

0.6.7

190

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 190

1961

---

Х. В. ААРЕЛАЙД

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ  
СПОСОБОМ ВНЕДРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО  
ИНДЕНТОРА**

ТАЛЛИН, 1961



Ер. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
Серия А № 190 1961

---

Х. В. ААРЕЛАЙД

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ  
СПОСОБОМ ВНЕДРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО  
ИНДЕНТОРА**

ТАЛЛИН, 1961

Работа выполнена под руководством доктора технических наук  
А. М. ВУЛЬФА

Ер 4538



## ВВЕДЕНИЕ

Процесс пластической деформации металла играет большую роль как при обработке деталей резанием, так и при различных способах формоизменения заготовок без снятия стружки. Осуществление этих процессов связано с необходимостью определения прилагаемых усилий обработки.

Общепринятые методы получения характеристик деформируемого металла трудоемки, дороги и, как правило, связаны с изготовлением и разрушением специального образца. Метод определения пластических свойств металлов применением цилиндрического индентора, изложенный в работе [5], уменьшает во много раз трудоемкость испытания и, в большинстве случаев, исключает необходимость изготовления специального образца. В

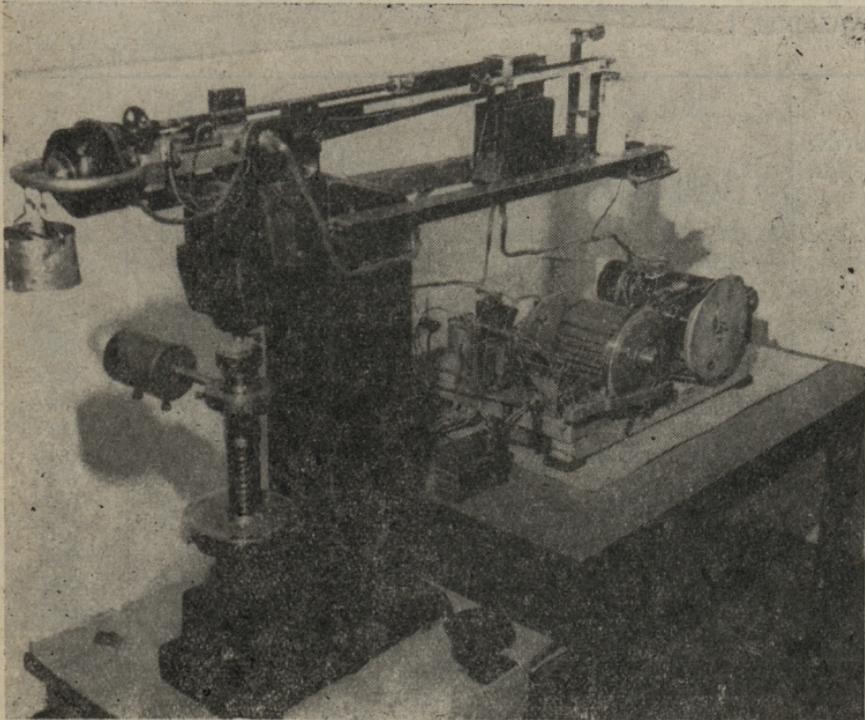


Фото 1.

процессе внедрения индентора только на поверхности изделия образуется отпечаток диаметром 2,0—2,5 мм и глубиной 1,0—1,3 мм. При этом, используя соответствующую установку (фото 1), получают первичные диаграммы. На основе последних определяются постоянные  $C$  и  $m$ , из которых  $C$  характеризует предел текучести а  $m$  способность упрочнения материала.

В настоящей работе излагаются результаты дальнейших исследований предложенного метода испытаний материалов.

## 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА $C$ И $m$ У РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

### 1. Зависимость $C$ и $m$ от твердости и интенсивности упрочнения металлов

Методом внедрения цилиндрического индентора были определены величины  $C$  и  $m$  для некоторых цветных и черных металлов. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

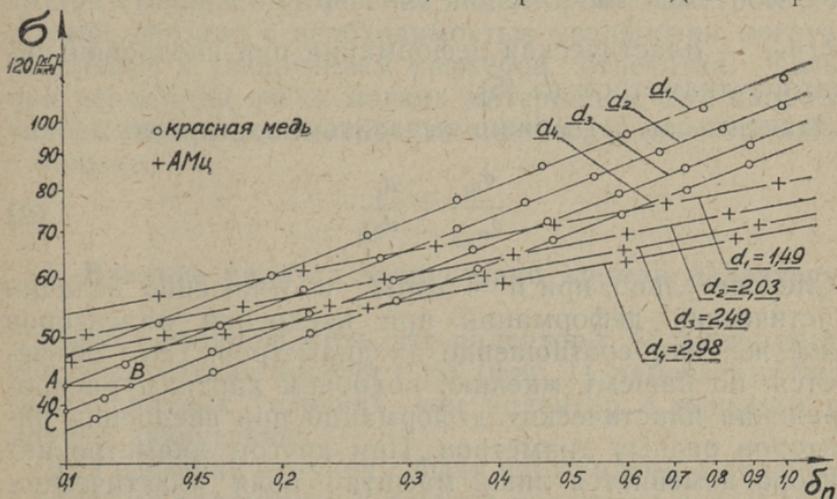
№№ п/п.	Материал			$C$ [кг/мм <sup>2</sup> ]	$m$
	Наименование	Марка	Твер- дость $H_B$		
1	Свинец	—	—	6,7	0,19
2	Олово	02	8,9	13,7	0,26
3	Алюминий	АО	20,1	17,1	0,36
4	Алюм. сплав	—	25,9	27,4	0,23
5	Красная медь	—	46,3	40,5	0,37
6	Цинк	ЦЗ	32,3	46,5	0,27
7	Алюм. сплав	АМц	39,6	47,2	0,18
8	Силумин	СИЛО	50,3	50,4	0,24
9	Алюминий	АЛ15	83,1	78,6	0,29
10	Дуралюмин	Д1	80,4	83,9	0,19
11	Сталь	10	121	119	0,27
12	Бронза	БрАЖ9-4	129	155	0,25
13	Сталь нормал.	45	189	198	0,23
14	„ автоматн.	А12	197	210	0,17
15	Кислотостойкая ст.	1Х18Н9	235	234	0,28

