

Методика расчета осесимметричного формоизменения монолитных ребристых панелей двойной кривизны с жесткими ребрами последовательным деформированием

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Рассмотрены особенности получения панелей с оребрением двойной кривизны для изделий аэрокосмической техники с использованием перспективного технологического процесса формообразования последовательной местной гибкой с посадкой (разводкой). Описаны процесс и методика расчета необходимого количества местных воздействий и энергии местного воздействия для получения панелей требуемой формы и размеров. Проведено экспериментальное исследование методики расчета параметров на натурных панелях с жесткими ребрами самолета большой грузоподъемности.

Ключевые слова: технологический процесс, формообразование, панель, двойная кривизна, посадка, разводка, пластическая деформация, прогиб.

Введение

В последние годы наметилась тенденция увеличения габаритных размеров монолитных панелей, в связи с чем стоит задача получения панелей сложных форм при неизменных габаритных размерах изделия. Наибольшую трудность представляет получение панелей двойной кривизны из плоских оребренных заготовок, что связано с отсутствием производственного оборудования для формоизменения панелей больших габаритных размеров. Получение панелей двойной кривизны является непростой задачей, так как требует создания в материале полотна сложного напряженного состояния при минимальном уровне остаточных напряжений.

Определенные трудности представляет изготовление панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой, имеющих нерегулярную структуру поперечных сечений (включающих в себя разрезные ребра, местные поперечные утолщения и другие элементы). В связи с большими технологическими отклонениями на всех операциях получения заготовок панелей не удастся достичь достаточной точности формообразования панелей.

1. Анализ состояния вопроса и постановка задачи исследования

Анализ публикаций, направленных на совершенствование технологического процесса формообразования панелей двойной кривизны, показывает, что для успешного применения на предприятиях такой техпроцесс должен удовлетворять следующим требованиям [1]:

1. Универсальность устройства для формообразования разнообразных форм с широким диапазоном размеров поперечных сечений.
2. Возможность монотонного изменения формы в целях поэтапного ее контроля, корректировки процесса и повышения точности формы.
3. Возможность местной правки и доводки панелей с отклонениями формы в разные стороны.

4. Наличие достоверной методики расчета параметров деформирования панелей последовательным приложением местных воздействий и, особенно, величины местной деформации, которая при единичном воздействии не проявляется в связи с большим влиянием упругих процессов при локальном деформировании.

Изготовление панелей двойной кривизны отличается рядом особенностей. В частности, такие панели имеют различную форму и, следовательно, различные моменты инерции поперечных сечений в продольном и поперечном направлениях. Поэтому применение для формообразования таких панелей традиционных методов (например, свободной гибки) в некоторых случаях ограничено или невозможно.

При использовании процессов локального пластического деформирования (местной гибки с посадкой или разводкой) имеется возможность получить любое местное напряженно-деформированное состояние заготовки, необходимое для формообразования панели требуемой формы и размеров. Однако в литературе отсутствуют полные сведения о расчете основных параметров процесса локального формоизменения, в частности величины местной деформации или энергии разового местного деформирования.

2. Цель исследования

Развитие самолетостроения и других отраслей ставит задачу получения целого ряда сложных форм панелей с оребрением (в частности, панелей двойной кривизны), что, в свою очередь, требует создания технологических процессов, удовлетворяющих приведенным требованиям [2].

Таким образом, **цель работы** – теоретическое исследование технологического процесса получения ребристых панелей двойной кривизны местной гибкой с посадкой (разводкой), в частности исследования величины энергии местного разового воздействия в зависимости от получаемой двойной кривизны и геометрических размеров панелей.

