

Санкт-Петербургский Государственный Университет  
Saint-Petersburg State University

Кафедра теории упругости

**ОТЧЕТ**  
**По лабораторной работе 1**  
«Испытание на растяжение»

По дисциплине  
«Лабораторный практикум, лабораторная работа»

Выполнили:

Баталов С. А.  
Хайретдинова Д. Д.

Санкт-Петербург  
2021

# 1 Цель работы

При малых деформациях и нагрузках почти все материалы обнаруживают свойство упругости, то есть деформации образца обратимы и исчезают после снятия нагрузки. Многие материалы подчиняются при этом закону Гука, то есть удлинение образца прямо пропорционально приложенной нагрузке. При больших нагрузках деформации становятся необратимыми, и начинают работать сложные механизмы развития деформаций. Изучение закономерностей поведения материалов за пределами упругости очень важно для практики, так как оно дает ответ на вопрос о допустимых напряжениях в деталях из данного материала. В данной работе испытываются металлические образцы при комнатной температуре, когда основным механизмом развития деформаций за пределами упругости является пластичность.

В данной лабораторной работе производится испытание образцов на растяжение с деформациями за пределами упругости. Строятся условная и истинная диаграммы растяжения и находятся механические характеристики материалов.

## 2 Характеристики напряженно-деформированного состояния образца

Рассмотрим стержень длины  $l_0$  с площадью поперечного сечения  $F_0$ . Пусть стержень растягивается силой  $P$  и при этом удлиняется на  $\Delta l$ . При удлинении стержня происходит его поперечное сужение, поэтому площадь его поперечного сечения становится равной  $F < F_0$ . Условным напряжением  $\sigma$  называют отношение нагрузки к первоначальной площади поперечного сечения:

$$\sigma = \frac{P}{F_0}. \quad (1)$$

Истинным напряжением называют величину  $S$  – отношение нагрузки к текущей площади поперечного сечения, рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{P}{F}. \quad (2)$$

Поле деформаций в образце характеризуется относительным удлинением образца и относительным сужением образца, рассчитываются соответственно:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%, \quad \psi = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100\%. \quad (3)$$

В формулах (3) изменение длины и площади поперечного сечения относятся к первоначальным значениям длины и площади сечения. Для характеристики больших деформаций по аналогии с истинным напряжением целесообразно ввести истинные удлинения и истинные сужения:

$$\begin{aligned} de = \frac{dl}{l} &\Rightarrow e = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \epsilon), \\ d\bar{\psi} = -\frac{dF}{F} &\Rightarrow \bar{\psi} = \int_F^{F_0} \frac{dF}{F} = \ln\left(\frac{F_0}{F}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

В отличие от относительного удлинения  $\epsilon$ , логарифмическая деформация обладает свойством аддитивности. Кроме того, формулой (4) можно пользоваться и при малых деформациях: разлагая логарифмы в ряд и удерживая первый член, в этом случае найдём, что  $e \approx \epsilon$ .

В нашей задаче сечение стержня представляет из себя круг диаметра  $d$ . Расчет площади  $F$  поперечного сечения в таком случае производится по формуле:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (5)$$

## 3 Описание аппаратуры

### 3.1 Машина ИМ-4Р

Машина ИМ-4Р предназначена для испытания цилиндрических и плоских образцов на растяжение прямым нагружением. Кроме того, при помощи специальных приспособлений можно проводить испытания на сжатие, изгиб и срез. Машина позволяет прикладывать к образцу нагрузку до 4 т. В процессе испытания автоматически строится диаграмма в координатах «нагрузка–деформация».

