

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННЫХ СОСТОЯНИЙ И ИЗНОСА В КРИВОШИПЕ ПОДШИПНИКА ДВИГАТЕЛЯ М-62 МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

О.В. Маковецкая-Абрамова<sup>1</sup>, А.В. Хлопова<sup>2</sup>, В.А. Маковецкий<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики (СПбГУСЭ)  
191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 7, лит.А;

<sup>3</sup>Владимирский государственный университет, 600000, Владимир, ул. Горького, 87

Исследуется износ беговой дорожки в коренном роликовом подшипнике шатуна, как следствие неравномерности распределения контактных напряжений, оценивается эксплуатационная надёжность ДВС. Предлагается новая конструкция шатуна с переменной жесткостью стойки и с изменённой беговой дорожкой подшипника шатунной шейки. Применяется теория Г. Герца и Ж.В. Буссинеска для теоретического анализа контактной задачи. Результаты исследования экспериментально подтверждаются на моделях шатуна поляризационно-оптическим методом.

**Ключевые слова:** подшипник; износ; шатун; напряжения контактные; фотоупругость.

## RESEARCH OF CONTACT TENSION IN THE BEARING OF THE M-62 ENGINE A PHOTOELASTICITY METHOD

O.V. Makovetskaya-Abramova, A.V. Hlopova, V.A. Makovetsky  
St.-Petersburg state university of service and economy (SPbSUSE),  
191015, St.-Petersburg, street Kavalergardsky, 7 A.  
Vladimirskiy state university, 600000, Vladimir, street Gorkogo, 87

Research of wear of a path in the rod bearing, as a result of unevenness of distribution of contact tension, is estimated operational reliability of IKE. The new design of a rod with variable rigidity of a rack is offered. G.Gerts and Zh.V.Bussineska's theory is applied to the theoretical solution of a contact task. Results of research experimentally prove to be true on models a polarizing and optical method of research of tension in details of cars.

**Keywords:** bearing; wear; rod; tension contact; photoelasticity.

Как известно [1, 2], радиальные подшипники с цилиндрическими роликами имеют в 1,5 – 2 раза большую грузоподъемность и работоспособность по сравнению с однорядными радиально-упорными шариковыми подшипниками. Поэтому они широко применяются наряду с подшипниками скольжения в транспортных и бытовых машинах. В частности, опорные валы электродвигателей, насосов и компрессорных машин пищевой промышленности, а также ткацких, металлорежущих станков, как правило, опираются на роликовые подшипники. Надёжность и износоустойчивость этих опор во многом определяют эксплуатационную долговечность всей машины. Так, быстроходный четырёхтактный двухцилиндровый ДВС М-62 с середины прошлого века применяется на мотоциклах тяжёлого класса, выпускаемых на заводах городов Ирбита, Киева, Серпухова. Прототипом М-62 является двигатель BMW.

При работе данного двигателя на частотах до 5000 об/мин возникает проблема

прочности шатуна – быстрый износ и выход из строя кривошипного подшипника.

Циклическое воздействие (сжатие-растяжение шатуна) под каждым роликом вызывает максимумы и минимумы контактных напряжений, что приводит к усталостному износу беговых дорожек кривошипного подшипника [2, 3, 5].

На испытательном стенде Ирбитского мотоциклетного завода проводилось тензометрирование шатуна мотоцикла "Урал" на работающем двигателе М-62. Ртутный бесконтактный токосъёмник, показанный на рис.1 а), регистрирует показания розетки тензодатчиков тензостанции ТА-5 в динамике при числе оборотов коленвала до 10000 об/мин [4,6]. Зная упругие деформации шатуна по показаниям тензометрирования не трудно определить наибольшие (при сжатии шатуна) и наименьшие (при растяжении) действующие усилия. Фотография двигателя М-62 в разрезе перед началом тензометрирования, представлено на рис.1-а) – Фотография

объекта исследования - реальный шатун мотоцикла “Урал” с роликовым подшипником, представлена на рис.1 б).

На рис.2 представлена выявленная закономерность износа внутренней беговой дорожки шатуна в виде графика глубины цементирования поверхностного слоя “ $h$ ” и твердости по Бринеллю “HRc” по беговой дорожке для пальца цапфы коленчатого вала мотоцикла, до испытания и после 10000 км пробега в условиях бездорожья [3,4].

Кривая HRc показывает значительное уменьшение глубины цементированного слоя, равной перед началом эксплуатации – 1,8 мм. Области беговой дорожки “ $e-u$ ”, подвергнуты значительному износу и на отдельных участках почти полностью потеряли цементированный слой –  $h=0,15$  мм в точке “жс”. Металл сердцевины вследствие этого оказался наклепанным - HRc=72 в точке “жс”.

