

P 180790

И. В. КУДРЯВЦЕВ

# **МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

**МАШГИЗ  
1944**



И. В. КУДРЯВЦЕВ  
кандидат технич. наук

# МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ

НКТМ СССР  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
Москва 1944 Свердловск

Брошюра содержит основные сведения о методах производства испытаний механических качеств сталей и чугунов. В брошюре описаны наиболее распространенные виды механических испытаний: на растяжение, сжатие, твердость, ударную вязкость, а также испытания чугунов по методу Людвига (клиноватая проба).

Брошюра рассчитана на работников отделов технического контроля и заводских лабораторий, имеющих общее образование в объеме 7—9 классов средней школы и принимающих непосредственное участие в проведении испытаний и подсчетов.

## Глава I

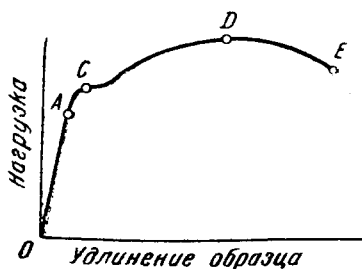
### ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Среди существующих способов определения показателей механических свойств металлов наибольшее распространение получил способ испытания на растяжение.

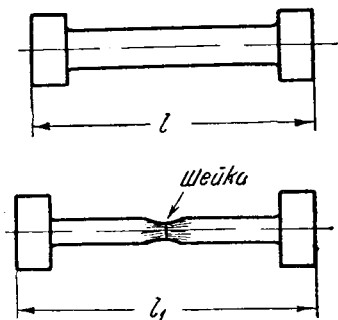
Для испытания на растяжение из испытуемого материала изготавливают цилиндрические или призматические образцы и на разрывных машинах растягивают их до разрыва. Обычно разрывные машины снабжены диаграммными приборами, на которых в процессе испытания автоматически вычерчиваются диаграммы растяжения, т. е. кривые зависимости между нагрузками и удлинениями.

#### ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ

Типичная кривая зависимости между нагрузками и удлинениями для мягкой стали показана на фиг. 1. В начале растяжения образца эта зависимость выражается прямой линией (участок  $OA$ ).



Фиг. 1. Диаграмма растяжения для мягкой стали.



Фиг. 2. Разрывной образец до и после испытания.

Это означает, что увеличение нагрузки вызывает пропорциональное увеличение удлинения. Если, к примеру, нагрузка увеличивается в 2 раза, то и удлинение также увеличивается в 2 раза; для увеличения удлинения в 3 раза требуется увеличение нагрузки тоже в 3 раза и т. д. Существование пропорциональной зависимости между нагрузкой и удлинением в начальной стадии растя-

жения металлов была впервые установлена ученым Гуком. Закон Гука гласит: «до некоторого предела изменение нагрузки на образец вызывает пропорциональное изменение длины образца». Предельная (наибольшая) нагрузка, до которой этот закон справедлив, носит название нагрузки предела пропорциональности.

Когда нагрузка становится выше предельной, кривая начинает отклоняться вправо, потому что с этого момента удлинение возрастает быстрее нагрузки.

Далее от точки *C* кривая становится параллельной горизонтальной оси. Это означает, что образец продолжает удлиняться (течь) при неизменной нагрузке (явление текучести). Нагрузка, при которой начинается течение материала, называется нагрузкой предела текучести. Горизонтальный участок кривой, соответствующий удлинению образца без увеличения нагрузки, носит название площадки текучести.

За этой площадкой нагрузка опять начинает увеличиваться с возрастанием удлинения, пока не достигнет максимальной величины, соответствующей точке *D* кривой. При этой максимальной нагрузке на образце начинает образовываться местное уменьшение сечения образца, так называемая шейка (фиг. 2). Быстрое уменьшение сечения образца в зоне шейки вызывает падение нагрузки до величины, соответствующей точке *E* кривой. При этой нагрузке образец разрывается.

Не следует смешивать между собой явления образования шейки и текучести металла. Эти явления совершенно различные и независимы одно от другого; во время текучести металла шейка на образце еще не появляется, а происходит равномерное удлинение образца по всей испытываемой длине его.

Следует подчеркнуть, что диаграмма растяжения, приведенная на фиг. 1, является, как указывалось выше, типичной для мягкой углеродистой стали. По мере увеличения твердости стали площадка текучести уменьшается и у кривых для высокоуглеродистых сталей может совершенно отсутствовать. Нет площадок текучести и на диаграммах растяжения серых чугунов и цветных сплавов.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛА, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА РАСТЯЖЕНИЕ

При испытании на растяжение можно получить следующие показатели, характеризующие качество металла: 1) сопротивление разрыву, 2) предел текучести, 3) предел пропорциональности, 4) относительное удлинение и 5) относительные сужение.

Сопротивление разрыву (или предел прочности при растяжении) определяется делением максимальной нагрузки  $P_b$ , которая понадобилась для разрыва образца, на площадь поперечного сечения образца  $F_0$ , измеренную до начала испытания. При этом нагрузку принято выражать в килограммах, а площадь поперечного сечения—в квадратных миллиметрах. Сопротивление разрыву принято условно обозначать через  $\sigma_b$  („сигма бе“).

Таким образом сопротивление разрыву

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \text{ кг/мм}^2. \quad (1)$$

Пример 1. Определить сопротивление разрыву стального образца диаметром  $D=6 \text{ мм}$ , для разрыва которого потребовалась максимальная нагрузка  $P=2370 \text{ кг}$ .

По формуле (1) имеем:

$$\sigma_b = \frac{P}{F_0} = \frac{2370}{\pi D^2} = \frac{2370}{28,3} = 83,7 \text{ кг/мм}^2.$$

Предел текучести определяется делением нагрузки предела текучести  $P_s$  (точка С, фиг 1) на площадь поперечного сечения образца  $F_0$ , измеренную до начала испытания. Предел текучести обозначают через  $\sigma_s$  („сигма с“).

Таким образом предел текучести

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ кг/мм}^2. \quad (2)$$

Пример 2. Нагрузка на образец, при которой началась текучесть, составляет 1160 кг. До испытания образец имел диаметр 6,03 мм (площадь сечения  $F_0 = 28,6 \text{ мм}^2$ ). Определить предел текучести.

Подставляя численные значения в формулу (2), получаем:

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} = \frac{1160}{28,6} = 40,6 \text{ кг/мм}^2.$$

Пределом пропорциональности называют наибольшее напряжение, до которого справедлив закон Гука, т. е. до которого деформация образца пропорциональна нагрузке. Для получения предела пропорциональности делят нагрузку пропорциональности  $P_p$  на площадь первоначального поперечного сечения образца  $F_0$ . Предел пропорциональности обозначают через  $\sigma_p$  („сигма пе“),

Таким образом предел пропорциональности

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \text{ кг/мм}^2. \quad (3)$$

Определить с достаточной точностью нагрузку, соответствующую пределу пропорциональности, по обыкновенной диаграмме растяжения затруднительно, так как прямая линия переходит в кривую постепенно. Поэтому для определения нагрузки пропорциональности пользуются диаграммой растяжения, записанной в очень большом масштабе (на прессе системы Гагарина или на машине системы ЦНИИТМАШ) и обработанной особым способом, или применяют точные приборы для замера удлинений (экстензометры).

Пример 3. Нагрузка предела пропорциональности путем обработки диаграммы растяжения, записанной на прессе Гагарина, определена в 1090 кг. Определить предел пропорциональности, если диаметр испытуемого образца был 5,97 мм ( $F_0 = 28,0 \text{ мм}^2$ ).

По формуле (3) находим:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} = \frac{1090}{28,0} = 38,9 \text{ кг/мм}^2.$$

Относительным удлинением называют выраженное в процентах отношение остающегося приращения длины образца к первоначальной расчетной длине. Относительное удлинение принято обозначать буквой  $\delta$  („дельта“).

Если обозначить первоначальную расчетную длину образца через  $l_0$ , а длину его после разрыва через  $l_1$ , то

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Пример 4. Первоначальная расчетная длина образца стали  $l_0 = 30 \text{ мм}$ , длина образца после разрыва  $l_1 = 40 \text{ мм}$ . Определить относительное удлинение образца.

По формуле (4) имеем:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{40 - 30}{30} \cdot 100 = 33,3\%.$$

Относительным сужением при разрыве называют выраженное в процентах отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва (в шейке) к первоначальной площади поперечного сечения. Относительное сужение обозначают буквой  $\phi$  („пси“).

Если обозначить первоначальную площадь сечения образца через  $F_0$ , площадь сечения образца в месте разрыва в шейке через  $F_1$ , то

$$\phi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

Пример 5. Первоначальный диаметр стального образца  $d_0 = 6,04 \text{ мм}$  ( $F_0 = 28,7 \text{ мм}^2$ ), диаметр образца в шейке (после разрыва)  $d_1 = 4,03 \text{ мм}$  ( $F_1 = 12,8 \text{ мм}^2$ ). Определить относительное сужение.

По формуле (5) находим:

$$\phi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100 = \frac{28,7 - 12,8}{28,7} \cdot 100 = 55,4\%.$$

## МАШИНЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

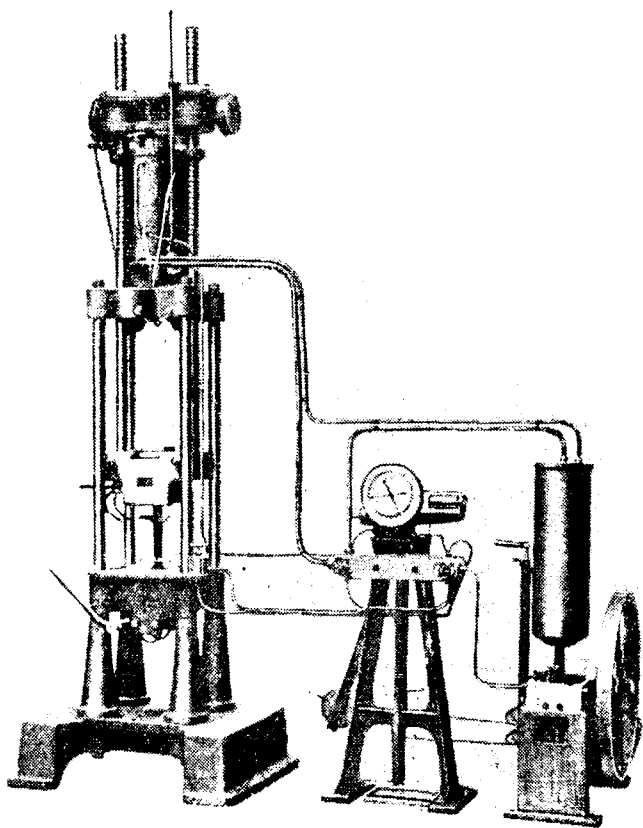
Испытания на растяжение производятся на машинах разнообразных конструкций. Различают испытательные машины двух основных типов: с гидравлической передачей, в которых детали, растягивающие образец, получают движение от гидравлического (обычно масляного) насоса, и с механическим приводом, в которых растяжение образца осуществляется при помощи рычажных и винтовых передач.

Испытательная машина любой системы имеет механизм, создающий растяжение образца, и механизм для измерения усилия растяжения.

Ниже приводится описание конструкции трех машин для испытания на растяжение: машины Амслера с гидравлическим приводом, пресса системы Гагарина и машины конструкции ЦНИИТМАШ<sup>1</sup>.

### Гидравлическая машина Амслера

Одной из самых распространенных машин с гидравлической передачей является машина Амслера с максимальным разрывным усилием в 50 т.



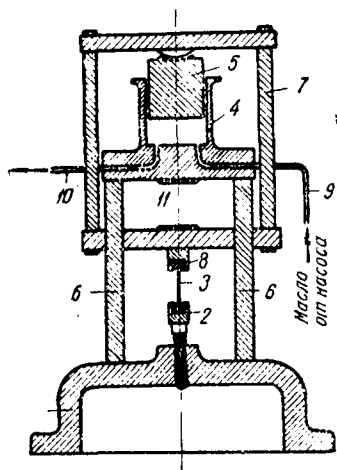
Фиг. 3. Общий вид 50-тонной машины Амслера.

На фиг. 3 изображен общий вид, а на фиг. 4 — схема действия этой машины. Машина имеет три основные части (фиг. 3): масляный насос 1, приводимый в действие электромотором; собственно машину 2 с растягивающим устройством и маятниковый динамо-

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский институт технологии и машиностроения (Москва).

метр (силоизмеритель) 3. Все эти части соединены одна с другой только трубопроводами.

В станине 1 (фиг. 4) машины Амслера помещается захват 2, в котором закрепляется нижний конец растягиваемого образца 3. В верхней части машины расположен гидравлический масляный цилиндр 4; в цилиндре может перемещаться по вертикали поршень 5.



Фиг. 4. Схема действия 50-тонной машины Амслера.

Цилиндр жестко связан со станиной при помощи стоек 6. На поршень опирается коромысло 7, к нему присоединен второй захват 8, в котором закрепляется верхний конец образца.

От масляного насоса через трубку 9 под поршень нагнетается масло. Поршень 5 поднимается вверх и поднимает коромысло 7, сообщаящее растяжение испытываемому образцу. Из нижней части цилиндра 4 выходит вторая трубка 10 для спуска масла в масляный резервуар насоса.

Нагрузки измеряются при помощи маятникового динамометра. Как и насос, динамометр монтируется отдельно от машины и связан с рабочим цилиндром 4 масляной трубкой (на

фиг. 4 не показана). Отклонение маятника вызывается давлением масла на поршенок цилиндра в маятниковом динамометре.

Маятниковый динамометр в машинах Амслера имеет обычно сменные шкалы на 5, 10, 25 и 50 т. В зависимости от ожидаемых максимальных нагрузок при испытаниях выбирают наиболее подходящую шкалу. Для каждой шкалы устанавливают определенное плечо маятника и навешивают на него определенные грузы. Вентили для управления машиной помещаются на динамометре.

Диаграмма растяжения записывается самопишущим прибором, помещенным рядом со шкалой динамометра. Диаграммная запись имеет очень малый масштаб и не может быть поэтому использована для определений пределов пропорциональности.

На машине Амслера можно производить не только испытания на растяжение; ею можно пользоваться также для испытаний на сжатие, изгиб, срез и пр., поэтому подобные машины и носят названия универсальных испытательных машин.

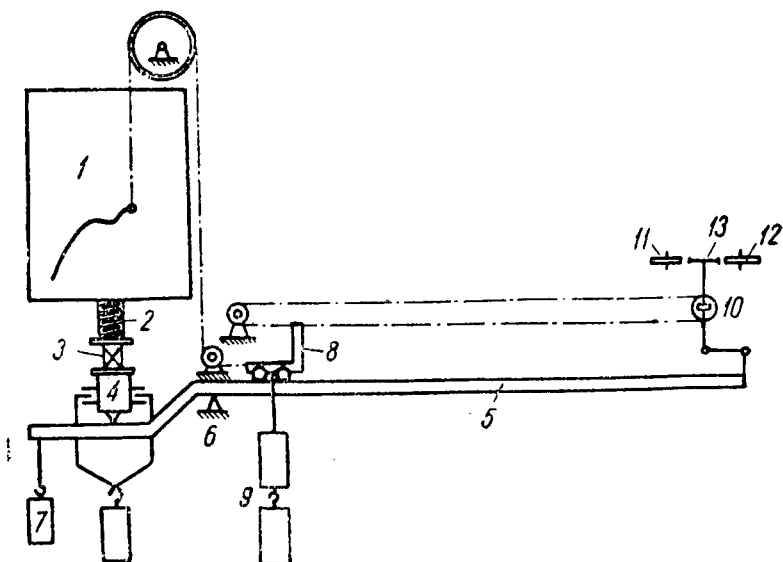
Из рассмотрения схемы устройства машины Амслера легко понять, как осуществляются на ней сжимающие усилия. Для этого образец помещается на подвижной траверсе, в месте, отмеченном на фиг. 4 цифрой 11.

### Пресс Гагарина

Во многих технических условиях на стальные детали боеприпасов и предметов вооружения предусмотрено применение для испытаний на растяжение так называемого пресса Гагарина. Предло-

женный русским инженером Гагариным в 1896 г., этот пресс изготовлялся только в СССР. Максимальное развиваемое прессом усилие 5000 кг.

Главное достоинство прессы Гагарина заключается в конструкции самопишущего прибора, дающей возможность вычерчивать диаграммы растяжения в очень большом масштабе. Схематически устройство прессы Гагарина показано на фиг. 5, общий вид его



Фиг. 5. Схема устройства прессы Гагарина.

приведен ниже на фиг. 10. В отличие от машин других систем в этом прессе сила, действующая на образец, передается через литой чугунный диаграммный цилиндр 1 больших размеров. Цилиндр приводится в медленное вращение от электромотора (не показанного на схеме). Цилиндр закреплен на вертикальной оси так, что может только вращаться, но не передвигаться вверх или вниз. Винт 2, который входит внутрь цилиндра, наоборот, может только перемещаться вверх или вниз, но не вращаться. При медленном вращении цилиндра по часовой стрелке винт 2 опускается и давит на испытываемый образец 3, поставленный на опорную площадку 4. Груз 13 служит для того, чтобы постоянно поддерживать опорную площадку 4 в горизонтальном положении независимо от положения рычага 5, на который эта площадка опирается при помощи призмы.

Рычаг 5 служит для измерения усилия, действующего на испытываемый образец. Он опирается на призму 6 и уравнивается противовесом 7. На короткое плечо рычага 5 передается сила, с которой винт 2 давит на образец. Вдоль длинного плеча рычага может перемещаться уравнивающий рычаг каретка 8 с подвешенными к ней двумя плоскими гирями 9. Если пресс применяют для работы с небольшой нагрузкой, то нижнюю гирю снимают.

Перемещение одной верхней гири до конца рычага уравновешивает давление на короткое плечо в 1000 кг, а обе гири уравновешивают давление до 5000 кг. На длинном плече рычага 5 помещена шкала нагрузок от 0 до 1000 кг (для работы с одним только грузом) и от 0 до 5000 кг (для работы с обоими грузами) <sup>1</sup>.

Если образец не нагружен, рычаг 6 при установке тележки на нуль по шкале рычага должен находиться в горизонтальном положении. Чтобы при замене двойного груза 9 одинарным сохранить горизонтальное положение рычага, передвигают при помощи ручколки подвеску груза 7.

По мере увеличения нагрузки на образец для сохранения равновесия рычага необходимо передвигать каретку с грузами вправо. Это передвижение каретки осуществляется автоматически без участия работающего на прессе. Для передвижения каретки служит электромагнитный механизм 10—13. Шестеренки 11 и 12 этого механизма приводятся во вращение в противоположных направлениях от того же мотора, который вращает винт 2.

Через маховичок 10 перекинута бесконечная цепь, которая при вращении его передвигает каретку 8. Электромагнит 12 притягивает к себе поочередно шестеренки 11 или 12. В каждый данный момент работает только одна из шестеренок, причем шестеренка 11 заставляет вращаться маховичок 10 в одну сторону, а шестеренка 12 — в противоположную.

При увеличении нагрузки на образец длинный конец рычага 5 приподнимается и при помощи электрического контакта притягивает к электромагниту 13 шестеренку 11. В этом случае маховичок 10 вращается по часовой стрелке, груз 8 передвигается по рычагу 5 вправо до тех пор, пока не перевесит нагрузку на образец. В тот же момент длинное плечо рычага отклоняется вниз. Электрический контакт освобождает шестеренку 11 и включает шестеренку 12. Благодаря этому меняется направление вращения маховичка 9 и груз 8 передвигается несколько назад (влево).

Таким образом каретка с грузом все время передвигается то в одну, то в другую сторону, и рычаг 5 испытывает ряд незначительных колебаний около своего горизонтального положения.

Электромагнит питается током в 4—6 вольт от аккумулятора или от осветительной сети через соответствующий понижающий трансформатор и выпрямитель.

