

## К ВОПРОСУ О ТВЕРДОСТИ НАПРЯЖЕННЫХ ТЕЛ

В. П. ШУБИН

Как известно, в физике твердого тела и в металловедении нет более неопределенного термина, чем твердость. Действительно, твердость не является физической постоянной, характеризующей данное тело и не зависящей от применяемого метода её изыскания, а наоборот, твердость есть величина, зависящая от метода, которым её измеряют. При этом твердости одного и того же тела, измеренные разными методами, могут оказаться весьма различными. Однако несмотря на это, твердость является наиболее часто и легко измеряемой механической характеристикой материала. Вопрос об изменении твердости, в связи с напряженным состоянием материала, имеет чрезвычайно важное значение, ибо от разрешения его и тем более от установления зависимости между изменением твердости и работоспособностью напряженного материала зависит разрешение проблемы износа ряда деталей машин.

Все детали машин в процессе работы являются напряженными, и поведение их в работе во многом отличается от предполагаемого при расчётах и конструировании.

Нам кажется, что изучение вопроса твердости напряженных тел представляет собой большой практический и теоретический интерес.

Впервые твердость при напряженном состоянии тела повидимому была испытана Финком и Ванорном [1], в связи с проверкой взглядов Розенгейна, по мнению которого основной причиной высокой твердости металлов после термической обработки или холодной деформации является искажение кристаллической решетки. Финк и Ванорн испытывали твердость по Роквеллу наиболее растянутых волокон при изгибе в образцах из дуралюмина и  $\alpha$ -латуни (30% Zn). Результаты опытов показали понижение твердости.

Инженер Д. М. Загородских [2] произвел ряд опытов по определению твердости напряженных тел при деформации растяжения, с помощью переносного пресса Бринеля с шариком  $d = 5$  мм, при нагрузке в 750 кг и с выдержкой в 30 сек. Им получены результаты, показывающие, что твердость при растяжении тела понижается незначительно до предела текучести, значительно — при пределе текучести, а за пределами текучести твердость остается также меньше начальной твердости, но повышается по сравнению с твердостью при пределе текучести. Мы приводим ниже табл. 1, показывающую результаты, полученные инженером Д. М. Загородских.

Таблица 1

№ образца	Напряжение $\sigma$ $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	Твердость <i>Hv</i>		Уменьшение твердости в %	Примечание
		начальная	при напряжении		
1	16,5	154,3	151,5	1,82	Предел течения
2	26,3	155,7	144,7	7,07	
3	35,8	156,6	128,2	18,13	
4	48,8	157,1	138,5	11,84	

Материал—простая углеродистая сталь, имеющая химический состав: 0,28% С; 0,12% Si; 0,59% Мп; 0,04% Р; 0,02% S.

Наша работа [3], посвященная исследованию твердости напряженных тел при кручении, показала, что твердость по Шору в пределах пропорциональности почти не меняется, твердость начинает возрастать с момента перехода металла в пластическую зону. Твердость возрастает с возрастанием напряжения по закону прямой

$$Y = ax + B \quad (1)$$

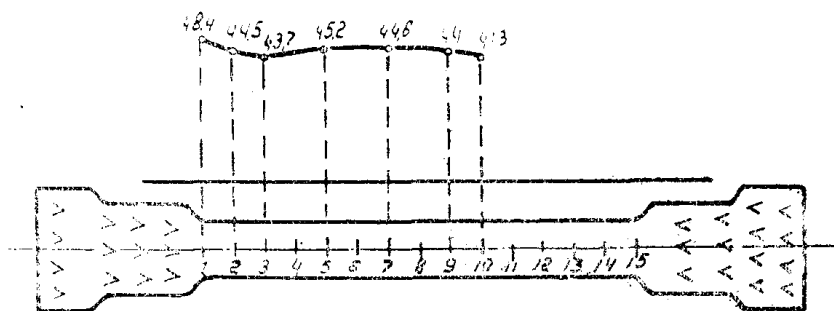
Инж. М. П. Марковец [4] показывает, что сталь, содержащая 0,25% С, увеличивает твердость после изгиба на 44%, а сталь, содержащая 0,35% С, на 34%. Однако, инж. Марковец не показал степень деформации изгиба, да и сама твердость определялась после снятия нагрузки и деформации.

