

0.6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 175

1960

---

**Х. В. ААРЕЛАЙД**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МЕТАЛЛОВ**

ТАЛЛИН, 1960



X. В. ААРЕЛАЙД

ВВЕДЕНИЕ

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ

ТАЛЛИН, 1960

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

1960

№ 175

Серия А

Х. В. АРБЕЛАНД

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО МЕТОДА  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
МЕТАЛЛОВ

Ер. 3821



1960. АРБЕЛАНД

## ВВЕДЕНИЕ

Многие методы обработки машиностроительных деталей связываны с пластической деформацией материала. Такие процессы как холодная прокатка, волочение, накатывание резьб и зубьев, обработка резанием и т. д. без пластических деформаций в металле практически неосуществимы. Для рационального использования этих процессов в целях получения максимальной производительности, минимальной себестоимости и требуемого качества обработки необходимо знать закономерности пластической деформации применяемых материалов.

Классические методы испытания металлов позволяют определить некоторые параметры, характеризующие пластические свойства материала (например предел текучести при растяжении), однако при этом, как правило, требуется изготовление специальных образцов, которые во время испытаний разрушаются. Исключения составляют лишь методы определения твердости, но твердость пластических свойств металла непосредственно не характеризует.

Предлагаемый метод с применением цилиндрического индентора разработан в целях быстрого определения параметров, характеризующих пластические свойства данного металла. Эти параметры дадут возможность рассчитать возникающие при пластической деформации напряжения, усилия и т. д. При этом для испытания не требуется изготовления специальных образцов, — лишь чистота поверхности, на которой производится испытание, должна быть не ниже 4 класса. Если на обработанной поверхности испытываемой детали можно допустить лунку глубиной около 1 мм, то испытание можно производить непосредственно на этой поверхности. Продолжительность испытания примерно 1 ÷ 2 минуты. Метод позволяет определить пластические свойства материала в наружном слое глубиной 3 ÷ 5 мм.

## 1. О ПРИМЕНЕНИИ ИНДЕНТОРОВ

Одним из распространенных видов испытания материалов является испытание на твердость. Под твердостью понимают способность металла сопротивляться проникновению в него другого тела — индентора, не получающего остаточной пластической деформации при приложении нагрузки. По сравнению с другими видами испытаний определение твердости является менее трудоемкой операцией и не связано с разрушением образца. Стандартизованные в СССР методы определения твердости основаны на статическом вдавливании твердого наконечника — стального закаленного шарика, алмазного конуса или алмазной пирамиды [1]. Хотя при вдавливании соответствующего индентора происходит пластическая деформация материала, однако, применяя стандартные инденторы, нельзя достаточно правильно характеризовать предел текучести и коэффициент упрочнения данного металла. Это объясняется следующим:

1. случай наложения на индентор определенной стандартной нагрузки.

Величина твердости при этом определяется по конечному размеру отпечатка, процесс образования которого не рассматривается.

2. случай наложения на индентор непрерывно и равномерно возрастающей нагрузки.

Величина, характеризующая предел текучести, не может быть выявлена вследствие формы стандартных инденторов, при которой пластическая деформация начинается практически сразу после приложения нагрузки. Исключение составляет небольшое пластическое вдавливание индентора при малой постоянной нагрузке [2].

Величину, характеризующую коэффициент упрочнения, при этом способе испытания трудно определить, так как в процессе вдавливания интенсивно увеличиваются площадь соприкосновения индентора с образцом и зона пластической деформации перед ним.

Проф. П. Е. Дьяченко предложил новый метод для определения глубины наклепанного слоя без разрезания изделия, путем внедрения в образец пирамидального индентора под непрерывно и равномерно возрастающей нагрузкой [3]. Этот метод нами был исследован на нескольких опытных установках. Опыты были поставлены

на ненаклепанных и наклепанных образцах, а также на образцах с нанесенным слоем другого металла. В качестве инденторов были применены алмазная пирамида прибора для определения микротвердости ПМТ-3 [4] и конус из микролита с углом заострения  $90^\circ$ . Наши опыты показали, что:

1. получаются плавные кривые внедрения  $P = f(h^2)$  без «перелома» ( $P$  — усилие,  $h$  — глубина внедрения индентора);

2. касательная к этим кривым при достаточном внедрении индентора в образец не проходит через начало координат. \*)

По нашему мнению вышеуказанное объясняется следующим:

1. в процессе внедрения индентора одновременно оказывают влияние как верхний слой, так и нижний основной материал образца, плавно изменяется лишь их относительная роль;

2. пластически деформированная зона перед индентором увеличивается интенсивнее, чем  $h$ ;

3. материал в пластически деформированной зоне получает упрочнение.

