

УДК 621.981.12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШТАПМОВКИ ПОЛИУРЕТАНОМ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В УСЛОВИЯХ СТЕСНЁННОГО ИЗГИБА

© 2012 Е. В. Еськина, Е. Г. Громова

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)

Разработан способ изготовления профилей штамповкой полиуретаном в условиях стеснённого изгиба. На основе конечно - элементной модели проведён комплекс исследований напряжённо-деформированного состояния эластичного пуансона и заготовки, а также влияния основных параметров процесса на характеристики получаемых деталей с использованием программного продукта ANSYS. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность разработанной модели.

Стеcнённый изгиб, листовая заготовка, эластичная среда, конечно-элементная математическая модель, экспериментальные исследования.

Одной из важнейших задач при изготовлении аэрокосмической техники является повышение эффективности производства, а одним из направлений - совершенствование технологий формоизменения деталей методами штамповки. Высокоэффективные методы штамповки деталей давлением полиуретана широко применимы в заготовительно-штамповочном производстве. Отличительной особенностью листовой штамповки является её высокая производительность, рациональное использование исходного материала, широкие возможности механизации и автоматизации технологических процессов, возможность изготовления жёстких деталей при небольшой их массе.

Однако процесс штамповки-гибки деталей эластомерами имеет ряд недостатков: недостаточная точность изготовления детали вследствие пружинения; невысокая прочность из-за утонения материала в зоне изгиба; малая жёсткость как следствие большого радиуса сопряжения стенки и борта. Для устранения этих недостатков используют процессы гибки листовых деталей методом стеснённого изгиба.

Широкими возможностями обладает штамповка с использованием эластомеров, основное достоинство которой – значительное упрощение, снижение металлоёмкости и стоимости технологической ос-

настки. Сочетание процессов стеснённого изгиба и использование преимуществ штамповки полиуретаном позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики деталей профилей. Однако проводимые исследования в данном направлении не отвечают на многие вопросы, связанные с особенностями данного метода.

Таким образом, исследования по методу стеснённого изгиба с использованием полиуретана при изготовлении деталей летательных аппаратов из листовых материалов являются актуальными и позволяют решить часть проблем по повышению эффективности заготовительно-штамповочного производства.

Для достижения поставленной цели на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет)» при участии авторов статьи был разработан новый способ изготовления профилей методом стеснённого изгиба с помощью полиуретана. Основными элементами конструкции штампа, необходимого для реализации данного метода, являются полиуретановый пуансон, жёсткие матрица и корпус [1].

Для изучения технологических возможностей разработанного способа изготовления профилей методом стеснённого изгиба с помощью полиуретана проводилось конечно-элементное математическое моделирование процесса стеснённого изгиба. Основными этапами математического моделирования с применением метода конечных элементов являются: 1) создание геометрической модели, пригодной для МКЭ; 2) разбиение модели на сетку конечных элементов; 3) задание свойств материалов и констант; 4) приложение к модели граничных условий (закрепление на границе или граничные нагрузки); 5) численное решение системы уравнений; 6) анализ результатов.

Для математического описания процесса деформирования использовали основные уравнения механики деформируемого тела.

В основу теоретической задачи математического моделирования положен принцип виртуальной работы, согласно которому очень малое (виртуальное) изменение внутренней энергии деформаций должно компенсироваться таким же изменением внешней работы приложенных к телу нагрузок:

$$dU = dV, \quad (1)$$

где U - энергия деформации (внутренняя работа); V - внешняя работа; δ - символ виртуального приращения.

Нагружение тела считается квазистатическим. При этом массовые и инерционные силы не учитываются. Деформации и напряжения Мизеса вычисляются по известным формулам механики твёрдого тела.

Материал эластичного инструмента принимается гиперупругим. Для гиперупругих материалов уравнение связи между напряжениями и деформациями представляется в виде упругого потенциала (или плотности энергии деформации) Муни-Ривлина, которое имеет следующий вид для используемой в данном случае двухпараметрической модели:

$$W = a_{10}(I^*_1 - 3) + a_{01}(I^*_2 - 3) + 0,5 k (I^*_3 - 1)^2, \quad (2)$$

где I^*_i - редуцированные инварианты деформации в i -ом направлении; k - объёмный модуль; a_{10}, a_{01} - константы Муни-Ривлина для эластоплимерного материала, определяемые экспериментально.