Инж. Д. М. Загородских [5] пришел к выводам, противоположным тем, которые получил инж. Марковец М. П., а именно показал, что твердость стали при напряжении от изгиба в области упругих деформаций остается без изменения. В случае пластических деформаций в момент изгиба происходит понижение твердости, которое с ростом напряжения падает еще больше. Этот вывод как будто бы подтверждает выводы из работы инж. Д. М. Загородских над твердостью напряженных тел при растяжении.

Таким образом, вопрос о твердости напряженных тел, несмотря на свою актуальность, не разрешен. Это дает нам право поставить опыты над определением твердости напряженных тел. Мы провели эти исследования при деформациях растяжения, сжатия и кручения. При проведении экспериментальной части работы большую помощь мне оказали студенты тт. Гранин и Виденкин, участники научно-технического студенческого кружка. Попутно, при определении твердости при сжатии, мы провели исследование, подобное исследованию академика Губкина, Скугарева [6], о неоднородности деформации стали при сжатии. Твердость определялась дюрометром Роквелла, шариком  $d = 1,53$  мм, при нагрузке  $P = 100$  кг, по шкале твердости  $B$  индикаторного прибора.

## I. Твердость напряженных тел при растяжении

Испытание произведено на двух образцах, изготовленных из стали 4. Схемы образцов показаны на фиг. 1 и 2. Образец по длине разделен делениями, отстоящими друг от друга на расстоянии 5 мм. Образцы были

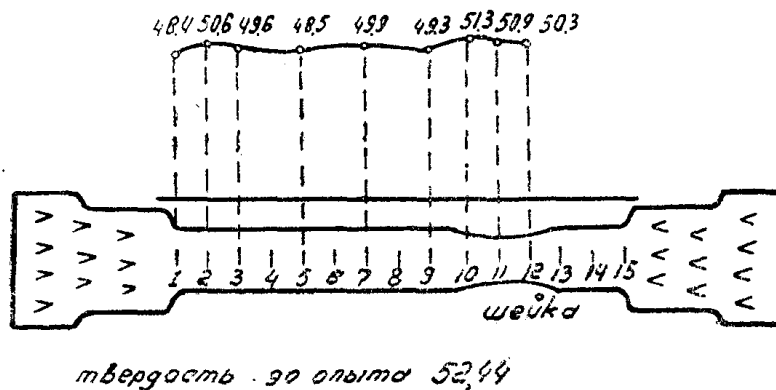


твердость по опыту 56,83

Фиг. 1

нагружены: первый до  $P = 6000$  кг; второй до  $P = 7000$  кг, после чего нагрузка была снята и произведены замеры твердости. Предварительно

мы установили, что твердость в пределах упругости не изменялась. Результаты опыта представлены табл. 2. Вторым образцом был доведен до



Фиг. 2

образования шейки. На фиг. 1 и 2 показаны диаграммы изменения твердости по длине образцов после их деформации.

Таблица 2

Размеры образца мм				Твердость до опыта $R_B$	№ сече- ния	Твердость в отдельных точках после дефор- мации $R_B$			Средняя твердость $R_B$			
$h$	$b$	$F$	$l$									
11	15	165 мм <sup>2</sup>	75	57; 58; 57,8; 59,5; 60,8; 59; 56,7; 54; 54; 52,5	1	49,7	45,7	50	48,4			
					2	42,5	45	44	44,5			
					3	40,5	45,2	45,5	43,7			
					5	42,3	47,8	48,2	45,2			
					7	41,8	45,3	47,3	44,8			
					9	41,5	42,5	48,0	44,0			
					10	38,2	42,0	43,8	41,3			
					Средняя твердость 56,83							
				11	15,8	174 мм <sup>2</sup>	75	52; 53,6; 54; 50,7; 51,2; 55; 55,5; 53,2; 49; 50	1	49,2	49,0	47
2	52,0	48,8	51						50,6			
3	50,5	50,0	48,2						49,6			
5	49,0	49,0	47,5						48,5			
7	5,5	49,6	48,8						49,9			
9	49,9	49,2	48,8						49,3			
10	50,0	54,2	52,4						51,2			
11	50,8	51,2	50,9						50,9			
12	48,7	50,8	51,0						50,3			
Средняя твердость 52,44												

