

ДВУХОПОРНАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ГИБКА СТЕРЖНЕВЫХ ЗАГОТОВОК КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Аннотация. В статье изложены результаты исследования процесса двухопорной пластической гибки стержневых заготовок круглого поперечного сечения. Рассматривался процесс деформирования заготовки круглого сечения, которая располагалась на двух неподвижных опорах, и деформировалась пуансоном с цилиндрической рабочей поверхностью. Пуансон располагался посередине между опорами и перемещался перпендикулярно продольной оси исходной недеформированной заготовки. На основании анализа геометрических параметров процесса двухопорной гибки установлена зависимость перемещения рабочего инструмента h от угла гибки α . Для обобщения полученных результатов и возможности их использования в широком диапазоне размеров заготовки и инструмента вводились безразмерные параметры и получена зависимость относительного перемещения пуансона от угла гибки. Используя метод конечных элементов (программный комплекс «DEFORM-3D»), выполнено компьютерное моделирование процесса двухопорной гибки стержневых заготовок круглого сечения. При моделировании процесса гибки в качестве материала изгибаемой заготовки рассматривалась сталь марки 40С2А, которая применяется при изготовлении пружинных клемм рельсовых скреплений. Применяемая в расчетах кривая упрочнения строилась по результатам испытаний на растяжение. По результатам моделирования установлены закономерности изменения силы деформирования и формы поперечного сечения на различных этапах деформирования. Экспериментальные исследования процесса двухопорной гибки проводились на испытательной машине ИП 5082-100. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 5–7%.

Ключевые слова: пластическая гибка, стержневая заготовка, двухопорная гибка, угол гибки, ход инструмента, метод конечных элементов, сила деформирования, напряженное состояние

Введение

Процессы пластической гибки стержневых заготовок связаны с изменением кривизны оси стержня [1]. При этом пластической деформации подвержена только часть заготовки (очаг деформации), а остальные части деформируются упруго [2]. Пластическая гибка стержневых заготовок широко используется при изготовлении изделий типа пружин, пружинных клемм рельсовых креплений, грузоподъемных скоб и т.п.

Один из распространенных способов стержневой гибки – двухопорная гибка (рис. 1), при которой заготовка располагается на двух неподвижных опорах, у которых рабочие цилиндрические поверхности имеют радиусы R_1 , а деформация осуществляется пуансоном, рабочая поверхность которого выполнена в виде цилиндра с радиусом R . При этом рабочий пуансон расположен посередине опор и перемещается на величину h (ход пуансона).

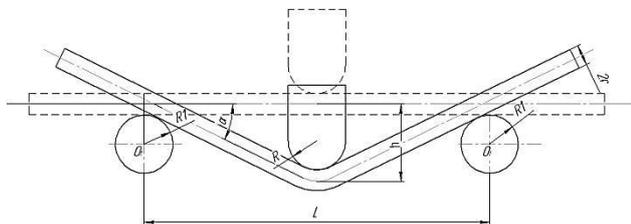


Рис.1. Схема двухопорной гибки заготовки круглого сечения

Анализируя геометрические параметры процесса деформирования, получено уравнение, описывающее зависимость хода пуансона h от угла гибки α и соответствующих размеров заготовки и инструмента:

$$h = [L - (R_1 + r) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}] \operatorname{tg} \alpha - (R_2 + r) \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right), \quad (1)$$

где α – угол гибки; r – радиус поперечного сечения заготовки; L – расстояние между опорами; R – радиус рабочей поверхности пуансона (подвижного инструмента); R_1 – радиус опорных поверхностей неподвижного инструмента.

Для обобщения результатов моделирования и возможности их использования в широком диапазоне размеров уравнение (1) преобразовывалось за счет введения без-размерных параметров:

$$\frac{h}{R} = \delta, \quad \frac{L}{R} = \lambda, \quad \frac{R_1}{R} = k, \quad \frac{r}{R} = \rho.$$

В итоге получено следующее уравнение

$$\delta = \left[\frac{\lambda}{2} - (k + \rho) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right] \operatorname{tg} \alpha + (1 + \rho) - \frac{(1 + \rho)}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

По результатам выполненных расчетов построен график $\delta = f(\alpha)$, который представлен на рис. 2.

