

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-8-61-64

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ В УСЛОВИЯХ ЛИНЕЙНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

© Александр Дмитриевич Хван, Дмитрий Владимирович Хван, Алексей Алексеевич Воропаев, Юрий Борисович Рукин

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; e-mail: tpm@vorstu.ru

*Статья поступила 3 ноября 2017 г.*

Представлена конструкция устройства для пластического сжатия длинномерных цилиндрических образцов в условиях линейного напряженного состояния. Данное устройство создано для исследования свойств металлов при пластическом деформировании в условиях немонотонного нагружения. При этом для получения точных опытных данных необходимо проводить испытания на одном длинномерном цилиндрическом образце, расчетная длина которого должна составлять более пяти диаметров. В целях предотвращения искривления сжимаемого длинномерного образца в предлагаемом устройстве используют поддерживающие конические секторы, изготовленные разрезкой на шесть или восемь равных частей заготовки в форме усеченного конуса с центральным продольным отверстием диаметром, равным диаметру испытуемого образца. Секторы связаны между собой двумя парами полуколец. На основе кинематического анализа подвижных звеньев устройства получено трансцендентное уравнение для определения угла конусности указанных секторов. Этот угол является функцией, зависящей от суммарного веса секторов, коэффициентов трения скольжения в соответствующих кинематических парах устройства. Для рассматриваемого устройства угол конусности секторов составил  $36^\circ$ . Данное устройство спроектировано и изготовлено для испытаний на сжатие образцов диаметром 16,5 мм и расчетной длиной 135 мм. Проведены испытания образцов из стали 45 в целях получения опытных данных для построения кривой течения и экспериментальной проверки диаграмм деформирования в условиях циклического растяжения – сжатия – растяжения – сжатия. Результаты сопоставления расчетных и опытных данных подтвердили достаточную точность определения напряжений в образце, что позволяет рекомендовать указанное устройство в качестве испытательной техники в механических лабораториях вузов и научно-исследовательских институтов.

**Ключевые слова:** устройство; пластическое сжатие; длинномерные цилиндрические образцы; напряжения; конические секторы; немонотонное нагружение; накопленная деформация.

## DEVICE FOR PLASTIC COMPRESSION OF LONG-DIMENSIONAL CYLINDRICAL SAMPLES IN LINEAR STRESS CONDITIONS

© Alexander D. Khvan, Dmitry V. Khvan, Alexey A. Voropaev, Yury B. Rukin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; e-mail: tpm@vorstu.ru

*Submitted November 3, 2017.*

A design of the device for studying plastic compression of long cylindrical specimens under conditions of a linear stress state is presented. The device is developed to study the properties of metals under plastic deformation in conditions of nonmonotonic loading. The goal of getting the accurate experimental data entails the necessity of carrying out tests using one long-length cylindrical sample, with the calculated length being more than five diameters. To prevent flexure of the long-length sample upon compression, the support conical sectors made by cutting truncated cone shaped blank into 6 or 8 equal parts with a central longitudinal hole having a diameter equal to the diameter of the test sample are used. The sectors are coupled by two pairs of semirings. A transcendental equation is obtained for determination of the taper angle of those sectors on the basis of kinematic analysis of the mobile links. This angle depends on the total weight of the sectors and sliding friction coefficients in the corresponding kinematic pairs of the device. For the considered device, the taper angle of the sectors is  $36^\circ$ . This device is designed and manufactured for compression testing of the samples with a diameter of 16.5 mm and a gaged length of 135 mm. Samples from steel 45 are tested with a goal of the flow curve construction and experimental verification of the strain diagrams under conditions of cyclic

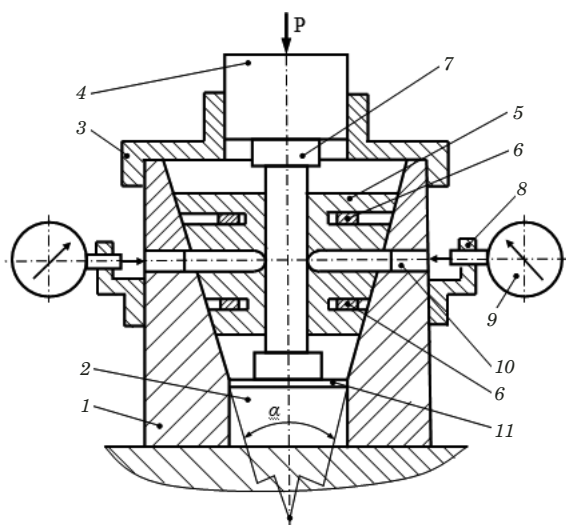
tensile-compression. Comparison of the calculated and experimental data proved the satisfactory accuracy of the stress determination, which makes it possible to recommend this device as a testing tool to be used in mechanical laboratories of the universities and research institutes.