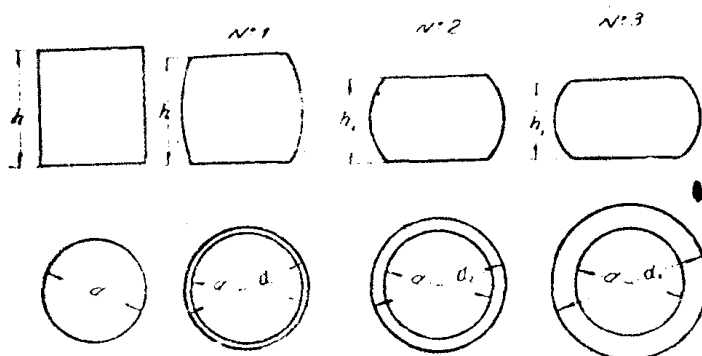
Рассматривая результаты этих опытов, отмечаем падение твердости после деформации. В шейке твердость также упала, но несколько меньше по сравнению с твердостью в других сечениях.

## 2. Твердость напряженных тел при сжатии

Для испытания были изготовлены 3 цилиндрических образца из стали 4. Схема образцов показана на фиг. 3. Твердость до опыта замерена по образующей цилиндра, а также в торце. Результаты сведены в табл. 3.

После замера твердости образцы были подвергнуты деформации сжатия, причем образец № 1 был нагружен силой  $P_1 = 28\ 000$  кг; образец № 2 — силой  $P_2 = 40\ 000$  кг; образец № 3 — силой  $P_3 = 50\ 000$  кг. Сжатие

производилось на прессе мощностью 60 000 кг. Сжатые образцы, после снятия нагрузки, вновь подвергались испытанию на твердость по образующим цилиндра и в торце. Результаты показаны в табл. 4. Из резуль-



Фиг. 3

татов опытов можно сделать вывод, что при небольших деформациях сжатия, когда образец только лишь начал получать бочкообразную форму (что, очевидно, соответствует пределу течения), твердость понизилась.