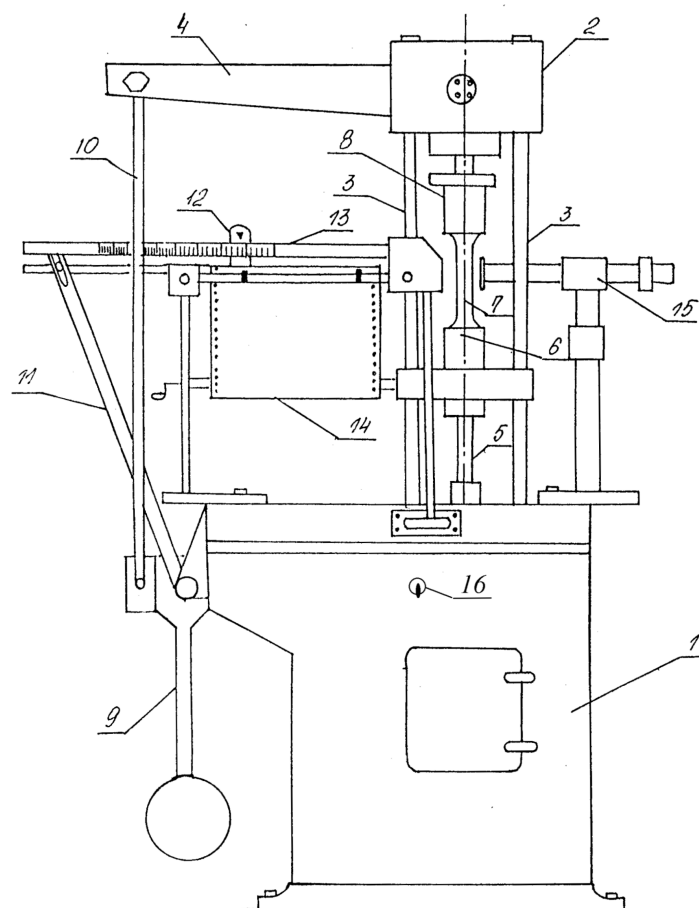


Рис. 1: Машина ИМ-4Р.

Устройство машины показано на рис. 1. Машина состоит из нагружающего и измерительного механизмов, смонтированных на станине. Станина состоит из нижней (1) и верхней (2) частей, соединенных четырьмя вертикальными стойками (3). В нижней части станины установлен электродвигатель.

При работе электродвигателя движение через коробку передач передается шпинделю (5). Движение шпинделя вниз соответствует рабочему ходу (нагрузке), а движение вверх – холостому ходу (разгрузке). На шпинделе установлен нижний захват (6) для крепления образца (7). верхний конец образца крепится в захвате (8), связанном с механизмом силоизмерителя.

Силовой измерительный механизм состоит из рычага (4), связанного тягой (10) с маятником (9). Отклонение маятника через поводок (11) передается на каретку (12) самописца.

Машина снабжена самописцем (14), позволяющим в процессе испытания строить диаграмму «нагрузка – абсолютное удлинение». Валик самописца связан через систему шестерен со шпинделем нагружающего механизма, поэтому по продольной оси диаграммы откладывается перемещение нижнего захвата (то есть абсолютное удлинение образца). Перо самописца укреплено в каретке (12), соединенной с силоизмерителем. Таким образом, по поперечной оси диаграммы откладывается есть действующее на образец усилие. Цена деления самописца: 1 мм диаграммы по продольной оси соответствует удлинению образца на 0.01 мм, 1 мм диаграммы по поперечной оси соответствует нагрузке 10 кг. Для измерения диаметра образца в процессе испытания служит окуляр–микрометр (15).

### 3.2 Окуляр–микрометр

Окуляр–микрометр (рис. 2) состоит из зрительной трубки (1), которую можно поднимать и опускать по вертикали рифленой гайкой (3) и наводить по горизонтали винтом (5). Замеры выполняются по шкале (а) и барабану (2). Для удобства наблюдения образец подсвечивается лампой, снабженной металлическими шторками.

