

Анализ особенностей процесса гибки с прижимом при изготовлении детали, состоящей из сложных криволинейных поверхностей, с применением программного продукта LS-DYNA

К.А. НИКОЛЕНКО,
канд. техн. наук,
Е.Г. ДЕМЬЯНЕНКО,
д-р техн. наук,
И.П. ПОПОВ,
д-р техн. наук,
Д.С. ФОМИЧЕВ,
студент
(Самарский университет,
Самара)
demyanenko.eg@ssau.ru

Проводится оценка возможности получения деталей со сложными криволинейными поверхностями. Анализируются особенности формообразования процессом гибки подобных деталей на примере детали «створка» с использованием CAE-системы LS-DYNA. С помощью моделирования установлено, что при сжимающих напряжениях на боковой поверхности детали происходит образование гофр, обусловленное перемещением металла в зазор между пуансоном и матрицей. Определены параметры зазора, исключающие недопустимый производственный брак. На разработанной штамповой оснастке проведены эксперименты.

Гибка, криволинейная поверхность, толщина, тонкостенная деталь, LS-DYNA

Проанализированы особенности формообразования деталей, состоящих из сложных криволинейных поверхностей. Типовым представителем таких деталей является створка – конструктивный элемент, устанавливаемый под фюзеляжем или на крыле летательного аппарата и являющийся частью узла подвески воздушного судна. Деталь изготовлена из листа конструкционной стали 12Х18Н10Т толщиной 0,8 мм с применением операции гибка с прижимом [1]. В используемых технологиях [2–6] из-за сложности конструкции детали «створка» возникает брак в виде гофр на боковой поверхности.

Особенностью детали «створка» является ее сложная конструкция [7–9] (рис. 1). Деталь состоит из трех геометрических участков – цилиндрического участка 1, участка перехода от цилиндрической к прямоугольной форме 2, прямоугольного участка 3. Форма второго участка, состоящего из бокового участка 2', криволинейного участка перехода 2'' и верхней наклонной конической площадки 2''', представляет собой наиболее сложную область при изготовлении. Геометрически сложный переход от цилиндрического участка к прямоугольному, характеризующийся смещением центров симметрии, усложняет процесс изготовления деталей данного типа, а в отдельных ситуациях делает его технически невыполнимым.

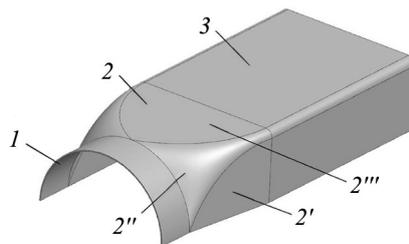


Рис. 1

Для исследования процесса гибки с прижимом выполнено моделирование задачи в три этапа с применением CAE-системы LS-DYNA [10].

На первом этапе была построена трехмерная модель формирующих элементов штамповой оснастки в программном продукте Unigraphics NX [11]. Геометрия пуансона определялась внутренней поверхностью детали, геометрия матрицы – наружной поверхностью детали с учетом величины гарантированного зазора z . Его величина, выставленная с учетом толщины исходной заготовки s и коэффициента поправки на позиционирование оснастки k , может определяться по формуле $z = sk$.

На втором этапе по построенной геометрии создавалась конечно-элементная сетка в программном продукте LS-DYNA [12].

На рис. 2 представлена конечно-элементная модель оснастки для гибки с прижимом и фигурной заготовкой: *а* – вид оснастки по ходу перемещения; *б* – вид оснастки в развернутом положении (против хода перемещения). Оснастка состоит из трех элементов – гибочного пуансона 1, по форме соответствующего внутренней поверхности детали «створка», гибочной матрицы 2 с отверстием для перемещения прижима, прижима 3 прямоугольного участка заготовки 4.

