

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ДВУХУГЛОВОЙ ГИБКИ В ШТАМПЕ С УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТОМ

© 2016 И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, А.О. Кузин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 25.04.2016

В данной работе предложена новая схема процесса двухугловой гибки в штампе с упругой планкой, проведен анализ ее напряженно-деформированного состояния в DEFORM-2D.

*Ключевые слова:* двухугловая гибка; упругие свойства; деформация; напряжение; форма пуансона; упругая планка; упругое пружинение; ширина планки.

Гибка листового металла осуществляется в результате упругопластической деформации, протекающей различно с каждой из сторон изгибаемой заготовки [1].

Слои металла внутри угла изгиба (со стороны пуансона) сжимаются и укорачиваются в продольном и растягиваются в поперечном направлении. Наружные слои (со стороны матрицы) растягиваются и удлиняются в продольном и сжимаются в поперечном направлении. Между удлиненными и укороченными слоями (волоками) находится нейтральный слой, длина которого равна первоначальной длине заготовки. При гибке узких полос происходит сильное искажение поперечного сечения, заключающееся в уменьшении толщины в месте изгиба, уширении внутри угла с образованием поперечной кривизны и сужении с наружной стороны (рис. 1).

В результате утонения материала и искажения формы поперечного сечения нейтральный слой в месте изгиба не проходит посередине сечения, а смещается в сторону малого радиуса. При гибке широких полос и листов также происходит утонение материала, но почти без искажения поперечного сечения, так как деформации в поперечном направлении противодействует сопротивление материала большой ширины. Лишь по краям широких полос происходит деформация, аналогичная поперечной деформации узких полос.

В большинстве случаев гибка происходит при большой величине деформаций, когда в металле кроме продольных растягивающих и сжимающих напряжений образуются радиальные напряжения сжатия, которые возникают в результате давления крайних слоев металла на внутренние и достигают наибольшей величины у нейтрального слоя.

На рис. 2 приведены схемы напряженно-деформированного состояния при изгибе. При изгибе узких заготовок (рис. 2, а) деформированное состояние — объемное, так как поперечное сечение образца деформируется во всех трех направлениях.

По мере увеличения ширины изгибаемой заготовки поперечная деформация постепенно уменьшается и становится весьма малой в результате значительного сопротивления, оказываемого большой шириной заготовки (рис. 2, б).

С целью упрощения при изгибе широких заготовок деформацией боковых поверхностей можно пренебречь и рассматривать деформацию всего сечения как деформацию сдвига.

Как известно, в процессе при двухугловой гибке возникает упругое пружинение [1]. Формула для приближенного определения упругого пружинения (Π-образная гибка) [1]:

$$\operatorname{tg} \beta = 0,375 \cdot \frac{l_1}{kS} \cdot \frac{\sigma_m}{E}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – угол пружинения;

$k = 1 - x$  – коэффициент, определяющий положение нейтрального слоя в зависимости от  $r/S$ ;

$l_1 = r_m + r_n + 1,25S$  – плечо гибки, мм;

$\sigma_m$  – предел текучести, МПа;

$E$  – модуль упругости, МПа.

На кафедре обработки металлов давлением Самарского национального исследовательского университета ведется работа по исследованию упругих свойств штамповой оснастки, в частности, процесса гибки листового материала [2].

В результате работы была разработана модель штампа с упругой планкой, которая позволяет сделать процесс двухугловой гибки более технологически и экономически выгодным. Данный штамп предназначен для углагиба  $90^\circ$  и  $90^\circ - \beta$  и не учитывает утонение штампуемой заготовки в зонегиба. Схема процесса представлена на рис. 3.

В начале процесса заготовка 3 фиксируется на матрице 5 и выталкивателе 4, который находится в верхнем положении. При движении пуансона 1

Попов Игорь Петрович, доктор технических наук, профессор. E-Mail: igr\_popov@mail.ru

Нестеренко Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент. E-Mail: nesterenko77@mail.ru

Кузин Александр Олегович, аспирант.