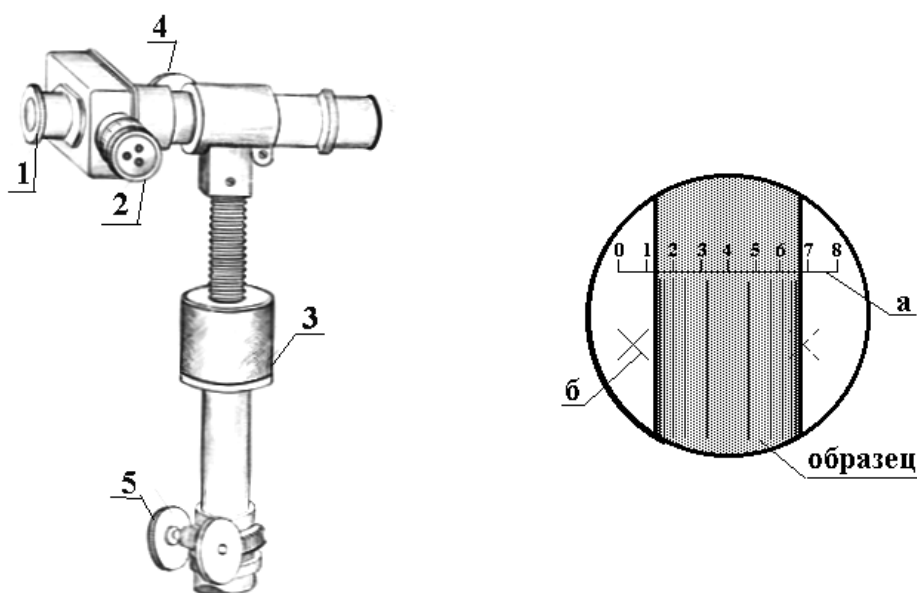


Рис. 2: Окуляр–микрометр.

Для снятия показаний с окуляр-микрометра требуется вычислить коэффициент  $K$  по следующей формуле:

$$K = \frac{d_0}{d'_0} \quad (6)$$

Здесь диаметр  $d'_0$  – диаметр, измеренный окуляр–микрометром. Теперь диаметр образца в момент времени  $t$  будет вычисляться по формуле:

$$d_t = K \cdot d'_t \quad (7)$$

## 4 Эксперимент

Работа проводилась на испытательной установке ИМ-4Р. Производилась деформация железного стержня (рис. 3), начальные размеры которого равны  $d_0 = 5.4$  мм и  $l_0 = 43$  мм. Важно отметить, что все вычисления и построения производились с помощью пакета Matlab, с исходным кодом программы можно ознакомиться отдельно.

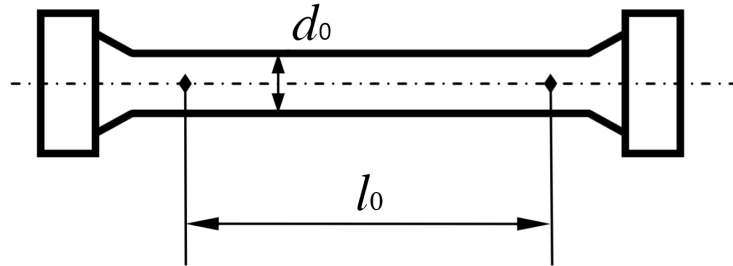


Рис. 3: Эскиз стержня.

Регистрация диаметра стержня в процессе нагружения осуществлялась окуляр-микрометром (все результаты измерений представлены в таблице 3). Для снятия показаний с данного прибора нужно использовать формулу (7), требуется также найти коэффициент пропорциональности по формуле (6), и для предоставленного окуляр-микрометра он равен  $K = 0.63$ . Составим таблицу начальных данных:

Таблица 1: Начальные данные.

