

## ИССЛЕДОВАНИЯ СТЕСНЁННОГО ИЗГИБА КРИВОЛИНЕЙНЫХ БОРТОВ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2021

- Е. Г. Громова** кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [pla.gromova@ya.ru](mailto:pla.gromova@ya.ru)
- В. К. Моисеев** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [moiseevvk@mail.ru](mailto:moiseevvk@mail.ru)
- А. А. Шаров** кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [aa.sharov@ya.ru](mailto:aa.sharov@ya.ru)
- О. В. Ломовской** кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [oleg.lomovskoi@ya.ru](mailto:oleg.lomovskoi@ya.ru)
- М. Н. Мантусов** ведущий инженер; Ульяновский филиал КБ «ПАО Туполев», г. Ульяновск; [mishaufkb@ya.ru](mailto:mishaufkb@ya.ru)
- А. Н. Плотников** кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [anplotnikov@ya.ru](mailto:anplotnikov@ya.ru)

Представлен метод стеснённого изгиба эластомером листовых деталей летательных аппаратов с криволинейными бортами. Изготовление детали осуществляется за два перехода, в результате первого перехода получается деталь с утонением в радиусной части, второй переход проводят на формблочке сниженной высоты, в результате полученная волна избыточного материала деформируется по радиусу гибочной оправки. В готовой детали наблюдается увеличение толщины заготовки в зоне радиусагиба. Проведены численные исследования процесса с применением программного комплекса «ANSYS/LS-DYNA». В рамках исследования отработана модель протекания процесса, получены значения распределения толщины материала детали по всей рассматриваемой поверхности и построены графики, показывающие распределения давления эластомера и деформации материала детали в характерных точках.

*Технология производства летательных аппаратов; штамповка эластомером; стеснённый изгиб; притупок; численное моделирование*

---

**Цитирование:** Громова Е.Г., Моисеев В.К., Шаров А.А., Ломовской О.В., Мантусов М.Н., Плотников А.Н. Исследования стеснённого изгиба криволинейных бортов деталей летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 1. С. 65-74.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-65-74

### Введение

В конструкции летательных аппаратов широко применяются детали, получаемые холодной штамповкой эластомером из листовых заготовок. В частности, имеют большое распространение гнутые детали, имеющие борта криволинейной формы в плане.

При изготовлении таких деталей предлагается использование схем стеснённого изгиба для исключения утонения стенок и уменьшения предельных радиусовгиба [1-4]. Стеснённый изгиб детали по одной из схем происходит за два перехода (рис. 1). На первом переходе заготовка изгибается по формблоку-пуансону под действием давления эластичной среды. Перед вторым переходом удаляется проставка, за счёт чего формируется превышение борта и создаётся зазор между заготовкой и формблоком, далее под действием эластомера происходит прогиб полуфабриката с формированием избыточного материала в зоне радиусагиба. Этот избыток материала в дальнейшем осаживается на кромку формблока с утолщением стенки детали в этой зоне. Вместе с утолщением стенки появляется возможность уменьшения радиусагиба, что даёт свои преимущества по жёсткости и весу детали. Существуют и другие схемы, все они сводятся к созданию избыточной волны материала за счёт превышения борта с её последующей посадкой на радиус кромки формблока, то есть принципиально не отличаются от описанной процедуры.

