

УДК 621.98.043

Моделирование и управление явлением упругой отдачи, возникающей в процессе однопереходной формовки-вытяжки детали типа днище

Чумадин А. С.¹, Батурин Д. А.^{1,*}

^{*}baturinda@mati.ru

¹МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского, Москва, Россия

В статье исследуются возможности управления упругой отдачей (пружинением) деталей типа днищ после снятия внешней нагрузки при ее изготовлении в процессе формовки-вытяжки из плоской листовой заготовки. Изготовление таких деталей без учета пружинения ведет к значительным затратам, связанным с ручной доводкой деталей или корректировкой рабочего контура технологического оснащения. Целью исследования является снижение трудоемкости изготовления деталей данного типа за счет повышения точности обводов получаемых деталей. В работе предложены три способа управления пружинением и даны результаты моделирования. Моделирование пружинения проведено методом конечных элементов при помощи программного комплекса AutoForm и показало повышение точности обводов деталей при изменении режимов традиционного процесса формовки-вытяжки.

Ключевые слова: пружинение, формовка-вытяжка, днище, метод управления, снижение трудоемкости, конечно-элементное моделирование.

Введение

Процессы формовки и вытяжки деталей из листовых заготовок широко используются в современном машиностроении [1]. В процессах изготовления деталей типа днище часто применяют совмещенный процесс формовки-вытяжки (рис. 1), где напряженно-деформированное состояние в куполе детали соответствует процессу формовки, а во фланцевой части – процессу вытяжки.

Известны труды многих исследователей в области расчета пружинения деталей после снятия внешней нагрузки. Наиболее полно они изложены в работах Э.Л. Мельникова, Е.И. Исаченкова и Л.Г. Степанского. В работах [2-4] представлены решения задач расчета пружинения, однако они носят больше эмпирический характер и не предусматривают возможность управления процессом. В работах [5,6] была приближенно решена задача расчета напряженно-деформированного состояния в процессе формовки

деталей типа днище и значений пружинения, также дан расчет формы заготовки после пружинения.

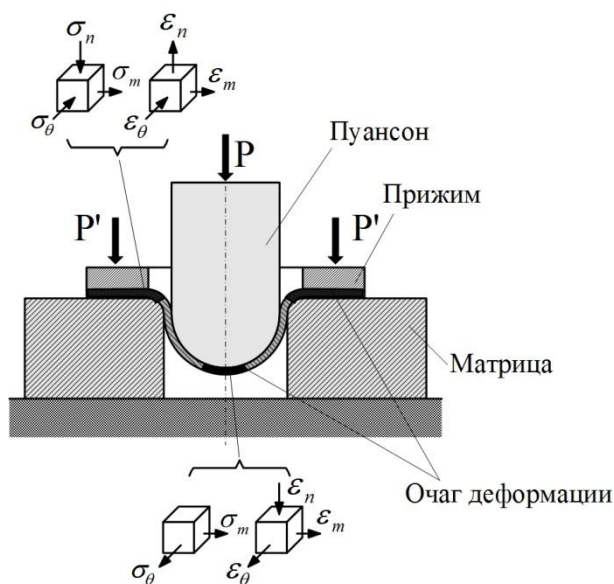


Рис. 1. Схема формовки-вытяжки

Настоящая работа, являясь продолжением исследований [7,8], связанных с изучением процесса формовки-вытяжки, имеет цель подтвердить средствами конечно-элементного моделирования предположения о наличии границы перехода процесса формовки в вытяжку и возможности управления пружинением посредством перемещения этой границы.

Основываясь на предшествующих исследованиях, было установлено, что изменять величину пружинения можно несколькими технологическими методами, в том числе:

- Установлением оптимальных областей распределения напряжений на этапе формовки-вытяжки заготовки;
- Дополнительным растяжением фланцевой части заготовки;
- Использованием двухпереходной формовки-вытяжки.

Исходя из этого, при моделировании процесса однопереходной формовки-вытяжки, использовали три метода управления пружинением:

1. Управление положением линии перехода процесса формовки в процесс вытяжки путем изменения давления прижима фланца за счет варьирования коэффициентами трения на поверхностях матрицы и прижима штампа;
2. Управление пружинением через дополнительное растягивающее усилие во фланцевой части заготовки;
3. Управление пружинением через технологический вкладыш на первом переходе обработки.

Для удобства сравнения с результатами исследований [5-8], моделирование управления пружинением осуществляли для процесса однопереходной формовки-вытяжки детали сферической формы из сплава АМг5 толщиной 0,8 мм по жесткой матрице радиусом $R=120$ мм и глубиной $h=60$ мм.

1. Управление пружинением за счет регулирования усилия прижима фланца

В программном комплексе AutoForm моделировали процесс однопереходной формовки-вытяжки трехмерной модели днища методом конечных элементов с номинальным усилием прижима фланца $P_1 = 2$ МПа. Увеличение давления прижима получали через изменение сил контактного трения на поверхности матрицы и прижима. Тем самым осуществляли перемещение линии перехода процесса формовки в вытяжку.

