

стей и во всяком случае начиная с некоторых средних скоростей порядка $10^{-2} \frac{1}{\text{сек}}$. Первоначальная форма тел при этом существенно изменяется за счет пластической деформации". А. А. Ильющин наметил и пути разработки этой проблемы, а именно:

- а) изучение и формулировка законов пластичности при конечных деформациях, больших давлениях и скоростях;
- б) исследование динамических характеристик металлов волновыми методами теории пластичности;
- в) решение важнейших технических задач на прочность тел при динамическом приложении нагрузок и развитие пространственной задачи динамических упруго-пластических деформаций.

Х. А. Рахматулин [6] в области теории динамической пластичности ставит задачи:

- а) определение законов передачи импульсов в пластической среде;
- б) определение критериев прочности металлов при динамических нагрузках.

Ударная деформация металлов является весьма распространенной и имеет ряд особенностей, вытекающих из того, что действие отрыва, или рекристаллизация, здесь значительно ослаблено, вследствие кратковременности процесса деформации. В силу своей распространенности ударная деформация заслуживает особого рассмотрения. Обычно определяется работа деформации, силы же могут быть найдены дифференцированием кривой работ. При ударном испытании на сжатие обыкновенно определяют две величины: удельную работу, необходимую для разрушения образца и называемую „разрушающим фактором“, и удельную работу, достаточную для того, чтобы вызвать определяемое обжатие образца (обычно на 80%) и называемую „фактором усадки“.

2.

Основные закономерности динамического сжатия установлены проф. Н. Ф. Куниным [7]. Он показывает, что закон статического сжатия:

$$P \cdot h^m = P_0 h_0^m$$

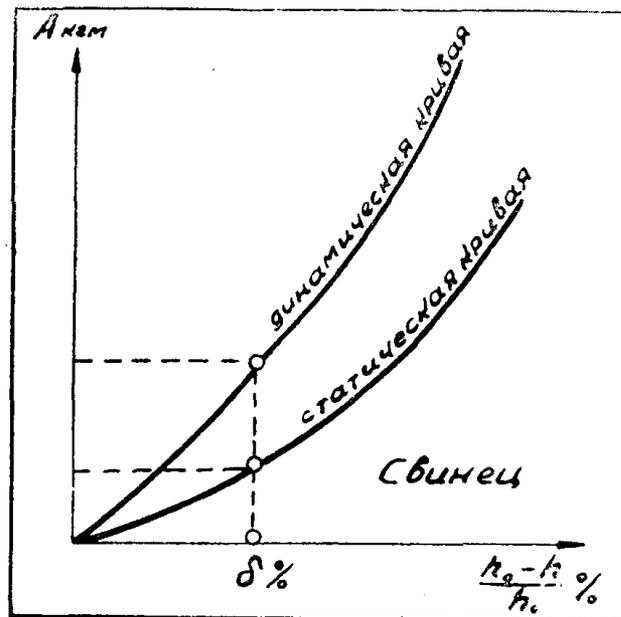
справедлив и для динамического сжатия (свинец, медь, алюминий, олово). На фиг. 1 приведена диаграмма статического и динамического сжатия свинца. Видно, что динамическая кривая лежит выше статической при равных обжатиях. Статическая кривая получена им графическим интегрированием кривой „Сила—деформация“. Показатель политропы „ m “ при динамическом сжатии оказался таким же, что и при статическом. В табл. 1 приведены результаты работы Н. Ф. Кунина.

Условный предел текучести σ_0 при динамическом сжатии значительно больше, чем при статическом. Отношение $\frac{\sigma_0 \text{ дин}}{\sigma_0 \text{ стат}} = z$ Н. Ф. Кунин называет динамическим коэффициентом.

Таблица 1

Металл	Точка плавления в °С	$\sigma_0 \text{ стат}$ $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_0 \text{ дин}$ $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$z = \frac{\sigma_0 \text{ дин}}{\sigma_0 \text{ стат}}$
Олово	232	4,16	18,56	4,50
Свинец	327	3,55	6,31	1,78
Алюминий	658	11,99	16,18	1,35
Медь	1083	33,04	40,46	1,23
Железо	1528	44,57	53,57	1,20

Е. П. Унсков [8] указывает на то, что практики заметили, что из двух молотов с равной энергией удара большую осадку дает тот, у которого масса падающих частей больше. Иными словами, есть указание на то, что с увеличением скорости деформирования сопротивление металла растет. К аналогичным выводам пришли многие теоретики и экспериментаторы, в частности Людвик [9]. Рост сопротивления деформации со скоростью он объяснял увеличением внутреннего трения, считая, согласно гидродинамической теории вязких жидкостей, что силы трения пропорциональны скорости деформирования. Далее Людвик отмечает, что с увеличением скорости деформирования увеличивается хрупкость металла.



Фиг. 1

М. Кодром [10] приводит результаты опытов деформирования свинцовых цилиндров при разных скоростях в условиях комнатной температуры. Он нашел, что с повышением скорости деформирования сопротивление свинца сильно возрастает. Ход кривых зависимости аналогичен ходу этих кривых при небольших скоростях. Для латуни и стали он пришел к противоположным выводам.

Инж. Геллер [11] указывает на повышение сопротивляемости деформации даже с весьма незначительным увеличением скоростей. Так, увеличивая скорость деформации в 2 раза: с 0,3—0,6 м/сек, Геллер получил увеличение расхода энергии на 70%.

Инж. Ридель [12] приводит формулу для сопротивления металла деформации в зависимости от скорости

$$\sigma = 3,8 + 0,1 v \text{ кг/мм}^2.$$

Таким образом, существует мнение о значительном увеличении расхода энергии с увеличением скорости деформации, хотя имеются и обратные мнения. Например, проф. Шапошников [13], сжимая медные крешеры, меняя скорость от 1,98—9,90 м/сек и не заметил существенной разницы в результатах.

