

11. Крутина Е.В., Калпин Ю.Г. Определение пластичности металлов методом комбинированного поперечного выдавливания и высадки / Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 2. № 2 (14). С. 95 – 98.
12. Filipov Yu.K., Kalpin Yu.G., Ragulin A.V., Zaicev A., Anfimov Yu.N. Developing of technological process for the cold forging of thin-walled bushes with regard of plastic properties. 46th ICFG Plenary Meeting 2013, 15th – 18th September Paris, France.

### **Исследование трубчатых образцов на растяжение (плоская деформация)**

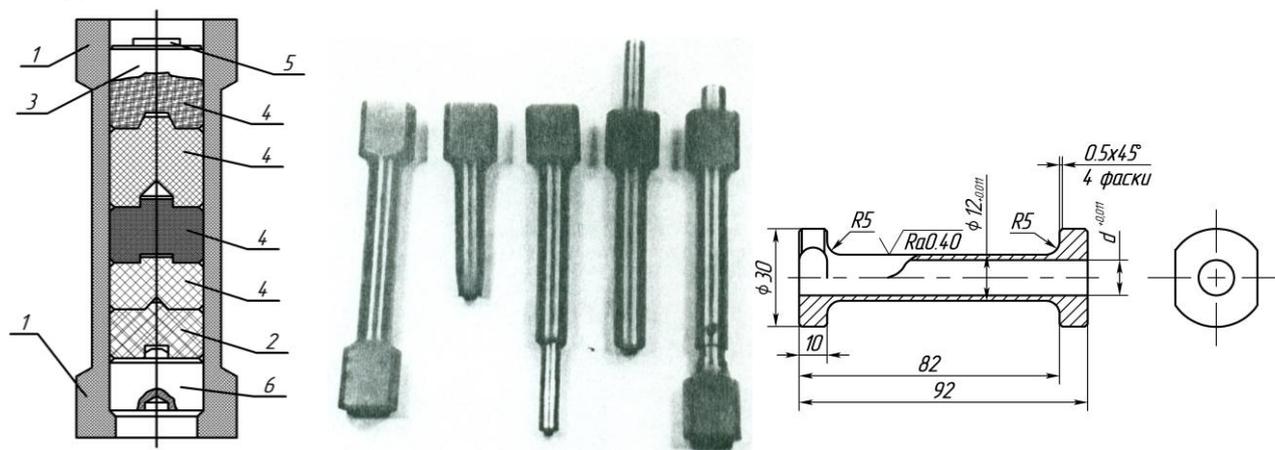
Филиппов Ю.К., Зайцев А.Г.  
 Университет машиностроения  
 8 (495) 223-05-23 [kiod@mami.ru](mailto:kiod@mami.ru)

*Аннотация.* Описана методика исследования плоскодеформированного состояния материала путем растяжения трубчатого образца на оправке. Проведены эксперименты и представлены графики изменения толщины растягиваемого образца. Показано изменения деформации разрушения в зависимости от толщины стенки растягиваемого образца для материалов 20Х и Д16.

*Ключевые слова:* плоская деформация, растяжение трубчатого образца, изменение толщины, деформация разрушения.

Точные экспериментальные исследования по определению свойств материала являются основой для последующих расчетов технологических процессов как в аналитическом виде, так и в численном, с помощью специальным программных продуктов. В зависимости от напряженно деформированного состояния параметры штамповки могут существенно меняться. В связи с этим количество методик исследований свойств материала постоянно растет [5 – 10].

Теоретически можно представить себе несколько вариантов осуществления испытания на растяжение при плоском деформированном состоянии, однако наиболее удобным представляется растяжение трубчатых образцов на оправке (при достаточно малой толщине стенки трубки).