Этапы моделирования:

- однопереходная формовка-вытяжка;
- обрезка фланца днища;
- расчет упругих перемещений (пружинения) детали относительно контура матрицы.

В рассматриваемом случае варьировали двумя коэффициентами трения: k_1 – на поверхности прижима, k_2 – на поверхности матрицы (рис. 2). Значения коэффициентов трения находятся в пределах от 0 до 1, где 0 – абсолютное скольжение, а 1 – абсолютное трение. Значение коэффициента трения на поверхности пуансона $k_3 = 0$.

Результаты расчета упругих перемещений (пружинения) U и толщины стенки днища S с различными коэффициентами трения k_1 и k_2 на поверхностях фланца представлены на рис. 3-10 и в табл. 1.

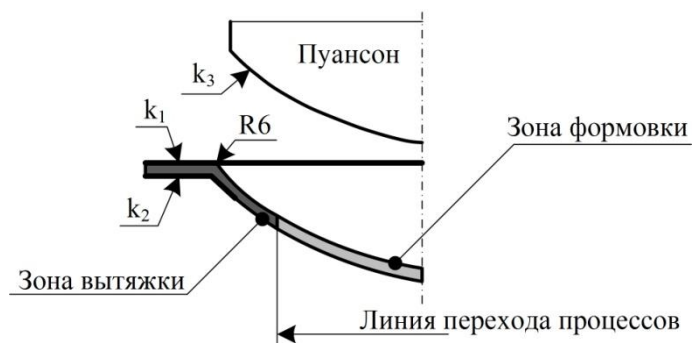


Рис. 2. Формовка-вытяжка с регулированием переходной линии за счет сил контактного трения во фланце