На первом этапе исследований была создана адекватная конечно-элементная модель процесса стеснённого изгиба с использованием эластомера, представленная на рис. 1. Конечно-элементная модель содержит четыре подконструкции. Первая подконструкция моделирует жёсткую матрицу, вторая - моделирует заготовку, третья - эластичный пуансон, четвёртая - корпус. Нагружение производилось путём последовательного перемещения жёсткого корпуса вниз по оси Y . На первом этапе деформирования заготовка изгибается вначале в полуцилиндр. На следующем этапе эластичный пуансон деформируется, изгибая заготовку из полуцилиндрического в уголкового сечения по радиусу, большему минимально допустимого при обычной гибке. Окончательное деформирование заготовки производится уступами корпуса, которые передают усилие прессы на торцы изгибаемых полок.

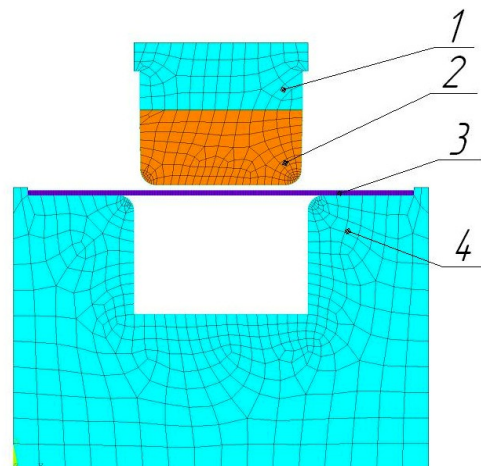


Рис. 1. Конечно-элементная модель: 1 - корпус; 2 - полиуретановый пуансон; 3 - заготовка; 4 - матрица

В реализации численных исследований коэффициент Пуассона эластоплимерного материала принимался $\nu=0,496$, коэффициенты трения по контактным поверхностям имеют фиксированные значения. Основными варьируемыми параметрами при

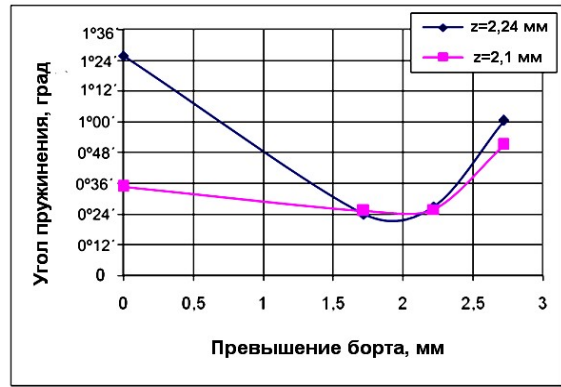
исследованиях являлись материал заготовки, превышение борта, относительная осадка полиуретанового пуансона и гарантированный зазор между пуансоном и матрицей. С использованием разработанной конечно-элементной математической модели на первом этапе исследовалось влияние превышения борта ($\Delta H = \frac{S_0/2}{r_0 + S_0/2} \cdot \frac{\rho(r_0 + S_0)}{2}$) от

0 до 2,72 мм, где S_0, r_0 – толщина заготовки и радиус скругления) на основные параметры детали (угол пружинения, утолщение материала в зонегиба). Исследования проводились для материалов АМцМ, АМг6М, Д16АМ, Д16АТ толщиной от 0,8 до 3 мм с радиусом скругления от 1 до 4 мм.

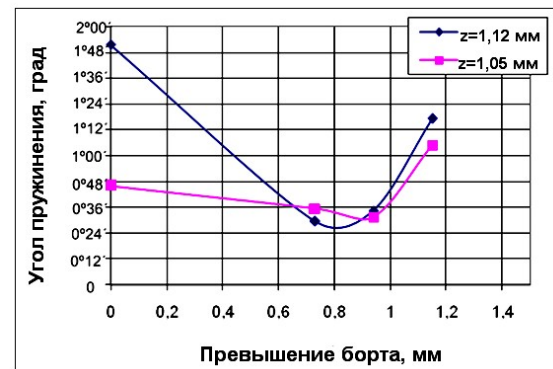
Алгоритм численного решения данной технологической задачи деформирования заготовки методом стеснённого изгиба с учётом взаимодействия с эластичным инструментом позволил проследить поэтапно весь путь деформирования заготовки и эластомера, учесть характер силового поля, свойства материалов и конструктивные параметры технологической оснастки, а также движение контактирующих поверхностей с учетом трения.