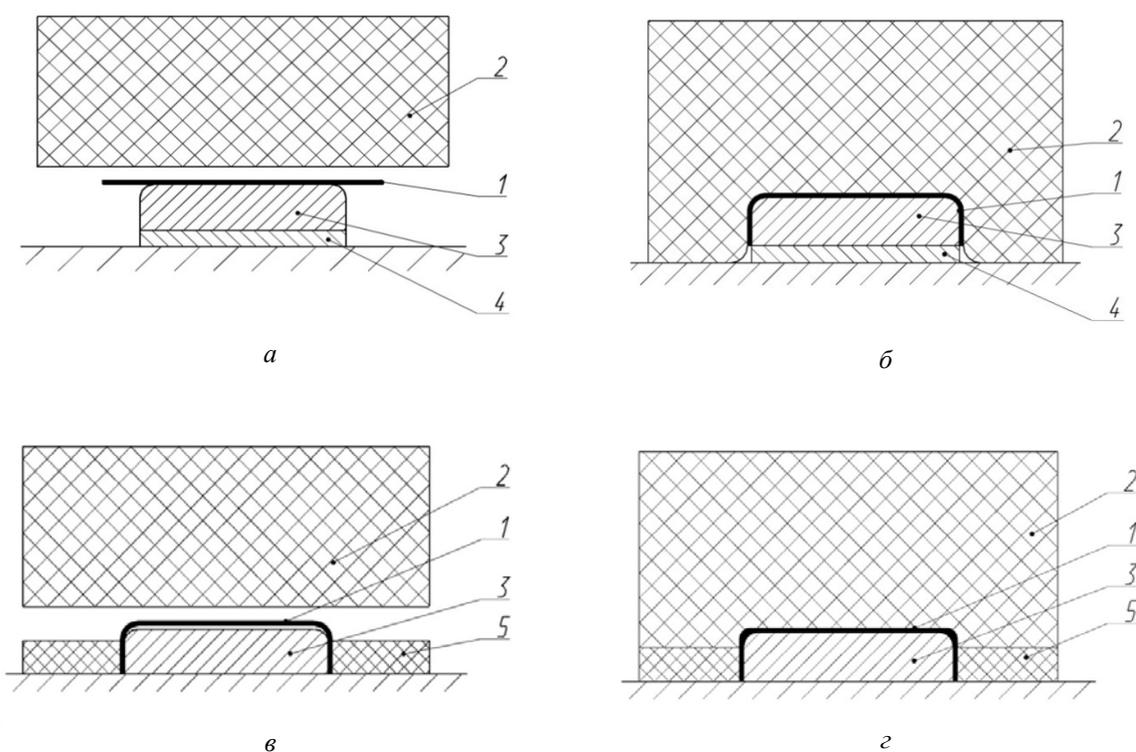


Рис. 1. Физическая модель процесса стеснённого изгиба:  
 а – до деформирования; б – в конце первого перехода;  
 в – до начала второго перехода; г – в конце второго перехода;  
 1 – заготовка; 2 – полиуретан; 3 – формблок; 4 – проставка; 5 – эластичный подпор

### Общая постановка задачи

При проектировании технологических процессов штамповки-гибки требуется определить ряд технологических параметров и спрогнозировать толщину стенки детали на предмет её соответствия техническим требованиям, оговоренным в чертеже. Решению этих вопросов должны предшествовать исследования процесса формоизменения полуфабриката в соответствии с предлагаемой технологией. Исследования в настоящее время подразумевают проведение натурных экспериментов, разработку аналитических моделей и численное моделирование процесса.

Для проведения численных исследований процесса была разработана конечно-элементная модель при использовании следующих допущений:

- нагружение тел считается квазистатическим;
- формблок принимается абсолютно жёстким;
- эластомер-полиуретан СКУ-7Л является несжимаемым, упругим, модуль упругости 10 МПа;
- трение подчиняется закону Амонтона-Кулона.

Входными параметрами численных исследований были приняты материал заготовки, толщина заготовки, превышение борта, радиус кривизны криволинейного борта, радиусгиба (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1. Входные параметры

Материал заготовки	Толщина заготовки $S$ , мм	Радиусгиба $r$ , мм	Радиус кривизны криволинейного борта $R$ , мм	Превышение высоты борта $\Delta H$ , мм
Д16АМ	1,5	4	80; 100; 120; 150	0,5; 1,0; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0

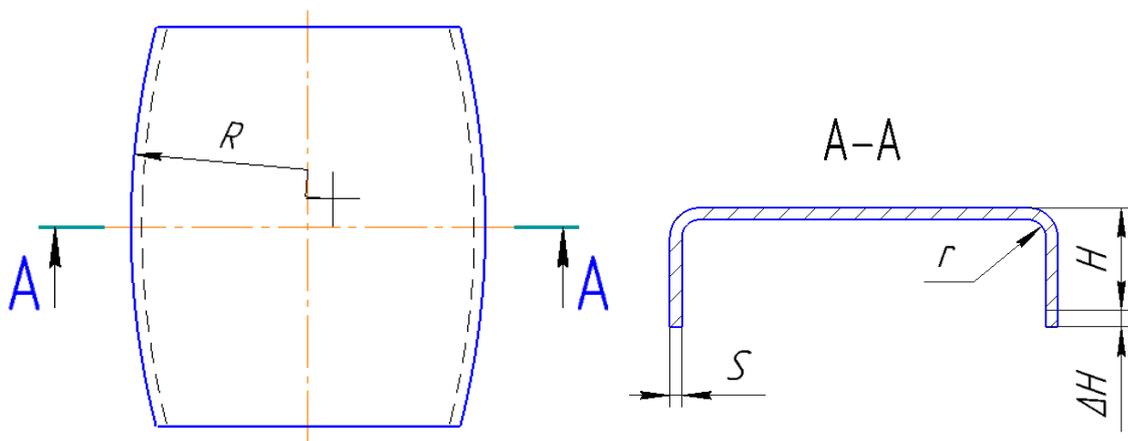


Рис. 2. Параметры детали

Моделирование проводилось с применением программного комплекса «ANSYS/LS-DYNA» и препроцессора LS-PrePost [5]. Рассматривалась четвертая часть геометрической модели ввиду симметричности детали.

