

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТЕСНЕННОГО ИЗГИБА ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

© 2011 А.А. Шаров¹, В.А. Барвинок¹, А.Д. Комаров¹, Е.Г. Громова¹, Е.В. Еськина¹, В.Г. Кулаков²

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

² ЗАО «Авиастар-СП», г. Ульяновск

Поступила в редакцию 12.05.2011

Проведены исследования процесса стесненного изгиба листовых заготовок эластичной средой в условиях стесненного изгиба. Разработаны методики определения рабочего давления эластомера и необходимого превышения борта для реализации стесненного изгиба полиуретаном в контейнере с замкнутым объемом. Разработанная методика показала хорошее соответствие с экспериментальными данными. Ключевые слова: стесненный изгиб, эластичная среда, листовая заготовка, контейнер с замкнутым объемом.

Большую номенклатуру деталей каркасов самолетов, вертолетов и других летательных аппаратов изготавливают из листового материала штамповкой и гибкой эластичной средой — полиуретаном. Эти детали имеют прямолинейные или криволинейные борта обычно выпуклой формы в плане, которые служат для соединения с обшивкой или с другими деталями каркаса летательных аппаратов.

При гибке эластичной средой после снятия давления борт детали отпружинивает от гибочной оправки — формблока, величина угла борта изменяется. Для доводки угла борта до требуемой величины, после гибки приходится вручную выполнять подгоночные работы. Для исключения или значительного уменьшения этих работ необходимо изготавливать формблоки с углами поднутрения, соответствующими углам пружинения бортов детали. Углы пружинения рассчитывают обычно по формулам из работы [1] или определяют по диаграммам, приведенным в работах [2, 3].

Однако при корректировке углов формблоков на величину пружинения разброс механических свойств материалов заготовок и их толщин в пределах допуска приводит к нестабильным результатам. В отраслевой научно-исследовательской лаборатории ОНИЛ-11 Самарского государственного аэрокосмического университета разработаны способы уменьшения и стабилизации пружинения деталей при гибке эластичной средой, которые позволяют изгибать детали практически с требуемой точностью на гибочных оправках без корректировки их на величину пружинения [4]. Но все эти процессы требуют многократного воздействия на заготовку силовых факторов — многократной правки или нескольких последующих переформовок, в результате которых повреждаются поверхностные слои деталей. И при этом, в зонегиба материал утоняется на величину, рассчитываемую по формуле из работы [5]:

$$\Delta s = \frac{s_0^3}{4(2r_0 - s_0)^2}, \quad (1)$$

где S_0 — исходная толщина листового материала;
 r_0 — внутренний радиусгиба.

Из формулы (1) можно установить, что при $r_0 \rightarrow 0$ имеет место наибольшее изменение толщины материала, которое составляет примерно $0,25S_0$. Такое утонение значительно снижает жесткость и прочность деталей, так как места утонения являются концентраторами напряжений, что особенно опасно при пульсирующих и знакопеременных нагрузках с которыми работают практически все детали планера летательного аппарата.

При увеличении радиусагиба утонение материала уменьшается. Но такое увеличение радиусагиба приводит к уменьшению жесткости

Шаров Андрей Алексеевич, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

E-mail: barvinok@ssau.ru; bogdanovich@ssau.ru

Комаров Анатолий Дмитриевич, кандидат технических наук, профессор.

Громова Екатерина Георгиевна, — кандидат технических наук, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Еськина Елена Владимировна, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Кулаков Виктор Геннадьевич, первый заместитель генерального директора — технический директор ЗАО «Авиастар-СП». Тел. (8422)22-06-16.

детали и увеличению её массы, так как ширина борта определяется требуемым размером для постановки крепежного элемента и при увеличении радиуса изгиба высоту борта необходимо увеличивать.