Численными исследованиями установлено, что с увеличением превышения борта угол пружинения борта уменьшается, но до определённого момента, затем увеличивается (рис. 2). При $r/s = 1$ оптимальным значением превышения борта является 2,12 мм, при $r/s = 2 - 0,94$ мм.

Также установлено, что с увеличением превышения борта наблюдается утолщение материала изгибаемой детали как в зонегиба, так и в изгибаемых полках. Причём при значительном превышении борта ($\Delta H = 2,72$ мм) набор толщин происходит в большей степени в зоне вертикальной стенки, а не в зоне скругления (рис. 3), в краевой области стенки наблюдается образование гофров (рис. 4).

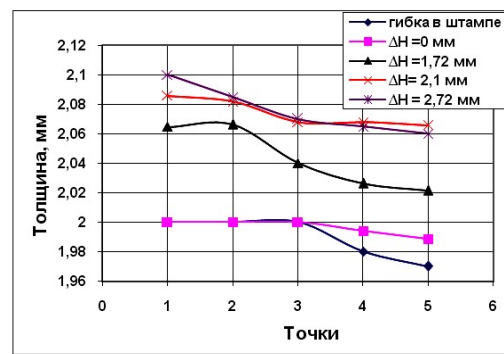


а

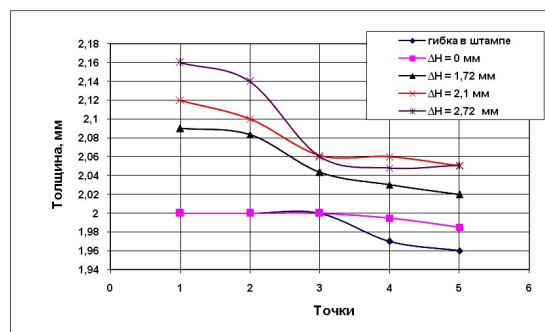


б

Рис. 2. Характер зависимости угла пружинения от превышения борта на примере материала АМг6М (z – зазор между пуансоном и матрицей): а - $r = 2$ мм, $s = 2$ мм; б - $r = 2$ мм, $s = 1$ мм



а



б

Рис. 3. Изменение толщины борта для различных значений превышения борта (материал АМг6М, $r = 2$ мм, $s = 2$ мм): а - $z = 2,1$ мм; б - $z = 2,24$ мм

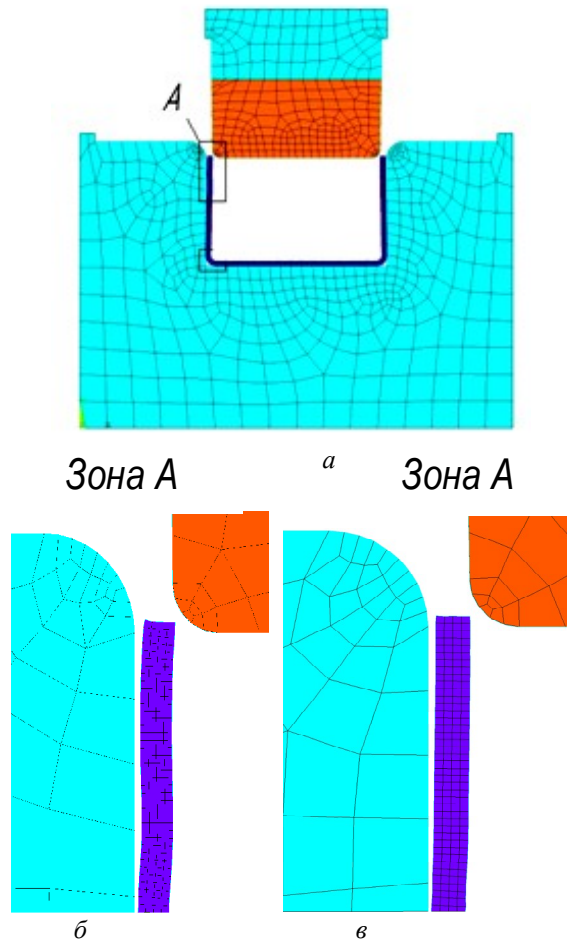


Рис. 4. Вид борта при различных превышениях борта: а - общий вид модели; б - при величине превышения борта $\Delta H = 2,72$ мм; в) при величине превышения борта $\Delta H = 2,12$ мм

Измерение толщины детали проводилось в пяти точках (рис. 5).