3D-модель (рис. 3) была спроектирована в CAD системе и импортирована в программный комплекс «ANSYS/LS-DYNA» через формат Parasolid.

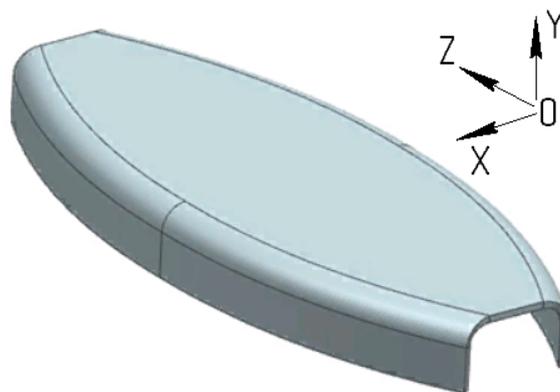


Рис. 3. 3D-модель детали

Геометрическая модель процесса представлена на рис. 4.

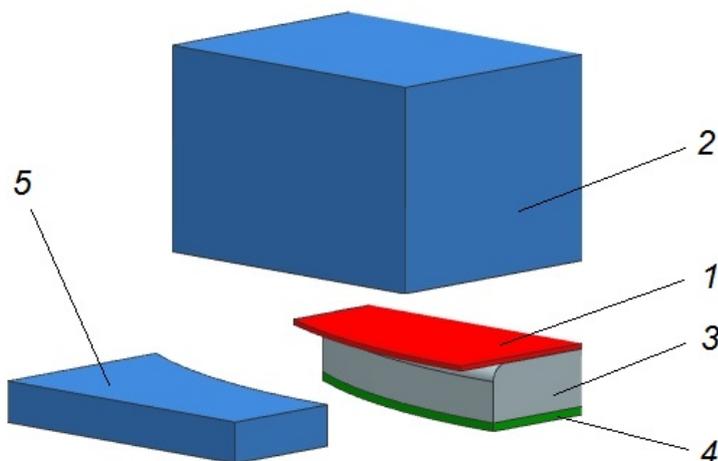


Рис. 4. Геометрическая модель процесса стесненного изгиба:  
1 – заготовка; 2 – полиуретан; 3 – формблок; 4 – эластичная проставка; 5 – эластичный прижим

С использованием разработанной конечноэлементной модели процесса стесненного изгиба изучалось влияние превышения борта на утолщение материала в зонегиба и на величину необходимого давления.

### Основная часть

Определение толщины виртуальной детали для анализа результатов расчёта проводилось в пяти точках по трем сечениям в одной четвертой части детали, что вполне допустимо в силу её симметрии (рис. 5).

Поэтапное формообразование детали при предварительной гибке на первом переходе и в условиях стеснённого изгиба на втором переходе с учетом взаимодействия с эластичной средой представлено на рис. 6 – 9.