$d_0$		$l_0$		$K$
mm		mm		
5.3	5.4	42.8	43	0.63
5.6		43.0		
5.2		43.2		

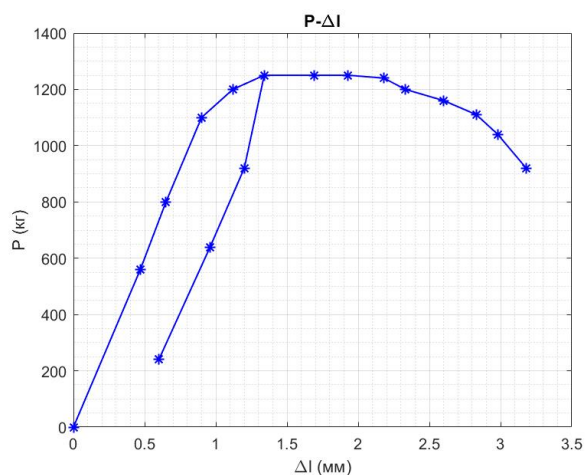
Пользуясь средствами пакета Matlab, построим графики напряженно-деформированного состояния в разных координатах (рис. 4). Данные во всех отмеченных на графиках точках указаны в таблице 3.

Снятая с машины диаграмма в координатах  $P - \Delta l$  изображена на графике (4a). Отчетливо виден линейный участок и участок упрочнения. В ходе эксперимента образец после небольшой пластической деформации разгружался, этот этап также изображен на диаграмме. При повторном нагружении материал обнаружил более высокий предел пропорциональности и меньшие пластические деформации, такое изменение механических характеристик называется наклепом.

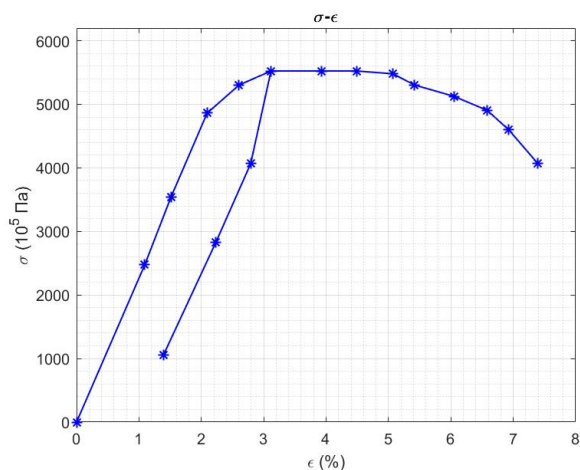
Следующая диаграмма (4b) представлена в координатах  $\sigma - \epsilon$ . Она совпадает с предыдущей диаграммой с точностью до сжатия (растяжения) осей.

Далее изображена диаграмма (4c) в координатах  $S - \psi$ . Здесь  $S$  — отношение нагрузки к текущей площади поперечного сечения,  $\psi$  — относительное сужение образца.

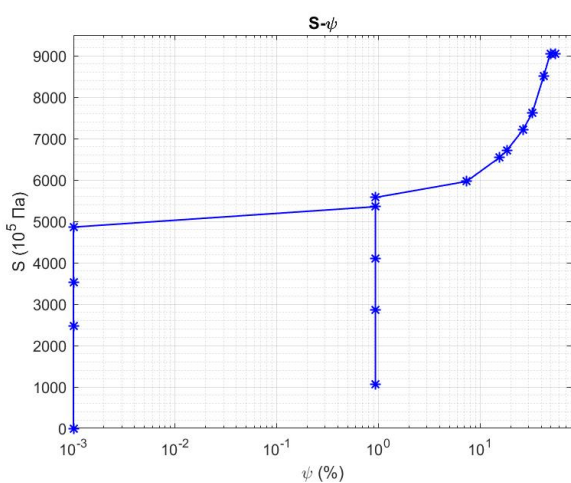
Следующий график (4d) представлен в координатах  $S - e$ . Здесь  $e$  — истинное относительное удлинение. Видно, что напряжение в самой узкой части стержня растет, несмотря на уменьшение прилагаемой растягивающей силы.