Следует отметить еще метод для определения толщины закаленного слоя, где применяется конический алмазный индентор, к которому прикладывается непрерывно и равномерно возрастающая нагрузка [5]. Согласно нашим исследованиям можно предположить, что точность этого метода невысока. «Точку расхождения» двух кривых трудно определить, так как все кривые внедрения конического индентора имеют плавный ход без резких изменений кривизны.

Хотя при методе пластического сжатия, предложенного проф. В. Д. Кузнецовым и М. А. Большаниной [6], индентор не применяется, однако на нем необходимо остановиться, так как разработанный нами метод имеет с этим методом много общего.

Если цилиндрический образец с первоначальной высотой  $h_0$  сжимать между параллельными пластинами с возрастающей нагрузкой и проводить измерение этой высоты  $h$ , то с некоторой высоты  $h_p$  получается зависимость,

---

\*) См. «Вестник машиностроения» 1951, № 4 статья проф. Дьяченко. Г. Е.

которая называется уравнением политропы сжатия. Это уравнение имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 \left( \frac{h_0}{h} \right)^n, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — напряжение сжатия в образце в данный момент;

$\sigma_0$  — условный предел текучести при сжатии;

$h_0$  — первоначальная высота образца;

$h$  — высота образца в данный момент;

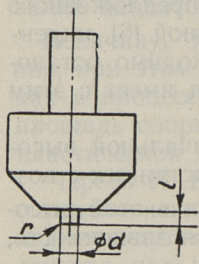
$n$  — показатель политропы, характеризующий коэффициент упрочнения.

Уравнение (1) в логарифмических координатах выражается прямой линией. Зная зависимость (1), можно при известной степени деформации определить напряжение в материале, а также и усилие деформирования. Недостатком метода пластического сжатия можно считать необходимость изготовления специального образца, который в процессе испытания разрушается.

В 1957 году нами был разработан новый метод определения пластических свойств материалов [7], сущность которого излагается ниже.

## II. СУЩНОСТЬ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА

Как было указано выше, применяя инденторы стандартной формы, трудно определить величины, характеризующие предел текучести и коэффициент упрочнения материалов. Поэтому нами были использованы цилиндрические инденторы (фиг. 1), которые под действием непрерывно и равномерно возрастающей нагрузки внедрили в испытываемую деталь. При этом автоматически записывалась первичная диаграмма в координатах  $P-\delta$  (фиг. 2),