Известно, что метод стесненного изгиба листового материала позволяет получать детали с очень малыми радиусамигиба ($r_0 = S_0$ и менее [6, 7]). При этом в зонегиба материал утолщается и пружинение значительно уменьшается. Особенно эффективен способ стесненного изгиба с дополнительным радиальным давлением и локализацией очага пластической деформации в угловой зоне [8]. Однако для всех разработанных способов стесненного изгиба требуются специальное оборудование и трудоемкая оснастка. Кроме того, стесненный изгиб можно производить только по прямолинейному контуру.

В ОНИЛ – 11 СГАУ разработан новый способ стесненного изгиба, осуществляемый на традиционных прессах, оснащенных контейнерами для штамповки эластичной средой на обычных гибочных оправках. При этом стесненный изгиб может производиться для деталей как с прямолинейными, так и с криволинейными бортами [9]. Один из способов такой штамповки реализован в “Устройстве для штамповки эластичной средой”, на которое получен патент [10]. Схема реализации этого способа стесненного изгиба полиуретаном представлена на рис. 1.

Стесненный изгиб на этом устройстве производится за два перехода. Вначале (рис. 1, а) заготовка 1 изгибается по гибочной оправке 2 под действием давления эластичной среды 3, заключенной в контейнер (условно не показан). Затем под торец изогнутого борта заготовки 4 (рис. 1, б) устанавливается опорная пластина 5 для создания определенного зазора ДН между верхней плоскостью гибочной оправки и стенкой заготовки (рис. 1, б, слева). Для предотвращения потери устойчивости изогнутого борта заготовки 4 на опорную пластину 5 ставятся эластичные подпоры 6. Под действием давления эластичной среды стенка заготовки вначале прогибается в центральной части, а затем образуется волна избыточного материала в зоне скругления гибочной оправки с радиусом r_0 (см. рис. 1, б, справа). При дальнейшем увеличении давления эластичной среды волна избыточного материала деформируется по радиусу гибочной оправки (рис. 1, в). В результате толщина заготовки в зоне радиусагиба увеличивается, а пружинение борта уменьшается за счет изменения схемы напряженно-деформированного состояния материала.

Кроме того описываемая схема штамповки полиуретаном позволит для деталей с угломгиба в 90° обходиться одним гибочным пуансоном для

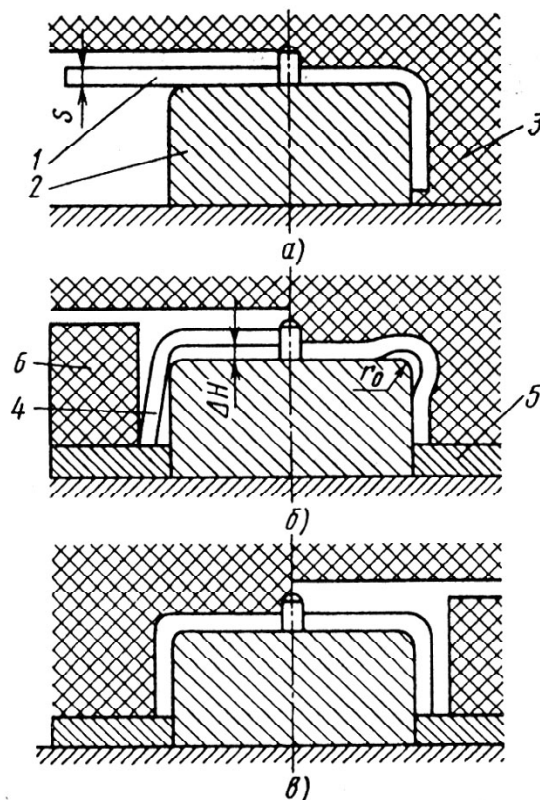


Рис. 1. Схема устройства для стесненного изгиба эластичной средой с подпорами

левой и правой деталей, так как пуансон 2 не дорабатывается на угол пружинения и может быть просто перевернут в процессе штамповки, тем же переворачиваются и опорные пластины 5. Такая особенность этого процесса позволяет значительно сократить расходы на технологическую оснастку, при сохранении качества – углагиба, обуславливаемого особенностью стесненного изгиба, при котором материал заготовки принимает форму конечной детали в результате пластического деформирования под действием тангенциальных и радиальных сжимающих напряжений. Все это кроме повышения точностигиба может позволить уменьшить и радиус изгиба, что также является актуальной задачей, так как при этом повышается жесткость деталей и снижается их масса, в результате уменьшения высоты борта.

