

УДК 629.78  
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14  
EDN: VQZRG1

Д. И. ЧЕРНЯВСКИЙ  
Д. Д. ЧЕРНЯВСКИЙ

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ИЗГИБА ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ЕЕ ГИБКЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ПРУЖИНЕНИЯ

В работе проводится анализ технологического процесса гибки листовой заготовки для формообразования деталей из листового металла и профилей. Анализ проведен на основе прочностных расчетов упругопластического изгиба металлической пластины. При прессовании такой пластины на практике наблюдается эффект пружинения, когда изогнутая заготовка изменяет свою форму под действием остаточных упругих деформаций при окончании технологического процесса прессования. Для компенсации эффекта пружинения необходимо определять величины упругих и пластических деформаций в листовой заготовке. В работе рассмотрена методика расчёта данных величин на основе имеющихся экспериментальных работ. Сделаны выводы и приведены практические рекомендации, которые можно использовать в процессе настройки технологических параметров прессования листовых заготовок.

**Ключевые слова:** листовые металлические заготовки, упругие и пластические деформации, энергия формирования упругих и пластических деформаций, технологические параметры прессования, эффект пружинения.

**Введение.** В настоящее время основным направлением развития современной промышленности является производство новой техники при использовании прогрессивных технологических приемов. Вопросы, связанные с удешевлением продукции, также актуальны в современных условиях. Поэтому технологии обработки металлов давлением широко используются при изготовлении машин и механизмов.

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с изготовлением тонкостенных деталей методом гибки на специализированных гибочных станках. Такие детали, изготовленные из профилированного и листового металла, широко применяются в авиации и ракетной технике, автомобилестроении и других отраслях промышленности.

Использование технологий обработки металлов давлением ведет к повышению автоматизации технологических процессов машиностроительного производства, удешевлению массового производства изделий, а также и к другим положительным факторам.

Однако применение данных технологических методов требует серьезного научно-технического обоснования. В работе [1] Лизин В. Т. и Пяткин В. А. рассмотрели особенности проектирования и оптимизации тонкостенных силовых конструкций; устойчивость гладких и сложнопрофильных цилиндрических и конических сжатых оболочек; а также и другие проблемы, связанные с прочностью тонкостенных конструкций.

## Обозначения в формулах

Символы	Описание	Размерность
$F$	Сила прижатия пуансона к заготовке	Н
$a$	Координата точки приложения силы $F$	м
$z$	Текущая координата поперечного сечения заготовки, рис. 5	м
$l$	Расстояние опорами листовой заготовки в матрице	м
$M_{\max}$	Максимальный изгибающий момент в листовой заготовке	Нм
$z_0$	Координата опасного сечения заготовки	м
$\sigma_{\text{упр}}$	Величина напряжений при изгибе листовой заготовки	МПа
$M(z)$	Текущий изгибающий момент в листовой заготовке	Нм
$W_x$	Осевой момент сопротивления	м <sup>3</sup>
$L$	Длина изгиба листа заготовки	м
$h$	Толщина листовой заготовки	м
$W_{\text{пла}}$	Осевой момент сопротивления площади поперечного сечения заготовки длиной $L$ при пластических деформациях.	м <sup>3</sup>
$\sigma_{\text{пл}}$	Предел пропорциональности материала	МПа
$Y(z)$	Уравнение поперечного изгиба заготовки, рис. 5	м
$f(z)$	Уравнение прогиба заготовки, рис. 5	м
$E_1, E_2$	Модуль Юнга	МПа
$J_x$	Момент инерции	м <sup>4</sup>
$\chi$	Коэффициент, связывающий величины $a$ и $l$	—
$\xi$	Коэффициент, связывающий величины $z$ и $l$	—
$A_{\Sigma}$	Общая энергия формоизменения заготовки	Дж
$A_{\text{упр}}$	Энергия упругих деформаций при формоизменении заготовки	Дж
$A_{\text{пласт}}$	Энергия пластических деформаций при формоизменении заготовки	Дж
$n_{\text{упр}}$	Относительная энергия пластических деформаций	—
$n_{\text{пласт}}$	Относительная энергия пластических деформаций	—
$\Delta A_{\Sigma}$	Дополнительная общая энергия для компенсации эффекта пружинения при формоизменении листовой заготовки	Дж
$\Delta A_{\text{пласт}}$	Дополнительная энергия пластических деформаций для компенсации эффекта пружинения	Дж
$\sigma_{\text{в}}$	Предел прочности (временное сопротивление) материала	МПа
$\mu$	Коэффициент Пуассона материала листовой заготовки	—
$n-n$	Текущее сечение заготовки, рис. 5	—
$C$	Углерод	—
$Mn$	Марганец	—
$Cr$	Хром	—
$W$	Вольфрам	—
$V$	Ванадий	—
$HRC$	Твердость по шкале Роквелла	—
$F_{\max}$	Величина максимальной силы деформации материала, полученная в результате обработки диаграмм, рис. 6	Н
$R$	Коэффициент детерминации. Максимальное значение — 1	
$\Delta F_{\max}$	Увеличение максимальной силы деформации материала для компенсации эффекта пружинения	Н

В работах [2, 3] Лысов М. И. и Сосов Н. В. обобщают различные исследования научных и технологических проблем, связанных с изготовлением тонкостенных деталей на основе теории пластичности. Подробно рассмотрены методики расчетов параметров оборудования и оснастки для существующих технологий гибки металлических листовых и профильных заготовок.