Кривая растяжения записывается на диаграммном приборе прессы Гагарина следующим образом. На диаграммный барабан плотно надевается и прижимается к нему зажимом миллиметровая бумага. Перо прибора укреплено в стойке, расположенной вдоль барабана, и может передвигаться по этой стойке в вертикальном направлении. Тонкая нить, перекинутая через блоки, соединяет перо с кареткой; по мере увеличения нагрузки и продвижения каретки по рычагу 5 вправо перо поднимается. Таким образом на диаграмме по вертикальной оси отмечаются в определенном масштабе величины нагрузок. По горизонтальной оси перо отмечает угол поворота

<sup>1</sup> На некоторых прессах вместо шкалы от 0 до 1000 кг ошибочно нанесена шкала от 0 до 500 кг. В этом случае показания шкалы следует удваивать.

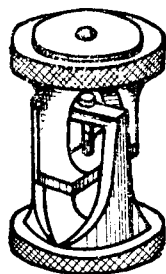
барабана, что соответствует величине опускания винта 2, которое равно деформации образца. Таким образом по горизонтальной оси отмечаются также в определенном масштабе величины деформации испытуемого образца. Диаграммная кривая записывается чернилами. Толщина линии должна быть по возможности малой; во всяком случае, она не должна превышать 0,5 мм.

Масштаб диаграммной записи на прессе Гагарина, как сказано, очень велик. Для деформаций он составляет 100 : 1, т. е. увеличение в 100 раз; для нагрузок: в 1 см диаграммы 20 кг (для шкалы на 1000 кг) или 100 кг (для большой шкалы).

Размеры листа бумаги, которая крепится к барабану, должны соответствовать размерам барабана (высота 550 мм и длина окружности 900 мм).

Как видно из схемы, пресс Гагарина в основном предназначен для испытаний на сжатие, но применение так называемого реверсора дает возможность производить на этом прессе также испытания на растяжение.

Устройство реверсора показано на фиг. 6. Он состоит из двух рамок, в которых закреплен образец. Сжимание рамок вызывает растяжение образца.



Фиг. 6. Реверсор к прессу Гагарина.

На прессе Гагарина можно испытывать образцы небольших размеров. Это очень удобно, когда испытуемый образец нужно выточить из небольшой детали.

### Машина ЦНИИТМАШ с большой диаграммной записью типа ИМ-4А

В последнее время ЦНИИТМАШ предложил новую простую конструкцию универсальной машины с разрывным усилием в 4000 кг. Машина, как и пресс Гагарина, предназначена для испытаний на растяжение малых образцов. На ней можно также производить испытания на сжатие, изгиб, срез и пр.

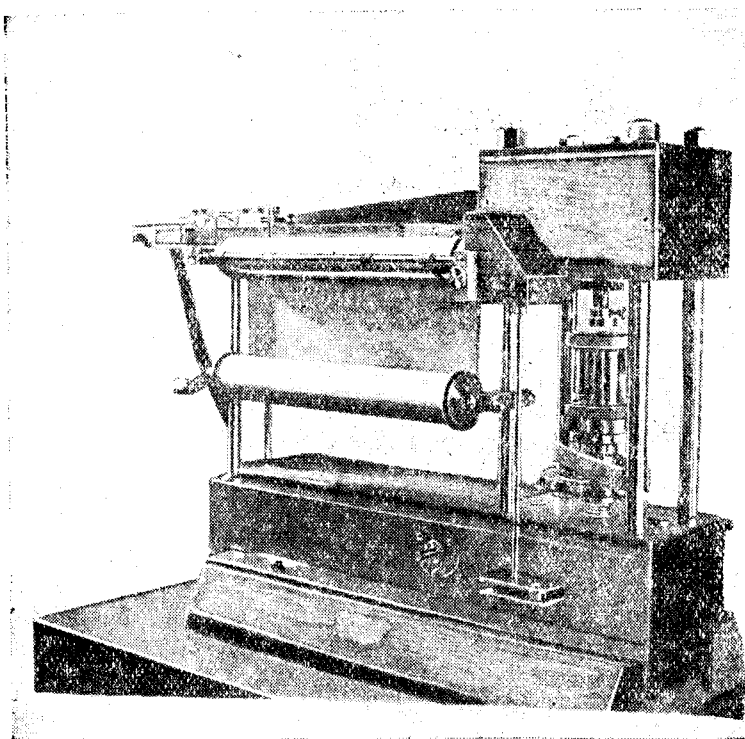
Испытания на растяжение осуществляются на этой машине при помощи особого реверсора. Может быть использован реверсор такого же устройства, как и у пресса Гагарина (фиг. 6).

На фиг. 7 показан общий вид, а на фиг. 8 и 9 — схема устройства машины ЦНИИТМАШ. Машина приводится в действие от электромотора мощностью в 0,25 кв. Движение рабочему шпинделю сообщается через червячную передачу и пару цилиндрических шестерен. Измерение усилий, прилагаемых к образцу, — рычажное. Нагрузки отсчитываются по диаграммной записи или непосредственно по прямой шкале — линейке, которую можно настроить по желанию на 4 или на 2 т.

Диаграммный барабан приводится во вращение от приводного мотора через ту же червячную передачу и систему цилиндрических и конических шестерен. Масштаб диаграммной записи на машине ЦНИИТМАШ, как и на прессе Гагарина, очень велик, что дает возможность определять по диаграмме растяжения предел

пропорциональности. Масштаб диаграммы: по оси нагрузок (вдоль образующей барабана) 10 или 5 кг в 1 мм; по оси удлинений — 0,01 мм в 1 мм (т. е. удлинение записывается с увеличением в 100 раз).

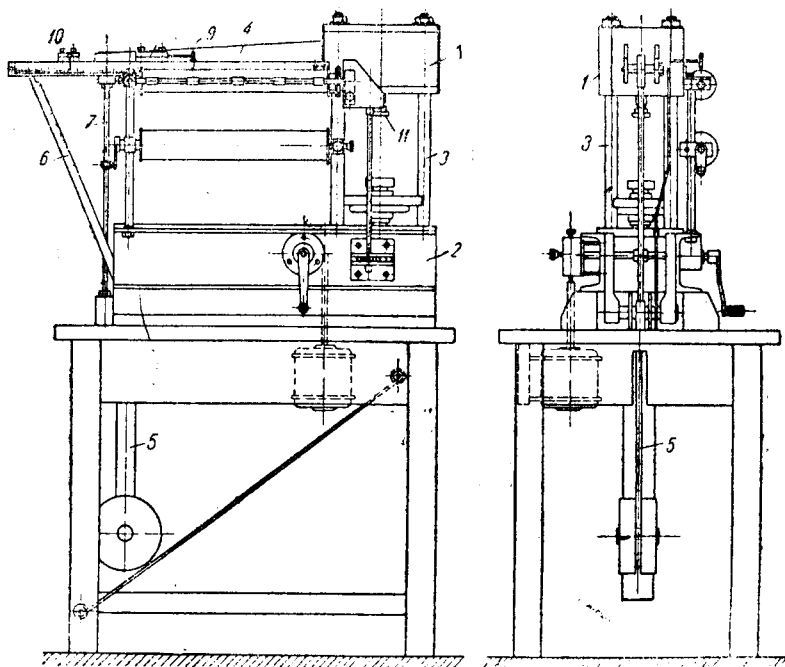
По характеру действия сил машина ЦНИИТМАШ относится к типу испытательных машин — прессов. Она имеет следующие основные узлы: станину, нагружающий механизм, динамометрический (силоизмерительный) механизм, диаграммный аппарат и стол.



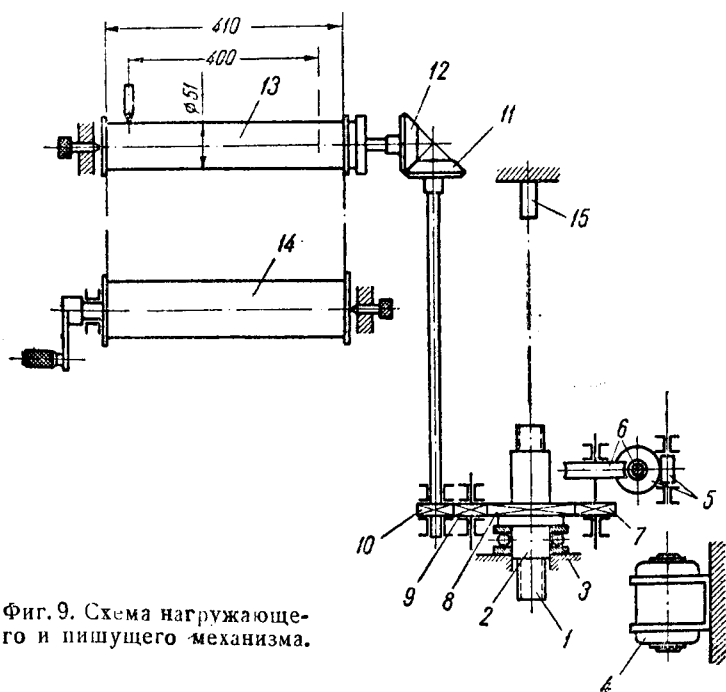
Фиг. 7. Общий вид машины ЦНИИТМАШ, тип ИМ-4А.

Станина машины (фиг. 8) состоит из двух основных частей: верхней коробки 1, в которой помещаются шариковые опоры главного рычага силоизмерительного механизма, и основания 2, соединенного с коробкой 1 при помощи четырех точеных стоек 3.

Нагружающий механизм, расположенный в нижней части станины, схематически представлен на фиг. 9. Винтовой шпиндель 1 перемещается по вертикали при вращении гайки 2 в упорном шарикоподшипнике 3. Шпиндель, как уже упоминалось выше, получает движение от электромотора 4, который вращает гайку 2 через червячные пары 5 и 6. Червяки у обеих пар однозаходные, червячные колеса пары 5 имеют  $z_1 = 40$  зубьев, пары 6 —  $z_2 = 50$  зубьев. От червячной пары 6 вращение получает цилиндрическая шестерня 7 ( $z_3 = 20$ ), сцепленная с шестерней 8 ( $z_4 = 50$ ).



Фиг. 8. Схема устройства машины ЦНИИТМАШ.



Фиг. 9. Схема нагружающего и пишущего механизма.

которая соединена с гайкой 2. Мощность электромотора 0,25 кв, число оборотов вала электромотора 1440 в минуту. Скорость вертикального перемещения шпинделя 1,25 мм/мин.

Си ло из мер и тель ный ме х а н и з м (см. фиг. 8) имеет следующие основные детали: верхний горизонтальный рычаг 4, на короткий конец которого передается давление шпинделя 11 силоизмерительного механизма (отношение плеч рычага 1:40); маятник 5 с точкой подвеса в левом нижнем углу станины и толкатель 6, жестко укрепленный на оси маятника. Рычаг 4 и маятник 5 связаны между собой вертикальной штангой 7.

Толкатель 6 служит для передвижения каретки 8 с пером 9 и указателем 10 на горизонтальной направляющей, расположенной за шкалой, параллельно последней. Угловое перемещение маятника, получаемое под действием силы, нагружающей образец, преобразуется в прямолинейное перемещение каретки с пером. Это перемещение каретки прямо пропорционально нагрузке на образец.

За пи с ы в а ю щ и й ди а г р а м м н ы й а п п а р а т (см. фиг. 9) по конструкции принципиально отличается от обычных барабанных самописцев испытательных машин (пресса Гагарина и др.). Отличие заключается в том, что диаграммная бумага не укрепляется на барабане 13, а только проходит по нему в процессе записи кривой, сматываясь с катушки.

Таким образом барабан является как бы столиком, на котором производится запись. Этот принцип использован в испытательных машинах впервые; преимущество его заключается в том, что для получения записи в большом масштабе можно пользоваться барабаном малого диаметра (в нашем случае диаметр барабана равен 51 мм).

Благодаря малому диаметру диаграммного барабана упрощается конструкция машины и уменьшаются ее габаритные размеры.

Вращение диаграммному барабану 13 передается от цилиндрической шестерни 8, нагружающего механизма через две цилиндрические шестерни 9 ( $z_5 = 20$ ) и 10 ( $z_6 = 20$ ) и две конические шестерни 11 ( $z_7 = 30$ ) и 12 ( $z_8 = 30$ ). Жесткая передача шестернями обеспечивает полную синхронность вращения барабана с движением шпинделя нагружающего механизма.

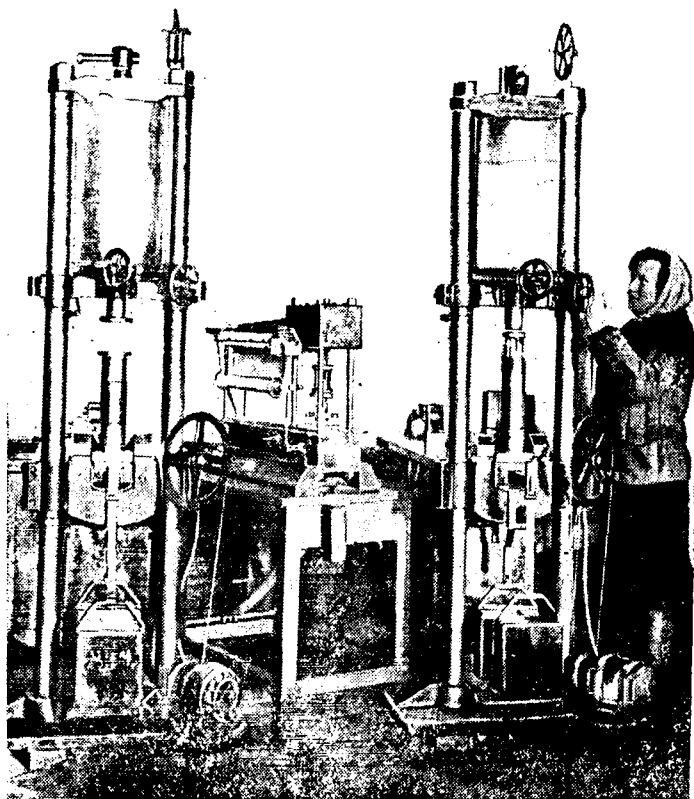
Рулон диаграммной бумаги (длиной до 20 м) наматывается на катушку 14, расположенную ниже диаграммного барабана. Бумага прижимается к барабану при помощи валика с резиновыми роликами (см. фиг. 7). По мере вращения барабана бумага проходит по нему, сматываясь с катушки 14. Пишущее перо укреплено на каретке, которая перемещается вдоль силоизмерительной шкалы по мере изменения нагрузки на образец и соответствующего отклонения маятника, вызываемого изменением давления на шпиндель 15 силоизмерительного механизма.

Диаграмма записывается чернилами. Качество записываемых на машине диаграммных кривых значительно выше, чем на прессе Гагарина, на котором неизбежно получение более или менее значительных зигзагов.

Машина ИМ-4А выгодно отличается от прессы Гагарина также отсутствием нитей, соединяющих подвижную каретку с записыва-

ющим пером. Вытяжка в прессах Гагарина нитей, длина которых составляет 3 м, может, разумеется, исказить диаграммную запись.

Вредные деформации станины машины, а также захватов реверсора и головок образцов не позволяют (как и на прессе Гагарина) с нужной точностью определять по диаграммной записи малые деформации испытуемого образца в пределах упругих деформаций.



Фиг. 10. Общий вид прессов Гагарина и машины ЦНИИГМАШ.

Таким образом определение модуля упругости испытуемого материала по диаграммной записи является в этом случае затруднительным. Однако пределы пропорциональности, а также условные или физические пределы текучести по диаграммной записи на машине ИМ-4А можно определять вполне надежно и с той же точностью, что по кривым, получаемым на прессах Гагарина.

Деревянный стол, к которому крепится машина ИМ-4А, представляет собой обыкновенный лабораторный стол с вырезом в верхней доске для маятника. Непосредственно к столу крепится электромотор и переключатель (для включения прямого и обратного хода).

В нижней части стола (под маятником) укрепляется тормоз в виде плоского ремня. Работа мотора не вызывает вибраций машины и стола, поэтому крепить стол к полу не приходится.

Особое преимущество машины ЦНИИТМАШ заключается в простоте ее изготовления. В этом отношении машина ИМ-4А значительно превосходит пресс Гагарина. Вес машины (около 140 кг) примерно в 5 раз меньше веса прессы Гагарина. Машина не имеет громоздких и сложных деталей. Конструкция машин ИМ-4А рассчитана на возможность быстрого изготовления их в штучном или серийном порядке на несложном оборудовании.

Простота изготовления не лишает, однако, машину ЦНИИТМАШ необходимой надежности в работе и не понижает точности замеров на ней.

Габаритные размеры машины:  $710 \times 560 \times 220$  мм. Конструкция машины разработана ст. инж. Чулошниковым М. И.

На фиг. 10 для сопоставления размеров представлена машина ЦНИИТМАШ и два прессы Гагарина.

### **Общие требования, предъявляемые к испытательным машинам**

Любая испытательная машина, на которой производится определение усилий, должна обладать достаточной точностью и чувствительностью. По нормам, действующим в СССР, как и в большинстве других стран, при нагружении образцов на испытательных машинах наибольшая допускаемая погрешность составляет  $\pm 1\%$  от величины измеряемого усилия. Если эта погрешность доходит до  $\pm 2\%$ , то следует вводить соответствующие поправки в получаемые результаты. Если же погрешность превышает  $2\%$ , то машину необходимо наладить и отрегулировать, без чего производить на ней испытания нельзя.

Правильность показаний машины проверяют инспекторы Комитета по делам мер и измерительных приборов при СНК СССР или организации, имеющие полномочия от Комитета. Показания машины должны проверяться не реже одного раза в год, а при перестановках, ремонтах, разборке и пр. каждый раз после этих операций.

Большую роль, особенно при испытаниях хрупких материалов, играет соосность захватов машины. Даже небольшая эксцентricность может вызвать дополнительные изгибающие напряжения в испытуемом образце и исказить, таким образом, результаты испытаний.

Конструкция испытательной машины должна обеспечивать возможность плавного увеличения нагрузок.

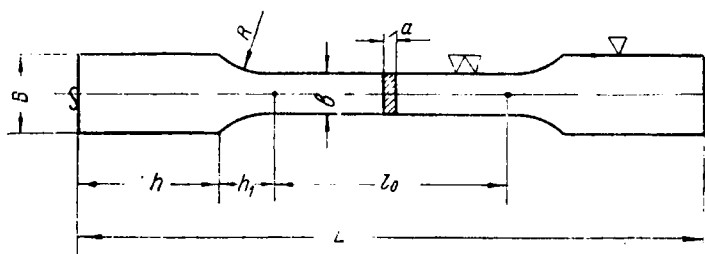
Для выполнения испытаний следует выбирать силоизмерительную шкалу машины с таким расчетом, чтобы максимальная измеряемая нагрузка составляла от 10 до 100% максимального обозначенного на шкале усилия.

Рабочая скорость перемещения захватов испытательной машины должна быть подобрана таким образом, чтобы у испытуемых образцов из черных металлов создавалось напряжение не больше  $1 \text{ кг/мм}^2$  в секунду, а у образцов из цветных металлов и сплавов — не больше  $0,5 \text{ кг/мм}^2$  в секунду.

# ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

## Формы и размеры образцов

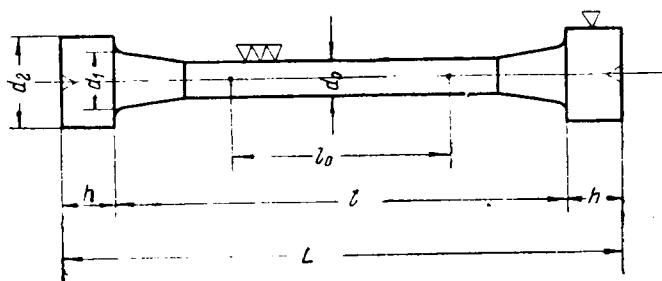
Для испытаний на растяжение обычно применяют образцы круглого или прямоугольного сечения. Испытуемые образцы имеют по концам утолщения — головки, которые закрепляются в захватах машины (фиг. 11 и 12). Та часть образца, на которой определяется относительное удлинение, должна иметь одинаковую площадь по-



Фиг. 11. Форма плоского разрывного образца.