E-Mail: mrfry@mail.ru

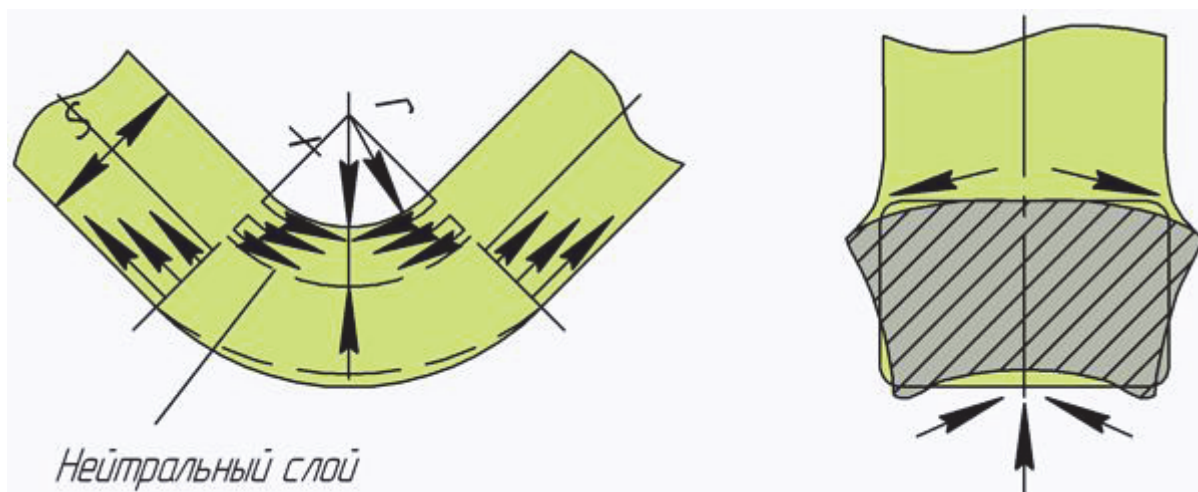


Рис. 1. Схема процесса гибки

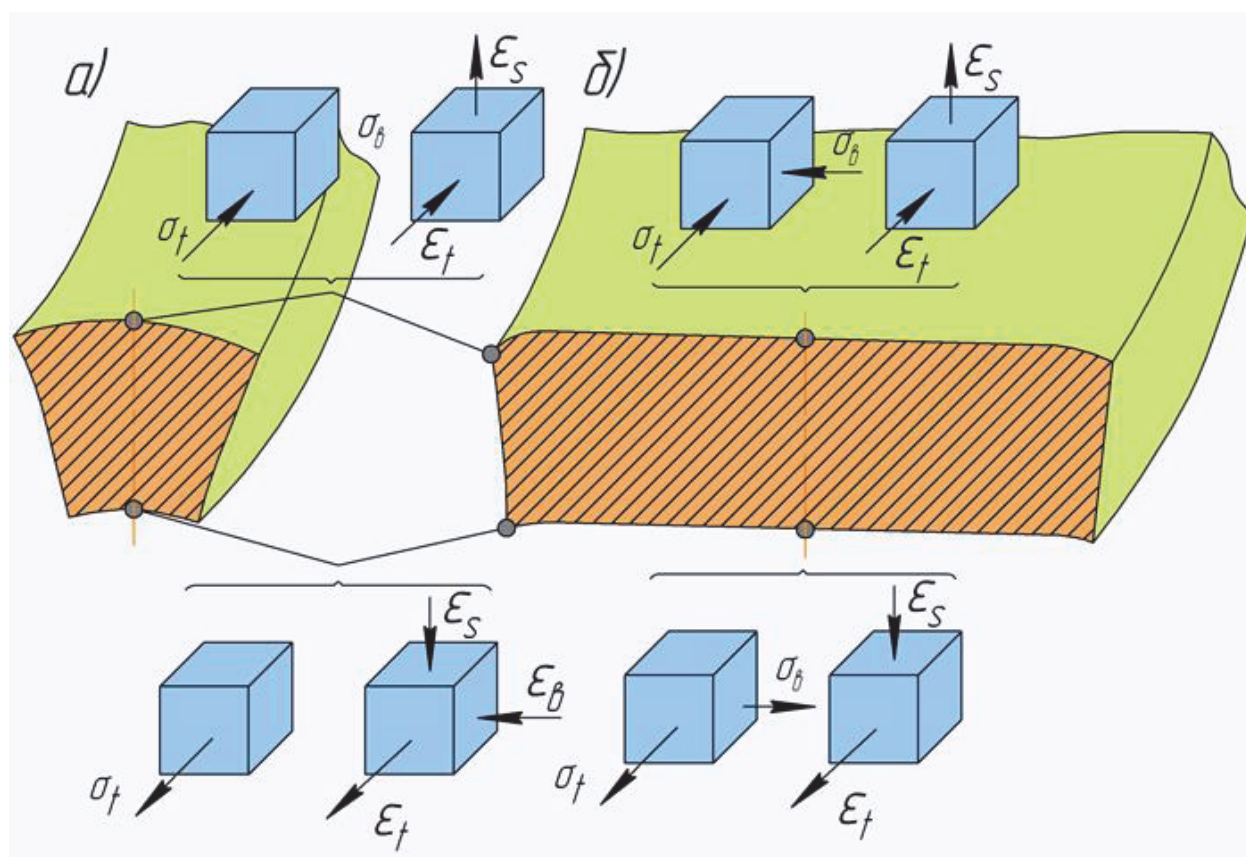


Рис. 2. Схемы напряженно-деформированного состояния при изгибе:  
 $\sigma$  — напряжение;  $\varepsilon$  — деформации

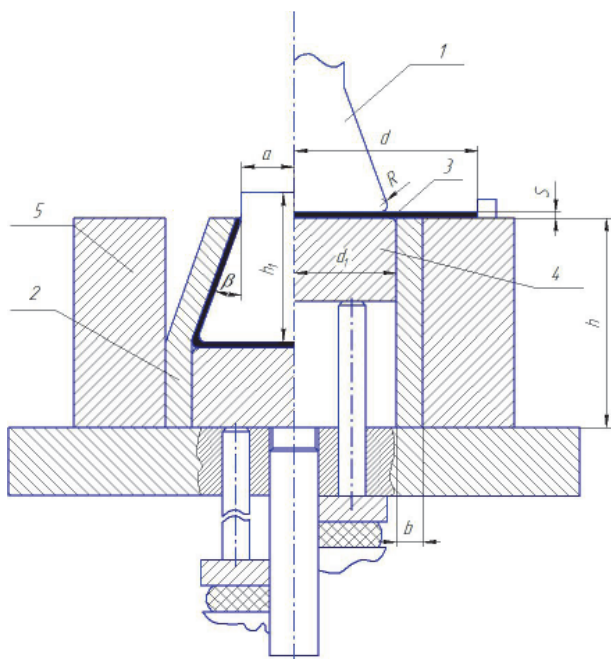
вниз выталкиватель 4 опускается, упругая планка 2 начинает прижимать вертикальные полки заготовки 3 к пуансону 1, создавая дополнительную нагрузку на заготовку 3. При обратном ходе выталкиватель 4 выводит заготовку из матрицы 5, при этом упругая планка 2 на протяжении всего процесса прижимает заготовку 3 к пуансону 1. После окончания процесса заготовку 3 снимают с пуансона 1 пинцетом.

Применение данного способа позволит: использовать упругие свойства штамповой оснастки, повысить качество детали, снизить упругое пружинение за счет формы упругой планки и

формы пуансона, исключить из технологического процесса операции калибровки.

Для подтверждения был смоделирован процесс деформации упругой планки и процесс двухугловой гибки с использованием упругой планки в программном комплексе DEFORM-2D. На рис. 4 указана геометрия объектов при моделировании процесса двухугловой гибки с использованием упругой планки.