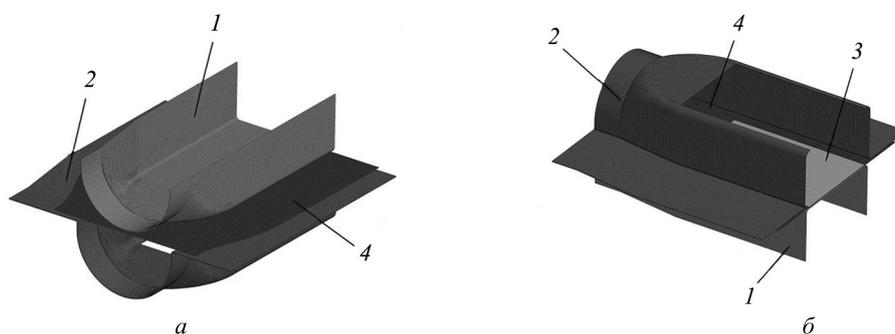


Рис. 2

На третьем этапе задавали технологические параметры процесса и управляющих карт LS-DYNA. К технологическим параметрам относятся кинематика движения инструмента, свойства материала заготовки и оснастки, установления контактного взаимодействия. Пуансон перемещался на величину 65 мм, что соответствует высоте цилиндрического участка детали с учетом величины гарантированного зазора z . При этом прямоугольный участок детали прижимался к пуансону прижимом с усилием 10 т. Для оснастки использовалась модель материала RIGID, для заготовки – Transversely Anisotropic Elastic Plastic. Свойства материала оснастки соответствуют свойствам стали X12 [1], материал заготовки – конструкционная сталь 12X18H10T. Контактное взаимодействие Automatic Surface to Surface применялось для контактных пар (заготовка – пуансон, заготовка – матрица, заготовка – прижим) с коэффициентом трения на всех контактных парах 0,1.

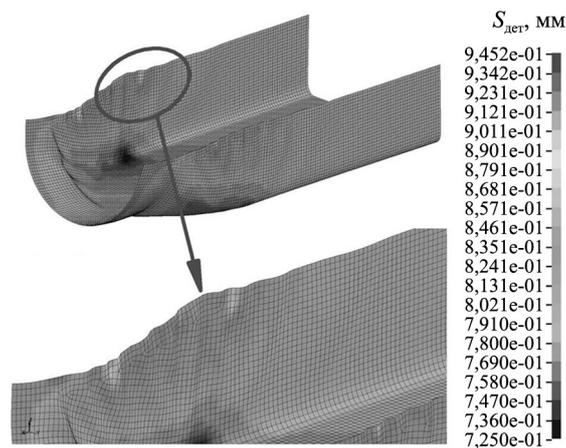
Благодаря технологии с подобранным гарантированным зазором между пуансоном и матрицей, определяемым коэффициентом поправки k , можно провести формообразование детали без дефекта в виде гофр. В зависимости от свойств материала, толщины исходной заготовки и сложности геометрических элементов формуемой детали коэффициент поправки может варьироваться в диапазоне 1,1...2,3. Его значение, близкое к 2,3, позволит уменьшить трудоемкость изготовления деталей штампа, а также упростит сборку, наладку и работу оснастки. При этом возрастает вероятность возникновения неустраняемого дефекта в виде гофр на боковых поверхностях детали. При значении коэффициента, близком к 1,1, появляется возможность существенно снизить вероятность возникновения дефектов в готовом изделии. Однако реализация и сохранение заданного гарантированного зазора при сборке и эксплуатации штампа сопряжены с значительными трудностями производства, что негативно влияет на трудоемкость изготовления.

Были смоделированы два варианта штамповки с разной величиной гарантированного зазора: $z_1 = 1,4$ мм (поправочный коэффициент $k_1 = 1,75$ мм) и $z_2 = 1$ мм (поправочный коэффициент $k_2 = 1,25$ мм).

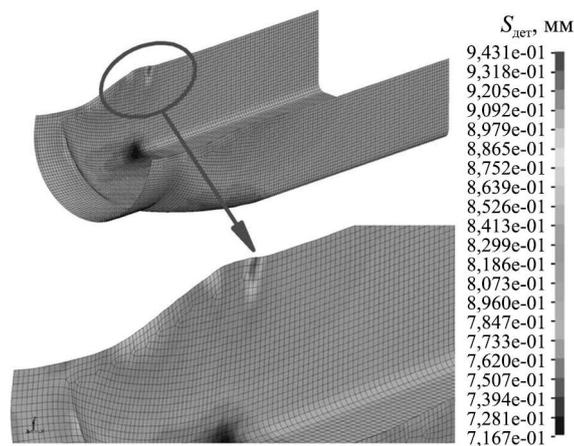
Приведем результаты моделирования и апробации на опытно-промышленной штамповой оснастке.

Результаты моделирования процесса гибки фигурной заготовки [13–15] с прижимом на заключительной стадии процесса представлены на рис. 3: *а* – зазор между матрицей и пуансоном – 2 мм; *б* – зазор между матрицей и пуансоном – 1 мм.

При анализе полученных эпюр распределения толщины выявлено наличие гофр на боковой поверхности детали (см. рис. 3, *а*). Гофры появляются при возникновении сжимающих напряжений на боковой поверхности. Начало их возникновения определено величиной перемещения пуансона на 32 мм, что соответствует половине его хода. Величина сжимающих напряжений увеличивается с -362 МПа до -677 МПа. Значение напряжений не зависит от выбранной величины гарантированного зазора.