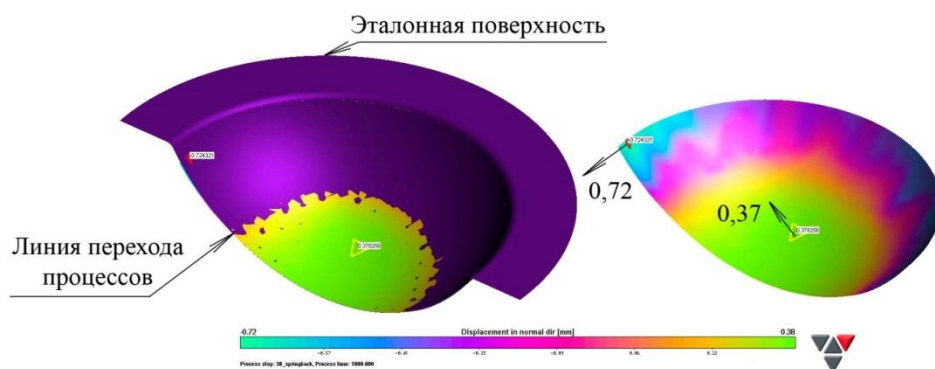


Рис. 3. Упругие перемещения (пружинение) в мм при $k_1=0,18$; $k_2=0,18$

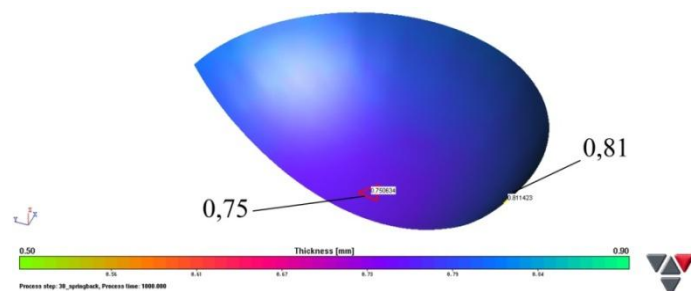


Рис. 4. Распределение толщины стенки детали при $k_1=0,18$; $k_2=0,18$

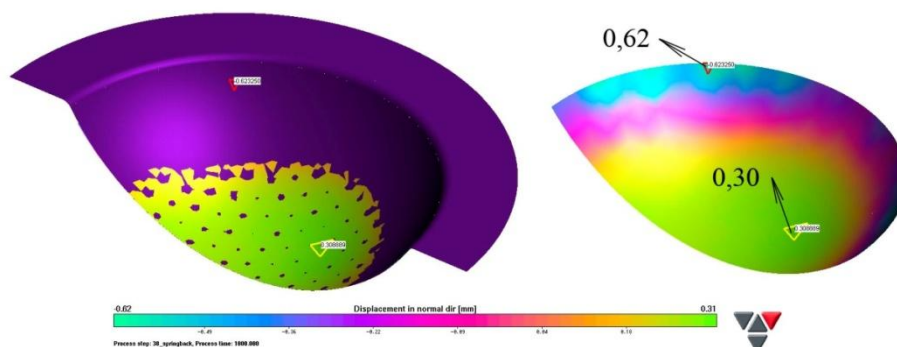


Рис. 5. Упругие перемещения (пружинение) в мм при $k_1=0,18$; $k_2=0,90$

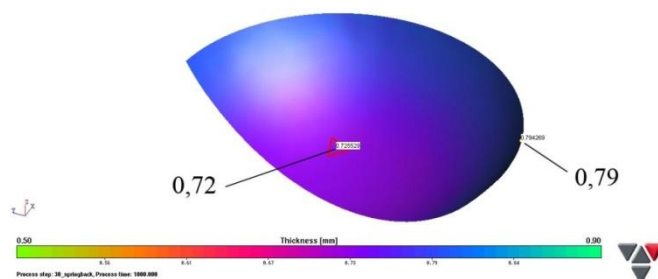


Рис. 6. Распределение толщины стенки детали при $k_1=0,18$; $k_2=0,90$

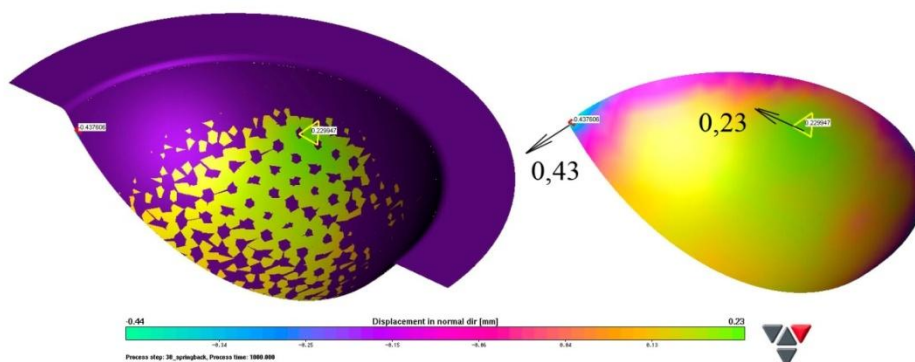


Рис. 7. Упругие перемещения (пружинение) в мм при $k_1=0,40$; $k_2=1,00$

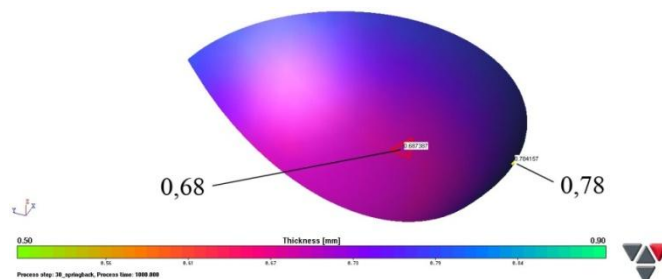


Рис. 8. Распределение толщины стенки детали при $k_1=0,40$; $k_2=1,00$

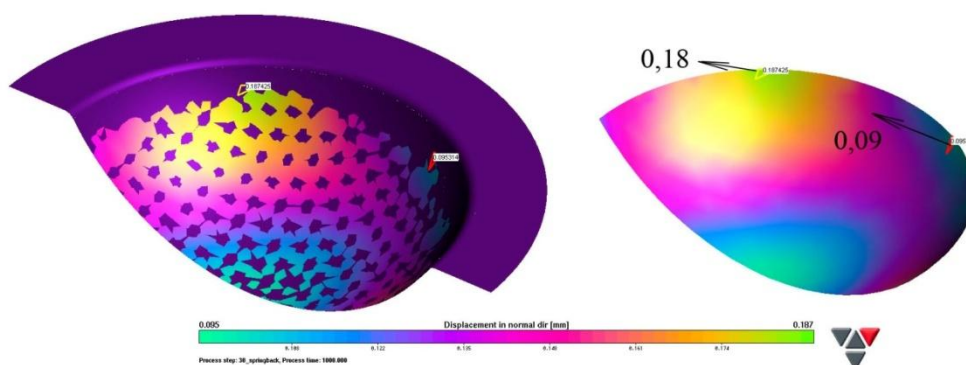


Рис. 9. Упругие перемещения (пружинение) в мм при $k_1=0,60$; $k_2=1,00$

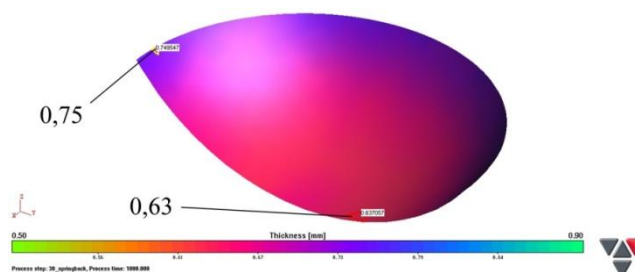


Рис. 10. Распределение толщины стенки детали при $k_1=0,60$; $k_2=1,00$

Таблица 1. Результаты расчетов пружинения и толщины

Значения коэффициента k	$U+$, мм	$U-$, мм	$S_{\max}$, мм	$S_{\min}$, мм
$k_1=0,18; k_2=0,18$	0,37	0,72	0,81	0,75
$k_1=0,18; k_2= 0,90$	0,30	0,62	0,79	0,72
$k_1=0,40; k_2= 1,00$	0,23	0,43	0,78	0,68
$k_1=0,60; k_2= 1,00$	0,09	0,18	0,75	0,63

