

## О влиянии температуры на внутреннее трение твердых тел.

(К статье 2 стр. диаграмм).

### § 1. Введение.

После того, как для меня выяснилось, что коэффициент внутреннего трения твердых тел не является постоянной величиной, а изменяется в весьма широких пределах в зависимости от величины силы, производящей «течение» тела, мне казалось особенно интересным выяснить природу внутреннего трения. Это выяснение могло бы быть произведено путем изучения внутреннего трения в зависимости от различных факторов, влияющих на его величину. Наиболее важным фактором является температура. Вязкость твердых тел весьма сильно зависит на температуры. Если бы внутреннее трение при данной неизменной температуре было постоянно и не зависело бы от силы производящей сдвиг, то вопрос об изучении влияния температуры на вязкость был бы достаточно ясен и прост. Тогда достаточно было бы определить коэффициент внутреннего трения по какому либо способу при нескольких температурах и выразить зависимость формулой. Если внутреннее трение определяется по способу кручения стержня, то достаточно было бы приложить постоянную закручивающую силу и определить при различных температурах стационарную скорость кручения. Изменение угловой скорости с температурой могло бы служить характеристикой влияния температуры на внутреннее трение. Но в действительности это не так. Опыты со свинцом <sup>1)</sup> показали, что вязкость свинца тем меньше, чем больше угловая скорость кручения. На основании этого можно высказать следующие положения:

1. Если закручивающая сила  $P$  остается неизменной во всех опытах и если при температурах  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  и т. д. для одного и того же образца получаются угловые скорости  $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \dots$ , на основании которых по формуле:

$$\eta = \frac{2L}{\pi R^4} \cdot \frac{Pgd}{\omega} \dots \dots \dots (1)$$

или по формуле Шведова:

$$\eta = NT + \frac{N\varphi_0}{\omega} \dots \dots \dots (2)$$

получаются значения коэффициента внутреннего трения  $\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots$ , то эти значения не сравнимы между собой.

В формулах (1) и (2) введены обозначения:  $L$ —длина образца,  $d$ —плечо закручивающей силы,  $g$ —ускорение силы тяжести,  $R$ —радиус круглого образца,  $N$ —модуль сдвига,  $T$ —время релаксации,  $\varphi_0$ —предельное значение угла сдвига, при котором начинается явление релаксации.

2. Если бы структура образца не изменялась с изменением температуры, т. е. если бы нагретый и вновь охлажденный до первоначальной температуры образец имел при последней температуре до нагревания и после нагревания одинаковые свойства, то численные значения  $\eta$ , получающиеся при одних и тех же угловых скоростях закручивания, но при различных температурах, можно было бы сравнивать между собою для нахождения зависимости  $\eta$  от  $\theta$ .

<sup>1)</sup> В. Д. Кузнецов и Л. А. Швирк. О внутреннем трении свинца. Изв. Том. Ун. 7 5, (1925).

Металлы представляют собою агломераты мелких кристаллических тел, так называемых кристаллитов, которые имеют разнообразные формы и которые расположены без какой либо определенной ориентировки. Пространства между этими кристаллитами заполнено более мелкозернистым веществом. Такая структура происходит от того, что при отвердевании расплавленного металла в очень многих точках начинают образовываться маленькие кристаллы, которые мешают друг другу в правильном росте и получаются кристаллы с неправильно-развитыми гранями. Чем быстрее происходит отвердевание, тем меньше получаются кристаллы, тем более они перемешиваются и перепутываются между собою. Если отжигать металл, т. е. держать его при достаточно высокой, но все же далекой от точки плавления, температуре, то мелкие кристаллы начинают расти. Повышение температуры вызывает более усиленное движение молекул, которые группируются около имеющихся кристаллитов и образуют крупные зерна. Такая кристаллизация путем отжига сильно изменяет, как структуру, так и свойства металла. Чем продолжительнее действует повышенная температура, тем сильнее изменяются свойства.