перечного сечения на всей длине. Расстояние  $l_0$  (фиг. 11) между двумя крайними точками, по увеличению которого определяют удлинение образца, носит название расчетной длины.

Обычно применяют цилиндрические образцы, у которых расчетная длина равна удвоенному диаметру (десятикратные, или



Фиг. 12. Форма цилиндрического разрывного образца.

длинные), и образцы с расчетной длиной, равной пяти диаметрам (короткие, или пятикратные образцы). Цилиндрический образец с диаметром, равным 20 мм, называется нормальным. Образцы с другими размерами сечения называются пропорциональными. Согласно общесоюзному стандарту (ОСТ 1497-42), введенному в действие с 1942 г., образцы, применяемые для испытаний на растяжение, должны удовлетворять требованиям табл. 1 и 2, в которых  $l_0$ ,  $d_0$  и  $F_0$  — соответственно расчетная длина, диаметр и площадь поперечного сечения образца.

Разрешается применять образцы, имеющие и другое соотношение между расчетной длиной и диаметром (например для стальных отливок 2,5-кратные образцы). В таких случаях при определе-

Таблица 1

Образцы		$l_0$ в мм	$d_0$ в мм	$F_0$ в мм <sup>2</sup>	Символы для обозначения кратности образца
$\frac{\text{Длинный}}{\text{Короткий}}$	Нормальный	$\frac{200}{100}$	20	314	$\frac{\delta_{10}}{\delta_5}$
$\frac{\text{Длинный}}{\text{Короткий}}$	Пропорциональный —	$\frac{11,3\sqrt{F_0}}{5,65\sqrt{F_0}}$	Произвольный	Произвольный	$\frac{\delta_{10}}{\delta_5}$

Таблица 2

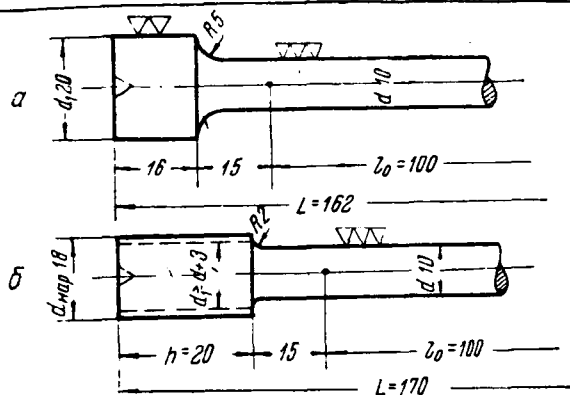
$d_0$ мм	Допускаемые отклонения от размеров рабочей части образцов в мм		Допускаемая разность между наибольшим и наименьшим диаметрами на длине рабочей части образца в мм
	по $d_0$	по $l_0$	
До 10	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,02$
10 и выше	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,05$

нии относительного удлинения в протоколе испытаний обязательно следует указывать кратность образца (соответствующим индексом  $\gamma$   $\delta$ ).

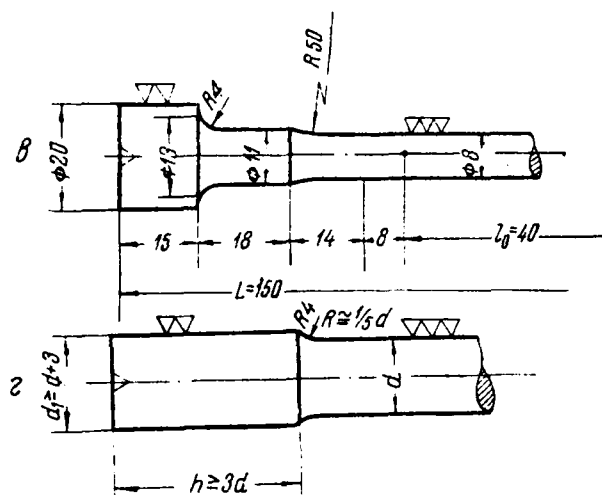
Допуски на размеры, указанные в табл. 2, относятся к обработанным цилиндрическим образцам. У плоских образцов (фиг. 11) отклонения от номинального размера по ширине допускаются в  $\pm 0,5$  мм. Колебания в ширине по всей длине рабочей части плоского образца допускаются в  $\pm 0,1$  мм.

Смещение оси головки образца относительно оси рабочей части образца не допускается. Размеры и формы головок разрывных образцов зависят от конструкции захватов машины. Необходимо следить за неизменным выполнением общего требования к образцам — о плавности перехода от их головок к рабочим частям.

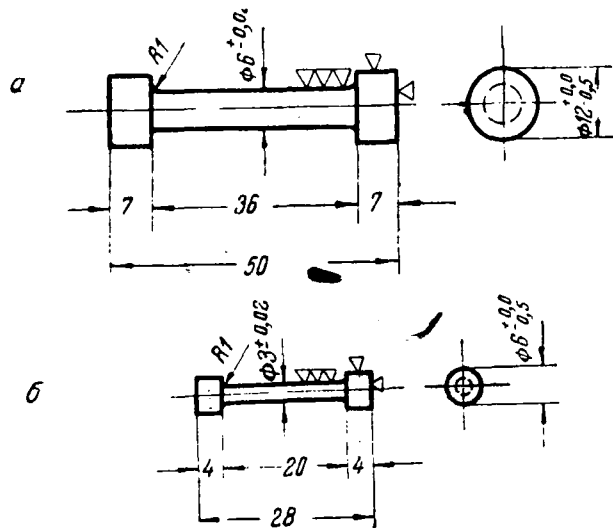
На фиг. 13 изображены формы и рекомендуемые размеры разрывных образцов с головками нескольких типов: *а* — цилиндрический 10-мм образец для материалов, обладающих достаточной пластичностью; *б* — цилиндрический 10-мм образец с резьбой; его можно применять при испытании всех материалов, когда требуется особо тщательное центрирование; *в* — образец с головками для кольцевых захватов, который рекомендуется применять при испытании закаленных сталей с малой пластичностью; *г* — цилиндрические образцы с головками для крепления клиновыми захватами, применяемые при испытании мягких и пластичных материалов (без экстензометров).



Фиг. 13. Головки  
разрывных образ-  
цов.



Фиг. 14. Образцы  
для прессы Гагари-  
на и машины  
ЦНИИТМАШ.



На фиг. 14 изображены малые образцы двух типов для испытаний на прессе Гагарина или на машине ЦНИИТМАШ. Эти образцы в настоящее время имеют очень большое распространение при выполнении приемочных испытаний материалов боеприпасов и предметов вооружения.

### **Обработка поверхности и клеймение образцов**

При изготовлении образцов для испытаний на растяжение рекомендуется соблюдать следующие правила.

Поверхности цилиндрических образцов из материалов с твердостью до 350 по Бринеллю можно зачищать мелкой шкуркой на токарном станке (после чистовой обработки резцом).

Поверхности цилиндрических образцов с большей твердостью надо шлифовать на шлифовальном станке.

Не допускается наличие на рабочей части образца рисок, забоин, подрезов, искривлений и других дефектов.

Центровые отверстия образцов после обработки на станке надо срезать совсем или оставлять глубиной не более чем в  $\frac{1}{3}$  высоты головки. Выполнение этого требования особенно существенно при изготовлении малых образцов, у которых глубокие центра ослабляют сечение рабочей части образца, что нередко приводит к отрыву головок.

Плоский образец должен быть симметричен относительно продольной оси. На обработанных поверхностях плоских образцов не должно быть грубых рисок от резца. Заусенцы по углам плоских образцов должны быть сняты и углы несколько затуплены (напильником).

Допуски на общую длину  $L$  и длину  $l$  рабочей части не устанавливаются.

Образцы клеймятся стальными циферниками или электрографом на торцевых или боковых поверхностях головок (ни в коем случае не на рабочих частях).

Необходимо подчеркнуть особую важность внимательного отношения к нумерации образцов. Путаница в номерах образцов, в особенности при испытании больших партий, может приводить к большим осложнениям и браку при лабораторной работе. Следует твердо придерживаться правила, что образец нельзя испытывать до тех пор, пока на нем не поставлены нужные клейма. Клеймение рекомендуется делать на обеих головках образца, чтобы после разрыва можно было надежно устанавливать, к которому образцу относятся половинки.

### **Подготовка образцов к испытанию**

Перед испытанием образцы надо тщательно осматривать. Если при этом обнаруживаются дефекты, могущие повлиять на результаты испытаний, то образцы бракуют или в соответствующей графе протокола испытаний делают примечание о наличии дефекта.

Диаметры обработанных цилиндрических образцов измеряются с точностью до 0,02 мм. Диаметры необработанных образцов за-

меряются с точностью до 0,1 мм. Поперечные размеры сечения рабочей части плоских образцов измеряются с точностью до 0,05 мм, если эти размеры выше 5 мм, и с точностью до 0,02 мм, если они ниже 5 мм.

Диаметры цилиндрических образцов, толщина и ширина плоских образцов измеряются по концам и в середине расчетной длины образцов; при этом фиксируется наименьший из трех размеров. По данным замера вычисляют первоначальную площадь поперечного сечения образца  $F_0$  с точностью до 0,1 мм<sup>2</sup>.

Для измерения удлинения на рабочую часть образца наносится расчетная длина  $l_0$  симметрично по отношению к середине образца (по его длине). Расчетную длину можно нанести на образец двумя способами: 1) на специальной делительной машине рабочая часть образца делится неглубокими рисками на участки в 5 или 10 мм, суммирование которых и дает требуемую расчетную длину; 2) на рабочей части образца двумя неглубокими кернами обозначаются границы расчетной длины образца. Любым из указанных способов расчетная длина должна быть нанесена на образец с точностью до 0,5%.

При разметке плоских образцов на делительной машине риски должны отстоять от краев образца на  $1/4$  его ширины  $b$ .

## ТЕХНИКА ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

### Процесс испытания

Сделав необходимые обмеры образцов и записав их в протокол испытаний, готовят разрывную машину. В зависимости от размеров и формы образца выбирают и вставляют в захваты машины требуемые плашки. Захваты ставят на нужное расстояние один от другого и регулируют машину так, чтобы указатель нагрузки стоял на нуле.

Если необходимо получить диаграмму растяжения, то на барабан надевают бумагу (лучше миллиметровую) и проверяют правильность нажима карандаша или пера на бумагу. После этого вставляют образец в захваты, следят за тем, чтобы образец не был перекошен. Захваты машины обычно снабжают самоцентрирующими вкладышами.

Прежде чем производить испытание, следует грубо определить размер нагрузки, которая потребуется для разрыва образца. Испытательные машины часто имеют различные шкалы, позволяющие делать отсчеты с различной точностью. Например, на линейке пресса Гагарина, как уже было сказано, нанесены две шкалы для нагрузок в 5 и в 1 т. Если максимальная нагрузка на образец ожидается больше 1000 кг, то следует, разумеется, пользоваться первой шкалой. Наоборот, ожидая максимальную нагрузку на образец не свыше 1000 кг, нецелесообразно пользоваться первой шкалой, так как точность отсчетов по ней будет меньше, чем по второй шкале.

Переставные шкалы имеют также машина Амслера и машина системы ЦНИИТМАШ.

Таблица 3

Относительное удлинение в процентах ( $l_0 = 30$  мм)

$l$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
30	0,0	0,3	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0
31	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0	5,3	5,7	6,0	6,3
32	6,7	7,0	7,3	7,7	8,0	8,3	8,7	9,0	9,3	9,7
33	10,0	10,3	10,7	11,0	11,3	11,7	12,0	12,3	12,7	13,0
34	13,3	13,7	14,0	14,3	14,7	15,0	15,3	15,7	16,0	16,3
35	16,7	16,0	17,3	17,7	18,0	18,3	18,7	19,0	19,3	19,7
36	20,0	20,3	20,7	21,0	21,3	21,7	22,0	22,3	22,7	23,0
37	23,3	23,7	24,0	24,3	24,7	25,0	25,3	25,7	26,0	26,3
38	26,7	27,0	27,3	27,7	28,0	28,3	28,7	29,0	29,3	29,7
39	30,0	30,3	30,7	31,0	31,3	31,7	32,0	32,3	32,7	33,0
40	33,3	33,7	34,0	34,3	34,7	35,0	35,3	35,7	36,0	36,3
41	36,7	37,0	37,3	37,7	38,0	38,3	38,7	39,0	39,3	39,7
42	40,0	40,3	40,7	41,0	41,3	41,7	42,0	42,3	42,7	43,0
43	43,3	43,7	44,0	44,3	44,7	45,0	45,3	45,7	46,0	46,3
44	46,7	47,0	47,3	47,7	48,0	48,3	48,7	49,0	49,3	49,7
45	50,0	50,3	50,7	51,0	51,3	51,7	52,0	52,3	52,7	53,0

Таблица 4

Относительное сужение в процентах  
(для образцов диаметром 5,8 — 6,2 мм)

$d_0$	$d$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
5,8	2	—	—	—	—	—	—	79,9	78,3	76,7	75,0
	3	73,2	71,4	69,6	67,6	65,6	63,6	61,5	59,3	57,1	54,8
	4	52,4	50,0	47,6	45,0	42,2	39,5	37,1	34,3	31,5	28,6
	5	25,7	22,7	19,6	16,5	13,3	10,1	—	—	—	—
5,9	2	—	—	—	—	—	—	80,6	79,1	77,5	75,8
	3	74,2	72,4	70,6	68,7	66,8	64,8	62,8	60,7	58,6	56,3
	4	54,0	51,7	49,3	46,9	44,1	41,5	39,2	36,5	33,8	31,0
	5	28,2	22,3	19,3	16,2	13,1	9,9	—	—	—	—
6,0	2	—	—	—	—	—	—	—	79,8	78,2	76,6
	3	75,0	73,3	71,6	69,8	67,9	66,0	64,0	62,3	59,9	57,8
	4	55,6	53,3	51,0	48,6	45,9	43,5	41,2	38,6	36,0	33,0
	5	30,6	27,8	24,9	22,0	19,0	16,0	12,9	9,8	—	—
6,1	2	—	—	—	—	—	—	—	—	78,9	77,4
	3	75,8	74,2	72,5	70,7	68,9	67,1	65,2	63,5	61,2	59,1
	4	57,0	54,8	52,6	50,3	47,7	45,3	43,1	40,6	38,1	35,5
	5	32,8	30,1	27,3	24,5	21,6	18,7	15,7	12,7	9,6	—
6,2	2	—	—	—	—	—	—	—	—	79,9	78,1
	3	76,6	75,0	73,4	71,7	69,9	67,9	66,2	64,6	62,4	60,4
	4	58,4	56,3	54,1	51,9	49,4	47,1	45,0	42,5	40,1	37,5
	5	35,0	32,3	29,7	26,9	24,1	21,3	18,4	15,5	12,5	9,4

Подготовив машину и укрепив образец, пускают машину в ход с нужной скоростью и следят за показаниями силоизмерителя. Следует иметь в виду, что перерыв в испытании или разгрузке образца по той или иной причине недопустимы, если нагрузка уже перешла за предел упругости, так как такие перерывы создают наклеп в образце и могут исказить результаты испытаний. Величину максимальной нагрузки записывают в журнал сейчас же после разрыва образца. Если во время испытания удалось установить нагрузку текучести, то ее тоже заносят в журнал испытаний.

Нагрузку можно определить также по диаграмме растяжения. Вынув образец из зажимов машины, промеряют удлинение и диаметр в шейке, для чего образец складывают в месте излома и для удобства замеров зажимают в тисочки или в центра. Полученные замеры вносят в журнал испытаний. Для удобства подсчетов относительного удлинения и относительного сужения можно пользоваться заранее составленными таблицами, подобными табл. 3 и 4.

Если нужно определить предел пропорциональности и предел текучести по диаграмме растяжения, то поступают, как описано ниже.

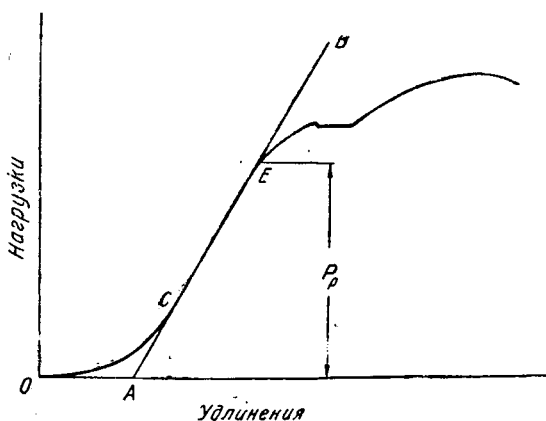
### Определение предела пропорциональности по диаграмме растяжения

Для определения по диаграмме растяжения предела пропорциональности ее необходимо записать автоматически, так чтобы масштаб по оси напряжений был не более  $1 \text{ кг/мм}^2$  в  $1 \text{ мм}$ , а удлинения записывались с увеличением не менее чем в 100 раз. На диаграмме не должны получаться пропуски, скачки и подтеки чернил. Линия диаграммы должна быть не толще  $0,5 \text{ мм}$ . Диаграмма обрабатывается следующим образом.

К ясно выраженному прямолинейному участку кривой проводится касательная  $AB$  (фиг. 15).

Точка  $A$  пересечения прямой  $AB$  с осью абсцисс диаграммы (ось абсцисс наносится на диаграмме заранее при нагрузке, равной нулю) принимается за начало координат и начало диаграммы. Участок диаграммы  $OC$  отбрасывается, так как он получается искаженным как следствие неизбежных деформаций зажимов, головок образца, записывающего механизма и пр.

Отмечают точку  $E'$  по отклонению кривой от прямолинейного участка диаграммы (от прямой  $AB$ ). Ордината этой точки ( $P_p$ ) представляет собой нагрузку предела пропорциональности.



Фиг. 15. Графическое определение нагрузки пропорциональности по диаграмме растяжения

Предел пропорциональности находят делением нагрузки предела пропорциональности на площадь первоначального поперечного сечения образца. При этом в протоколе испытаний обязательно указывается, что предел пропорциональности вычислен по диаграмме растяжения.

Описанный способ нахождения предела пропорциональности установлен ГОСТ 1497-42.

### Определение предела текучести по диаграмме растяжения

Как уже было сказано, предел текучести определяется по характерному прекращению возрастания нагрузки при растяжении образца. Нагрузка, соответствующая пределу текучести, указывается на шкале силоизмерителя остановившейся стрелкой или определяется по ординате площадки текучести кривой растяжения. Задача усложняется, однако, тем, что при испытании не всех металлов получается характерная для периода текучести остановка роста нагрузки; кривая испытания на растяжение ряда металлов получается без заметного перегиба и без площадки текучести.

Применительно к таким диаграммам растяжения речь может идти только об условном пределе текучести, который соответствует той нагрузке, при которой образец впервые получает остаточную деформацию (удлинение) заданной величины. Чаще всего эта величина остаточного удлинения принимается в 0,2% от первоначальной длины образца. В отличие от физического предела текучести, обозначаемого через  $\sigma_s$ , условный предел текучести обозначается через  $\sigma_{0,2}$ .

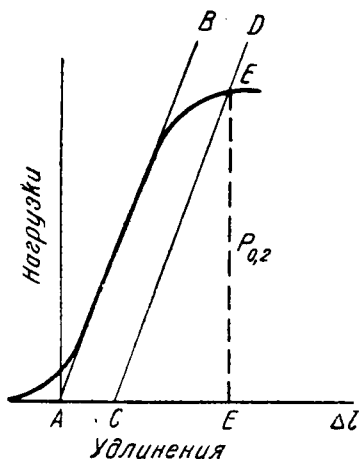
Условный предел текучести определяется по диаграммной записи следующим образом.

