

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

С. Е. БРЕСЛЕР и П. А. ФИНОГЕНОВ

**О ЗАМЕНЕ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ТРЕНИЕМ КАЧЕНИЯ В МЕХАНИЗМАХ С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ ШАРИКОВ \***

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 9 XII 1939)

С 1883 г., со времени, когда впервые возникло производство шариковых и роликовых подшипников, они все более заменяют подшипники скольжения, в особенности в наиболее ответственных и нагруженных механизмах, работающих при высоких оборотах—в тракторах, автомобилях, центрифугах и т. п. За последние годы наряду с обычными роликовыми подшипниками получили распространение так называемые игольчатые подшипники, особо пригодные при больших нагрузках ударного характера; в них диаметр роликов сильно уменьшен ( $1\frac{1}{2}$ —3 мм), сепараторы выброшены, иглы обильно смочены смазкой, которая удерживается в них значительными капиллярными силами. Работает игольчатый подшипник таким образом, что в месте приложения максимальной радиальной нагрузки иглы катятся и работают, как ролики, во всей же остальной части подшипника иглы со смазкой вращаются как целое, образуя своеобразный подвижной вкладыш.

Теория трения качения показывает, что условия работы шариков и роликов несколько не ухудшаются при уменьшении их линейных размеров, так как нагрузка распределяется на большее их число. Действительно, долговечность шариков, которые работают на усталость, зависит, как известно, от величины максимального напряжения в материале; а последнее пропорционально удельному давлению на один шарик.

Последнее может быть определено из известной формулы Герца \*\* для радиуса площадки соприкосновения шарика с плоскостью:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{8}pd \frac{m-1}{mG}} \approx \sqrt{\frac{2,73p}{\frac{4}{d}E}},$$

где  $p$ —нагрузка на один шарик,  $d$ —диаметр шарика,  $E$ —модуль Юнга,  $G$ —модуль сдвига,  $m$ —коэффициент Пуассона.

Удельное давление  $\sigma$  может быть найдено простым интегрированием:

$$\sigma = \frac{3p}{2\pi a^2} = \frac{3}{2\pi} \left( \frac{4}{2,73} \right)^{\frac{2}{3}} p^{\frac{1}{3}} E^{\frac{2}{3}}.$$

\* Заявка С. Е. Бреслера № ГП11437 от 27 IX 1937 г.

\*\* Heinrich Hertz, *Gesammelte Werke*, I, 5—6.

Но если удельное давление между трущимися поверхностями  $P$ , то полное давление на один шарик будет равно

$$P = \frac{P}{N},$$

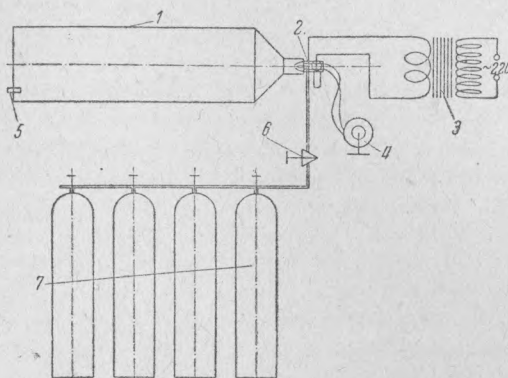
где  $N$ —число шариков на  $1 \text{ см}^2$ .

$N = k \frac{4}{\pi d^2}$ , где  $k$ —коэффициент порядка единицы, описывающий степень компактности укладки шариков. Отсюда окончательно получаем:

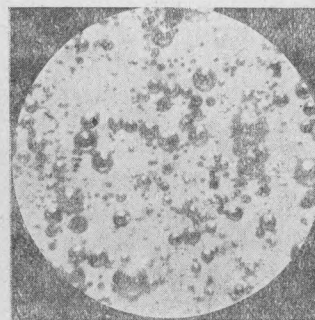
$$\sigma = A p^{\frac{1}{3}} E^{\frac{2}{3}},$$

где  $A$ —числовой коэффициент порядка единицы. Таким образом мы видим, что удельное давление  $\sigma$ , а соответственно и кратное ему максимальное напряжение в материале шарика не зависит от диаметра последнего.

А значит, микроскопические шарики должны работать в таких же выгодных условиях, как и крупные, если число их достаточно велико. Эти



Фиг. 1. Схема установки для получения микрошариков: 1—деревянный цилиндр, 2—электрометаллизатор, 3—пониж. трансформатор, 4—катушки со стальной проволокой, 5—выходной клапан, 6—редуктор, 7—баллон с азотом.



Фиг. 2

соображения навели одного из нас на мысль использовать суспензию из микроскопических стальных шариков, смешанных с обычным смазочным маслом, для смазки многочисленных механизмов, в особенности в тех случаях, когда так называемая полная смазка не всегда имеет место.

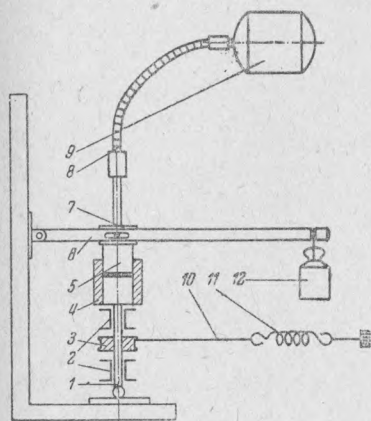
По законам гидродинамической теории смазки прорыв пленки смазки происходит, когда относительная скорость трущихся частей проходит через нуль. Значит, в подобном положении оказываются кривошипные механизмы и вообще все машины с возвратно-поступательным движением. Но интерес, который представляет суспензия микрошариков, не ограничивается этим примером. Можно пытаться применять ее для смазки обычных подшипников, разнообразных передач и т. д.