В публикациях [4–7] авторы предоставляют сведения о материалах, применяемых в машиностроении; некоторые данные о физико-механической сущности пластической и упругой деформаций; информацию о технологических режимах гибки; а также и других знаниях об обработке металлов давлением. В статьях [8–13] авторы рассматривают отдельные вопросы, связанные с напряженно-деформируемым состоянием материала при гибке; процессами формирования упругих деформаций при гибке и причинах, вызывающих эффект пружинения, а также и другие проблемы, возникающие в процессе формообразующих операций листовой штамповки.

Данная работа является продолжением публикации [12]. Обозначения физических величин, принятые в данной статье, приведены в табл. 1.

**Постановка задачи.** Для увеличения жесткости металлических конструкций и отдельных деталей широко применяются составные элементы различной конфигурации, изготовленные из изогнутого металлического листа: уголок гнутый, S- и Z-образные профили, коробчатые конструкции и т.д.

Гибка листового металла производится на гидравлических прессах разнообразной конструкции. Полоса металла укладывается на нижний стол прессы, на котором находится матрица заданной формы. Под действием гидравлического давления пуансон (пуансоны) приближается к полосе металла. После контакта пуансона с листом металла, за счет увеличения силы гидравлического давления, металл в зоне контакта начинает упруго и далее пластически деформироваться для получения заданного угла изгиба путем вдавливания в матрицу. Все слои металла, которые располагаются в зоне контакта вдоль оси изгиба остаются неизменными. Поэтому все прочностные и технологические расчеты гибки проводятся с ориентировкой на данные слои металла. Во многих случаях готовая деталь формируется за счет нескольких технологических операций гибки с применением специализированных для данных операций пуансонов и матриц. Как правило, в массовом производстве используют листы металла толщиной до 10 мм и длиной до 6 м (рис. 1–3).

В процессе гибки листа (полосы) металла формируется так называемый «**эффект пружинения**». При изгибе металлического листового материала под действием пластических деформаций лист превращается в заданный профиль, который задан угломгиба плоского металлического листа. Однако после снятия давления пуансона в зонегиба листа остаются остаточные упругие деформации, которые изменяют сформированный первоначально угол сгиба заготовки. Тем самым полученная продукция становится дефектной и требует либо доработки, либо списания в утиль. Величина такого угла пружинения зависит от многих факторов. В данной публикации рассматривается методика учета эффекта пружинения на основе определения соотношения между энергиями упругих и пластических деформаций, возникающих в металле заготовки.



Рис. 1. Гибка листового металла на гидравлическом прессе

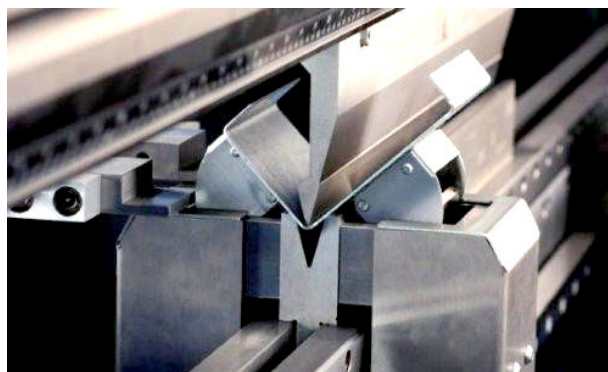


Рис. 2. Получение детали сложной формы за счет применения нескольких технологических операций прессования

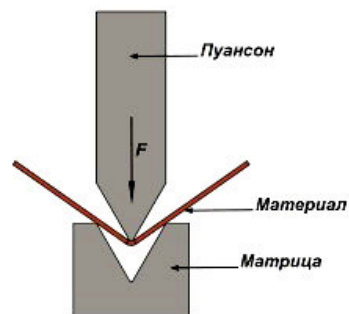


Рис. 3. Условная схема прессования металлического листа

**Теория.** Для решения поставленной задачи рассмотрим две стадии технологического процесса гибки листовой металлической заготовки.

На первой стадии технологического процесса гибка осуществляется в пределах закона Гука, т.е. в зоне сгиба формируются только упругие деформации, зависящие от величины контактных напряжений, возникающих в результате давления формообразующей поверхности пуансона на поверхность листовой заготовки (рис. 4, 5).