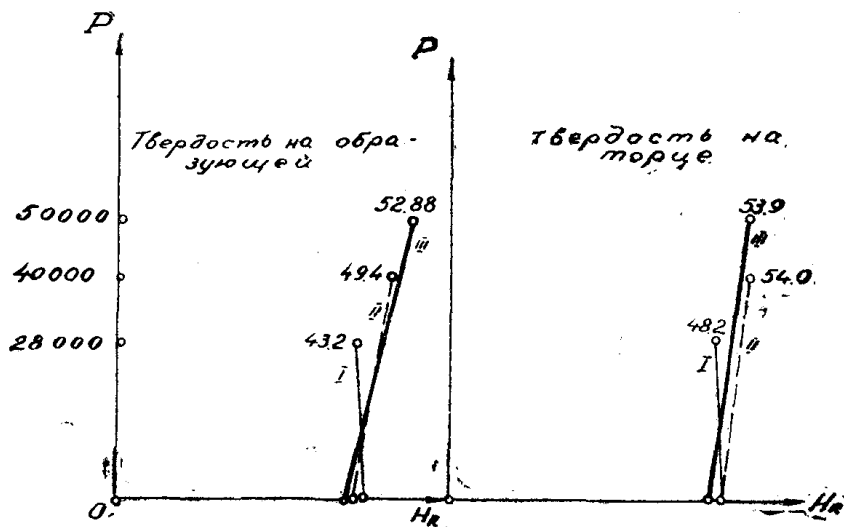
Таблица 3

№ образца	Размеры мм		Твердость по образующей $R_B$	Средняя твердость $R_B$	Твердость в торце $R_B$	Средняя твердость $R_B$
	$d$	$h$				
1	25	26,8	40; 47,8; 48,2; 40,4; 44,2; 46,8; 41,8	44,6	48; 49,2; 51,2	49,5
2	25	28,3	44; ; 41,2; 41,5; 41,4; 42,7; 46; 43,2	42,9	51; 49,5; 51,8; 44,8; 47,5	48,9
3	25	27,0	42,7; 41,2; 38; 41; 41,2; 42; 42,8	41,3	45,5; 49; 46,5; 47,0.	47,0

Таблица 4

№ образца	Размеры мм				Твердость по образующей после деформации $R_B$	Средняя твердость $R_B$	Твердость в торце после деформации $R_B$	Средняя тверд. $R_B$
	до опыта		после опыта					
	$d$	$h$	$d_1$	$h_1$				
1	25	26,8	26,5	24,5	34,2; 45,8; 46; 42; 39,8; 49; 43,7	43,2	46,8; 43; 52; 52; 47,5	48,26
2	25	28,3	28,2	21,6	46; 50,8; 50; 53; 49; 43; 41	49,4	53; 49,5; 52,5; 53,5; 58; 55; 56,2	54
3	25	27,0	31,9	19,2	50,5; 49,9; 57; 54; 53	52,88	52; 58,8; 54; 52; 53,5; 53,5	53,9

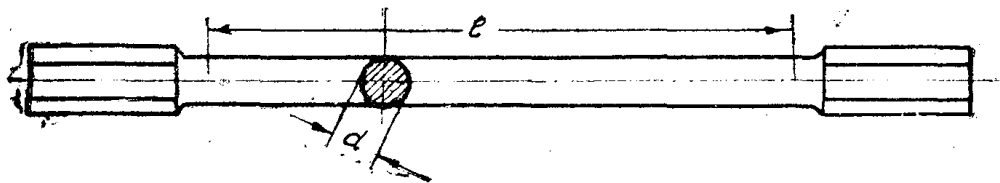
При значительных деформациях твердость повышается и тем больше, чем больше деформация. Зависимость твердости от степени деформации показана на фиг. 4.



Фиг. 4

### 3. Твердость напряженных тел при кручении

Для определения твердости при кручении нами были изготовлены 7 образцов из стали 3 и стали 4, схема которых показана на фиг. 5. Образцы, на крутильной машине „Амслера“ мощностью в 150 кгм, подвергались деформации закручивания, доведенной до определенного значения



Фиг. 5

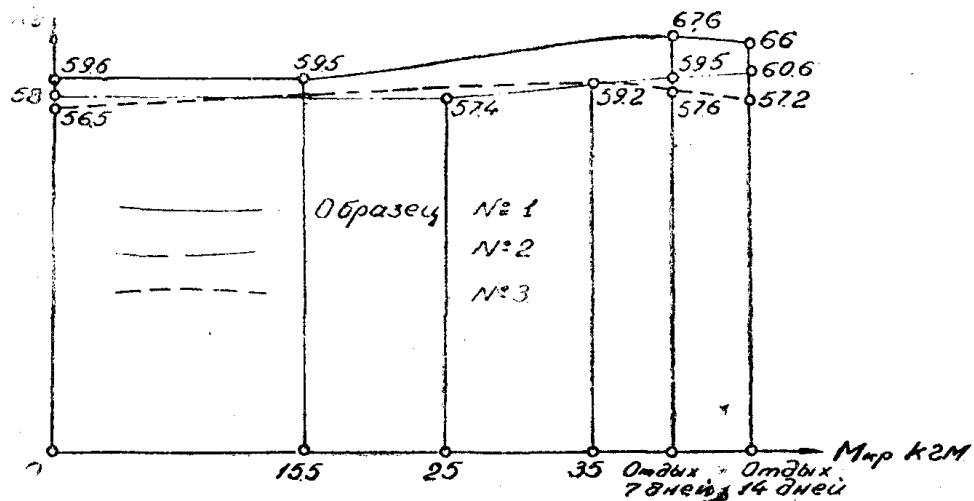
крутящего момента. После приложения крутящего момента образцы вновь разгружались, снимались с машины и испытывались на твердость. После определенного отдыха образцы вновь испытывались на твердость. Данные этих испытаний показаны в табл. 5.