Из подобной постановки задачи вытекал ряд частных вопросов: как изготовить в массовом количестве микроскопические шарики из стали достаточно совершенной формы, как выделять из них фракцию с диаметрами, лежащими в достаточно узком интервале, наконец, как поведут они себя между трущимися поверхностями, в частности, не будет ли происходить набегание шариков друг на друга, что по некоторым предсказаниям должно было аннулировать весь ожидаемый эффект уменьшения трения.

В настоящем кратком сообщении мы решились опубликовать первые результаты, полученные нами в этой работе. Они не являются ни в какой мере полными и количественными, однако они достаточно удовлетворительны, чтобы продолжить работу с надеждой на успех.

Во-первых, нами был сделан ряд опытов для выработки метода получения шариков из стали. После ряда неудачных попыток мы остановились на методе пульверизации, причем в качестве разбрызгивателя использовали обычный электрометаллизатор. Оказалось лишь необходимым производить распыление в инертной среде—азоте, так как в противном случае шарики сгорали насквозь.

Опыт ставился нами следующим образом (фиг. 1). Газовая форсунка электрометаллизатора 2 питалась азотом из батареи баллонов 7. Азот



Фиг. 3. 1—нижняя пята, 2—шарикоподшипники, 3—барaban динамометра, 4—направляющая, 5—верхняя пята, 6—рычаг, 7—корпус шарнира, 8—гибкий вал, 9—электромотор, 10—шнур динамометра, 11—пружина динамометра, 12—груз.

вытянутой в соответствии с нашими ожиданиями, так как капельки застывают в быстром полете; у больших шариков отступление от сферичности достигает 5—10%, у мелких оно значительно меньше (так как большее значение приобретает поверхностное натяжение). Мы испытали пока в качестве материала для шариков только мягкую углеродистую сталь и не подвергли шарики термообработке, хотя нам вполне ясно значение, которое может приобрести таковая.

Фракционирование частиц по диаметрам может быть произведено в принципе с большой точностью с помощью осадительной ванны. Но в настоящей предварительной стадии работы мы этим не занимались и фракционировали их грубо с помощью сит. Мы выделили фракцию 120—150  $\mu$  и исследовали ее в смеси с машинным маслом в простом приборе для измерения трения (фиг. 3). Прибор этот представляет собой в основных чертах пята, состоящую из двух плоских каленых и полированных стальных поверхностей, между которыми и наносилась смазка.

Верхнее стальное тело 5 вращалось мотором с помощью гибкого вала, нижняя часть пяты была связана с простым пружинным динамометром, измерявшим момент трения. Нагрузка на трущиеся поверхности задавалась с помощью рычага 6 на шарикоподшипнике 2; благодаря тому, что последний был так называемым качающимся или двухрядным, он обла-

чрезвычайной чистоты мы приготавливали у себя ректификацией жидкого воздуха; анализ обнаруживал в нем присутствие кислорода в количестве, не превышавшем 0,1—0,2%. Перед газовой форсункой горела вольтова дуга, для которой электродами служили куски стальной проволоки, автоматически сматываемой с катушки 4. В этой дуге сталь плавилась и выдувалась из нее форсункой в широкий герметический сосуд 1, где застывшие капельки стального «тумана» оседали. Азот через клапан 5 выходил в атмосферу.

Исследование полученных нами частиц показало, что у них приближенно сферическая форма. На фиг. 2 представлена микрофотография шариков с увеличением 30. Размеры их оказались разнообразными—от нескольких микрон до нескольких сотен микрон. Поверхность зеркальна. Их форма была исследована нами с помощью оптиметра и оказалась слегка

дал свойствами универсального шарнира и поэтому способствовал устранению боковых давлений. Все же прибор этот был несовершенен, так как пришлось ввести в него направляющую втулку 4, препятствующую центрифугированию шариков. Поэтому абсолютные цифры, полученные на этом приборе, не столь интересны, сколько относительные, дающие изменения коэффициента трения при замене обычного масла между калеными стальными поверхностями нашей суспензией из шариков. В условиях опыта линейная скорость у периферии пяты 5 составляет 1 м/сек; нормальное давление было 20 кг/см<sup>2</sup>. В первый момент после прибавления шариков трение несколько возрастало, через несколько минут приработки они принимали, по видимому, правильное расположение, затем трение продолжало падать в течение некоторого времени, после чего устанавливалась величина его в 2—2,5 р а з а м е н ь ш а я, чем в опытах без шариков. Подобным образом прибор работал непрерывно в течение 2—3 час.

После этого суспензия рассматривалась снова под микроскопом. Обнаруживалось, что шарики сохранили свой блестящий зеркальный вид. Лишь некоторые из них, сильно отличавшиеся по диаметру, попавшие в суспензию благодаря грубости метода, которым мы их фракционировали, немного раскатались в процессе работы и приобрели ясно выраженную вытянутость. Это не помешало им катиться в подпятнике, воспринимая часть нагрузки.

Поступило  
27 XII 1939