3. Теоретические исследования процесса получения панелей двойной кривизны последовательным деформированием **Основные допущения**

Выполним расчет процесса формообразования монолитной панели двойной кривизны с использованием принципа минимума энергии. В силу малого объема пластически деформированных зон по сравнению со всем объемом можно считать, что остаточные деформации, отнесенные ко всей панели и возникшие при технологическом нагружении, находятся в области упругих деформаций [3]. Получаемая форма панели зависит от характера распределения этих факторов по участкам панели. В качестве силовых факторов выступают деформации, которые могут быть различными по характеру. Технологические деформации участка панели – это деформации, которые остались бы в участке панели без учета превращения этого участка в пологую оболочку при его отдельном нагружении. Влияние соседних не нагруженных участков панели на процесс деформирования в месте приложения воздействия не будем учитывать.

Монолитные ребристые панели конструктивно представляют собой обшивку, подкрепленную продольными ребрами жесткости. В случае, когда жесткость

ребер превосходит изгибную жесткость полотна, панель с оребрением рассматривают чаще всего как систему балок на упругом основании, в качестве которого выступает полотно панели.

Расчеты процесса формоизменения в этом случае можно провести отдельно для полотна и ребер. В пределах упругих деформаций формоизменение первоначального плоского полотна панели можно свести к задаче изгиба пластин [4]. Изгиб ребер жесткости можно рассматривать как изгиб балки, связанной с полотном панели условием неразрывности деформаций в месте присоединения.

При определении параметров формоизменения полотна панели будем учитывать наряду с чисто изгибными деформациями тангенциальные деформации, равномерно распределенные по толщине пластины. Эти деформации появляются во всех случаях, когда срединная поверхность пластины переходит при изгибе в неразвертывающуюся поверхность путем удлинения или укорочения элементов срединного слоя [4].

Приближенные методы решения задачи изгиба пластины большого прогиба, связанные с вариационными уравнениями и с заданием функции прогиба пластины через определяемые параметры, являются наиболее подходящими. Это особенно важно, так как главной задачей процесса формоизменения является определение формы поверхности панели.

Осесимметричную поверхность двойной кривизны можно задать в общем виде уравнением поверхности второго порядка

$$w = a \frac{y^2}{2} + b \frac{x^2}{2}, \quad (1)$$

где w – прогиб пластины, расположенной в системе декартовых координат;

a, b – параметры, подлежащие определению.

Для решения задачи воспользуемся энергетическим методом [4], выразив полную энергию системы (панели) через компоненты деформаций.

Геометрическое описание деформаций монолитной ребристой панели при изгибе будем проводить в системе декартовых координат. Для этого совместим оси x и y с продольной и соответственно с поперечной осями симметрии полотна панели в его срединной плоскости (рис. 1). Панель шириной $2p$, длиной $2L$ и толщиной h имеет $2n$ продольных Т-образных ребер жесткости, симметрично расположенных относительно продольной оси симметрии полотна и равноотстоящих друг от друга на шаг $t = p/n$.

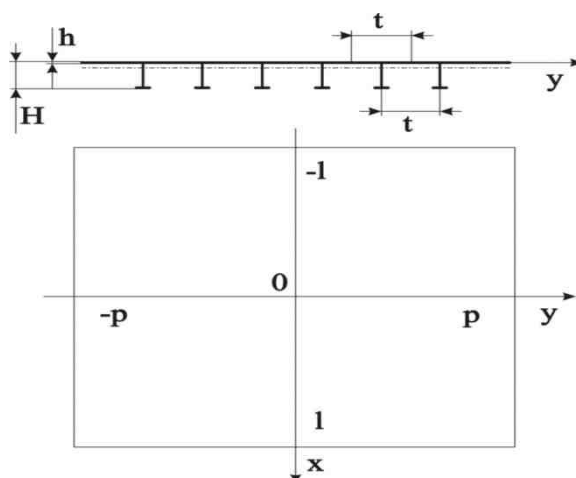


Рис. 1. Распределение панели в системе декартовых координат

Воспользуемся для определения потенциальной энергии деформирования монолитной ребристой панели подходом, предложенным в работе [4]. Потенциальную энергию деформирования монолитной ребристой панели можно выразить суммой энергий деформирования полотна и ребер панели, определяемых отдельно. Потенциальную энергию тангенциальных деформаций полотна панели через деформации срединной поверхности определяем как:

$$U_{e.p} = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (\varepsilon_1^2 + 2\nu \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2 + \frac{1-\nu}{2} \varepsilon_{12}^2) dx dy, \quad (2)$$

где E – модуль упругости;

ν – коэффициент Пуассона.