Из таблицы 1 следует, что в общем постоянное  $C$  возрастает с увеличением твердости материала, что и сле-

довало ожидать, поскольку и  $H_B$  и  $C$  обе выражают среднее контактное напряжение при внедрении индентора. Несовпадение значений величин  $H_B$  и  $C$  вызвано очевидно тем, что с одной стороны инденторы имеют разные формы, в результате чего пластически деформированные зоны перед ним получаются неодинаковыми; с другой стороны, твердость  $H_B$  определяется по конечным размерам отпечатка, а постоянная  $C$  при небольшой пластической деформации  $\delta_n = 0,1$  мм. Следовательно, упрочнение металла оказывает большее влияние на твердость  $H_B$ , чем на постоянную  $C$ . Действительно, из таблицы 1 видно, что у интенсивно упрочняющихся металлов, как например у красной меди ( $m = 0,37$ ), алюминия АО ( $m = 0,36$ ), алюминия АЛ15 ( $m = 0,29$ ) и у других величина твердости  $H_B$  больше чем постоянная  $C$ . И наоборот, у относительно мало упрочняющихся металлов, как например у холоднотянутой автоматной стали А12 ( $m = 0,17$ ), алюминиевого сплава АМц ( $m = 0,18$ ), дуралюмина Д1 ( $m = 0,19$ ) и у других, величина твердости  $H_B$  меньше постоянной  $C$ .

## 2. Влияние диаметра индентора $d_i$

Для исследования влияния величины диаметра на характеристики  $C$  и  $m$  использовались инденторы диаметрами от 1,49 мм до 2,98 мм. Испытания проводились с алюминиевым сплавом АМц и с красной медью. Первый



Фиг. 1.

материал упрочняется относительно мало ( $m = 0,18$ ), а второй значительно больше ( $m = 0,37$ ). Результаты испытаний приведены в таблице 2 и на фиг. 1, на которой по оси абсцисс отложена пластическая деформация при внедрении индентора  $\delta_n$  [мм], по оси ординат — средние контактные напряжения на торец индентора  $\sigma$  [кг/мм<sup>2</sup>].

Таблица 2

№№ п/п.	Диаметр индентора $d_i$ [мм]	Алюмин. сплав АМц		Красная медь	
		$C$ [кг/мм <sup>2</sup> ]	$m$	$C$ [кг/мм <sup>2</sup> ]	$m$
1	1,49	53,7	0,18	46,6	0,39
2	2,03	49,7	0,18	42,5	0,39
3	2,49	47,2	0,18	39,3	0,39
4	2,98	45,8	0,18	37,0	0,38

Из таблицы 2 следует, что с изменением  $d_i$  изменяется и  $C$ , в то время как  $m$  остается практически неизменным. Анализируя результаты испытаний можно сделать вывод, что при постоянном среднем контактном напряжении  $\sigma$  на торец индентора имеют место постоянные соотношения:

$$\frac{\delta_{n_{2,5}}}{d_{2,5}} = \frac{\delta_{n_2}}{d_2} = \dots = \frac{\delta_{n_1}}{d_1} = \text{const.} \quad (1)$$

где  $\delta_{n_i}$  — пластическая деформация при внедрении индентора диаметром  $d_i$  [5].

Зависимость (1) можно выразить и по другому:

$$\frac{\delta_{n_1}}{\delta_{n_{2,5}}} = \frac{d_1}{d_{2,5}}. \quad (2)$$

Следовательно, при  $\sigma = \text{const.}$ , соотношение величин пластических деформаций при внедрении инденторов такое же, как соотношение их диаметров. Это объясняется, по нашему мнению, подобием картины распространения пластических деформаций при внедрении инденторов разных диаметров. При другом диаметре индентора изменяется лишь масштаб поля пластических деформаций.

Зная постоянную  $C_i$  для какого-то диаметра индентора  $d_i$  можно следующим образом определить постоянную  $C_{2,5}$  для диаметра индентора  $d_{2,5} = 2,5$  мм. Из треугольника ABC (фиг. 1) можно написать

$$\lg C_{2,5} = \lg C_i - m (\lg \delta_{n_{2,5}} - \lg \delta_{n_i}),$$

откуда

$$C_{2,5} = C_i \left( \frac{\delta_{n_i}}{\delta_{n_{2,5}}} \right)^m. \quad (3)$$

Заменяя соотношение  $\frac{\delta_{n_i}}{\delta_{n_{2,5}}}$  по формуле (2),

получаем

$$C_{2,5} = C_i \left( \frac{d_i}{d_{2,5}} \right)^m = C_i \left( \frac{d_i}{2,5} \right)^m. \quad (4)$$

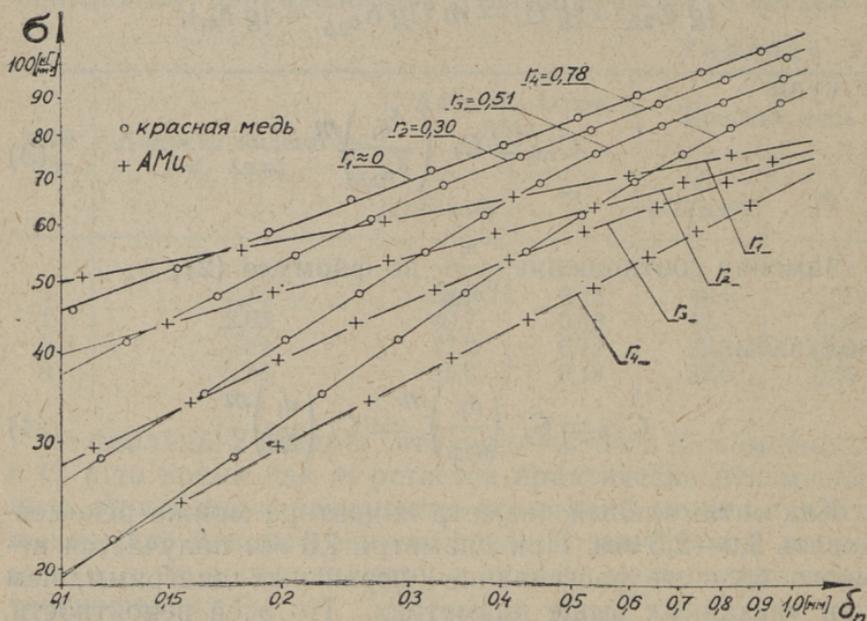
Как оптимальный диаметр индентора можно рекомендовать 2,0—2,5 мм. При диаметре 1,5 мм получается немного большее рассеивание первичных диаграмм, чем при указанных выше диаметрах. По всей вероятности, это является следствием неточности изготовления использованного индентора и неоднородностью материала. С другой стороны, применение инденторов диаметром 3 мм и выше связано с необходимостью увеличения нагрузки внедрения и увеличением размеров отпечатка. Только при испытании очень мягких материалов, как например свинец, можно рекомендовать инденторы диаметром 3 мм и больше.

