

Г. В. ВИНОГРАДОВ и К. И. КЛИМОВ

## ПОЛЗУЧЕСТЬ И СДВИГОВАЯ ПРОЧНОСТЬ СМАЗОК

(Представлено академиком С. С. Наметкиным 30 XII 1949)

Способность смазок вести себя при малых напряжениях сдвига  $\tau$  подобно твердым телам с ясно выраженным пределом текучести  $\tau_{пр}$  определяет их способность сопротивляться течению под действием центробежных сил и силы тяжести.

Описание упруго-пластических свойств различных типов смазок было дано нами ранее (1). Важные результаты в области отыскания инвариантных реологических характеристик моделей мыльных смазок (олеогелей) были получены школой акад. П. А. Ребиндера (4).

Задачи настоящей работы: 1) доказать, что, несмотря на низкий предел прочности, при малых  $\tau$  смазки обнаруживают предел ползучести; 2) дать общую картину прочностных свойств смазок. Ниже дается сводка экспериментов, проведенных при комнатных температурах (в условиях строгого термостатирования) на различных смазках промышленного и лабораторного изготовления.

В основу изучения упруго-пластических свойств смазок был положен детально разработанный нами метод концентрического кручения образцов кольцевой формы (1, 2).

Для доказательства того, что смазки имеют предел ползучести, на торсионном эластометре (2) был поставлен опыт по типу тех, которые ставят в металловедении. Кальциевая смазка (солидол, содержащий 15% стеарата кальция) была подвергнута действию постоянной нагрузки ( $\tau/\tau_{пр} = 0,475$ ) при  $30^\circ$  в течение 20 мин. Затем температура термостатной жидкости, циркулировавшей вокруг образца, была понижена до  $20^\circ$  и деформации  $\gamma$  регистрировались в течение 9 час. Из фотограммы, приведенной на рис. 1, видно, что деформации со временем стремятся к пределу, т. е. что по достижении предела ползучести смазка ведет себя как нерелаксирующее твердое тело.

Прочностные характеристики смазок удобнее всего изучать, исследуя зависимость  $\tau = f(\gamma)$ . Рис. 2 обобщает по данным многочисленных опытов характер зависимости  $\tau = f(\gamma)$  при испытаниях смазок в различных условиях по методу концентрического кручения (2). В точ-

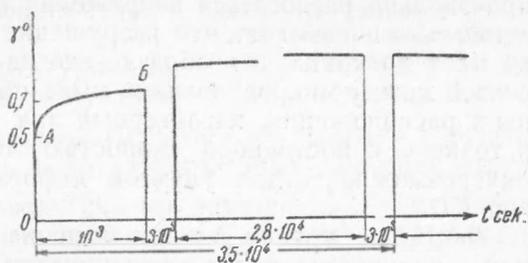


Рис. 1. Фотограмма длительной записи кинетики деформаций при постоянной нагрузке солидола, приготовленного лабораторно на стеарате кальция. O — момент приложения нагрузки; A — начало развития задержанной деформации; B — начало снижения температуры с  $30$  до  $20^\circ$

ке  $O$  к цилиндрическому сердечнику, погруженному в смазку, прикладывают момент, возрастающий с постоянной скоростью. Нагрузка на образец растет с постоянной скоростью до точки  $A$ . На начальном отрезке кривой  $OA$  величины  $\tau$  связаны практически линейно с  $\gamma$ . В точке  $A$  достигается предел прочности (текучести) и начинается интенсивное разрушение структурного каркаса образца. По кривой  $AB$  осуществляется переход к установившемуся режиму течения. Здесь напряжения падают вследствие разрушения

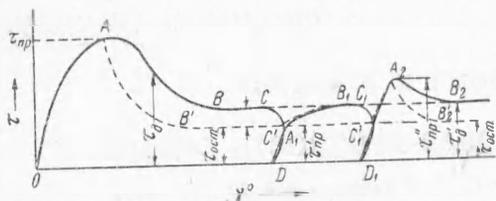


Рис. 2. Зависимость напряжений сдвига от деформаций при различных условиях испытаний смазок по методу концентрического кручения

структурного каркаса в смазке. На кривой  $BC$  реализуется установившийся поток. Если прекратить дальнейшее закручивание образца и попытаться оставить его под напряжением, соответствующим точке  $C$ , то, с одной стороны, под действием этой нагрузки будет продолжаться течение, с другой, в результате этого течения будут рассасываться и падать напряжения в образце.