В данной работе мы ставим задачу рассмотреть некоторые частные случаи деформирования металлов ударом и выяснения закономерностей, наблюдаемых при этом. Нами в лаборатории кафедры сопротивления материалов Томского политехнического института на копре Амслера с наиболь-

шей высотой подъема бабы равной 4,5 м проведено большое число опытов над образцами из стали 30, стали 40, латуни, алюминия, меди, цинка, олова и свинца.

Прежде чем перейти к разрешению поставленной задачи, мы считаем необходимым остановиться на некоторых теоретических соображениях, общих, повидимому, для любых металлов и для любых условий деформирования металлов ударом.

Допустим, что образец длины h и площади поперечного сечения F , деформируемый некоторым грузом Q , падающим с высоты H_0 , совершающем работу $A_0 = H_0 Q$, накапливает потенциальную энергию упругой деформации

$$u_0 = \frac{Q^2 \cdot h}{2EF} \quad (1)$$

Допустим теперь, что образец, имеющий начальную длину $h_0 > h$, деформируется до высоты h и накапливает при ударе такую же потенциальную энергию. Для этого, очевидно, понадобится некоторый груз Q_1 опустить с высоты $(H + H_0)$. Создаваемая грузом работа при этом будет $A_1 = Q_1(H + H_0)$. Выражение потенциальной энергии для этого случая будет иметь вид:

$$u_1 = \frac{Q_1^2 h_0}{2EF} \quad (2)$$

Из равенства, в пределах упругих деформаций, работы потенциальной энергии следует, что работы A и A_1 равны между собой (по условию), то есть

$$H_0 Q = (H + H_0) Q_1, \quad (3)$$

откуда

$$Q_1 = \frac{QH_0}{H + H_0} \quad (4)$$

Приравняв значения потенциальной энергии в первом и втором случаях и заменяя Q_1 ее значением по формуле (4), получаем

$$\frac{Q^2 h}{2EF} = \frac{Q^2 H_0^2 h_0}{2EF(H + H_0)^2},$$

откуда следует

$$(H + H_0)^2 \cdot h = H_0^2 \cdot h_0. \quad (5)$$

Производя некоторые преобразования этого выражения, получим

$$(H + H_0) = H_0 \frac{1}{\sqrt{\frac{h}{h_0}}}.$$

Выясним, что собой представляет $\sqrt{\frac{h}{h_0}}$ при условии $h_0 > h$.

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{h}{h_0}} &= \sqrt{\frac{h}{h_0} + 1 - 1} = \sqrt{\frac{h - h_0}{h_0} + 1} = \\ &= \sqrt{1 - \frac{h_0 - h}{h_0}} = \sqrt{1 - \delta_{сжат}}. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$H + H_0 = H_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \delta_{сжат}}}.$$

Из этого выражения легко получить

$$H = H_0 \cdot \frac{1 - \sqrt{1 - \delta_{сжат.}}}{\sqrt{1 - \delta_{сжат.}}} \quad (6)$$

Определим величину H_0 , для этого исходим из равенства

$$(H + H_0)^2 \cdot h = H_0^2 \cdot h_0$$

$$S = (H + H_0)^2 \cdot h - H_0^2 \cdot h_0 = 0.$$

$$\frac{\partial S}{\partial H_0} = 2 \cdot (H + H_0)h - 2H_0h_0 = 2 [H \cdot h - H_0(h_0 - h)] = 0.$$

Отсюда следует, что

$$H_0 = \frac{Hh}{h_0 - h} \quad (7)$$

В случае, когда мы имеем ряд испытаний,

$$H_0 = \frac{\Sigma Hh}{\Sigma(h_0 - h)} \quad (8)$$

Очевидно, при определенной высоте подъема груза — H для данной серии испытаний $H_0 = \text{const}$. Если при этом вес поднимаемого груза равен Q , то работа этого груза на высоте H_0 будет $H_0 \cdot Q = A = \text{const}$, откуда $H_0 = \frac{A}{Q}$.

Введем некоторую величину B , имеющую размерность куба линейной величины, такую, что произведение B на модуль нормальной упругости E исследуемого материала будет равно A , т. е.

$$B \cdot E = A.$$

В свою очередь, величину B можно представить как произведение некоторого безразмерного коэффициента $2\beta_c$ на объем образца V

$$B = 2\beta_c \cdot V.$$

При этих предположениях формула (6) приобретает вид:

$$H \cdot Q = 2\beta_c \cdot V \cdot E \cdot \frac{1 - \sqrt{1 - \delta_{сжат.}}}{\sqrt{1 - \delta_{сжат.}}} \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что

$$\beta_c = \frac{H \cdot Q \sqrt{1 - \delta_{сжат.}}}{2 \cdot V \cdot E (1 - \sqrt{1 - \delta_{сжат.}})} \quad (10)$$

Эта наша формула общего коэффициента удара β_c позволяет поставить ряд задач, а именно:

1. Выяснение влияния веса груза Q и высоты подъема груза.
2. Выяснение влияния модуля Юнга, т. е. фактически, при прочих равных условиях, выяснение влияния самого металла.
3. Выяснение влияния объема образца.
4. Выяснение влияния относительных геометрических размеров.

Введем понятие о среднем сопротивлении деформации металла при ударном сжатии. Под этим сопротивлением будем понимать отношение разности работ $A_1 - A_2$ к перемещенному объему, т. е.

$$K = \frac{A_1 - A_2}{V_n} \quad (11)$$

где A_1 — работа падающего груза,

A_2 — работа на подсакивание груза после удара

$$V_n = V \ln \left(\frac{1}{\delta_{сжат}} \right), \quad (12)$$

V — объем образца до удара,

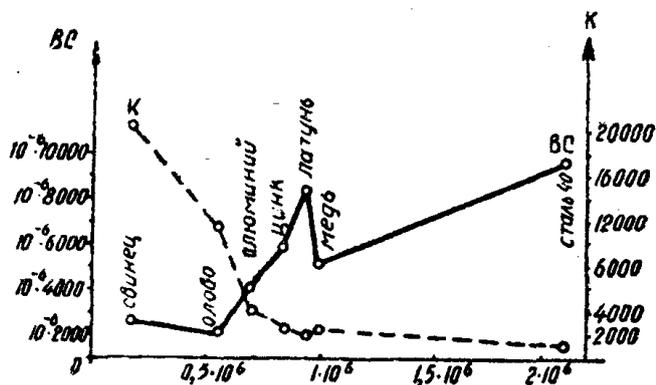
$$\delta_{сжат} = \frac{h_0 - h}{h_0} \text{ — ударное сжатие,}$$

V_n — перемещенный объем.