Из табл. 1 видно, что управляя усилием прижима фланцевой части заготовки можно снизить пружинение в 4 раза при разнотолщинности детали, не превышающей 20%, что в общих случаях не превышает допуска, установленного техническими условиями.

2. Управление пружинением через дополнительное растягивающее усилие во фланцевой части заготовки

Сущность данного метода управления пружинением заключается в создании на момент прилегания детали к обводу матрицы дополнительной деформации фланца заготовки кольцевым пуансоном, вызывающим появление меридионального напряжения $\Delta\sigma_m$ от действия силы P_1 (рис. 11). При этом основное деформирующее усилие P в купольной области остается неизменным, а фланец заготовки на периферии зажат давлением P_2 .

Этапы моделирования:

- однопереходная формовка-вытяжка;
- формовка кольцевого рифта на фланце;
- обрезка фланца днища;
- расчет пружинения детали.

Условия контактного трения на поверхностях матрицы и кольцевого пуансона соответствовали коэффициентам $k=0,18$, на поверхности основного пуансона – $k=0$, на поверхности прижима $k=0,18$ на первом этапе и $k=1,00$ – на втором этапе.

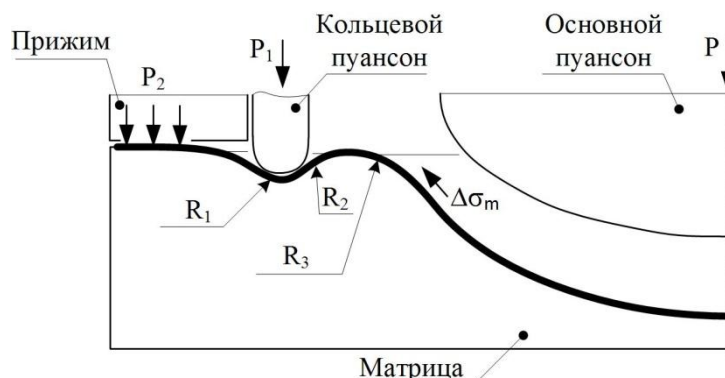


Рис. 11. Схема управления пружинением через дополнительное растягивающее усилие

Результаты расчета упругих перемещений (пружинения) U и толщины стенки днища S при различных значениях R_1, R_2, R_3 и P_2 представлены на рис. 12-17 и в табл. 2.

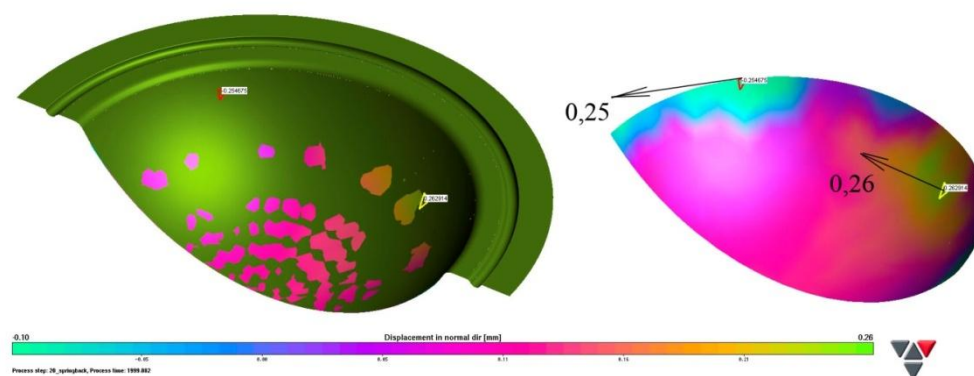


Рис. 12. Упругие перемещения (пружинение) в мм при $R_1=R_2=3$ мм, $R_3=6$ мм, $P_2=40$ МПа

