

## **РАБОТА ДЕФОРМИРУЮЩИХ ШАРИКОВ СТАТИЧЕСКОЙ РАСКАТКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

**Аветисян В.К. к.т.н., доцент, Польотов В.А. доцент.**

*(ХНТУСХ им. П.Василенко, Харьков, Украина)*

**Соболев Е.Ф.**

*(Харьковский автодорожный техникум, Украина)*

*Рассмотрена работа статической раскатки для обработки гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания.*

*Произведен анализ силового взаимодействия статически нагруженного деформирующего шарика с обрабатываемой поверхностью.*

В процессе работы традиционной статической раскатки первоначальное взаимоположение шариков постоянно изменяется. Постоянное изменение взаимоположения шариков относительно друг друга приводит к тому, что тела качения начинают постепенно взаимодействовать с сепаратором, в результате чего между взаимодействующими элементами появляются силы, которые создают принципиально отличительные условия пластического деформирования металла, характеризующиеся увеличением сдвиговых деформаций на поверхности обрабатываемого цилиндра. Это обстоятельство, приводит к снижению качественных характеристик, а также к разрушению кристаллов поверхностного слоя гильзы и скалыванию микронеровностей при работе статических раскаток. В связи с чем представляет интерес подробное изучение задачи о силах взаимодействия шариков с сепаратором.

Подобная задача, но применительно к шарикоподшипникам, работающим в вакууме, рассмотрена в работах [1, 2]. Этот способ решения задачи может быть использован при изучении процессов, происходящих при раскатывании в результате возникновения сил взаимодействия деформирующих шариков с сепаратором. Он заключается в рассмотрении состояния равновесия деформирующего шарика под действием сил и в составлении системы уравнений с последующим её решением.

По аналогии с известной задачей для рассмотрения состояния равновесия деформирующего шарика необходимо построить модель его силового взаимодействия с сопрягаемыми поверхностями. На рисунке 1 изображена такая модель.

На рисунке 1 показаны только силы, действующие на деформирующий шарик со стороны обрабатываемой поверхности, опор качения и сепаратора.

Под действием этих сил деформирующий шарик будет совершать вращательное движение, однако, для того чтобы шарик продолжал равномерное вращательное движение, необходимо выполнение следующих требований: равномерное движение центра масс (относительного мгновенного центра

скоростей) шара и вращение вокруг этого центра с постоянной угловой скоростью.

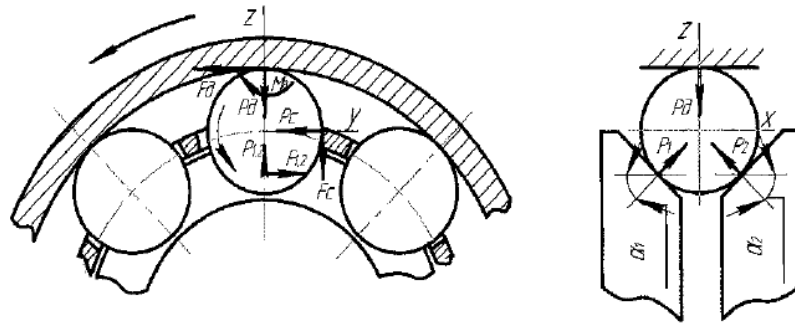


Рисунок 1

Первое условие определяется равенством нулю суммы проекций всех сил, действующих на деформирующий шарик по координатным осям. Второе условие определяется равенством нулю суммы моментов всех сил, действующих на шарик относительно осей координат.

Тогда, согласно этим условиям имеем следующие уравнения:

$$\sum F_x = 0; \quad P_1 \cos \alpha_1 - P_2 \cos \alpha_2 = 0, \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0; \quad F_\delta - F_1 - F_2 + P_c = 0, \quad (2)$$

$$\sum F_z = 0; \quad P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2 - P_\delta - F_c = 0, \quad (3)$$

$$\sum M_x = 0; \quad F_\delta \frac{d}{2} + F_1 \sin \alpha_1 \frac{d}{2} + F_2 \sin \alpha_2 \frac{d}{2} - F_c \frac{d}{2} - M_\delta = 0, \quad (4)$$

$$\sum M_z = 0; \quad F_1 \cos \alpha_1 \frac{d}{2} - F_2 \cos \alpha_2 \frac{d}{2} = 0. \quad (5)$$

Учитывая, что

$$F_c = P_c f_c, \quad (6)$$

$$M_\delta = P_\delta K, \quad (7)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \quad (8)$$

где  $f_c$  - коэффициент трения скольжения между деформирующим шариком и сепаратором;

$K$  - коэффициент трения качения между деформирующим шариком и обрабатываемой поверхностью.