Если, кроме нагревания, подвергать металл таким деформациям, при которых происходит перемещение частиц, то это способствует изменению строения. Закручивание металлического образца при повышенной температуре более быстро, чем только одно повышение температуры, заставляет металл перейти из мелкокристаллического в крупнокристаллический.

Это обстоятельство следует принимать во внимание при изучении зависимости внутреннего трения металлов от температуры. Если сначала определить  $\eta$  при низкой температуре, а затем при более высокой, то результаты могут оказаться несравнимыми именно вследствие изменения структуры. Если, наоборот, сначала определить  $\eta$  при высокой температуре, а затем при низкой, то можно ожидать большей сравнимости результатов, хотя и в этом случае структура не может быть одинаковой.

Произвести определение  $\eta$  с одним образцом при нескольких различных температурах невозможно, так как образец не может продолжительное время без разрушения подвергаться закручиванию или сдвиганию. Следовательно приходится исследовать различные образцы, структура которых может сильно отличаться друг от друга.

Все эти обстоятельства весьма затрудняют исследования и этим вероятно объясняется то, что «попытки измерить внутреннее трение твердых тел пока еще не привели к ясным и определенным результатам»<sup>1)</sup>.

## § 2. Некоторые теоретические ожидания.

Если бы коэффициент внутреннего трения  $\eta$  твердых тел был постоянной величиной, то при кручении стержней имела бы место формула (1), из которой должно следовать, что:

$$\frac{P}{\omega} = \text{const.} \dots \dots \dots (3)$$

Если обозначим через  $T$  величину обратную угловой скорости кручения  $\omega$ , то вместо формулы (1) можно написать:

$$\eta = \alpha P T \dots \dots \dots (4)$$

и при  $\eta = \text{const}$  должно быть:

$$P T = \text{const.} \dots \dots \dots (5)$$

Опыты со свинцом показали, что формула (5) совершенно не имеет места. Точно так же не справедлива и формула (2) Шведова, из которой, как следствие, получается:

$$P T = a + b T \dots \dots \dots (6)$$

<sup>1)</sup> О. Д. Хвольсон. Курс физики. Т. I. 669 (1914).

Только в некоторых пределах  $\omega$  или  $T$  эту формулу можно применять. Точно такие же результаты получаются из опытов с оловом. При комнатной температуре получается следующая зависимость между  $RT$  и  $T$ . Если откладывать по оси абсцисс  $T$ , а по оси ординат  $RT$ , то кривая проходит через начало координат и образует слабую вогнутость в сторону оси абсцисс. На некотором протяжении эту кривую можно принять за прямую линию (черт. 1, кривая I).

Если повышать температуру, то, очевидно, что для получения той же самой угловой скорости  $\omega$  или того же промежутка  $T$  нужно приложить меньшую закручивающую силу  $P$ . Следовательно для одного и того же значения  $T$  произведение  $RT$  будет тем меньше, чем выше температура.

При различных температурах должны получаться кривые, которые 1) будут непременно проходить через начало координат и 2) будут тем меньше наклонены к оси абсцисс, чем выше температура и 3) вогнутость кривых вблизи начала координат должна увеличиваться с повышением  $\theta$ , так как если бы этого не было, то при некоторой достаточно высокой  $\theta$  получилась бы прямая, совпадающая с осью абсцисс, чего не может быть. Это было бы равносильно тому, что при некоторой  $\theta$  внутреннее трение равнялось бы нулю (кривые II и III).

Теперь предположим, что температура  $\theta$  поднята настолько, что металл расплавился и обратился в жидкое состояние. Какой вид должна иметь кривая  $RT = \varphi(T)$  для расплавленного металла? Для жидкостей принято считать вязкость постоянной, по крайней мере при скоростях ниже критической. Если это действительно так, то кривая должна проходить через начало координат, затем загигать в сторону оси абсцисс и обращаться в прямую линию, параллельную оси абсцисс (кривая IV).

При дальнейшем повышении температуры уже жидкого металла вязкость  $\eta$ , оставаясь независимой от скорости течения, продолжает уменьшаться и кривая  $RT = \varphi(T)$ , оставаясь параллельной оси  $T$ , приближается к ней (кривая V), при чем участок значений  $T$ , при котором  $\eta$  не постоянно, становится более узким.

