

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Д. М. Толстой

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ  
ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 15 I 1951)

П. А. Ребиндером и его сотрудниками<sup>(1)</sup> установлены две величины, характеризующие прочность структур в дисперсных системах:

1)  $\theta$  (в обозначениях П. А. Ребиндера  $P_R$ ) — предел текучести (совпадающий с пределом упругости<sup>(1)</sup>), т. е. наименьшее касательное напряжение  $\tau$ , вызывающее стационарное течение типа ползучести (с малыми скоростями сдвига  $dv/dx$ ), причем

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\tau - \theta}{\eta_1},$$

где  $\eta_1 = \text{const}$ .

2)  $\tau_m \geq \theta$  — прочность структуры, т. е. наименьшее касательное напряжение, вызывающее разрушение структуры, обратимое лишь в результате достаточно длительного тиксотропного восстановления. Эту величину можно считать верхним пределом текучести системы в целом, при превышении которого начинается течение разрушенной структуры с высокими скоростями.

Достаточно точное измерение предела текучести  $\theta$ , основанное на приведенном определении этой величины, сопряжено со значительными трудностями, так как на точность результата влияют следующие факторы; 1) величина интервала между последовательными нагрузками, при которых наблюдается деформация; 2) время, затраченное на наблюдение при нагрузках, близких к искомой. При кратковременном наблюдении можно не обнаружить замедления деформации и принять упругое последствие за течение с постоянной скоростью, преуменьшив искомую величину. Например, во многих консистентных смазках упругое последствие при напряжениях, близких к  $\theta$ , замедляется в течение десятков минут. При недостаточно узких интервалах между последовательными нагрузками результат может быть, наоборот, преувеличен.

Единственный вполне объективный метод абсолютного определения  $\theta$ , предложенный в работах П. А. Ребиндера и Е. Е. Сегаловой<sup>(1)</sup>, также связан с необходимостью длительных наблюдений и трудоемким полным исследованием упруго-пластично-вязких свойств изучаемой системы.

Точность другого метода, основанного на экстраполяции кривой  $\frac{dv}{dx}(\tau)$  до  $\frac{dv}{dx} \rightarrow 0$  (где  $\frac{dv}{dx}$  — градиент скорости и  $\tau$  — напряжение сдвига) или  $v(F)$  до  $v \rightarrow 0$  (где  $F$  — касательная сила), также зависит от затраты времени (на измерение весьма малых скоростей). Кроме того, для тиксотропных систем статический предел текучести, соответствующий

неразрушенной структуре, может весьма сильно превышать напряжение, при котором  $\frac{dv}{dx} \rightarrow 0$  после разрушения структуры (2).

Это, в частности, доказывается следующим наблюдением: углеводородная защитная смазка № 82 МНИ, зажата между параллельными плоскими горизонтальными кольцами ротационного прибора (3), при напряжениях сдвига, меньших  $\theta$  и вызывающих, следовательно, лишь пристенное скольжение (3,4), выдерживает нормальную нагрузку в несколько десятков  $\Gamma/\text{см}^2$  при толщине слоя  $\sim 2$  мм. Как только касательное напряжение достигает величины, вызывающей постоянную скорость сдвига, смазка почти мгновенно разжижается и выдавливается из зазора между кольцами уже при нормальных нагрузках порядка  $1 \Gamma/\text{см}^2$ .

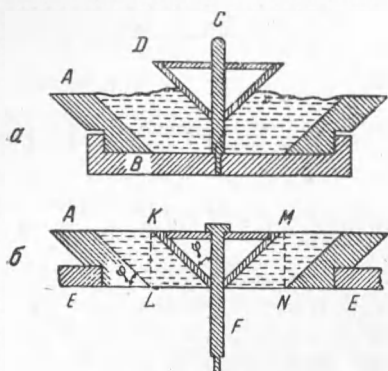


Рис. 1

Аналогичные результаты наблюдались и для солидолов. Вместе с тем это доказывает, что возникновение стационарного течения и разрушение структуры (сопровождающееся падением  $\theta$ ) происходят при одном и том же напряжении — статическом пределе текучести  $\theta$ , практически совпадающем для этих систем с  $\tau_m$ .