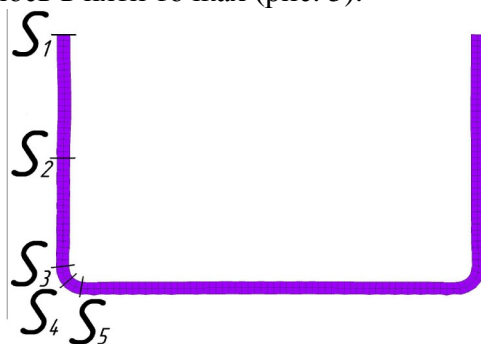


Рис. 5. Точки замера изменения толщины детали

Анализ результатов исследований первого этапа позволил также установить, что с увеличением превышения борта в зоне скругления детали возникают большие сжимающие деформации и, соответственно, напряжения, которые могут привести к воз-

никновению трещин в зоне скругления (рис. 6). Так, например, для материала заготовки АМг6М при превышении борта на 2,72 мм в зоне изгиба формируются сжимающие напряжения порядка 915 МПа, что значительно превышает прочностные параметры материала АМг6М. При превышении борта на 2,1 мм в зоне изгиба формируются максимальные сжимающие напряжения, равные 278 МПа, что ниже предела прочности $\sigma_b = 330$ МПа.

Также рассмотрен характер влияния высоты самого борта на параметры детали. Исследование проводилось на материалах АМцМ, Д16АМ, Д16АТ, АМг6М для борта высотой 10, 20, 30, 40, 50 мм; $r = 2$ мм, $s = 2$ мм; превышение борта составляло 2,11 мм. При уменьшении высоты борта утолщение происходит более равномерно, при высоте борта, равной 50 мм, наблюдается потеря устойчивости борта, выражающаяся в искривлении его в осевом направлении.

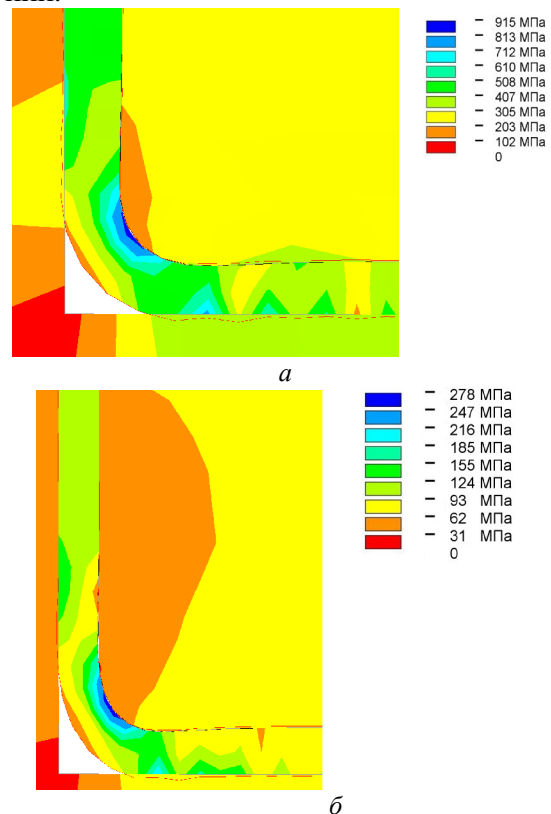


Рис. 6. Напряжённно-деформированное состояние детали из материала АМг6М в зонегиба: а - при превышении борта $\Delta H = 2,72$ мм; б - при превышении борта $\Delta H = 2,12$ мм

Это объясняется тем, что усилие формоизменения передается в очаг деформации через борт. В результате численных исследований установлено, что наиболее равномерного распределения материала по толщине детали удается достигнуть для материалов АМцМ и Д16АМ. Углы пружинения для этих же материалов минимальны в сравнении с другими материалами. Установлено также, что распределение утолщения для материала Д16АТ неравномерное.