Получаем значения сил трения  $F$  в контакте деформирующих шариков с деталью и опорами качения, при которых после возникновения взаимодействия их с сепаратором не будет происходить скольжения:

$$F_{\partial} = \frac{P_{\partial} \cdot \kappa - P_c \cdot (d/2) \cdot (\sin \alpha - f_c)}{(1 + \sin \alpha) \cdot d/2}, \quad (9)$$

$$F_1 + F_2 = \frac{P_{\partial} \cdot \kappa + P_c \cdot (d/2) \cdot (1 + f_c)}{(1 + \sin \alpha) \cdot d/2}. \quad (10)$$

Очевидно, что проскальзывание шарика либо в контакте с деталью либо с опорами качения произойдет в том случае, если:

$$|F_{\partial}| > P_{\partial} f_{\partial}, \quad (11)$$

$$|F_1 + F_2| > \sqrt{2} P_{\partial} f_{on}, \quad (12)$$

где  $f_{\partial}$  - коэффициент трения скольжения между деформирующим шариком и обрабатываемой поверхностью;

$f_{on}$  - коэффициент трения скольжения между деформирующим шариком и опорами качения.

Значения сил трения  $F_{\partial}$  и  $F_1 + F_2$  берем по абсолютной величине, поскольку эти силы могут изменять свое направление на противоположное.

Подставляя в неравенства (11) и (12) значения сил трения  $F_{\partial}$  и  $F_1 + F_2$  из (9, 10) и решая их относительно  $P_c$ , получаем значения нормальной силы также по абсолютной величине, действующей со стороны сепаратора на деформирующий шарик при качении его по:

- обрабатываемой поверхности

$$P_c \leq P_{\partial} \frac{(\kappa - f_{\partial} \cdot (d/2) \cdot (1 + \sin \alpha))}{(\sin \alpha - f_c) \cdot d/2}, \quad (13)$$

- опорам качения

$$P_c \geq P_{\partial} \frac{(\sqrt{2} \cdot f_{on} \cdot (d/2) \cdot (1 + \sin \alpha) - \kappa)}{(1 + f_c) \cdot d/2}. \quad (14)$$

Полученные неравенства определяют тот интервал допустимых значений нормальной силы, действующей со стороны сепаратора на деформирующий шарик, в которой он будет продолжать равномерное вращательное движение. Однако при постоянном изменении взаимоположения деформирующих шариков друг относительно друга происходит неизбежное увеличение силы  $P_c$ , приводящее к выходу его значения из допустимого интервала. Следовательно, увеличение нормальной силы, действующей со стороны сепаратора, приведет вначале к частичному, а в последующем к полному проскальзыванию либо по опорам качения, либо по обрабатываемой поверхности и, в конечном итоге, к заклиниванию шара и переходу его движения от процесса качения к процессу скольжения.

Как следует из зависимостей (13, 14), величина силы взаимодействия деформирующего шарика с сепаратором определяется сочетанием коэффициентов трения между деформирующим шариком и поверхностями деталей, контактирующими с ним, углом взаимодействия шарика с опорами качения, его радиусом, а также величиной нормальной силы, обеспечивающей пластическое деформирование поверхности. Очевидно, что в зависимости от сочетания коэффициентов трения, входящих в данные неравенства, проскальзывание шарика произойдет в первую очередь там, где реализуется та из зависимостей, которая при данном сочетании коэффициентов трения между деформирующим шариком и поверхностями, контактирующими с ним, принимает наименьшее значение.

Сочетания коэффициентов трения между деформирующим шариком и поверхностями, контактирующими с ним, образуют области, которые определяют характер процесса движения деформирующего шарика. Для того чтобы определить области сочетаний коэффициентов трения, решим уравнения равновесия относительно коэффициента трения скольжения  $f_c$  с учетом интервала допустимых значений нормальной силы, действующей со стороны сепаратора, а также нагрузки, обеспечивающей, пластическое деформирование поверхности без опасности перенаклепа, и реального плеча трения качения деформирующего шарика по обрабатываемой поверхности.