**Keywords:** device; angular deformation; plastic compression; long cylindrical specimens; stresses; conical sectors; nonmonotonic loading; accumulated deformation.

Для описания пластического состояния в заготовках при обработке их давлением используют различные модели анизотропно упрочняющихся тел [1, 2]. Эти модели нуждаются в экспериментальном обосновании возможности их применения при проектировании техпроцессов пластического формоизменения изготовленных поковок без браковочных признаков (трещины, локализация пластических деформаций и др.).

Для проведения экспериментов, связанных с проверкой той или иной модели упрочняющегося тела, возникает необходимость создания опытной установки, в частности, для испытаний длинномерных цилиндрических образцов ( $l_0 > 3d_0$ , где  $l_0$  и  $d_0$  — исходные расчетные длина и диаметр образца) при знакопеременном деформировании в условиях линейного напряженного состояния.

В случае отсутствия соответствующей опытной установки испытания проводят по следующему алгоритму. На первом этапе цилиндрический образец растягивают до накопленной деформации  $e_1$ , на втором — из растянутого образца вырезают короткий цилиндрический образец и сжимают его до деформации  $e_2$ , на третьем — из деформированного короткого образца изготавливают образец для последующего растяжения до деформации  $e_3$  и т.д. Однако из-за практической сложности изготовления образца для растяжения процесс испытания заканчивают на втором этапе.



**Рис. 1.** Схема устройства для пластического сжатия длинномерных цилиндрических образцов

Таким образом, возникла необходимость разработки соответствующей экспериментальной установки для пластического сжатия длинномерных образцов для проведения испытаний в цикле нагружения сжатие (с) – растяжение (р) – сжатие (с) и т.д.

В статье рассмотрена конструкция устройства для пластического сжатия длинномерных цилиндрических образцов (рис. 1), спроектированного на базе изобретения [3].

Оно состоит из стального корпуса 1 цилиндрической формы с внутренней опорной конической поверхностью с углом конусности  $\alpha$ , запрессованного в него основания 2, крышки 3, пуансона 4, сменных поддерживающих секторов 5, изготовленных в количестве шести штук разрезкой по диаметральной плоскости заготовки в виде усеченного конуса с углом конусности  $\alpha$ , высотой  $L$  с соосным отверстием диаметром  $d$ . В кольцевых проточках секторов размещают две пары направляющих полуколец 6, необходимых для совместной сборки секторов и испытуемого образца 7. Секторы сопрягают с корпусом 1 по конической поверхности, а с образцом — по цилиндрической. Для обеспечения достаточной точности рекомендуется полукольца и секторы по их торцевым поверхностям сопрягать по подвижной посадке.

Для измерения деформаций в образце на наружной поверхности корпуса с двух сторон по диаметральному сечению устанавливают с помощью кронштейнов 8 два стрелочных индикатора 9, измерительные стержни которых прижимают к штокам 10. Последние имеют цилиндрическую часть, по которой они устанавливаются в радиальных отверстиях корпуса 1, и плоскую (толщиной  $\sim 1,5$  мм) часть, располагающуюся в зазоре между секторами и соприкасающиеся полукруглыми концами с испытуемым образцом. Образец 7 в сборе с секторами и направляющими полукольцами размещают в корпусе и закрывают крышкой и пуансоном. Собранное устройство устанавливают на опорную плиту испытательной машины и через пуансон 4 нагружают образец силой  $P$ . При сжатии образца происходит увеличение его поперечного размера, вследствие чего секторы 5 перемещаются по конической поверхности корпуса вверх. Направляющие полукольца 6 при этом обеспечивают одновременное перемещение всех секторов в радиальном и осевом направлениях. При подготовке к испытанию

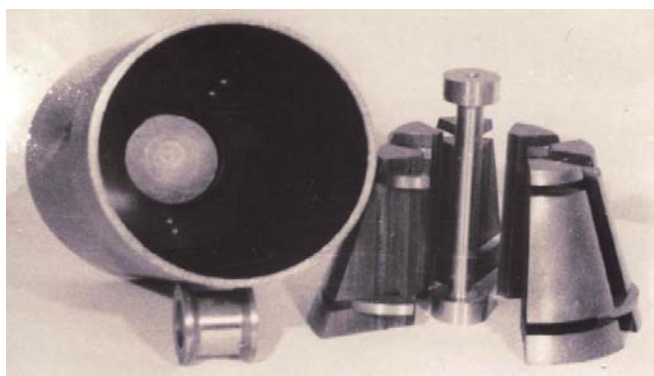


Рис. 2. Фотография устройства в разобранном виде

ям на образец 7 накладывают поддерживающие секторы 5 и скрепляют их полукольцами 6. При этом в целях предотвращения самопроизвольного раскрепления секторов перед установкой их в корпусе 1 следует плоскости разъема верхних и нижних полуколец 6 располагать перпендикулярно друг к другу и под углом 10 – 15° к плоскостям разреза секторов.