3.

Влияние модуля Юнга на значение коэффициента β_c и на сопротивление деформации металла ударному сжатию.

Для выяснения этого вопроса нами были испытаны на ударное сжатие образцы из стали 40, меди, латуни, алюминия, цинка, олова, свинца. Все образцы имели постоянные одинаковые размеры: высота $h_0 = 15$ мм, диаметр $d_0 = 10$ мм. Удар производился с высоты $H = 100$ см грузом $Q = 31,2$ кг. Число оборотов барабанчика копра $n = 1500$ об/мин. Средние величины, полученные из этих опытов, сведены нами в таблицу 2.



Фиг. 2

По данным таблицы 2 построена графическая зависимость между значениями модуля нормальной упругости E коэффициента удара β_c и коэффициентом сопротивления деформации K (фиг. 2).

Анализ этого графика позволяет сделать следующие заключения:

а) С увеличением модуля нормальной упругости E коэффициент удара β_c возрастает, что указывает на справедливость этого коэффициента, как величины, определяющей собой процесс удара.

б) Коэффициент K с увеличением модуля нормальной упругости E уменьшается и весьма значительно (для свинца $K = 20580$, а для стали $K = 1237$).

На фиг. 2 для меди заметно отклонение от сделанного выше вывода, что можно объяснить специфичностью деформации меди при ударной нагрузке (при небольших сравнительно осадках значительная потеря упругих свойств).

4.

Влияние на коэффициент удара β_c и коэффициент сопротивления K высоты подъема груза H .

Для выяснения этой зависимости нами испытано большое число образцов из указанных в § 3 материалов, имеющих постоянные размеры:

Материалы	Размеры образца до опыта			Работа подающего груза A_1 кг.см	Высота подскокивания груза a см	Работа на подскокивание груза A_2 кг.см	Разность работ $A_1 - A_2$ кг.см	Длина образца после удара h мм	$\delta_{сжат} = \frac{h_0 - h}{h_0}$	$\sqrt{1 - \delta_{сжат}}$	$\ln \frac{1}{\delta_{сжат}}$	Перемещенный объем $Vn = V \ln \frac{1}{\delta_{сжат}}$	$K = \frac{A_1 - A_2}{Vn}$	Значение коэффициента удара β_c по формуле — 10
	h_0 мм	d_0 мм	$V = \frac{\pi d_0^2}{4} h_0$ см ³											
Ст. 40 $E = 2,1 \cdot 10^6$	15	10	1.176	3120	2.25	69.6	3050.4	13.15	0.1233	0.935	2.050	2.460	1237	$9600 \cdot 10^{-6}$
Медь $E = 1,0 \cdot 10^6$	15	10	1.176	3120	0.55	16.55	3103.45	9.80	0.3473	0.807	1.058	1.243	2498	$5050 \cdot 10^{-6}$
Далунь $E = 0,95 \cdot 10^6$	15	10	1.176	3120	1.45	44.7	3075.3	11.00	0.2650	0.858	1.328	1.560	1968	$8425 \cdot 10^{-6}$
Алюминий $E = 0,7 \cdot 10^6$	15	10	1.176	3120	0.30	9.36	3110.64	7.02	0.5333	0.683	0.632	0.743	4168	$4000 \cdot 10^{-6}$
Пинк $E = 0,85 \cdot 10^6$	15	10	1.176	3120	0.43	13.4	3106.6	9.23	0.3846	0.785	0.955	1.123	2762	$5770 \cdot 10^{-6}$
Олово $E = 0,56 \cdot 10^6$	15	10	1.176	3120	0.51	15.6	3104.4	3.15	0.7906	0.457	0.230	0.271	11450	$2015 \cdot 10^{-6}$
Свинец $E = 0,17 \cdot 10^6$	15	10	1.176	2340	1.15	35.9	2304.1	1.4	0.9070	0.305	0.095	0.112	20580	$2570 \cdot 10^{-6}$

Примечание: Для свинца высота подъема груза $H = 75$ см.

$h_0 = 15$ мм, $d_0 = 10$ мм. Высота подъема H менялась в пределах: для стали 40, меди, алюминия от $H = 150$ см до $H = 75$ см; для латуни, цинка в пределах от $H = 125$ см до $H = 75$ см; для олова от $H = 100$ см до $H = 50$ см и свинца от $H = 75$ см до 25 см. Различные высоты подъема груза приняты в силу того, что при более высоких подъемах груза для латуни, цинка, олова и свинца образцы после удара либо раскалывались (латунь, цинк), либо сильно расплющивались (олово, свинец).

В таблице 3 приведены основные данные этих опытов.

Анализ данных табл. 3 показывает, что увеличение высоты подъема ударяющего груза существенно сказывается на величине значений β_c и K .

Для стали, например, увеличение высоты подъема ударяющего груза вызывает изменение значений β_c и K в следующем отношении:

$$\frac{\beta_c(150)}{\beta_c(75)} = \frac{8150 \cdot 10^{-6}}{9440 \cdot 10^{-6}} = 0,865,$$

$$\frac{K(150)}{K(75)} = \frac{2485}{842} = 2,95,$$

т. е. при изменении высоты подъема ударяющего груза в два раза среднее сопротивление удару меняется на 295%, а коэффициент—на 13,5%. Естественно ожидать, что увеличение высоты подъема груза вызывает возрастание расхода энергии на деформацию в таком же отношении, как изменяются средние сопротивления удару, т. е. значения K .

5.

Влияние относительных геометрических размеров на значения β_c и K .

