

Наличие высоких герцовских напряжений и больших скоростей обуславливает неизотермичность процесса трения. Поэтому провести сравнение экспериментальных материалов с теоретическим расчетом для изотермического случая, строго говоря, затруднительно.

Нами сделана попытка сравнить теоретические расчеты при изотермическом процессе с экспериментами, для чего принято, что температура масла  $t_M = t_{\text{общ}} + \alpha \Delta t$ , где  $0 < \alpha < 1$ . Для ориентировочных расчетов принято  $\alpha = 0,2 \div 0,5$  и проведены соответствующие расчеты согласно методике, изложенной в работе [4]. При этом экспериментальные значения толщины смазочного слоя в центре контакта  $h_0$ , практически легли в указанную вилку рис. 4. Это свидетельствует о качественном совпадении теоретических и экспериментальных результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gohar R., Cameron A. The Mapping of Elastohydrodynamic Contacts, ASLE Trans., Vol. 10, pp. 215—225, 1967.

2. Сэнборн, Винер. Влияние реологических свойств жидкости на упруго-гидродинамический точечный контакт при скольжении в условиях неустановившейся нагрузки. Проблемы трения и смазки, № 2 и 3, 1971 г., изд-во «Мир».

3. Petrousevitich A. L., Kodnir D. S., Salukvadze K. G., Bakashvili D. L. and Schwarzman V. Sh. The investigation of Oil Film Thickness in Lubricated Ball-race Rolling Contact. Wear, 19 (1972) 369—389.

4. Применение контактно-гидродинамической теории смазки к исследованию деталей машины. Труды Куйбышевского Авиационного института, вып. 40, 1969 г.

В. Н. ПАВЛОВ

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ МЕЖДУ КОНТАКТИРУЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ (аппаратура, результаты измерений)

Контактирующие поверхности многих деталей машин (зубчатые и червячные передачи, подшипники и другие), работающие в условиях трения качения или трения качения с проскальзыванием, разделены слоем смазки, который полностью или частично несет нагрузку, приходящуюся на зону контакта. Создание оптимальных условий смазки трущихся контактных поверхностей является в настоящее время наиболее радикальным средством снижения износа. Поэтому, как отмечается в работе [1], при решении вопросов износостойкости в машинах одной из основных задач является создание методов измерения толщины пленки при различных условиях трения.

Сложность процессов, протекающих в смазываемом контакте, придает экспериментальным методам исследований исключительно большое значение в этой области.

Измерение толщины смазочных слоев позволяет не только проверить и уточнить контактно-гидродинамическую теорию смазки, являющуюся определяющей для большинства режимов трения контактных поверхностей. Путем измерения толщины слоев можно четко установить характер трения — жидкостный, граничный — и условия перехода от одного к другому. В практическом отношении весьма важно, что измерение толщины смазочных слоев позволяет быстро и с высокой точностью, без разрушения испытуемых деталей, обнаруживать возникновение критических режимов трения, связанных с аварийным износом. Одновременное измерение толщины слоя и коэффициента трения позволяет исследовать теоретически очень важный вопрос о реологическом состоянии смазочных слоев при контактном трении.

Измерение толщины смазочного слоя даже в настоящее время представляет сложную задачу, так как объект измерений — смазочная пленка — находится между двумя движущимися поверхностями. При этом измеряемая величина в большинстве случаев намного меньше биений движущихся поверхностей, меньше отклонения формы этих поверхностей от правильной геометрической и меньше величины упругих деформаций этих поверхностей.

В настоящее время для измерения толщины смазочных слоев применяется ряд методов. Если исходить из тех физических явлений, на которых базируются методы измерения, то практически применяемые методы можно классифицировать следующим образом:

1) методы, основанные на использовании диэлектрических и диаманитных свойств смазочных масел (емкостной метод, метод измерения сопротивления смазочного слоя, метод измерения напряжения электрического пробоя, метод измерения магнитного потока);

2) люминесцентный метод, основанный на свойстве тонких смазочных слоев флуоресцировать после облучения источником ультрафиолетового света;

3) рентгеновский метод, основанный на просвечивании рентгеновскими лучами смазочных масел, находящихся между контактными поверхностями;

4) метод, основанный на явлении интерференции света;

6) метод, основанный на возникновении электрического разряда через смазочный слой.