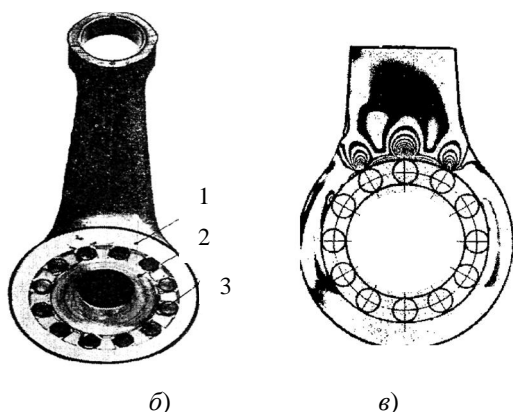
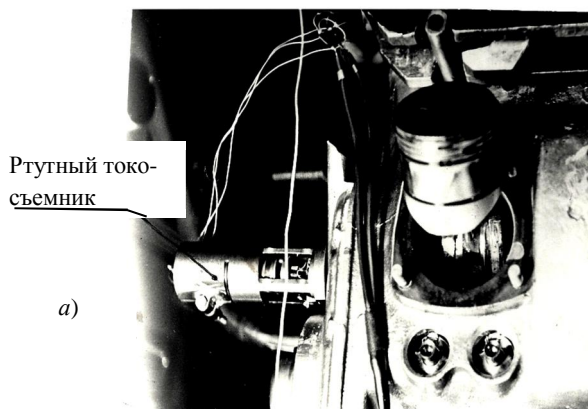


Рисунок 1. Испытательный стенд: а) – подготовленный для тензометрирования двигатель М-62; б) – реальный шатун мотоцикла “Урал” с роликовым подшипником (фотография); в) – оптически прозрачная модель; 1 – шатун; 2 – палец цапфы; 3 – ролики подшипника в сепараторе

Изучение металлографического состояния поверхностного слоя под микроскопом показывает, что разрушение начинается в середине беговой дорожки с образованием зон циклически изменённой микроструктуры,

возникновения микропор, вмятин и трещин, вслед за чем появляется выкрашивание, соответствующее этапу катастрофического износа.

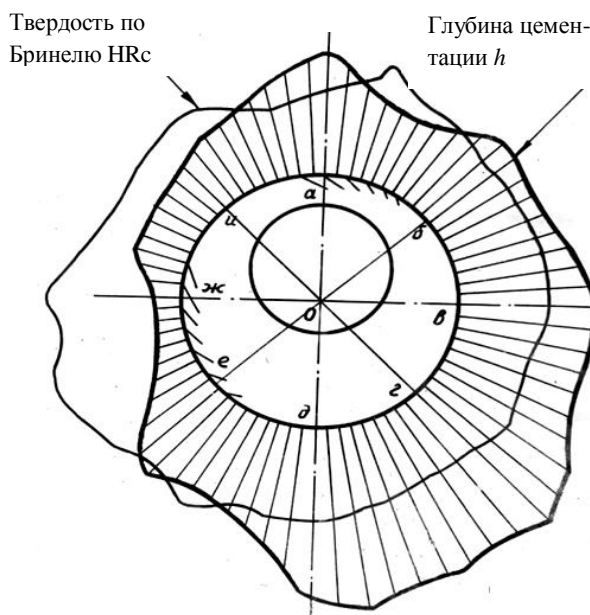


Рисунок 2. Закономерности износа внутренней беговой дорожки шатуна

Известно [2], что существует прямая связь между направлением качения роликов и ориентацией поверхностных трещин на беговой дорожке. В рассматриваемом случае, ориентация трещин по поверхности меняется вдоль беговой дорожки и различна по обе стороны от линии действия максимальной нагрузки шатуна на палец. На участке от “ $e$ ” до “ $a$ ” поверхность беговой дорожки покрыта выбоинами трещины отсутствуют. На диаметрально противоположной стороне пальца можно отметить лишь микрополости, которые не имеют выхода на поверхность, а глубина цементации  $h=0,8 - 1,0$  мм. Локализацию разрушения на участке “ $e - a$ ” можно объяснить тем, что наибольшему значению сжимающей нагрузки, соответствует всегда определённое положение коленчатого вала двигателя.

В ходе исследований были изготовлены экспериментальные шатуны геометрически подобные натуре. Чертёж данного шатуна и картина изохром и изоклин представлена на рис.3 (а,б). Сравнительная характеристика натурального шатуна (тип А) и экспериментальной модели (тип Б) представлена в таблице 1.

