

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВНЕКОНТАКТНОЙ ЗОНЫ ПРИ ДВУХОПОРНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ГИБКЕ СТЕРЖНЕВЫХ ЗАГОТОВОК

**Аннотация.** В статье изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса двухопорной пластической гибки. 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 недеформированной заготовки. Используя программный комплекс «Mathcad», установлена аналитическая зависимость угла гибки от хода пуансона и соответствующих размеров заготовки и инструмента. При компьютерном моделировании процесса двухопорной гибки применялся программный комплекс «Deform - 3D». Используемая в расчетах кривая упрочнения калиброванной стали марки 40С2А строилась по результатам испытаний на сжатие образцов с торцевыми буртиками. В расчетах варьировались геометрические параметры процесса гибки: диаметр заготовки 11,0÷17,0 мм, радиус рабочей поверхности пуансона 15,0÷20,0 мм, радиус опор 15,0÷20,0 мм и расстояние между осями опор 90,0÷100,0 мм. Установлено, что в процессе двухопорной пластической гибки стержневой заготовки возникает зона потери контакта между деформируемой заготовкой и инструментом, то есть образуется внеконтактная зона. Проведенные эксперименты по пластической гибке заготовок диаметром 11,0 мм из стали марки 40С2А с использованием универсальной испытательной машины ИР 5082-100 и соответствующей оснасткой подтвердили образование внеконтактной зоны. Для обобщения результатов исследования вводились относительная максимальная высота  $\delta$  и центральный угол  $\beta$  внеконтактной зоны и построены графики зависимостей этих параметров от угла гибки, размеров заготовки и гибочного инструмента.

**Ключевые слова:** пластическая гибка, стержневая заготовка, двухопорная гибка, внеконтактная зона, угол гибки, ход инструмента, метод конечных элементов.

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 скреплений, 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 радиуса  $R_1$ , а деформация осуществляется пуансоном, рабочая поверхность которого выполнена в виде цилиндра с радиусом  $R$ . При этом рабочий пуансон расположен посередине опор и перемещается вниз на величину  $h$  (ход пуансона).

В работе [3] получено уравнение, описывающее зависимость хода пуансона  $h$  от соответствующих размеров заготовки и инструмента

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

где  $\alpha$  – угол гибки;

$r$  – радиус поперечного сечения заготовки;

$L$  – расстояние между опорами.

Используя программный комплекс «Mathcad», выполнены преобразования уравнения (1) и установлена зависимость угла гибки  $\alpha$  от перемещения пуансона  $h$  и соответствующих размеров

$$\alpha = 2 \cdot a \operatorname{tan} \left( \frac{L - \sqrt{L^2 + h^2 - 4rh - 2h(R_1 + R)}}{4r - h + 2(R_1 + R)} \right). \quad (2)$$

При компьютерном моделировании процесса двухопорной гибки применялся программный комплекс «Deform - 3D», который базируется на методе конечных элементов [4]. Используемая в расчетах кривая упрочнения калиброванной стали марки 40С2А, которая широко применяется при изготовлении пружинных клемм рельсовых скреплений, строилась по результатам испытаний на сжатие образцов с торцевыми буртиками [5,6]. В расчетах варьировались геометрические параметры процесса гибки: диаметр заготовки  $d=11,0 \div 17,0$  мм, радиус рабочей поверхности пуансона  $R=15,0 \div 20,0$  мм, радиус опор  $R_1=15,0 \div 20,0$  мм, расстояние между осями опор  $L=90,0 \div 100,0$  мм.

Результаты конечно-элементного моделирования [7] показывают, что в процессе двухопорной пластической гибки стержневых изделий возникает зона потери контакта между деформируемой заготовкой и инструментом, то есть образуется внеконтактная зона (рис. 2, а).