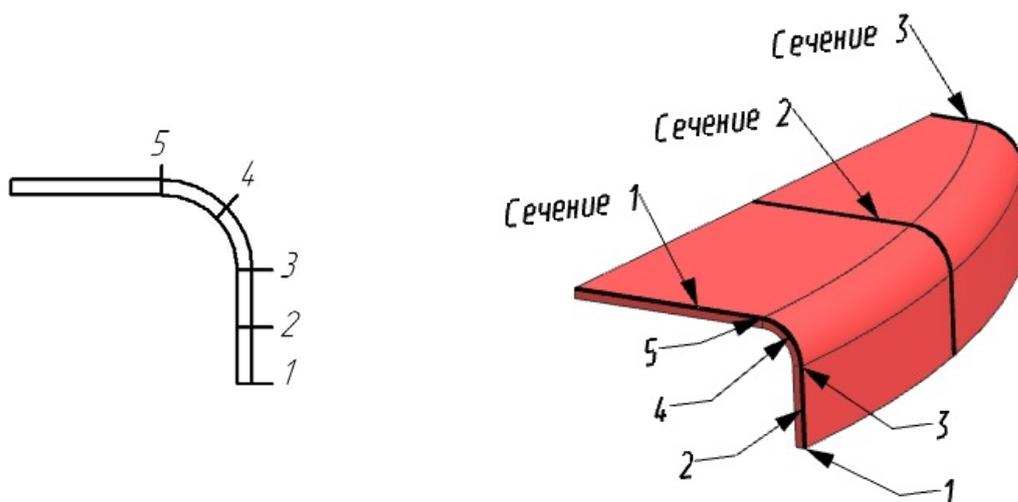


Рис. 5. Точки замера изменения толщины детали

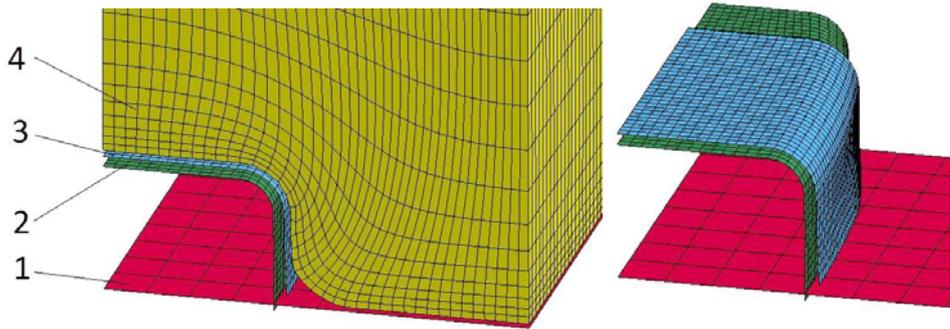


Рис. 6. Конечноэлементная модель процесса стеснённого изгиба в конце первого перехода:  
1 – основание; 2 – формблок; 3 – деталь; 4 – полиуретан

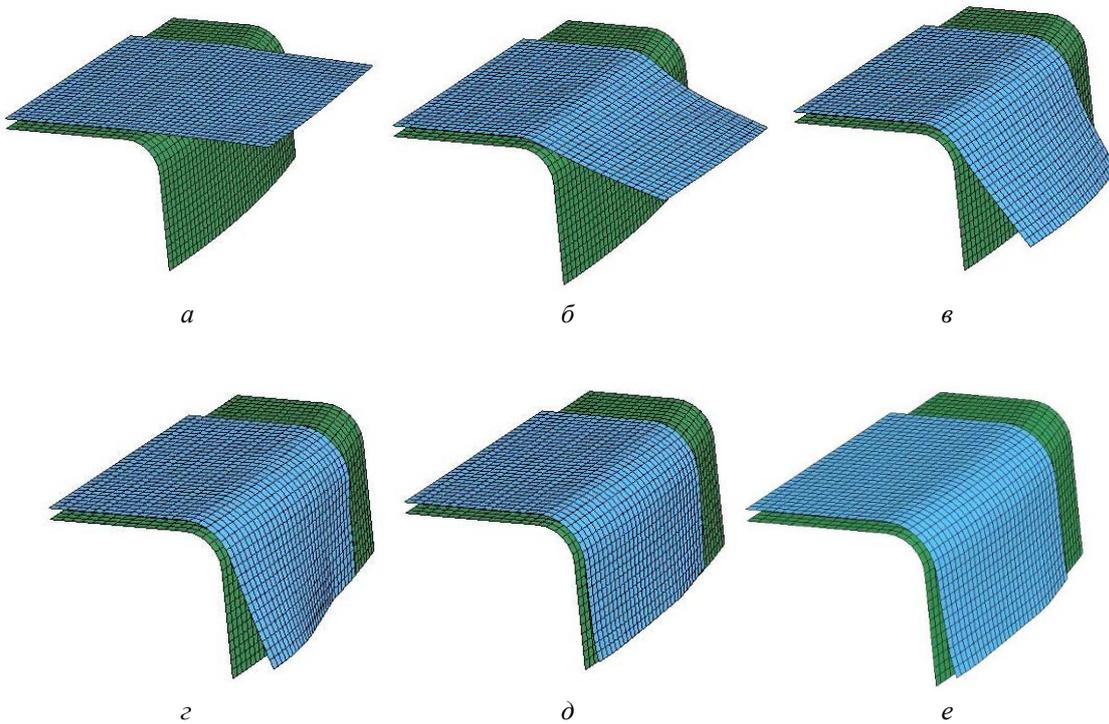


Рис. 7. Этапы формирования детали на первом переходегиба:  
а – начало деформирования; б, в, г – промежуточные стадии процесса деформирования;  
д – завершение деформирования; е – после снятия нагрузки

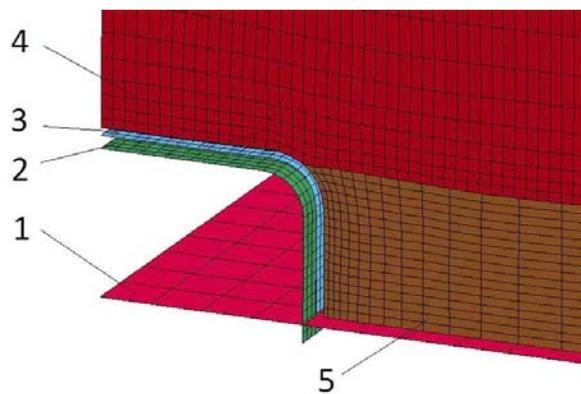


Рис. 8. Конечноэлементная модель процесса стеснённого изгиба в конце второго перехода:  
1 – основание; 2 – формблок; 3 – деталь; 4 – полиуретан; 5 – полиуретановый прижим