Данные этой таблицы показывают, что с повышением значения крутящего момента твердость увеличивается, хотя и незначительно. В пределах упругих деформаций и течения твердость почти не меняется. Интересные результаты показывает отдых образцов после деформации. Очевидно, в результате внутренней перестройки структуры материала при деформации и попыток во время отдыха восстановить эту структуру, происходят сложные явления, влияющие на повышение твердости даже за пределы твердости, полученной при деформации. При этом твердость сначала возрастает, а с последующим отдыхом (в нашем случае после 15 дней) начинает убывать. На фиг. 6 приведены кривые измерения твердости при отдыхе.

Таблица 5

№ образца	Размеры мм		Твердость до опыта $R_B$	Значение $M_{кр}$ кг м	Средняя твердость под нагрузкой $R_B$	Средняя твердость после отдыха				
	$d$	$l$				3 дня	7 дней	15 дней	18 дней	
Сталь № 3	1	15,4	150	59,65	15,5	59,54	60,5	63,57	66,0	64,0
	2	15,1	150	57,99	25,0	57,43	59,0	59,5	60,57	58,9
	3	15,2	150	56,47	35,0	59,20	58,2	57,6	57,2	56,0
Сталь № 4	4	14,6	150	72,8	15,5 течен.	76,6	76,5	75,3	78,2	77,2
	5	15,0	150	73,1	20,0	79,0	79,1	78,7	79,5	79,0
	6	15,0	150	71,8	25,0	83,1	83,2	83,3	84,6	84,4
	7	15,4	150	72,8	30,0	83,1	86,5	86,8	89,0	83,2

Одновременно с этим были испытаны 2 образца из стали 4 на повторное закручивание. Опыт протекал по следующему плану: твердость замерялась при  $M_{кр}=0$ , затем на образец давали определенного значения



Фиг. 6

крутящий момент, снимали его, замеряли твердость. После этого тот же образец вновь нагружался, но уже моментом ббльшего значения, который снова снимался, замерялась новая твердость и т. д. Результаты этих исследований сведены в табл. 6.

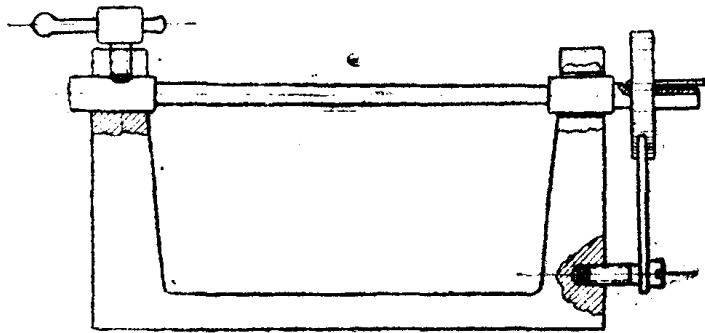
Таблица 6

№ образцов	Размеры мм		Значение $M_{кр}$ кг. м					74,7 разруш.	
	$d$	$l$	0	29,5 течение	40,0	55,0	65,0		
1	19,6	160	68,4	70,5	74,8	82,8	87,3	89,6	Средняя твердость
2	14,8	150	$M_{кр} = 0$	15,5	23,0	25,0	29,8	—	
			69,6	71,8	87,2	90,5	94,6	—	Средняя твердость

Повторное закручивание одного и того же образца сказывается на более интенсивном повышении твердости в сравнении с твердостью при том же внешнем крутящем моменте, приложенном без повторного закручивания.