Разработаны и запатентованы также устройства для стесненного изгиба за один переход [11, 12], схемы которых представлены на рисунке 2. В устройстве с подпружиненной оправкой (рис. 2, а) при перемещении контейнера 2 под действием давления эластичной среды 1 заготовка изгибается по оправке 3, а пружина 4 сжимается (рис. 2, а, позиция 2).

При дальнейшем увеличении давления эластичной среды пружина будет сжиматься в большей степени, гибочная оправка опустится, торцы изогнутых бортов упрутся в подштамповую плиту 5 и в зоне радиусагиба образуется волна

избыточного материала (рис. 2, а, позиция 3). При достаточном давлении эластичной среды 1 волна избыточного материала деформируется по радиусу гибочной оправки с образованием утолщения в этой зоне (рис. 2, а, позиция 4).

В устройстве с накладками (рис. 2, б) при опускании контейнера 4 с эластичной средой 3 накладки 5 изгибают борта заготовки с образованием волны избыточного материала с вершиной над средней частью гибочной оправки 1 (рис. 2, б, позиция 2). С увеличением усилия прессы, а, следовательно, и давления эластичной среды

3 вершина волны прогибается и избыточный материал перемещается в зоны радиусов гибочной оправки (рис. 2, б, позиция 3). Затем происходит посадка материала избыточных волн с образованием утолщения в зоне радиусагиба (рис. 2, б, позиция 4).

При штамповке деталей по разработанным схемам необходимо рассчитать высоту изгибаемых бортов так, чтобы создать необходимую высоту волны избыточного материала DDH и давление полиуретана, достаточное для осуществления процесса.