Недостатком методов первой группы является то, что электропроводность смазочных масел существенно зависит от температуры и резко возрастает с увеличением прикладываемого напряжения. Продукты износа и окисления масла также вносят погрешности при измерении толщины смазочного слоя. Кроме того в условиях контактного трения, характеризующегося весьма малыми толщинами слоев смазки, последняя изменяет свои свойства диэлектрика и диаманитика, поэтому методы первой группы успешно применяемые для измерения сравнительно толстых слоев (напри-

мер, в подшипниках скольжения), могут оказаться ошибочными при измерениях тонких слоев (до 5 мк).

Люминесцентный и рентгеновский методы можно применять для измерения толщины смазочного слоя только между телами простой геометрической формы — цилиндрами, конусами. На точность измерений люминесцентным методом значительное влияние оказывает явление тушения люминесценции, особенно сильно проявляющееся при образовании структурированных граничных слоев.

Измерение толщины смазочного слоя по интенсивности рентгеновских лучей, проходящих через зазор между контактными поверхностями, является принципиально наиболее точным.

Как показали наши исследования, метод, основанный на возникновении электрического разряда через смазочный слой и измерении падения напряжения на нем, обладает высокой точностью. Кроме того он не требует сложной измерительной аппаратуры, позволяет вести наблюдение за состоянием смазочного слоя непосредственно во время эксперимента и применим в редукторах и передачах промышленного назначения. На рис. 1 представлена электрическая схема измерения этим методом, а описание метода дано в работе [2]. Проведенные нами специальные исследования позволили выяснить физическую сущность механизма электропроводности в тонких смазочных слоях (до 5 мк). Было установлено, что прохождение тока через тонкий смазочный слой осуществляется за счет электрического разряда (типа тлеющего), вызванного эмиссией электронов из контактирующих поверхностей, а смазочный слой только стабилизирует процесс разряда и предотвращает образование дугового разряда.

Процесс, очевидно, протекает следующим образом. Сперва между контактирующими поверхностями в месте их наибольшего сближения образуется ионизированная зона. Возникновению ионизации способствуют находящиеся в масле посторонние примеси. Попадая между поверхностями, токопроводящая частица разогревается проходящим током до испарения, в результате чего образуются условия для возникновения устойчивого тлеющего разряда. Образование ионизации было обнаружено при помощи сцинтилляционного и гейгеровского счетчиков. При возникновении тлеющего разряда сила тока через слой возрастает, ионизированные частицы влияния на процесс разряда не оказывают, перенос электрических зарядов происходит за счет эмиссии электронов из контактирующих поверхностей. Тлеющий разряд возникает и при отсутствии масляного слоя между поверхностями (в воздухе), но исследовать его, ввиду низкой стабильности, можно только путем записи на осциллограф. На воздухе тлеющий разряд переходит в дуговой.

При неплоском смазочном слое отдельные микронеровности поверхностей вступают в соприкосновение и через них осуществляется электрическая проводимость. С возрастанием толщины

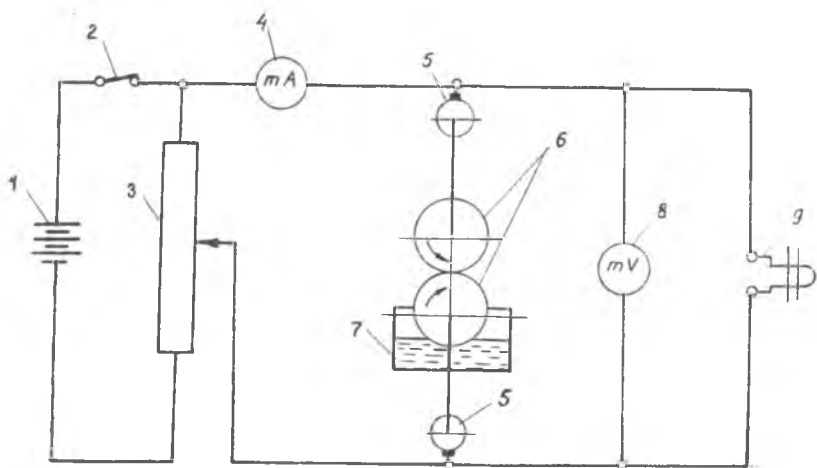


Рис. 1. Электрическая схема измерения толщины смазочного слоя методом электрического разряда:

1 — аккумуляторная батарея; 2 — выключатель; 3 — реостат; 4 — миллиамперметр; 5 — токоємники; 6 — ролики; 7 — масляная ванна; 8 — милливольтметр; 9 — шлейф осциллографа

смазочного слоя уменьшается площадь соприкосновения поверхностей и контактное сопротивление возрастает. Теплота концентрируется в очень малом объеме металла, который нагревается до высокой температуры и, наконец, испаряется со взрывом, образуя при этом понижившую зону, в которой развивается тлеющий разряд. Разряд образуется немедленно вслед за взрывом контактного мостика между его остатками. При этом характерной особенностью разряда является то, что не требуется высокого напряжения зажигания. Разница между напряжением зажигания и последующим напряжением уже горящего разряда очень мала.

Величина падения напряжения на электрическом разряде в смазочном слое между разнородными металлами (медь — алюминий, алюминий — сталь, медь — сталь) изменяется при переключении полярности источника тока. При одинаковом материале поверхностей падение напряжения не зависит от полярности источника тока. Было установлено, что величина падения напряжения зависит от работы выхода электрона металла. Расположение металлов в ряд по возрастающей работе выхода электрона показывает, что основную роль в разряде играют электронные процессы за счет эмиссии электронов из металла катода. Необходимо заметить, что изменение падения напряжения при переключении полярности обнаруживается только при смазывании свежим неполярным маслом (вазелиновое). Это объяснить можно тем, что работа выхода электрона металла значительно изменяется в

зависимости от состояния его поверхности, загрязнений, следов влаги и пр.

Очевидно, что при измерениях описываемым методом на точность показаний не будут влиять увеличение температуры масла, содержания в нем влаги, продуктов разложения масла, окисных продуктов износа, металлических частиц, так как это не влияет на процесс разряда. Проведенные нами специальные исследования подтвердили это предположение. Падение напряжения на электрическом разряде зависит только от толщины смазочного слоя между контактирующими поверхностями (при постоянной силе тока).

Для выяснения величины погрешности при измерении толщины пленки по падению напряжения нами было проведено сопоставление результатов измерений по падению напряжения, рентгеновским методом и при помощи тензометрического датчика микроперемещений.

Для этого была разработана и изготовлена установка для одновременного измерения толщины смазочного слоя рентгеновским методом, по падению напряжения и тензометрическим датчиком. На рис. 2 показан узел установки для рентгеновского метода измерения.

Метод измерения толщины смазочного слоя между движущимися поверхностями при помощи рентгеновских лучей основан на том, что между ними пропускается узкий пучок рентгеновских лучей, которые легко проникают через масло и не проходят через металлические поверхности.

В отечественной литературе данных об использовании рентгеновских лучей для измерения толщины смазочного слоя в контакте и установок для этой цели не имеется. За рубежом рентгеновский метод измерения толщины смазочного слоя применяется [3].

Описываемая установка отличается от зарубежных своей конструкцией и системой регистрации радиации. Рабочими телами установки являются цилиндрические ролики 1 и 2, установленные на двух валах, имеющих самостоятельный привод непосредственно от электродвигателей постоянного тока 3 (для верхнего ролика не показано), что позволяет плавно изменять скорость вращения обоих роликов в широком диапазоне независимо друг от друга. Нагрузка на ролики создается пружинным устройством (на рисунке не показано). Особое внимание уделялось точности изготовления и монтажа установки, устранению вибраций, биений, балансировке, которые бы могли повлиять на измерение толщины пленки. На выступающей части крышки 5 подшипникового узла 4 вала нижнего ролика на подшипнике качения 5 установлен кронштейн 7. С одной стороны кронштейна закреплен рентгеновский аппарат 8, а с другой — счетчик радиации 9. При помощи винта 10 кронштейн может поворачиваться вокруг оси вращения нижнего ролика. Это позволяет точно выставить рентгеновский луч по касательной к двум роликам. Перед выходным