На второй стадии гибки начинают формироваться пластические деформации. В итоге действующая со стороны пуансона сила возрастает до постоянной величины. Листовая заготовка смещается

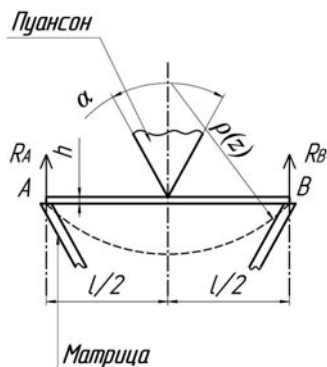


Рис. 4. Расчетная схема гибки металлического листа

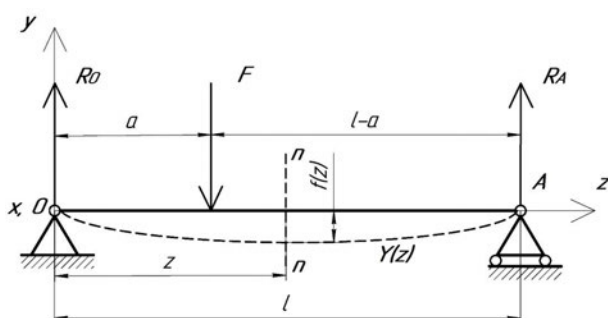


Рис. 5. Схема силового расчета изгиба листовой металлической заготовки

до упора в поверхность матрицы за счет пластического течения металла в зоне сгиба.

Для того чтобы определить силу прессования  $F$ , используем расчетную схему, приведенную на рис. 5.

Как известно, максимальный прогиб листа  $f(z)$  будет в зоне действия изгибающей силы  $F$ , т.е. координата опасного сечения  $z_0$  и величина максимального изгибающего момента  $M_{\max}$  будут определяться:

$$z_0 = a, M_{\max} = F \frac{a(l-a)}{l}. \quad (1)$$

На основании формулы Навье получим выражения:

$$\sigma_{\text{упр}} = \frac{M(z)}{W_x}, \quad (2)$$

$$W_x = \frac{Lh^2}{6}. \quad (3)$$

В работе [3] приведено следующее утверждение.

«...В теории обработки металлов давлением, с целью упрощения расчетов, вводится допущение Прандтля, при котором в диаграмме напряжения — деформации ( $\sigma-\epsilon$ ) участок прямой, выражающий закон Гука, непосредственно переходит в горизонтальную прямую без плавного перехода. Таким образом допускается равенство между пределами пропорциональности и текучести. Длина горизонтального участка диаграммы не ограничивается, т.е. материал считается идеально пластичным, не упрочняющимся. Такая диаграмма называется диаграммой Прандтля.

Замена реальных диаграмм напряжения — деформации схематизированной диаграммой Прандтля допустима для стали, сплавов на основе меди и алюминия, а также для материалов, имеющих диаграммы с ограниченной длиной площадки текучести...» [3].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при увеличении контактного давления в зоне сгиба упругие деформации меняются на пластические. При достижении определенного соотношения между пластическими и упругими деформациями угол изгиба листовой заготовки будет увеличиваться при постоянной силе (изгибающем моменте).

«...В данной зоне формируется, так называемый пластический шарнир. Пластический момент сопротивления данного сечения определяется следующим выражением...» [14]:

$$W_{\text{пл}} = \frac{Lh^2}{4}. \quad (4)$$

Определим значения действующей силы  $F$  с учетом выражений (1), (2) и (4).

$$F = \frac{\sigma_{\text{пл}} l}{a(l-a)} \frac{Lh^2}{4}. \quad (5)$$

Рассмотрим уравнения поперечного изгиба  $Y(z)$  и максимального прогиба  $f(z)$  нейтральной линии заготовки [14].

Для условия  $0 \leq z \leq a$  получим следующее выражение:

$$Y(z) = \frac{Fa^2(l-a)^2}{6EJ_x l} \left[ 2 \frac{z}{a} + \frac{z}{l-a} - \frac{z^3}{a^2(l-a)} \right]. \quad (6)$$

Для условия  $a \leq z \leq l$  получим выражение вида:

$$Y(z) = \frac{Fa^2(l-a)^2}{6EJ_x l} \left[ 2 \frac{l-z}{l-a} + \frac{l-z}{a} - \frac{(l-z)^3}{a(l-a)^2} \right]. \quad (7)$$

Величина максимального прогиба заготовки  $f(z)$  будет определена следующим выражением [14]:

$$f(z) = \frac{Fa^2(l-a)^2}{3EJ_x l} \quad \text{при } z = a. \quad (8)$$

Для дальнейшего анализа целесообразно выразить величины  $a$  и  $z$  в выражении (8) через величину  $l$ . Для этого введем следующее выражение.

$$a = \chi l, \quad \text{при условии } 0 \leq \chi \leq 1. \quad (9)$$

Тогда выражения (5) и (8) можно переписать в следующем виде:

$$F = \frac{\sigma_{\text{пл}}}{l\chi(1-\chi)} \frac{Lh^2}{4}. \quad (10)$$

$$f(z) = \frac{F(\chi l)^2(l-\chi l)^2}{3EJ_x l} \quad \text{при } z = \chi l. \quad (11)$$