**Рисунок 1. Трубчатый образец с оправками**

Тонкостенные трубчатые образцы применяются для построения кривых упрочнения при кручении и растяжении. В некоторых случаях используются оправки (обычно при кручении) для предотвращения потери устойчивости образца. П. Бриджмен использовал трубчатые образцы для испытания пластичности металлов при растяжении, однако без применения оправки [1]. На стадии устойчивой деформации образец растягивается с уменьшением диаметра трубки и его напряженное состояние, по-видимому, близко к линейному. После обра-

зования шейки напряженное состояние становится объемным, а деформированное – близко к плоскому.

На рисунке 1 показан трубчатый образец и оправки используемые в настоящей работе. Поскольку внутренний диаметр таких образцов при растяжении не изменяется и равен диаметру оправки, а толщина стенки трубки мала по сравнению с ее диаметром, можно считать, что на стадии устойчивого растяжения деформированное состояние металла близко к плоскому. При этом:

$$\sigma_z = 115\sigma_i; \quad \sigma_p = 0; \quad \sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_p) = 0,58\sigma_i; \quad K = 0,58.$$

Образец содержит захватные головки 1 для крепления рабочей части 2 образца, расположенный внутри образца составной цилиндр 3 или сплошной, состоящий из соосных между собой элементов.

После образования шейки напряженное состояние становится объемным; деформированное состояние продолжает оставаться плоским. Рассмотрим напряженное состояние в зоне максимального утонения стенки трубки, полагая, что поверхность этой зоны близка к сферической, и принимая следующие допущения: накопленная деформация, а следовательно, и интенсивность напряжений не зависят от координаты  $Z$ . Выберем цилиндрическую систему координат с началом в середине максимального утонения (рисунок 2). Выделим по обе стороны оси симметрии стенки трубки два симметричных бесконечно малых элемента таким образом, чтобы его грани совпадали с главными площадками. Такие элементы получатся, если они ограничены:

- 1) двумя взаимно перпендикулярными меридиональными сечениями;
- 2) двумя поверхностями радиуса  $R_B$  и  $R_H$ , где  $\varphi$  – достаточно малый угол, так что  $\varphi^2 \ll \varphi$ ;
- 3) двумя сферическими поверхностями, отстоящими друг от друга на расстоянии  $d\rho$  с центрами в точках  $O_1$  и  $O_2$  (рисунок 2).

Процеируя все силы, действующие на выделенные элементы, на ось  $Z$ , записываем уравнение равновесия с учетом следующих допущений и геометрических соотношений:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial Z} = 0; \quad \sigma_z = \beta(\sigma_z + \sigma_p); \quad \sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_p);$$

$$h_1 = R_B d\varphi; \quad h_2 = (R_B + d\rho) d\varphi; \quad h_3 = R_H d\varphi; \quad h_4 = (R_H + d\rho) d\varphi;$$

$$R_B = R_{III}^B \frac{a_1}{(\rho_{HC} - \rho_1)} = \frac{\rho_{HC} - \rho_B}{\rho_{HC} - \rho_1}; \quad R_H = R_{III}^H \frac{a_2}{(\rho_2 - \rho_{HC})} = \frac{\rho_H - \rho_{HC}}{\rho_2 - \rho_{HC}}.$$

Для элемента 1, с учетом того, что  $\sigma_\theta > 0$ :

$$-\sigma_p d\theta \rho h_1 - 2 \left( \sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial Z} h_2 \right) d\rho d\theta \rho \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + \left( \sigma_p + \frac{\partial \sigma_p}{\partial \rho} d\rho \right) h_2 d\theta (\rho + d\rho) + 2\sigma_\theta d\rho h_1 \cdot \sin \frac{d\theta}{2} = 0.$$

После преобразований, получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \sigma_p}{\partial \rho} R_B \rho + \left( \frac{1}{2} R_B - \rho \right) \beta \sigma_i + 2\sigma_p R_B = 0,$$

и после подстановки (рисунок 2) –  $\frac{\partial \sigma_p}{\partial \rho} + 2 \frac{\sigma_p}{\rho} = \beta \sigma_i \left( \frac{\rho_{HC} - \rho}{R_{III}^H a} - \frac{1}{2\rho} \right)$ .