### 3. Влияние радиуса закругления кромки индентора

Можно предположить, что индентор с большим радиусом закругления кромки  $r$  [5] (фиг. 1) работает в более благоприятных условиях, чем индентор с меньшим радиусом закругления.

Для изучения влияния  $r$  были изготовлены 4 индентора с разными радиусами. У первого индентора  $r_1 \approx 0$ , у второго  $r_2 = 0,30$  мм, у третьего  $r_3 = 0,51$  мм и у четвертого

$r_4 = 0,78$  мм. Диаметры инденторов были одинаковые —  $d = 1,99$  мм. Опыты проводились с красной медью и со сплавом АМц. Результаты опытов показаны на фиг. 2. Так как практически трудно учитывать мгновенную пло-



Фиг. 2.

щадь контакта при внедрении инденторов с заметными радиусами, то напряжение  $\sigma$  на фиг. 2 рассчитано на номинальную площадь поперечного сечения индентора. Из фиг. 2 следует, что:

1. с увеличением  $r$  процесс внедрения индентора протекает при более низких напряжениях, что связано очевидно с более обтекаемой формой индентора;

2. при более высоких значениях  $r$  постоянные  $C$  для разных металлов меньше отличаются друг от друга, что приводит к уменьшению четкости этой характеристики;

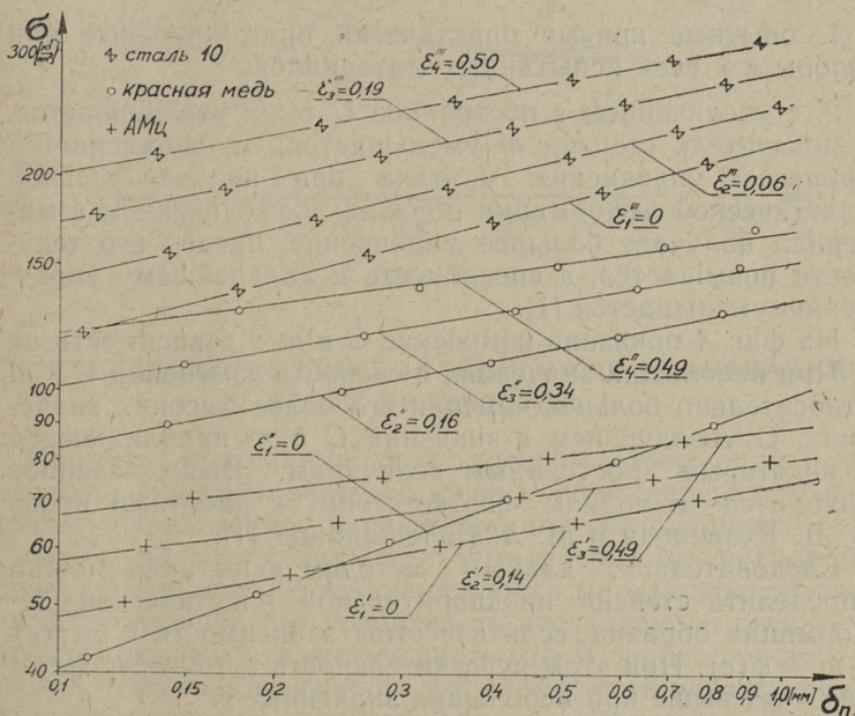
3. с увеличением  $r$  теряется прямолинейность опытных кривых; для первого индентора ( $r \approx 0$ ) максимальное отклонение опытной кривой от прямой линии ( $\Delta_{\text{макс}}$ ) не превышает  $\pm 1\%$  (для сплава АМц  $\Delta_{\text{макс}} = \pm 0,3\%$ , для

красной меди  $\Delta_{\text{макс}} = \pm 0,8\%$ ); с увеличением  $r$   $\Delta_{\text{макс}}$  значительно возрастает, доходя для сплава АМц до  $\pm 3,5\%$  и для красной меди до  $\pm 5,2\%$ . В связи с этим повышается роль субъективного фактора при графической обработке первичных диаграмм и уменьшается точность данного метода испытания.

Следовательно, радиус закругления кромки индентора должен быть минимальным.

#### 4. Влияние предварительной пластической деформации образцов

Методика исследования влияния степени предварительной пластической деформации образцов  $\epsilon$  и соответствующие первичные диаграммы испытания сплава АМц были изложены ранее [5]. Результаты опытов с образцами из красной меди, сплава АМц и стали 10 приводятся в таблице 3 и на фиг. 3.



Фиг. 3.