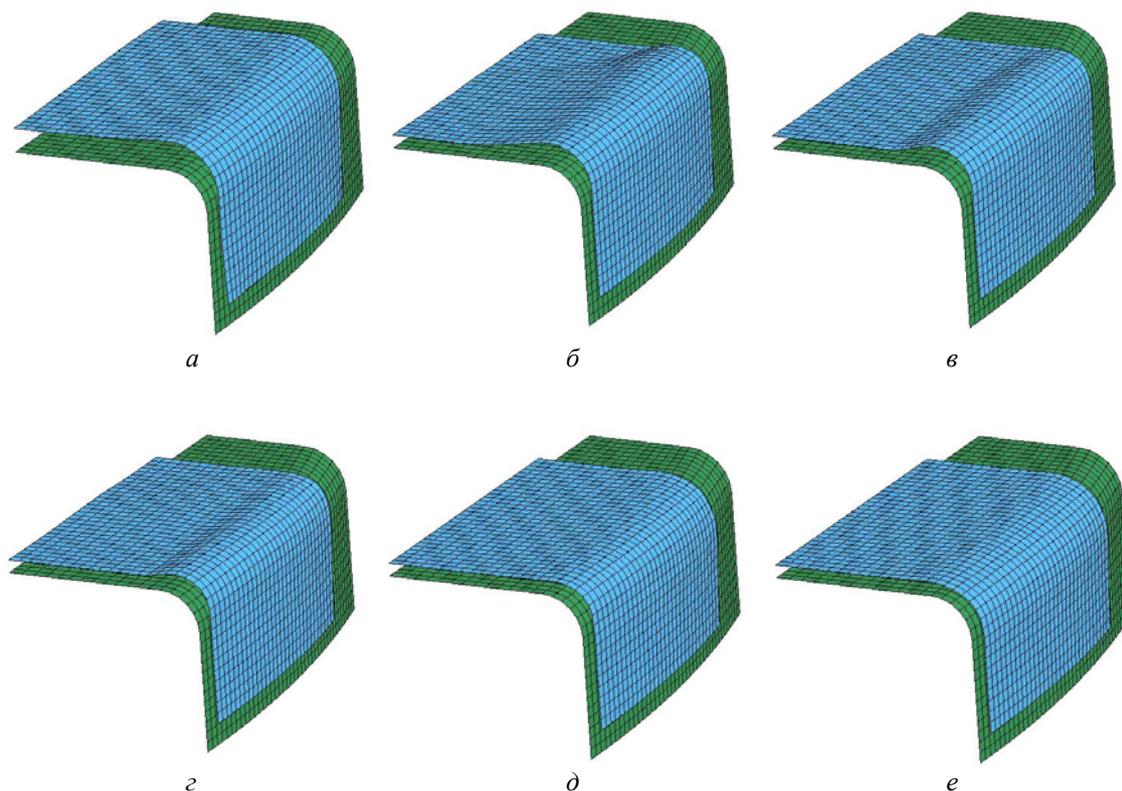


Рис. 9. Этапы формирования детали на втором переходегиба:  
а – начало деформирования; б, в, г, д – промежуточные стадии процесса деформирования;  
е – после снятия нагрузки

В результате моделирования получены диаграммы и графики изменения толщины стенки детали для различных этапов деформирования, а именно после первого и второго переходов в отдельности. При этом были определены изменения толщины после первого перехода относительно исходной толщины, а также после второго перехода относительно исходной толщины и толщины после второго перехода. Выяснено, что в конце стеснённого изгиба (рис. 10) наблюдается увеличение толщины материала детали в зоне точки 4 (радиусной зоне) между сечениями 1 и 3. При этом больший набор толщины происходит в точках 3 и 5 (рис. 5).