На основании полученных результатов сформулированы оптимальные условия стеснённого изгиба листовых деталей с использованием полиуретана и разработаны методические указания для проектирования штамповой оснастки для проведения экспериментов.

Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован при участии авторов и изготовлен штамп, который позволяет реализовать новый способ изготовления профилей методом стеснённого изгиба с помощью полиуретана (рис. 7) [2]. На конструкцию штампа получен патент [3].

В экспериментальных исследованиях использовался гидравлический пресс марки РУЕ-250. С целью оценки адекватности созданных математических моделей процесса стеснённого изгиба с использованием эластомера была проведена серия экспериментов. Экспериментальное исследование влияния величины превышения борта, относительного сжатия полиуретанового пуансона и зазора между пуансоном и матрицей на качество получаемых деталей проводилось на алюминиевом сплаве АМг6М толщиной 2 мм.

В партиях поставляемых материалов производились выборочные испытания стандартных образцов на растяжение с помощью разрывной машины Р-5. Результаты испытаний не выходили за пределы, установленные ГОСТ или ТУ.

Длину заготовки рассчитывали с учётом превышения борта ΔH , которое согласно статье [4] равно

$$\Delta H = \frac{S_0/2}{r_0 + S_0/2} \cdot \frac{p(r_0 + S_0)}{2}. \quad (3)$$

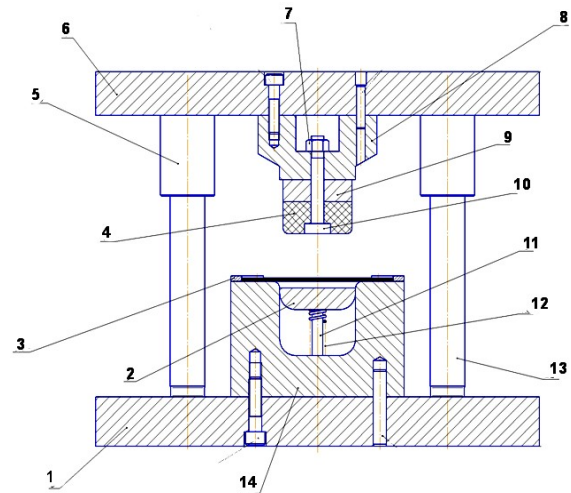


Рис. 7. Схема экспериментального штампа (Патент № 40230 РФ): 1 - нижняя монтажная плита; 2 - выталкиватель; 3 - фиксаторы; 4 - полиуретановый пуансон; 5 - направляющая втулка; 6 - верхняя монтажная плита; 7 - гайка; 8 - корпус; 9 - пуансонодержатель; 10 - болт; 11 - штилька; 12 - пружина; 13 - направляющая колонка; 14 - матрица

Для обеспечения качественного стеснённого изгиба с образованием утолщения материала в зоне радиуса изгиба при минимальных радиусах и углах пружинения необходимо, чтобы по всему сечению материала в зоне изгиба были только сжимающие тангенциальные деформации и напряжения.

Так как при этом нейтральный слойгиба должен совпадать с наружной поверхностью заготовки, её длину можно рассчитать по формуле:

$$L = \Sigma l + \pi(r_0 + S_0) + 2\Delta H, \quad (4)$$

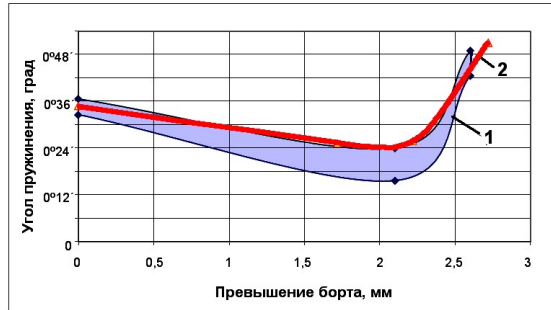
где Σl - суммарная длина прямолинейных участков заготовки; r_0 - внутренний радиусгиба.