В настоящем параграфе мы рассматриваем вопрос о влиянии коэффициента $\alpha = \frac{h_0}{d_0}$ на изменение значений β_c , среднего сопротивления деформации при ударе K . Для разрешения этого вопроса нами произведены опыты с образцами, имеющими следующие значения α

$$\alpha = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0$$

и изготовленными из стали 30, меди, латуни, цинка и серого чугуна. Вес падающего груза $Q = 25$ кг. Высоты падения приняты различными так, как это показано в табл. 4 и 5.

Графики изменения K и β_c в функции от α представлены на фиг. 3 и 4.

Анализ таблиц и графиков позволяет сделать следующие выводы:

а) Для всех металлов, испытанных нами, с увеличением α увеличивается среднее сопротивление деформированию металлов при ударе.

б) Наименьшее значение K соответствует значению $\alpha = 3,0$ и наибольшее значению $\alpha = 0,5$.

в) При уменьшении значения α изменения значений коэффициента удара β для стали и меди происходит по плавной возрастающей кривой.

Для латуни, чугуна и цинка изменение β в функции от α носит сложный характер, причем, все они имеют 2 максимума при $\alpha = 1,5$ и $\alpha = 0,5$. При $\alpha = 1,0$ для этих металлов значение β_c падает. Это, очевидно, объясняется тем, что все эти металлы относятся к разряду хрупких металлов.

6

Рассмотрим вопрос о зависимости работы удара $A_1 - A_2$ и относительной деформации сжатия при ударе $\delta_{сжат} = \frac{h_0 - h}{h_0}$ от начальной скорости удара V . С этой целью данные опытов предыдущих параграфов нами обработаны в направлении определения скорости удара V и сведены в табл. 6.

Таблица 3

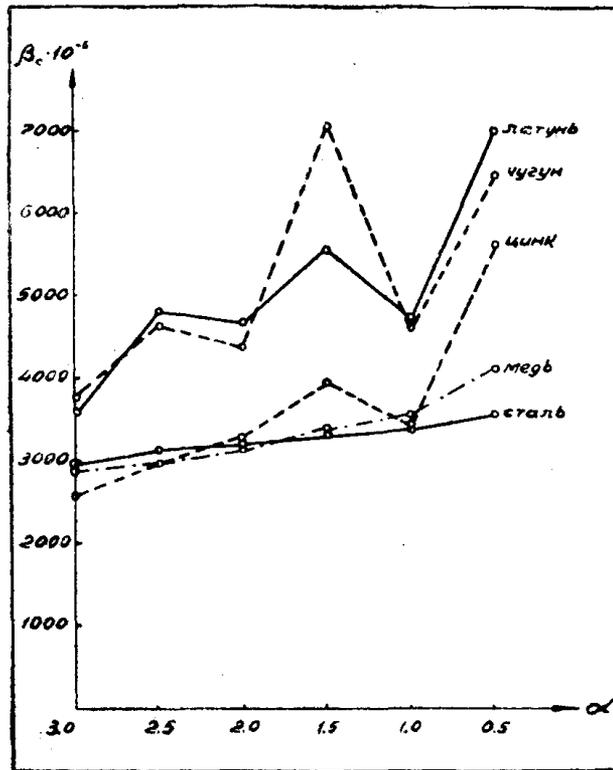
Материал	Размеры образца до опыта			Груз Q кг	Высота подъема груза H см	Работа падающего груза A_1 кг.см	Высота отскока груза a см	Работа груза при отскоке A_2 кг.см	$A_1 - A_2$ кг.см	Высота образца после удара h мм	$\delta_{сжат} = \frac{h_0 - h}{h_0}$	$\sqrt{1 - \delta_{сжат}}$	Значение β_c	$\ln \frac{1}{\delta_{сжат}}$	Перемещенн. объем $V_n = V \ln \frac{1}{\delta_{сжат}}$	$K = \frac{A_1 - A_2}{V_n}$
	h_0 мм	d_0 мм	$V = \frac{\pi d_0^2 h_0}{4}$ см ³													
Сталь 40	15	10	1.176	31.2	150 100 75	4680 3120 2340	2.50 2.260 1.90	77.00 69.60 59.25	4602.10 3050.4 2280.75	11.90 13.15 13.50	0.2066 0.1273 0.1000	0.891 0.935 0.950	8150.10 ⁻⁶ 9600.10 ⁻⁶ 9440.10 ⁻⁶	1.576 2.090 2.302	1.852 2.460 2.710	2485 1237 845
Медь	15	10	1.176	31.2	150 100 75	4680 3120 2340	1.20 0.53 0.30	37.47 16.55 9.36	4642.53 3103.45 2330.64	8.00 9.80 11.00	0.4670 0.3473 0.2662	0.731 0.808 0.857	4930.10 ⁻⁶ 5050.10 ⁻⁶ 5440.10 ⁻⁶	0.761 1.058 1.321	0.895 1.243 1.555	5180 2498 1498
Латунь	15	10	1.176	31.2	125 100 75	3900 3120 2340	1.5 1.43 1.2	46.8 44.7 37.42	3853.2 3075.3 2302.58	10.50 11.00 11.85	0.3000 0.2650 0.2165	0.836 0.858 0.885	8900.10 ⁻⁶ 8425.10 ⁻⁶ 8040.10 ⁻⁶	1.200 1.328 1.530	1.410 1.560 1.800	2730 1968 1278
Алюминий	15	10	1.176	31.2	150 100 75	4680 3120 2340	0.5 0.3 0.2	15.6 9.36 6.24	4664.4 3110.64 2333.76	4.9 7.0 8.9	0.6740 0.5333 0.4075	0.572 0.683 0.771	3718.10 ⁻⁶ 4000.10 ⁻⁶ 4710.10 ⁻⁶	0.395 0.632 0.895	0.465 0.743 1.051	10000 4108 2258
Цинк	15	10	1.176	31.2	125 100 75	3900 3120 2340	0.5 0.43 0.3	15.6 13.4 9.36	3884.4 3106.6 2330.64	7.7 9.2 10.5	0.4875 0.3846 0.3000	0.717 0.785 0.836	5000.10 ⁻⁶ 5770.10 ⁻⁶ 6050.10 ⁻⁶	0.716 0.955 1.200	0.844 1.123 1.410	4601 2762 1652
Олово	15	10	1.176	31.2	100 75 50	3120 2340 1560	0.5 0.2 0.09	15.6 6.24 2.8	3104.4 2333.76 1557.2	3.1 4.8 6.8	0.7906 0.6800 0.5475	0.457 0.566 0.674	2015.10 ⁻⁶ 2560.10 ⁻⁵ 2480.10 ⁻⁶	0.230 0.385 0.605	0.271 0.453 0.712	11450 5140 2185
Свинец	15	10	1.176	31.2	75 50 25	2340 1560 780	1.15 0.15 0.2	35.9 15.6 6.24	2304.1 1544.4 773.76	1.4 1.9 2.7	0.9070 0.8740 0.8210	0.305 0.355 0.424	2570.10 ⁻⁶ 2140.10 ⁻⁶ 1430.10 ⁻⁶	0.095 0.139 0.199	0.112 0.164 0.235	20580 9410 3290