Масштаб диаграммы растяжения, по которой хотят определить условный предел текучести, должен быть таким, чтобы 1 мм ординаты диаграммы соответствовал не более как 1 кг/мм<sup>2</sup> напряжения в образце.

Обработку кривой растяжения начинают с проведения касательной  $AB$  к прямолинейному участку диаграммы (фиг. 16).

От точки  $A$  пересечения касательной с осью удлинений по этой оси откладывают в масштабе диаграммы отрезок  $AC$ , соответствующий 0,2% рабочей длины образца. Из точки  $C$  проводят прямую  $CD$ , параллельную прямой  $AB$  до пересечения с линией диаграммы.

Перпендикуляр, опущенный из точки  $E$  на ось удлинений, соответствует в масштабе диаграммы нагрузке предела текучести (условного).



Фиг. 16. Графическое определение нагрузки текучести по диаграмме растяжения.

Следует отметить, что диаграммный способ определения пределов пропорциональности и текучести отличается сравнительной простотой; поэтому им главным образом и пользуются, проводя приемочные испытания. Однако выигрыш в простоте и скорости сопровождается здесь проигрышем в точности. Для более точных исследовательских целей при определении пределов пропорциональности и текучести пользуются специальными приборами, так называемыми экстензометрами, которые дают возможность вести наблюдения за удлинением образца с точностью до одного микрона.

Таблица 5

НКТМ  
ЦНИИТМАШ  
Лаборатория испытания  
материалов

Цеху № . . . . .  
Заказ № . . . . .

### Протокол испытания на растяжение

Поступившие в лабораторию образцы стали „С-54“ в количестве . . . . . шт. были испытаны на растяжение на машине Гагарина по шкале 5000 кг, тарированной . . . . . (число, месяц, год); при испытаниях получены следующие результаты

№ по пор.	Клеймо образца	Размеры расчетной части образца до испытания				Нагрузки, соответствующие			Предел пропорциональности в кг/мм <sup>2</sup>	Предел текучести в кг/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление при разрыве в кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение в %	Относительное сужение в %	Примечание
		расчетная длина в мм	толщина в мм	ширина или диаметр в мм	площадь поперечного сечения в мм <sup>2</sup>	пределу текучести в кг	сопротивлению разрыву в кг	пределу пропорцион. в кг						
1	83—8	30	—	5,99	28,2	1630	2600	1570	55,7	57,8	92,2	17,3	48,6	
2	83—8	30	—	6,03	28,6	1680	2730	1580	55,2	58,7	95,5	16,0	46,9	
3	84—0	30	—	6,08	29,0	1600	2420	1540	53,1	55,2	83,4	16,3	52,1	
4	84—0	30	—	5,99	28,2	1490	2300	1440	51,1	52,8	81,6	20,7	55,3	

Нач. лаборатории (подпись)  
. . . . . 194 . . . . . г.

Испытание производил (подпись)

Протоколы испытаний на растяжение можно рекомендовать вести по форме, приведенной в табл. 5.

## Глава II

### ИСПЫТАНИЕ ЧУГУНОВ НА СЖАТИЕ

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СЖАТИЕ

Одним из наиболее распространенных видов испытания чугунов является испытание на сжатие. Образцы цилиндрической формы, выточенные из отливки, сдавливают между стальными опорными плоскостями испытательной машины.

По мере увеличения нагрузки образец чугуна укорачивается и приобретает бочкообразную форму. Нагрузку увеличивают

до тех пор, пока в образце не появится первая трещинка, обычно идущая под углом  $45^\circ$  к оси образца. В момент появления первой трещинки нагрузка резко падает, что можно отчетливо видеть по шкале динамометра машины.

При испытании на сжатие можно получить две характеристики: временное сопротивление сжатию  $\sigma_b$  и относительное укорочение  $\varphi$ .

Последнюю характеристику при контрольных приемочных испытаниях часто не определяют и ограничиваются определением одного лишь временного сопротивления сжатию.

Временное сопротивление сжатию представляет собой частное от деления разрушающей нагрузки на первоначальную площадь поперечного сечения образца:

$$\sigma_b = \frac{P}{F_0} \text{ кг/мм}^2, \quad (6)$$

где  $P$  — нагрузка, при которой появляется первая трещинка (в кг);

$F_0$  — площадь поперечного сечения образца, замеренная до испытания (в  $\text{мм}^2$ ).

Относительное укорочение  $\varphi$  выражается в процентах от первоначальной высоты испытуемого образца:

$$\varphi = \frac{H - h}{H} 100\%, \quad (7)$$

где  $H$  — высота образца до испытания;

$h$  — высота образца после испытания.

### ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОБРАЗЦУ

Размеры образца оказывают существенное влияние на результаты испытаний на сжатие. По опытам Леви на заводе „Динамо“ в Москве над образцами одного и того же перлитного чугуна значения сопротивления сжатию колебались от 82 до  $134 \text{ кг/мм}^2$  в зависимости от размеров испытуемых образцов. Наименьшие значения соответствуют образцам с минимальным диаметром и максимальной высотой и, наоборот, — максимальные значения получаются при испытании образцов с максимальным диаметром и минимальной высоты. На фиг. 17 по данным Леви приведены значения сопротивления сжатию образцов разных размеров, выточенных из одного и того же перлитного чугуна. Из фигуры видно, какое огромное влияние на результаты испытаний оказывают размеры образцов.

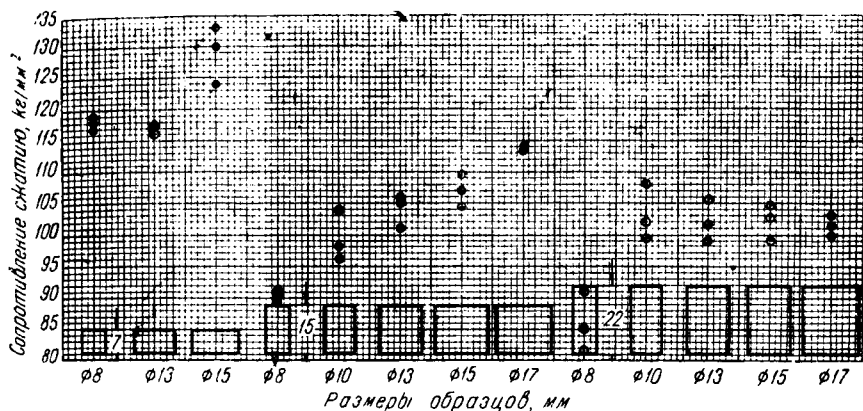
Согласно общесоюзному стандарту на методику механических испытаний чугунов (ГОСТ 2055-43) рекомендуется применять образцы диаметром  $D$  от 10 до 25 мм и высотой  $H$ , равной диаметру.

Размеры образцов рекомендуется выбирать в соответствии со средней толщиной отливок.

Технические условия на ряд литых боеприпасов предписывают применять для испытаний на сжатие цилиндрические образцы размерами  $6 \times 6 \text{ мм}$  или  $10 \times 15 \text{ мм}$ .

Из сказанного выше ясно, что размеры образцов для испытаний на сжатие, указываемые в технических условиях на те или иные отливки, безусловно обязательны и применять образцы других размеров недопустимо.

Второе очень существенное требование, предъявляемое к образцам, — чистота обработки их поверхностей. На боковой и торцевых поверхностях образца не должно быть следов резца, вмятин, царапин или различных невооруженным глазом дефектов, могущих повлиять на результаты испытаний. Чугунные образцы нельзя клеить при помощи стальных букв или цифр. Приходится ограничиваться карандашными пометками на образцах или нумерацией на обертках.

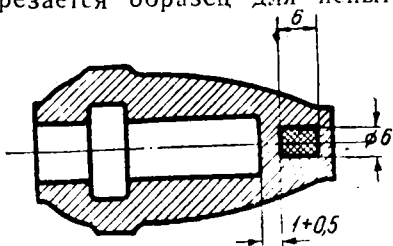


Фиг. 17. Влияние размеров образца на величину сопротивления сжатию.

Особое внимание необходимо обращать на то, чтобы торцевые поверхности образца были взаимно параллельны. Если это требование не удовлетворяется, напряжения по сечению образца распределяются неравномерно, из-за чего образец может преждевременно разрушиться. Надежные результаты получаются при контроле параллельности торцевых поверхностей образца путем зажима его между мерительными ножками штангенциркуля или микрометра и проверки на просвет. До испытаний образцы следует измерять микрометром с точностью до 0,01 мм. Колебания в длине образцов диаметром до 10 мм не должны превышать 0,02 мм. Площадь поперечного сечения следует подсчитывать с точностью до 0,1 мм².

При выборе места взятия пробы из отливки надо помнить, что в разных местах одной и той же отливки металл может иметь различные показатели механических качеств. Процесс графитизации чугуна, определяющий его твердость, зависит от скорости остывания отливки, которая может быть различной в разных местах отливки. Более тонкие сечения или поверхностные слои отливки остывают, понятно, быстрее более толстых, массивных частей. Кроме того, в зависимости от способа заливки и расположения литников в изделии могут образоваться места наибольшего ско-

пления раковин и рыхлостей, что также может сказаться на результатах испытаний. Поэтому выбор в отливке места, откуда вырезается образец для испытания, является очень ответственным делом. Для получения сравнимых результатов необходимо вырезать образцы всегда в одном определенном месте отливки; в технических условиях такое место обычно указывается. Совершенно очевидно, что это требование технических условий надо во всех случаях аккуратно выполнять.



Фиг. 18. Место вырезки образца из полый отливки.

На фиг. 18 в виде примера показано место взятия пробы из полых отливок для боеприпасов.

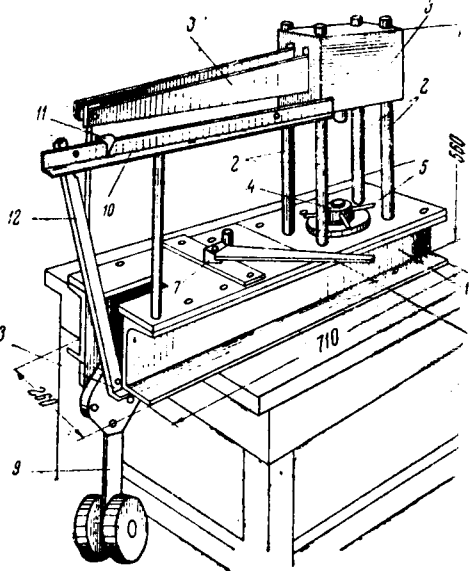
Если подобная отливка имеет другие размеры, расположение образца относительно оси отливки и внутренней ее полости остается тем же, меняется лишь расстояние от носика отливки до торца образца.

### ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

Для испытаний на сжатие можно использовать любую испытательную машину, обладающую достаточной для разрушения образца мощностью. Усилия следует замерять с погрешностью, не превышающей 10% от величины замеряемого усилия.

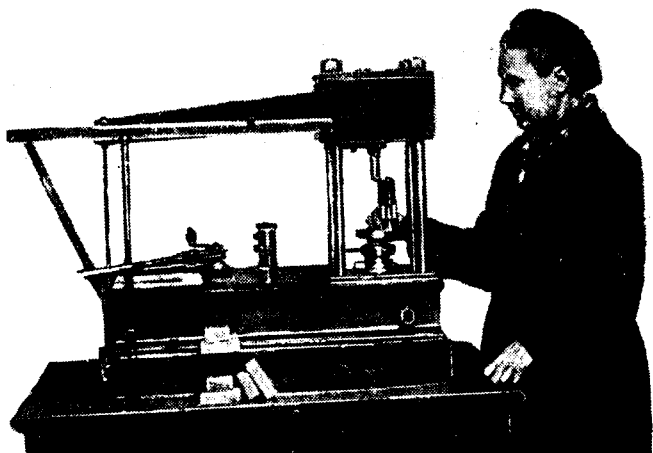
Машина должна иметь паспорт, удостоверяющий ее пригодность для испытаний. Этот паспорт выдается на общих основаниях соответствующими организациями и периодически возобновляется.

Выше уже отмечалось, что некоторые из машин, служащих для испытаний на растяжение, приспособлены к испытаниям и на сжатие. Если машина предназначена для испытаний только на сжатие или только на растяжение, на ней при помощи реверсоров можно производить испытания того и другого вида. Реверсор уже описан выше (см. «Пресс системы Гагарина», фиг. 6). В больших лабораториях, где приходится вести массовые испытания на сжатие, пользуются машинами, специально предназначенными для этой цели.



Фиг. 19. Схема универсальной испытательной машины конструкции ЦНИИТМАШ типа ИМ-4 с ручным приводом.

На фиг. 19, схематически изображена небольшая машина с ручным приводом конструкции ЦНИИТМАШ типа ИМ-4. На фиг. 20 показан общий вид этой машины. Благодаря простоте конструкции этой машины машиностроительные заводы могут изготавливать ее для своих лабораторий и контрольных пунктов собственными силами.



Фиг. 20. Общий вид машины ЦНИИТМАШ с ручным приводом.

У машины очень невелико количество деталей, требующих механической обработки, и вовсе нет деталей, для изготовления которых требовалось бы сложное станочное оборудование; нет также литых и сварных деталей.

Машина предназначена для испытаний чугунов на сжатие и разрыв по Людвику, но ее можно легко приспособить также для механических испытаний других видов (на изгиб, растяжение, твердость). Максимальное усилие, развиваемое машиной, — 4000 кг. Габаритные размеры машины  $710 \times 600 \times 220$  мм. Станина 1 машины состоит из двух прокатных необработанных швеллеров № 12, на которые опираются колонки 2, поддерживающие головку 3.

Для предварительной установки подвижного нижнего шпинделя 4 служит маховичок 5. Рабочее движение сообщается шпинделю при помощи рычага и винта с гайкой. Винт вращается вручную рукояткой 6 с трещеткой 7. Для измерения прилагаемого усилия служит рычаг 8 и маятник 9. Усилия отсчитываются по шкале 10, вдоль которой по направляющей перемещается движок 11, связанный поводком 12 с осью 13 маятника.

Машина снабжается клиньями для испытания чугунов по Людвику и специальными опорами для испытаний чугунов на сжатие.

Описанные машины по чертежам ЦНИИТМАШ построены на ряде заводов и находятся в эксплуатации.

## ТЕХНИКА ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ

Прежде всего осматривают образцы, чтобы убедиться в отсутствии на их поверхностях дефектов, которые могут повлиять на результаты испытаний. Затем образцы измеряют и результаты измерений записывают в протокол испытаний. Форму записи можно рекомендовать согласно табл. 6. После замера образец ставят на машину. Поверхности опорных подушек машины должны быть хорошо обработаны (отшлифованы); твердость их должна быть значительно выше твердости испытываемых образцов.

Одна из опор должна иметь шаровую поверхность, как показано на фиг. 21. Желательно, чтобы центр шарообразной поверхности опорной подушки лежал на плоской поверхности опоры, на которую ставится образец. Чтобы избежать эксцентричного приложения нагрузки, надо устанавливать образец возможно точнее по центру опор. Если образцы или опоры были смазаны, то перед испытанием необходимо смазку смыть (керосином или иным каким-либо растворителем). Установленный в машину образец следует нагружать медленно, без толчков. По ГОСТ 2055-43 скорость перемещения подвижной головки машины не должна превышать 2 мм/мин.

Фиг. 21. Форма шаровой опоры машины для испытания на сжатие:

1 — головки машины;  
2 — опора с шаровой поверхностью; 3 — опорная подушка; 4 — центр шаровой поверхности.

Во время испытания следует наблюдать не за самим образцом, а за стрелкой динамометра.

Максимальную нагрузку, которая понадобилась для разрушения образца, заносят в протокол испытаний. Появлению первой трещинки сопутствует резкое падение нагрузки. В этот момент машину разгружают и, вынув образец, измеряют высоту его; результаты измерения тоже заносят в протокол испытаний.

Таблица 6

НКТМ ЦНИИТМАШ Лаборатория испытания материалов	Протокол механических испытаний	Цеху № . . . . . К работе № . . . . . Основание—заказ № . . . . .
Поступившие в лабораторию . . . . . образцы чугуна . . . . шт. были испытаны на сжатие; при испытании получены следующие результаты		

№ по пор.	Клеймо образца	Диаметр образца в мм	Начальная высота в мм	Высота после испытания в мм	Площадь по- перечного сече- ния в мм <sup>2</sup>	Разрушаю- щая нагр/- зка в кг	Спротив- ление сжа- тию в кг/мм <sup>2</sup>	Относитель- ное укороче- ние в %	Примечание
1	Д-1	6,04	6,00	4,00	28,7	3 730	130,0	33,3	
2	Б-1	5,98	6,05	3,70	28,1	2 960	106,3	38,3	
3	25-2	6,05	6,00	3,95	28,7	2 750	95,8	34,3	

Начальник лаборатории (подпись)  
. . . . . 194 г.

Испытание производил (подпись)

Величины сопротивления сжатию и относительного укорочения лучше подчитывать сразу для целей серии образцов.

## ИСПЫТАНИЯ ЧУГУНОВ ДАВЛЕНИЕМ КЛИНЬЕВ

(по Людвику)

## МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

В последние годы в наших лабораториях получил широкое распространение способ испытания чугунов давлением клиньев. Этот способ был предложен в 1934 г. за границей Людвигом, поэтому испытания давлением клиньев часто называют испытаниями по Людвику. Метод Людвига дает возможность определять величину сопротивления разрыву для чугунов, не производя непосредственных испытаний на растяжение.

Сущность способа Людвига заключается в следующем. Образец чугуна прямоугольного или круглого поперечного сечения сдавливается между двумя стальными закаленными клиньями с углом при вершине в  $90^\circ$  (фиг. 22). Лезвия клиньев лежат в одной вертикальной плоскости.

При испытании по методу Людвига образцы можно сдавливать между клиньями на любом испытательном прессе, если нагрузку на нем можно измерять с нужной точностью. По мере сдавливания образца лезвия клиньев углубляются в металл и вызывают хрупкое разрушение испытуемого образца. При испытании отмечается максимальная нагрузка, по достижении которой образец разрушается.

Сопротивление разрыву рассчитывают по эмпирической формуле, предложенной Людвигом:

$$\sigma_b = \frac{P}{F_0} \left( 1 + 0,02 \frac{P}{F_0} \right) \text{ кг/мм}^2, \quad (8)$$

где  $\sigma_b$  — сопротивление разрыву в  $\text{кг/мм}^2$ ;

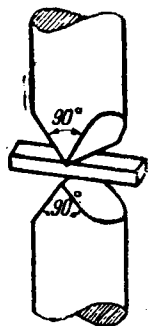
$P$  — разрушающая образец нагрузка в кг;

$F_0$  — площадь поперечного сечения образца в  $\text{мм}^2$ .

Большое преимущество способа Людвига — его простота и возможность использовать для испытания очень небольшой образец.

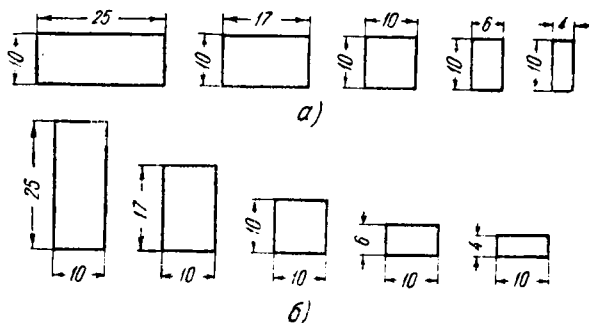
Размеры образца могут значительно влиять на результаты испытаний, поэтому надо строго придерживаться размеров, указанных в технических условиях на данное изделие.

Влияние размеров образцов на результаты испытаний было исследовано в лаборатории ЦНИИТМАШ на большом количестве образцов перлитных чугунов. Для этого изготавливались образцы различного поперечного сечения двух серий (фиг. 23). В первой серии переменной была ширина образца, во второй — высота образца. Результаты этих сравнительных испытаний (по средним значениям) показаны в графиках на фиг. 24. Как видно из графиков, величина временного сопротивления разрыву возрастала по мере уменьшения размеров образцов.