Потенциальная энергия тангенциальных деформаций растяжения-сжатия ребер панели на уровне срединной поверхности полотна определится суммой энергий для каждого ребра [4]:

$$U_{e.p} = \sum_{i=1}^{2n} \frac{EF_p}{2} \int_{-l}^l \varepsilon_{i1}^2 dx,$$

где F_p – площадь одного ребра;

ε_{i1} – продольная деформация растяжения-сжатия i -го ребра панели, равная продольной деформации срединной поверхности полотна панели на уровне расположения ребра;

$2n$ – общее число ребер панели.

В силу осесимметричного расположения ребер панели имеем

$$U_{e.p} = \sum_{i=1}^n EF_p \int_{-l}^l \varepsilon_{i1}^2 dx. \quad (3)$$

Потенциальная энергия тангенциальных деформаций растяжения-сжатия всей панели с учетом равенств (2), (3) выразим формулой

$$U_e = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (\varepsilon_1^2 + 2\nu \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2 + \frac{1-\nu}{2} \varepsilon_{12}^2) dx dy + \sum_{i=1}^n EF_p \int_{-l}^l \varepsilon_{i1}^2 dx. \quad (4)$$

Потенциальную энергию изгибных деформаций полотна панели определим через изгибные деформации (кривизны) срединной поверхности с учетом того, что $\theta_1 = b$, $\theta_2 = a$, $\theta_{12} = 0$:

$$U_{\theta.p.e} = \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (a^2 + 2\nu ab + b^2) dx dy. \quad (5)$$

Дополнительная потенциальная энергия изгибных деформаций полотна панели вследствие несовпадения центров тяжести полотна и панели в продольном направлении имеет вид

$$U_{\theta.p.e} = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p e_0^2 dx dy = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p \theta_1^2 e^2 dx dy. \quad (6)$$

Потенциальную энергию изгибных деформаций $2n$ ребер панели определим как сумму энергий по каждому ребру:

$$U_{\theta p} = \sum_{i=1}^{2n} U_{\theta pi} = \sum_{i=1}^n Ei [F_p e^2 + I_p - 2eS_p] \int_{-l}^l \theta_1^2 dx, \quad (7)$$

где I_p и S_p – соответственно момент инерции и статический момент сечения ребра панели относительно нейтральной оси полотна.

Потенциальная энергия панели в целом определится суммой энергий деформаций растяжения-сжатия и изгибных деформаций (4), (5) и (7):

$$U = U_e + U_{\theta} = \sum_{i=1}^n EF_p \int_{-l}^l e_{i1}^2 dx + \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (e_1^2 + 2\nu e_1 e_2 + e_2^2 + \\ + \frac{1-\nu}{2} e_{12}^2) dx dy + \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (a^2 + 2\nu ab + b^2) dx dy + \sum_{i=1}^n Ei [F_p e^2 + I_p - \\ - 2eS_p] \int_{-l}^l b^2 dx. \quad (8)$$

Полная энергия деформирования панели должна кроме потенциальной энергии U включать в себя работу внешних силовых факторов на соответствующих перемещениях. Воздействие внешних силовых факторов на форму панели представим остаточными технологическими деформациями, т.е. деформациями, определяемыми режимом силового нагружения применительно к конкретному участку нагружения панели [3,4].

Полная энергия деформирования панели должна включать в себя компоненты технологических деформаций и деформаций, достигаемых конечной формой панели. Разность технологических и конечных деформаций – это упругая составляющая изменения деформаций при формоизменении панели. Рассматривать силовые факторы, заменяющие технологическое воздействие, при этом не требуется. Дальнейшее решение задачи определения конечной формы панели в зависимости от параметров технологических деформаций осуществляют из условия стационарности полной энергии панели [4].