Таблица 4

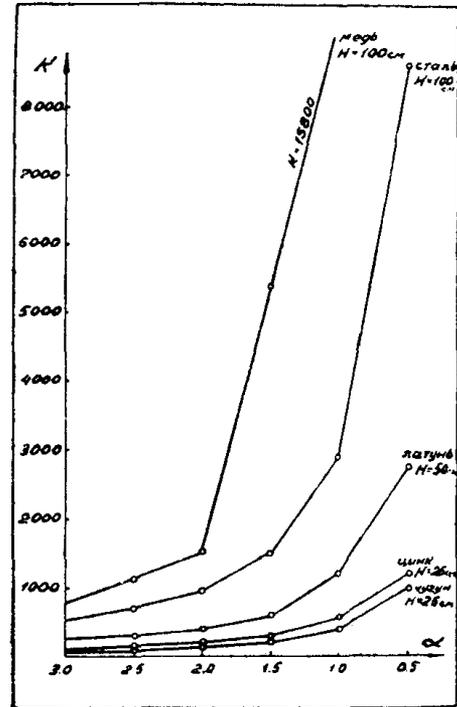
№ образца	Размеры до опыта		$\alpha = \frac{h_0}{d_0}$	Материал	Вес груза Q кг	Высота подъема H см	Работа груза кг см $A_1 = QH$	Высота подскока a см	Работа после подскока A_2 кг см	$A_1 - A_2$	Высота образца после удара h см	$\delta_{сж\text{ ат}} \frac{h_0 - h}{h_0}$	$\sqrt{1 - \delta_{сж\text{ ат}}}$
	h_0 мм	d_0 мм											
1	30	10	3.0	Сталь-30	25 кг	100	2500	1.5	150	2350	25.47	0.151	0.921
2	25	10	2.5			100	2500	1.6	160	2340	20.53	0.179	0.908
3	20	10	2.0			100	2500	2.2	220	2280	15.70	0.215	0.886
4	15	10	1.5			100	2500	1.64	164	2336	11.10	0.260	0.861
5	10	10	1.0			100	2500	1.7	170	2330	6.55	0.345	0.810
6	5	10	0.5			100	2500	2.1	210	2290	2.44	0.512	0.695
1	30	10	3.0	Медь	25 кг	100	2500	0.50	50	2450	21.90	0.270	0.855
2	25	10	2.5			100	2500	0.55	55	2445	16.95	0.322	0.824
3	20	10	2.0			100	2500	1.20	120	2380	12.83	0.359	0.802
4	15	10	1.5			100	2500	0.56	56	2444	8.60	0.427	0.759
5	10	10	1.0			100	2500	0.65	65	2435	4.75	0.525	0.690
6	5	10	0.5			100	2500	1.10	110	2390	1.60	0.680	0.566
1	30	10	3.0	Латунь	25 кг	50	1250	1.10	55	1195	26.84	0.137	0.930
2	25	10	2.5			50	1250	1.20	60	1190	21.82	0.127	0.935
3	20	10	2.0			50	1250	2.30	115	1135	16.80	0.160	0.918
4	15	10	1.5			50	1250	1.15	57.5	1192.5	12.34	0.177	0.909
5	10	10	1.0			50	1250	1.30	65	1185	7.20	0.280	0.850
6	5	10	0.5			50	1250	2.20	110	1140	3.25	0.350	0.807
1	30	10	3.0	Цинк	25 кг	25	625	0.15	3.75	611.25	26.95	0.102	0.945
2	25	10	2.5			25	625	0.2	5.00	620.0	22.11	0.116	0.940
3	20	10	2.0			25	625	1.0	25.0	600	17.36	0.132	0.932
4	15	10	1.5			25	625	0.2	5.0	620	12.85	0.143	0.926
5	10	10	1.0			25	625	0.4	10.0	615	7.73	0.227	0.880
6	5	10	0.5			25	625	0.8	20.0	605	3.67	0.226	0.857
1	30	10	3.0	Чугун	25 кг	25	625	0.3	7.5	617.5	28.25	0.058	0.971
2	25	10	2.5			25	625	0.4	10.0	615	23.48	0.060	0.970
3	20	10	2.0			25	625	1.2	30.0	595	18.26	0.070	0.961
4	15	10	1.5			25	625	0.4	10.0	615	13.90	0.073	0.964
5	10	10	1.0			25	625	0.6	15.0	610	8.60	0.140	0.928
6	5	10	0.5			25	625	1.0	25.0	900	3.96	0.208	0.890