Таблица 3

№№ п/п.	Материал	$\epsilon$	$C$ [кг/мм <sup>2</sup> ]	$m$
1	АМц	0	47,2	0,18
2		0,14	57,5	0,14
3		0,49	66,6	0,12
4	Красная медь	0	40,5	0,37
5		0,16	83,0	0,20
6		0,34	101	0,17
7		0,49	120	0,14
8	Сталь 10	0	119	0,27
9		0,06	143	0,24
10		0,19	172	0,20
11		0,50	201	0,18

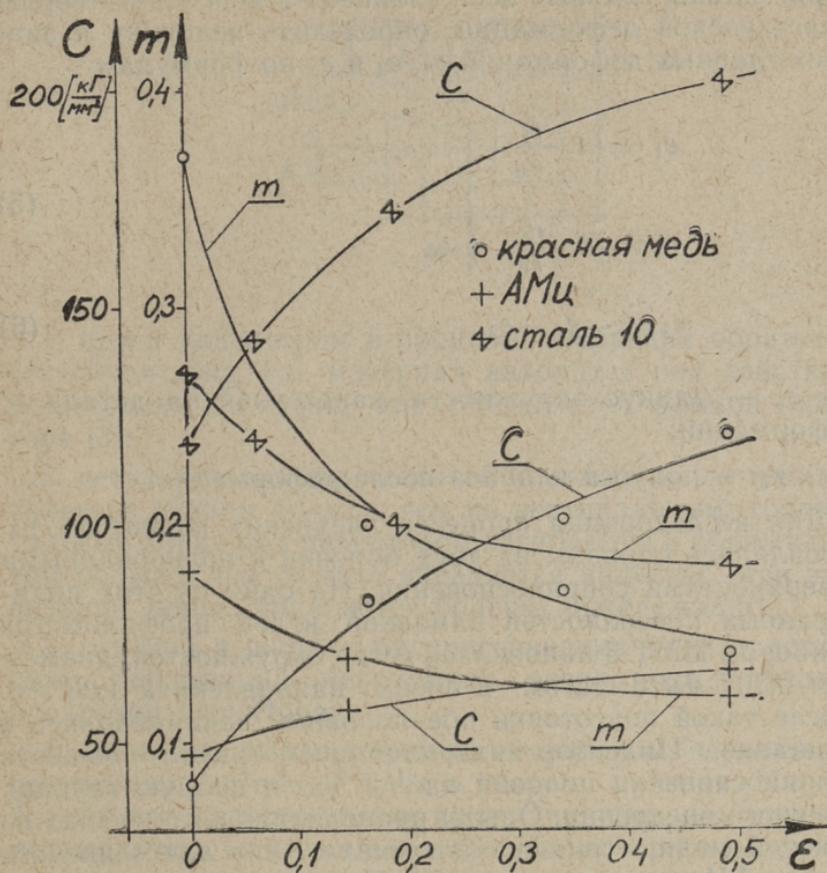
На основе приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. опытные кривые практически прямолинейные при любом  $\epsilon$  у всех испытанных материалов;

2. с увеличением  $\epsilon$  постоянное  $C$  тоже увеличивается, а показатель степени  $m$  уменьшается; это объясняется процессом упрочнения металла при предварительной пластической деформации образца; с увеличением  $\epsilon$  материал получает большее упрочнение, предел его текучести повышается, а способность к дальнейшему упрочнению уменьшается [1].

На фиг. 4 показано изменение  $C$  и  $m$  в зависимости от  $\epsilon$ . При небольших значениях  $\epsilon$  скорость изменения  $C$  и  $m$  относительно больше, чем при его более высоких значениях. С увеличением  $\epsilon$  значения  $C$  и  $m$  приближаются к некоторым постоянным величинам. Вышесказанное находится в полном соответствии с работами проф. В. Д. Кузнецова и М. А. Большаниной [1].

Следовательно, данным методом испытания можно определить степень предварительной пластической деформации образца, если известны зависимости  $C = f(\epsilon)$  и  $m = \varphi(\epsilon)$ . При этом чувствительность и точность метода будет выше при небольших значениях  $\epsilon$ .



Фиг. 4.

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЕРЕД ИНДЕНТОРОМ

Процесс протекания пластической деформации при внедрении цилиндрического индентора исследовался методом определения напряженно-деформированного состояния по искажениям круговых рисок на свободной поверхности тела [2]. Сущность этого метода заключается в следующем. На поверхность исследуемого тела наносятся окружности малого диаметра. В процессе пластической деформации изделия эти окружности искажаются и превращаются в эллипсы. Для каждого материального объема тела, очерченного одним кружком, можно, из-

меры длины главных осей эллипсов и используя теорию пластической деформации, определить величину и знак трех главных деформаций  $e_1$ ,  $e_2$  и  $e_3$  по формулам

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \ln \frac{r_1}{r_0} \\ e_2 &= \ln \frac{r_2}{r_0} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

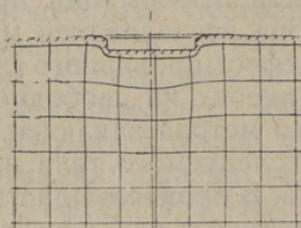
$$e_3 = -e_1 - e_2, \quad (6)$$

где  $r_0$  — радиус окружности, нанесенной на деталь до деформации;

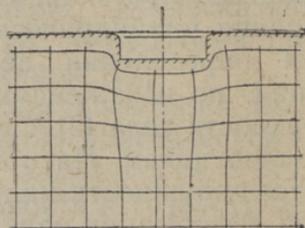
$r_1$ ,  $r_2$  — полуоси эллипса после деформации.

Для исследования процесса внедрения индентора изготавливались образцы из двух половин с полированными поверхностями соприкосновения. На одну из этих полированных поверхностей алмазной иглой профилометра прибором ПМТ-3 наносилась сетка окружностей, диаметром 0,207 мм с шагом в обоих направлениях 1,00 мм. После такой подготовки обе половины заклинивались в державке. Индентор внедрялся симметрично плоскости соприкосновения половин на  $1/3$ ,  $2/3$  и полную глубину обычного внедрения. Опыты проводились на образцах из красной меди, свинца, алюминия АО, алюминиевого сплава АМц и дуралюмина Д1. Ниже излагаются результаты исследования процесса внедрения индентора для сплава АМц.

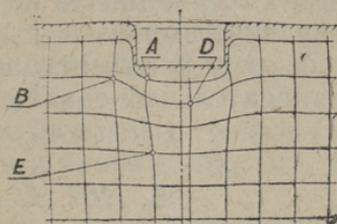
На фиг. 5, 6 и 7 показано изменение сетки центров окружностей при внедрении индентора соответственно на  $1/3$ ,  $2/3$  и на полную глубину. Из этих фигур следует:



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

1. перед индентором в процессе внедрения образуется застойная зона, где материал находится под действием всестороннего сжатия; это объясняется формой индентора [3];

2. сетка центров окружностей искажается по горизонтальным линиям больше, чем по вертикальным; горизонтальные линии под индентором изгибаются и сближаются тем больше, чем глубже внедряется индентор, при этом верхние линии сближаются больше нижележащих;

3. глубина и ширина распространения зоны пластических деформаций непрерывно возрастают в процессе внедрения индентора;

4. материал, выдавливаемый индентором, перемещается спереди застойной зоны в сторону и вверх. На свободной поверхности детали вокруг индентора образуется возвышение, максимальная высота которого находится на небольшом расстоянии от краев отпечатка.