Полученная кривая описывалась полиномом пятой степени

$$\delta = 2E - 08\alpha^5 - 3E - 06\alpha^4 + 0,0002\alpha^3 - 0,0039\alpha^2 + 0,1332\alpha. \quad (3)$$

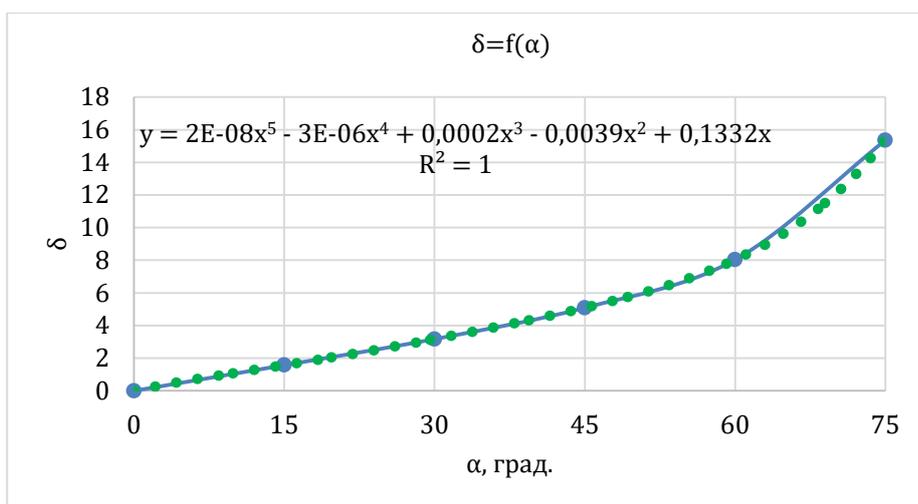


Рис. 2. Зависимость относительного перемещения δ подвижного рабочего инструмента от угла гибки α

При компьютерном моделировании процесса двухопорной гибки применялся программный комплекс «DEFORM-3D» [4], который базируется на методе конечных элементов [4]. Используемая в расчетах кривая упрочнения калиброванной стали марки 40С2А, которая применяется при изготовлении пружинных клемм рельсовых скреплений, строилась по результатам испытаний на растяжение с использованием аттестованной испытательной машины ИР 5082-10.

В расчетах варьировались геометрические параметры процесса гибки: диаметр заготовки $d = 11,0 \div 17,0$ мм, радиус рабочей поверхности пуансон $R = 15,0 \div 20,0$ мм, радиус опор $R_1 = 15,0 \div 20,0$ мм, расстояние между осями опор $L = 90,0 \div 100,0$ мм.

По результатам конечно-элементного моделирования определены силовые параметры и напряженно-деформированное состояние при двухопорной пластической гибке. В частности, на рис. 3 показаны: положение заготовки и инструмента на отдельных этапах процесса двухопорной гибки и поля распределения интенсивности напряжений σ_i в очаге деформации при изгибе заготовки.

По результатам моделирования построен график зависимости силы деформирования P заготовки от перемещения h подвижного инструмента, который представлен на рис. 4.

Полученные зависимости силы P деформирования от перемещения h подвижного инструмента аппроксимировались полином 6-й степени:

$$P = -10h^6 + 0,0004h^5 - 0,0132h^4 + 0,2771h^3h^2 + 16,896h. \quad (4)$$

Уравнение (4) достаточно точно описывает зависимость силы гибки P от перемещения подвижного инструмента h , так как коэффициенты детерминации имеют ($R^2 = 0,9997$) высокие значения.

По результатам моделирования пластической гибки установлено, что в процессе деформирования происходят изменения формы поперечного сечения заготовок. На рис. 5 показаны поперечные сечения заготовки в вертикальной плоскости по оси симметрии очага деформации при углах гибки $\alpha = 15^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$.