Для экспериментального подтверждения отмеченных закономерностей износа методом фотоупругости проводилось исследование распределения усилия по телам качения при сжатии и растяжении шатуна. Модели шатунов пальцев и роликов изготовлены из оптически активного материала ЭД-6М в

натуральную величину. Нагружение их осуществлялось с силами 221, 446, 935 Н, что соответствовало коэффициентам силового подобия 50, 25, и 12.

Таблица 1. Сравнительная характеристика натурального шатуна и экспериментальной модели

№	Диаметр ролика, мм	Диаметр пальца, мм	Число роликов	Зазор, мк	На-тяг, мк	Тип шатуна
1	7	36	12	20	-	А
2	7	36	12	-	20	А
3	5	40	18	20	-	А
4	5	40	18	-	20	А
5	7	36	12	20	-	Б
6	7	36	12	-	20	Б
7	5	40	18	20	-	Б
8	5	40	18	-	20	Б

Натяг или зазор в подшипнике создавался путём изменения диаметра пальца. Для всех восьми вариантов исполнения роликового подшипника (таблица) фотографировались картины изохром – линий максимальных касательных напряжений. Анализ картин изохром в моделях серийных шатунов показал неблагоприятное распределение усилий по телам качения при сжатии шатуна.

Качественный анализ картин изохром в моделях серийных шатунов (тип А) показывает неблагоприятное распределение усилий при сжатии. Нагрузку воспринимают только три ролика. Увеличение количества роликов с 12 до 18 несколько снижает контактные усилия по каждому ролику, но не является радикальным решением. Шатун экспериментального типа (тип Б), представленный на рис.4 а), при прочих равных условиях позволяет значительно снизить усилия на нижней головке шатуна под наиболее нагруженным центральным роликом. Существенное перераспределение усилий под роликами в моделях подшипников типа А и типа Б иллюстрирует рис.4 б).

Эпюра контактных напряжений для различных нагрузок серийного (на графике слева тип А) экспериментального (на графике справа тип Б) шатуна представлена на рис.5. Анализ данной эпюры позволяет сделать окончательные выводы:

1. Шатун типа В при прочих равных условиях позволяет значительно снизить усилия в нижней головке шатуна под наиболее нагруженным центральным роликом  $\max P_{\phi} = 0,29 P_0$  в шатуне типа Б против  $\max P_{\phi} = 0,45 P_0$  в шатуне типа А.
2. С увеличением зазора максимальное усилие в подшипнике возрастает во всех рас-

сматриваемых вариантах. Лучший результат получен при натяге в 20 мкм.

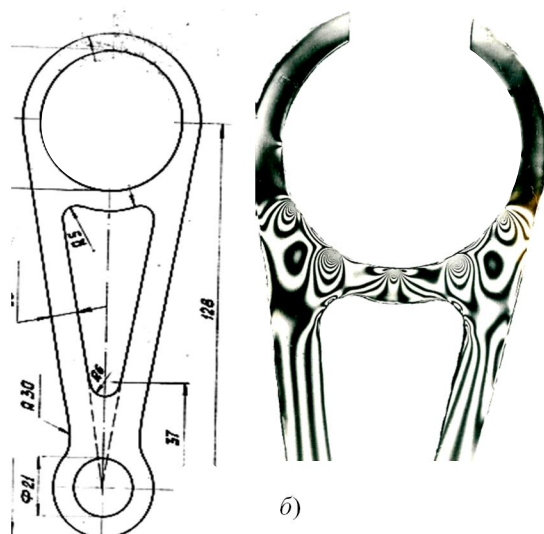


Рисунок 3. Чертёж модели и фотография изохром: а) – чертёж модели экспериментального шатуна (тип Б); б) – фотография изохром

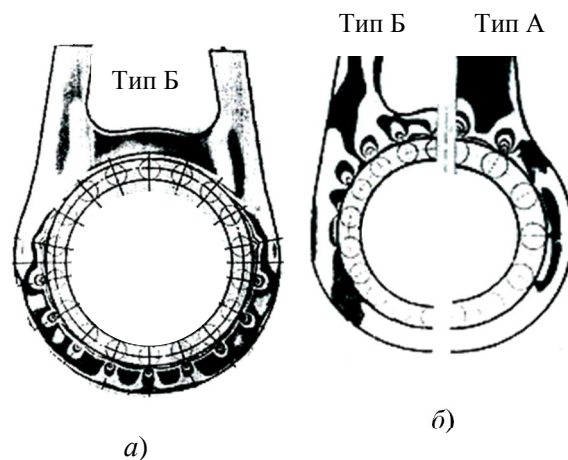


Рисунок 4. Контактные изохромы под роликами подшипников: а) – при сжатии шатуна; б) – при растяжении шатуна

### Выводы

1. В работе исследованы закономерности износа беговой дорожки роликового подшипника шатуна. Показана целесообразность комплексного исследования вопросов износа беговой дорожки путём применения микроструктурного анализа поверхности металла совместно с поляризационно-оптическим методом исследования напряжений.