С учетом выражения (10) запишем уравнение (11).

$$f(z) = \frac{\sigma_{\text{пл}} Lh^2}{4} \frac{l^2}{3EJ_x} \chi(1-\chi). \quad (12)$$

Для расчета компенсации эффекта пружинения используем такой физический показатель, как «энергия». Известно, «...что работа, совершаемая силой над телом, равна произведению величины данной силы на пройденное телом расстояние...». В рассматриваемой задаче технологический процесс гибки осуществляется за счет того, что пуансон посредством силы  $F$  давит на заготовку, и она изгибается. Величину данного прогиба обозначим через значение функцию  $f(z)$ , уравнение (12). Тогда энергия, затраченная на изгиб листа заготовки, равна:

$$dA_{\Sigma} = Fdf(z). \quad (13)$$

$$dA_{\Sigma} = \frac{\sigma_{ну}^2 L^2 h^4 I}{48EJ_x} \left( \frac{1}{\chi(1-\chi)} - \frac{2}{1-\chi} \right) d(\chi). \quad (14)$$

Интегрируя выражение (14), получим уравнение (15) [15].

$$A_{\Sigma} = \frac{\sigma_{ну}^2 L^2 h^4 I}{48EJ_x} [\ln \chi(1-\chi)]. \quad (15)$$

С учетом граничных условий, постоянная интегрирования  $C$  будет равна нулю.

Для проведения дальнейших расчетов необходимо составить баланс энергии, суммарная величина которой определена выражением (15). Примем допущение, что вся энергия, необходимая для получения изменения формы листовой заготовки, состоит из энергий упругих и пластических деформаций. Такое допущение может иметь место, так как силовая нагрузка прессования является статической. При динамической нагрузке (ударе) необходимо будет учитывать кинетическую энергию отскока индентора, а также энергию формирования продольных волн и поверхностных волн Рэлея.

$$\frac{A_{упр}}{A_{\Sigma}} + \frac{A_{пласт}}{A_{\Sigma}} = 1. \quad (16)$$

Введем обозначения  $\frac{A_{упр}}{A_{\Sigma}} = n_{упр}$  и  $\frac{A_{пласт}}{A_{\Sigma}} = n_{пласт}$ .

Для компенсации эффекта пружинения необходимо увеличить величину энергии пластических деформаций, формирующихся в зоне сгиба листовой заготовки.

$$\frac{A_{упр} + \Delta A_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} + \frac{A_{пласт} + \Delta A_{пласт}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = 1. \quad (17)$$

Главным условием является то, что дополнительная энергия пластических деформаций должна быть равна энергии упругих деформаций, вызывающих эффект пружинения —  $A_{пласт} = A_{упр} = A_{\Sigma} n_{упр}$ .

$$\frac{A_{упр} + \Delta A_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} + \frac{A_{пласт} + A_{\Sigma} n_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = 1. \quad (18)$$

Введем допущение, что при малом увеличении энергии деформации  $A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}$  соотношение между энергиями упругих и пластических деформаций не меняется. Тогда запишем следующее выражение:

$$\frac{A_{пласт} + A_{\Sigma} n_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = n_{пласт}, \quad \frac{A_{пласт}}{A_{\Sigma}} = n_{пласт}. \quad (19)$$

$$\frac{A_{\Sigma} n_{пласт} + A_{\Sigma} n_{упр}}{A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma}} = n_{пласт}. \quad (20)$$

Преобразуем выражение (20).

$$\Delta A_{\Sigma} = A_{\Sigma} \frac{(1 - n_{пласт})}{n_{пласт}}. \quad (21)$$

$$A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma} = A_{\Sigma} \left[ 1 + \frac{(1 - n_{пласт})}{n_{пласт}} \right] = \frac{A_{\Sigma}}{n_{пласт}}. \quad (22)$$

Как следует из уравнения (22), для расчета эффекта пружинения необходимо знать величину соотношения между энергиями упругих и пластических деформаций в обрабатываемой заготовке.

**Результаты теоретических исследований.** В работе [16] описаны экспериментальные результаты, связанные со статическим внедрением конических инденторов из частично отожженной инструментальной стали в стержни из того же материала (рис. 6). Характеристики частично отожженной инструментальной стали следующие:  $E = 2,041 \cdot 10^5$  МПа,  $\sigma_{ну} = 937,7$  МПа,  $\sigma_b = 1245$  МПа,  $\mu = 0,286$ , HRC — 17–32. Содержание легирующих элементов: C — 0,90 %, Mn — 1,20 %, Cr — 0,50 %, W — 0,50 %, V — 0,20 %.

Все графики, описывающие зависимости «Внедрение — сила» и представленные на рис. 6, были оцифрованы на основе применения компьютерных программ «Compas» и «MathCad». Множество точек данных графиков получали индивидуальные координаты по соответствующим осям  $\delta$  (сближение) и  $F$  (сила). Далее производилась обработка дискретных экспериментальных данных методом интерполяции (рис. 7). Полученные интерполяционные функции приведены в табл. 2. После обработки данных функций получены результаты, приведенные в табл. 3.