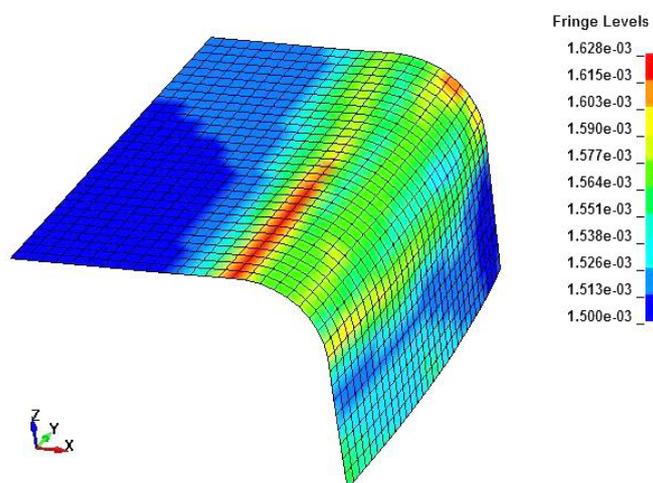


Рис. 10. Диаграмма изменения толщины детали после второго перехода ( $R = 150$  мм,  $\Delta H = 1,0$  мм)

Получены также графические зависимости величины необходимого давления и деформаций по толщине от радиуса кривизны борта в плане  $R$  и превышения борта  $\Delta H$ . Примеры этих зависимостей приведены на рис. 11, 12. Деформации по толщине представлены для конечной толщины относительно начальной толщины стенки заготовки. Из графиков следует, что утолщение стенки детали, осреднённое по длине дуги зоны радиусагиба, составляет 8...10% при превышении борта, равном толщине стенки.

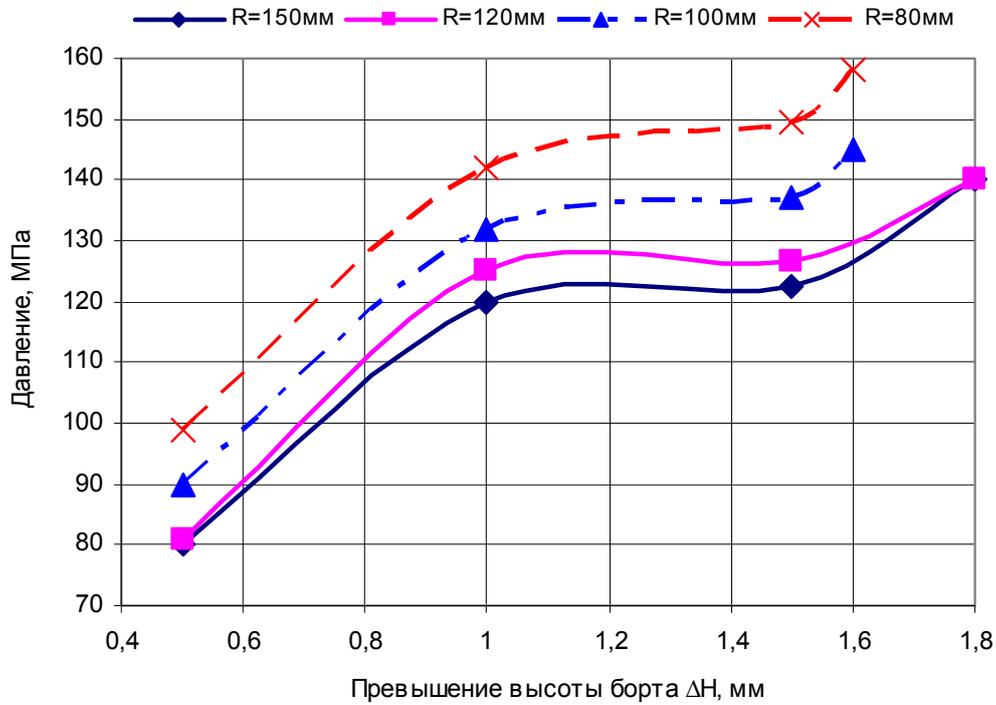


Рис. 11. Зависимость изменения давления эластичной среды от превышения высоты борта при  $r = 4$  мм,  $S = 1,5$  мм для материала Д16АМ