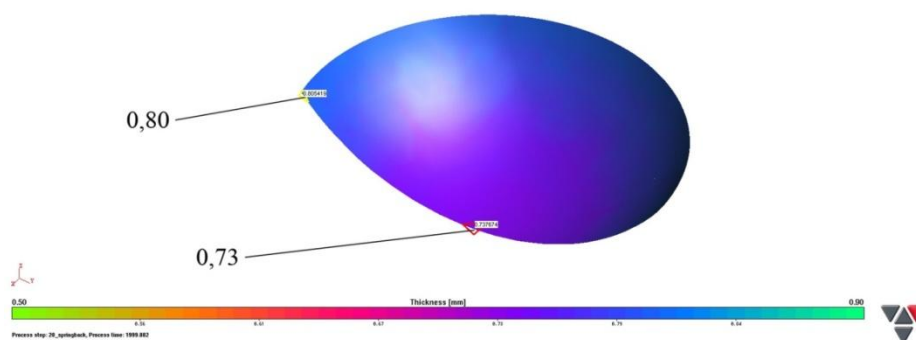


Рис. 13. Распределение толщины стенки детали при $R_1=R_2=3$ мм, $R_3=6$ мм, $P_2=40$ МПа

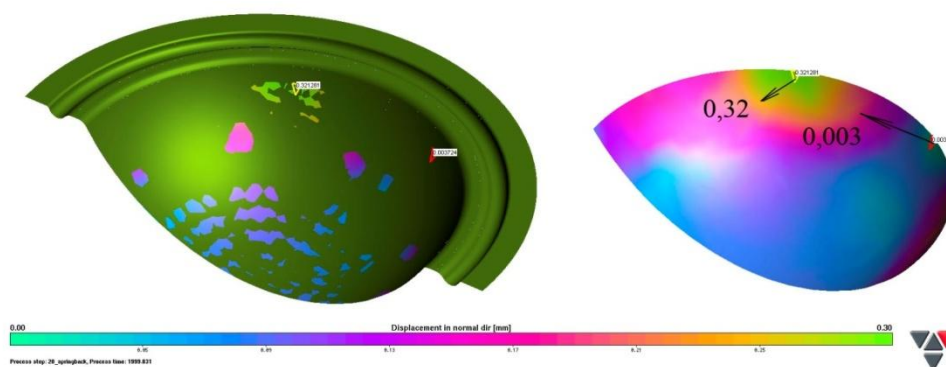


Рис. 14. Упругие перемещения (пружинение) в мм при $R_1=5$ мм, $R_2=R_3=6$ мм, $P_2=40$ МПа

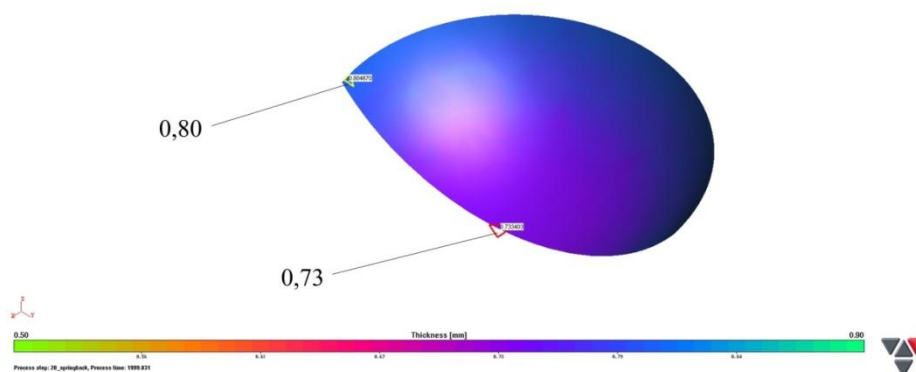


Рис. 15. Распределение толщины стенки детали при $R_1=5$ мм, $R_2=R_3=6$ мм, $P_2=40$ МПа

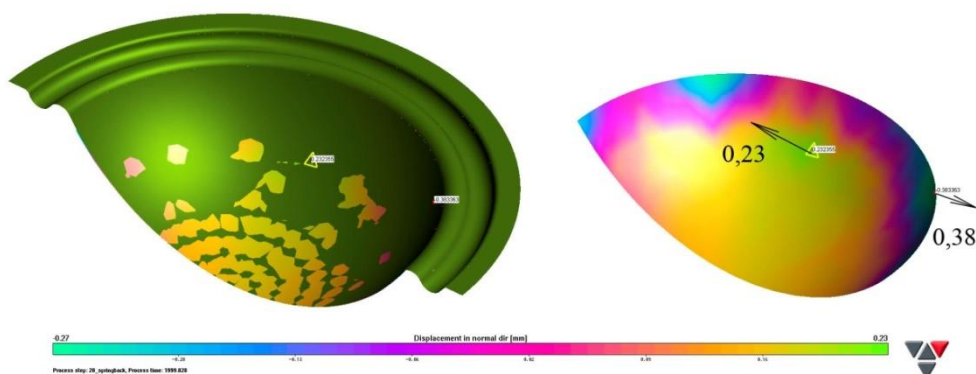


Рис. 16. Упругие перемещения (пружинение) в мм при $R_1=R_2=R_3=7$ мм, $P_2=40$ МПа