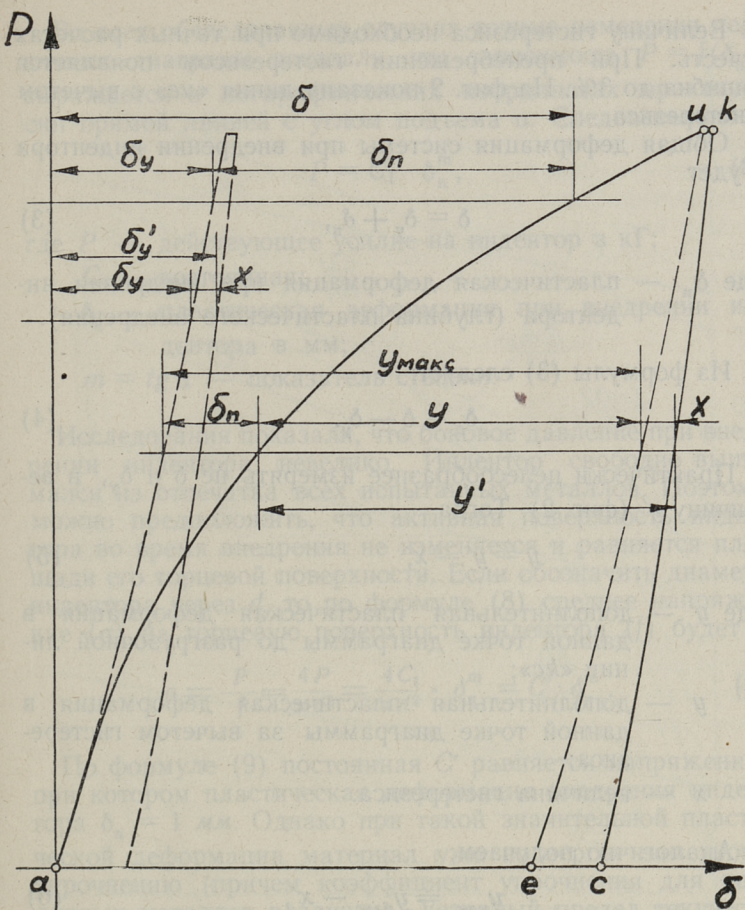


Фиг. 1

где  $P$  — нагрузка на инденторе;

$\delta$  — общая деформация системы.





Фиг. 2

Ветвь «*au*» получена при возрастании, ветвь «*kc*» при уменьшении нагрузки на индентор. Ветвь «*kc*» позволяет учесть упругую деформацию системы  $\delta_y$

$$\delta_y = \delta'_y - x, \quad (2)$$

где  $\delta'_y$  — упругая деформация системы вместе с гистерезисом;

$x$  — величина гистерезиса.

Величину гистерезиса необходимо при точных расчетах учесть. При пренебрежении гистерезисом появляется ошибка до 3%. На фиг. 2 показана линия «*ue*» с вычетом гистерезиса.

Общая деформация системы при внедрении индентора будет

$$\delta = \delta_y + \delta_n, \quad (3)$$

где  $\delta_n$  — пластическая деформация при внедрении индентора (глубина пластического внедрения).

Из формулы (3) следует:

$$\delta_n = \delta - \delta_y. \quad (4)$$

Практически целесообразнее измерять не  $\delta$  и  $\delta_y$ , в величину  $y'$  (фиг. 2). Тогда

$$y = y' - x, \quad (5)$$

где  $y'$  — дополнительная пластическая деформация в данной точке диаграммы до разгрузочной линии «*kc*»;

$y$  — дополнительная пластическая деформация в данной точке диаграммы за вычетом гистерезиса;

$x$  — величина гистерезиса.

Аналогично получаем:

$$y_{\text{макс}} = y'_{\text{макс}} - x', \quad (6)$$

где  $y_{\text{макс}}$  — максимальная пластическая деформация за вычетом гистерезиса;

$y'_{\text{макс}}$  — максимальная пластическая деформация вместе с гистерезисом;

$x'$  — величина гистерезиса при  $y = y_{\text{макс}}$ .

Из вышеизложенного следует, что пластическая деформация при внедрении индентора

$$\delta_n = y_{\text{макс}} - y. \quad (7)$$

Во всех обследованных случаях точные измерения первичных диаграмм показали, что зависимость  $P = f(\delta_n)$  выражается в логарифмических координатах практически прямой линией с углом подъема  $\alpha$ . Следовательно

$$P = C_1 \cdot \delta_n^m, \quad (8)$$

где  $P$  — действующее усилие на индентор в кг;

$C_1$  — постоянная;

$\delta_n$  — пластическая деформация при внедрении индентора в мм;

$m = \operatorname{tg} \alpha$  — показатель степени.

Исследования показали, что боковое давление при внедрении индентора невелико. Индентор свободно вынимался из отпечатка всех испытанных металлов. Поэтому можно предположить, что активная поверхность индентора во время внедрения не изменяется и равняется площади его торцевой поверхности. Если обозначить диаметр индентора через  $d$ , то по формуле (8) среднее напряжение ( $\sigma$ ) на торцевую поверхность индентора ( $f$ ) будет

