расчета $E_1 = E_3$; $\mu_1 = \mu_3$, т.е. $k_1 = k_3$ и $\frac{m}{n} \approx 0$.

Расчет ведем в сравнении с герцевской задачей контактирования упругой сферы и упругого полупространства с аналогичными размерами и физико-механическими свойствами материалов. Параметр Φ в зависимости от h и η может принимать любые значения в интервале от 1 до $+\infty$ (реальный диапазон $1 \leq \Phi \leq 10$). При значениях $\Phi \gg 10$ данная задача теряет смысл, так как в контакте со сферой практически отсутствует основа, в случае $\Phi = 1$ решением является решение Герца. Характер изменения деформационных и силового параметров контакта в зависимости от изменения значений Φ представлен в левой части графика и определяется соответствующими формулами (7).

Зная конкретные данные на сопряжение, а именно σ_T , k_1 , k_3 , R , N , по формуле (9) определяем допустимое сближение ε . Для действующей нагрузки N определяем ε_r и a_r (a_r – площадь контакта при герцевском взаимодействии).

Отношение: $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_2}$ дает возможность по графику или аналитически определить

значение $[\Phi]$, а по нему величину $\frac{[a_c]}{a_2}$. Значению $[\Phi]$ соответствует ряд

определенных значений h и η . Зная величину $[a_c]$, подбираем значение глубины ЧРМР h исходя из технологических возможностей получения ЧРМР такой глубины и допустимой величины износа поверхностей. Как правило, процесс накатывания синусоидальных канавок накатным роликом позволяет получить достаточно правильную форму углублений, параметры канавки определяются технологическими режимами обработки. Соответственно глубине ЧРМР находят по графику η , для данного значения η .

Для конкретно выбранных значений h , d , η определяют величину максимального давления в контакте p_c^0 . Абсолютное значение p_c^0 может быть использовано для расчета величины износа и ресурса работы данного сопряжения.

Список литературы

1. Патент № 2308542. Способ нанесения металлических покрытий на рабочие поверхности деталей машин // А.Л. Берсудский, В.П. Малышев, А.Ю. Астраханский. – Заявка №2006105130/02 от 20.02.2006; опубл. 20.10.2007, Бюл. №29
2. Жданов А.Г., Кожевников В.А., Астраханский А.Ю. Способ упрочнения поверхностей деталей машин с одновременным нанесением антифрикционных покрытий // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2018. – № 1. – С. 57-63.
3. Чичинадзе А.В. Справочник по триботехнике. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

Сведения об авторах:

Кожевников Вадим Александрович – к.т.н., доцент;

Астраханский Алексей Юрьевич – старший преподаватель.