Моделирование проводилось для процесса деформации прямого и обратного хода. Анализ результатов проводился в постпроцессоре программного комплекса. Для оценки условий



**Рис. 3.** Схема процесса двухугловой гибки с использованием упругой планки (слева окончание процесса, справа начало процесса): 1 – пуансон; 2 – упругая планка; 3 – заготовка; 4 – выталкиватель; 5 – матрица;  $h$  – высота планки;  $b$  – ширина планки;  $R$  – радиусгиба;  $S$  – толщина заготовки;  $d$  – длина заготовки;  $h_1$  – высота пуансона;  $a$  – ширина пуансона,  $d_1$  – ширина выталкивателя.

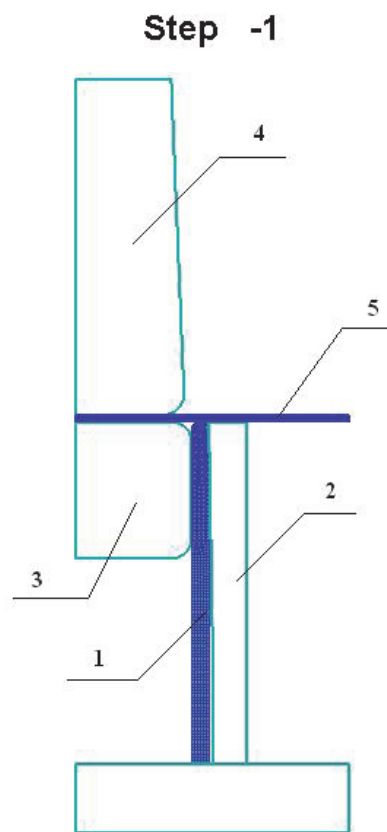
процесса рассматривались поля распределений напряжений и деформаций по объёму планки в момент начала деформации, в середине процесса деформации и по окончании деформации.

В результате для заготовки толщиной  $s=1\text{мм}$  было получено, что максимальные напряжения в начале деформации равны  $0,375\text{ МПа}$  (для  $s=6\text{мм}$ ,  $\sigma_{\text{max}}=0,519\text{МПа}$ ), они возникают в месте контакта заготовки с пуансоном, упругой планки с выталкивателем и упругой планки с матрицей. Значительных пластических деформаций ещё не возникает, однако в заготовке в месте контакта с пуансоном степень пластической деформации достигает  $36\%$  для  $s=1\text{мм}$  и  $22,4\%$  для  $s=6\text{мм}$ . В середине процесса деформации максимальные напряжения возникают в большем объёме заготовки и упругой планки, а именно в местах контакта заготовки и упругой планки, а также в месте контакта упругой планки и матрицы равны: для  $s=1\text{мм}$ ,  $\sigma_{\text{max}}=0,375\text{ МПа}$ ; для  $s=6\text{мм}$   $\sigma_{\text{max}}=0,519\text{МПа}$ . Максимальные значения пластических деформаций при этом наблюдаются в месте скругления заготовки (контактная поверхность «заготовка- пуансон»), их уровень достигает  $36\%$  для  $s=1\text{мм}$  и  $67,3\%$  для  $s=6\text{мм}$ , а также в месте контакта заготовки с упругой планкой и на внешнем радиусе скругления:  $24\%$  для  $s=1\text{мм}$ ;  $44,9\%$  для  $s=6\text{мм}$ . По окончании прямого хода пуансона максимальные напряжения в упругой планке наблюдаются по сечению упругой планки на уровне