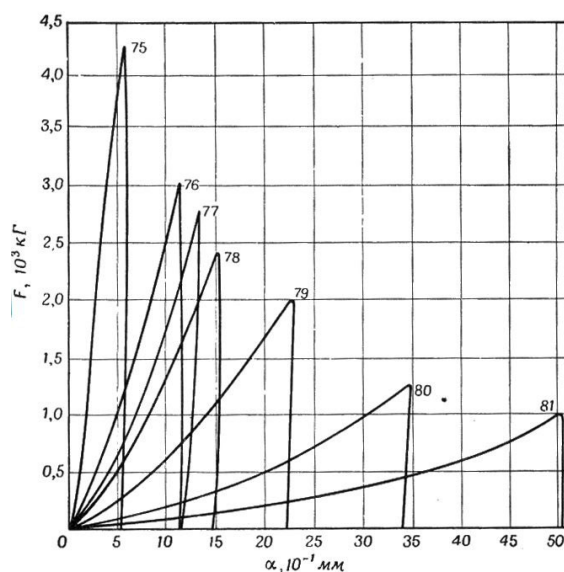


Рис. 6. «...Зависимости сила–глубина внедрения для случаев внедрения индентора из отожженной инструментальной стали с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине по заготовке из того же материала твердостью HRC — 13,7...», [16, с. 195] Номера графиков и величины углов  $\alpha$  при вершине конусов соответствуют: 75–160°, 76–120°, 77–90°, 78–80°, 79–60°, 80–40°, 81–20°

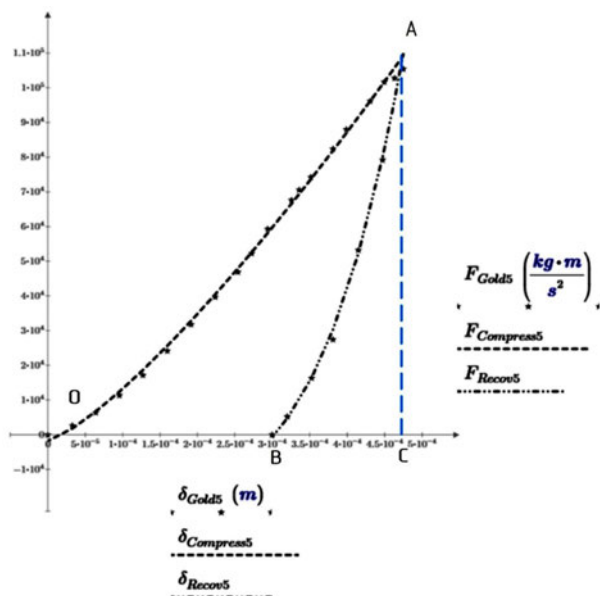


Рис. 7. Пример методики интерполяционного расчета общей энергии деформации, а также энергии упругих деформаций. Опыт № 75

На основании этих данных выведены интерполяционные выражения (23, 24), а также построены графики на рис. 8 и 9.

$$n_{\text{пласт}} = 0,248 \sin(\alpha + 1,08) + 0,716, R = 0,98, \quad (23)$$

$$n_{\text{пласт}} = 0,248 \sin(\alpha^\circ + 61,88^\circ) + 0,716.$$

$$F_{\text{max}} = 1,312 \cdot 10^4 \alpha^{0,98} + 5,068 \cdot 10^3 \text{ Н}, R = 0,979. \quad (24)$$

Аналогично, по материалам работы [16] для конического индентора с головной частью  $\alpha = 20$  градусов, было получено выражение (25).

$$n_{\text{пласт}} = 0,0715 \sin(F_{\text{max}} + 1,94) + 0,883, \\ R = 0,992. \quad (25)$$

**Результаты практических исследований.** Таким образом, для расчета параметров гибки листовой заготовки с учетом эффекта пружинения необходимо вычислить выражения (10), (15), (22) и (25).

Рассмотрим пример такого расчета с учетом следующих параметров:  $\sigma_{\text{нц}} = 937,7$  МПа;  $L = 1$  м;  $l = 0,2$  м;  $h = 0,003$  м;  $\chi = 0,5$ ;  $E = 2,06 \cdot 10^{11}$  Па.

$$F_{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{нц}}}{l\chi(1-\chi)} \frac{Lh^2}{4} = 42,197 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

$$J_x = \frac{Lh^3}{12} = 2,25 \cdot 0,003^{-9} \text{ м}^4,$$

$$n_{\text{пласт}} = 0,0715 \sin(F_{\text{max}} + 1,94) + 0,883 = 0,921,$$

Таблица 2

Интерполяционные зависимости при взаимодействии индентора из отожжённой инструментальной стали с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине с заготовкой из того же материала (рис. 6)