Используя универсальную испытательную машину ИР 5082-100, проведена серия экспериментов [8], в ходе которых осуществлялась двухопорная пластическая гибка круглых заготовок из стали марки 40С2А диаметром  $d=11,0$  мм пуансоном с радиусом рабочей поверхности  $R=15,0$  мм, радиус опор  $R_1=15,0$  мм, расстояние между осями опор  $L=90,0$  мм. Эксперименты подтвердили возникновение внеконтактной зоны (рис. 2, б).

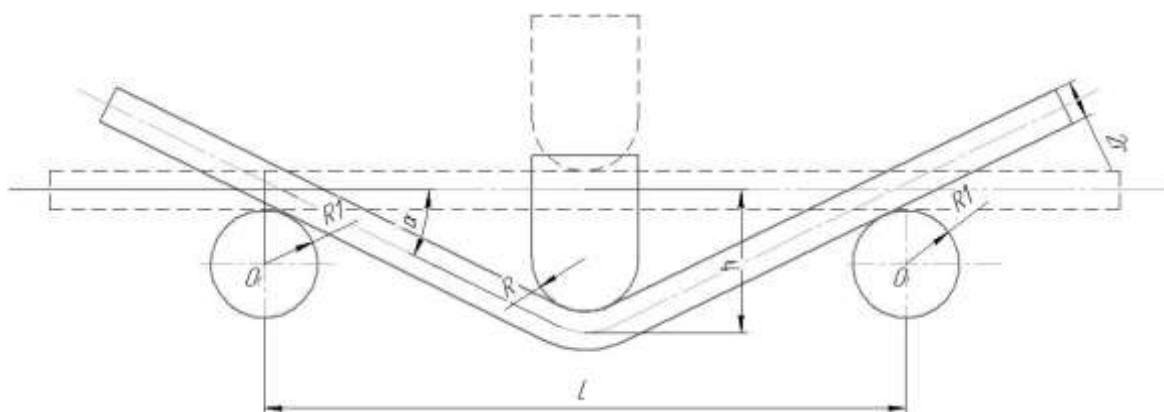


Рис. 1. Схема двухопорной гибки заготовки круглого сечения

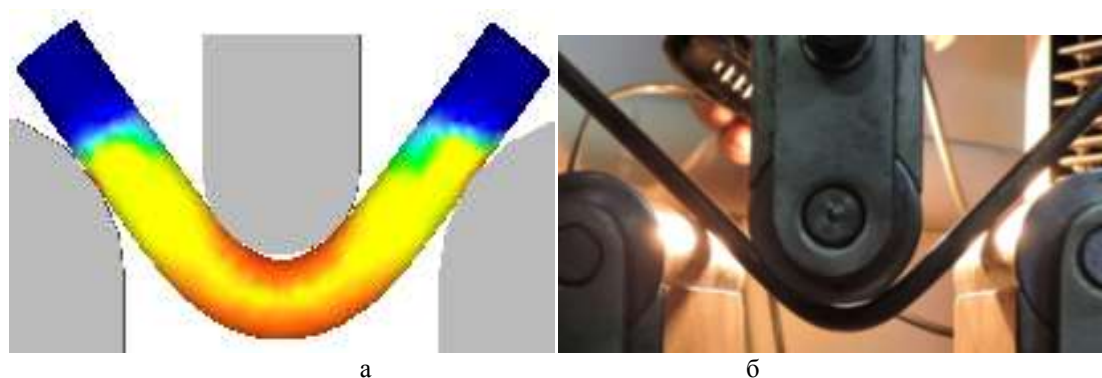


Рис. 2. Внеконтактная зона: а – при моделировании процесса пластической гибки с использованием ПК «Deform - 3D»; б – при экспериментальных исследованиях

По результатам конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований определялись основные геометрические параметры внеконтактной зоны и их изменение в процессе гибки в зависимости от режимов деформирования и размеров заготовки и инструмента.