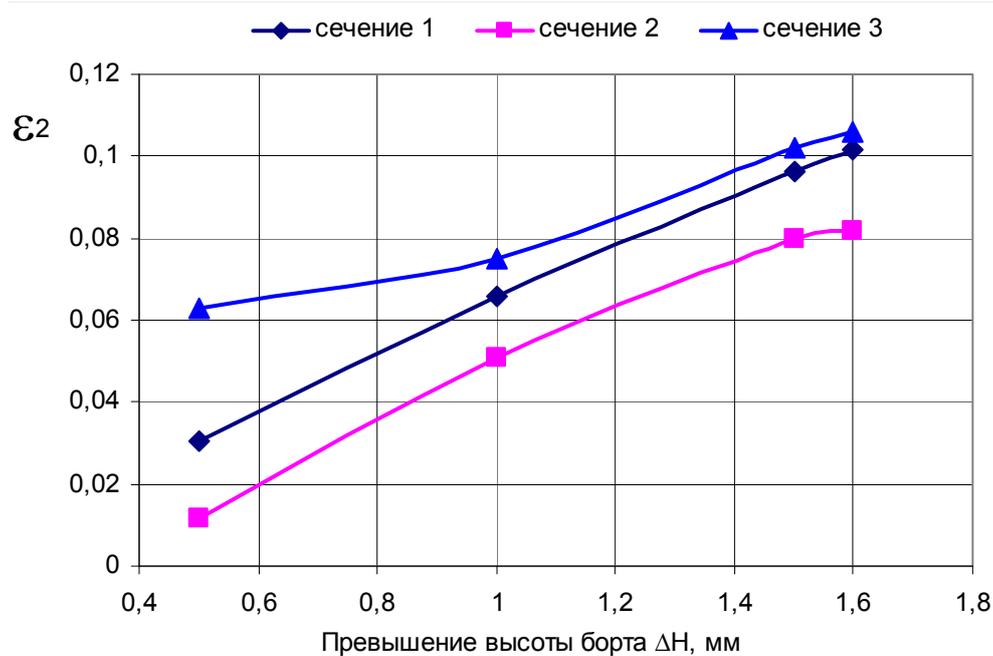
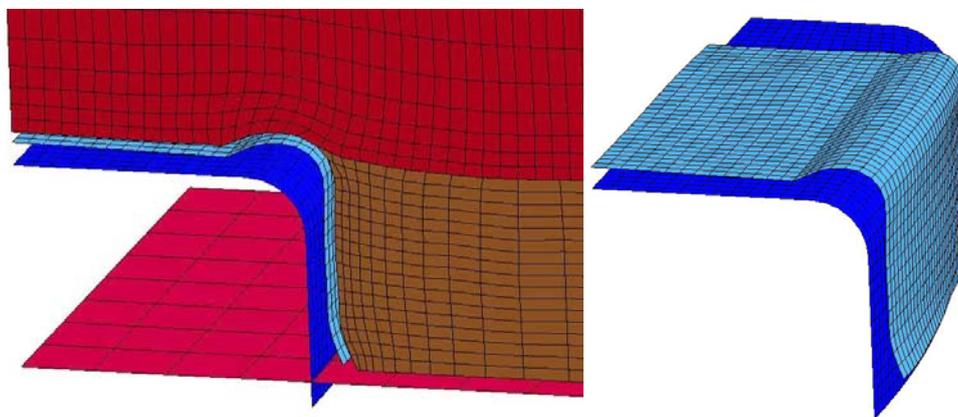


Рис. 12. Зависимость осреднённого по точкам 3, 4, 5 утолщения стенки от превышения высоты борта при  $r = 4$  мм,  $S = 1,5$  мм,  $R = 80$  мм для материала Д16АМ

Выявлено также, что при превышении высоты борта, равном 2 мм, для радиусов кривизны 120 мм и 150 мм борт детали теряет устойчивость и в радиусной зоне начинает появляться складка (рис. 13).

Для радиусов кривизны борта 100 мм и 80 мм такая складка образуется при превышении высоты борта, равном 1,8 мм, то есть вероятность появления складок растёт с увеличением кривизны борта в плане и превышения высоты борта.



*Рис. 13. Дефекты при гибке*

### **Заключение**

При проведении численных исследований стеснённого изгиба криволинейных бортов листовых деталей эластомером получены следующие результаты:

1. Получены диаграммы изменения толщины детали для различных этапов деформирования.

2. Установлено, что с увеличением превышения борта наблюдается рост утолщения в зонегиба, приемлемая величина превышения борта  $\Delta H$  составляет не более одной толщины стенки  $S$ .

3. Наибольшее утолщение стенки на этапе стеснённогогиба происходит в точках 3 и 5 сечений 1 и 2 (рис. 5). Набор толщины в зоне точки 4 (радиусной зоне) сечения 3 наблюдается в большей степени на этапе свободнойгибки. При уменьшении радиуса кривизны борта набор толщины на первом переходегиба происходит интенсивнее.

4. Увеличенное превышение борта приводит к потере устойчивости стенки и складкообразованию в радиусной зоне, вероятность чего увеличивается с ростом кривизны борта в плане.

5. Установлено, что с увеличением радиуса кривизны борта в плане наблюдается увеличение утолщения стенки в зоне сечения 2.

6. Стеснённый изгиб при превышении борта, равном толщине стенки, приводит к осреднённому утолщению радиусной зоны детали на величину до 10% относительно начальной толщины.

7. Выявлено, что давление, необходимое для реализации процесса стеснённого изгиба, монотонно возрастает с уменьшением радиуса кривизны борта и немонотонно увеличивается с ростом превышения борта.