Это падение напряжений происходит до некоторого предельного значения остаточного напряжения сдвига  $\tau_{ост}$ , отвечающего точке  $C$  и равного тому минимальному значению  $\tau_{ост}$ , до которого могут самопроизвольно рассосаться напряжения в образце смазки. Конечное значение  $\tau_{ост}$  показывает, что разрушение структурного каркаса никогда не идет до конца, и в образце всегда сохраняются достаточное число связей между микроволокнами мыла, обеспечивающих дальний порядок в их расположении, характерный для типичных твердых тел. Снимая в точке  $C$  с постоянной скоростью нагрузку с образца, мы создаем ему возможность для упругой деформации (восстановления) по кривой  $CD$ .

$DA_1B_1C_1$  — кривая зависимости напряжений сдвига от деформаций — получается так же как кривая  $OABC$ , притом немедленно после завершения разгрузки образца в процессе первого его испытания и при условии, что: 1) время протекания процесса рассасывания напряжений по кривой  $CC'$  невелико, т. е. он завершается только в первом приближении; 2) нагрузка снимается с образца (кривая  $C'D$ ) сейчас же после того, как в первом приближении завершился процесс рассасывания напряжений по кривой  $CC'$ . Если, наоборот, не разгружая образец в точке  $C'$ , начать прикладывать с постоянной скоростью момент к цилиндрическому сердечнику, погруженному в смазку, то кривая зависимости напряжений сдвига от деформаций изобразится линией  $C'B_1$ . В этом случае течение начинается одновременно с началом нагружения образца, т. е.  $\tau_{np} = \tau_{ост}$ . Этот случай иллюстрируется фотограммой, приведенной на рис. 3.

Кривая  $D_1A_2B_2$  (рис. 2) дает зависимость  $\tau = f(\gamma)$ , если образцу дают достаточно длительный отдых в точке  $D_1$ . Отдых приводит к частичному восстановлению структуры образца, в результате чего повышается предел текучести и  $\tau'_{np} > \tau'_{np}$ . Если образцу дать отдых в точке  $C'$ , не разгружая его, а затем начать погружать с постоянной скоростью его внутренний концентрический слой, то деформации будут развиваться по кривой  $C'_1A_2$ . В этом случае  $\tau'_{np} > \tau_{ост}$ .

Кривые  $C'D_1$ ,  $DA_1$  и  $C'_1D_1$ ,  $D_1A_2$  образуют гистерезисные петли.

Кривая  $AB'C'$  показывает влияние разрушения структурного каркаса образца (разупрочнения) на предел текучести. В ходе обычных опытов с концентрическим кручением образцов смазок невозможно расчитать

кривые  $ABC$  и  $AB'C'$ ; поэтому последняя носит гипотетический характер. Расчленив указанные кривые невозможно, поскольку неизвестна толщина слоя, прилегающего к сердечнику, в котором происходит течение, и толщина слоя, который находится в упруго напряженном состоянии; сказывается неоднородное напряженное состояние кольцевого слоя образца, подвергаемого деформации сдвига. Нельзя также рассчитывать вязкое сопротивление потока ( $\Delta\tau_\eta$ ). Однако естественно предположить, что непосредственно измеряемое на опыте динамическое напряжение сдвига ( $\tau_\partial$ ) складывается из  $\Delta\tau_\eta$  и предельного статического напряжения сдвига  $\tau_{пр} = \tau_{ост}$  слоя образца, граничащего с зоной течения и находящегося в упруго напряженном состоянии.

На кривой  $AB'$  значения  $\tau_{ост}$  не являются постоянной величиной, они зависят от величины  $\gamma$  и при данной скорости деформации образца не характеризуют его свойства. Поэтому определение  $\tau_{ост}$  имеет смысл только после выхода образца на кривую  $B'C'$ , т. е. для установившегося режима течения. В этих условиях сопоставление  $\tau_{пр}$  (начальное) и  $\tau_{ост}$  характеризует степень разупрочнения образца при данной скорости его деформации, поэтому  $\tau_{ост}$  является важным параметром, определяющим свойства смазки.

Процесс восстановления структуры смазок происходит медленно; поэтому, если

рассасыванию напряжений на кривой  $CC'$  или  $C_1C'_1$  дают завершиться только в первом приближении, т. е. за достаточно короткий отрезок времени (десять минут), можно считать кривую  $B'C'$  или  $B'_1C'_1$

горизонтальной прямой на всем ее протяжении, как это и показано на рис. 2.