Номер опыта	Угол при вершине конуса $\alpha^\circ$ (рад)	Зависимость сила – глубина внедрения для первой половины взаимодействия (сжатие)	Зависимость сила – глубина внедрения для второй половины взаимодействия (разгрузка)
75	160 (2,793)	$F_{\text{Compress75}} = 2,795 \cdot 10^8 \delta^{1,186} - 209,94$	$F_{\text{Recov75}} = 3,741 \cdot 10^{11} \delta^{2,126} - 1,288 \cdot 10^4$
76	120 (2,094)	$F_{\text{Compress76}} = 8,88 \cdot 10^7 \delta^{1,18} - 376,84$	$F_{\text{Recov76}} = 1,44 \cdot 10^{18} \delta^{4,55} - 3,37 \cdot 10^4$
77	90 (1,571)	$F_{\text{Compress77}} = 2,94 \cdot 10^8 \delta^{1,41} + 203,17$	$F_{\text{Recov77}} = 3,01 \cdot 10^{48} \delta^{15,38} + 1,61 \cdot 10^3$
78	80 (1,396)	$F_{\text{Compress78}} = 1,93 \cdot 10^8 \delta^{1,39} + 58,57$	$F_{\text{Recov78}} = 1,47 \cdot 10^{13} \delta^{2,09} - 1,86 \cdot 10^5$
79	60 (1,047)	$F_{\text{Compress79}} = 1,59 \cdot 10^8 \delta^{1,48} + 215,79$	$F_{\text{Recov79}} = 8,84 \cdot 10^8 \delta^{1,25} - 4,37 \cdot 10^5$
80	40 (0,698)	$F_{\text{Compress80}} = 2,24 \cdot 10^8 \delta^{1,74} + 334,89$	$F_{\text{Recov80}} = 7,37 \cdot 10^6 \delta^{0,08} - 4,68 \cdot 10^6$
81	20 (0,349)	$F_{\text{Compress81}} = 1,01 \cdot 10^9 \delta^{2,19} + 476,55$	$F_{\text{Recov81}} = 1,34 \cdot 10^8 \delta^{0,61} - 5,33 \cdot 10^6$

Таблица 3

Силовые и энергетические характеристики взаимодействия индентора из отожжённой инструментальной стали с головной частью в виде конуса с различными углами при вершине с заготовкой из того же материала

№ опыта	Максимальная сила — $F$ , кН	Остаточное сближение — $\delta$ , мм	Энергия упругих деформаций — $A_{\text{упр}}$ , Дж	Энергия пластических деформаций — $A_{\text{пласт}}$ , Дж	Относительная энергия упругих деформаций $n_{\text{упр}} = A_{\text{упр}}/A_{\Sigma}$	Относительная энергия пластических деформаций $n_{\text{пласт}} = A_{\text{пласт}}/A_{\Sigma}$
75	41,76	0,292	5,534	6,353	0,466	0,532
76	29,53	0,924	3,917	11,596	0,252	0,747
77	27,03	1,105	2,746	11,990	0,186	0,814
78	23,77	1,492	2,070	14,165	0,128	0,872
79	19,78	2,223	1,512	15,360	0,089	0,909
80	12,56	3,390	0,825	15,887	0,049	0,951
81	10,202	5,043	0,364	16,677	0,021	0,978

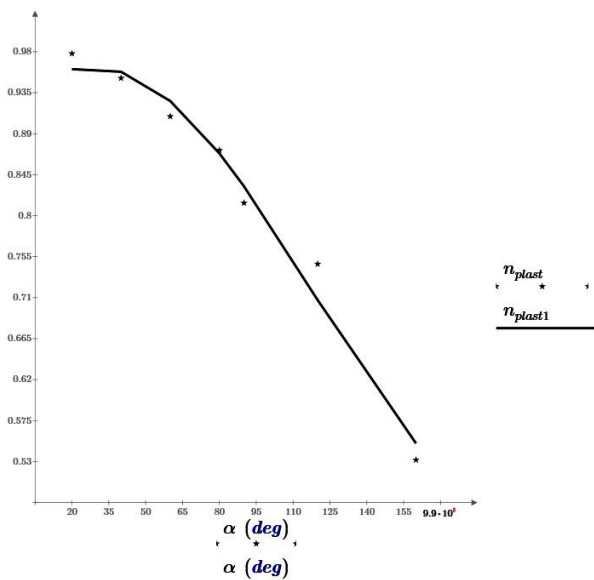


Рис. 8. График зависимости относительной энергии пластических деформаций  $n_{plast}$  от угла  $\alpha$  при вершине головной части индентора