#### 4. Твердость напряженных тел без снятия приложенного крутящего момента

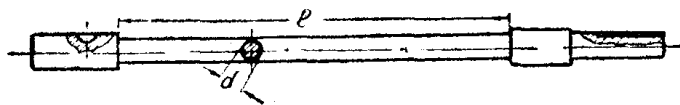
В разделе 1, 2, 3 данной работы нами исследовано влияние напряженного состояния на твердость напряженных тел. Однако, твердость была исследована после снятия приложенной нагрузки. В данном разделе мы показываем результаты опытов по определению твердости напряженных тел при кручении без снятия напряжений. Для осуществления этой задачи был сконструирован прибор, изображенный на фиг. 7.



Фиг. 7

Крутящий момент создавался за счёт поворота храповика, сидящего на шпонке, на испытуемом образце.

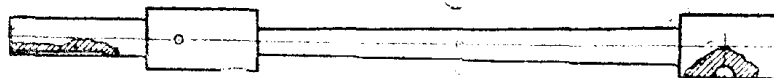
Усилия замерялись с помощью динамометра. Для исследования были изготовлены образцы из мягкой стали, показанные на фиг. 8 и 9.



Фиг. 8

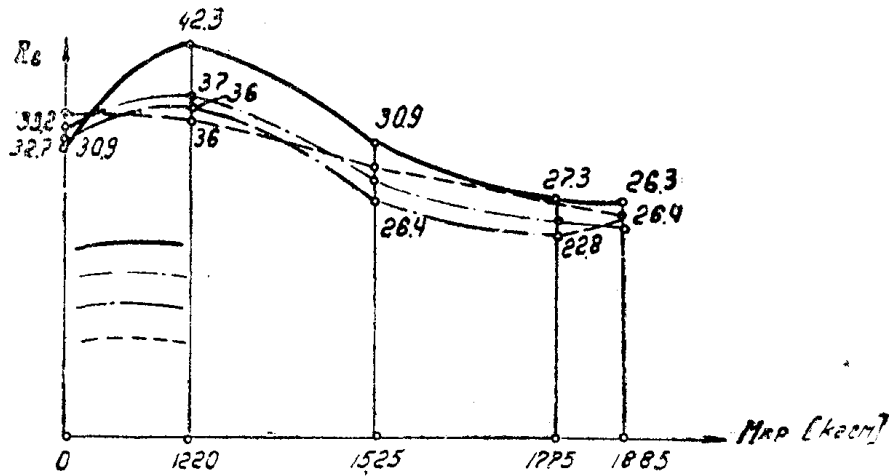
Твердость замерена по образующей образцов, причем в конических образцах твердость замерена на диаметрах  $d_1 = 8$  мм;  $d_2 = 7,5$  мм;

$d_3 = 7$  мм;  $d_4 = 6,5$  мм. Конические образцы преследовали цель создания различных напряжений по длине образца при одинаковом крутящем моменте. Результаты опытов представлены диаграммами изменения твердости в функции от  $M_{кр}$ , показанными на фиг. 10, 11 и 11а. Анализируя эти опыты,