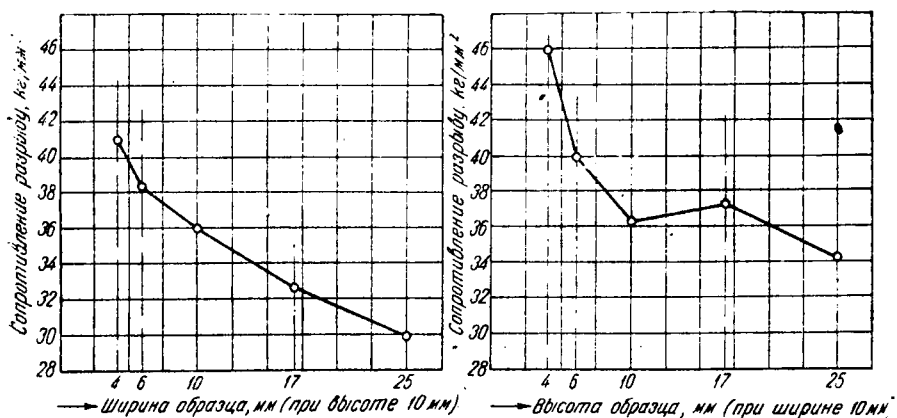


Фиг. 22. Стальные клинья для испытаний по Людвику.

Если в технических условиях нет указаний о размерах испытываемых образцов, можно применять призматические образцы с площадью поперечного сечения не менее  $150 \text{ мм}^2$  и стороной не менее  $10 \text{ мм}$ .



Фиг. 23 Размеры образцов для определения влияния размеров при испытаниях по Людвигу:  
а — первая серия; б — вторая серия.



Фиг. 24. Влияние размеров образца на результаты испытаний по Людвигу

Степень остроты лезвий клиньев тоже влияет на результаты испытаний. Чем меньше радиус закругления лезвий, тем ниже получаемые значения сопротивления разрыву. В большинстве технических условий указывается небольшой радиус закругления лезвий (от  $0,3$  до  $0,5 \text{ мм}$ ).

По методу Людвика, как правило, получаются несколько более высокие значения временного сопротивления разрыву, чем по обычному методу испытания на растяжение.

#### ТЕХНИКА ИСПЫТАНИЙ ДАВЛЕНИЕМ КЛИНЬЕВ

Приспособления для испытаний по Людвигу могут быть самых разнообразных конструкций. На фиг. 25 показан эскиз простого приспособления для испытания по методу Людвика на прессе

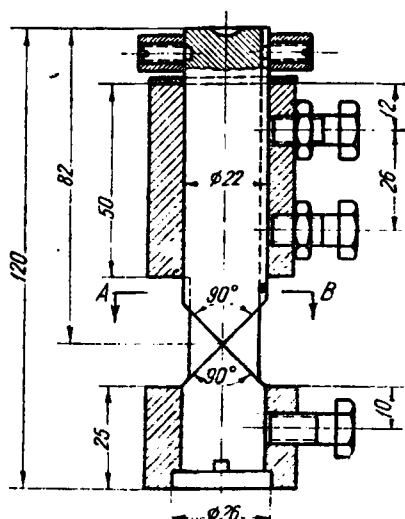
Гагарина или на другой какой-либо испытательной машине. Такое приспособление изготовлено и опробовано в лаборатории испытания материалов ЦНИИТМАШ.

Верхний (подвижной) плунжер надо слегка смазать маслом; он должен ходить в направляющей втулке свободно, без заедания.

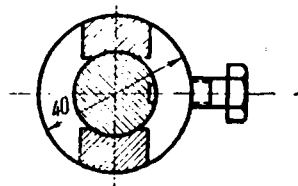
При изготовлении образца необходимо обращать особое внимание на то, чтобы те поверхности образца, с которыми соприкасаются клинья прибора, были взаимно параллельны. При испытании материала полых цилиндрических изделий удобно изготовлять образцы, как показано в виде примера на фиг. 26. Кривизна образца в таких случаях роли не играет. Поверхности образцов должны быть чисто обработаны.

Скорость возрастания нагрузки при испытаниях чугунов давлением клиньев еще не стандартизирована, но, по видимому, она существенной роли не играет.

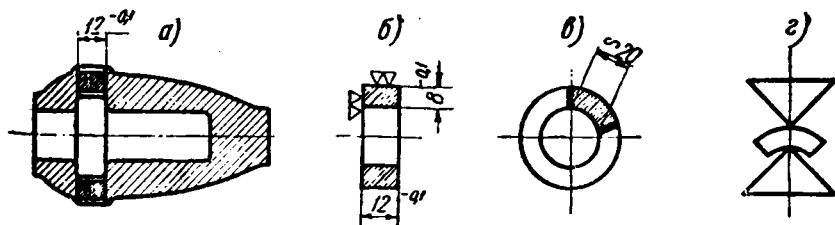
Сравнительные испытания чугунов, проведенные на многих образцах автором в ЦНИИТМАШ, не показали заметного различия при изменении скорости в очень больших пределах (от 2 до 130 мм/мин).



Разрез по А-В



Фиг. 25. Клиновое приспособление для испытаний по Людвику.



Фиг. 26. Примерная выточка образцов из колец:

а — вырезка кольца из отливки; б — размеры кольца; в — вырезка образца из кольца; г — расположение образца между клиньями.

При массовых испытаниях чугунов по методу Людвики иногда образцы небрежно устанавливаются под клинья. Из-за этого ось образца оказывается не перпендикулярной к плоскости, проходящей через лезвия клиньев, что может заметно исказить результаты испытаний.

Таблица 7

Значение временного сопротивления разрыву (по Людвику) в кг/мм<sup>2</sup> в зависимости от величины отношения  $P : F_0$

$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$	$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$	$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$	$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$	$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$	$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$	$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$	$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$	$\frac{P}{F_0}$	$\sigma_b$
13,0	16,4	15,0	19,5	17,0	22,8	19,0	26,2	21,0	29,8	23,0	33,6	25,0	37,5	27,0	41,6	29,0	45,8
13,1	16,5	15,1	19,7	17,1	22,9	19,1	26,4	21,1	30,0	23,1	33,8	25,1	37,7	27,1	41,8	29,1	46,0
13,2	16,7	15,2	19,8	17,2	23,1	19,2	26,6	21,2	30,2	23,2	34,0	25,2	37,9	27,2	42,0	29,2	46,3
13,3	16,8	15,3	20,0	17,3	23,3	19,3	26,7	21,3	30,4	23,3	34,2	25,3	38,1	27,3	42,2	29,3	46,5
13,4	17,0	15,4	20,1	17,4	23,5	19,4	26,9	21,4	30,6	23,4	34,4	25,4	38,3	27,4	42,4	29,4	46,7
13,5	17,1	15,5	20,3	17,5	23,6	19,5	27,1	21,5	30,7	23,5	34,5	25,5	38,5	27,5	42,6	29,5	46,9
13,6	17,3	15,6	20,5	17,6	23,8	19,6	27,3	21,6	30,9	23,6	34,7	25,6	38,7	27,6	42,8	29,6	47,1
13,7	17,5	15,7	20,6	17,7	24,0	19,7	27,5	21,7	31,1	23,7	34,9	25,7	38,9	27,7	43,0	29,7	47,3
13,8	17,6	15,8	20,8	17,8	24,1	19,8	27,7	21,8	31,3	23,8	35,1	25,8	39,1	27,9	43,3	29,8	47,6
13,9	17,8	15,9	21,0	17,9	24,3	19,9	27,8	21,9	31,5	23,9	35,3	25,9	39,3	27,9	43,5	29,9	47,8
14,0	17,9	16,0	21,1	18,0	24,5	20,0	28,0	22,0	31,7	24,0	35,5	26,0	39,5	28,0	43,7	30,0	48,0
14,1	18,1	16,1	21,3	18,1	24,7	20,1	28,2	22,1	31,9	24,1	35,7	26,1	39,7	28,1	43,9	30,1	48,2
14,2	18,2	16,2	21,5	18,2	24,8	20,2	28,3	22,2	32,1	24,2	35,9	26,2	39,9	28,2	44,1	30,2	48,4
14,3	18,4	16,3	21,6	18,3	25,0	20,3	28,5	22,3	32,2	24,3	36,1	26,3	40,1	28,3	44,3	30,3	48,7
14,4	18,5	16,4	21,8	18,4	25,2	20,4	28,7	22,4	32,4	24,4	36,3	26,4	40,3	28,4	44,5	30,4	48,9
14,5	18,7	16,5	21,9	18,5	25,3	20,5	28,9	22,5	32,6	24,5	36,5	26,5	40,5	28,5	44,7	30,5	49,1
14,6	18,9	16,6	22,1	18,6	25,5	20,6	29,1	22,6	32,8	24,6	36,7	26,6	40,8	28,6	45,0	30,6	49,3
14,7	19,0	16,7	22,3	18,7	25,7	20,7	29,3	22,7	33,0	24,7	36,9	26,7	41,0	28,7	45,2	30,7	
14,8	19,2	16,8	22,4	18,8	25,9	20,8	29,5	22,8	33,2	24,8	37,1	26,8	41,2	28,8	45,4	30,8	
14,9	19,3	16,9	22,6	18,9	26,0	20,9	29,6	22,9	33,4	24,9	37,3	26,9	41,4	28,9	45,6	30,9	

Особо важное значение имеет правильная установка образца под клинья при испытаниях образцов, вырезанных из колец (с кривизной).

При разрушении образца, испытываемого по методу Людвика, половинки образца с силой разлетаются в стороны. Поэтому надо обертывать прибор какой-нибудь тканью или накрывать его специальным чехлом. Можно также придерживать образец во время испытания рукой.

Линейные размеры образца следует измерять с точностью до 0,1 мм, площадь поперечного сечения образца с точностью до 0,1 мм<sup>2</sup>. Частное от деления разрушающей нагрузки на площадь поперечного сечения образца следует вычислять с точностью до 0,1 кг/мм<sup>2</sup>.

Временное сопротивление разрыву подсчитывают по указанной выше формуле, тоже с точностью до 0,1 кг/мм<sup>2</sup>.

Для определения временного сопротивления разрыву полезно пользоваться табл. 7, в которой приведены значения временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  в зависимости от величины отношения разрушающей нагрузки к площади поперечного сечения образца ( $P : F_0$ ).

Примерная форма записи результатов испытаний по Людвигу приведена в табл. 8.

Таблица 8

НКТМ — СССР  
ЦНИИТМАШ  
Лаборатория испытания  
материалов

Кому . . . . .  
К работе . . . .  
Основание: заказ  
от . . . 194 г.

### Протокол испытания

Доставленные в лабораторию . . . . . образцы чугунов в количестве . . . . . шт. были испытаны давлением клиньев по способу Людвика; при испытаниях получены следующие результаты

№ по пор.	Клеймо образца	Размеры образца			Разрушающая нагрузка	Сопротивление разрыву по Людвигу
		высота	ширина	площадь поперечного сечения		
		в мм	в мм	в мм <sup>2</sup>	в кг	в кг/мм <sup>2</sup>
1	238	7,8	12,1	94,4	2270	35,5
2	238	7,9	12,0	94,8	2250	34,9
3	239	8,0	11,9	95,2	1870	27,3
4	239	7,9	11,9	94,0	1810	26,7

Начальник лаборатории (подпись)

Испытание производил (подпись)

. . . . 194 г. . .

## ИСПЫТАНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ

Испытания металлов на твердость благодаря их простоте получили очень широкое распространение. Зачастую ответственные отливки и детали изделий данной партии пропускаются через контроль по твердости все без исключения. Отливки мин разных калибров, корпуса снарядов, многие детали стреляющих механизмов и предметы вооружения испытываются на твердость в массовых количествах. Поэтому работники ОТК и заводских лабораторий должны иметь навыки, необходимые для быстрого и уверенного обращения с испытательными приборами. Вместе с тем и приборы и методы испытаний должны быть достаточно просты, надежны в работе и производительны.

Из многочисленных способов испытаний твердости наиболее широко применяются способы Бринелля и Роквелла. Подавляющее большинство технических условий на боеприпасы и детали вооружения требует контроля твердости одним из этих способов.

## СПОСОБ БРИНЕЛЛЯ

В 1900 г. шведский инженер Бринелль предложил способ определения твердости металлов путем вдавливания в поверхность испытуемого металла стального закаленного шарика. Этот способ очень быстро получил широкое применение во всех странах мира и, как уже отмечено выше, в настоящее время является самым распространенным.

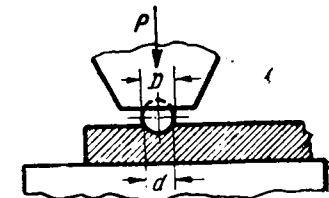
Схема испытания по методу Бринелля показана на фиг. 27. В результате вдавливания стального шарика на испытуемой поверхности образуется шаровое углубление (лунка). Диаметр лунки тщательно измеряют при помощи лупы со шкалой (фиг. 28). По величине диаметра лунки судят о твердости испытуемого металла. При данном усилии вдавливания и диаметре шарика лунка получается тем больше, чем мягче испытуемый материал.

Твердость при испытаниях по способу Бринелля характеризуется так называемым числом твердости  $H_B$  — частным от деления величины усилия, с которым шарик вдавливается в металл, на поверхность полученного шарового отпечатка (лунки). При этом нагрузка  $P$  выражается в килограммах, а поверхность  $F$  лунки — в квадратных миллиметрах:

$$H_B = \frac{P}{F} \text{ кг/мм}^2. \quad (9)$$

Поверхность шарового сегмента

$$F = \pi D h, \quad (10)$$



Фиг. 27. Вдавливание шарика при испытаниях твердости по Бринеллю.

где  $\pi = 3,14$ ;

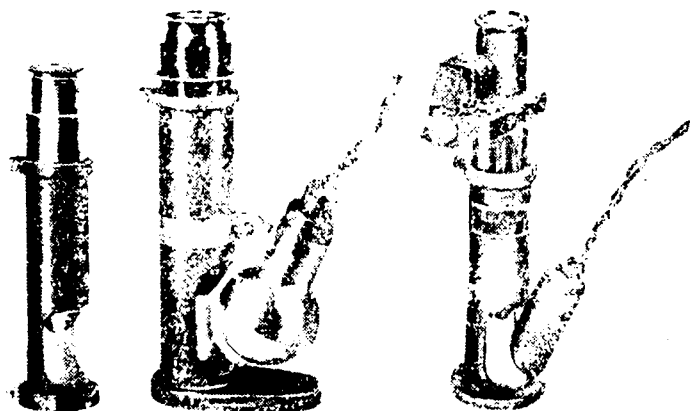
$D$  — диаметр вдавливаемого шарика;

$h$  — глубина отпечатка.

Так как при испытаниях на твердость удобнее измерять не глубину лунки  $h$ , а ее диаметр  $d$ , то величину  $h$  нужно выразить через  $d$

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (11)$$

и ввести значение  $h$  в формулу (10).



Фиг. 28. Лупы различных видов для замеров отпечатков.

Тогда формула (9) для определения числа твердости по Бринеллю примет следующий вид:

$$H_B = \frac{P}{F} = \frac{P}{\pi D h} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (12)$$

Чем тверже материал, тем больше число твердости по Бринеллю. Для облегчения работы по испытанию на твердость существуют таблицы, в которых приведены числа твердости по Бринеллю в зависимости от диаметров лунок (табл. 9 и 10). При пользовании такой таблицей число твердости определяется очень просто. Измерив диаметр отпечатка, сразу находят по таблице число твердости испытуемого материала. Пусть, например, при измерении твердости шариком  $D = 10$  мм под нагрузкой  $P = 3000$  кг был получен отпечаток с диаметром  $d = 3,5$  мм. В табл. 9 против диаметра отпечатка в 3,5 мм находим число твердости  $H_B = 302$ .

Диаметру лунки в 4,4 мм соответствует число твердости 187 и т. д.

В некоторых технических условиях твердость задается прямо диаметром отпечатка.

Для испытаний на твердости по Бринеллю употребляются стальные шарики трех различных диаметров в 10 или 5, или 2,5 мм. Обычно пользуются шариком в 10 мм и только в трех случаях, когда по размерам испытуемого изделия удобнее применять шарики меньших диаметров, пользуются шариками с  $D=5$  или  $D=2,5$  мм.

В зависимости от рода испытуемого материала выбирают и усилие вдавливания.

Так, при пользовании 10-мм шариком для испытаний сталей и чугунов применяют нагрузку в 3000 кг, для испытаний цветных металлов (меди, латуни, бронзы, алюминия и др.) 1000 кг, а для испытаний особо мягких материалов (свинца, олова, баббитов и пр.) 250 кг.

При измерении твердости материала шариками разных диаметров получают одинаковые числа твердости, если отношение нагрузки к квадратам диаметров примененных шариков остается неизменным

$$\frac{P}{D^2} = K, \quad (13)$$

где  $K$  — величина постоянная.

Таблица 9

Числа твердости по Бринеллю

(Диаметр шарика  $D = 10$  мм; нагрузка  $P = 3000$  кг ( $\frac{P}{D^2} = 30$ ))

Диаметр отпечатка в мм	$H_B$	Диаметр отпечатка в мм	$H_B$	Диаметр отпечатка в мм	$H_B$	Диаметр отпечатка в мм	$H_B$
2,50	601	3,40	321	4,30	197	5,20	131
2,55	578	3,45	311	4,35	192	5,25	128
2,60	555	3,50	302	4,40	187	5,30	126
2,65	534	3,55	293	4,45	183	5,35	123
2,70	514	3,60	285	4,50	179	5,40	121
2,75	495	3,65	277	4,55	174	5,45	118
2,80	477	3,70	269	4,60	170	5,50	116
2,85	461	3,75	262	4,65	167	5,55	114
2,90	444	3,80	255	4,70	163	5,60	111
2,95	429	3,85	248	4,75	159	5,65	109
3,00	415	3,90	241	4,80	156	5,70	107
3,05	401	3,95	235	4,85	152	5,75	105
3,10	388	4,00	229	4,90	149	5,80	103
3,15	375	4,05	223	4,95	146	5,85	101
3,20	363	4,10	217	5,00	143	5,90	99,2
3,25	352	4,15	212	5,05	140	5,95	97,3
3,30	341	4,20	207	5,10	137	6,00	95,5
3,35	331	4,25	201	5,15	134	—	—

## Числа твердости по Бринеллю

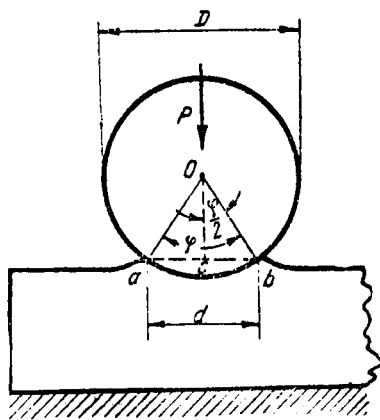
(Диаметр шарика  $D = 5$  мм; нагрузка  $P = 750$  кг ( $\frac{P}{D^2} = 30$ ))

Диаметр отпечатка в мм	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,00	945	926	908	890	873	856	840	824	809	794
1,10	780	765	752	738	725	712	700	688	676	665
1,20	653	643	632	621	611	601	592	582	573	564
1,30	555	547	538	530	522	514	507	499	492	485
1,40	477	471	464	457	451	444	438	432	426	420
1,50	415	409	404	398	393	388	383	378	373	368
1,60	363	359	354	350	345	341	337	333	329	325
1,70	321	317	313	309	306	302	298	295	292	288
1,80	285	282	278	275	272	269	266	263	260	257
1,90	255	252	249	246	244	241	239	236	234	231
2,00	229	226	224	222	219	217	215	213	211	209
2,10	207	204	202	200	198	197	195	193	191	189
2,20	187	185	184	182	180	179	177	175	174	172
2,30	170	169	167	166	164	163	161	160	158	157
2,40	156	154	153	152	150	149	148	146	145	144
2,50	143	141	140	139	138	137	135	134	133	132
2,60	131	130	129	128	127	126	125	124	123	122
2,70	121	120	119	118	117	116	115	114	113	112
2,80	111	110	110	109	108	107	106	105	105	104
2,90	103	102	101	101	99,9	99,2	98,4	97,7	96,9	96,2
3,00	95,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Высказанное правило можно обосновать следующим образом. Исследователь Мейер установил закон подобия форм отпечатков, по которому твердость по Бринеллю  $H_B$  для одного и того же материала получается одной и той же при любых диаметрах шариков, если они вдавливаются настолько, что получается один и тот же угол вдавливания  $\varphi$  (фиг. 29).