На рис. 3 представлены основные параметры внеконтактной зоны:  $\Delta$  – максимальный зазор между пуансоном и деформируемой заготовкой на некотором этапе деформирования;  $\beta$  – центральный угол между радиусами, которые ограничивают внеконтактную зону.

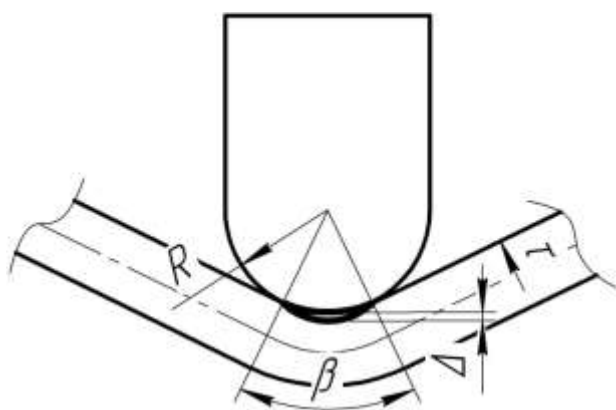


Рис. 3. Параметры внеконтактной зоны

С целью обобщения результатов исследования вводились безразмерные параметры: относительная максимальная высота внеконтактной зоны  $\delta = \Delta/r$  и относительный радиус пуансона  $\rho = R/r$ . По результатам выполненных расчетов построены графики  $\delta = f(\alpha; \rho)$  (рис. 4) и  $\beta = f(\alpha; \rho)$  (рис. 5).

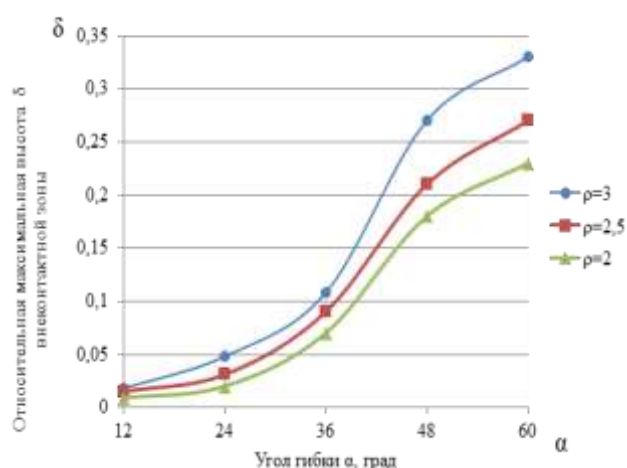


Рис. 4. Зависимость максимальной относительной высоты  $\delta$  внеконтактной зоны от угла гибки  $\alpha$

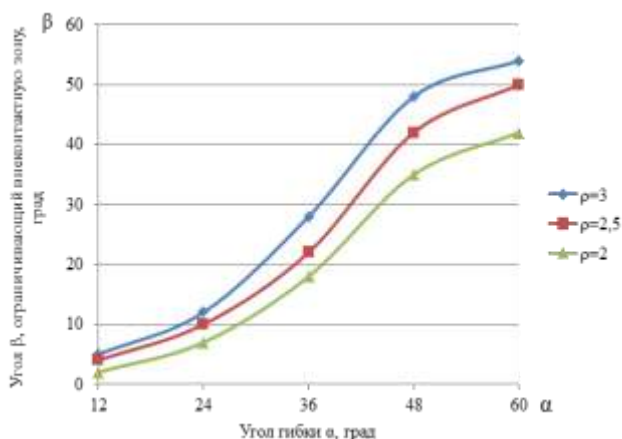


Рис. 5. Зависимость центрального угла  $\beta$  между радиусами, ограничивающими внеконтактную зону, от угла гибки  $\alpha$

#### Выводы

1. По результатам конечно-элементного и натурального моделирования установлено, что при двухопорной пластической гибке стержневых изделий возникает зона потери контакта между заготовкой и инструментом (внеконтактная зона).