Для более точного определения процесса протекания пластической деформации замерялись полуоси эллипсов и рассчитывались по формулам (5) и (6) главные деформации при  $1/3$ ,  $2/3$  и полной глубине внедрения индентора. Степень деформации металла в пластически деформированной зоне оценивалась величиной относительного сдвига  $g^1$ , который рассчитывался по формуле

$$g^1 = e_1 - e_2, \quad (7)$$

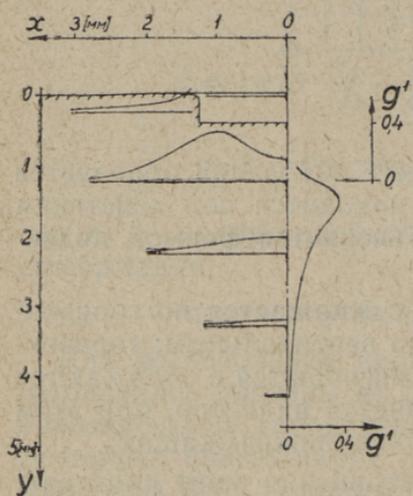
где  $e_1$  — главная деформация в направлении наибольшего удлинения;

$e_2$  — главная деформация в направлении наибольшего укорочения.

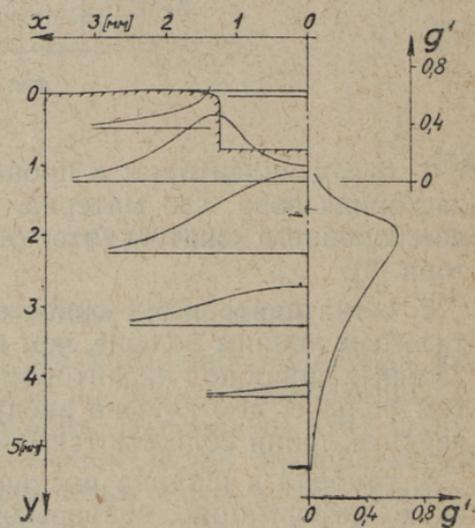
Относительные сдвиги  $g^1$  в разных сечениях при  $1/3$ ,  $2/3$  и полной глубине внедрения индентора показаны соот-

ответственно на фигурах 8, 9 и 10. На основе фигур 5—10 можно сделать следующие выводы:

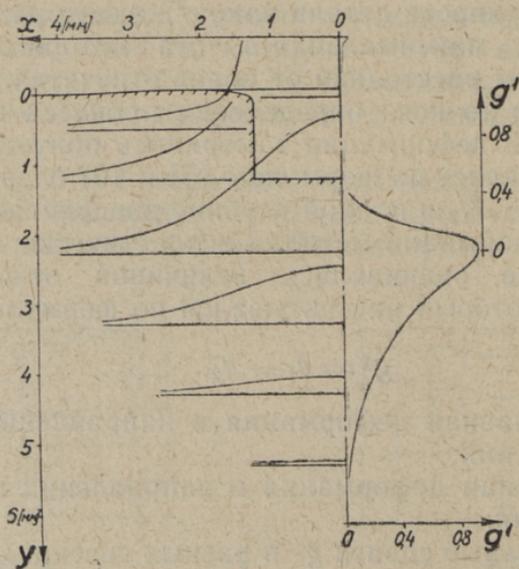
1. непосредственно перед индентором находится застойная зона, где относительный сдвиг  $g^1$  невелик (фиг. 8 и 9);



Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10

2. индентор вместе с застойной зоной окружен зоной максимальных пластических деформаций, где при полной глубине внедрения значения  $g^1$  доходят до величины 1,36 (точка  $A$  на фигуре 7);

3. от зоны максимальных деформаций значения  $g^1$  быстро падают как в направлении оси  $y$ , так и в направлении оси  $x$ ;

4. в процессе внедрения индентора  $g^1_{\text{макс.}}$  непрерывно возрастает. На фиг. 8  $g^1_{\text{макс.}} = 0,34$ , на фиг. 9  $g^1_{\text{макс.}} = 0,58$ , а на фиг. 10  $g^1_{\text{макс.}} = 0,94$  (в точке  $A$  на фиг. 7 даже  $g^1 = 1,36$ ). С увеличением  $g^1$  протекает процесс упрочнения металла и среднее контактное напряжение на торец индентора  $\sigma$  возрастает. Интенсивность последнего определяется показателем степени  $m$ , который таким образом, характеризует склонность материала к упрочнению.

Для контроля вышеизложенного на поверхности соприкосновения половин образцов была определена микротвердость в разных направлениях. Распределение значений микротвердости по поверхности соответствовало распределению значений относительных сдвигов.

Вид деформированного состояния металла при полной глубине внедрения индентора был определен по углу  $\Theta$  [2], величина которого рассчитывалась по формуле

$$\frac{e_1 + e_2 - 2e_3}{e_1 - e_2} = \frac{\text{tg}(30^\circ - \Theta)}{\text{tg}30^\circ} \quad (8)$$

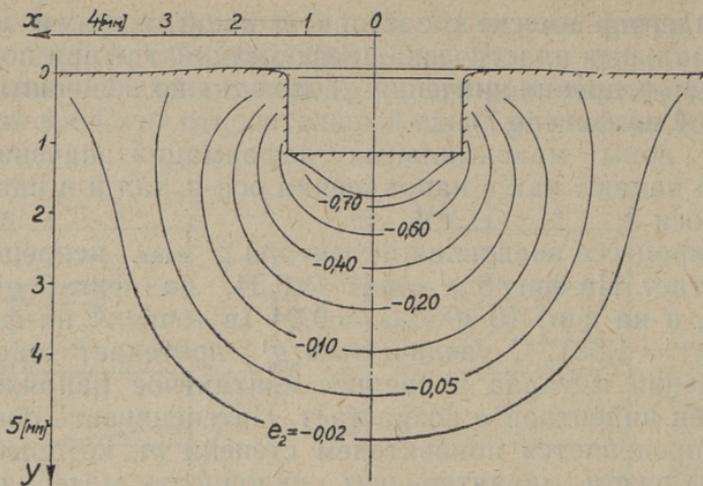
где  $e_1, e_2, e_3$  — главные деформации;

$\Theta$  — угол вида деформированного состояния.