Тогда имеем области сочетаний коэффициентов трения скольжения, определяющих проскальзывание и качение деформирующего шарика по сопрягаемым поверхностям (рис. 2):

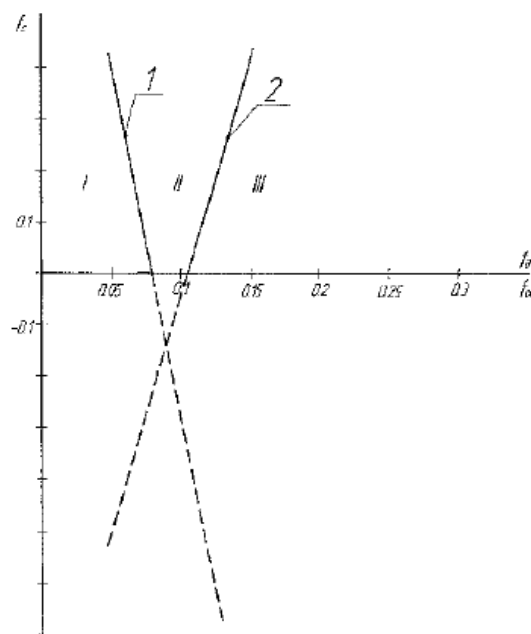


Рисунок 2

I - Область проскальзывания деформирующего шарика по опорам качения и по обрабатываемой поверхности.

II - Область качения деформирующего шарика по обрабатываемой

поверхности, но проскальзivanja по опорам качения.

III - Область качения деформирующего шарика и по обрабатываемой поверхности и по опорам.

где

$$1- \quad f_c = \sin \alpha - \frac{P_\partial}{P_c} \left( f_\partial (1 + \sin \alpha) + \frac{\kappa}{d/2} \right), \quad (15)$$

$$2- \quad f_c = \frac{P_\partial}{P_c} \left( \sqrt{2} f_{on} (1 + \sin \alpha) - \frac{\kappa}{d/2} \right) - 1. \quad (16)$$

Как следует из рисунка 2 скольжение деформирующего шарика по опорам качения или по обрабатываемой поверхности возможно только при определенном сочетании коэффициентов трения, которые в зависимости от условий работы раскатки могут быть различными и находиться в пределах  $0,1 \leq f_c \leq 0,2$ ,  $0,01 \leq f_{on} \leq 0,15$ ,  $0,05 \leq f_\partial \leq 0,25$ . Поэтому, прежде чем рассмотреть полученные области сочетания коэффициентов трения, в которых реализуются зависимости (13, 14), оговорим вначале реальные сферы применимости зависимостей, то есть реальные условия работы раскатки.

При невысокой частоте вращения гильзы и больших удельных давлениях в условиях полусухого трения смазка есть и коэффициенты трения различаются родом материалов и исходным состоянием сопрягаемых поверхностей. Следовательно, проскальзывание деформирующего шарика, в первую очередь, будет происходить по опорам качения, этому свидетельствует и область 2 (рис. 2). Следует также отметить, что и одновременно по опорам качения и по обрабатываемой поверхности деформирующий шарик проскальзывать не может (область 1). Так как постоянное нарастание нормальной силы, действующей со стороны сепаратора, приводит к тому, что свободное качение шарика не только по опорам качения, но и по обрабатываемой поверхности как таковое начинает отсутствовать и постепенно переходит в трение скольжения, то есть происходит так называемое заклинивание. Под заклиниванием следует понимать не полное прекращение вращения всех шариков раскатки и аварийный выход её из строя, а лишь частичное прекращение качения нескольких деформирующих шариков в течение некоторого времени. Но даже частичное скольжение шариков приводит к изменению соотношения значений максимальных нормальных и касательных напряжений, определяющих направление деформации и перемещение металла в зоне контакта деформирующего шарика с обрабатываемой поверхностью, которое оказывает наибольшее влияние на основные качественные показатели и, в первую очередь, на значения параметров и характеристик микрогеометрии поверхностного слоя. Таким образом, дальнейшее исследование сводится к определению величин и направлений главных сил, определяющих напряженное состояние поверхностного слоя гильзы цилиндра ДВС.