При сжатии образца до больших степеней деформации поддерживающие секторы по мере необходимости заменяют на другие соответствующих размеров  $L_i$  и  $d_i$ , связанные с рабочей длиной образца соотношением

$$L_i = l_i - 2d_i, \quad (1)$$

где  $l_i$  — рабочая длина образца. Для обеспечения этого условия рекомендуется поддерживающие секторы располагать приблизительно на одинаковых расстояниях от головок образца, для чего на основание 2 устанавливают круглую сменную пластину 11 необходимой толщины. Поэтому для проведения испытаний следует иметь набор из стальных пластин толщиной 3, 5, 7, 10 мм. По мере увеличения степени пластической деформации секторы 5 перемещаются вверх относительно образца. При достижении величины зазора между торцевыми поверхностями секторов и верхней головки образца 2 – 3 мм необходимо (после разгрузки и снятия пуансона и крышки с устройства), приподняв образец с секторами, поставить на основание 2, другую соответствующей толщины пластину, вызывая тем самым перемещение образца вверх относительно секторов. После повторной сборки всего устройства образец деформируют вновь до достижения указанного зазора. Замены пластин на другие проводят до тех пор, пока зазор между секторами и обеими головками образца не установится равным ~2 мм.

Осевые деформации определяют по данным измерений перемещений в поперечном направ-

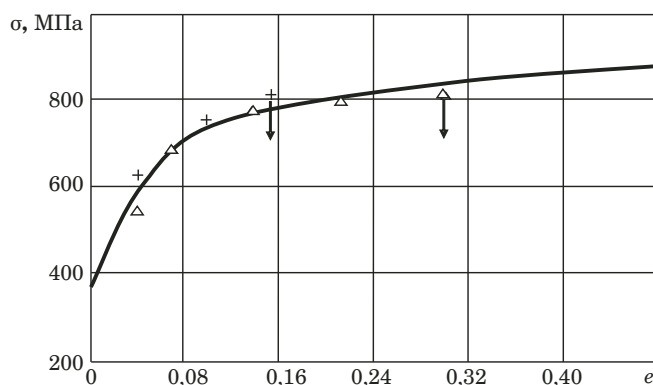


Рис. 3. Кривая течения: — — сжатие длиномерного образца; + — растяжение стандартного образца; Δ — сжатие образца размерами  $\varnothing 18 \times 30$  мм

лении и на основе условия пластической несжимаемости материала согласно соотношению

$$\varepsilon = (n_1 + n_2)/50d_0, \quad (2)$$

где  $n_1, n_2$  — показания индикаторов с точностью измерения 10 мкм;  $d_0$  — начальный диаметр образца.

В качестве примера определения угла конусности  $\alpha$  в устройстве рассмотрена пластическая осадка образца размерами  $d_0 = 16,5$  мм,  $l_p = 135$  мм из отожженной стали 45.

Получено соответствующее трансцендентное уравнение для расчета угла конусности секторов на основе анализа действующих в конической паре сектор 5 – корпус 1 сил, зависящее от угла  $\alpha$ , высоты секторов, коэффициентов сил трения в кинематических парах сектор 5 – корпус 1, сектор 5 – образец 7, сил давления секторов 5 на образец 1 и суммарного веса секторов.

В конической паре искомый расчетный угол конусности  $\alpha = 36^\circ$ .

Для испытуемого образца размерами  $d_0 = 16,5$  мм и  $l_p = 135$  мм ( $l_0 = 8,2d_0$ ) изготовлено устройство, представленное в разобранном виде на рис. 2.

Для обоснования возможности использования рассмотренного устройства в качестве испытательной техники при исследованиях механических свойств материалов были сопоставлены кривые течения, построенные по результатам испытания на растяжение и сжатие образцов из стали 45, отожженной при температуре 1073° К с выдержкой в течение трех часов (рис. 3).