Простому сжатию соответствует  $\Theta = 60^\circ$ , а простому сдвигу  $\Theta = 30^\circ$  [2]. В данном случае в точке  $A$  (фиг. 7)  $\Theta = 38^\circ 5'$  и в точке  $B$   $\Theta = 40^\circ 40'$ . Следовательно, вид деформированного состояния в этой зоне (недалеко от кромки индентора) — сдвиг, смежный с сжатием. В точках  $D$  и  $E$  соответственно получено  $\Theta = 56^\circ 5'$  и  $\Theta = 57^\circ 40'$ , т. е. около оси индентора, а также дальше от точек  $A$  и  $B$  в глубину образца вид деформированного состояния — почти простое сжатие.

На фиг. 11 показаны линии, на которых величина главной деформации в направлении наибольшего укорочения —  $e_2$  постоянная.

Расположение этих линий подтверждает, что зона максимальной пластической деформации окружает индентор



Фиг. 11.

вместе с застойной зоной. Застойная зона немного вдавлена со стороны кромки индентора.

Для других указанных металлов полученные результаты были аналогичны результатам для сплава АМц.

### III. СВЯЗЬ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК $S$ И $m$ С ПАРАМЕТРАМИ ДРУГИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ

Для практического применения предлагаемого метода при расчетах, в первую очередь, необходимо установить зависимости между характеристиками  $S$  и  $m$  и параметрами других общепринятых методов испытаний:

- а) растяжения ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ),
- б) пластического сжатия ( $\sigma_0$ ,  $n$ ).

Излагаемые опыты были поставлены на цветных металлах и на сталях, с разной способностью к упрочнению ( $m = 0,17 - 0,37$ ). Из всех выбранных материалов изготавливались пропорциональные образцы и проводились испытания на растяжение согласно ГОСТ'у 1497-42. Одновременно были изготовлены (кроме стали 1X18H9) образцы с соотношением размеров  $\frac{h_0}{a} = 2,5$  и проведены опыты пластического сжатия с нагружением ступенями через 200 кг с выдержкой 15 сек [1], [4]. При испытании внедрением цилиндрического индентора диаметр последнего для цветных металлов был 2,5 мм, для сталей 2,0 мм.

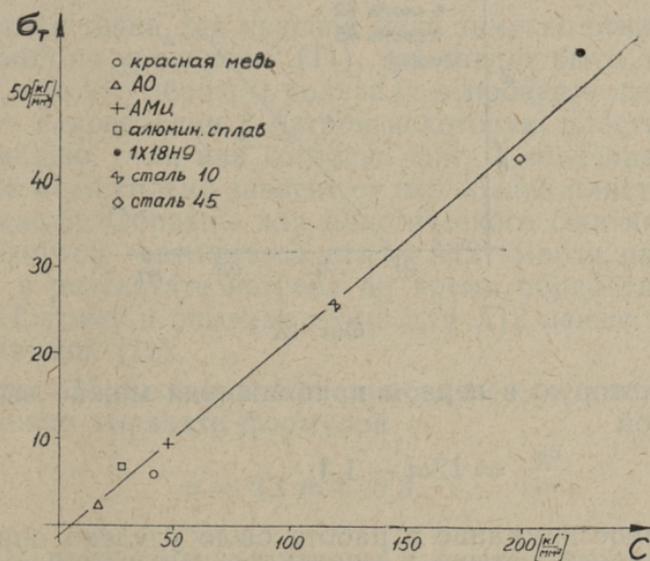
Для приведения результатов опытов к диаметру индентора 2,5 мм величины  $C$  пересчитывались для сталей по формуле (4). Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4

№ п/п.	Материал		Растяжение			Пластическое сжатие		Метод цилинд. индентором	
	Наименов.	Марка	$\sigma_T$ [кг/мм <sup>2</sup> ]	$\sigma_b$ [кг/мм <sup>2</sup> ]	$\delta_{10}$ [%]	$\sigma_0$ [кг/мм <sup>2</sup> ]	$n$	$C$ [кг/мм <sup>2</sup> ]	$m$
1	Красная медь	—	6,0	21,5	44,5	25,5	0,38	40,5	0,37
2	Алюминий	А0	2,5	5,5	22,0	8,0	0,46	17,1	0,36
3	Алюм. сплав	АМц	9,5	14,0	25,0	19,0	0,11	47,2	0,18
4	" "	—	7,0	9,0	28,0	12,5	0,25	27,4	0,23
5	Сталь	1Х18Н9	57,0	74,5	31,5	—	—	234	0,28
6	"	10	25,5	41,0	33,0	53,5	0,25	119	0,27
7	"	45	42,5	68,5	23,0	90,5	0,16	198	0,23
8	Авт. сталь	А12	—	71,0	5,0	76,0	0,11	210	0,17

Сталь 45 — в нормализованном состоянии, остальные материалы — в состоянии поставки. Автоматная сталь А12 — холоднотянутая.

По данным таблицы 4 были получены некоторые зависимости.



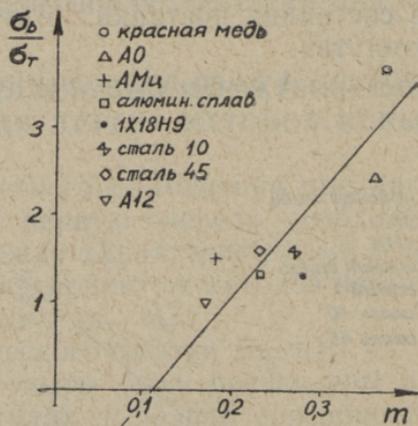
Фиг. 12.