2. Установлена зависимость изменения максимальной высоты и центрального угла внеконтактной зоны от угла гибки  $\alpha$  и размеров заготовки и гибочного инструмента.

#### 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 произ-

водство // Обработка материалов давлением. 2004. № 12. С. 26-28.

3. Исследование процесса гибки пружинных клемм ЖБР с использованием метода конечных элементов / А.Г.Виноградов, О.С. Железков, К.Ю. Морозов, В.А. Ханафина (Арзамасцева) // 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. Растегаев М.В. Новый метод равномерного осаживания образцов для определения истинного сопротивления деформации и коэффициента внешнего трения // Заводская лаборатория. 1940. № 3. С. 354-355.
6. Методы исследования механических характеристик металлов и сплавов в процессах обработки давлением с учетом неоднородности структуры / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4. С. 26-31.
7. Железков О.С., Арзамасцева В.А., Малаканов С.А. Определение упругого пружинения при двухопорной пластической гибке стержней круглого сечения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 247-252.
8. Экспериментальное исследование процесса двухопорной гибки прутковой заготовки круглого сечения / О.С. Железков, В.А. Арзамасцева, Р.Р. Дема, Р.Н. Амиров // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: международ. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. №4. С. 33-38.

#### Сведения об авторах

**Арзамасцева Вероника Айваровна** – аспирант кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: arzamasceva\_1990@mail.ru

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

**Лактюшин Алексей Андреевич** – технический директор ООО «Холдинг АРС», Москва, Россия. E-mail: Lotos77707@inbox.ru

## GEOMETRICAL PARAMETERS OF NON-CONTACT ZONE DOUBLE-SEAT FLEXIBLE PLASTIC ROUND BARS

**Veronika A. Arzamastseva** – Graduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: arzamasceva\_1990@mail.ru

**Oleg S. Zhelezkov** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ferumoff@mail.ru

**Aleksey A. Laktyushin** – Chief technology officer, LLC «Holding APC », Moscow, Russia. E-mail: Lotos77707@inbox.ru

**Abstract.** *The article presents the results of theoretical and experimental studies of the process of two-support plastic bending. The process of deforming a round-section blank that was located on two fixed supports and 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 undeformed workpiece. Using the software package "Mathcad", the analytical dependence of the bending angle on the stroke of the punch and the corresponding dimensions of the workpiece and tool is established. The "Deform-3D" software package was used for computer modeling of the two-support bending process. The hardening curve of calibrated 40C2A steel used in the calculations was based on the results of compression tests of samples with end flanges. The calculations varied the geometric parameters of the bending process: the diameter of the workpiece 11.0÷17.0 mm, the radius of the working surface of the punch 15.0÷20.0 mm, the radius of the supports 15.0÷20.0 mm and the distance between the axes of the supports 90.0÷100.0 mm. It is established that in the process of two-support plastic bending of a rod blank, a zone of contact loss occurs between the deformed blank and the tool, that is, a non-contact zone is formed. Experiments on plastic bending of workpieces with a diameter of 11.0 mm made of 40C2A steel using a universal testing machine ИП 5082-100 and the corresponding equipment confirmed the formation of a non-contact zone. To summarize the results of the study introduced the relative maximum height of the Central angle and non-contact zones and plotted these parameters from bending angle, the size of the workpiece and the bending tool.*

**Keywords:** *Plastic two-tools bending process, finite element modeling, round bar, non-contact zone, bending angle, bending tool.*

---

Ссылка на статью:

Арзамасцева В.А., Железков О.С., Лактюшин А.А. Геометрические параметры внеконтактной зоны при двухопорной пластической гибке стержневых заготовок // Теория и технология металлургического производства. 2020. №1(32). С. 31-34.

Arzamastseva V. A., Zhelezkov O. S., Laktyushin A. A. Geometrical parameters of non-contact zone double-seat flexible plastic round bars. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 32, no. 1, pp. 31-34.

**Теория и технология металлургического производства**