При контакте деформирующего шарика с поверхностью гильзы цилиндра

ДВС в процесі її обробки раскатыванием в ній виникають різного роду напруження, визначають поверхнотну, контактну і вигнуту міцність. Крім того, напружене стан поверхнотного шару гильзы непрямо впливає на його якісні показники, до яких пред'являються високі вимоги. Основним же фактором, визначаючим напружене стан, є механізм силового взаємодія контактуючих поверхностей.

Сили, виникають в процесі раскатывания, створюють контактні тиски на оброблюваній поверхні. На рисунку 3 показана схема взаємодія статично навантаженого деформуючого шара з оброблюваною поверхню гильзы, при цьому на шар діють сили  $P_{\partial}$  і  $F_{\partial}$ . Сила  $P_{\partial}$  здійснює нормальне тиски на оброблювану поверхню, сила  $F_{\partial}$ , забезпечує переміщення шара відносно неї.

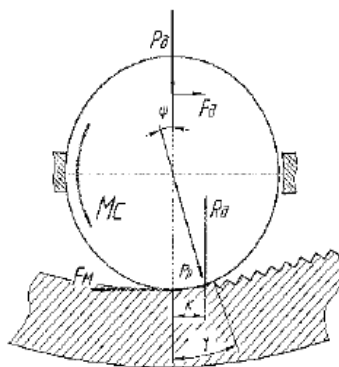


Рисунок 3

Очевидно, що рівнодійствующая  $P_p$  рівна сумі сил  $P_{\partial}$  і  $F_{\partial}$  розподілених по поверхні контакту, визначеною кутом контакту  $\gamma$ , і відхилена від напрямку дії сили  $P_{\partial}$  на кут  $\psi$ .

Пластичне деформування представляє собою локальне проявлення дії нормальних і касательних сил за межами еластичності. Згідно теорії дислокацій [3], якщо до кристалу прикласти зовнішню силу, то в ньому почнуть рухатися дислокації, причому їх рух відбувається в напрямках, забезпечують деформування кристала в напрямку дії прикладеної сили. При вільному каченні шара по поверхні гильзы маємо:

$$F_{\partial} \cdot \frac{3}{4} \cdot d = R_{\partial} \cdot \kappa. \quad (17)$$

Сила  $F_{\partial}$  витрачається тільки на подолання моменту контактної тертя  $M_{\partial}$ . Процес зняття вихідних шероховатостей за рахунок руху дислокацій і накоплення деформацій в поверхнотному шарі в цьому випадку здійснюється в основному за рахунок дії нормальної сили  $P_{\partial}$ . Такий процес сприяє створенню сприятливих умов пластичного деформування з виникненням незначительних сдвигових деформацій, в результаті чого досягається особливо висока ступінь гладкості і упрочнення обробленої поверхності.

При появлении силы, действующей со стороны сепаратора, момент, обеспечивающий перемещение деформирующего шара по обрабатываемой поверхности, увеличивается:

$$F_m \cdot \frac{3}{4} \cdot d = R_\delta \cdot \kappa + M_c, \quad (18)$$

где  $M_c$  – момент трения сепаратора ( $M_c = F_c \cdot d/2$ )

Результирующая сила в этом случае будет уже равна сумме сил  $P_\delta$  и  $F_m$  и будет отклонена от направления действия нормальной силы на угол больший чем  $\psi$ . Процесс пластической деформации при такой схеме может осуществляться по двум направлениям:

1. Если шар продолжает равномерное вращательное движение при значениях силы  $P_c$ , принадлежащих, допустимому интервалу, то значение силы  $F_\delta$  хотя и увеличивается, но увеличение это происходит в пределах угла контакта  $\gamma$ . При этом процесс постепенного осаживания исходных микронеровностей характеризуется еще и их сдвигающими деформациями, хотя и незначительными. Но наложение даже незначительных сдвиговых деформаций на процесс вдавливания микронеровностей существенным образом изменяет схему деформации и оказывает влияние на процесс формирования качественных показателей обработки [4].