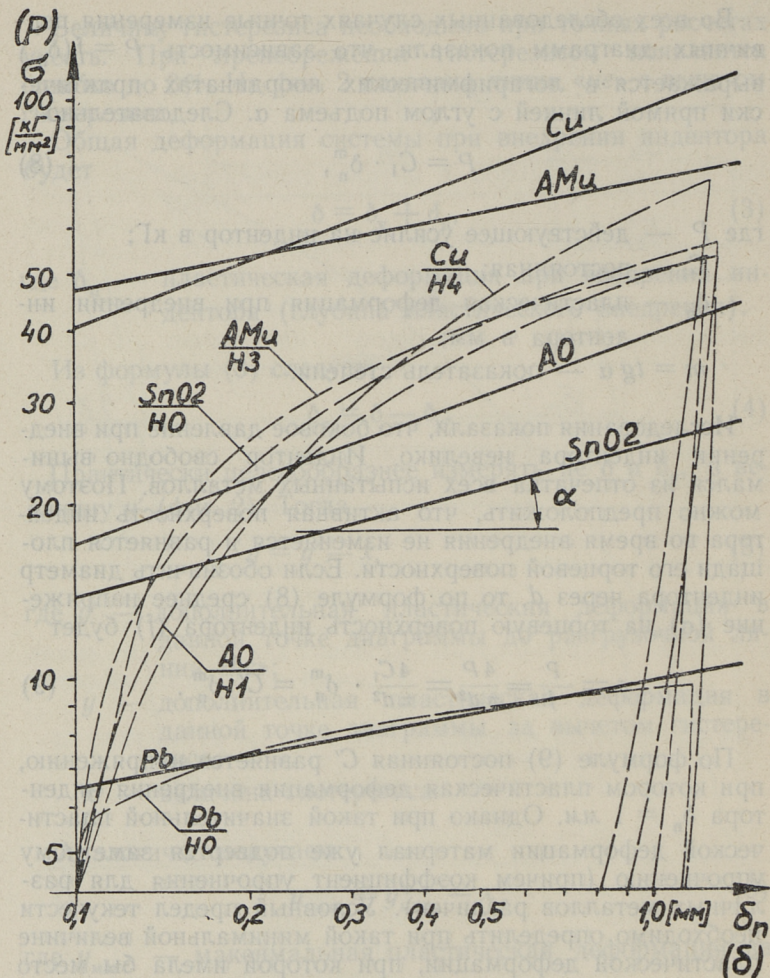
$$\sigma = \frac{P}{f} = \frac{4P}{\pi d^2} = \frac{4C_1}{\pi d^2} \cdot \delta_n^m = C' \cdot \delta_n^m. \quad (9)$$

По формуле (9) постоянная  $C'$  равняется напряжению, при котором пластическая деформация внедрения индентора  $\delta_n = 1$  мм. Однако при такой значительной пластической деформации материал уже подвергся заметному упрочнению (причем коэффициент упрочнения для различных металлов различен). Условный предел текучести необходимо определить при такой минимальной величине пластической деформации, при которой имела бы место зависимость (9), а упрочнение заметно не сказывалось бы. Выполненными опытами было установлено, что за такую величину пластической деформации можно принять  $\delta_n = 0,1$  мм. Отсюда следует, что

$$C = \frac{C'}{10^m} \quad (10)$$

и

$$\sigma = C' \cdot \delta_n^m = C \cdot 10^m \cdot \delta_n^m. \quad (11)$$



Фиг. 3

Таким образом постоянную «С» можно называть условным пределом текучести. При таком напряжении практически начинается интенсивное внедрение индентора в испытываемый образец. Показатель степени «*m*» выражает интенсивность изменения напряжений при внедрении ин-

дентора, то-есть характеризует коэффициент упрочнения данного материала.

На фиг. 3 показаны кривые испытания некоторых материалов: меди (*Cu*), алюминия АО, олова (*SnO<sub>2</sub>*), свинца (*Pb*) и алюминиевого сплава АМц. Пунктирные линии обозначают первичные диаграммы, сплошные — зависимость (11) для тех же материалов в логарифмическом масштабе. На фиг. 3 видно, что например для меди и алюминия получены разные условные пределы текучести «*C*» и почти одинаковые показатели степени «*m*»:

$$\text{медь} — C = 40,5 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}; m = 0,37;$$