4. Расчет основных параметров при последовательном формообразовании панелей двойной кривизны

Рассмотрим процесс формообразования с позиции последовательности приложения воздействий. Пусть форма панели достигается приложением технологических деформаций вдоль оси x , как показано на рис. 2. Деформации создаются последовательно вдоль каждого ребра в зависимости от требуемого распределения деформаций при образовании формы двойной кривизны заданных параметров. В качестве разовых местных воздействий принята разводка (посадка) с изгибом участка полотна шириной t совместно с ребром панели. При последовательном приложении разовых местных воздействий в соответствии с заданным законом распределения происходит сворачивание панели в форму двойной кривизны.

Пусть длина дуги после сворачивания поперечного сечения панели

$$AB = R_c \lambda' = l, \text{ откуда } \lambda' = \frac{l}{R_c} \text{ рад.}$$

Максимальная высота прогиба поперечного сечения панели

$$Z_{\max} = R_c - R_c * \cos \lambda' = R_c(1 - \cos \lambda').$$

Высота прогиба i -го ребра в поперечном сечении

$$Z_i = Z_{\max} - (OB - OC) = R_c(1 - \cos \lambda') - (R_c - R_c \cos \lambda_i) = R_c(\cos \lambda_i - \cos \lambda').$$

Тогда изгибная деформация в точке пересечения срединной поверхности полотна и ребра

$$e_x = \frac{Z_i}{R_{\pi}} = \frac{R_c}{R_{\pi}} (\cos \lambda_i - \cos \lambda') = \frac{R_c}{R_{\pi}} (\cos \lambda_i - \cos \frac{1}{R_c}), \quad (9)$$

где $\lambda_i = \frac{y_i}{R_c}$.

При этом следует учитывать, что y_i измеряется по плоской панели.

Нейтральную поверхность разместим таким образом, чтобы крайние ребра не деформировались, т.е. нейтральная поверхность сечения панели проходит через точки пересечения срединной поверхности панели и осей симметрии крайних ребер.

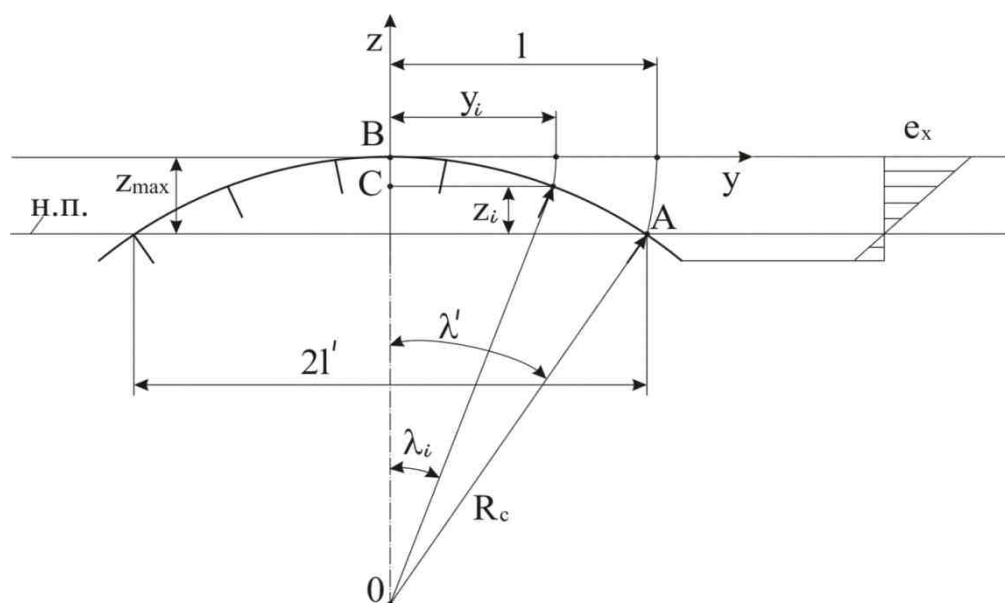


Рис 2. Схема поперечного сечения панели при формообразовании двойной кривизны приложением технологических воздействий

Величина технологической деформации при одном воздействии

$$e = KS,$$

где K – допускаемая относительная деформация;

S – величина деформируемого участка панели вдоль оси ребра при одном технологическом воздействии.