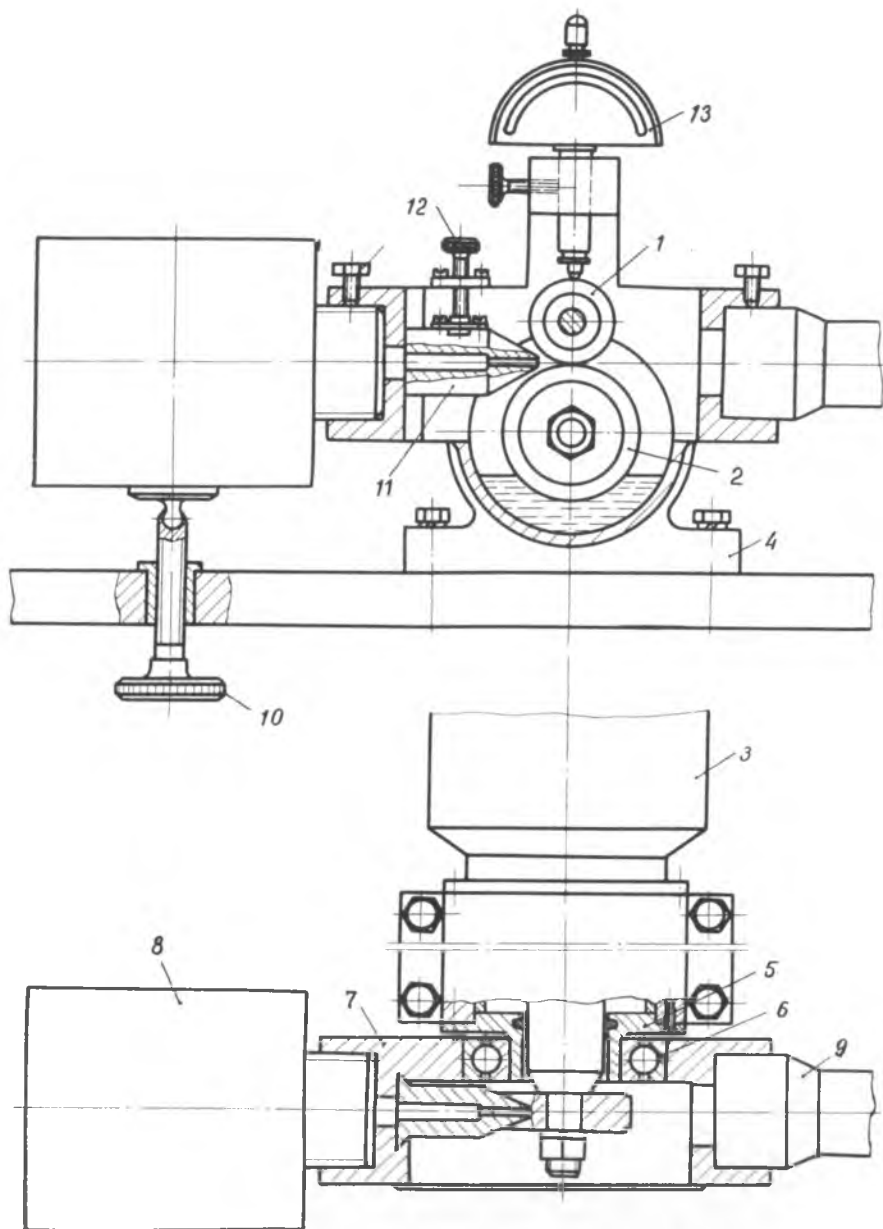


Рис. 2. Узел установки для измерения толщины смазочного слоя при помощи рентгеновских лучей:

1 — верхний ролик; 2 — нижний ролик; 3 — электродвигатель; 4 — подшипниковый узел; 5 — крышка; 6 — подшипник качения; 7 — кронштейн; 8 — рентгеновский аппарат; 9 — счетчик радиации; 10 — винт; 11 — коллиматор; 12 — винт; 13 — оптический датчик