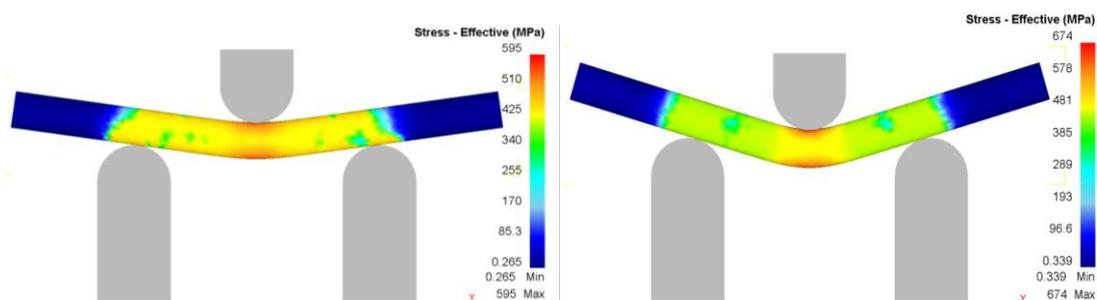


Рис. 3. Положение заготовки и инструмента и поля распределения интенсивности напряжений σ_i при двухопорной гибке заготовки на отдельных этапах деформирования

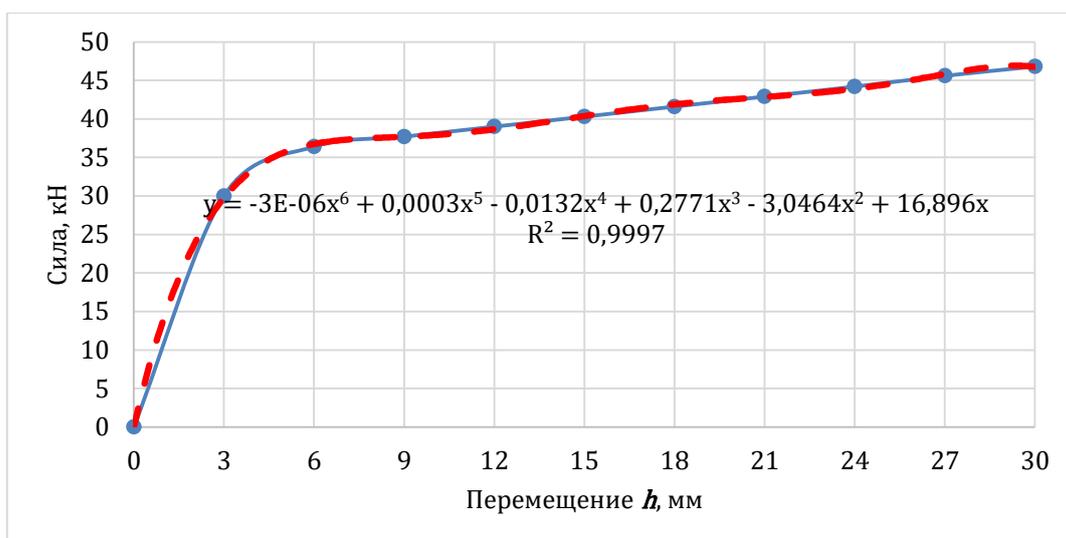


Рис. 4. Изменение силы деформирования при двухопорной гибке заготовки от перемещения h подвижного инструмента

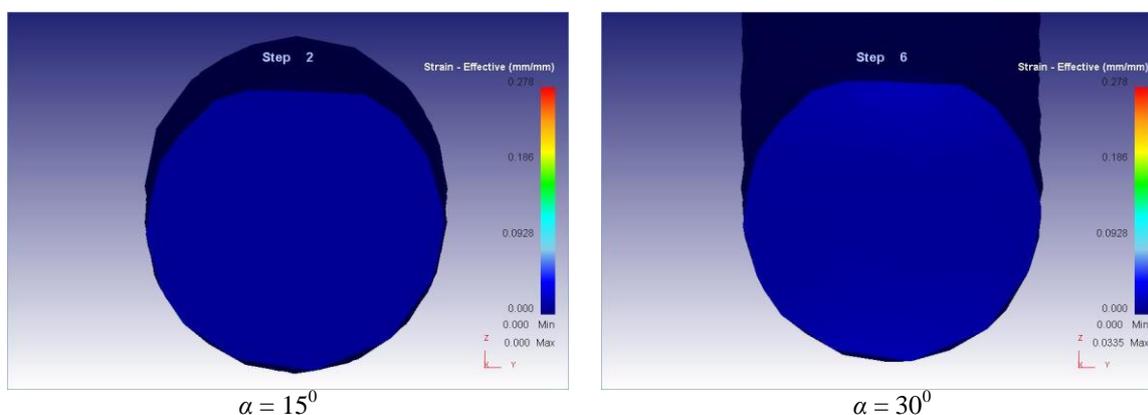


Рис. 5. Изменение формы поперечного сечения заготовки в очаге деформации при различных углах гибки α

На рис. 6 представлена форма и основные размеры заготовки круглого сечения до и после двухопорной пластической гибки.