Решая полученное дифференциальное уравнение получаем:

$$\sigma_p = \frac{\beta \sigma_i}{4} \left[ \frac{4\rho_{HC}(\rho^3 - \rho_B^3) - 3(\rho^4 - \rho_B^4)}{3R_{III}^B(\rho_{HC} - \rho_B)\rho^2} + \frac{\rho_B^2}{\rho^2} - 1 \right].$$

Для элемента 2, с учетом того, что  $\sigma_\theta < 0$ , уравнение равновесия имеет вид:

$$\sigma_{\rho} d\theta \rho h_3 - \left( \sigma_{\rho} + \frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} d\rho \right) h_4 (\rho - d\rho) d\theta + 2 \left( \sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} h_4 \right) \sin \frac{d\varphi}{2} \rho d\rho d\theta - 2\sigma_{\theta} d\rho h_3 \sin \frac{d\theta}{2} = 0.$$

Так как  $\sigma_z = \beta(\sigma_z + \sigma_{\rho})$ ,  $\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_{\rho})$ , то после преобразований получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} R_H \rho d\rho + \left( \frac{1}{2} R_H - \rho \right) \beta \sigma_i d\rho = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} = \beta \sigma_i \frac{\rho - R_H/2}{R_H \rho}.$$

Решая полученное дифференциальное уравнение получаем:

$$\sigma_{\rho} = \frac{\beta \sigma_i}{2} \left[ \frac{\rho^2 - \rho_H^2 - 2\rho_{HC}(\rho - \rho_H)}{R_{ш}^H (\rho_H - \rho_{HC})^2} - \ln \frac{\rho}{\rho_H} \right] \quad (2)$$

Так как на нейтральном слое в стенке трубочки радиальные напряжения равны между собой при  $\rho = \rho_H$ , т.е.  $\sigma_{\rho 1} = \sigma_{\rho 2}$  или  $\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\rho 2} = 0$ , получаем уравнение:

$$K = \frac{\beta}{2} \left( 1 + \left[ \frac{\rho^2 - \rho_H^2 - 2\rho_{HC}(\rho - \rho_H)}{R_{ш}^H (\rho_H - \rho_{HC})^2} - \ln \frac{\rho}{\rho_H} \right] \right),$$

и окончательно получаем:

$$K = \frac{\beta}{2} \left[ 1 + \frac{S_{ш}}{2R_{ш}^H} + \ln \frac{(1 + S/d)}{(1 + (S/d) + S_{ш}/d)} \right],$$

где:  $d$  – диаметр оправки;  $S$  – толщина стенки трубки;  $S_{ш}$  – толщина шейки трубки;  $R_{ш}^H$  – радиус шейки наружный.

Из этого уравнения численным методом, подставляя данные, например, полученные экспериментально:  $\rho_B = 4,0175$ ;  $\rho_H = 5,3325$ ;  $R_{ш}^B = 5,5$ ;  $R_{ш}^H = 3,75$ , находим  $\rho_{HC} = 4,775$ ;  $S_{ш} = 1,3$ ;  $S = 1,5$ ;  $K \cong 0,58$ .