Из рассмотрения треугольника  $Ocb$  (фиг. 29) следует, что

$$\frac{D}{2} \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{d}{2},$$

Фиг. 29. Угол вдавливания  $\varphi$ .

где  $D$  — диаметр шарика;  
 $d$  — диаметр отпечатка.

Откуда

$$d = D \sin \frac{\varphi}{2}.$$

Подставляя это значение  $d$  в обычную формулу Бринелля, получаем:

$$H_B = \frac{P}{D^2} \left[ \frac{2}{\pi \left( 1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right]. \quad (14)$$

Допустим, что применяются два шарика с диаметрами  $D_1$  и  $D_2$ , для вдавливания которых в один и тот же материал до получения одного и того же угла вдавливания  $\varphi$  требуются соответственно нагрузки  $P_1$  и  $P_2$ , тогда

$$\frac{P_1}{D_1^2} \cdot \left[ \frac{2}{\pi \left( 1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right] = \frac{P_2}{D_2^2} \cdot \left[ \frac{2}{\pi \left( 1 - \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi}{2}} \right)} \right]. \quad (15)$$

Так как угол  $\varphi$  согласно условию постоянный, то величины, стоящие в скобках, равны и, следовательно, равенство (15) справедливо при условии, что

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2}. \quad (16)$$

Это значит, что для получения сравнимых чисел твердости при пользовании шариками разных диаметров необходимо соблюдение постоянства отношения усилия вдавливания к квадрату диаметра шарика.

Для обычных испытаний черных металлов шариком с диаметром  $D=10$  мм нагрузка, как было указано выше, составляет 3000 кг. Следовательно, отношение между нагрузкой и квадратом диаметра шарика составляет

$$K = \frac{P}{D^2} = \frac{3000}{10^2} = 30.$$

Если вместо шарика в 10 мм применяется шарик в 5 мм, то для получения сравнимых чисел твердости следует выбрать нагрузку

$$P = 30 D^2 = 30 \cdot 5^2 = 750 \text{ кг.}$$

Аналогично поступают при выборе необходимого усилия вдавливания в случае перехода к шарiku диаметром в 2,5 мм.

В табл. 11 указаны нагрузки, употребляемые при испытаниях различных материалов при помощи шариков разных диаметров.

Чтобы показать, при каких условиях измерялась твердость по Бринеллю, применяют следующий условный метод записи. В случае применения шарика диаметром  $D=10$  мм, под нагрузкой  $P=3000$  кг и выдержке при этой нагрузке в 30 сек.

пишут:  $H_B 3000/10/30$ ; если  $D=5$  мм,  $P=750$  кг и выдержка равна 10 сек. пишут:  $H_B 750/5/10/$  и т. д.

Таблица 11

Нагрузки, употребляемые при испытаниях по методу Бринелля

Толщина образца в мм	Диаметр шари- ка в мм	Нагрузка $P$ кг		
		для чугуна и стали $30 D^3$	для меди, латуни, бронзы и т. п. $10 D^2$	для мягких сплавов $2, D^2$
Больше 6 . . . .	10	3000	1000	250
От 6 до 3 . . . .	5	750	250	62, 5
Меньше 3 . . . .	2,5	187,5	62,5	15,6

Длительность выдержки шарика под окончательной нагрузкой может повлиять на величину лунки. Поэтому при испытании сталей и чугунов средней твердости выдержку делают не менее 5—10 сек. а при испытании цветных металлов или мягких сталей не менее 10—30 сек.

### КОНСТРУКЦИЯ ПРЕССОВ БРИНЕЛЛЯ

Вообще говоря, испытания твердости по Бринеллю можно производить на любом лабораторном прессе, если на нем имеется возможность достаточно точно отмечать нужное усилие (например на прессе системы Гагарина). Однако для удобства и быстроты испытаний целесообразнее пользоваться прессами, предназначенными только для испытаний по методу Бринелля. Конструкций таких прессов много. Ниже приведены краткие описания некоторых конструкций прессов Бринелля.

### Гидравлический пресс типа „АЛЬФА“

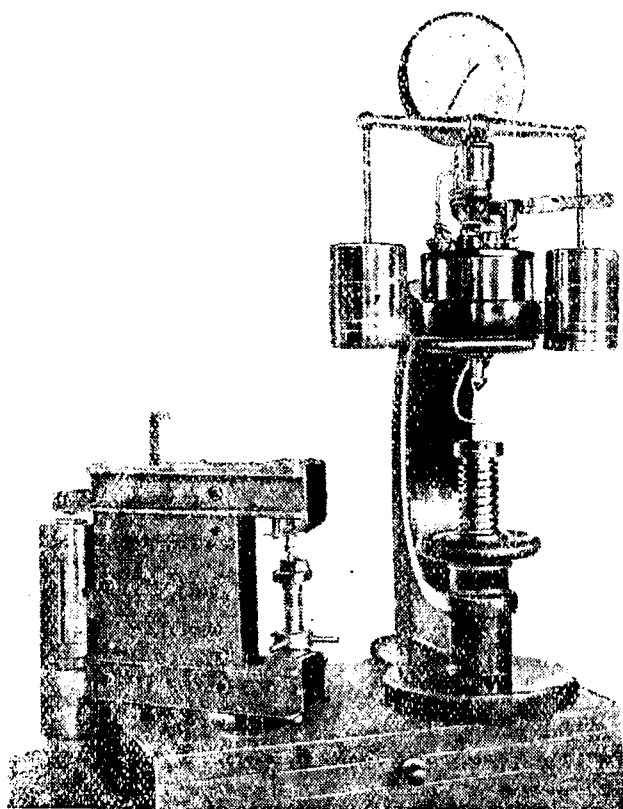
Общий вид пресса „Альфа“ показан на фиг. 30. Устройство пресса сх. матически изображено на фиг. 31.

Основные части пресса: чугунная массивная станина 1 подъемный винт 2 с ручным маховичком и предметным сменным столиком, цилиндр 3 с масляным резервуаром, поршень 4, шпиндель 5 со сменным шариком, ручной масляный насос 6, вентиль 7, перекрывающий отверстие из масляного резервуара в рабочую часть цилиндра, коромысло 8 с набором сменных грузов, манометр 9.

Приступая к испытаниям на прессе, надо прежде всего проверить, соответствует ли набор гирь нагрузке, выбранной для испытания. При смене грузов их нужно снимать или надевать

на коромысло попарно; на правую и левую подвески коромысла одновременно. Затем, если требуется, меняют шарик на шпинделе 5.

Испытуемый образец кладут на предметный столик и ручным маховичком поднимают образец вверх до соприкосновения его поверхности с шариком. Затем, вращением вентиля 7 (по часовой стрелке до упора) закрывают клапан, соединяющий масляный резервуар с рабочей частью цилиндра, и ручным насосом 6



Фиг. 30. Общий вид пресса „Альфа“ (рядом пресс ИВ-750).

начинают подавать масло. При этом возрастающее давление масла передается на поршень 4, манометр 9 и коромысло 8. Масло перестают накачивать, когда коромысло с гирями приподнимается и начнет „плавать“, а манометр одновременно покажет выбранную для испытания нагрузку. Роль коромысла с гирями заключается в автоматическом исключении возможности перегрузки. Манометр указывает на скорость возрастания нагрузки и дает возможность следить за процессом возрастания нагрузки.

Выдержав нагрузку в течение 10—30 сек., медленно открывают вентиль 7, сбрасывая этим давление масла на шпиндель 5, коромысло 8 и манометр 9. Ручным маховичком опускают винт 2 и снимают испытуемый образец со столика для замера диаметра лунки.

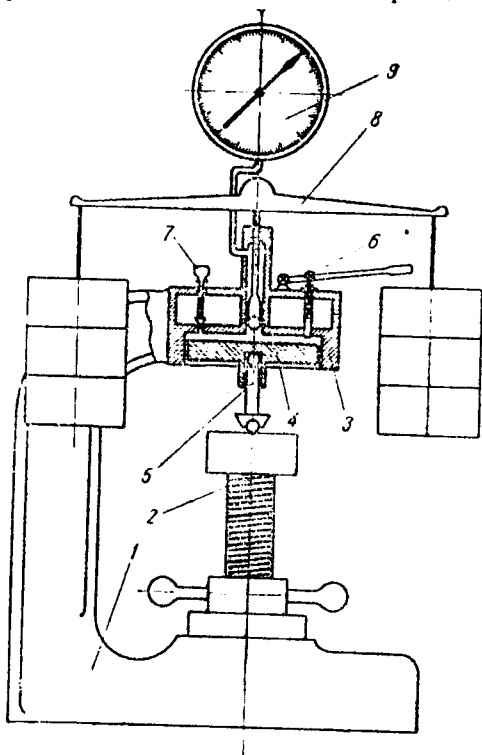
### Пресс Бринелля с механическим приводом типа АББ

Пресс типа АББ („автоматический, быстродействующий Бринелль“), выпускаемый заводом ГЗИП в Москве, тоже получил широкое распространение в наших лабораториях. Пресс особенно удобен при массовых испытаниях, так как он работает от электромотора, и процессы нагружения, выдержки под нагрузкой и снятия нагрузки автоматизированы.

Пресс состоит из следующих основных частей (фиг. 32): станины 1, ходового винта 2 с ручным маховичком и опорным сменным столиком, электромотора 3 с фрикционным приводом и редуктором, рычага 4 эксцентрика, двух грузовых рычагов 5, набора гирь 6, позволяющего устанавливать давление на шарик от 187,5 до 3000 кг, шпинделя 7 со сменным шариком, установочной стрелки 8.

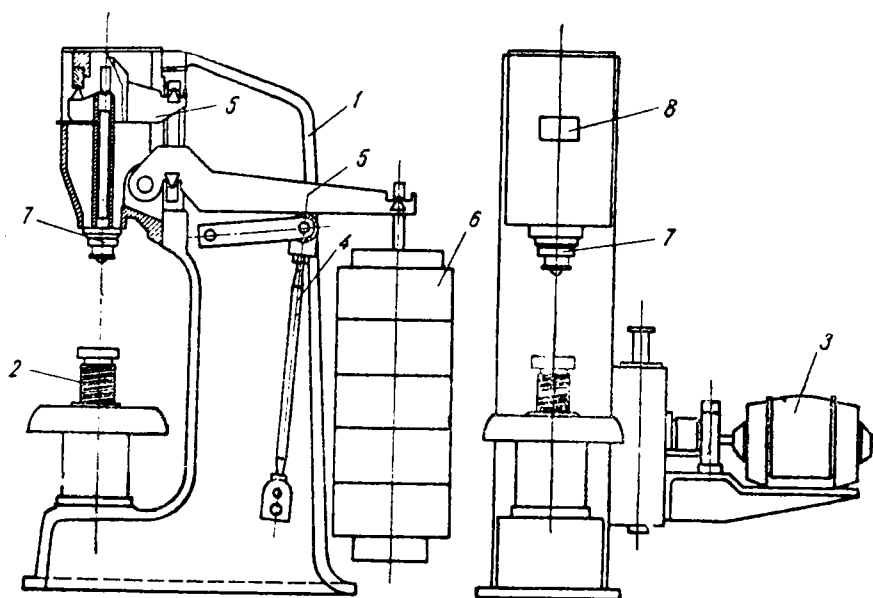
При испытании ручным маховичком поднимают ходовой винт 2 до соприкосновения поверхности испытуемого образца, помещенного на предметный столик, с шариком. Доведя шарик до соприкосновения с образцом, продолжают вращать ручной маховичок для создания так называемой предварительной нагрузки в 100 кг. Момент достижения этой нагрузки фиксируется установочной стрелкой 8, которая должна совпадать с риской в прорезе головки станины.

Затем устанавливают вал 9 в соответствии с выбранным временем выдержки под окончательной нагрузкой (10 или 30 сек.). Если при предыдущих операциях мотор пресса был выключен (что, вообще говоря, необязательно), то теперь его следует включить и поворотом рукоятки фрикциона влево привести в движение эксцентрик. При этом рычаг 4 начинает опускаться и нагрузка на образец плавно возрастает. После автоматической



Фиг. 31. Схема устройства гидравлического пресса „Альфа“.

выдержки под нагрузкой в течение установленного времени рычаг 4 эксцентрика автоматически поднимается, при помощи рычага 5 поднимает гири и освобождает таким образом образец от основной нагрузки. После этого фрикцион электромотора тоже автоматически выключается. Чтобы снять образец с предметного столика, опускают ходовой винт, вращая ручной маховичок против часовой стрелки.



Фиг. 32. Схема устройства механического пресса „АББ“.

Если не предполагается вести дальнейшие испытания, то электромотор выключают. Сняв образец с пресса, замеряют диаметр лунки обычным способом.

### Рычажный пресс ручного действия типа ПБ-3

Конструкция этого пресса предложена ЦНИИТМАШ. Основное достоинство конструкции пресса заключается в простоте изготовления его, что дает возможность заводам строить такие прессы для своих лабораторий и контрольных отделов в короткие сроки собственными силами. Благодаря этому прессы системы ЦНИИТМАШ в настоящее время быстро распространяются на заводах. Пресс изображен на фиг. 33 и 34.

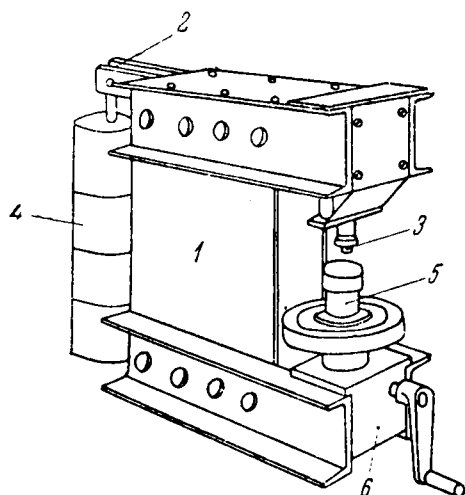
Пресс предназначен для испытаний на твердость по Бринеллю 10-мм шариком под нагрузкой в 3000 кг.

Станина 1 пресса состоит из двух пар прокатных швеллеров и двух вертикальных листов, которые скрепляются болтами. Между верхними швеллерами расположен рычаг 2 второго рода с отношением плеч 1:40.

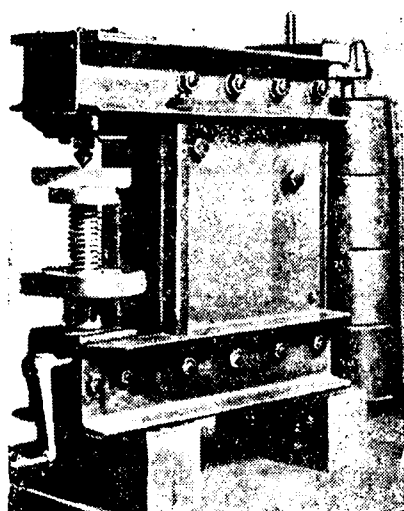
Рычаг состоит из двух скрепленных болтами полос. Ось рычага вращается в шариковых подшипниках.

Плунжер с шариком 3 упирается в призму рычага, к которой он прижимается спиральной пружинкой.

На конце длинного плеча рычага подвешены на тяге цилиндрические чугунные грузы 4 общим весом около 70 кг. Эти грузы



Фиг. 33. Схематическое изображение пресса ПБ-3.



Фиг. 34. Общий вид рычажного пресса ПБ-3.

через посредство рычага развивают необходимое давление на шарик.

Ход рычага ограничивается упором.

Винт предметного столика 5 и гайка, служащая подъемным маховичком, расположены в вылете нижней пары швеллеров. Винт направляется прямоугольной чугунной втулкой 6, плотно опирающейся заплечиками на верхние кромки швеллеров.

Плунжер с шариком поднимается и опускается при помощи подъемного устройства, которое дает возможность плавно поднимать и опускать рычаг с грузами.

Винт подъемного устройства упирается в рычаг двумя роликами (по одному на каждую из двух планок рычага). Для подъема рычага винтом служат пара конических шестерен и валик с рукояткой 7, которая расположена спереди пресса.

Испытания твердости проводятся на прессе в следующем порядке.

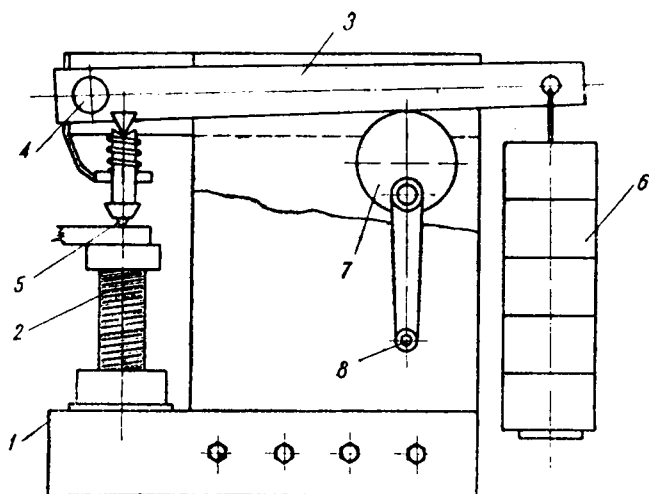
Вращением рукоятки 7 рычаг с грузами поднимают в верхнее положение (до упора). Испытуемое изделие, помещенное на предметный столик, поднимают при помощи ручного маховичка до со-

прикосновения с шариком. Затем при помощи рукоятки 7 рычаг с грузами опускают до тех пор, пока упорные ролики подъемного винта не перестанут поддерживать рычаг. В этом положении шарик давит на испытываемую поверхность с силой в 3000 кг. Сделав под этой нагрузкой необходимую выдержку, начинают медленно поднимать рычаг рукояткой подъемника до упора, затем ручным маховичком отводят испытываемое изделие вниз, снимают его с предметного столика и измеряют диаметр отпечатка.

### Рычажный пресс ручного действия типа ПБ-750

Довольно часто массовый контроль тех или иных деталей на твердость выполняется путем вдавливания в их поверхность 5-мм шарика под нагрузкой в 750 кг.

В этих случаях мощность обыкновенного 3-т пресса Бринелля используется лишь в небольшой степени. Поэтому целесообразнее для таких испытаний применять пресс ручного действия ПБ-750



Фиг. 35. Схема пресса ПБ-750 (см. фиг. 30).

для нагрузок до 750 кг, конструкция которого разработана ЦНИИТМАШ.

Простота изготовления таких прессов и вместе с тем простота обслуживания и надежность в работе обеспечивают этим прессам широкое распространение на наших заводах.

На фиг. 35 схематически изображено устройство пресса (общий вид его показан на фиг. 30). Пресс состоит из трех основных узлов: станины, винта с опорным предметным столиком и нагружающего рычага с грузами.

Станина 1 пресса изготавливается из двух пар прокатных швеллеров и двух вертикальных 6-мм листов, скрепленных болтами. Винт 2 предметного столика получает поступательное движение при вращении гайки ручным маховичком. Нагружающий рычаг 3

с отношением плеч 1 : 40 расположен в промежутке между верхними швеллерами. Ось 4 рычага вращается в шарикоподшипниках. Шпиндель 5 с шариком упирается в призму рычага, к которой прижимается винтовой пружинкой. На конце длинного плеча рычага подвешен набор гирь 6, которые через посредство рычага развивают необходимое давление на шарик. Для подъема и опускания рычага с гирями служит подъемное устройство, состоящее из пары цилиндрических шестерен и эксцентрика 7 с рукояткой 8.