На фиг. 12 показана зависимость между  $\sigma_T$  (предел текучести при растяжении) и постоянной  $C$ . Эту зависимость можно выразить формулой

$$\sigma_T = 0,23 C - 1,5. \quad (9)$$

На фиг. 12 видно, что опытные точки лежат достаточно близко от этой прямой, за исключением красной меди и алюминиевого сплава, которые имеют некоторое отклонение. Зависимость (9) подтверждает наше предположение о том, что величину  $C$  можно называть условным пределом текучести [5].

Также определена связь между соотношением  $\frac{\sigma_b}{\sigma_T}$  и показателем степени  $m$ . На основании теоретических соображений можно предположить, что для материалов, которые имеют большее соотношение  $\frac{\sigma_b}{\sigma_T}$  показатель степени  $m$  получается больше, так как эти материалы должны больше упрочняться, что в целом и подтверждается поставленными опытами. На фиг. 13 показана эта зависи-

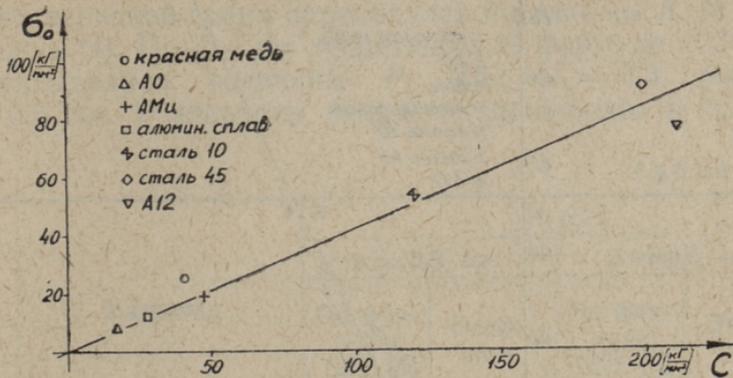


Фиг. 13.

мость, которую в первом приближении можно выразить формулой

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_T} = 12m - 1,3. \quad (10)$$

Основное внимание в работе было уделено определению связи  $C$  и  $m$  с параметрами пластического сжатия  $\sigma_0$  и  $n$ .



Фиг. 14.

На фиг. 14 показана зависимость между  $\sigma_0$  и  $C$ , которая достаточно хорошо описывается линейным уравнением

$$\sigma_0 = 0,42 C, \quad (11)$$

где  $\sigma_0$  — условный предел текучести в опытах пластического сжатия;

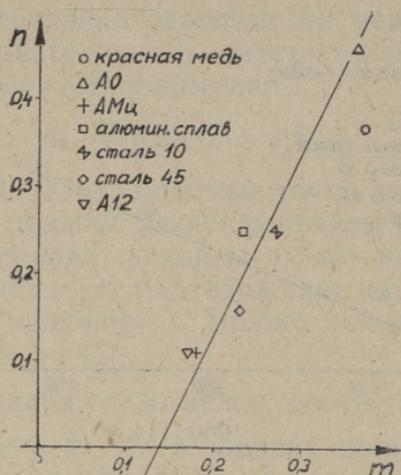
$C$  — условный предел текучести при внедрении цилиндрического индентора.

Опытная точка для красной меди заметно отклоняется от прямой по уравнению (11), что может быть объяснено тем, что эти образцы получили в процессе изготовления при закреплении в патрон некоторую пластическую деформацию, так как согласно фиг. 4 величина  $C$  для красной меди сильно зависит от небольшой пластической деформации. Образцы для пластического сжатия из холоднотянутой автоматной стали A12 могли разупрочняться в результате нагрева во время обработки резанием. Поэтому и опытная точка для A12 лежит немного ниже прямой (11).

На фиг. 15 показана зависимость между  $n$  и  $m$ , которую можно выразить формулой

$$n = 2,1 m - 0,3, \quad (12)$$

где  $n$  — показатель политропы в опытах пластического сжатия;



Фиг. 15.

$m$  — показатель степени при внедрении цилиндрического индентора.

Опытная точка для красной меди находится немного ниже прямой, согласно уравнению (12), что также, по нашему мнению, связано с упрочнением образцов в процессе их изготовления.

Интересно отметить, что прямая (12) не проходит через начало координат. Это значит, что у неупрочняющихся материалов ( $n = 0$ ) показатель степени  $m \neq 0$ , а имеет величину примерно 0,14.

Для проверки зависимостей (11) и (12) были поставлены опыты с резанием сталей 10 и 45. В специальном приспособлении под прессом осуществлялось строгание образцов с разной толщиной срезаемого слоя  $a$ , при постоянной ширине срезаемого слоя  $b = 5$  мм и при постоянной скорости резания  $v = 10$  мм/мин. При этом измерялась составляющая силы резания  $P_z$ , продольная усадка  $\zeta_1$  и уширение стружки  $\zeta_b$ . По методике А. М. Розенберга [4] высчитывались силы на заднюю грань резца. Полученные экспериментальные величины  $P_1$  (составляющая на переднюю грань резца в направлении ( $P_z$  при  $a_1 = 0,3$  мм и  $a_2 = 0,5$  мм показаны в таблице 5.

По  $\zeta_1$  и  $\zeta_b$  рассчитывались коэффициенты усадки стружки  $\zeta$  [4]. Передний угол резца в опытах был  $\gamma = 19,5^\circ$ . Условный предел текучести  $\sigma_0$  и показатель

политропы  $n$  рассчитывались по формулам (11) и (12), исходя из значений  $C$  и  $m$  (таблица 4). Коэффициент трения на передней грани определялся по данным А. М. Розенберга [4]. По его же теоретической формуле (27) [4] рассчитывались величины  $P_1$  при  $a_1 = 0,3$  мм и  $a_2 = 0,5$  мм. Результаты подсчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5

№№ п/п.	Материал	$P_1$ [кГ]			
		$a = 0,3$ мм.		$a = 0,5$ мм.	
		По формуле (27) [4]	Эксперим.	По формуле (27) [4]	Эксперим.
1	Сталь 10	180	184	295	285
2	„ 45 (нормализ.)	245	234	400	387