Таблица 5

Материал	$\alpha = \frac{h_0}{d_0}$	Объем образца $V = h_0 \frac{\pi d_0^2}{4 \text{ см}^3}$	$\delta_{сжат}$	$\ln \frac{1}{\delta_{сжат}}$	Перемещен. объем $V_n = V \cdot \ln \frac{1}{\delta_{сжат}}$	$A_1 - A_2$	$K = \frac{A_1 - A_2}{V_n}$	ρ_c
Сталь 30	3.0	2.458	0.151	1.895	4.65	2350	505	2970.10 ⁻⁶
	2.5	1.962	0.179	1.712	3.36	2340	697	3130.10 ⁻⁶
	2.0	1.571	0.215	1.538	2.42	2280	942	3090.10 ⁻⁶
	1.5	1.176	0.260	1.349	1.58	2336	1475	3300.10 ⁻⁶
	1.0	0.785	0.345	1.065	0.81	2330	2875	3390.10 ⁻⁶
	0.5	0.393	0.512	0.689	0.271	2290	8460	3610.10 ⁻⁶
Медь	3.0	2.458	0.270	1.297	3.18	2450	770	2860.10 ⁻⁶
	2.5	1.962	0.332	1.101	2.16	2445	1130	2970.10 ⁻⁶
	2.0	1.571	0.359	1.028	1.61	2380	1478	3210.10 ⁻⁶
	1.5	1.176	0.427	0.386	0.454	2444	5380	3350.10 ⁻⁶
	1.0	0.785	0.525	0.645	0.506	2435	4800	3540.10 ⁻⁶
	0.5	0.393	0.680	0.386	0.151	2390	15800	4140.10 ⁻⁶
Латунь	3.0	2.458	0.137	1.988	4.87	1195	245.8	3560.10 ⁻⁶
	2.5	1.962	0.127	2.065	4.06	1190	293.0	4810.10 ⁻⁶
	2.0	1.571	0.160	1.835	2.89	1135	393.0	4675.10 ⁻⁶
	1.5	1.176	0.177	1.734	2.04	1192.5	584.0	5560.10 ⁻⁶
	1.0	0.785	0.280	1.278	1.00	1185	1185.0	4740.10 ⁻⁶
	0.5	0.393	0.350	1.051	0.414	1140	2755	7020.10 ⁻⁶
Цинк	3.0	2.458	0.102	2.285	5.61	611.25	108.8	2610.10 ⁻⁶
	2.5	1.962	0.116	2.155	4.23	620	146.2	2975.10 ⁻⁶
	2.0	1.571	0.132	2.025	3.18	600	188.6	3240.10 ⁻⁶
	1.5	1.176	0.143	1.944	2.29	620	271.0	3960.10 ⁻⁶
	1.0	0.785	0.227	1.481	1.16	615	530.0	3460.10 ⁻⁶
	0.5	0.393	0.266	1.325	0.52	605	1162.0	5660.10 ⁻⁶
Чугун	3.0	2.458	0.058	2.855	7.00	617.5	88.20	4260.10 ⁻⁶
	2.5	1.962	0.060	2.820	5.54	615	121.0	5051.10 ⁻⁶
	2.0	1.571	0.077	2.568	4.04	595	147.2	4880.10 ⁻⁶
	1.5	1.176	0.073	2.620	3.08	615	199.5	7110.10 ⁻⁶
	1.0	0.785	0.140	1.967	1.54	610	396.0	5130.10 ⁻⁶
	0.5	0.393	0.208	1.572	0.618	600	970.0	6440.10 ⁻⁶



Фиг. 3



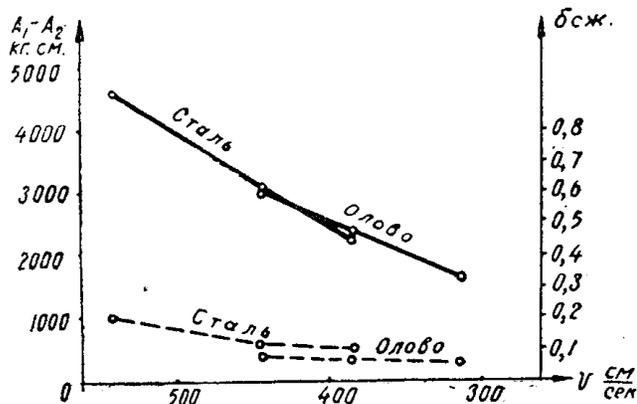
Фиг. 4

Таблица 6

Материал	Скорость <i>v</i> см/сек	$A_1 - A_2$ кг. см	дсжат
Сталь 40	542	4623,85	0,2065
	444	3069,2	0,1233
	384	2280,75	0,1000
Медь	542	4642,53	0,4670
	444	3103,45	0,3473
	384	2330,64	0,2662
Латунь	496	3853,2	0,3000
	444	3075,3	0,2650
	384	2302,58	0,2165
Алюминий	542	4664,4	0,6740
	444	3110,64	0,5333
	384	2333,76	0,4075
Цинк	496	3884,4	0,4875
	444	3106,6	0,3846
	384	2330,64	0,3000
Олово	444	3104,4	0,7906
	384	2333,76	0,6800
	414	1557,2	0,5475
Свинец	384	2304,1	0,9070
	314	1544,4	0,8746
	222	773,76	0,8210

По данным этой таблицы построен график 5 для стали и олова. Графики для других металлов имеют аналогичную форму. Наглядно видно, что закономерность изменения $A_1 - A_2$ и $\delta_{сжат}$ с изменением скорости подчиняется закону прямой линии.

Увеличение скорости ударяющего груза повышает значение работы удара и, соответственно, деформации металла.



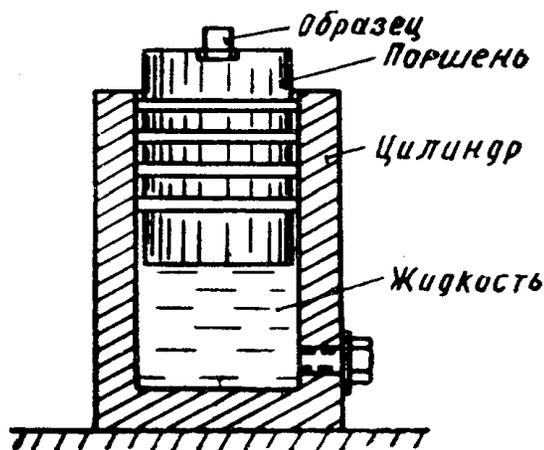
Фиг. 5

Увеличение скорости ударяющего груза с 384 см/сек до 542 см/сек вызывает, соответственно, следующие увеличения ($A_1 - A_2$) и $\delta_{сжат}$.