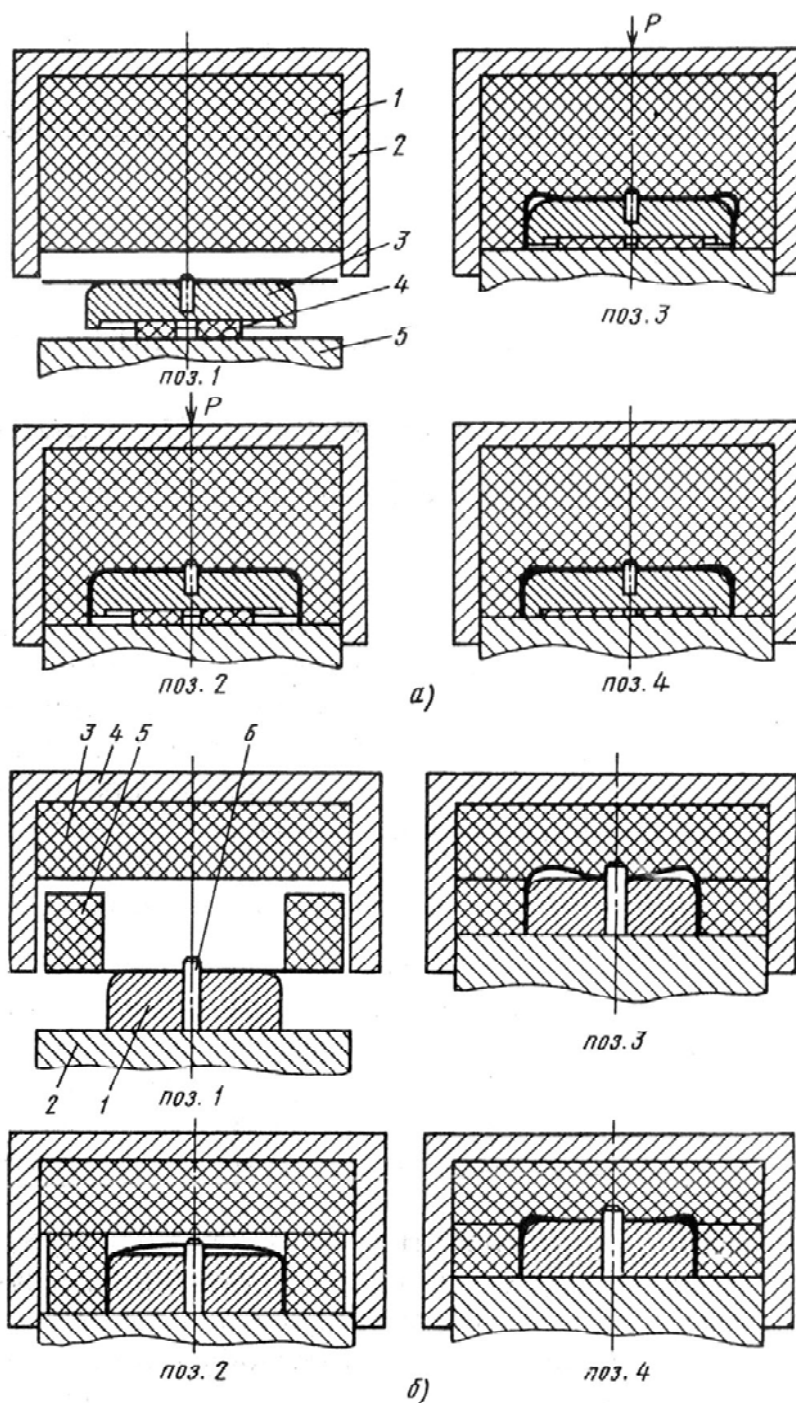


Рис. 2. Схемы устройств для стесненного изгиба эластичной средой с подпружиненной оправкой (а) и накладками (б)

Давление эластичной среды в контейнере, необходимое для изгиба прямолинейных или криволинейных бортов выпуклой или вогнутой формы в плане рассчитывают по формуле [13]

$$q = \frac{\sigma_e s_0^2}{2(H - r_0 - s_0)^2} + \frac{\sigma_{0,2} + \sigma_e s_0}{2R}, \quad (2)$$

где σ_e и $\sigma_{0,2}$ — предел прочности и условный предел текучести материала заготовки; H — высота изгибаемого борта; r_0 — радиус ребра гибочной оправки; R — радиус кривизны выпуклого или вогнутого борта.

Для расчета необходимого давления при изгибе прямолинейных бортов, у которых $R = \infty$, в вычислениях используют только первое слагаемое формулы (2).

Давление эластичной среды в контейнере, необходимое для посадки волны избыточного материала, можно рассчитать по безмоментной теории оболочек, которая в прикладном варианте описывается формулой Лапласа:

$$q = s \left(\frac{\sigma_1}{r_0 + \frac{s_0}{2}} + \frac{\sigma_2}{R} \right), \quad (3)$$

где σ_1 и σ_2 — напряжения в тангенциальном и меридиональном направлениях.

Необходимое превышение борта ΔH (рис. 1) можно определить аналитически из условия несжимаемости материала детали. При этом процесс стесненного изгиба полиуретаном может быть представлен следующей расчетной схемой согласно рис. 3.

Для схематизации процесса стесненного изгиба принимаются следующие основные допущения:

1. На первом этапе происходит деформирование материала заготовки (с начальным внутренним радиусомгиба r_0 , полученным заранее и $\alpha_0 = \pi/2$ при неизменной длине средней линии сечения.

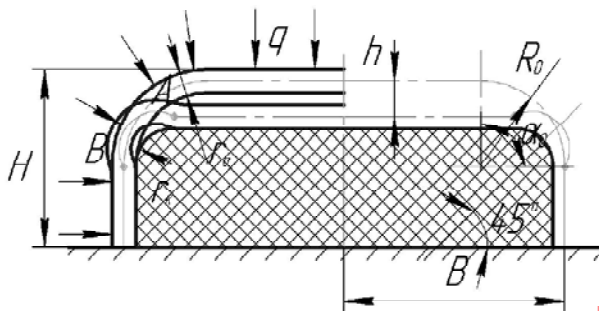


Рис. 3. Расчетная схема образования волны избыточного материала

Образуется волна избыточного материала в виде дуги окружности радиуса R_1 с углом α_1 , биссектриса которого проходит под углом 45° к основанию гибочной оправки (так, как это показано на рис. 3).