На основе данных таблицы 5 можно сделать вывод, что формулы (11) и (12) применимы для сталей. Неточность расчетных данных  $P_1$  доходит до 5%, что примерно соответствует точности формулы (27) [4] при микроскоростях. Использованное приспособление не позволяло определить коэффициент трения на передней грани. Так как соответствующие данные для цветных металлов в литературе [4] отсутствуют, не было возможности проверки формул (11) и (12) для этих материалов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изложены результаты исследования влияния некоторых важнейших факторов, которые действуют при испытании металлов внедрением цилиндрического индентора. Приводятся результаты исследования пластически деформированной зоны перед индентором. Определена связь между постоянными  $S$  и  $m$  предполагаемого метода испытания с параметрами некоторых других общепринятых методов. Установлено, что параметры  $\sigma_0$  и  $n$  опытов пластического сжатия линейно связаны с постоянными  $S$  и  $m$ . Это дает возможность испытывать пластические свойства металлов методом внедрения цилиндрического индентора, что в несколько раз менее трудоемко и дешевле, чем метод пластического сжатия и позволяет с достаточной для практики точностью определить усилия резания для сталей.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Кузнецов, Физика твердого тела, том II, Изд. «Красное Знамя», Томск, 1941.
  2. Г. А. Смирнов-Аляев, Сопротивление материалов пластическим деформациям, Машгиз, 1949.
  3. А. И. Исаев, Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием, Машгиз, 1950.
  4. А. М. Розенберг, А. Н. Еремин, Элементы теории процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
  5. Х. В. Аарелайд, Исследование возможности применения цилиндрического индентора для определения пластических свойств металлов, Труды Таллинского политехнического института, Серия А, № 175, 1960.
-

Х. В. Аарелайд

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ СПОСОБОМ ВНЕДРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА.

\*

Таллинский политехнический институт

Редактор Н. Щеглов

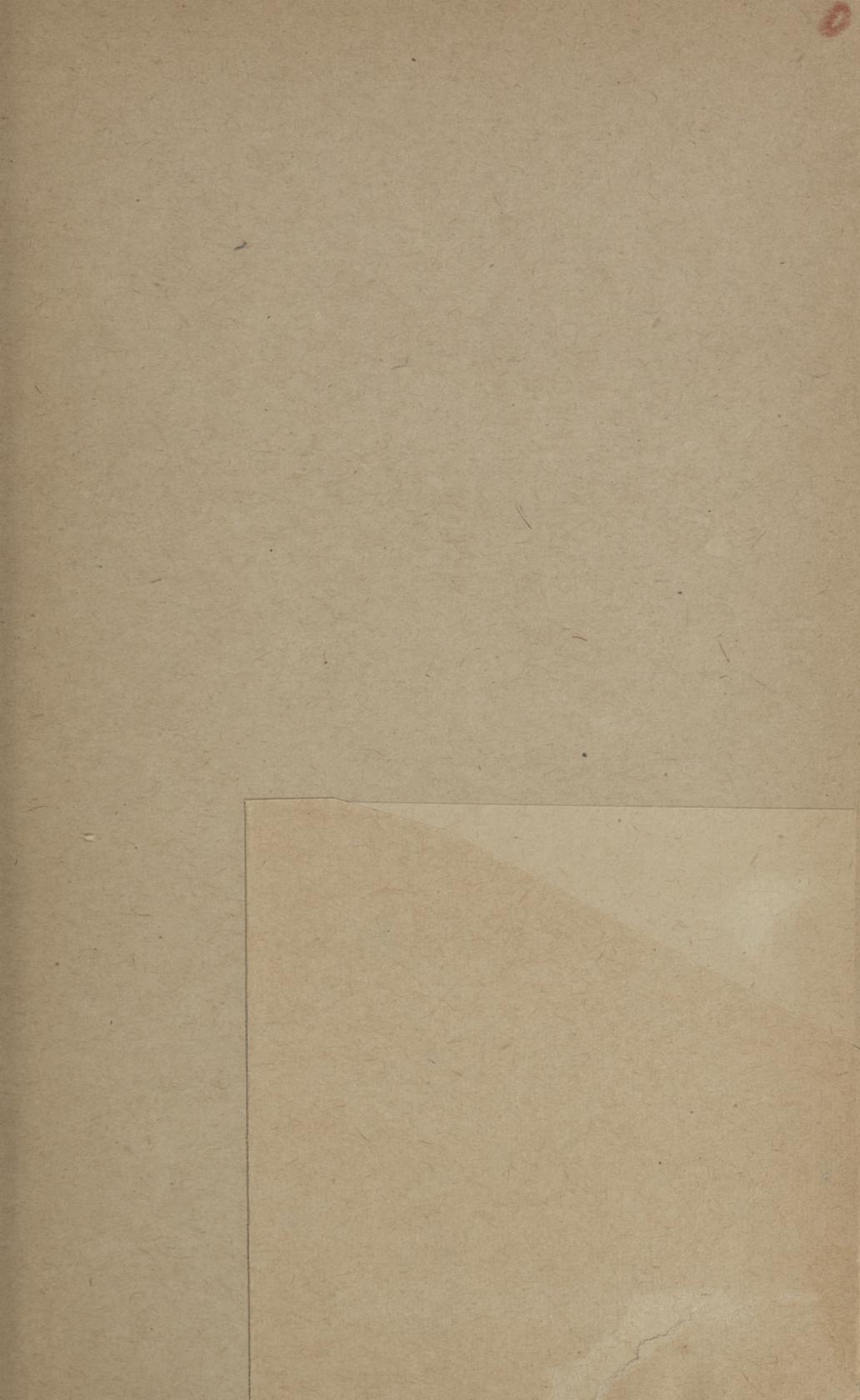
Технический редактор Я. Мыттус

Корректор Г. Гроссшмидт

Сдано в набор 20 VII 1961. Подписано к печати 24. VIII 1961. Бумага  $54 \times 84 \frac{1}{16}$ . Печатных листов 1,5. По формату  $60 \times 92$  печатных листов 1,23. Учетно-издательских листов 1,3. Тираж 500 экз. МВ-06310. Заказ № 5091.

Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк 2.

Цена 11 коп.



Цена 11 коп.