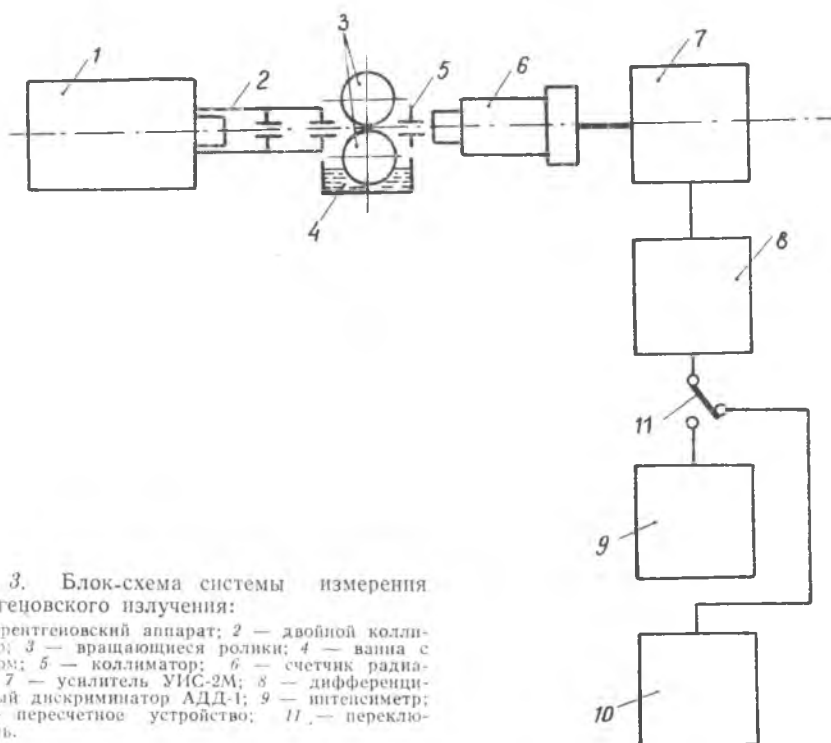


Рис. 3. Блок-схема системы измерения рентгеновского излучения:

1 — рентгеновский аппарат; 2 — двойной коллиматор; 3 — вращающиеся ролики; 4 — ванна с маслом; 5 — коллиматор; 6 — счетчик радиации; 7 — усилитель УИС-2М; 8 — дифференциальный дискриминатор АДД-1; 9 — интегратор; 10 — пересчетное устройство; 11 — переключатель.

оком рентгеновской трубки установлен двойной коллиматор 11, назначение которого — ограничить размеры первичного пучка рентгеновского излучения, предотвратить попадание его на детали установки и вырезать узкий направленный пучок рентгеновских лучей, который пропускается между вращающимися роликами. Винт 12 позволяет перемещать коллиматор вертикально, точно направляя луч между роликами. Для устранения ошибок при направлении рентгеновского луча между роликами размер выходного отверстия коллиматора равен 1 мм, что значительно больше измеряемой толщины пленки. Нижняя часть кронштейна представляет собой ванну, в которой находится масло для смазывания роликов. Подшипниковый узел вала верхнего ролика имеет возможность поворачиваться вокруг своей опоры, что позволяет создавать необходимый зазор между роликами при помощи специального устройства (на рисунке не показано). Для исследований принято мягкое рентгеновское излучение, имеющее малую проникающую способность, поэтому не проникающее через стальные ролики.

На рис. 3 показана блок-схема системы измерения рентгеновского излучения, принцип работы которой заключается в следующем.

Рентгеновское излучение, источником которого является рентгеновский аппарат 1, пропускается через коллиматор 2 и направляется в зазор между вращающимися роликами 3, один из которых помещен в ванночку с маслом 4. Величина рентгеновского излучения, прошедшего через масляный зазор между роликами, зависит от толщины смазочного слоя. Для регистрации вторичного излучения применяется счетчик 6, состоящий из сцинтилляционного кристалла, фотоэлектронного умножителя и предусилителя. Перед счетчиком установлен одинарный коллиматор 5, который препятствует попаданию в него излучения, рассеянного в воздухе. В счетнике вторичное рентгеновское излучение преобразуется с помощью кристалла в световые вспышки, которые в свою очередь преобразуются фотоэлектронным умножителем ФЭУ-35 в импульсы тока. Первоначальный сигнал усиливается усилителем 7 типа УИС-2М и подается на дифференциальный дискриминатор 8 типа АДД-1, применение которого позволяет исключить импульсы космического и радиоактивного фона и одновременно шумовые импульсы фотоумножителя.