Таблица 7

Увеличение скорости	Сталь 40		Медь		Алюминий	
	$A_1 - A_2$	$\delta_{сжат}$	$A_1 - A_2$	$\delta_{сжат}$	$A_1 - A_2$	$\delta_{сжат}$
1,41 раза	2,05 раза	2,0 раза	1,99	1,75	2,0	1,65 раза

Мы поставим также вопрос о влиянии жесткости опоры при постоянных значениях груза Q и высоты подъема H и постоянстве геометрических размеров образцов различных материалов на значения коэффициента удара



Фиг. 6

β_c и коэффициента сопротивления K . Различные опорные условия создаются с помощью приспособления, изображенного на фиг. 6. Оно представляет собой цилиндрический сосуд (корпус артиллерийского снаряда

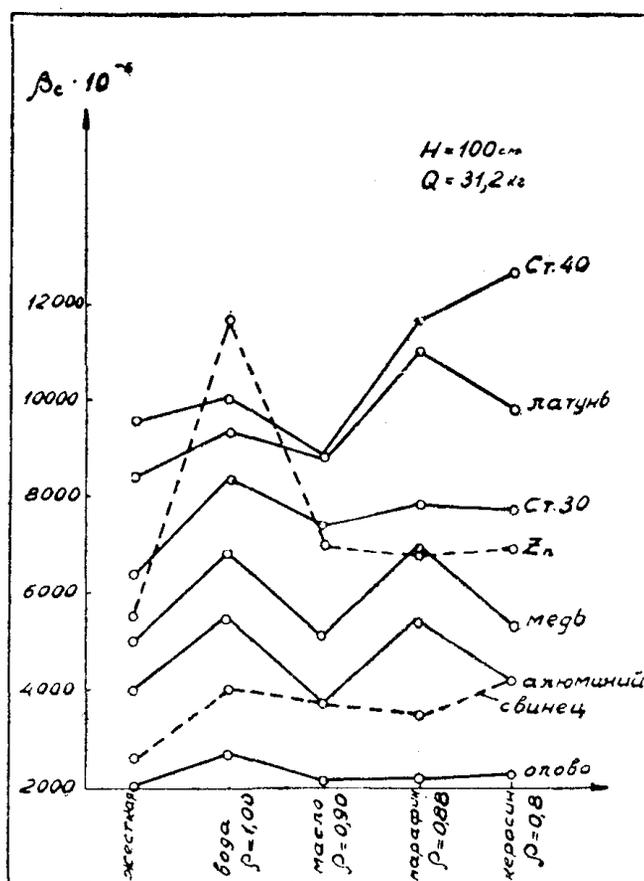
$d = 120$ мм), наполняемый различными жидкостями: водой, маслом, расплавленным парафином и керосином. В сосуд вставлен стальной поршень, имеющий на своей поверхности четыре уплотняющих кольца, предохраняющих от выбрасывания жидкости из цилиндра при ударе. На торцевой поверхности поршня в центре окружности устанавливался испытуемый образец. Удар производился грузом $Q = 31,2$ кг, из них на долю бойка специального устройства приходится 8,6 кг.

В табл. 8 приведены характеристики жидкостей по плотности.

Таблица 8

Жидкость	Вода	Масло	Керосин	Жидкий парафин
Плотность	1,00	0,90	0,80	0,88

Опыты проведены с образцами из стали 40, стали 30, меди, латуни, алюминия, цинка, олова и свинца. Размеры образцов: $h_0 = 15$ мм, $d_0 = 10$ мм. Высота подъема груза Q во всех случаях $H = 100$ см. Средние значения результатов из нескольких опытов для каждого образца представлены в табл. 9.



Фиг. 7

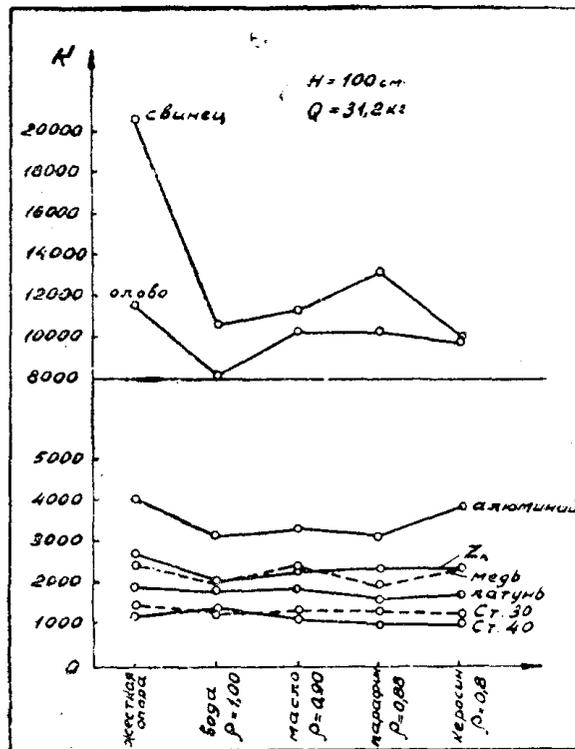
На основании данных этой таблицы в координатных осях — плотность опорной подушки — значения K и P_c — построены графики 7 и 8. В этих графиках приведены также данные для жесткой опоры.

Анализ данных табл. 9 и графиков приводит к следующим заключениям:

а) Среднее сопротивление материалов деформированию при ударе K и коэффициент удара β_c существенно зависит от жесткости опорной подушки. Наибольшие значения K соответствуют жесткой опоре.

б) По мере уменьшения плотности опорной подушки снижается значение среднего сопротивления K .

в) Изменение коэффициента удара β_c в зависимости от жесткости опорной подушки довольно сложно. Увязать изменение β_c с плотностью опорной подушки при ее уменьшении не представляется возможным.



Фиг. 8

Например, плотность опорной подушки масляной отличается от плотности опорной подушки парафиновой всего лишь на 0,02, а изменение значения β_c очень значительно.