Значения пределов текучести при этом практически совпали и составили ~364 МПа, что позволяет принять исследуемую сталь начально изотропной. Интенсивность напряжений определяли по формуле

$$\sigma = P/F, \quad (3)$$



Рис. 4. Фотография недеформированного и сжатого длинномерного образцов

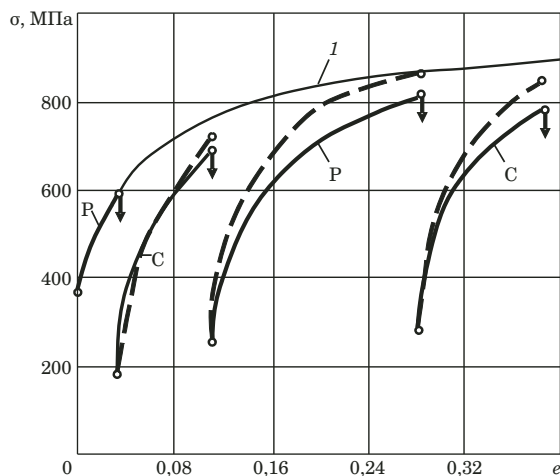


Рис. 5. Диаграммы знакопеременного деформирования (сталь 45): P – растяжение; C – сжатие

а интенсивность деформаций — по соотношению

$$e = \ln(l_0/l), \quad (4)$$

где  $P$  и  $F$  — соответственно сила сжатия и текущая площадь поперечного сечения образца.

На рис. 3 представлены также результаты испытания коротких образцов согласно методике [4, 5], а стрелками вниз отмечены начало образования шейки при растяжении и существенное искажение начальной формы (образование бочки) испытуемых коротких образцов. Деформации на образцах измеряли на каждой ступени нагружения после полной разгрузки с помощью инструментального микроскопа БМИ-1 с точностью 10 мкм.

На рис. 4 показана фотография недеформированного и сжатого до относительной деформации  $\varepsilon = 30\%$  длинномерного образца.

Удовлетворительное совпадение данных экспериментов позволяет сделать вывод о достаточной точности определения напряжений и деформаций по результатам испытания на сжатие длинномерных образцов с помощью предлагаемого устройства и рекомендовать его к применению при проведении технологических испытаний.

В целях экспериментального обоснования возможности применения представленного устройства при исследовании свойств материала образцы из стали 45 испытывали при знакопеременном деформировании вдоль оси:  $p - c - p - c$ . При этом испытание на сжатие проводили с применением описанного устройства. Полученные результаты представлены на рис. 5 в виде диаграмм в координатах нормальное напряжение  $\sigma$  – накопленная деформация  $e$ . Здесь  $I$  — кривая течения материала, построенная по данным испытания на сжатие коротких образцов согласно методике, изложенной в [5]; сплошные линии — опытные диаграммы; штриховые линии — расчетные диаграммы, полученные с использованием модели Г. Бакхауза [1] анизотропно упрочняющегося материала.

Из анализа полученных результатов следует, что опытные и расчетные диаграммы  $\sigma - e$  отличаются в пределах  $\sim 10\%$ , в связи с чем предлагаемое устройство можно рекомендовать к использованию в обработке металлов давлением.

Таким образом, спроектировано и изготовлено устройство для пластического сжатия длинномерных цилиндрических образцов. Результаты испытания этих образцов позволяют заключить, что предлагаемое устройство может быть использовано в качестве испытательной техники в механических лабораториях вузов и НИИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бакхауз Г. Анизотропия упрочнения. Теория в сопоставлении с экспериментом / Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1976. № 6. С. 120 – 129.
2. Данилов В. Л. К формулировке закона деформационного упрочнения / Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1971. № 6. С. 146 – 150.
3. А. с. 1411624 СССР, G 01 № 3/08. Устройство для испытаний на пластическое сжатие длинномерных цилиндрических образцов / Д. В. Хван и др. — № 4150538/25-28; заявл. 09.08.86; опубл. 23.07.86. Бюл. № 27.
4. ГОСТ 25.503–80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. — М.: Стандарт, 1981. — 95 с.
5. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Справочник. — М.: Машиностроение, 1980. — 157 с.

## REFERENCES

1. Bakhauz G. Renghtening anisotropy. Theory in comparison with experiment / Izv. AN SSSR. Mekh. Tv. Tela. 1976. N 6. P. 120 – 129 [in Russian].
2. Danilov V. L. To the formulation of the law of strain hardening / Izv. AN SSSR. Mekh. Tv. Tela. 1971. N 6. P. 146 – 150 [in Russian].
3. USSR Inventor's Certificate 1411624, G 01 N 3/08. Device for testing for plastic compression of long cylindrical specimens / D. V. Khvan et al. — N 4150538/25-28; appl. 09.08.86; publ. 23.07.86. Byull. N 27 [in Russian].
4. State Standard GOST 25.503–80. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Compression test method. — Moscow: Standart, 1981. — 95 p. [in Russian].
5. Krokha V. A. Hardening of metals during cold plastic deformation. Reference. — Moscow: Mashinostroenie, 1980. — 157 p. [in Russian].