Для обработки и выдачи информации об интенсивности вторичного рентгеновского излучения служит электронный пульт. Он может работать в режиме «интенсиметр» 9 и «пересчетное устройство» ПС 10. Для переключения режимов работы служит переключатель 11.

Для измерений толщины смазочного слоя по падению напряжения подшипниковый узел верхнего ролика электроизолирован от рамы установки. На валах роликов установлены токосъемники для подключения электрической схемы измерения.

Тензометрический способ измерения толщины смазочного слоя состоит в том, что на установке (рис. 2) вместо оптикатора устанавливается тензометрический датчик перемещений, основной деталью которого является пружина-балочка с наклеенными на ней тензодатчиками. Щуп датчика вводится в соприкосновение с верхним роликом, при вертикальном перемещении которого происходит прогиб балочки, что вызывает разбаланс тензомоста. Полученный сигнал усиливается усилителем 8АНЧ-ОМ и подается на шлейфовый осциллограф МПО-2. Измерение толщины смазочного слоя производилось следующим образом. Сначала ролики прокручивались вручную без масла и осциллограф фиксировал биение роликов. Затем подавалось масло и при вращении роликов между ними образовывался смазочный слой. В этом случае получали осциллограмму, подобную осциллограмме биения, но смещенную от нулевой линии. С увеличением скорости вращения роликов увеличивается толщина смазочного слоя, в результате осциллограмма все больше смещается и частота ее увеличивается. Для определения абсолютной толщины смазочного слоя тензометрический датчик тарировался.

При обработке экспериментальных данных по измерению толщины смазочного слоя была проведена статическая тарировка



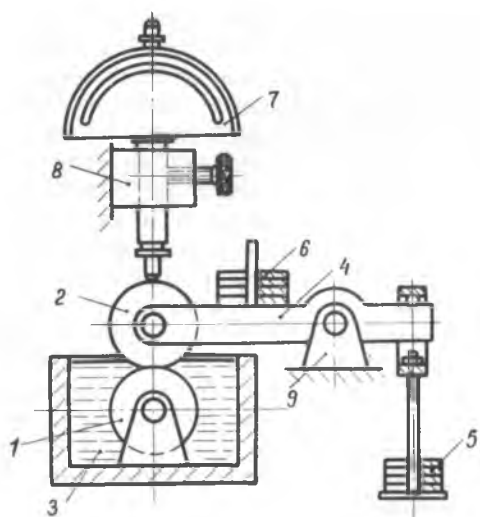


Рис. 4. Схема приспособления для выбора начала отсчета зазора:

1 — нижний ролик; 2 — верхний ролик; 3 — ванна с маслом; 4 — каретка верхнего ролика; 5 — противовес; 6 — груз; 7 — оптикатор; 8 — кронштейн; 9 — опора

му зазору между ними. Так как упругие деформации в контакте соизмеримы или превосходят измеряемую величину масляной пленки, то погрешность в выборе начала отсчета может быть значительной.

На рис. 4 показана схема приспособления для выбора начала отсчета при тарировке, которая проводилась непосредственно на установке. Для этого при помощи грузов 6 нагружаем контактирующие ролики 1 и 2 до появления упругих деформаций в контакте. Ножку оптикатора 7 устанавливаем на ролик 2. Производим плавную разгрузку контакта, снимая грузы 6 и затем увеличивая вес противовеса 5, до полного уравнивания ролика 2. Одновременно оптикатором измеряем деформацию разгрузки. Положение контакта, при котором величина упругой деформации равна нулю, а увеличение веса противовеса связано с преодолением сил трения в опоре 9, принимаем за начало отсчета. При тарировке раздвижение роликов осуществляется при помощи специального устройства.

График разгрузки контакта показан на рис. 5. По оси абсцисс отложено усилие разгрузки, а по оси ординат — деформация разгрузки. В области I при уменьшении усилия прижатия роликов проявляется упругая деформация контакта. Область II соответствует такому положению контакта, когда величина упругой деформации равна нулю. Горизонтальный участок на графике при-

зависимостей толщины смазочного слоя от падения напряжения на электрическом разряде и от величины рентгеновского излучения, прошедшего через масляный зазор. Величина зазора между роликами измеряется оптикатором 13 (рис. 2) с ценой деления  $0,0002 \text{ мм}$ , установленным на кронштейне 7 прямо над центром верхнего ролика.