Если высказанные соображения справедливы, то можно надеяться на основании их 1) установить связь между внутренним трением твердых тел и внутренним трением жидкостей и 2) приблизиться к пониманию природы внутреннего трения.

Невольно бросается в глаза сходство между кривыми черт. 1 и кривыми, выражающими зависимость силы тока от разности потенциалов для тел, обладающих ионной проводимостью. Как будто при повышении температуры происходит постепенный переход от закона Ома к току насыщения.

Мне кажется, что для выяснения природы внутреннего трения твердых и жидких тел интересно было бы выполнить следующие экспериментальные работы.

1. Изучить зависимость между значением внутреннего трения жидкости ( $RT$ ) и скоростью ее движения ( $T$ ). Для этого можно воспользоваться способом протекания через капиллярные трубки, заставляя жидкость протекать под различными давлениями. Особенно важно проследить участок кривой при больших скоростях. В виду того, что жидкость при протекании может нагреваться следует определять ее температуру до и после протекания.

2. Прodelать опыты, указанные в 1° при различных температурах.

3. Проследить постепенное изменение вида кривых с повышением температуры для таких веществ, которые плавно переходят из твердого в жидкое состояние (канадский бальзам, смола, вар). Можно воспользоваться методом спиралеобразного кручения между двух коаксиальных цилиндрических поверхностей.

4. Проследить изменение вида кривых с повышением температуры для таких твердых тел, которые имеют определенную точку плавления (металлы, сплавленные соли и кристаллы вообще).

### § 3. Некоторые данные о влиянии температуры на внутреннее трение свинца и олова.

С целью установить зависимость внутреннего трения от температуры были произведены наблюдения со свинцом и оловом при различных температурах в пределах  $12^{\circ}$ — $220^{\circ}$ . Эти опыты далеко еще не окончены в той мере, как было намечено, однако уже получились некоторые определенные результаты, которые могут служить иллюстрацией высказанных соображений.

Внутреннее трение измерялось по способу кручения круглых стержней. Прибор, установка, отливка образцов и метод наблюдения мною уже описаны<sup>1)</sup>. Размеры образцов были те же самые. Так же наблюдался промежуток времени  $T_{сек}$ , в течение которого 1 см шкалы проходил через горизонтальную нить трубы, при чем начальное и конечное деления во всех опытах были приблизительно одинаковы.

Для нагревания образцов была изготовлена печь с электрическим подогревателем. Эта печь состояла из железной прямоугольной коробки с двойными стенками. На дне коробки между стенками была помещена металлическая пластинка, обернутая азбестом, с несколькими витками нейзильберовой проволоки, через которую пропускался электрический ток от станции. В цепь, для регулирования высоты температуры, включался ламповый реостат. Коробка была разрезана по вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения образца. В боковых стенках были сделаны вырезы с небольшими просветами для осей прибора. После закрепления образца в прибор обе половины коробки надвигались одна на другую. В верхней стенке коробки было сделано отверстие для термометра; его резервуар почти касался образца. Когда напряжение станции было неизменно, тогда температура держалась достаточно хорошо. Если же напряжение колебалось, то для поддержания температуры приходилось все время следить за термометром, включая или выключая одну из лампочек реостата. Труба со шкалой помещалась на небольшой неподвижной площадке, поэтому, несмотря на то, что иногда приходилось несколько смещать трубу, можно было считать, что расстояние от зеркала до шкалы оставалось неизменным, равным 165 см. Неудобство установки заключалось в том, что образец не был виден, вследствие чего иногда, если образец имел неоднородное строение или пустоту, наблюдения пропадали бесцельно, так как неправильное закручивание обнаруживалось после окончания опыта.

Большая часть наблюдений была произведена студентами—физиками И. И. Поповым и Ф. П. Отрадных.