2. Если происходит заклинивание деформирующего шарика и значение силы  $P_c$  выходит из допустимого интервала при некотором соотношении коэффициентов трения, то угол  $\psi$  принимает наибольшее значение. Этот процесс характеризуется нарастающим увеличением значения сдвигающей силы  $F_\delta$  и стремлением её к максимальному значению  $F_m$ , которое обеспечивает деформирование микронеровностей в условиях наибольших касательных напряжений и высокой температуры в зоне контакта. Повышение температуры в зоне контакта приводит к увеличению скорости диффузии, которая в свою очередь обуславливает уменьшение твердости и прочности, а также медленное восстановление утраченных в результате пластической деформации исходных свойств металла (пластичности, магнитной проницаемости, теплопроводности, сопротивления коррозии и т.д.) и быстрое его окисление [5].

Такие условия пластического деформирования для материала, особенно чувствительного к перенапряжениям (чугуна) не приемлемы. Так как при взаимодействии контактирующих поверхностей в условиях пульсирующего трения скольжения, материал вначале затормаживается относительно индентора, а затем движется вместе с ним, то есть происходит как бы процарапывание (пропахивание) обрабатываемой поверхности внедрившимися в неё микровыступами профиля заклиненного шарика и разделение деформируемого металла на неустойчивые микрообъемы с различной степенью однородности. Все это приводит к скалыванию и шелушению поверхностного слоя обрабатываемой гильзы.

Таким образом, увеличение момента, обеспечивающего перемещение

деформирующего шарика относительно обрабатываемой поверхности за счет момента трения сепаратора, приводит к увеличению касательных (сдвигающих) напряжений поверхностного слоя, которые, в свою очередь, способствуют скалыванию исходных микронеровностей, а в последствии возможно и к их шелушению.

Учитывая вышеизложенное можно сделать следующие выводы:

1. При статическом раскатывании, когда орбита движения шариков расположена в плоскости, перпендикулярной оси обрабатываемого цилиндра, происходит постоянное изменение взаимоположения деформирующих шариков.

2. Изменение взаимоположения шариков приводит к возникновению сил их взаимодействия с сепаратором.

3. Область значений сил взаимодействия, в которой деформирующие шарики продолжают равномерное вращательное движение, можно определить по зависимостям (13, 14).

4. Сочетания коэффициентов трения между деформирующим шариком и поверхностями, контактирующими с ним, входящих в зависимости (13, 14), определяют очередность проскальзывания шариков по сопрягаемым поверхностям.

5. Увеличение касательных напряжений значительно влияет на процесс формирования качественных показателей обрабатываемой поверхности за счет увеличения сдвиговых деформаций в процессе образования новых дислокаций.

6. Пластическое деформирование чугуна в условиях значительных сдвиговых деформаций приводит к разделению поверхности деформируемого металла на неустойчивые микрообъемы с различной степенью однородности, скалыванию микронеровностей и шелушению поверхностного слоя.

### Список литературы:

1. Камышный Н.И. Внутренние силы и момент трения шарикоподшипников в вакууме / Н. И. Камышный // Изв. вузов, машиностроение, 1977,- №12. -С. 36-44.

2. Юрков Ю.В. Механизм заклинивания шарикоподшипников в вакууме / Ю.В. Юрков И Изв. вузов. Машиностроение. - 1962. - №4. - С. 23-27.

3. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах / А.Х. Коттрелл. - М.: Металлургиздат, 1958. - 267 с.

4. Максак В.И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта/ В.И. Максак. - М.: Наука, 1975. - 60 с.

5. Северденко В.П. Теория обработки металлов давлением / В.П. Северденко. - Минск.: Высшая школа, 1966. - 217 с.



**Анотація**

**Робота деформуючих кульок статичною розкаткою для обробки гільз  
циліндрів двигунів внутрішнього згоряння**  
Аветісян В.К., Польотов В.А., Соболев Є.Ф.

*Розглянуто роботу статичної розкатки для обробки гільз циліндрів  
двигунів внутрішнього згоряння.*

*Зроблено аналіз силової взаємодії статично навантаженого  
деформуючого кульки з оброблюваною поверхнею.*

**Abstract**

**Work deforming balls static rollers for processing cylinder liners of internal  
combustion engines.**

Avetisyan V.K., Polotov V.A., Sobolev E.F.

*Work of static rollers for the processing of cylinder liners of internal combustion  
engines.*

*The analysis of the force interaction statically loaded ball deforming the surface  
treatment.*