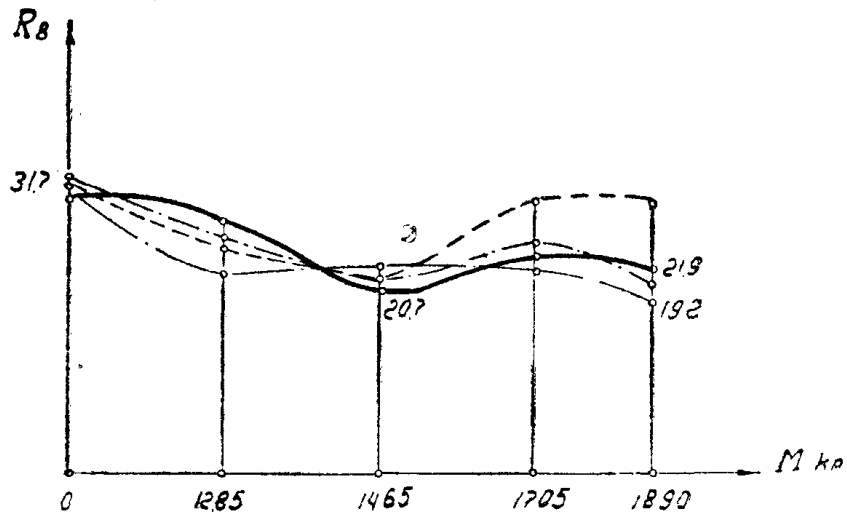
Фиг. 9

приходим к выводу, что если не считать, очевидно, случайных показаний твердости образца № 2, при  $M_{кр} = 1705$  кг. см и у образца № 3 при

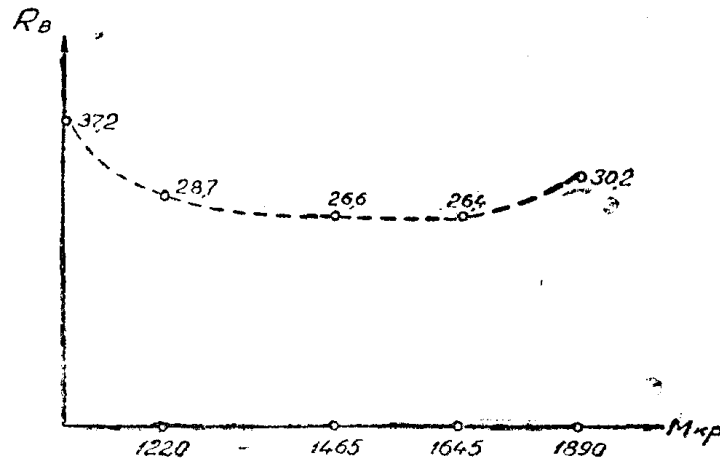


Фиг. 10

$M_{кр} = 1890$  кг. см, то с увеличением крутящего момента твердость падает до некоторого значения, а затем начинает возрастать.