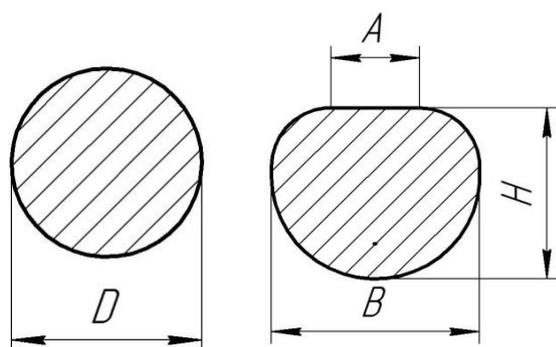


Рис. 6. Форма и основные размеры поперечного сечения заготовки до и после двухопорной пластической гибки

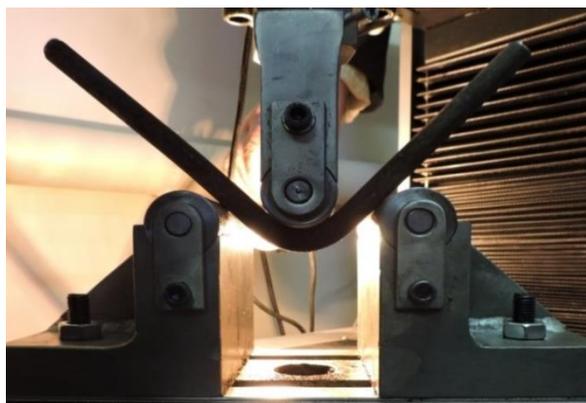
В табл. 1 представлены размеры A , B и H поперечного сечения продеформированной исходной заготовки ($D = 11$ мм) при углах гибки α , равных 15, 30, 45 и 60°.

Таблица 1

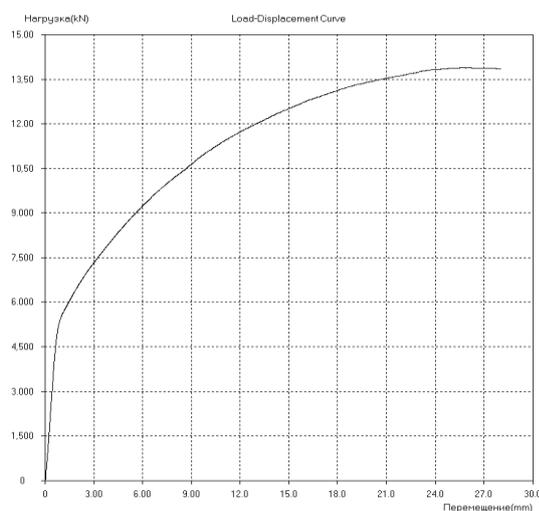
Размеры искаженного поперечного сечения при различных углах гибки α

α , град	A , мм	B , мм	H , мм
15	4,05	10,82	10,81
30	4,14	10,81	10,18
45	4,48	10,83	10,13
60	4,89	10,84	9,9

Экспериментальные исследования процесса двухопорной пластической гибки проводились на испытательной машине ИР 5082-100. При этом стержневая заготовка из калиброванной стали марки 40С2А диаметром $d = 11,0$ мм, длиной $l = 280,0$ мм устанавливалась на опоры цилиндрической формы радиусом $R_1 = 15,0$ мм, расстояние между осями опор составляло $L = 90,0$ мм, деформировалась пуансоном, имеющим радиус рабочей поверхности $R = 15,0$ мм. Положение заготовки и инструмента в процессе гибки и машинная диаграмма представлены на рис. 7.