### Библиографический список

1. Моисеев В.К., Мантусов М.Н., Плотников А.Н., Ломовской О.В., Шаров А.А. Совершенствование технологии гибки криволинейных бортов деталей самолётов // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 4 (3). С. 441-444.
2. Мантусов М.Н., Моисеев В.К., Шаров А.А., Громова Е.Г., Рыжаков С.Г. Штамповка листовых деталей с криволинейными бортами эластичным материалом // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20, № 4 (3). С. 332-336.
3. Гречников Ф.В., Моисеев В.К., Ломовской О.В., Шаров А.А., Мантусов М.Н. Штамповка с тангенциальным сжатием высокоточных листовых деталей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 7. С. 3-9.
4. Moiseyev V.K., Sharov A.A., Gromova E.G., Mantusov M.N. Results of the sheet parts curved edges constrained bending with elastomer // Key Engineering Materials. 2017. V. 746. P. 285-289. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.746.285
5. Кравчук А.С., Кравчук А.И. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST. Ч. 3. Основные элементы графического интерфейса LS-PREPOST. Решение задач с помощью LS-DYNA Solver. М.: БГУ, 2013. 74 с.

### RESEARCH OF RESTRAINED BENDING OF AIRCRAFT PARTS WITH CURVED SIDES

© 2021

- E. G. Gromova** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [pla.gromova@ya.ru](mailto:pla.gromova@ya.ru)
- V. K. Moiseev** Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [moiseevvk@mail.ru](mailto:moiseevvk@mail.ru)
- A. A. Sharov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [aa.sharov@ya.ru](mailto:aa.sharov@ya.ru)
- O. V. Lomovskoi** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [oleg.lomovskoi@ya.ru](mailto:oleg.lomovskoi@ya.ru)
- M. N. Mantusov** Leading Engineer; Ulyanovsk branch of Tupolev Design Bureau, Ulyanovsk, Russian Federation; [mishaufkb@ya.ru](mailto:mishaufkb@ya.ru)
- A. N. Plotnikov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Aircraft Production and Quality Control in Mechanical Engineering; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [anplotnikov@ya.ru](mailto:anplotnikov@ya.ru)

In the article the authors present a method of restrained elastomer bending of aircraft sheet parts with curved sides. Manufacturing of a part is carried out in two transitions; as a result of the first transition a part with thinning in the radial part is obtained, the second transition is carried out on the mold block of reduced height, as a result of which the resulting wave of excess material deforms along the radius of the bending mandrel. In the finished part, we can observe an increase in the thickness of the workpiece in the zone of the bend radius. Numerical studies of the process were conducted using the

ANSYS/LS-DYNA software complex. As part of the study, the process flow model was worked out, the distribution of thickness of the material of the part over the entire surface under consideration was obtained, and graphs were plotted showing the elastomer pressure distributions and the deformation of the material of the part at characteristic points.

*Aircraft manufacturing technology; elastomer stamping; restrained bending; allowance; numerical simulation*

---

*Citation:* Gromova E.G., Moiseev V.K., Sharov A.A., Lomovskoi O.V., Mantusov M.N., Plotnikov A.N. Research of restrained bending of aircraft parts with curved sides. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 1. P. 65-74. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-65-74

## References

1. Moiseev V.K., Mantusov M.N., Plotnikov A.N., Lomovskoi O.V., Sharov A.A. Improving the technology of bending curved sides of aircraft parts. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2018. V. 20, no. 4 (3). P. 441-444. (In Russ.)
2. Mantusov M.N., Moiseev V.K., Sharov A.A., Gromova E.G., Ryzhakov S.G. Stamping of sheet details with curvilinear sides by elastic material. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2018. V. 20, no. 4 (3). P. 332-336. (In Russ.)
3. Grechnikov F.V., Moiseev V.K., Lomovskoy O.V., Sharov A.A., Mantusov M.N. Stamping with tangential compression of high-precision sheet metal parts. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2019. No. 7. P. 3-9. (In Russ.)
4. Moiseyev V.K., Sharov A.A., Gromova E.G., Mantusov M.N. Results of the sheet parts curved edges constrained bending with elastomer. *Key Engineering Materials*. 2017. V. 746. P. 285-289. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.746.285
5. Kravchuk A.S., Kravchuk A.I. *Elektronnaya biblioteka mekhaniki i fiziki. Lektsii po ANSYS/LS-DYNA i osnovam LS-PREPOST. Ch. 3. Osnovnye elementy graficheskogo interfeysa LS-PREPOST. Reshenie zadach s pomoshch'yu LS-DYNA Solver* [Electronic library of Mechanics and Physics. Lectures on ANSYS/LS-DYNA and the basics of LS-PREPOST. The basic elements of the graphical interface of LS-PREPOST. Solving problems with LS-DYNA Solver]. Minsk: Belarusian State University Publ., 2013. 74 p.