При наблюдениях записывались следующие данные: 1) промежуток времени  $\Delta t$ , необходимый для прохождения  $\Delta n$  см. шкалы; 2) начальное и конечное деление шкалы, разность которых составляла  $\Delta n$ ; 3) время по часам в момент наблюдения и 4) температура  $\theta^{\circ}$  внутри печи.

Когда в трубе показывались последние деления шкалы, тогда храповик прибора поворачивался на несколько зубцов и в поле зрения трубы снова появлялось начало шкалы.

Кручение начиналось с большей силы в виду того, что из опытов со свинцом выяснилась выгода последовательного перехода от больших к меньшим силам. Наблюдения при данной силе и данной температуре оканчивались тогда, когда в течение нескольких минут получались одни и те же значения  $T$  или когда  $T$  колебалось около некоторого среднего значения.

<sup>1)</sup> В. Д. Кузнецов и Л. А. Швирк. *loc cit.*

В таблице I приведены полученные результаты для свинца. В ней не помещены численные значения  $\eta$ , которые легко получить путем умножения произведения  $PT$  на  $\alpha = 2 \cdot 40 \cdot 10^8$ . Некоторые значения  $PT$  при комнатной температуре взяты из предыдущей работы.

Таблица I.

Обозначения:

$P$  — приложенная закручивающая сила в граммах.

$\tau_1$  — время действия силы  $P$  в минутах.

$\tau_2$  — продолжительность наблюдения стационарного состояния в минутах.

$T$  — время в секундах прохождения 1 см. шкалы через нить трубы.

$PT$  — произведение, характеризующее величину внутреннего трения.

$\theta^\circ$  — температура по Цельсию.

$N$  — номер образца.

## Свинец.

$N$	$P$	$\tau_1$	$\tau_2$	$T$	$PT$	$\theta^\circ$
12	1200	—	—	13·5	16200	12·9°
	1400	—	—	2·9	4060	12·9°
	1600	—	—	0·065	103	12·9°
14	1400	—	—	2·0	2800	12·6°
	1300	—	—	6·0	7800	12·6°
	1200	—	—	17·5	21000	12·5°
	1250	—	—	10·5	13100	12·5°
28	800	35	13	1·0	800	127°
	700	45	10	2·0	1400	134°
	600	35	8	15·1	9060	129°
32	600	65	30	2·45	1470	173°
	650	10	4	0·7	450	160°
34	600	51	25	0·8	500	169°
	550	33	20	0·7	400	170°
	450	23	10	2·5	1100	168°
35	400	37	30	1·50	6000	170°
31	350	69	20	3·1	1100	219
	300	19	—	8 ?	2400	219

В таблице II приведены вновь полученные результаты для олова.

Таблица II.

О л о в о.

№	P	$\tau_1$	$\tau_2$	T	PT	$\theta^\circ$
2	1500	27	7	1.5	2200	12.4
	1400	20	12	3.4	4800	12.5
	1300	25	6	7.0	9100	12.5
	1100	40	32	50.0	55000	12.5
	1200	30	15	14.8	17800	12.3
	1400	35	15	3.0	4200	12.3
	1600	16	9	1.0	1600	12.3
5	800	20	8	2.0	1600	151
	900	7	5	0.8	700	155
	900	10	10	0.6	600	160
9	500	83	23	20.2	10000	143
	500	37	22	31?	15000	145
7	700	50	20	13	9100	113
	800	50	20	5.1	4100	114

Результаты для свинца изображены на черт. 2. Из сравнения таблиц мы прежде всего получаем интересный результат, что кривые  $PT = \varphi(T)$  при одной и той же температуре (около  $12'5^\circ$ ) для свинца и олова совпадают друг с другом. Это означает, что при одинаковых угловых скоростях закручивания коэффициенты внутреннего трения для свинца и олова одинаковы.

Приведенных данных еще не вполне достаточно, чтобы установить зависимость между  $\eta$  и  $\theta$ . Однако уже из них ясно, что все кривые  $PT = \varphi(T)$  проходят через начало координат.