Таким образом, мы имеем возможность только констатировать факт значительного влияния плотности опорной подушки на результаты ударного сжатия металлов.

Мы ввели предположение, что при ударе деформация стенок сосуда ($\delta = 15 \text{ мм}$) ничтожно мала и не сказывается на результатах опытов.

Таблица 9

№ опыта	Материал	Опора	Объем образца $V = h_0 \frac{\pi d_0^2}{4} \text{ см}^3$	$\delta_{сжат}$ среднее	$\ln \frac{l}{\delta_{сжат}}$
1 2 3 4 5	Сталь 30	Жесткая Вода Масло Керосин Парафин	1.176	0.1876 0.1443 0.1663 0.1533 0.1520	1.671 1.938 1.791 1.873 1.885
1 2 3 4 5	Сталь 40	Жесткая Вода Масло Керосин Парафин	1.176	0.1233 0.1196 0.1330 0.0996 0.1033	2.090 2.125 2.020 2.305 2.275
1 2 3 4 5	Медь	Жесткая Вода Масло Керосин Парафин	1.176	0.3473 0.2766 0.3466 0.3310 0.2733	1.058 1.282 1.060 1.105 1.297
1 2 3 4 5	Латунь	Жесткая Вода Масло Керосин Парафин	1.176	0.2650 0.2433 0.2550 0.2330 0.2110	1.328 1.410 1.364 1.452 1.558
1 2 3 4 5	Алюминий	Жесткая Вода Масло Керосин Парафин	1.176	0.5333 0.4440 0.5553 0.5153 0.4433	0.632 0.815 0.587 0.661 0.816
1 2 3 4 5	Цинк	Жесткая Вода Масло Керосин Парафин	1.176	0.3846 0.2833 0.3333 0.3346 0.3396	0.955 1.250 1.105 1.095 1.080
1 2 3 4 5	Олово	Жесткая Вода Масло Керосин Парафин	1.176	0.7906 0.7306 0.7766 0.7670 0.7723	0.230 0.315 0.255 0.270 0.255
1 2 3 4 5	Свинец	Жесткая Вода Масло Керосин Парафин	1.176	0.9070 0.8343 0.8470 0.8256 0.8603	0.095 0.182 0.165 0.191 0.148

Перемещенный объем $V_n = V \cdot \ln \frac{1}{\delta_{сжат}}$	$A_1 - A_2$	$K = \frac{A_1 - A_2}{V_n}$	β_c
1.970 2.280 2.108 2.202 2.220	3069.2 3020.4 2826.0 2836.0 2948.2	1558 1322 1351 1284 1328	6360.10 ⁻⁶ 8350.10 ⁻⁶ 7430.10 ⁻⁶ 7670.10 ⁻⁶ 7782.10 ⁻⁶
2.460 2.500 2.380 2.701 2.675	3050.4 2972.2 2736.0 2789.0 2836.0	1237 1396 1148 1032 1058	9600.10 ⁻⁶ 10100.10 ⁻⁶ 8900.10 ⁻⁶ 12700.10 ⁻⁶ 11700.10 ⁻⁶
1.243 1.510 1.248 1.300 1.525	3103.45 3066.9 3048.2 3063.4 3069.8	2498 2030 2442 2360 1968	5050.10 ⁻⁶ 6840.10 ⁻⁶ 5145.10 ⁻⁶ 5380.10 ⁻⁶ 6950.10 ⁻⁶
1.560 1.660 1.605 1.710 1.831	3075.3 3023.3 2973.3 2942.0 2985.9	1968 1822 1850 1720 1630	8425.10 ⁻⁶ 9340.10 ⁻⁶ 8850.10 ⁻⁶ 9870.10 ⁻⁶ 11030.10 ⁻⁶
0.743 0.960 0.690 0.778 0.961	3110.64 3047.6 3038.9 3042.0 3057.6	4108 3175 4385 3915 3175	4000.10 ⁻⁶ 5500.10 ⁻⁶ 3795.10 ⁻⁶ 4230.10 ⁻⁶ 5420.10 ⁻⁶
1.123 1.470 1.300 1.288 1.270	3106.6 3038.0 3032.6 3034.2 3054.3	2762 2060 2330 2358 2402	5770.10 ⁻⁶ 11700.10 ⁻⁶ 7000.10 ⁻⁶ 6960.10 ⁻⁶ 6820.10 ⁻⁶
0.271 0.371 0.300 0.318 0.300	3104.4 3088.8 3081.1 3101.3 3088.8	11450 8220 10270 9750 10280	2015.10 ⁻⁶ 2690.10 ⁻⁶ 2165.10 ⁻⁶ 2250.10 ⁻⁶ 2195.10 ⁻⁶
0.112 0.214 0.194 0.225 0.174	2304.1 2265.0 2186.0 2246.0 2283.9	20580 10580 11250 9975 13110	2570.10 ⁻⁶ 4020.10 ⁻⁶ 3775.10 ⁻⁶ 4275.10 ⁻⁶ 3490.10 ⁻⁶

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Давиденков Н. Н. Динамические испытания металлов. ОНТИ, 1936.
2. Ньютон И. Математические начала натуральной философии.
3. Буссинеск. Application des Potentieles, 1885.
4. Сен-Венан. Добавление к переводу книги Клебша Theoric de l'elasticite,
§ 60—61.
5. Ильюшин А. А. Известия АН СССР, ОТН, № 9, 1950.
6. Рахматулин Х. А. Известия АН СССР, ОТН, № 9, 1950.
7. Кунин Н. Ф. Закон пластического растяжения и сжатия металлов. Челябинск,
1943.
8. Унсков Е. П. О деформировании металла ударом. НИИТМАШ, № 8, 26—40,
1933.
9. Людвик. Elemente der technolgischen Mechanik. Berlin, 1909.
10. Кадрон К. Горячая обработка металлов.
11. Геллер. Влияние числа оборотов на температуру инструмента в холодных прес-
сах, 1927.
12. Ридель. Принцип расхода энергии при ковке под прессом, 1913.
13. Шапошников Н. Вопросы металлургии, стр. 189, Харьков, 1926.