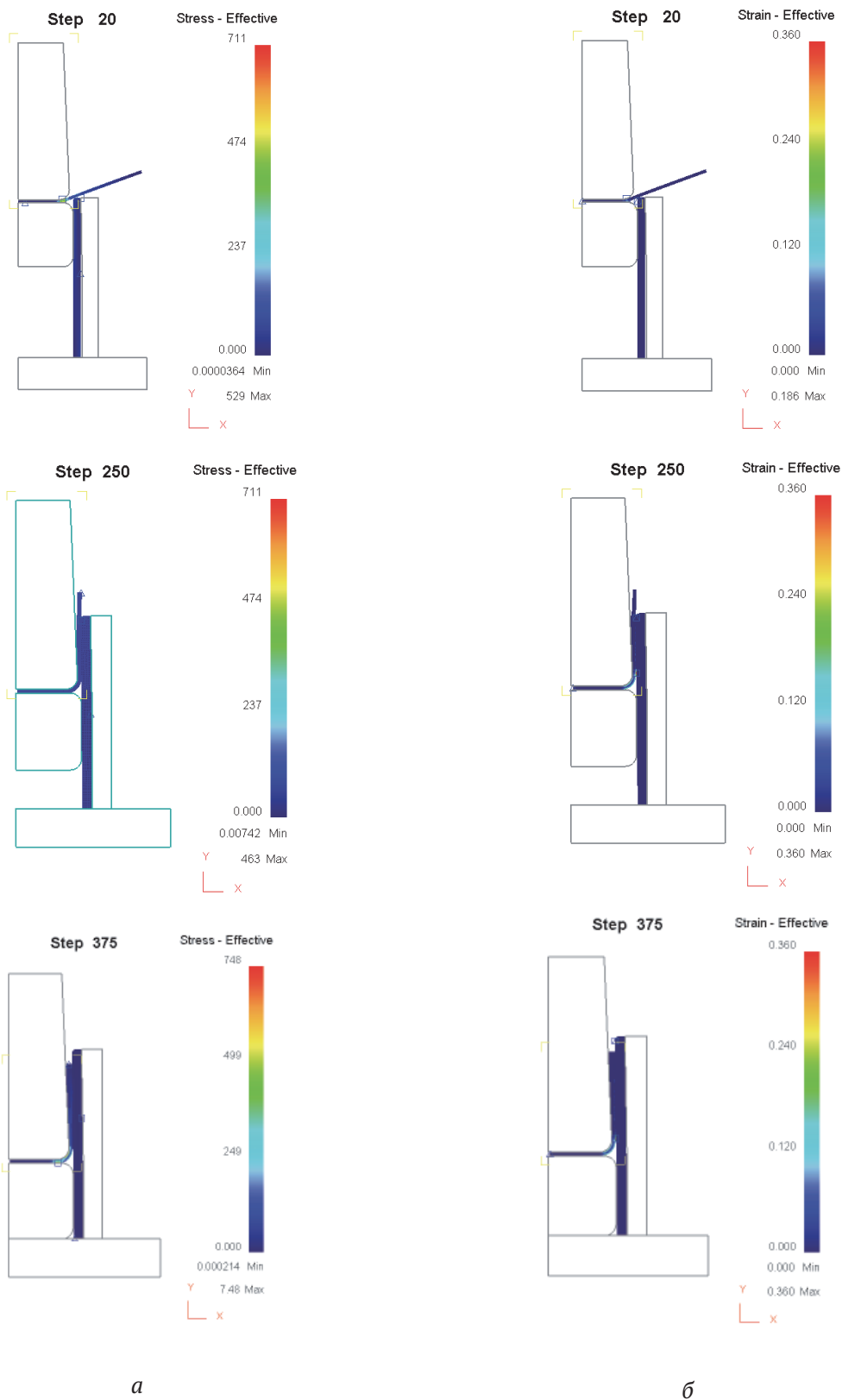
контакта матрицы и выталкивателя и равны: для  $s=1\text{мм}$ ,  $\sigma_{\text{max}}=0,748\text{МПа}$ ; для  $s=6\text{мм}$ ,  $\sigma_{\text{max}}=1,12\text{МПа}$ . В основном же уровень напряжений в этой области составляет  $0,249\text{ МПа}$  для  $s=1\text{мм}$  и  $0,749\text{МПа}$  для  $s=6\text{ мм}$ . Таким образом, пластические деформации в планке не возникают, в заготовке же на данном этапе максимальное значение пластической деформации достигает  $36\%$  для  $s=1\text{мм}$  и  $67,3\%$  для  $s=6\text{мм}$  (в области внутреннего радиуса скругления). На рис. 5 показаны поля распределения напряжений (а) и деформаций (б) по объёму заготовки и планки в момент начала, середины и по окончании деформации при прямом ходе.