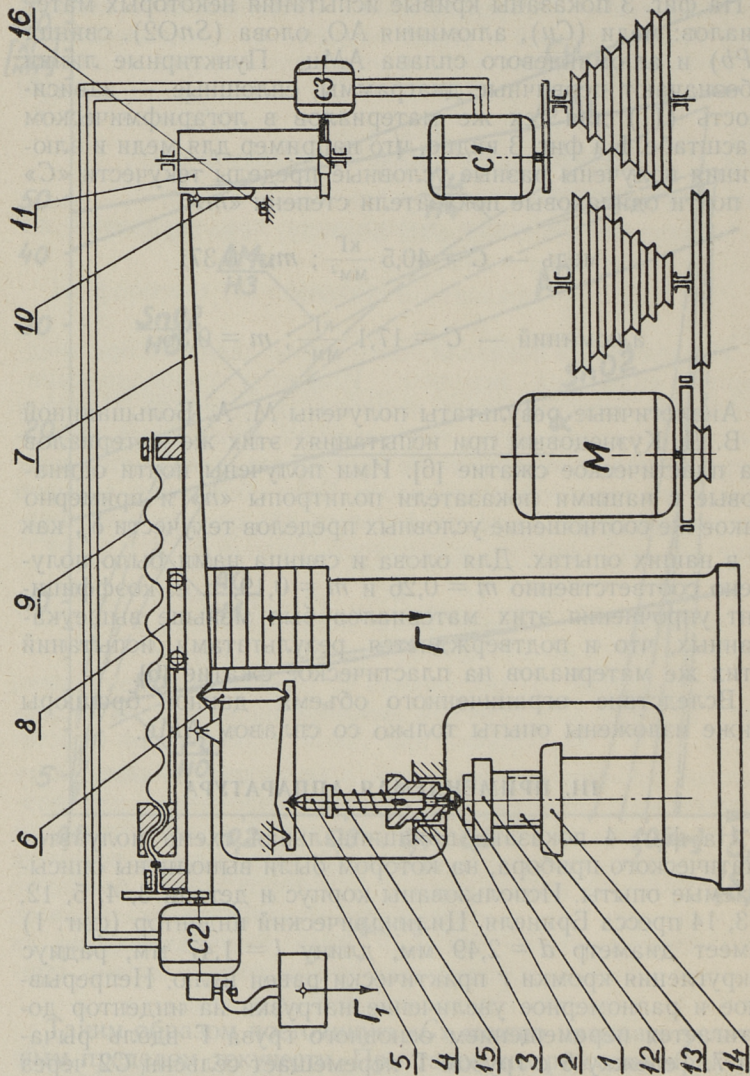
$$\text{алюминий} — C = 17,1 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}; m = 0,36.$$

Аналогичные результаты получены М. А. Большаниной и В. Д. Кузнецовым при испытаниях этих же материалов на пластическое сжатие [6]. Ими получены почти одинаковые с нашими показатели политропы «*n*» и примерно такое же соотношение условных пределов текучести  $\delta_0$ , как и в наших опытах. Для олова и свинца нами было получено соответственно  $m = 0,26$  и  $m = 0,19$ , т. е. коэффициент упрочнения этих материалов был меньше вышеуказанных, что и подтверждается результатами испытаний этих же материалов на пластическое сжатие [6].

Вследствие ограниченного объема данной брошюры ниже изложены опыты только со сплавом АМц.

### III. ПРИМЕНЯЕМАЯ АППАРАТУРА

На фиг. 4 показана принципиальная схема полуавтоматического прибора, на котором были выполнены описываемые опыты. Использованы корпус и детали 3, 4, 5, 12, 13, 14 пресса Бринеля. Цилиндрический индентор (фиг. 1) имеет диаметр  $d = 2,49$  мм, длину  $l = 1,47$  мм, радиус скругления кромки  $r$  практически равен нулю. Непрерывное и равномерное увеличение нагрузки на индентор достигается перемещением основного груза  $\Gamma$  вдоль рычага 7. Тележку 8 с грузом  $\Gamma$  перемещает сельсин С2 через зубчатую передачу и винт 9. Усилие передается с рычага 7 деталями 6, 5, 4 и 3 на индентор 2. Противовес  $\Gamma_1$  и пружина 15 выбраны так, что предварительная нагрузка