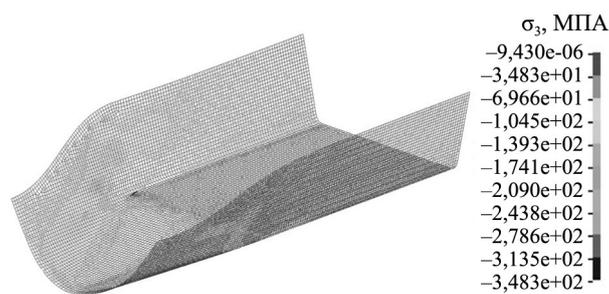
a



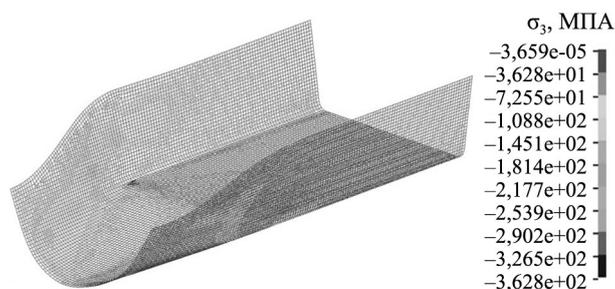
б

Рис. 3

Эпюры главных напряжений на различных стадиях процесса формообразования, МПа, приведены на рис. 4: *a* – перемещения пуансона – 16 мм; *б* – перемещения пуансона – 32 мм; *в* – перемещения пуансона – 65 мм.

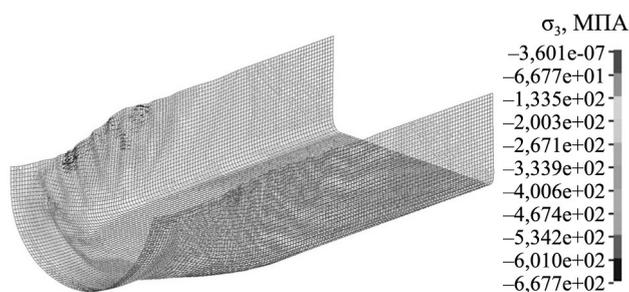


a



б

Рис. 4 (Начало)



6

Рис. 4 (Окончание)

Из-за наличия сжимающих напряжений в процессе деформирования на боковой поверхности детали металл начинает перемещаться в гарантированный зазор между пуансоном и матрицей. Величина зазора ограничивает высоту гофр и препятствует их возникновению. Установлено, что при увеличении зазора свыше 75 % от толщины исходной заготовки (с 0,8 мм до 1,4 мм) высота образующихся гофр становится недопустимой для изделия. В то же время при увеличении гарантированного зазора в пределах 25 % (до 1 мм) от толщины заготовки гофрообразование не наблюдается.

Для проверки результатов моделирования была разработана и изготовлена опытно-штамповая оснастки.

Трехмерная модель штампа представлена на рис. 5.

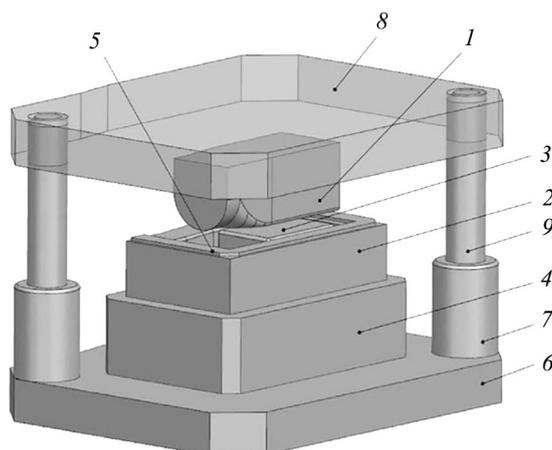


Рис. 5

Штамп состоит из двух частей. Точное позиционирование верхней части относительно нижней осуществляется с помощью направляющей втулки 7 и колонки 9. Верхняя часть штампа состоит из гибочного пуансона сложной формы 1, соответствующего форме детали, верхней плиты 8 и направляющей колонки. Нижняя часть штампа состоит из гибочной матрицы 2, в которой перемещается прижим 3 прямоугольной части детали. Для увеличения хода прижима гибочная матрица расположена на подкладной плите 4. Матрица, прижим и подкладная плита установлены на нижней плите штампа 6.