Именно для таких „хрупких“ систем, для которых  $\tau_m \rightarrow \theta$  (особенно в условиях быстро возрастающей нагрузки, что снижает  $\tau_m$ ), указанные ограничения точности измерения  $\theta$  отпадают, если в основу измерений положить то, что разрушение структуры при равномерно возрастающей нагрузке должно вызывать более или менее резкое изменение зависимости  $v(F)$ . Переход от  $v_1(F)$  к  $v_2(F)$  вызывается только разрушением сплошной структуры или более или менее резким изменением степени ее связности и потому может служить критерием этого изменения. Резкость этого перехода должна характеризовать резкость изменения связности структуры (ее хрупкость), а зависимость точки перехода от  $dF/dt$  дает истинную зависимость искомой величины от скорости нагружения, обусловленную только релаксационными процессами, а не несовершенством методики наблюдения.

Эти соображения были применены для выяснения степени инвариантности  $\theta$  в указанном смысле.

Для измерения  $\theta$  нами предложен прибор, показанный на рис. 1 и 2. Приведенные соображения относятся в принципе к любому прибору, позволяющему наблюдать сдвиг в функции равномерно возрастающей нагрузки, но данная система была выбрана для полного исключения пристенного скольжения.

Процесс зарядки прибора ясен из рис. 1а. Прилипание пасты ко дну центрировочного приспособления В предотвращается тем, что на дно В перед вмазыванием объекта кладется кружок папиросной бумаги, который затем легко удаляется (без повреждения плоской поверхности пасты) при перенесении прибора с В на пластинку Е

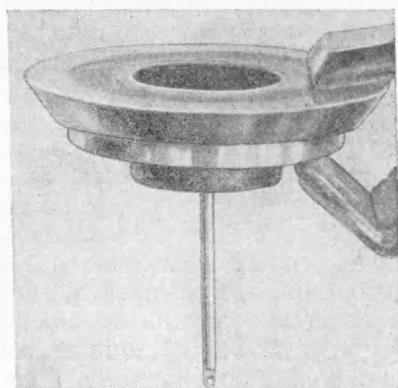


Рис. 2

(см. рис. 1а и б), снабженную установочными винтами. Вся система помещается в водяной термостат, в двойном дне которого впаяна трубка для пропуска стержня, подвешенного к  $F$ , нижний конец которого наблюдается в микроскоп с окулярной сеткой. После выдерживания объекта при заданной температуре в стакан, подвешенный к системе, начинает поступать вода через капилляр с постоянной скоростью.  $dF/dt$  и  $F(t)$  определяются путем взвешивания воды после измерений  $h(t)$ , где  $h$  — вертикальное смещение конуса  $D$ .

Цилиндрическая поверхность  $KLMN$  (см. рис. 1) является поверхностью наименьшей площади, к которой приложены тангенциальные силы, уравнивающие всю нагрузку на внутренний конус. Кроме того, при  $\varphi = 45^\circ$   $KL$  совпадает с направлением главного касательного напряжения, если пренебречь силой трения на  $KFM$  и  $AL$ . Поэтому пластическое состояние будет раньше всего достигнуто в тонком слое на поверхности  $KLMN$  (диаметры основания конуса  $D$  и нижнего отверстия  $A$  равны). Действительно, испытания с нерастекающимися консистентными смазками и глинистыми пастами показали, что сдвиг по  $KLMN$  успевает привести даже к полному выдавливанию этого цилиндра раньше, чем можно обнаружить какие-либо деформации в остальной массе (см. рис. 2). Таким образом, мы здесь имеем дело с простым сдвигом в весьма тонком цилиндрическом слое  $KLMN$ , расположенном целиком в объеме объекта и свободном от пристенного скольжения.

Достаточная однородность поля напряжений вдоль  $KL$  доказывается совпадением результатов с данными ротационного прибора<sup>(3)</sup>, в котором поле напряжений однородно с точностью до 15% (см. табл. 1).