При начале обратного хода деформации в упругой планке не возникают. По окончании обратного хода пуансона, то есть после снятия нагрузки напряжения, как и пластические деформации, в планке отсутствуют. В заготовке деформации составляют  $39,7\%$  для  $s=1\text{мм}$  и  $67,3\%$  для  $s=6\text{мм}$ . На рисунке 6 показаны поля распределения напряжений (а) и деформаций (б) по объёму заготовки и планки в начале, середине и по окончании деформации при обратном ходе.

Таким образом, напряжения, возникающие в планке и заготовке, имеют допустимый уровень для материалов, из которых они изготовлены. Пластическая деформация активно проходит в заготовке, в планке же она отсутствует (что подтверждает её упругую модель).



**Рис. 4.** Геометрия объектов при моделировании процесса двухугловой гибки с использованием упругой планки

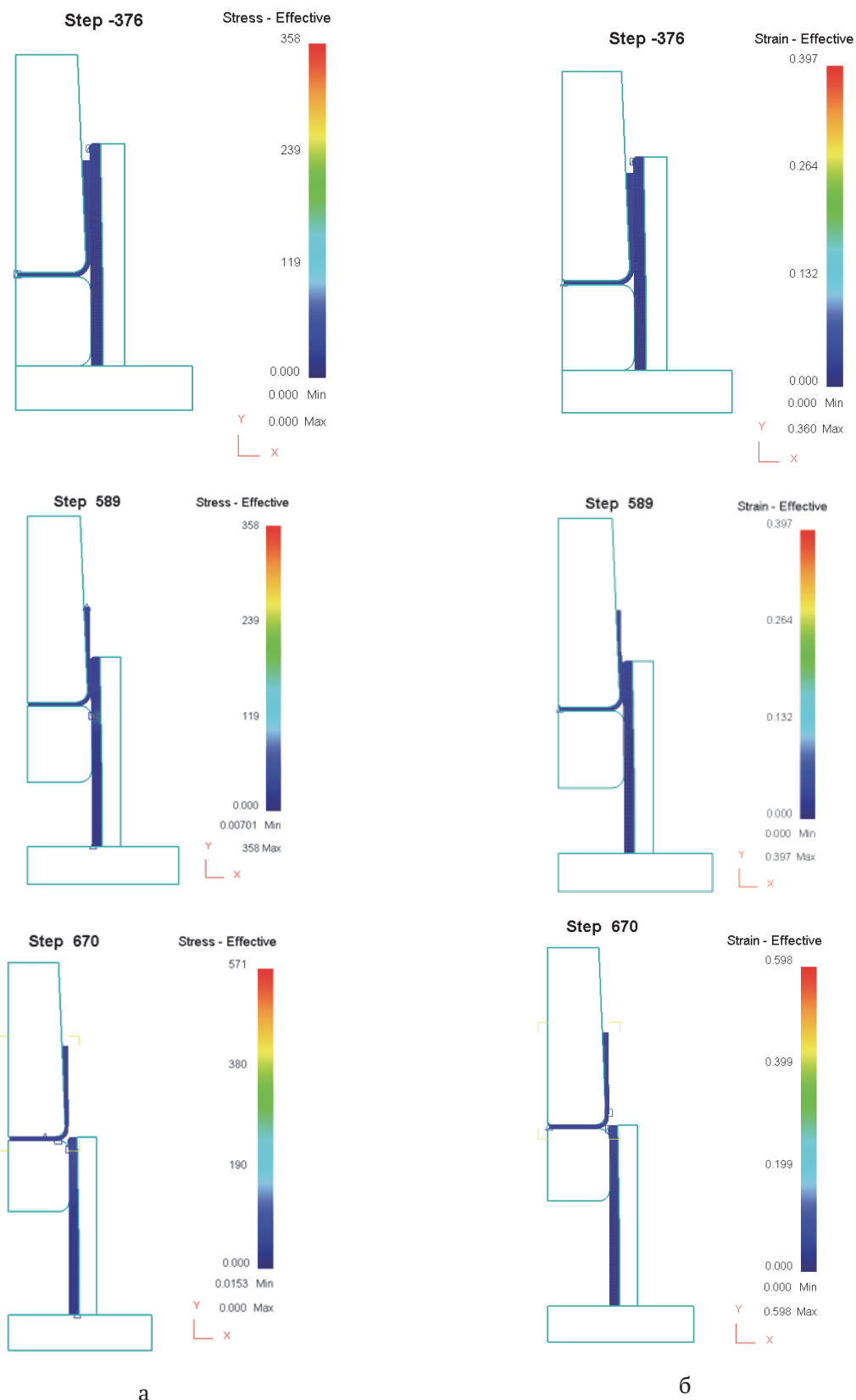


**Рис. 5.** Поля распределения напряжений (а) и деформаций (б) по объёму заготовки и планки в начале, середине и по окончании деформации

Результаты замера толщины заготовки в конце прямого хода, показали, что толщина постоянна ( $S_1=1$  мм и  $S_2=6$  мм) и равна начальной, кроме места перегиба, где наблюдается небольшое утонение за счет пластической деформации (0,98 мм и 5,89 мм).

Также был проведен анализ напряжения по ширине планки в месте максимального изгиба упругой планки и анализ напряжения на поверхности планки по длине образующей.

Рис. 5 показывает, что максимальные на-



**Рис. 6.** Поля распределения напряжений (а) и деформаций (б) по объёму заготовки и планки в начале, середине и по окончании деформации при обратном ходе

пряжения возникают в точках соприкосновения планки с заготовкой и матрицы с планкой и не превышают предела текучести  $\sigma_i = 0,4 \text{ МПа} \ll \sigma_t = 460 \text{ МПа}$  - для стали 45,  $\sigma_i = 0,56 \text{ МПа} \ll \sigma_m = 460 \text{ МПа}$  для стали 45.

Из рис. 5 видно, что распределение имеет максимальное значение в месте изгиба планки и не превышает предел текучести  $\sigma_i = 0,56 \text{ МПа} \ll \sigma_m = 460 \text{ МПа}$  - для стали 45,  $\sigma_i = 0,58 \text{ МПа} \ll \sigma_m = 460 \text{ МПа}$  - для стали 45.