Пресс не имеет литых или сварных деталей. Вес пресса около 36 кг. Габаритные размеры пресса  $585 \times 145 \times 370$  мм. Максимальная высота испытываемых изделий 120 мм, вылет шарика 75 мм.

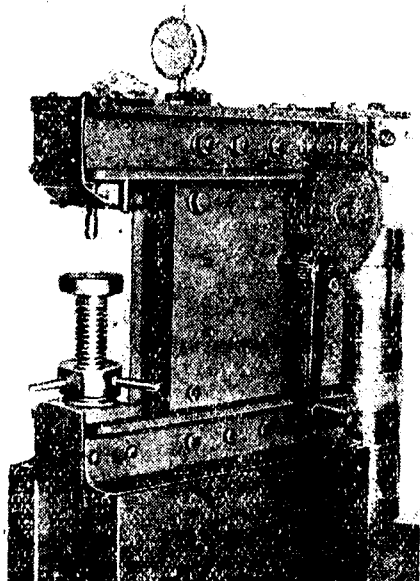
### Конструкция пресса Бринелля типа ПБ-750 А с автоматическим замером отпечатков

При массовых испытаниях деталей на твердость по методу Бринелля возникают затруднения не столько с нанесением отпечатков шариком, сколько с последующим замером этих отпечатков при помощи измерительной лупы или микроскопа. Эта измерительная операция довольно утомительна; поэтому при массовых испытаниях нередко получаются значительные погрешности в результатах измерений, тем более что и вообще точность подобных измерений зависит от субъективных качеств работников, проводящих испытания.

На основе изучения существующих конструкций прессов Бринелля и опыта применения их на заводах ЦНИИТМАШ предложил конструкцию пресса с автоматическим замером отпечатков.

Пресс предназначен для массовых испытаний твердости по Бринеллю 5-мм шариком под нагрузкой в 750 кг.

Автоматический замер производится индикатором; измеряется не диаметр, а разность глубин проникновения шарика под действием двух последовательно приложенных нагрузок (предварительной в 40 кг и окончательной в 750 кг). Этот принцип измерения

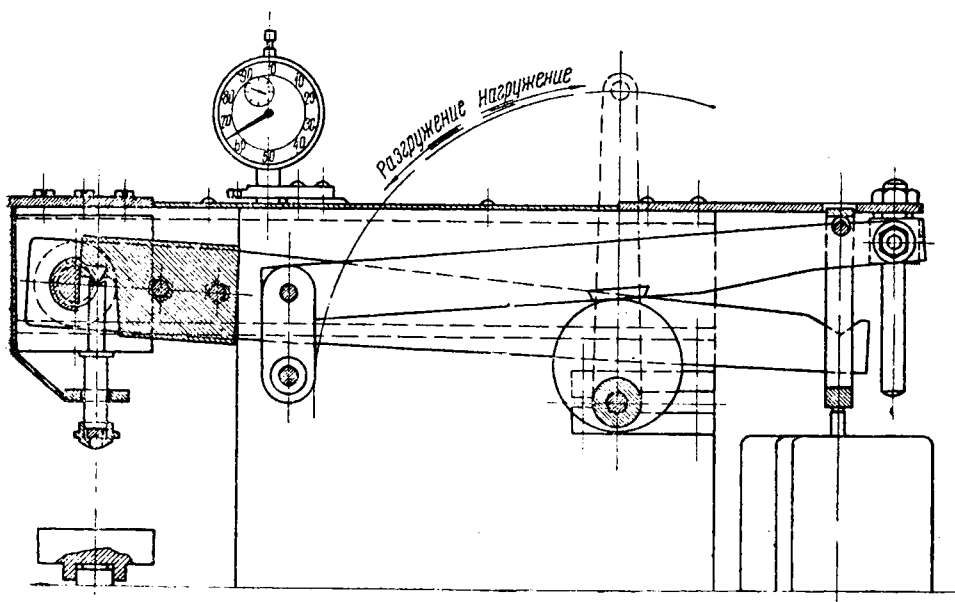


Фиг. 36. Общий вид пресса ЦНИИТМАШ (ПБ-750А) с автоматическим замером отпечатков.

вполне аналогичен с принципом, который применяется при испытаниях по известному методу Роквелла, а конструкция пресса аналогична конструкции прибора Роквелла (см. стр. 51).

На фиг. 36 изображен общий вид пресса, на фиг. 37 — схематический разрез нагружающего устройства.

Большим преимуществом пресса ЦНИИТМАШ является возможность постоянной проверки показаний индикатора по непосредственному замеру отпечатков, которые на прессе ЦНИИТМАШ получаются такого же размера, как на обыкновенных прессах Бринелля.



Фиг. 37. Разрез нагружающего устройства пресса ЦНИИТМАШ.

Вес пресса около 40 кг.

Габаритные размеры его 150 × 360 × 446 мм. Привод ручной; нагрузки передаются при помощи рычажной системы.

Пресс прошел промышленные испытания на большом количестве деталей авиамоторного производства; результаты испытаний вполне удовлетворительны.

Пресс обладает втрое большей пропускной способностью, чем пресс обычной конструкции<sup>1</sup>.

Для обработки деталей пресса ЦНИИТМАШ ПБ-750А не нужны специальные и сложные станки и инструмент. Заводы-потребители могут строить их собственными силами.

<sup>1</sup> На прессы типов ПБ-3, ПБ-750 и ПБ-750А ЦНИИТМАШ по запросам заводов высылает рабочие чертежи и инструкции, а также консультирует заводы, изготавливающие прессы собственными силами.

## ТЕХНИКА ИСПЫТАНИЙ ПО МЕТОДУ БРИНЕЛЛЯ

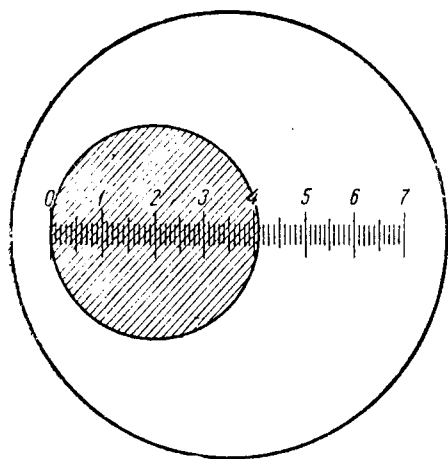
Перед вдавливанием шарика испытываемый образец необходимо в месте вдавливания шарика очистить от окалины, придать ему ровную и гладкую поверхность (это делается обычно наждачным камнем или напильником). Образец должен плотно лежать на предметном столике.

При испытании отливок из серого или ковкого чугуна надо удалять поверхностную корку на глубину не менее чем в 1 мм.

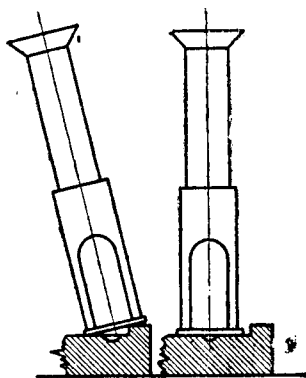
Чтобы лунка не получалась искаженной, испытываемая поверхность должна быть горизонтальной.

Шарик следует нагружать плавно, без толчков.

Диаметр лунки надо промерять по двум взаимно перпендикулярным направлениям и по двум промерам вычислять среднее. При пользовании измерительной лупой отсчеты по ней можно делать с точностью до 0,05 мм; во всяком случае, точность не должна быть ниже 0,1 мм.



Фиг. 38. Отсчеты по бринеллевской лупе.



Фиг. 39. Положение лупы при замерах отпечатков.

Настраивая лупу по глазу, надо прежде всего добиться, чтобы при установке ее на лист белой бумаги отчетливо и резко были видны деления шкалы; каждое малое деление лупы равно 0,1 мм (фиг. 38). Затем ставят лупу на поверхность испытываемого изделия и, поворачивая окуляр, добиваются, чтобы края лунки были резко очерчены.

Передвигая лупу, совмещают края отпечатка с началом шкалы и делают отсчет по диаметрально противоположному краю отпечатка. В положении, изображенном на фиг. 38, отсчет составляет 4,15 мм.

Чтобы избежать искажения результатов замера лунки, всегда следует нижнюю опорную поверхность лупы плотно (без зазоров) ставить на испытываемую поверхность образца. На фиг. 39 изобра-

жено правильное (справа) и неправильное (слева) положения лупы при замере отпечатка.

Если отпечаток не освещается специальной лампочкой (см. фиг. 28), то вырез (окно) в нижней части лупы должен быть при замерах обращен к свету.

Методом Бринелля можно пользоваться только при испытаниях материалов, твердость которых не превышает 450 единиц по Бринеллю. При вдавливании в более твердый образец сам шарик сильно деформируется и отпечаток получается искаженным. Кроме того, размеры лунок на очень твердых образцах получаются весьма малыми, а очертания их нечеткими, что чрезвычайно затрудняет замеры лунок.

Правила испытаний твердости по методу Бринелля установлены ГОСТ 10241-40.

Специальным постановлением ВКС при СНК СССР (№ 134055 от 9/III 1943 г.) в этот ГОСТ внесено дополнение, допускающее на военное время применение шариков в  $13/32''$  (вместо 10 мм) и  $3/16''$  (вместо 5 мм).

В случае применения шарика диаметром в  $13/32''$  можно пользоваться расчетными таблицами твердости, составленными для шарика диаметром в 10 мм, и никаких поправок в получаемые при замерах диаметры лунок не вносить.

В случае применения шарика диаметром в  $3/16''$  можно пользоваться таблицами твердости, составленными для 5-мм шарика, но в измеряемые диаметры лунок надо вводить поправку в +2%.

Один отпечаток от другого на поверхности испытуемого изделия должен отстоять не менее как на удвоенную величину диаметра отпечатка. Минимальная допустимая толщина испытуемых образцов зависит от усилия вдавливания и диаметра шарика. Можно рекомендовать минимальные толщины, указанные в табл. 12.

Т а б л и ц а 12

Минимальная допустимая толщина образцов при испытаниях твердости по методу Бринелля

Диаметр в мм	Нагрузка в кг	Число твердости $H_B$						
		100	120	150	200	300	400	500
		Минимальная толщина образца в мм						
2,5	62,5	0,8	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
	187,5	2,4	2,0	1,6	1,2	0,8	0,6	0,5
5,0	250,0	1,6	1,3	1,1	0,8	0,5	—	—
	750,0	5,0	4,0	3,2	2,4	1,6	1,2	1,0
10,0	1000,0	3,2	2,6	2,1	1,6	1,1	—	—
	3000,0	—	—	6,4	4,8	3,2	2,4	1,9

П р и м е ч а н и е. При составлении таблицы принято, что минимальная толщина образца превосходит глубину отпечатка не менее чем в 10 раз.

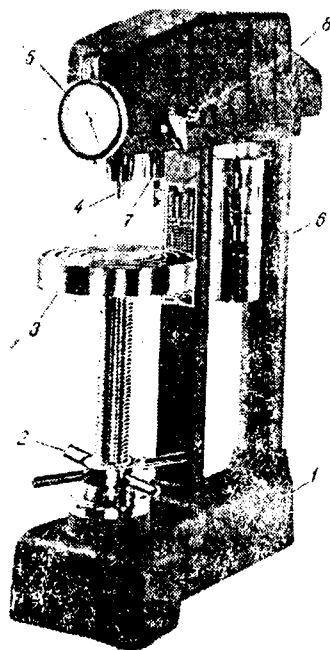
Для определения твердости закаленных сталей способ Бринелля, как было указано, неприменим, так как под очень большим давлением стальной шарик деформируется. Кроме того, по способу Бринелля нельзя испытывать слишком малые образцы, так как пластическая деформация металла в зоне вдавливания шарика распространяется на значительный объем.

В этих случаях для испытания на твердость пользуются способом Роквелла, который является разновидностью способа Бринелля; основной принцип Бринелля — принцип вдавливания — сохранен и у Роквелла.

По методу Роквелла в испытываемую поверхность вдавливается стальной закаленный шарик диаметром в  $\frac{1}{16}$ " или алмазный конус (фиг. 40) с углом при вершине в  $120^\circ$ . К шарiku прилагается нагрузка в 100 кг, а к алмазному конусу в 150 кг. Шариком пользуются для испытания сравнительно мягких материалов, а конусом для испытания твердых материалов. В отличие от испытаний по способу



Фиг. 40. Алмазный конус прибора Роквелла



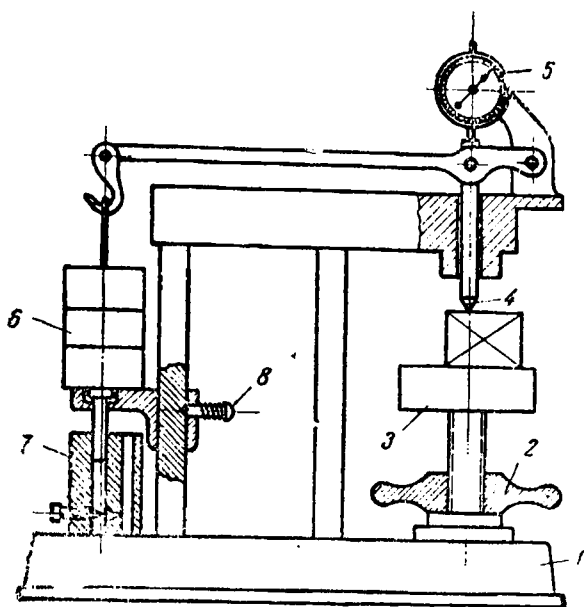
Фиг. 41. Прибор Роквелла фирмы Вилсон (США).

Бринелля при испытаниях по способу Роквелла измеряют не диаметр отпечатка, а его глубину.

Общий вид одной из моделей прибора Роквелла (в выполнении американской фирмы Вилсон) показан на фиг. 41. На этой фигуре обозначены: станина 1; маховичок 2 подъемного винта; предметный столик 3, на который помещается испытуемый образец; шарик или алмаз 4; индикатор 5, показывающий глубину вдавливания; гири 6, которые через систему рычагов передают нажатие на шарик; масляный тормоз 7, служащий для того, чтобы нагрузка на образец передавалась плавно, без рывков; рукоятка 8 для приложения и снятия нагрузки.

На фиг. 42 показана схема устройства прибора Роквелла в конструктивном выполнении фирмы Эйвери. Циферблат индикатора для замеров глубины имеет две шкалы: внутреннюю, красную (шкала В) и внешнюю, черную (шкала С). Первая шкала служит для отсчетов при испытаниях шариком под нагрузкой в 100 кг, вторая — для отсчетов при испытаниях алмазом под нагрузкой в 150 кг.

Каждое деление шкалы Роквелла соответствует глубине проникновения шарика (или алмаза) в испытуемый образец на 0,002 мм. Число твердости по Роквеллу получается путем автоматического вычитания числа делений, на которое углубляется шарик (или алмаз) из 100 (для шкалы С) или из 130 (для шкалы В). Следовательно, чем тверже материал, тем больше для него число твердости по Роквеллу.



Фиг. 42. Схема устройства прибора Роквелла фирмы Эйвери.

чтобы образец плотно лежал на столике. При помощи ручного маховичка 2 образец подводят к шарiku (алмазу) и слегка надавливают на него. Это предварительное надавливание производится с усилием в 10 кг и прилагается каждый раз для того, чтобы избежать ошибок вследствие разницы в состоянии обработки испытуемых поверхностей и в результате неизбежного наличия зазоров (люфтов) в звеньях прибора.

Чтобы установить нажим силой в 10 кг, испытуемое изделие после соприкосновения его с шариком продолжают поднимать до тех пор, пока достижение необходимой нагрузки не будет отмечено на индикаторе 5.

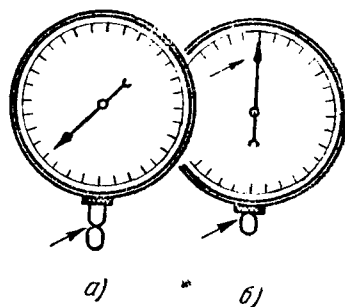
Некоторые индикаторы снабжены для этой цели маленькой стрелочкой, которая при достижении нагрузки на шарик или алмаз в 10 кг совпадает с установочной риской на циферблате индикатора. У индикаторов других конструкций в нижней части шпинделя имеется прорезь (фиг. 43). При достижении нагрузки в 10 кг шпиндель индикатора поднимается настолько, что эта прорезь

совпадает с краем муфты; одновременно большая стрелка индикатора занимает вертикальное положение (допустимо отклонение на 5 делений в ту или другую сторону).

После этого поворотный циферблат индикатора надо установить так, чтобы его стрелка точно совпадала с нулем черной шкалы (С), независимо от того, по какой шкале предполагается вести замеры. Затем при помощи рукоятки 8 освобождают грузы.

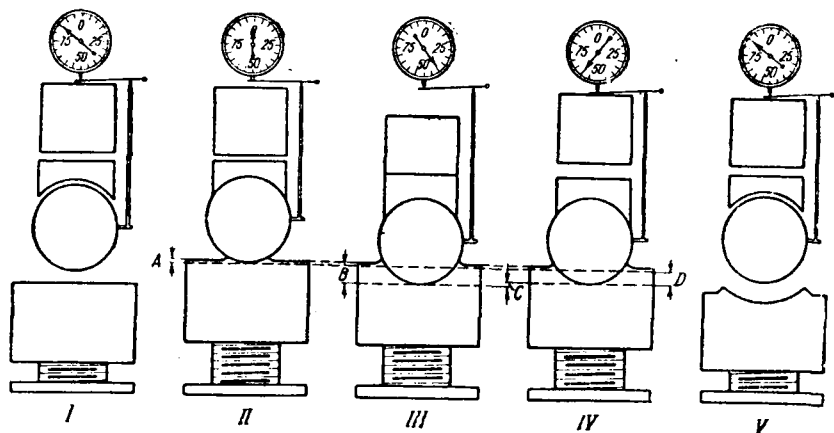
Благодаря наличию масляного тормоза нагрузка на шарик передается плавно и постепенно. Когда нагрузка приложена полностью (об этом свидетельствует остановка стрелки индикатора), нужно при помощи той же рукоятки 8 поднять гири и, не освобождая образец от действия первоначальной нагрузки (10 кг), сделать отсчет показаний индикатора. Это и есть число твердости по Роквеллу.

На фиг. 44 схематически изображены последовательные положения прибора при испытаниях твердости по Роквеллу.



Фиг. 43. Установочная прорезь в шпинделе индикатора:

а — до приложения нагрузки; б — после приложения нагрузки в 10 кг.



Фиг. 44. Различные рабочие положения прибора Роквелла:

I — предварительная нагрузка не приложена, основная нагрузка еще не действует; II — предварительная нагрузка приложена, основная нагрузка еще не действует; III — шарик нагружен общей нагрузкой в 10 кг, IV — основная нагрузка 90 кг снята, нагрузка в 10 кг еще действует; V — вся нагрузка снята.

Ознакомившись с устройством и способом выполнения испытаний на приборе Роквелла, можно точнее определить понятие твердости по Роквеллу.

Степень твердости по Роквеллу определяется величиной разности углублений, полученных от добавочной нагрузки на шарик (алмаз) в 140 (или 90 кг) и от предварительной нагрузки на него в 10 кг. Углубление измеряется с точностью до 0,002 мм; при этом величина в 0,002 мм принимается за единицу измерения.

Числа твердости по Роквеллу получаются путем автоматического вычитания глубины из 100 (для шкалы *C*) или из 130 (для шкалы *B*).

Необходимость вычитания полученного отсчета из 130 (для шкалы *B*) вызывается тем, что глубина вдавливания иногда получается больше 0,2 мм и доходит до 0,26 мм, т. е. стрелка при вдавливании шарика делает больше одного полного оборота (обходит больше 100 делений шкалы). С этой целью и смещают циферблат индикатора на 30 делений от нуля черной (для алмаза) шкалы.