Таблица 1

Метод измерения	№ кривых рис. 3	$\frac{dF}{dt}$ мГ/сек.	Длительность измерения в мин.	$h_k$ в $\mu$	$F_k$ в Г	$\theta$ в Г/см <sup>2</sup>
-----------------	--------------------	----------------------------	-------------------------------------	---------------	-----------	------------------------------

1. Углеводородная защитная смазка № 82 МНИ

Коакс. конуса . . . . .	1	6,32	168	494	86,0	12,5
" " . . . . .	2	30,7	41	183	88,1	12,4
" " . . . . .	3*	32,8	37	530	87,1	12,7
" " . . . . .		0	143	595	83,5 ± 5,0	12,0 ± 1,0
Ротацион. прибор . . . . .		0				12,4 ± 0,5
Винт . . . . .	4	138	16	150	157	10,8

2. Часовъярская глина; 58,5%

Коакс. конуса . . . . .	5	46,8	62	155	191	26,9
" " . . . . .	6	130	26	141	193	27,1

\* Без выдерживания при начальной нагрузке.

Результаты выполненных измерений (рис. 3 и табл. 1) показали справедливость предположения о резком изменении функции  $v(F)$  при определенном напряжении, которое оказалось не зависящим от  $dF/dt$  и равным пределу текучести  $\theta$ , измеренному в ротационном приборе с плоскими кольцами, позволяющем наблюдать сдвиг в объеме материала независимо от пристенного скольжения<sup>(3)</sup>. Точность установления этого напряжения в приборе с коаксиальными конусами

повышается, если зависимость  $v(F)$  при  $\tau < \theta$  привести к линейному виду. Оказалось, что при  $F < F_k$  (где  $F_k$  — критическая нагрузка, соответствующая  $\tau = \theta$ ) для обоих исследованных объектов имеет место зависимость  $v = kF^n$ , причем  $k$  и  $n$  зависят от  $dF/dt$ . Поэтому

результаты выражены в координатах  $\lg v - \lg F$  (см. рис. 3).

Предел текучести  $\theta$  вычисляется по формуле

$$\theta = \frac{F_k}{2\pi r(h - h_k)},$$

где  $F_k$  — полная нагрузка, соответствующая точкам излома кривых на рис. 3 (с учетом веса внутреннего конуса и объекта в объеме  $KLMN$ ),  $r$  — радиус основания внутреннего конуса и отверстия наружного,  $h$  — высота внутреннего конуса и  $h_k$  — его вертикальное смещение, соответствующее моменту достижения  $F_k$ .

Описанный прибор был также использован для измерений  $\theta$  методом  $F = \text{const}$ , что также дало совпадающий результат.

Были также произведены измерения  $\theta$  тем же методом (постоянной скорости нагружения) в приборе с осевым нагружением винта, коаксиального с цилиндрической обоймой, содержащей объект. Полученное при этом пониженное значение  $\theta$  показывает, что винтовая резьба не вполне исключает пристенное скольжение.

Все измерения производились при  $18,0 \pm 0,1^\circ$  и  $\varphi = 45^\circ$ .

Московский станко-инструментальный институт  
им. И. В. Сталина

Поступило  
6 I 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Е. Е. Сегалова и П. А. Ребиндер, Коллоидн. журн., **10**, 223 (1948); П. А. Ребиндер и Е. Е. Сегалова, ДАН, **71**, № 1 (1950). <sup>2</sup> М. П. Воларович, Вязкость смазочных масел при низких температурах, 1944; Г. В. Виноградов и К. И. Климов, ДАН, **71**, № 4 (1950); Д. М. Толстой, 2-я Всесоюзн. конф. по трению и износу в маш., **3**, 155, 1949. <sup>3</sup> Д. М. Толстой, там же, **4**, 1951. <sup>4</sup> Д. М. Толстой, Коллоидн. журн., **9**, № 6, 450 (1947); **10**, № 2, 133 (1948).