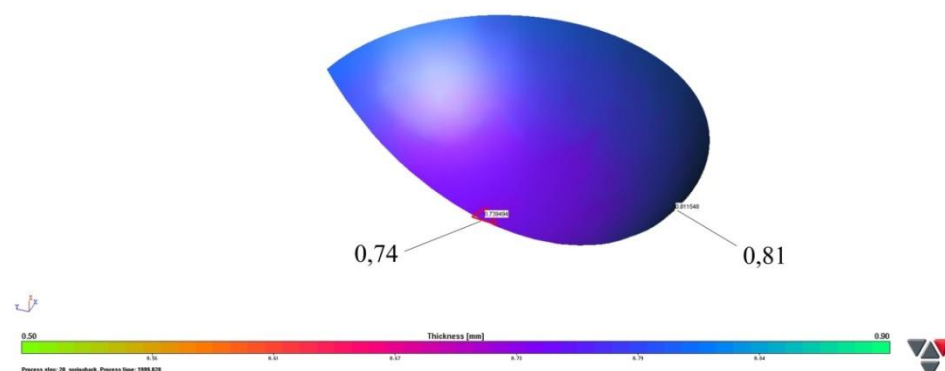


Рис. 17. Распределение толщины стенки детали при $R_1=R_2=R_3=7$ мм, $P_2=40$ МПа

Таблица 2. Результаты расчетов пружинения и толщины

Значения параметров	U+, мм	U-, мм	S _{max} , мм	S _{min} , мм
$R_1=R_2=3$ мм, $R_3=6$ мм, $P_2=40$ МПа	0,26	0,25	0,80	0,73
$R_1=5$ мм, $R_2=R_3=6$ мм, $P_2=40$ МПа	0,32	0,003	0,80	0,73
$R_1=R_2=R_3=7$ мм, $P_2=40$ МПа	0,23	0,38	0,81	0,74

Как видно из табл. 2, расчетные значения суммарного пружинения в двух направлениях имеет наименьшее значение при $R_1=5$ мм, $R_2=R_3=6$ мм, $P_2=40$ МПа. Это говорит о наличии интервала оптимальных значений дополнительного меридионального напряжения $\Delta\sigma_m$, вызываемого действием кольцевого пуансона. Также следует отметить, что при использовании данного метода удалось снизить значения пружинения в 3,4 раза по сравнению с исходным значением (рис. 3), распределение толщины стенки детали при этом не изменилось.

3. Управление пружинением через технологический вкладыш

Использование технологического вкладыша на поверхности матрицы позволяет на последнем переходе вызвать дополнительное растягивающее усилие в меридиональном направлении. При проектировании вкладыша должно соблюдаться основное условие, что длина отрезка L_2 должна быть меньше длины отрезка L_1 на величину необходимых деформаций. В нашем случае разница длин составила 0,73 мм.

Этапы моделирования:

- формовка-вытяжка в оснастке с вкладышем;
- изъятие из штампа;
- расчет пружинения;
- отжиг при температуре $t = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- формовка-вытяжка без вкладыша;
- расчет пружинения;
- обрезка фланца.

Условия контактного трения на поверхностях матрицы, вкладыша и прижима соответствовали коэффициентам $k=0,18$, на поверхности пуансона – $k=0$. Давление прижима $P_1=2\text{ МПа}$.

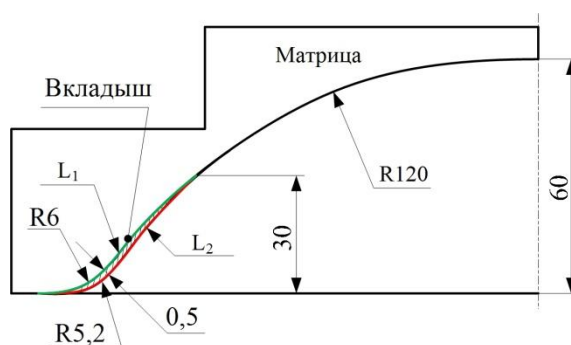


Рис. 18. Схема установки технологического вкладыша

Результаты расчета упругих перемещений (пружинения) U и толщины стенки днища S , полученные при использовании промежуточного технологического вкладыша и отжига с обрезкой фланца и без обрезки, представлены на рис. 19-20 и 21 соответственно.