Большое значение при тарировке имеет возможно более точное определение начала отсчета зазора между контактирующими поверхностями.

Дело в том, что момент касания двух поверхностей в одних случаях может соответствовать уже какой-то деформации их, а в других случаях незначительно-

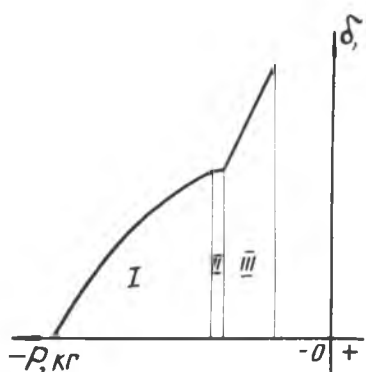


Рис. 5. График разгрузки контакта.

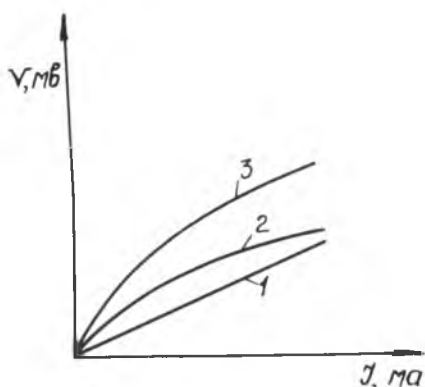


Рис. 6. Вольтамперные характеристики разгрузки контакта

пимаем за начало отсчета толщины смазочного слоя. Область III соответствует увеличению толщины смазочного слоя.

Выбранный метод начала отсчета подтверждается характером вольт-амперных характеристик для различных положений контакта (рис. 6). Линия 1 соответствует нагруженному положению контакта. В этом случае соблюдается линейная зависимость между током и напряжением. Линия 2 соответствует положению контакта, принятому за начало отсчета. Линейная зависимость между током и напряжением нарушается. Линия 3 соответствует толщине смазочного слоя между роликами равной 1 мк. Отступление от закона Ома значительное. Таким образом, вольтамперные характеристики подтверждают правильность выбора начала отсчета. Ошибка в выборе начала отсчета будет зависеть от тщательности проведения эксперимента.

Результаты статической тарировки представлены на рис. 7.

По результатам измерений тремя методами построены графики зависимости толщины смазочного слоя в функции суммарной скорости качения (рис. 8). Полученные кривые имеют одинаковый характер, их расхождение не превышает 15%. Наименьшая толщина получается при измерении рентгеновским методом и несколько больше при измерении методом разряда и при помощи тензодатчика. Расхождение результатов повторных измерений в одинаковых условиях не превышает 5%.

Таким образом, по сравнению с наиболее точным, но требующим сложной измерительной аппаратуры, рентгеновским методом, более простой и применимый во всех случаях метод по измерению разряда в масле обладает также высокой чувствительностью и точностью.

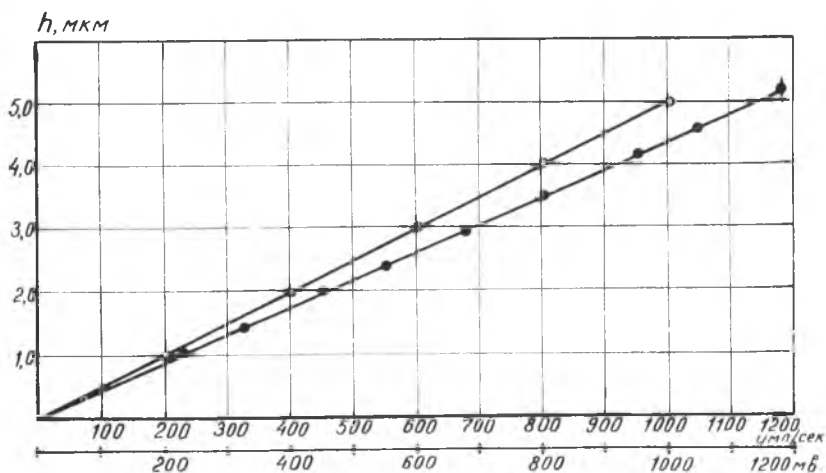


Рис. 7. Тарировочные зависимости радиации и падения напряжения от толщины слоя масла:  
 1 — радиация в имп/сек; 2 — падение напряжения в мВ.