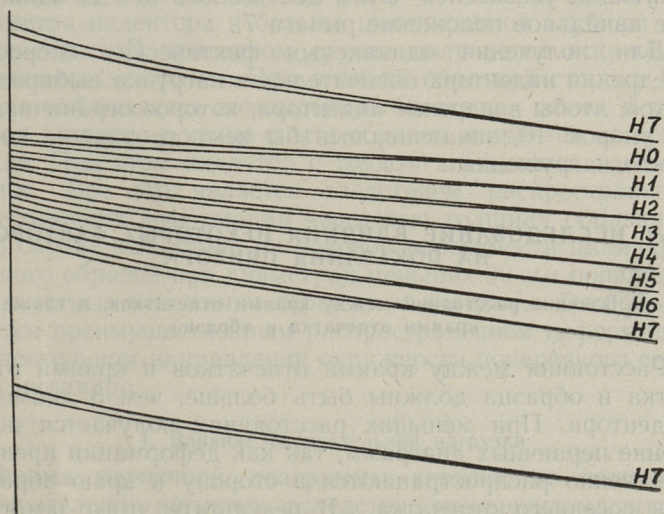


Фиг. 4

на индентор составляет 10 кг. В конце рычага 7 находится перо 10, которое чертит первичную диаграмму  $P-\delta$  на бумагу, закрепленную на барабане 11, вращающегося от сельсина С3. Сельсины С1, С2 и С3 работают в единой системе. Ведущим является сельсин С1, который приводится в действие асинхронным электродвигателем М. Передача от М до С1 позволяет получить 6 разной продолжительности циклов, т. е. скоростей нагружения индентора К6÷К1 (9,4; 13,1; 19,9; 30,1; 46,2 и 71,1 сек). Можно применять 8 различных окончательных нагрузок на индентор Н0÷Н7 (160; 256; 354; 446; 536; 641; 750 и 841 кг). Масштаб деформаций системы — 100:1.

#### IV. ТАРИРОВКА АППАРАТУРЫ

Для тарирования системы нагружения индентора были использованы упругие образцовые динамометры типа ДС. Динамометр был установлен вместо индентора, между деталями 3 и 12 (фиг. 4). Ступенчатым перемещением основного груза Г задавались нагрузки и одновременно фиксировались показания динамометра, на основании чего строились тарировочные кривые для всех окончательных нагрузок. Выявление гистерезиса системы (без дина-



Фиг. 5

мометра) было осуществлено также при всех окончательных нагрузках НО÷Н7. Величина гистерезиса определялась с помощью инструментального микроскопа по соответствующим первичным диаграммам (фиг. 5).

## V. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Образцы изготовлялись из прутка диаметром 44,5 мм. После отрезки образцы обрабатывались многократно с обоих торцов на токарном станке. Полученная чистота поверхности — 8. класс.

Перед испытанием образцы очищались бензином от остатков охлаждающей жидкости. Всего было испытано более 50 образцов из сплава АМц. На каждом из них производилось до 14 отпечатков на одной торцевой плоской поверхности (другая поверхность не использовалась).

После установки образца 1 (фиг. 4) на столик 12 поворотом маховика 14 винтом 13 образец вместе со столиком поднимался до соприкосновения индентора с поверхностью образца. При дальнейшем медленном повороте маховика 14 пружина 15 сжималась до соприкосновения торца детали 4 с дном отверстия детали 3 и далее поднимался правый конец рычага 7 до совпадения соответствующих указателей. Этим достигалось всегда одинаковое начальное положение рычага 7.

Для получения одинаковых фактических скоростей внедрения индентора окончательная нагрузка выбиралась такой, чтобы внедрение индентора, которое ограничивается упором 16, заканчивалось бы немного раньше конца цикла нагружения.

## VI. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАНИЯ ПРИБОРА

### 1. Влияние расстояний между краями отпечатков, а также краями отпечатка и образца

Расстояния между краями отпечатков и краями отпечатка и образца должны быть больше, чем 3 диаметра индентора. При меньших расстояниях получается искажение первичных диаграмм, так как деформации преимущественно распространяются в сторону к краю образца или соседнего отпечатка. В результате этого заметная пластическая деформация начинается при более низких



напряжениях и тем самым изменяется самый характер течения пластических деформаций. Влияние соседнего, рядом лежащего отпечатка сказывается также как сопротивление распространению деформации в результате действия его наклепанной зоны.

## 2. Влияние скорости нагружения

Испытаниями образцов из сплава АМц при циклах нагружения длительностью от 9,4 сек до 71,1 сек выявилось, что скорость нагружения индентора у этого сплава влияет относительно мало. С увеличением скорости нагружения индентора пластическая деформация уменьшается, т. е. для достижения одинаковой деформации необходима большая нагрузка. По нашему мнению это объясняется меньшим разупрочнением материала. Для получения сравнимых результатов была выбрана как основная скорость К4 с циклом нагружения 19,9 сек., при которой выполнялись все остальные опыты. Эта скорость являлась максимальной, при которой скорость нагружения не оказывала еще заметного влияния на характер первичных диаграмм.