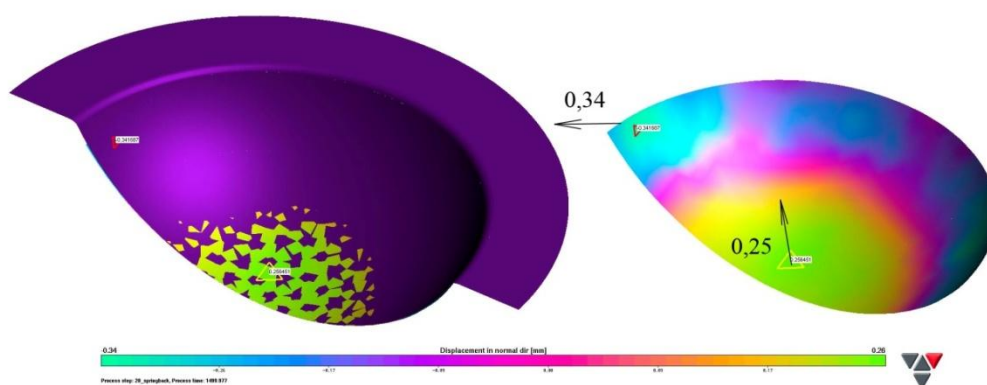


Рис. 19. Упругие перемещения (пружинение) детали в мм с использованием вкладыша и отрезкой фланца

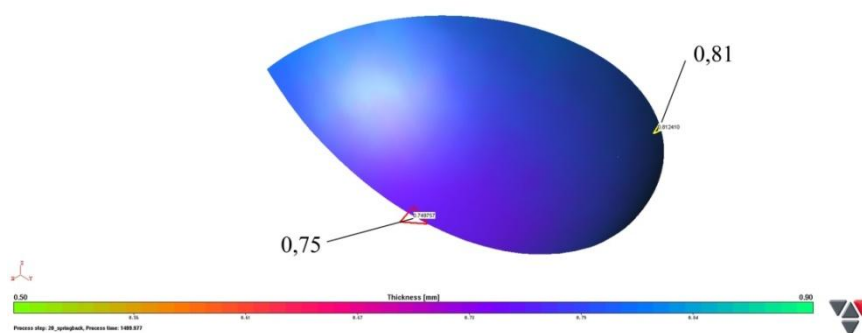


Рис. 20. Распределение толщины стенки детали

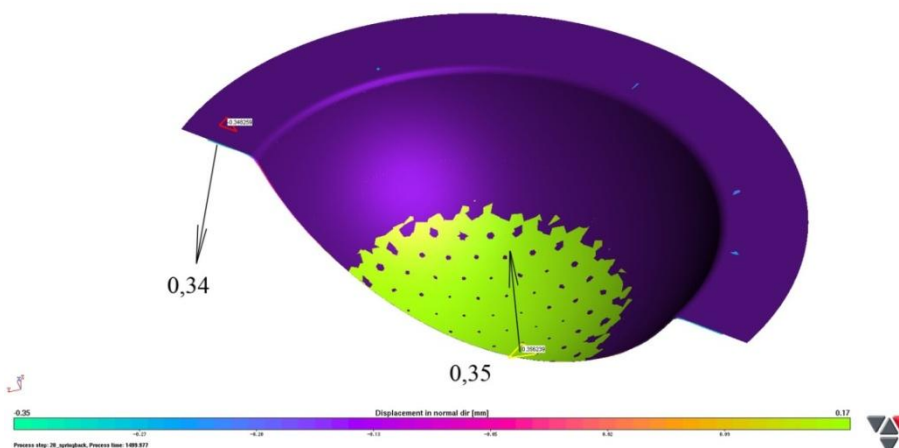


Рис. 21. Упругие перемещения (пружинение) детали в мм с использованием вкладыша без отрезки фланца

Результаты расчета показали, что суммарное значение пружинения при использовании вкладыша и обрезке фланца по сравнению с исходным значением (рис. 3) снизилось в 1,8 раза при этом распределение толщины осталось неизменным. Как видно из рисунка 21, суммарное значение пружинения после обрезки фланца снизилось на 15%.

Заключение

Произведенные расчеты подтвердили предположение о влиянии границы перехода процесса формовки в процесс вытяжки при изготовлении деталей типа днище и возможность управления значениями пружинения при перемещении этой границы. Из трех методов управления пружинением наиболее оптимальное соотношение снижения пружинения к наименьшему утонению детали получили при дополнительном растяжении фланца с использованием кольцевого пуансона (в 3,4 раза с сохранением исходного утонения), однако этот метод более сложен в техническом плане. Метод с удержанием фланца заготовки силами трения позволил снизить значения пружинения в 4 раза с утонением в 16%, однако применение метода с технологическим вкладышем позволяет добиться меньшего утонения материала заготовки с уменьшением пружинения в 1,8 раза.

В итоге можно заключить, что для производства деталей типа днищ наиболее предпочтительной с точки зрения наименьшего пружинения является преобладание зоны формовки, а положение границы перехода процесса формовки в вытяжку должно быть за линией обрезки фланца.