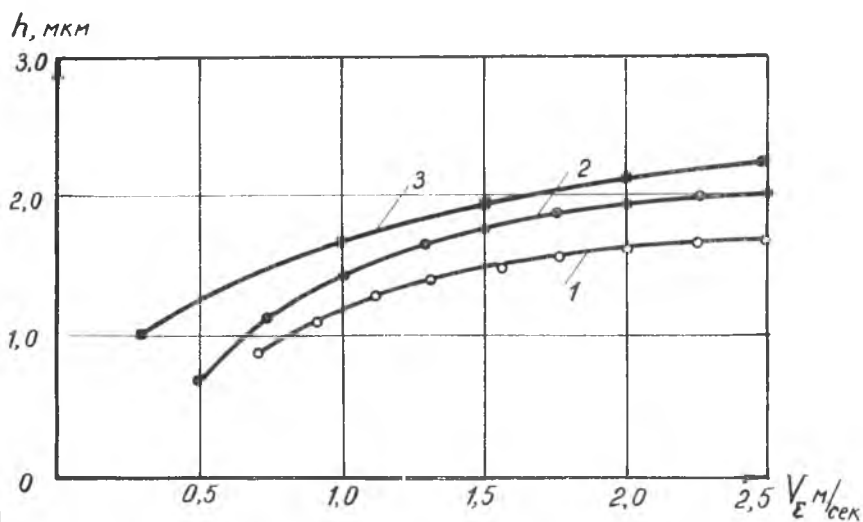


Рис. 8. Влияние скорости качения на толщину слоя масла:  
 1 — по радиации; 2 — по падению напряжения; 3 — по данным тензодатчика

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пинегин С. В. Научные проблемы прочности и износостойкости в машиностроении, «Вестник машиностроения», 1970, № 3.

2. Райко М. В., Тривайло М. С. Метод измерения толщины смазочного слоя в контакте деталей машин, «Физико-химическая механика материалов», 1965, № 5.

3. Sibly L. B., Austin A. E. An X-ray method for measuring thin lubricant films between rollers «ISA Trans». 1962. 1. № 3.

С. В. ПИНЕГИН, Ю. Н. БЛОХИН

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ

В современной технике наиболее распространенные детали машин (шариковые и роликовые подшипники качения, зубчатые и фрикционные передачи), как правило, работают со смазкой. Смазочные вещества выполняют при этом различные функции — обеспечение минимальных потерь на трение, уменьшение износа, отвод тепла и т. д. Влияние масел на износ и трение смазываемых поверхностей зависит от сочетания многочисленных факторов (параметров режима трения, состояния поверхностей, износных, фрикционных и смазочных свойств масел). В данной работе приведены результаты экспериментального исследования влияния смазки на характер и величину изменения сопротивления качению в зависимости от скорости, нагрузки, размеров и формы контактной площадки. Эксперименты проводились на высокоскоростной роликовой установке с изменением скорости качения от 3,5 до 75 м/сек и нормальной нагрузки от 50 до 450 кГ [1]. Установка оборудована измерительными устройствами, позволяющими вести непрерывно регистрацию в ходе эксперимента величины сопротивления качению, нормальной нагрузки, скорости качения и относительного проскальзывания поверхностей. При испытаниях использовались ролики цилиндрической и торoidalной формы с отношением  $\frac{R_0}{d_{ин}} = \infty; 1; 0,59; 0,515$ . Диаметр роликов 140<sub>-0,01</sub> мм, радиус в плоскости, перпендикулярной качению,  $\infty; 5; 5,15; 5,9; 10$  мм. Материал образцов ШХ15, твердость после термической обработки HRC 60—62, чистота рабочей поверхности ∇9 по ГОСТу 2789—56. Нагрузка на контакте изменялась ступенями 50 кГ; 150; 250; 350; 450 кГ. Вычисление контактных напряжений производилось по известным формулам теории упругости. Расчетные значения максимальных контактных напряжений приведены в таблице 1.

Исследование влияния смазки на сопротивление качению проводилось с последовательным изменением условий проведения эксперимента: а) поверхности сухие, б) обильная подача масла в