2. Второй этап заключается в упруго-пластическом деформировании материала на участке АВ (линейный размер АВ остается постоянным), при сокращающейся длине средней линии сечения. Волна избыточного материала осаживается на радиус гибочной оправки r_k при $\alpha_k = \pi/2$ (рис. 4.)

Таким образом, задача сводится к исследованию пластического деформирования цилиндрической оболочки с радиусом кривизны в тангенциальном направлении R_1 , находящейся под действием удельной нагрузки q_i [1].

В соответствии с введенными условными обозначениями, принятые допущения можно записать в следующем виде:

$$\alpha_0 = \pi/2, \quad (4)$$

$$L_0 = L_1, \quad (5)$$

$$S_0 = S_1, \quad (6)$$

$$\alpha_k = \pi/2. \quad (7)$$

Коэффициент утолщения материала в зоне изгиба:

$$\delta = s_k / s_0. \quad (8)$$

На основании выражения (6):

$$L_0 / 2 = L_1 / 2.$$

С учетом геометрических размеров по расчетной схеме на рис. 3, последнее равенство после преобразования имеет вид:

$$2R_1 \sqrt{2} \sin(\alpha_1 / 2) = \alpha_1 R_1 - h + R_0 (2 - \pi / 2). \quad (9)$$

Исходя из допущений второго этапа (рис. 4)

$$2R_1 \sin(\alpha_1 / 2) = 2R_k \sin(\alpha_k / 2)$$

Подставляем (6) и домножаем обе части последнего равенства на $\sqrt{2}$:

$$2R_1 \sqrt{2} \sin(\alpha_1 / 2) = 2R_k. \quad (10)$$

Сравнивая (8) и (9), находим, что

$$\alpha_1 R_1 = h - R_0 (2 - \pi / 2) + 2R_k. \quad (11)$$

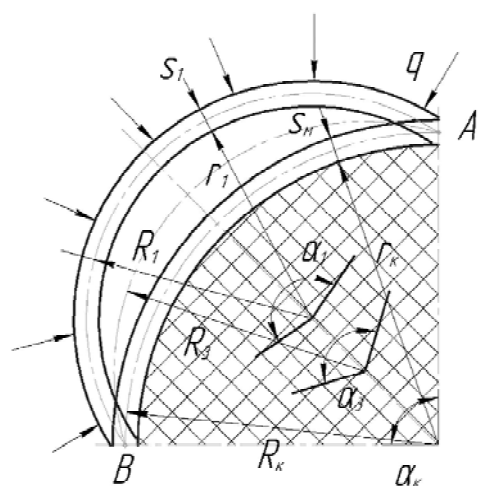


Рис. 4. Осадка волны избыточного материала

Значение средней толщины заготовки на участке АВ определим из условия постоянства объема:

$$R_J \alpha_J S_J = R_1 \alpha_1 S_1,$$

из (8) следует, что

$$S_k = S_1 \delta, \quad (12)$$

следовательно:

$$\delta = R_1 \alpha_1 / R_k \alpha_k. \quad (13)$$

Перепишем последнее равенство, применяя (11), (6), (7) и (12) для $i = 1$ и $i = k$:

$$\delta = 2[h - (r_0 + S_0 / 2)(2 - \pi / 2) + 2(r_k + \delta S_0 / 2)] / \pi(r_k + \delta S_0 / 2).$$

Опуская промежуточные выкладки, приходим к квадратному уравнению относительно δ :

$$\delta^2 S_0 \pi / 4 + \delta(\pi r_k / 2 - S_0) - (h + 2r_k - (r_0 + S_0 / 2)(2 - \pi / 2)) = 0$$