2. На основании проведенных исследований контактных напряжений методом фотоупругости обосновано увеличение количества



роликов до 18 штук. Показано, что с увеличением числа роликов с 12 до 18 значительно уменьшается контактное напряжение в нижней головке шатуна (до 17%), соответственно уменьшается износ беговой дорожки.

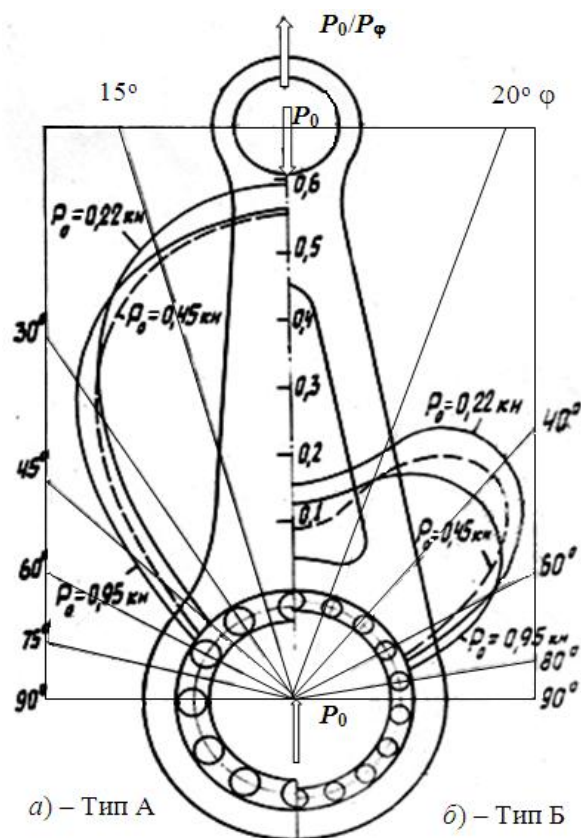


Рисунок 5. Сравнительные эпюры контактных усилий на ролики подшипника: а) – реальный шатун; б) – экспериментальный шатун

4. Предложена новая конструкция шатуна типа Б с изменённой жёсткостью нижней головки. Данная конструкция наряду с другими доработками шатуна позволила в два раза – до 20000 км увеличить испытательный пробег мотоцикла "Урал".

5. Определены максимальные контактные усилия под опасным роликом шатуна типа В

при растяжении  $\max P_\phi = 0,27 P_0$  и сжатии  $\max P_\phi = 0,29 P_0$ .

Предлагаемая методика решения контактной задачи полуобратным методом может успешно применяться для исследования распределения контактных напряжений при высокооборотной динамике. При этом эффективно применение скоростной фотографии, видеосъёмки, либо стробоскопии быстропротекающих процессов.

Результаты работы показывают, что физическое моделирование решения технических задач существенно дополняет, а иногда и полностью заменяет компьютерное моделирование в выборе граничных условий для разработки матмоделей.

### Литература

1. Понамарёв С.Д., Бидерман В.Л. и др. Расчёты на прочность в машиностроении/М.-МашГиз,1956.-т1,т.2
2. Когаев В.П. Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин /М.-Выш.шк.-1991.
3. Маковецкий В.А., Жиргалов В.Ф. и др. Распределение усилий в кривошипном подшипнике шатуна мотоциклетного двигателя/ Челябинск: сб. научных трудов Вопросы прочности и динамики конструкций, 1971- №92.
4. Горский С.В, Кононов Н.М. Тензометрирование лопаток радиально-осевой турбины/ Челябинск: сб. научных трудов Вопросы прочности машиностроительных конструкций, 1968- №45.
5. Горелик В.С. Измерение контактных давлений в подшипниковых узлах с помощью оптически активных моделей: Таллин, Материалы VIII Всесоюзной конференции по методу фотоупругости-1979.
6. Финк К., Рорбах Х. Измерение напряжений и деформаций / М.-МашГиз,1961.

<sup>1</sup> Маковецкая-Абрамова Ольга Валентиновна – кандидат технических наук, доцент кафедры "Технология обслуживания транспортных средств" СПбГУСЭ, моб.:+7(921)556 93 06, e-mail: abramova19701970@mail.ru;

<sup>2</sup> Хлопова Антонина Валентиновна – аспирант кафедры "Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения" СПбГУСЭ, моб.:+7(921) 556 95 37;

<sup>3</sup> Маковецкий Валентин Архипович – кандидат технических наук, доцент кафедры "Физика и прикладная математика" Владимирского государственного университета, моб.:+7(920)900 80 50