а



б

Рис. 7. Экспериментальные исследования двухопорной гибки на испытательной машине ИР 5082-100:

а – положение инструмента и заготовки;

б – машинная диаграмма

Выводы

1. По результатам анализа геометрических соотношений размеров и параметров процесса двухопор-

Сведения об авторах

Лактюшин Алексей Андреевич – заместитель директора, ООО «Концерн АРС», Москва, Россия. E-mail: Lotos77707@inbox.ru.

Железков Олег Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ferumoff@mail.ru

Макаров Богдан Борисович – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: Nexusbionics@yandex.ru.

Долгушин Денис Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: d.dolgushin@magtu.ru

ной гибки установлены зависимости перемещения рабочего инструмента h от угла гибки α .

2. Используя метод конечных элементов на базе программного комплекса «DEFORM-3D», выполнено компьютерное моделирование процесса двухопорной гибки стержневых заготовок круглого сечения. Установлены закономерности изменения силы деформирования и формы поперечного сечения на различных этапах процесса гибки.

3. Используя испытательную машину ИР 5082-100, проведены экспериментальные исследования процесса двухопорной гибки. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 5–7%.

4. Полученные результаты исследований рекомендуется использовать при выборе технологии и оборудования для пластической гибки стержневых изделий, при проектировании гибочного инструмента и оценки его ресурса работы.

Список литературы

1. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. Л.: Машиностроение, 1971. 236 с.
2. Вдовин С.И., Петров Н.В. Инженерные расчеты операций гибки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2004. № 12. С. 26-28.
3. Виноградов А.Г., Железков О.С., Морозов К.Ю. Исследование процесса гибки пружинных клемм ЖБР с использованием метода конечных элементов // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И. Носова, 2010. Вып. 36. С. 68-70.
4. Norrie D.H., de Vries G. The Finite Element Method – Fundamentals and Applications. Academic Press. New York, 1973. 322 p.
5. DEFORM-3D Version 6.0 User's Manual // [M].Columbia, Ohio: Scientific Forming Technologies Corporation, 2006.

ROD BLANKS DOUBLE-SEAT PLASTIC BENDING

Laktushin Aleksey A. – Deputy Director, Concern ARS LLC, Moscow, Russia E-mail: Lotos77707@inbox.ru.

Zhelezkov Oleg S. – Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ferumoff@mail.ru.

Makarov Bogdan B. – student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nexusbionics@yandex.ru

Dolgushin Denis M. – Ph.D. head of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia E-mail: d.dolgushin@magtu.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the process of double-support plastic bending of rod blanks of round cross-section. The process of deformation of a round workpiece, which was located on two fixed supports, and was deformed by a punch with a cylindrical working surface, was considered. The punch was located in the middle between the supports and moved perpendicular to the longitudinal axis of the original undeformed workpiece. Based on the analysis of the geometric parameters of the double support bending process, the dependence of the displacement h of the working tool on the bending angle α was established. To generalize the results obtained and the possibility of their use in a wide range of workpiece and tool sizes, dimensionless parameters were introduced and the dependence of the relative movement of the punch on the bending angle was obtained.

Using the finite element method (DEFORM-3D software package), a computer simulation of the process of two-support bending of round rod blanks was performed. When modeling the bending process, grade 40C2A steel, which is used in the manufacture of spring terminals for rail fastenings, was considered as the material of the bent workpiece. The hardening curve used in the calculations was constructed based on the results of tensile tests. Based on the modeling results, patterns of changes in the deformation force and cross-sectional shape at various stages of deformation were established. Experimental studies of the double-support bending process were carried out on an IR 5082-100 testing machine. The discrepancy between theoretical and experimental data will not exceed 5-7%.

Key words: plastic bending, rod blank, double-support bending, bending angle, tool stroke, finite element method, deformation force, deformation force, stress state

Ссылка на статью:

Двухопорная пластическая гибка стержневых заготовок круглого сечения / А.А. Лактюшин, О.С. Железков, Б.Б. Макаров, Д.М. Долгушин // Теория и технология металлургического производства. 2024. №1(48). С. 24-28.
Laktushin A.A., Zhelezkov O.S., Makarov B.B., Dolgushin D.M. Rod blanks double-seat plastic bending. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 48, no. 1, pp. 24-28.