Решая полученное уравнение, и отбрасывая отрицательный корень, получим зависимость:

$$\delta = [2 - \pi r_k / S_0 + \sqrt{(2 - \pi r_k / S_0)^2 + 4\pi h / S_0 - 4\pi(2 - \pi / 2)(r_0 / S_0 + 1/2)}] / \pi \quad (14)$$

Из (14) несложно получить зависимость $\delta(r_k / S_0; h / r_k)$:

$$\delta = [2S_0 / r_k - \pi + \sqrt{(2S_0 / r_k - \pi)^2 + 4\pi(h / r_k - (r_0 / r_k + S_0 / 2r_k)(2 - \pi / 2)S_0 / r_k)}] / \pi. \quad (15)$$

Текущая деформация сжатия в тангенциальном направлении равна

$$\varepsilon_1 = (R_J \alpha_J - R_1 \alpha_1) / R_1 \alpha_1 = (1 - R_1 \alpha_1 / R_J \alpha_J) / R_1 \alpha_1 / R_J \alpha_J.$$

или с учетом (13):

$$\varepsilon_1 = (1 - \delta) / \delta.$$

Очевидно, что $\varepsilon < 0$, отсюда абсолютное значение ε_1

$$|\varepsilon_1| = (1 - \delta) / \delta. \quad (16)$$

Текущую потребную удельную нагрузку определяем по формуле Лапласа:

$$q_J = S_J (\sigma_1 / R_J + \sigma_2 / R_2),$$

где в соответствии с принятой расчетной схемой радиус кривизны оболочки в меридиональном направлении

$$R_2 = \infty,$$

То есть

$$q_J = S_J \sigma_1 / R_J.$$

Принимая во внимание (12), перепишем:

$$q_J = (R_1 \alpha_1 / R_J \alpha_J) S_1 \alpha_1 / R_J,$$

Или после подстановки (6) и (13):

$$q_k = \delta S_0 \sigma_1 / R_k. \quad (17)$$

Применив (8), преобразуем (17) как

$$q_k = \delta S_0 \sigma_1 / (r_k + \delta S_0 / 2). \quad (18)$$

Для определения абсолютного значения напряжений в тангенциальном направлении используем степенную аппроксимацию напряжений:

$$|\sigma_1| = K |\varepsilon_1|^n. \quad (19)$$

Таким образом, (18) с учетом (19) и (16) после преобразований принимает вид

$$q_k = K [(\delta - 1) / \delta]^n / (r_k / S_0 \delta + 1/2). \quad (20)$$

Качественную оценку полученных зависимостей произведем для детали из материала Д16АМ, имеющего следующие характеристики: $K = 574$ МПа, $n = 0,23$, и наиболее распространенного соотношения размеров:

$$S_0 = 1 \text{ мм}, r_b = 3 \text{ мм}, h = 1 \text{ мм}.$$

Для этого варианта штамповки требуемое давление полиуретана, определенное по формуле (20), составляет 130 МПа.

В работе [14] приведены результаты исследований стесненного изгиба листовых деталей полиуретаном. В проведенных экспериментальных исследованиях установлено, что для материала Д16АМ толщиной 1 мм величина давления, при котором происходит образование волны избыточного материала на первой стадии процесса (рис. 1), составляет 2,5 МПа, а окончание процесса посадки волны произошло при давлении 127 МПа.

Такое близкое совпадение величин рабочего давления говорит об адекватности разработанного метода расчета рабочего давления полиуретана при штамповке со стесненным изгибом.