Интересный результат мы получаем, если отложим (черт. 3) по оси абсцисс температуры, а по оси ординат произведение  $PT$ , характеризующее величину внутреннего трения свинца. Кривые при различных значениях  $T$ , т. е. при различных угловых скоростях показывают, что при сравнительно низких температурах зависимость между  $PT$  и  $\theta$  может быть выражена линейно

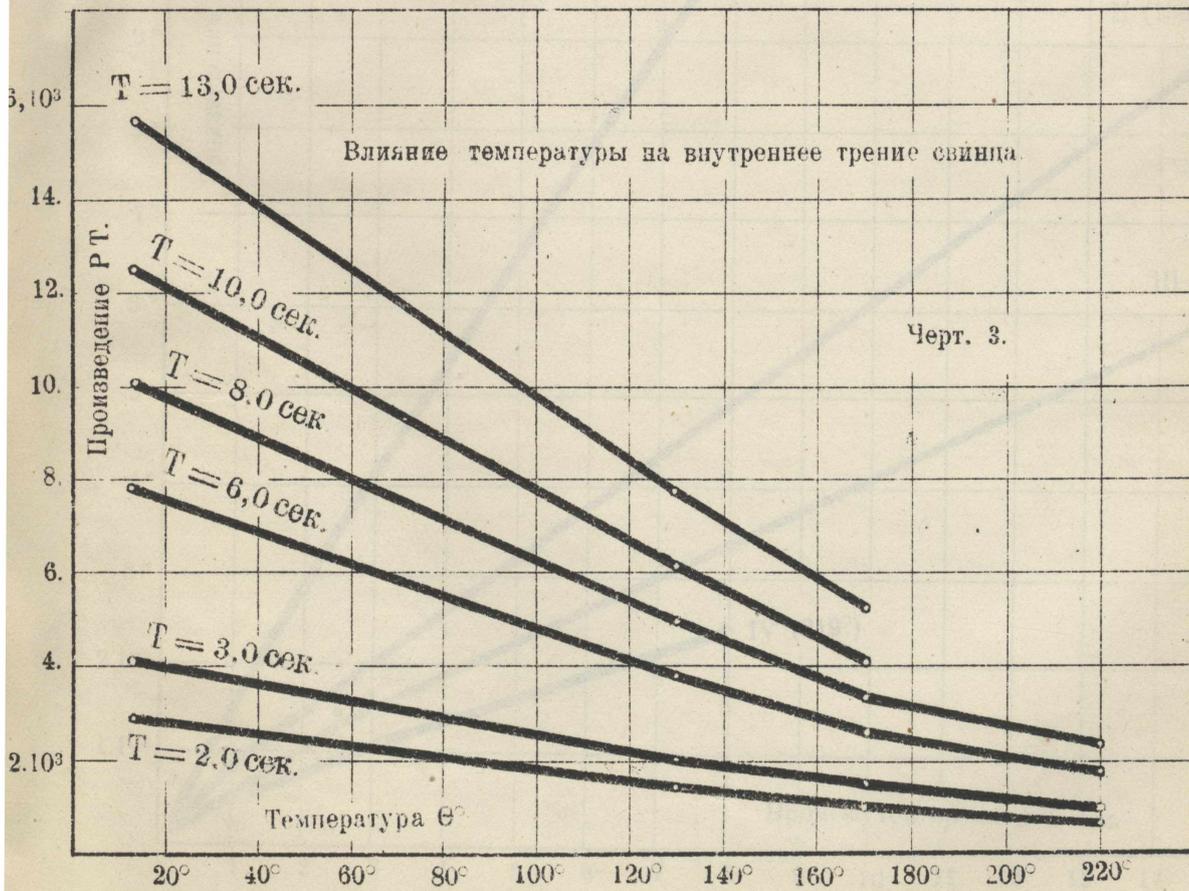
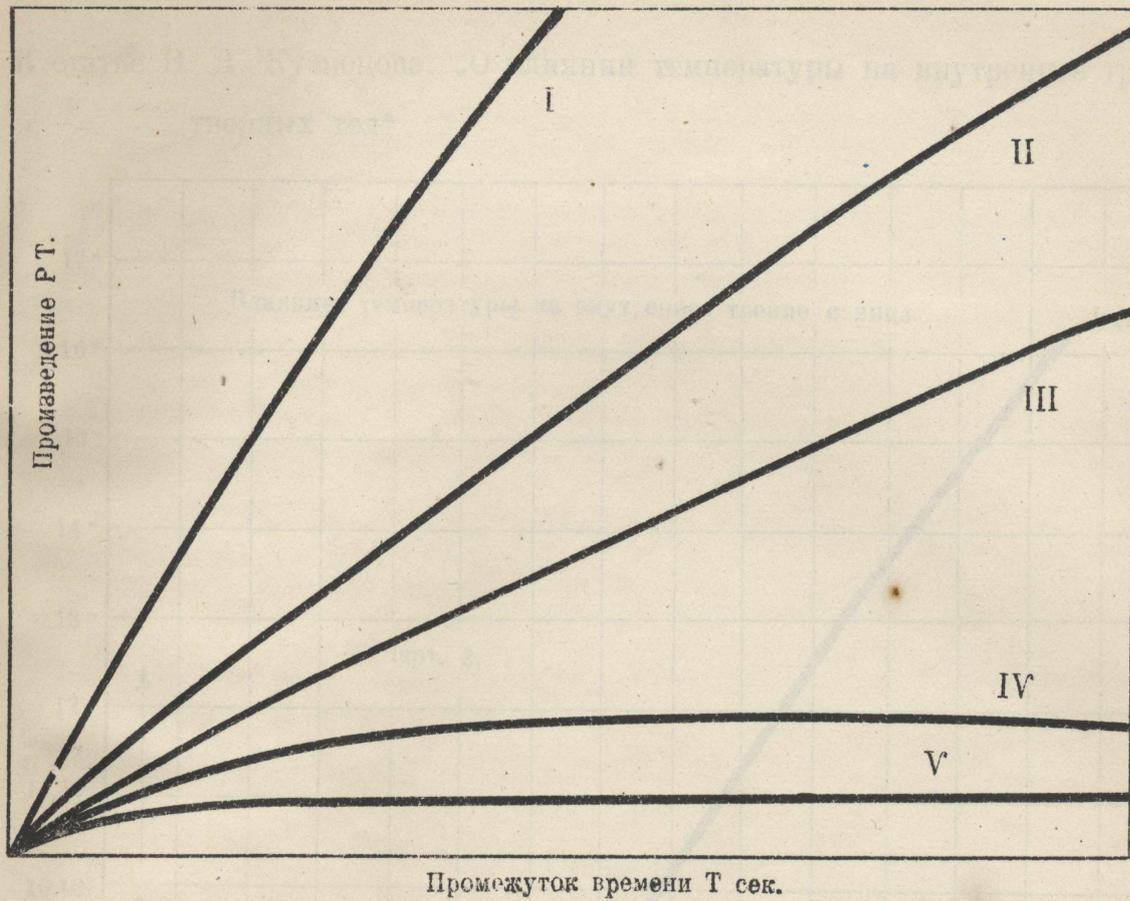
$$PT = a - b\theta,$$

(7)

где  $a$  и  $b$  некоторые постоянные, зависящие от угловой скорости, при чем, как  $a$ , так и  $b$  уменьшаются при увеличении угловой скорости. По мере повышения температуры и приближения ее к точке плавления кривые становятся выпуклыми относительно оси абсцисс и все пересекают ее в точке, соответствующей температуре плавления (около  $330^\circ$ ). Чем больше скорость течения, тем меньше влияние температуры.

Дальнейшие опыты должны состоять в том, чтобы кручение одного и того же образца производить при различных температурах, но при одинаковой угловой скорости, которая должна быть по возможности меньше, так как при малых скоростях погрешности опытов становятся ничтожными по сравнению с влиянием температуры. Наиболее удобной скоростью, при нашей установке, является та, при которой  $T = 5-15$  секунд.

Томск.  
Декабрь 1924 г.



К статье В. Д. Кузнецова: „О влиянии температуры на внутреннее трение твердых тел“