Повышение напряжений при росте деформаций, согласно кривым  $C'B_1$  и  $A_1B_1$ , происходит за счет роста вязкого сопротивления в слое, в котором имеет место течение, пока не будет достигнуто значение  $\Delta\tau_\eta$ , характерное для данной скорости деформации образца.

Разупрочнение не устраняется и сдвиговая прочность не восстанавливается полностью даже после очень длительного отдыха смазок. Это связано с эффектом ориентации микроволокон в потоке (3). После прекращения течения смазок эта ориентация частиц в потоке сохраняется. Она фиксируется высокой вязкостью среды и в результате оказывается, что смазки до и после испытаний резко различаются по своей текстуре и по прочности. Влияние эффекта ориентации и дезориентации структурных элементов смазки на предел прочности иллюстрируется следующим опытом.

Рис. 4. Влияние на предел текучести нарушения ориентации в смазке, испытывавшей течение.  $A$  — предел текучести при доведении образца до течения в первый раз;  $B, D, F, H$  — значения  $\tau_{пр}$ , отвечающие предельному разупрочнению;  $C, G$  — значения  $\tau_{пр}$  после смещения сердечника вдоль его оси;  $E$  — значение  $\tau_{пр}$  после отдыха смазки

Испытанию была подвергнута кальциевая смазка (солидол, содержащий 18% мыл). Точкам на кривой  $AB$  (см. рис. 4) отвечают пределы прочности, достигаемые при последовательно проводимых опытах

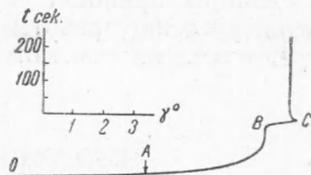


Рис. 3. Фотограмма кинетики деформаций консталина, изготовленного на касторовом масле.  $O$  — момент достижения установившегося режима течения;  $A$  — прекращение закручивания образца, материал остается под нагрузкой;  $B$  — достижение  $\tau = \tau_{ост}$  и начало нового нагружения образца;  $C$  — полное снятие нагрузки с образца. На выноске указаны направление и масштабы осей координат

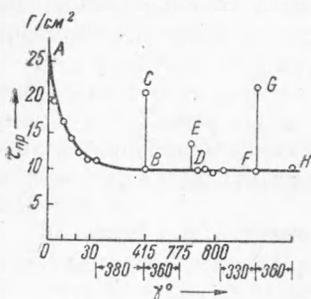


Рис. 4. Влияние на предел текучести нарушения ориентации в смазке, испытывавшей течение.  $A$  — предел текучести при доведении образца до течения в первый раз;  $B, D, F, H$  — значения  $\tau_{пр}$ , отвечающие предельному разупрочнению;  $C, G$  — значения  $\tau_{пр}$  после смещения сердечника вдоль его оси;  $E$  — значение  $\tau_{пр}$  после отдыха смазки

Испытанию была подвергнута кальциевая смазка (солидол, содержащий 18% мыл). Точкам на кривой  $AB$  (см. рис. 4) отвечают пределы прочности, достигаемые при последовательно проводимых опытах

с непрерывно возрастающей нагрузкой. Каждый раз образец доводился до течения и полностью разгружался после этого. Вслед за достижением предела разупрочнения (точка *B*) сердечник в эластометре <sup>(2)</sup> был поднят вверх в направлении оси на 5 мм, а затем опущен на прежнее место. Нарушение ориентации волокон в зоне течения при перемещении сердечника вызывает резкое повышение  $\tau_{np}$  (точка *C*). Прямая *FG* (рис. 4) показывает результаты повторения опыта. Повышение  $\tau_{np}$  за счет отдыха образца показано отрезком *DE* на рис. 4.

Авторы приносят глубокую благодарность проф. М. М. Кусакову за обсуждение работы и ценные советы и проф. А. С. Ирисову за предоставление возможности ее выполнения.

Поступило  
12 XII 1949

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Г. В. Виноградов и К. И. Климов, ДАН, 57, 911 (1947); 58, 1677 (1947); 71, № 3 (1950); ЖТФ, 18, 355 (1948). <sup>2</sup> Г. В. Виноградов и К. И. Климов, Тр. 2-й Конф. по трению, 3, 300 (1949). <sup>3</sup> Г. В. Виноградов, ДАН, 71, № 3 (1950). <sup>4</sup> Е. Е. Сегалова и П. А. Ребиндер, Колл. журн., 10, 223 (1948).