Заготовка укладывается на поверхность матрицы и позиционируется с помощью фиксатора 5. При перемещении верхней части штампа относительно нижней пуансон прижимает прямоугольный участок будущей детали к прижиму. При дальнейшем перемещении осуществляется гибка, при которой боковая поверхность заготовки деформируется в гарантированном зазоре между пуансоном и матрицей. После гибки штамп размыкался. Изделие выталкивается на поверхность матрицы прижимом и извлекается из штампа.

Эксперименты проводились также для двух вариантов гарантированного зазора между гибочной матрицей и гибочным пуансоном, значение которого в первом варианте составило 1,4 мм, во втором – 1 мм. Для реализации технологии важно обеспечить точность гарантированного зазора на различных участках геометрии оснастки.

В процессе эксперимента были изготовлены детали сложной криволинейной формы. В случае гарантированного зазора, не превышающего 1 мм, получено изделие без брака, с отсутствием гофры на боковой поверхности. При штамповке с гарантированным зазором более 1,4 мм наблюдаются гофры на боковых поверхностях детали.

Таким образом, при соблюдении гарантированного зазора, не превышающего 25 % от толщины заготовки, возможно получить изделия требуемого качества, без дефектов.

Обеспечение требуемого зазора между пуансоном и матрицей на криволинейных поверхностях при изготовлении и сборке штамповой оснастки – сложная производственная задача, требующая высокой квалификации специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атрошенко А.П. и др.* Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. М.: Машиностроение, 1986. Т. 2. Горячая штамповка. 592 с.
2. *Ранжус Х.* Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки при многоходовой ротационной вытяжке цилиндрической детали // Изв. вузов. Авиационная техника. 2011. № 2. С. 56–59.
3. *Демьяненко Е.Г., Попов И.П., Никонов Д.А.* Определение области разрушения заготовки при глубокой вытяжке в коническую матрицу // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 146–153.
4. *Бодунов Н.М.* Расчет настроечных параметров процесса гибки-прокатки тонкостенных деталей авиационной техники с помощью конечно-разностного метода // Изв. вузов. Авиационная техника. 2011. № 1. С. 64–67.
5. *Марковцев В.А. и др.* Совершенствование технологий продольной гибки и правки профильных авиационных деталей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 4. С. 201–203.
6. *Катаев Ю.П. и др.* Овальность и пружинение при формообразовании трубопроводных систем // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 2. С. 215–220.
7. Способ штамповки полых деталей из плоских листовых заготовок и устройство для его осуществления: пат. 2242320 Рос. Федерация, № 2002104040/02; заявл. 19. 02.2002; опубл. 20.12.2004.
8. *Михеев В.А. и др.* Статистический анализ процессов формообразования деталей оболочек сложной двояковыпуклой формы // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 132–136.
9. Способ изготовления тонкостенных сферических оболочек: пат. 2791478 Рос. Федерация, № 2022105798; заявл. 24. 06.2022; опубл. 9.03.2023.
10. *Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.* ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
11. *Краснов М., Чигишев Ю.* UNIGRAPHICS для профессионалов. М.: ЛОРИ, 2004. 320 с.
12. *Маслов В.Д., Николенко К.А.* Моделирование процессов листовой штамповки в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA. Самара: СГАУ, 2007. 80 с.
13. *Звонов С.Ю., Попов И.П., Шляпугин А.Г.* Особенности процесса формообразования полых конических деталей из кольцевой заготовки // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 3. С. 75–76.
14. *Лавриненко В.Ю., Серезжкин М.А.* Исследование процесса гибки листовых заготовок с использованием FDM-штампов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2024. № 2 (80). С. 31–36.
15. *Демьяненко Е.Г., Левагина А.А.* Совершенствование процесса формовки для получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 139–145.

Поступила в редакцию 25.06.25

После доработки 26.06.25

Принята к публикации 30.06.25

Analysis of the Features of the Clamping Bending Process in the Manufacture of Parts Consisting of Complex Curved Surfaces Using the LS-DYNA Software

K.A. NIKOLENKO, E.G. DEM'YANENKO, I.P. POPOV, AND D.S. FOMICHEV

Samara University, Samara

The possibility of obtaining parts with complex curved surfaces is estimated. The features of shaping of such parts by the bending process are analyzed using the example of the "flap" part using the LS-DYNA CAE system. Using modeling, it was found that under compressive stresses on the side surface of the part, corrugations occur due to the movement of metal into the gap between the punch and the die. The gap parameters have been determined, which exclude an unacceptable manufacturing defect. Experiments have been carried out on the developed die tooling.

Bending, curved surface, thickness, thin-walled part, LS-DYNA