## 3. Влияние толщины и диаметра образца

Толщина образца должна быть больше трехкратного диаметра индентора и больше шестикратной глубины его внедрения. В противном случае получается искажение первичных диаграмм. При этом на обратной стороне образца наблюдается возвышенное блестящее пятно, в пределах которого в конце опыта образец опирается на основание. При этом индентор с трудом вынимается из отпечатка. Все это является следствием распространения пластических деформаций через всю толщину образца.

В случае испытаний на боковой поверхности цилиндрического образца при диаметрах меньших 30 мм появляются заметные искажения первичных диаграмм. Это объясняется преимущественным распространением деформации в касательном направлении окружности поперечного сечения цилиндра.

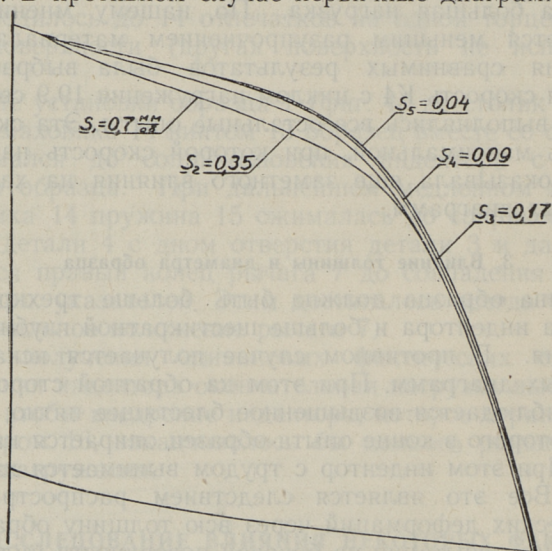
## 4. Влияние окончательной нагрузки

Форма первичной диаграммы зависит от величины окончательной нагрузки, вследствие изменения масштаба усилий первичных диаграмм. С увеличением величины

окончательной нагрузки максимально возможное внедрение индентора, которое ограничивается упором 16 (фиг. 4), достигается раньше и так как продолжительность цикла нагружения не изменяется, фактическая скорость внедрения индентора увеличивается. Этим, по нашему мнению, можно объяснить небольшую разницу расположения прямых в логарифмических координатах.

### 5. Влияние чистоты поверхности образцов

Чистота поверхности образца должна быть не ниже 4. класса. В противном случае первичные диаграммы иска-

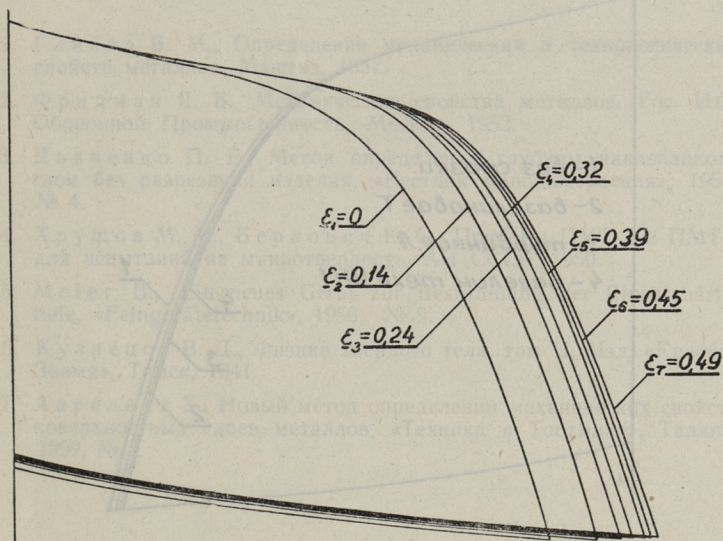


Фиг. 6

жаются. При наличии микронеровностей с увеличением нагрузки на индентор вначале происходит деформация гребней. При этом удельное давление оказывается вначале значительно большим; кроме того деформируемый металл может перемещаться в направлении впадин. Поэтому в начальной части кривых (фиг. 6) наблюдаются искажения, если чистота поверхности ниже 4. класса.