Список литературы

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971. 728 с.
2. Мельников Э.Л. Холодная штамповка днищ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
3. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 367 с.
4. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979. 215 с.
5. Чумадин А.С., Ульвис Н.В. Приближенный расчет пружинения при формовке днищ // Научные труды (Вестник МАТИ). 2009. Вып. 15 (87). С. 148-156.
6. Чумадин А.С., Ульвис Н.В. Расчет формы детали после ее пружинения // Научные труды (Вестник МАТИ). 2010. Вып. 17 (89). С. 186-189.
7. Чумадин А.С., Батурин Д.А. Приближенный расчет пружинения при формовке-вытяжке деталей типа днищ // Научные труды (Вестник МАТИ). 2013. Вып. 20 (92). С. 182-185.
8. Чумадин А.С., Батурин Д.А. Управление упругой отдачей, возникающей в процессе формовки-вытяжки днищ // Актуальные проблемы российской космонавтики: тр. XXXVII Академических чтений по космонавтике (Москва, 29-30 января 2013 г.) / Под общ. ред. А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2013. С. 592-593.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VII. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 203 с.

.

Modeling and Control of the Springback Effect in the Bottom Sheet Metal Part One-Stage Drawing Process

A. S. Chumadin¹, D.A. Baturin^{1,*}

[*baturinda@mati.ru](mailto:baturinda@mati.ru)

¹ MATI — Russian State Technological University, Moscow, Russia

Keywords: springback, sheet-forming process, bottom part, method of springback manage, reducing labor, finite element analysis

The main objective of this study is to reduce a manufacturing complexity of bottom sheet metal parts by improving the accuracy of parts produced. This study is aimed at using the finite element analysis to prove assumptions that there is a transition frontier between the processes of forming and drawing, and there are capabilities to control springback effect by moving this frontier positions.

The process, the stress-strain state of which in the dome corresponds to the process of forming parts, and in the flange area to the drawing process, was considered to be a forming-drawing process.

Based on previous studies, techniques to reduce a springback have been proposed which enable us to use three calculation schemes for the process simulation:

The frontier transition position control between the processes of forming and drawing by changing the contact pressure on the flange by varying the frictions coefficients on the die and binder surfaces;

Springback manage through the additional tensile forces in the flange area of the blank;

Springback manage through the technological insert at the first process stage.

For ease of comparison with previous research results the same geometric parameters and material properties of the items are used in the simulation.

The springback analysis used a finite element method in the AutoForm™ incremental module with automatically mashed and standard tolerance computation properties. The blank, binder, punch, and die were then imported to the module by CATIA™ interface in .iges format.

The calculation has shown that the optimal value for the least thinning and springback parts are available for the second scheme whereby ring punch makes additional tension in the flange area (from 1.09 to 0.35 mm with thinning from 0.80 to 0.73 mm). The use of flange retention of sheet blank at the expense of variable frictional forces showed the springback value reduction by 4 times (from 1.09 to 0.27 mm). However thinning was 16% (from 0.80 to 0.63 mm).

Application of the scheme with technological insert allowed us to achieve the least thinning of the blank material (from 0.80 to 0.75 mm), but with only 1.8-fold (from 1.09 to 0.69 mm) springback decrease.

As a result, it is found that in bottoms manufacturing the most preferred in terms of the smallest springback is the predominate forming zone, and the position of the transition frontier between the forming and drawing processes should be behind the cutting line of flange.

References

1. Romanovskii V.P. *Spravochnik po kholodnoi shtampovke* [Handbook of cold stamping]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 728 p. (in Russian).
2. Mel'nikov E.L. *Kholodnaia shtampovka dnishch* [Cold stamping of bottoms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 192 p. (in Russian).
3. Isachenkov E.I. *Shtampovka rezinoi i zhidkost'iu* [Stamping with the use of rubber and liquid]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 367 p. (in Russian).
4. Stepan'skii L.G. *Raschety protsessov obrabotki metallov davleniem* [Calculations of metal forming processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 215 p. (in Russian).
5. Chumadin A.S., Ul'vis N.V. Ulvis Model for calculations of the elastic strains in the sheet metal forming. *Nauchnye trudy (Vestnik MATI)*, 2009, iss. 15 (87), pp. 148-156. (in Russian).
6. Chumadin A.S., Ul'vis N.V. The calculation of the form detail with elastic unload. *Nauchnye trudy (Vestnik MATI)*, 2010, iss. 17 (89), pp. 186-189. (in Russian).
7. Chumadin A.S., Baturin D.A. Calculation of the of force parameters of the process to reduce the tube diameter pipe rotation. *Nauchnye trudy (Vestnik MATI)*, 2013, iss. 20 (92), pp. 182-185. (in Russian).
8. Chumadin A.S., Baturin D.A. Control of elastic recoil that occurs during the forming-drawing process. *Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavtiki: materialy 37 akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [Actual problems of Russian astronautics: Materials 37th academic readings on Astronautics]. Moscow, 29-30 January 2013. Moscow, RAS Commission Publ., 2013, pp. 592-593. (in Russian).
9. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. Tom 7. Teoriya uprugosti* [Theoretical physics. Vol. 7. Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 203 p. (in Russian).