Фиг. 11



Фиг. 11-а

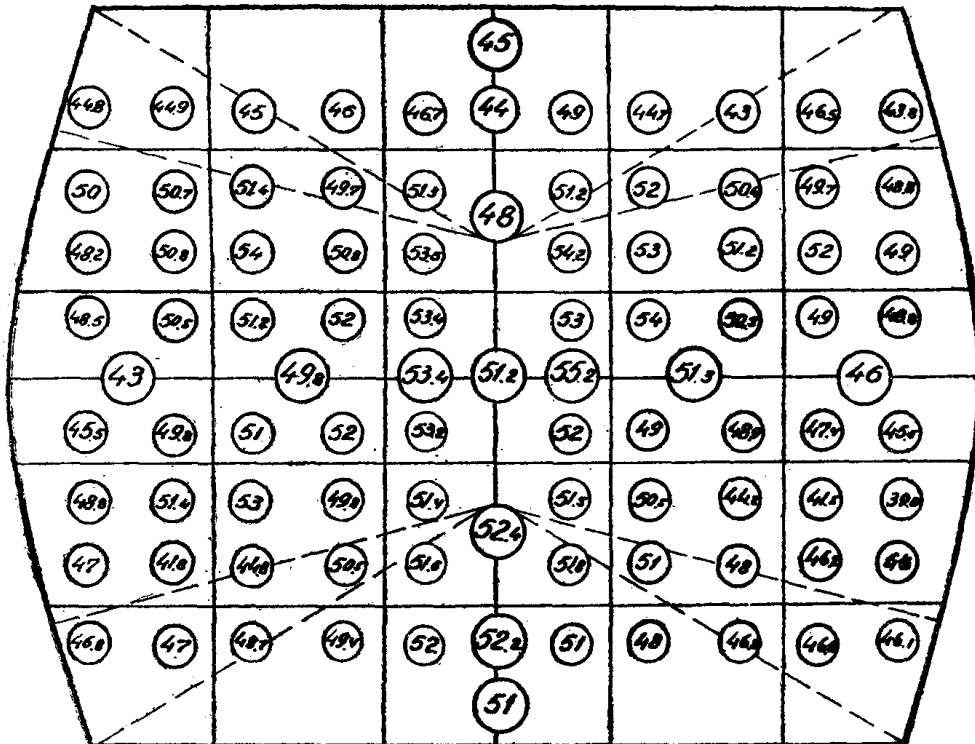


Таблица 7

№ образца	Значение $M_{кр}$ кг. см	Средняя твердость в сечениях			
		$d_1 = 8$ мм	$d_2 = 7,5$ мм	$d_3 = 7,0$ мм	$d_4 = 6,5$ мм
1	0	30,95	33,25	32,7	35,8
	1220	42,3	37,0	36,0	34,3
	1525	30,9	28,7	26,4	29,3
	1775	27,3	23,7	22,8	23,5
	1885	26,3	23,6	25,2	26,4
2	0	30,3	31,7	30,4	31,1
	1285	27,6	24,6	21,2	24,5
	1465	20,7	21,2	21,5	21,4
	1705	23,3	23,9	22,1	28,8
	1890	21,9	20,9	19,2	28,9
3	0	37,25			
	1220	28,7			
	1465	26,6			
	1645	26,4			
	1890	30,2			

### 5. Распределение твердости по диаметральному сечению образцов

В работе [6] академик С. И. Губкин и Н. Г. Скучарев при исследовании неоднородности деформации в динамически сжатом цилиндре из сплава Т4 обнаружили, что наибольшая твердость наблюдается в средней части образца, что ясно выделяются около той и другой торцевой поверхности два конуса, почти не подвергшиеся пластической деформации.



Средняя твердость до деформации:  
на образующей 413 на торце 47

Фиг. 12

Мы поставили аналогичные опыты для статического сжатия стального образца. С этой целью деформированные при сжатии образцы были распилены по плоскости диаметрального сечения. Поверхность распила была тщательно отшлифована и на ней была нанесена сетка взаимно перпендикулярными линиями. ДюрOMETром Роквелла вокруг этих линий была измерена твердость. Мы испытали три образца с различной степенью деформации и произвели около 400 замеров твердости. На фиг. 12 показан образец с указанными на нем значениями твердости в рассмотренных точках. Из этой фигуры следует, что ясно выделяются два конуса, имеющие почти одинаковую твердость, что свидетельствует об отсутствии пластических деформаций в этой зоне. Ясно выражено повышение твердости по средним линиям как по горизонтали, так и по вертикали. Наблюдается понижение твердости в точках, наиболее удаленных от центра образца. Можно также выделить еще два конуса, охватывающие часть материала уже в пластической зоне, причем и в пределах этих конусов твердость мало изменилась по сравнению с твердостью до опыта.

Как уже было указано выше, вопрос о твердости напряженных тел представляет несомненный интерес. Проведенные нами испытания показали всю необходимость более тщательного изучения твердости тел, находящихся под напряжением. Наши опыты затронули лишь небольшой комплекс вопросов; однако и здесь уже заметна некоторая определенность и функциональная зависимость твердости от усилий, приложенных на материал. Мы предполагаем в дальнейшем рассмотреть еще ряд более общих вопросов, связанных с рассматриваемой проблемой твердости напряженных тел.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д. М. Загородских. К вопросу о твердости при напряженном состоянии тела. Вестник металлопромышленности № 10, 1937—ссылка на работы Финка и Вангорна.
2. Д. М. Загородских. К вопросу о твердости при напряженном состоянии тела. Вестник металлопромышленности № 10, 1937.
3. В. П. Шубин. Твердость напряженных тел. Вестник металлопромышленности № 1, 1939.
4. М. П. Марковец. Исследование стали при изгибе. Сельскохозяйственная машина № 4, 1932.
5. Д. В. Загородских. О твердости напряженных тел. Вестник металлопромышленности № 10—11, 1939.
6. С. И. Губкин и Н. Г. Скучарев. Экспериментальные вопросы пластической деформации металлов. ОНТИ, стр. 31, 1934.