Подставив значения ΔH из (3) и преобразовав формулу (4), получим:

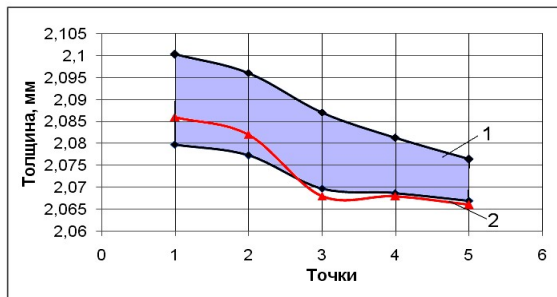
$$L = \Sigma l + \pi(r_0 + S_0) \times \left(1 + \frac{S_0/2}{r_0 + S_0/2} \right). \quad (5)$$

Толщина уголкового зоны, толщина бортов, радиус сгиба исследовались с использованием ПО Image Expert Pro 3 на микрошлифах, приготовленных на шлифовально-полировальном станке Gripo IV по стандартной методике. Результат изме-

рения на графиках (рис. 8) представлен в виде среднего значения и области ϵ , в которой с вероятностью 0,95 находятся полученные экспериментальные значения.



а



б

Рис. 8. Сравнение результатов экспериментальных данных (1) и математического моделирования (2) процесса деформирования материала АМгБМ, $r = 2$ мм, $S_{0\text{расчет.}} = 2$ мм, $S_{0\text{экспер.}} = 1,98$ мм; $z = 2,1$ мм: а - зависимость угла пружинения от превышения борта; б - измерение толщины борта и уголкового зоны при превышения борта $\Delta H = 2,1$ мм

Исследование возможностей процесса деформирования тонколистовых металлов с различными механическими свойствами проводилось на материалах АМцМ, Д16АМ, АМг6М, Д16АТ. На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что математическая модель процесса стеснённого изгиба с использованием эла-

стомера имеет в целом хорошую сходимость с экспериментальными результатами с погрешностью в пределах 11-14 %, что подтверждает адекватность разработанной математической модели реальному процессу.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Библиографический список

1. Комаров, А. Д. Разработка и исследование процесса стеснённого изгиба в штампе с использованием эластичного пуансона [Текст] / А. Д. Комаров, Е. В. Еськина, Н. Ю. Паникарова // Вестн. СГАУ, 2009, №2 (18). – С. 75-82.
2. Овчинникова Е. В. Повышение качества процесса получения деталей из листа стеснённым изгибом // Сборник научно-технических проектов финалистов и победителей конкурса идей молодых специалистов ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». - Самара: ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2007. - С. 56-66.
3. Пат. № 40230 РФ, 7 В 21 D 22/10. Штамп для изгиба листовых деталей / А. Д. Комаров, В. К. Моисеев, Е. В. Овчинникова [и др.] // № 2004112655; заявл. 27.04.2004; опубл. 10.03.2004 Бюл. № 25 // открытие, изобретение. – 2004.
4. Исследование пружинения прямолинейных бортов при стеснённом изгибе листовых заготовок эластичной средой [Текст] / А. Д. Комаров, В. А. Барвинок, А. В. Соколова [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. - 1998. - №12 - С.8-11.

RESEARCH OF THE PROCESS OF SHEET PRESSWORK USING POLYURETHANE UNDER CONSTRAINED BENDING

©2012 E. V. Eskina, E. G. Gromova

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

A method of producing profiles by polyurethane stamping under constrained bending has been developed. Research of the stressed strain state of the elastic punch and the blank has been carried out on the basis of a finite-element model. The influence of the main process parameters on the characteristics of the obtained parts has also been analysed using the ANSYS software. Experimental studies have been conducted which confirm the adequacy of the model devised.

Constrained bending, elastic medium, sheet blank, finite element mathematical model, experimental researches.

Информация об авторах

Еськина Елена Владимировна, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: barvinok@ssau.ru; elena2002.83@mail.ru. Область научных интересов: штамповка полиуретаном; повышение качества деталей, получаемых гибкой.

Громова Екатерина Георгиевна, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: barvinok@ssau.ru. Область научных интересов: процессы формообразования методом штамповки полиуретаном; математическое моделирование.

Eskina Elena, candidate of technical sciences, assistant of the aircraft production and quality control in mechanical engineering department, Samara state aerospace university named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: barvinok@ssau.ru; elena2002.83@mail.ru. Area of research: stamping by polyurethane, improving the quality of parts produced by bending.

Gromova Ekaterina, candidate of technical sciences, assistant of the aircraft production and quality control in mechanical engineering department, Samara state aerospace university named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: barvinok@ssau.ru. Area of research: processes of formation by polyurethane stamping; mathematical modeling.