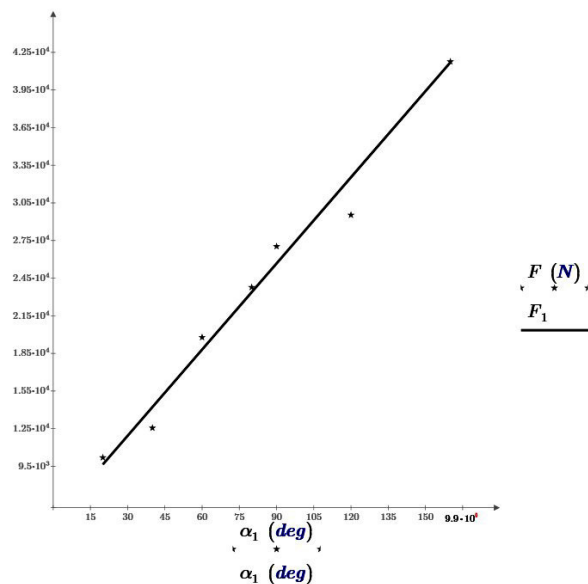


Рис. 9. График зависимости максимальной силы  $F$  деформации заготовки от угла  $\alpha$  при вершине головной части индентора

$$A_{\Sigma} = \frac{\sigma_{nu}^2 L^2 h^4 I}{48 E J_x} [\ln \chi(1 - \chi)] = 887,58 \text{ Дж} ,$$

$$A_{\Sigma} + \Delta A_{\Sigma} = \frac{A_{\Sigma}}{n_{plast}} = 963,21 \text{ Дж} .$$

Увеличение требуемой силы деформации можно определить по следующему выражению:

$$\begin{aligned} \frac{F_{max} + \Delta F_{max}}{A_{\Sigma}} &= \frac{12 E J_x}{\sigma_{nu} L h^2 I^2 \chi(1 - \chi) [\ln \chi(1 - \chi)]} = \\ &= 45,792 \cdot 10^3 \text{ Н} . \end{aligned}$$

Таким образом, для компенсации эффекта пружинения необходимо увеличить силу  $F_{max}$  до 45,792 кН.

#### Выводы и заключение

1. По результатам работы получены аналитические зависимости о взаимосвязи формирующихся в листовой заготовке упругих и пластических деформаций. На основании данных зависимостей определена методика расчета усилий прессования листовой металлической заготовки с учетом эффекта пружинения.

2. По результатам анализа интерполяционных характеристик можно сделать вывод о зависимости величины соотношения пластических и упругих деформаций в листовой заготовке от значений углов заострения конических инденторов. Чем меньше угол при вершине конуса, тем больше величина пластических деформаций в листовой заготовке.

#### Библиографический список

- Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1994. 380 с. ISBN 5-217-02379-1.
- Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. Москва: Машиностроение, 1966. 236 с.

- Лысов М. И., Сосов Н. В. Формообразование деталей гибкой. Москва: Машиностроение, 2001. 388 с. ISBN 5-217-03105-0.

- Schuler. Metal forming handbook. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. 573 p. ISBN 3-540-61185-1.

- Banabic D. Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming // ESAFORM Bookseries on Material Forming. Springer Cham, 2016. 416 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44070-58.

- Бурдуковский В. Г. Технология листовой штамповки. Екатеринбург: Изд-во Уральского у-та, 2019. 224 с. ISBN 978-5-7996-2569-6.

- Китаева Д. А., Пазылов Ш. Т., Рудаев Я. И. Температурно-скоростное деформирование алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. 2016. Т. 57, № 2. С. 182 – 189. DOI: 10.15372/PMTF20160219.

- William F. Hosford, Robert M. Caddell. Metall Forming. Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press, 2007. 328 p. ISBN 978-0-511-35453-3.

- Rott O., Hömberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Preprint. No. 1151. Berlin: WIAS, 2006. 23 p.

- Ibaraki S., Shimizu T. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes // Precision Engineering. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 675–682. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001.

- Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование динамических характеристик удара двух твердых деформируемых тел при скорости удара до 100 м/с // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-5-14. EDN: BBYONG.

- Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование уругопластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее вальцевании // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54.

- Матвеев А. С. Справочник кузнеца. Москва: Машиностроение, 2011. 357 с. ISBN 978-5-94275-579-9.

- Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с. ISBN 5-12-000299-4.

- Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 608 с. ISBN 978-5-8114-0906-8.

16. Гольдсмит В. Удар и контактные явления при средних скоростях. Физика быстропротекающих процессов. В 3 т. Москва: Мир, 1971. Т. 2. С. 151–201.

**ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Машиноведение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 8610-2957

AuthorID (РИНЦ): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

AuthorID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

Адрес для переписки: dichernyavskiy@omgtu.tech

**ЧЕРНЯВСКИЙ Даниил Дмитриевич**, студент гр. ФИТ-201 факультета информационных технологий и компьютерных систем ОмГТУ, г. Омск.

#### Для цитирования

Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Исследование упруго-пластического изгиба листовой заготовки различной толщины при ее гибке с учетом эффекта пружинения // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14.

Статья поступила в редакцию 15.11.2023 г.

© Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявский



## STUDY OF ELASTOPLASTIC BENDING OF SHEET BLANK OF DIFFERENT THICKNESS AT ITS BENDING TAKING INTO ACCOUNT THE SPRINGING EFFECT

The work analyzes the process of bending the sheet work piece to obtain shaping of sheet metal parts and profiles. The analysis is carried out on the basis of strength calculations of elastoplastic bending of the metal plate. When pressing such a plate, in practice, a spring effect is observed when the curved blank changes its shape under the influence of residual elastic deformations at the end of the pressing process. To compensate for the spring effect, it is necessary to determine the values of elastic and plastic deformations in the sheet blank. The work considers the method of calculation of these values on the basis of available experimental works. Conclusions have been drawn and practical recommendations can be used in the process of setting process parameters for pressing sheet blanks.

**Keywords:** sheet metal blanks, elastic and plastic deformations, energy of formation of elastic and plastic deformations, technological parameters of pressing, springing effect.

### References

1. Lizin V. T., Pyatkin V. A. *Proyektirovaniye tonkostennykh konstruksiy* [Design of thin-walled structures]. 3rd ed. Moscow, 1994. 380 p. ISBN 5-217-02379-1. (In Russ.).
2. Lysov M. I. *Teoriya i raschet protsessov izgotovleniya detaley metodami gibki* [Theory and calculation of processes for manufacturing parts using bending methods]. Moscow, 1966. 236 p. (In Russ.).
3. Lysov M. I., Sosov N. V. *Formoobrazovaniye detaley gibkoy* [Formation of flexible parts]. Moscow, 2001. 388 p. ISBN 5-217-03105-0. (In Russ.).
4. Schuler. *Metal forming handbook*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. 563 p. ISBN 3-540-61185-1. (In Engl.).
5. Banabic D. *Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming* // ESAFORM Bookseries on Material Forming. Springer Cham, 2016. 416 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44070-58. (In Engl.).
6. Burdukovskiy V. G. *Tekhnologiya listovoy shtampovki* [Sheet stamping technology]. Ekaterinburg, 2019. 224 p. ISBN 978-5-7996-2569-6. (In Russ.).
7. Kitayeva D. A., Pazylov Sh. T., Rudayev Ya. I. *Temperaturno-skorostnoye deformirovaniye alyuminiyevykh splavov* [Temperature-speed deformation of aluminum alloys] // *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 57, no. 2. P. 182–189. DOI: 10.15372/PMTF20160219. (In Russ.).
8. William F. Hosford, Robert M. Caddell. *Metall Forming. Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, 2007. 328 p. ISBN 978-0-511-35453-3. (In Engl.).
9. Rott O., Hömberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models. Preprint. No. 1151. Berlin, 2006. 23 p. (In Engl.).
10. Ibaraki S., Shimizu T. A long-term control scheme of cutting forces to regulate tool life in end milling processes // *Precision Engineering*. 2010. Vol. 34, Issue 4. P. 675–682. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.05.001. (In Engl.).
11. Chernyavskiy D. I., Chernyavskiy D. D. *Issledovaniye dinamicheskikh kharakteristik udara do 100 m/s* [Study of dynamic characteristics of impact of two solid deformable bodies at impact speed of up to 100 m/s] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 5 (179). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-5-14. EDN: BBYOHG. (In Russ.).
12. Chernyavskiy D. I., Chernyavskiy D. D. *Issledovaniye uprugo-plasticheskogo izgiba listovoy zagotovki razlichnoy tolschchiny pri eye val'tsevanii* [Study elastoplastic bending of a sheet blank of different thickness while rolling] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 2 (186). P. 44–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-44-54. (In Russ.).
13. Matveyev A. S. *Spravochnik kuznetsa* [Blacksmith's Handbook]. Moscow, 2011. 357 p. ISBN 978-5-94275-579-9. (In Russ.).
14. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveyev V. V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of Strength of Materials]. 2th ed. Kyiv, 1988. 736 p. ISBN 5-12-000299-4. (In Russ.).
15. Bronshteyn I. N., Semendyayev K. A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and college students]. Saint Petersburg, 2010. 608 p. ISBN 978-5-8114-0906-8. (In Russ.).
16. Gol'dsmit V. *Udar i kontaktnyye yavleniya pri srednikh skorostyakh* [Fizika bystroprotekayushchikh protsessov. Impact

and contact phenomena at medium speeds. Physics of fast processes]. In 3 vols. Moscow, 1971. Vol. 2. P. 151–201. (In Russ.).

**CHERNYAVSKY Daniil Dmitrievich**, Student gr. ФИТ-201 of Information Technologies and Computer Systems Faculty, OmSTU, Omsk.

**For citations**

Chernyavsky D. I., Chernyavsky D. D. Study of elastoplastic bending of sheet blank of different thickness at its bending taking into account the springing effect // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 5–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-5-14.

**Received November 15, 2023.**

© **D. I. Chernyavsky, D. D. Chernyavsky**

**CHERNYAVSKY Dmitry Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Mechanical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 8610-2957

AuthorID (RSCI): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

AuthorID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

Correspondence address: dichernyavskiy@omgtu.tech