Штамповую оснастку целесообразно изготавливать из инструментальных сталей, предназначенных для штампов холодной штамповки. Размеры пуансона и матрицы соответствуют размерам детали. Пуансон корректируется в зависимости от геометрических параметров детали, угла пружинения, минимального радиуса гибки и материала заготовки.

Таким образом при моделирование процесса были рассчитаны напряжения и деформации, которые показали, что упругая планка пластически не деформируется. Разработанная модель штамповой оснастки с упругой планкой показала перспективность технологического процесса и рекомендована к внедрению в производство.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 6 изд. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1979. 520 с.
2. Попов И.П., Нестеренко Е.С., Кузин А.О. Исследование упругих свойств штамповой оснастки при операции двухугловой гибки в штампе с упругой планкой // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. №4, 2013. С. 20-23.
3. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд., переработ. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
4. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. Киев: Наукова думка 1988. 2-е изд. 736 с.
5. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

## PROBE OF STRAINS AND THE VOLTAGES ARISING AT TWO-ANGLE BENDING IN A DIE WITH ELASTIC PLATE

© 2016 I.P. Popov, E.S. Nesterenko, A.O. Kuzin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

In the current work the scheme of two-angle bending in a die with elastic plate is proposed, results of elastic stringiness angle simulation in software DEFORM-2D are analyzed.

*Keywords:* two-angle bending, elastic properties, punch shape, an elastic plate, elastic stringiness, width of plate.

---

Igor Popov, Doctor of Technics, Professor.

E-Mail: igr\_popov@mail.ru

Elena Nesterenko, Candidate of Technics, Associate Professor.

E-Mail: nesteren-ko77@mail.ru

Alexander Kuzin, Graduate Student. E-Mail: mrfry@mail.ru