ВЫВОДЫ

1. Разработан новый способ стесненного изгиба полиуретаном деталей различного наружного контура в плане.
2. Разработана методика расчета рабочего давления полиуретана, учитывающая утолщение и упрочнение материала в процессе формообразования.
3. Сравнительный анализ теоретических расчетов и экспериментальных данных подтвердил адекватность разработанной методики расчета.
4. Детали, полученные стесненным изгибом, обладают более высокими значениями надежности, ресурса, жесткости и точности.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов / В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, В.П. Саломовалов, Ю.В. Федотов. М.: Наука и технологии, 2002. 394 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
3. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.
4. Способы уменьшения и стабилизации пружинения

- деталей при гибке эластичной средой / А.Д. Комаров, А.А. Шаров, В.К. Моисеев // Кузнечно-штамповочное производство. 1993. №7. С. 13-16.
5. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1968. 283 с.
6. Проскуряков Г.В. Стесненный изгиб // Авиационная промышленность. 1963. № 12. С. 9-13.
7. Формообразование листовых профилей повышенной жесткости при волочении / И.М. Колганов, Г.В. Проскуряков, В.И. Колганов // Кузнечно-штамповочное производство. 1982. №5. С. 21-23.
8. Разработка и исследование процесса гибки профилей и панелей методом проглаживания / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников, Г.В. Коновалов и др. // Оборудование, технология и организация цехов по производству профильной продукции и товаров народного потребления: Материалы конф. Пенза, 1991.
9. Технология гибки полиуретаном деталей повышенной точности, надежности и ресурса / А.Д. Комаров, А.А. Шаров, В.К. Моисеев / Тез. докл. II Всесоюз. науч.-техн. конф. "Прогрессивные технологические процессы, оборудование и оснастка для холоднштамповочного производства". Пенза, 1994. С. 6-8.
10. Свидетельство № RU 1647. МКИ 6 В 21 D 22/10 Устройство для штамповки эластичной средой / А.Д. Комаров, А.А. Шаров, В.К. Моисеев, и др. Заявка №94025900/08 от 12.07.94г., опубли. 16.02.96г. Бюл. №2.
11. Патент № RU 2089312, МКИ6 В 21 D 22/10 Устройство для штамповки эластичной средой / А.Д. Комаров, В.А. Барвинок А.А. Шаров, В.К. Моисеев, и др. Заявка №95102196/02 от 15.02.95г., опубли. 10.09.97г. Бюл. №25.
12. Патент № RU 2089313, МКИ6 В 21 D 22/10 Устройство для штамповки эластичной средой / А.Д. Комаров, В.А. Барвинок А.А. Шаров, В.К. Моисеев, и др. Заявка №95102197/02 от 15.02.95г., опубли. 10.09.97г. Бюл. №25.
13. Достижения в области освоения в производстве новых процессов штамповки эластичной средой в условиях конверсии / А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, А.А. Шаров // Материалы семинара "Эффективные технологические процессы листовой штамповки". М.: ЦРДЗ, 1993. С. 66—72.
14. Исследование пружинения прямолинейных бортов при стесненном изгибе листовых заготовок эластичной / А.Д. Комаров, В.А. Барвинок, А.А. Шаров, В.К. Моисеев // Кузнечно-штамповочное производство. 1998. № 12. С. 3-9.

RESEARCH OF PROCESS OF THE STRAITENED BEND OF SHEET PURVEYANCES BY AN ELASTIC ENVIRONMENT

© 2011 A.A. Sharov¹, V.A. Barvinok¹, A.D. Komarov¹, E.G. Gromova¹, E.V. Eskina¹, V.G. Kulakov²

¹Samara State Aerospace University

²Joint-Stock Companies "Aviastar-SP", Ulyanovsk

Researches of process of the straitened bend of sheet purveyances are conducted by an elastic environment in the conditions of the straitened bend. The methods of determination of working pressure of elastomera and necessary exceeding of side are developed for realization of the straitened bend poliuretanom in a container with the closed volume. The developed method rotined good accordance with experimental information.

Key words: straitened bending, elastic environment, sheet purveyances, container with the closed volume

Andrey Sharov, Assistant Lecturer at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.

Vitaly Barvinok, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.

E-mail: barvinok@ssau.ru; bogdanovich@ssau.ru.

Anatoly Komarov, Candidate of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department

Ekaterina Gromova, Candidate of Technics, Assistant Lecturer at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.

Elena Eskina, Assistant Lecturer at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.

Victor Kulakov, First Deputy General Director – Technical Director of Joint-Stock Company "Aviastar-SP".

Tel. (8422)22-06-16.