Иногда при работе на приборе Роквелла пользуются алмазным конусом под нагрузкой в 60 кг. К этому прибегают при испытании очень тонких закаленных изделий или твердых сплавов.

При испытаниях по Роквеллу необходимо соблюдать следующие правила.

Стальным шариком (шкалой *B*) следует пользоваться для испытаний материалов с твердостью меньшей  $R_B = 80$ ; алмазом (шкалой *C*) — с твердостью большей  $R_C = 20$ . Чтобы избежать неясностей и ошибок, следует всегда указывать, по какой шкале (*C* или *B*) производились замеры, так как показания шкал различны.

Т а б л и ц а 113

Соотношение между числами твердости по Бринеллю и по Роквеллу

$H_B$	$R_B$ (100)	$R_C$ (150)	$H_B$	$R_B$ (100)	$R_C$ (150)	$H_B$	$R_B$ (100)	$R_C$ (150)
782	—	72	302	—	33	156	82	—
744	—	69	293	—	31	153	81	—
713	—	67	286	—	30	149	80	—
683	—	65	277	—	29	146	78	—
652	—	63	269	104	28	143	77	—
627	—	61	262	103	27	140	76	—
600	—	60	255	102	26	137	75	—
678	—	58	248	101	25	134	74	—
555	—	56	241	100	24	131	72	—
532	—	54	235	99	23	128	71	—
512	—	52	228	98	22	126	69	—
495	—	51	223	97	21	124	68	—
477	—	49	217	97	20	121	67	—
460	—	48	212	96	19	118	66	—
444	—	47	207	95	18	116	65	—
430	—	45	202	94	17	114	64	—
418	—	44	196	93	16	112	62	—
402	—	43	192	92	—	109	61	—
387	—	41	187	91	—	107	59	—
375	—	40	183	89	—	105	58	—
364	—	39	179	88	—	103	57	—
351	—	38	174	87	—	101	56	—
340	—	37	170	86	—	99	54	—
332	—	36	166	85	—	97	53	—
321	—	35	163	84	—	96	52	—
311	—	34	159	83	—	94	51	—

Испытуемый образец должен иметь ровную и гладкую поверхность, плотно стоять на предметном столе и не прогибаться при испытании.

На опорной поверхности образца не должно быть заусенцев, окалины, грязи и пр., что могло бы повлиять на точность измерения глубины углубления алмаза (или шарика).

С алмазным конусом необходимо обращаться особенно осторожно, чтобы не сломать его острия. Алмаз очень хрупок, поэтому надо подводить образец к алмазу медленно и осторожно во избежание ударов.

Правильности показаний прибора следует проверять по контрольным брускам-эталонам, твердость которых по Роквеллу известна. При пользовании эталонами алмаз или шарик следует вдавливать только с одной стороны эталона. Опорная сторона эталона не должна иметь никаких повреждений, в том числе и следов отпечатков от вдавливания алмаза или шарика.

Числа твердости по Роквеллу можно приближенно перевести в числа твердости по Бринеллю, пользуясь данными табл. 13.

В табл. 14 приведена примерная форма записи в протокол испытаний на твердость по способу Бринелля и по способу Роквелла.

Таблица 14

ЦНИИТМАШ  
Лаборатория испытания  
материалов

Кому . . . . .  
К работе № . . . . .  
Основание . . . . .  
Доставленные в лабораторию образцы . . . . .  
в количестве... шт. были испытаны на твердость  
При испытаниях получены следующие результаты

№ по порядку	Клеймо образца	Твердость по . . . . . Пуансон . . . . .				Шкала . . . . . Нагрузка . . . . .				Средняя	Примечание
		Диаметр отпечатка				Число твердости					
		1-й отпе- чаток	2-й отпе- чаток	3-й отпе- чаток	4-й отпе- чаток	1-й отпе- чаток	2-й отпе- чаток	3-й отпе- чаток	4-й отпе- чаток		
1											
2											
3											
4											
20											

\_\_\_\_\_ 194 г.

Нач. лаборатории (подпись)

Работу производил (подпись)

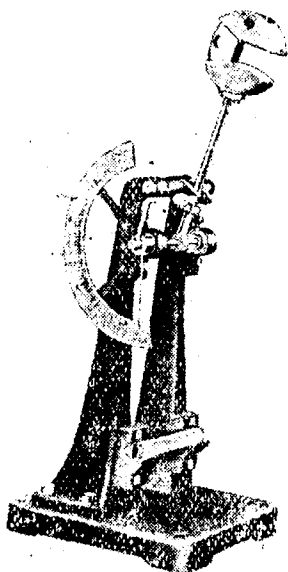
## ИСПЫТАНИЯ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

При испытаниях на растяжение или сжатие, производимых под действием статической (медленно возрастающей) нагрузки, нельзя судить о стойкости металла под действием удара — о степени его хрупкости. Между тем многие детали подвергаются в условиях эксплуатации изделий действию ударной (динамической) нагрузки, и материал, при испытаниях которого статической нагрузкой получаются хорошие результаты, может оказаться не пригодным для работы под ударной нагрузкой.

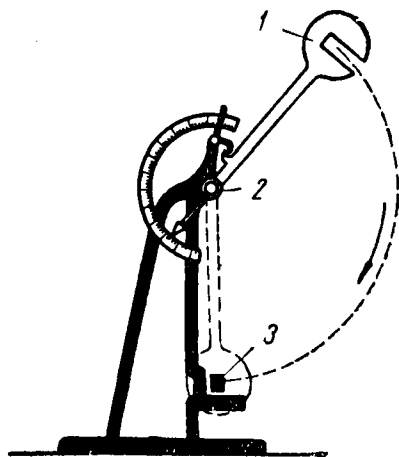
Самым распространенным способом испытания на ударную вязкость является испытание надрезанных образцов на изгиб. Он заключается в том, что образец прямоугольного поперечного сечения с надрезом посередине помещают концами на две опоры и ударом падающего маятника ломают пополам. При этом отмечают работу, которая потребовалась для разрушения образца. Чем больше работа разрушения, тем вязче материал.

## МАЯТНИКОВЫЙ КОПЕР ШАРПИ

Испытания на ударную вязкость производятся на маятниковом копере Шарпи (фиг. 45). Схема устройства этого прибора показана на фиг. 46. Массивный плоский маятник 1 определен-



Фиг. 45. Общий вид маятникового копра Шарпи.



Фиг. 46. Схема устройства копра Шарпи.

ного веса может качаться вокруг горизонтальной оси 2. Испытуемый образец 3 помещается на опорах так, что нож маятника касается образца в тот момент, когда маятник занимает отвесное

положение. Перед испытанием маятник поднимают в верхнее положение, в котором он удерживается защелкой. Положив образец на опоры копра, поднимают защелку и маятник сбрасывается из верхнего положения. Маятник опускается с возрастающей скоростью, которая в момент встречи с образцом достигает максимальной величины. Ударяясь об испытуемый образец 3, маятник ломает его и по инерции поднимается на некоторый угол в другую сторону. Если вес маятника равен  $Q$  кг и высота, на которую он поднят, составляет  $H$  м, то запас энергии, которым обладает маятник в верхнем положении, определяется произведением

$$P = Q \cdot H \text{ кгм.} \quad (17)$$

Допустим, что после излома образца маятник поднимется в другую сторону на высоту  $h$  м. Произведение  $Q \cdot h$  кгм представляет собой энергию, которая осталась неиспользованной при изломе образца. Следовательно, весь первоначальный запас работы  $Q \cdot H$  можно расчитать на две части: 1) работа, затрачиваемая на разрушение образца, и 2) работа, затрачиваемая на подъём маятника в другую сторону. Зная всю работу маятника ( $Q \cdot H$ ) и работу, не израсходованную при изломе образца ( $Q \cdot h$ ), можно вычислить работу, затраченную на излом образца

$$I = (Q \cdot H) - (Q \cdot h) = Q(H - h) \text{ кгм.} \quad (18)$$

Для характеристики материала величину работы разрушения делят на площадь поперечного сечения образца, выраженную в квадратных сантиметрах,

$$a_k = \frac{I}{F_0} = \frac{Q(H - h)}{F_0} \text{ кгм/см}^2. \quad (19)$$

Величина  $a_k$  носит название ударной вязкости.

Таким образом ударная вязкость материала характеризуется величиной разрушающей работы, приходящейся на  $1 \text{ см}^2$  поперечного сечения образца в месте излома.

Особо следует отметить, что при ударных испытаниях площадь поперечного сечения образца принято выражать в квадратных сантиметрах в отличие от всех прочих видов механических испытаний, при которых площади выражаются в квадратных миллиметрах.

В маятниках Шарпи непосредственно измеряется не высота, а угол, на который поднят маятник, и угол его взлета в другую сторону. Зная длину маятника  $L$ , высоту подъема можно выразить через угол подъема следующим образом:

$$H = L[1 + \cos(180 - \alpha_1)] \quad (20)$$

и

$$h = L(1 - \cos \alpha_2), \quad (21)$$

где  $\alpha_1$  — угол первоначального подъема маятника (величина постоянная для данного копра);

$\alpha_2$  — угол подъема маятника после разрушения образца (отмечается при испытании).

Подставляя значение  $H$  и  $h$  в выражение (19) для работы, затраченной на разрушение образца, получаем:

$$I = Q(H - h) = QL\{\cos(180^\circ - \alpha_1) + \cos \alpha_2\} \text{ кгм.} \quad (22)$$

В выражении (22) произведение  $Q \cdot L$  — величина постоянная для каждого маятникового копра, угол  $\alpha_1$  — тоже имеет постоянную величину. Меняется, следовательно, только угол  $\alpha_2$ .

Таким образом для определения разрушающей работы надо отметить только величину  $\alpha_2$ .

Для упрощения и расчетов каждый копер снабжается таблицей, в которой приводятся значения разрушающей работы для различных углов  $\alpha_2$ .

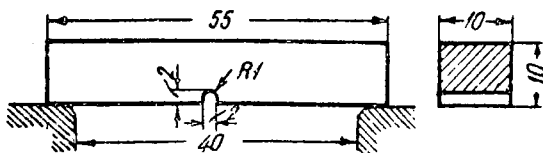
Копры Шарпи обычно имеют первоначальный запас энергии маятника в 15 или 30 кгм. Реже изготавливаются копры, у которых запас энергии маятника меньше или больше.

### ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

Форма и абсолютные размеры образца оказывают весьма сильное влияние на результаты испытаний на ударную вязкость. Особенно большое значение имеет форма и глубина надреза на образце. Чем глубже и острее надрез, тем меньшее значение ударной вязкости получается при испытании.

Поэтому строгое соблюдение предписанных техническими условиями формы и размеров образцов совершенно необходимо. Недопустимо сравнивать между собой величины ударной вязкости образцов разной формы или размеров. Указывая величину ударной вязкости, необходимо отметить, на каком образце производились испытания.

Согласно требованиям ГОСТ 1524-42 и большинства технических условий, для испытаний на ударную вязкость применяется образец формы Менаже (фиг. 47). В редких случаях для специальных исследований применяют другие образцы; при этом обязательно делаются соответствующие оговорки.



Фиг. 47 Образец формы Менаже.

Вводить какие-либо поправки для перевода величин ударной вязкости, полученных на разных образцах, невозможно, так как соотношения эти различны для сталей разных марок и разных состояний.

Интересно отметить «парадоксальные» результаты, полученные проф. Некрытым при испытании на ударную вязкость одной и той

же стали на различных по величине образцах<sup>1</sup>. Для стали, содержащей 0,33% С, после перегрева получились результаты, приведенные в табл. 15.

Таблица 15

№ по порядку	Размеры образца по торцу в мм		Сечение в месте надреза в см <sup>2</sup>	Работа разрушения (общая) в кгм
	высота	ширина		
1	30	30	$3,0 \times 1,5 = 4,5$	9,43
2	30	15	$1,5 \times 1,5 = 2,25$	18,10
3	15	30	$3,0 \times 7,5 = 2,25$	14,02
4	15	15	$1,5 \times 7,5 = 1,125$	7,04

При этом радиус закругления для надреза ( $r = 1$  мм) и длина образцов (160 мм) были одни и те же у всех образцов. Для разрушения больших образцов потребовалось в два раза меньшая работа, чем для разрушения аналогичных образцов с меньшей (вдвое) площадью сечения. Указанная парадоксальность была отмечена при испытании только указанной стали.

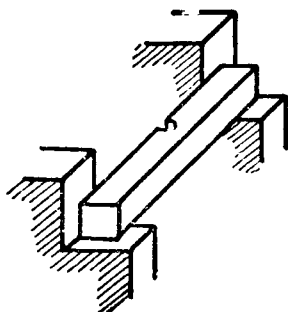
Особое внимание следует обратить на тщательность выполнения надреза. Лучше всего делать надрез на сверлильном или фрезерном, в крайнем случае на строгальном станке.

Клеймить образцы лучше всего на торцах.

### ТЕХНИКА ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

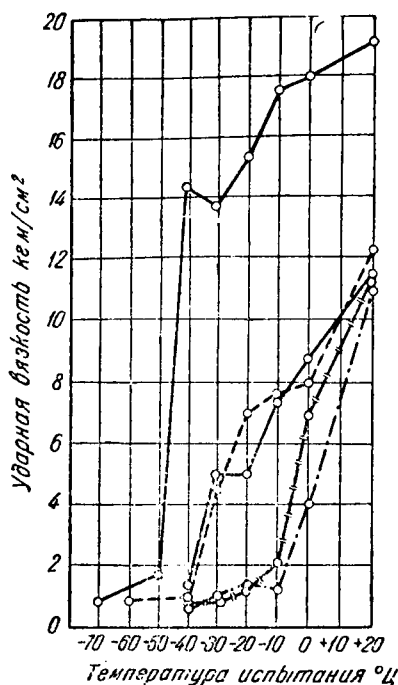
Образцы замеряют штангенциркулем или микрометром в месте выточки с точностью до 0,05 мм. Результаты обмера заносят в протокол испытаний (табл. 16). Если испытывается партия образцов, то рекомендуется сразу замерить и записать в протокол размеры всех образцов (до 30—50 шт.).

Не поднимая маятник в верхнее положение, устанавливают образец на опоры так, чтобы нож маятника касался образца со стороны, противоположной выточке (фиг. 48). При этом надо следить, чтобы выточка приходилась по середине пролета, в плоскости ножа маятника. Для испытания нормального образца Менаже расстояние между опорами устанавливают в 40 мм. Только после установки образца маятник поднимают в верхнее положение (на защелку). Стрелку, укрепленную на оси маятника, поворачивают вверх до



Фиг. 48. Положение образца на опорах копра.

<sup>1</sup> „Теория и практика металлургии“ № 12, 1937.



Фиг. 49. Изменение величины ударной вязкости стали в зависимости от температуры испытания.

НКТМ  
ЦНИИТМАШ  
Лаборатория  
испытания материалов

### Протокол испытаний

Доставленные в лабораторию . . . . . образцы типа Менаже в количестве . . . . . шт. были испытаны на ударную вязкость; при испытаниях получены следующие результаты  
(копер на 15 кгм, расстояние между осями 40 мм:)

№ по пор.	Клеймо образца	Размеры образца в плоскости надреза до испытания			Температура испытания в °C	Угол перелета маятника в градусах	Работа разрушения в кгм	Удельная работа в кгм/см²	Примечание
		высота в см	ширина в см	площадь в см²					
1	1406	0,800	0,990	0,79	+22	125	2,9	3,7	Излом хрупкий
2	1407	0,800	0,970	0,78	+22	122	3,3	4,3	То же
3	1388	0,860	1,002	0,86	+22	134	1,9	2,2	..

Нач. лаборатории (подпись)

Испытание производил (подпись)

упора. В этом положении она должна совпадать с нулевым делением шкалы.

Затем, подняв защелку вверх, освобождают маятник, который падает, разбивает образец и поднимается на некоторый угол в другую сторону («угол перелета»). Этот угол отмечается по шкале. Чтобы затормозить маятник, качающийся после излома образца, пользуются ременным тормозом.

Отметив угол подъема маятника после разрушения образца, записывают его в протокол испытаний. После того как все образцы данной партии испытаны, в таблице по полученным углам перелета находят соответствующие значения работы и тоже записывают их в протокол. Вычислив площадь поперечного сечения образца, делят на нее соответствующие значения работы разрушения. Площадь следует

Таблица 16

Кому . . . . .  
К работе № . . . . .  
Основание . . . . .

вычислять с точностью до  $0,01 \text{ см}^2$ , ударную вязкость с точностью до  $0,1 \text{ кгм/см}^2$ .

Протокол испытаний можно рекомендовать вести по форме, приведенной в табл. 16.

При изломе образца его половинки могут с силой отлетать в стороны и причинить ранение работающему на копре лаборанту. Поэтому копры обычно окружают специальными ограждениями.

Температура помещения, в котором производятся испытания, должна быть в пределах от  $+15$  до  $+25^\circ$ . Температура может оказать очень сильное влияние на величину ударной вязкости. На фиг. 49 показан график изменения ударной вязкости для мягкой углеродистой стали разных заводов в зависимости от температуры. Как видно из фигуры, с понижением температуры величина вязкости сильно понижается. Если температура помещения выходит за указанные выше пределы, то образцы следует нагреть или охладить до  $+20^\circ$  в воде, после чего поочередно вынимать их из ванны и разбивать на копре.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### Глава I

#### Испытания на растяжение

	Стр.
Диаграмма растяжения . . . . .	3
Характеристики металла, получаемые при испытании на растяжение . . .	4
Машины для испытаний на растяжение . . . . .	6
Гидравлическая машина Амслера . . . . .	7
Пресс Гагарина . . . . .	8
Машина ЦНИИТМАШ с большой диаграммной записью типа ИМ-4А . . . . .	11
Общие требования, предъявляемые к испытательным машинам . . .	16
Образцы для испытаний на растяжение . . . . .	17
Формы и размеры образцов . . . . .	17
Обработка поверхности и клеймение образцов . . . . .	20
Подготовка образцов к испытанию . . . . .	20
Техника испытаний на растяжение . . . . .	21
Процесс испытания . . . . .	21
Определение предела пропорциональности по диаграмме растяжения	23
Определение предела текучести по диаграмме растяжения . . . . .	24

### Глава II

#### Испытание чугунов на сжатие

Характеристики, получаемые при испытании на сжатие . . . . .	25
Требования, предъявляемые к образцу . . . . .	26
Требования, предъявляемые к испытательной машине . . . . .	28
Техника испытаний на сжатие . . . . .	30

### Глава III

#### Испытания чугунов давлением клиньев (по Людвику)

Методика испытаний . . . . .	31
Техника испытаний давлением клиньев . . . . .	32

## Глава IV

### Испытания на твердость

	Стр.
Способ Бринелля . . . . .	36
Конструкция прессов Бринелля . . . . .	41
Гидравлический пресс типа „Альфа“ . . . . .	41
П есс Бринелля с механическим приводом типа АББ . . . . .	43
Рычажный пресс ручного действия типа ПБ-3 . . . . .	44
Рычажный пресс ручного действия типа Г.Б-750 . . . . .	46
Конструкция п, есса Бринелля типа ПБ-750 А с автоматическим замером отпечатков . . . . .	47
Техника испытаний по методу Бринелля . . . . .	49
Способы Роквелла . . . . .	51

## Глава V

### Испытания на ударную вязкость

Маятниковый копер Шарни . . . . .	56
Образцы для испытаний на ударную вязкость . . . . .	58
Техника испытаний на ударную вязкость . . . . .	59

---

Отв. редактор И. Ф. Гринберг      Техн. редактор Е. Д. Гракова

Сдано в произв. 9/IV 1944 г. Подпущено в печать 25/VII 1944 г. Печ. лист. 4.

Уч.-издат. л. 4,8.      Тираж 8 000      Формат бум. 60×92 1/8

Л73777      В печ. л. 41000 зн      Зик № 416

13-я тип. треста „Полиграфкнига“ ОГИЗ при С НК РСФСР,  
Москва, Денисовский, 30