## 6. Влияние предварительной пластической деформации образцов

Для выявления влияния предварительной пластической деформации были изготовлены образцы с разными начальными высотами. Все образцы сжимались гидравлическим прессом до одинаковой высоты. Полученные таким образом степени деформации  $\varepsilon$  в процентах были:

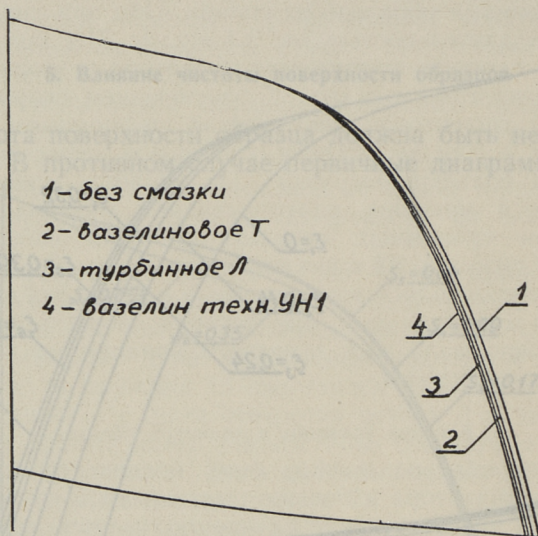


Фиг. 7

0; 14; 24; 32; 39; 45; 49. Первичные диаграммы испытаний показаны на фиг. 7. С увеличением степени деформации кривые перемещаются вправо. Это является результатом упрочнения материала и увеличения условного предела текучести при предварительной пластической деформации. Интересно отметить, что с увеличением степени предварительной пластической деформации интенсивность смещения первичных диаграмм уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением степени предварительной пластической деформации интенсивность упрочнения уменьшается.

## 7. Влияние смазки

В поставленных опытах было исследовано влияние смазок различной вязкости. На фиг. 8 показаны полученные первичные диаграммы. Выяснилось, что влияние смазки небольшое и им практически можно пренебречь. Это подтверждает высказанное нами предположение о том, что боковое трение при внедрении индентора небольшое.



Фиг. 8

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный в данной брошюре метод определения пластических свойств металлов цилиндрическим индентором позволяет двумя параметрами «С» и «*m*» охарактеризовать пластические свойства металлов. Испытание не трудоемкое и не требует изготовления специальных образцов. В работе исследовано влияние основных факторов при испытании образцов из сплава АМц и сделаны соответствующие выводы.

На основании выполненных предварительных испытаний с образцами из сталей можно предположить, что метод испытания с цилиндрическим индентором применим и для сталей.

## Литература

1. Глинер Б. М., Определение механических и технологических свойств металлов, Машгиз, 1957.
2. Фридман Я. Б., Механические свойства металлов, Гос. Изд. Оборонной Промышленности, Москва, 1952.
3. Дьяченко П. Е., Метод определения глубины наклепанного слоя без разрезания изделия, «Вестник машиностроения», 1951, № 4.
4. Хрущов М. М., Беркович Е. С., Приборы ПМТ-2 и ПМТ-3 для испытаний на микротвердость, АН СССР, 1950.
5. Meier В., Ein neues Gerät zur Bestimmung der Einsatzhärte-tiefe, «Feingerätetechnik», 1956, № 9.
6. Кузнецов В. Д., Физика твердого тела, том II, Изд. «Красное Знамя», Томск, 1941.
7. Аарелайд Х., Новый метод определения механических свойств поверхностных слоев металлов, «Техника я Тоотмине», Таллин, 1959, № 2.



Х. В. Аарелайд

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИЛИН-  
ДРИЧЕСКОГО ИНДЕНТОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИ-  
ЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ

\*

Таллинский Политехнический Институт



Редактор Н. Щеглов

Технический редактор А. Тамм

Корректор Г. Гроссшмидт

Сдано в набор 22 07 1960. Подписано к печати 11. 08. 1960. Печат-  
ных листов 1,25. По формату 60×92 печатных листов 1,03. Учетно-  
издательских листов 0,87. Тираж 400. МВ-05594. Заказ № 5125.

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

Цена 65 коп.



Цена 65 коп.

. 1961, 07.

~~1/2~~