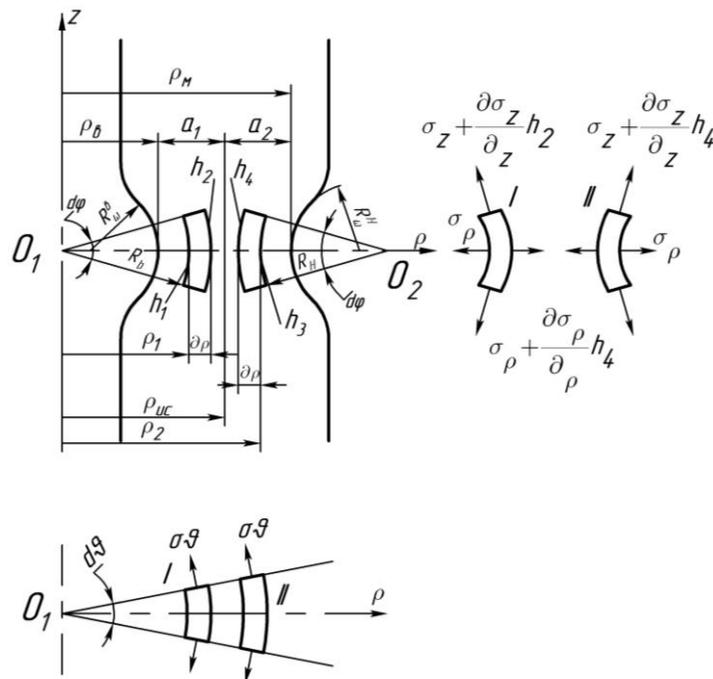


Рисунок 2. Расчетная схема к уравнениям равновесия

### Результаты экспериментального исследования

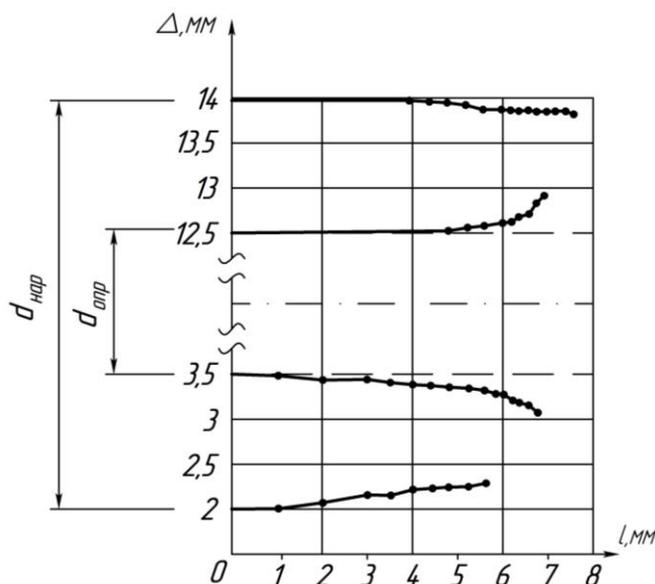
Для испытания изготовлено по 5 образцов из стали 20Х и алюминиевого сплава Д16. Образцы имели следующие геометрические размеры: наружный диаметр трубчатого образца 14,98 мм и 12 мм, внутренние диаметры оправок 8,98 мм, 10,09 мм, 11 мм и 11,98 мм; отношение длины цилиндрической части к диаметру около 5 (длина рабочей части 92 мм). При эксперименте образец устанавливаем в захваты специального приспособления на универсальной машине МУП-50. Перед проведением эксперимента шлифованную, а затем полированную оправку смазывают смесью олеиновой кислоты с графитом и по скользящей посадке вставляют в трубчатый образец. Каждая пара образец – оправка изготавливается и подгоняется сопрягаемыми поверхностями индивидуально.

При растяжении трубчатых образцов определяли шероховатость поверхности: до испытания  $Ra = 0,3$  как на внутренней поверхности, так и на наружной, после испытания на внутренней поверхности  $Ra = 0,34$ , на наружной  $Ra = 1,34$  (средние величины по всем образцам).

П. Бриджмен [1] проводил эксперименты с трубчатыми образцами с отношениями:  $S/R = (1/3)$ , с наружным диаметром – 8,38 мм и внутренним – 6,38 мм. ( $S$  – толщина стенки трубки,  $R$  – радиус трубки).

В наших экспериментах [3]:  $S/R = (1/10; 1/5; 1/3)$ .