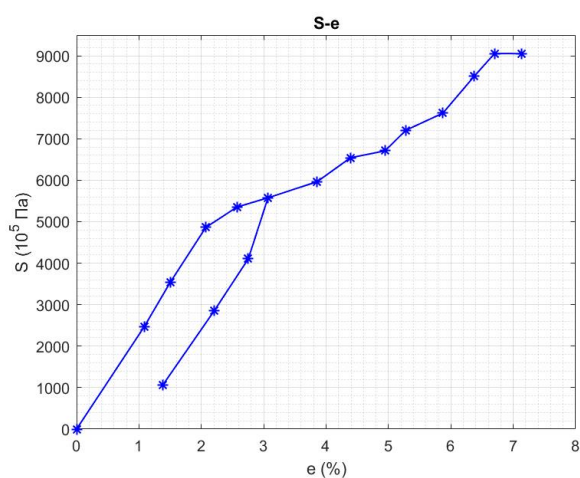
(a) Координаты  $P - \Delta l$ .



(b) Координаты  $\sigma - \epsilon$ .



(c) Координаты  $S - \psi$ .



(d) Координаты  $S - \epsilon$ .

Рис. 4: Диаграммы растяжения в различных координатах.

Используем полученные диаграммы для того, чтобы найти предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пр}}$  при первом и повторном нагружениях, предел текучести  $\sigma_{0.2}$ , предел временного сопротивления разрыву  $\sigma_{\text{вр}}$ , остаточное относительное сужение  $\psi$  при разрыве образца, упругую и пластическую деформации в узловой точке диаграммы.

Таблица 2: Пределы нагружения.

$\sigma_{\text{пр}}$		$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{\text{вп}}$	$\psi$
1	2			
кг/см <sup>2</sup>				%
4425	5524	5044	5575	55.1

## 5 Выводы



Таблица 3: Результаты измерений и расчеты.

№	$P$	$\Delta l$	$d'$	$d$	$F$	$\sigma$	$S$	$\epsilon$	$\psi$	$e$	$\overline{\psi}$
	кг	мм	мм	мм	мм <sup>2</sup>	кг/см <sup>2</sup>	кг/см <sup>2</sup>	%	%	%	%
1	0	0	8.52	5.4	22.6	0	0	0	0	0	0
2	560	0.47	8.52	5.4	22.6	2475	2475	1.1	0	1.1	0
3	800	0.65	8.52	5.4	22.6	3535	3535	1.5	0	1.5	0
4	1100	0.9	8.52	5.4	22.6	4861	4861	2.1	0	2.1	0
5	1200	1.12	8.48	5.3	22.4	5303	5353	2.6	0.9	2.6	0.9
6	1250	1.34	8.48	5.3	22.4	5524	5576	3.1	0.9	3.1	0.9
7	920	1.2	8.48	5.3	22.4	4066	4104	2.8	0.9	2.8	0.9
8	640	0.96	8.48	5.3	22.4	2828	2855	2.2	0.9	2.2	0.9
9	240	0.6	8.48	5.3	22.4	1061	1071	1.4	0.9	1.4	0.9
10	640	0.96	8.48	5.3	22.4	2828	2855	2.2	0.9	2.2	0.9
11	920	1.2	8.48	5.3	22.4	4066	4104	2.8	0.9	2.8	0.9
12	1250	1.34	8.48	5.3	22.4	5524	5576	3.1	0.9	3.1	0.9
13	1250	1.69	8.2	5.2	21	5524	5964	3.9	7.4	3.9	7.7
14	1250	1.93	7.83	4.9	19.1	5524	6541	4.5	15.5	4.4	16.9
15	1240	2.18	7.7	4.9	18.5	5480	6709	5.1	18.3	4.9	20.2
16	1200	2.33	7.31	4.6	16.7	5303	7204	5.4	26.4	5.3	30.6
17	1160	2.6	6.99	4.4	15.2	5126	7616	6	32.7	5.9	39.6
18	1110	2.83	6.47	4.1	13	4905	8506	6.6	42.3	6.4	55
19	1040	2.98	6.07	3.8	11.5	4596	9055	6.9	49.2	6.7	67.8
20	920	3.18	5.71	3.6	10.2	4066	9052	7.4	55.1	7.1	80