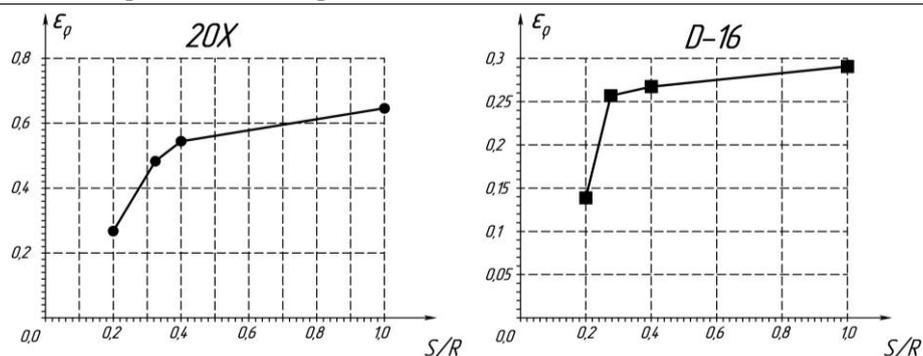
На основании эксперимента производились замеры разорванных образцов по наружной поверхности вдоль образующей до места разрыва на инструментальном микроскопе с точностью до 0,005 мм. Цель определения величины деформации в месте разрыва, форма и геометрические размеры образования шейки. Для проведения теоретического исследования напряженного состояния металла в области наибольшего утонения и разрушения были выявлены геометрические формы и размеры изменения толщины стенки при растяжении трубчатого образца на оправке. На основании проведенных исследований на графике можно видеть, каким образом выглядит форма и геометрические размеры стенки трубчатого образца (рисунок 3).



**Рисунок 3. Геометрические формы и размеры изменения толщины стенки при растяжении трубчатого образца из стали 20Х на оправке**

В результате проведенных исследований при разрыве трубчатых образцов были получены следующие данные деформации разрушения в зависимости от толщины стенки растягиваемого образца (рисунок 4).

По результатам экспериментов получили данные о деформации разрушения по формуле  $\varepsilon_p = 2 \ln \left( \frac{F_0}{F_p} \right)$  для Д16  $\varepsilon_p = 0,09$  для стали 20Х  $\varepsilon_p = 0,55$  [2].



**Рисунок 4. Деформация разрушения в зависимости от толщины стенки растягиваемого образца из 20X и Д16**

#### Выводы

1. Для исследования плоскодеформированного состояния материала целесообразно воспользоваться предложенной методикой растяжения турбчатого образца на оправке.
2. Получена достоверно надежная точка диаграммы пластичности при значениях  $K$  близких к 0,58 (и даже несколько больше ввиду шейкообразования).

#### Литература

1. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд. иностр. лит., 1955. 444 с.
2. Калпин Ю.Г., Филиппов Ю.К., Перфилов В.И., Козлечков В.П. Определение пластичности металлов при растяжении цилиндрических образцов // Республиканская научно-техническая конференция "Теоретические и прикладные проблемы развития наукоемких и малоотходных технологий обработки металлов давлением", Винница, 1991.
3. Филиппов Ю.К. и др. Образец для механических испытаний. А.С. СССР №1578567 от 15.03.1990.
4. Калпин Ю.Г., Филиппов Ю.К. Влияние упрочнения на пластичность металла при холодной деформации. М.;МАМИ, 1989, С. 37 – 42.
5. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 1. С. 166 – 170.
6. Калпин Ю.Г., Перфилов В.И., Петров П.А., Рябов В.А., Филиппов Ю.К. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением. М., Машиностроение. 2010, 244 с.
7. Filippov Yu.K., Kalpin Yu.G., Ragulin A.V., Zaicev A.G. Research of deformation and stress state schemes for steel hardness. Штутгарт, 2013 г., июнь Международная конференция.
8. Filippov Yu.K., Kalpin Yu.G., Ragulin A.V., Zaicev A.G., Yu. N Anfimov. Developing of technological process for the cold forging of thin-walled bushes with regard of plastic properties. 46th ICFG Plenary Meeting 2013 15th - 18th September Paris, France.
9. Бондарь В.С., Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф. Вязкопластический изгиб и скручивание листа / М.: МГТУ «МАМИ», 2003. 168 с.
10. Филиппов Ю.К., Молодов А.В., Зайцев А.Г., Евсиков Р.А. Испытание образцов на двухосное растяжение / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. № 10 (ч. 2), 2014, с. 126 – 137.