Потребная расчетная величина деформации вдоль оси ребра при одном воздействии штампа

$$e = t_i * \varepsilon_i,$$

где t_i – расстояние между двумя соседними точками воздействия на одном ребре.

Приравняем расчетные и технологические деформации:

$$KS = t_i * \varepsilon_i ,$$

откуда с учетом выражения (9) при формообразовании разводкой

$$t_i = \frac{KS}{\varepsilon_i} = \frac{KSR_{\Pi}}{R_c} \frac{1}{(\cos \lambda_i - \cos \frac{1}{R_c})}. \quad (10)$$

Аналогично при получении панели посадкой нейтральная поверхность будет проходить через точку В, тогда

$$t_i = KSR_{\Pi}(R_c - \cos \lambda_i)^{-1}.$$

Число равномерно распределенных элементарных воздействий по длине ребра определяют по формуле

$$n_i = \varepsilon_1 \frac{L}{e_i}, \quad (11)$$

где L – длина панели.

5. Расчет энергии локального воздействия при последовательном формообразовании

Определим потенциальную энергию формообразования двойной кривизны панели по внешним воздействиям технологического оборудования.

Энергию одного воздействия штампа обозначим W_i^t , тогда внешняя энергия технологического деформирования всей панели

$$W^t = W_i^t \sum_{n=1}^{2n} \frac{L_p^i}{t_i},$$

где $2n$ – число ребер на всей панели;

L_p^i – длина i -го ребра.

При разводке, если длины ребер одинаковы, с учетом (10) получим

$$W^t = \frac{W_i^t L_p^i R_c}{KSR_{\Pi}} \sum_{n=1}^{2n} (\cos \frac{\gamma_i}{R_c} - \cos \frac{1}{R_c}). \quad (12)$$

Общее уравнение энергетического баланса процесса формообразования панели двойной кривизны с оребрением имеет вид

$$U = U_e + U_\theta + W^t = 0.$$

Из этого выражения с учетом уравнений (8) и (12) получим

$$W_i^t = \frac{KSR_\Pi}{L_p^i R_c} \left[\sum_{n=1}^{2n} \left(\cos \frac{y_i}{R_c} - \cos \frac{1}{R_c} \right) \right]^{-1} \left\{ \sum_{i=1}^n E F_p \int_{-l}^l e_{i1}^2 dx + + \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (e_1^2 + 2\nu e_1 e_2 + e_2^2 + \frac{1-\nu}{2} e_{12}^2) dx dy + + \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (a^2 + + 2\nu ab + b^2) dx dy + \sum_{i=1}^n E i [F_p e^2 + I_p - 2e S_p] \int_{-l}^l b^2 dx \right\}. \quad (13)$$

Данное выражение может быть использовано для определения энергии одного воздействия штампа W_i^t , необходимого для формообразования панели двойной кривизны с оребрением с заданными поперечными и продольными радиусами кривизны.

Путем последовательной обработки сечений и ребер в штампе была получена панель двойной кривизны со следующими геометрическими размерами: длина панели – 5,5 м, ширина – 1,1 м, продольный радиус – 12 м, поперечный радиус – 1,5 м (рис. 3). Панель имела переменное сечение толщины полотна панели от 2,5 до 6,0 мм, разрезные ребра длиной 500...700 мм, свободные кромки толщиной 6 мм. Материал панели – Д16пчТ.

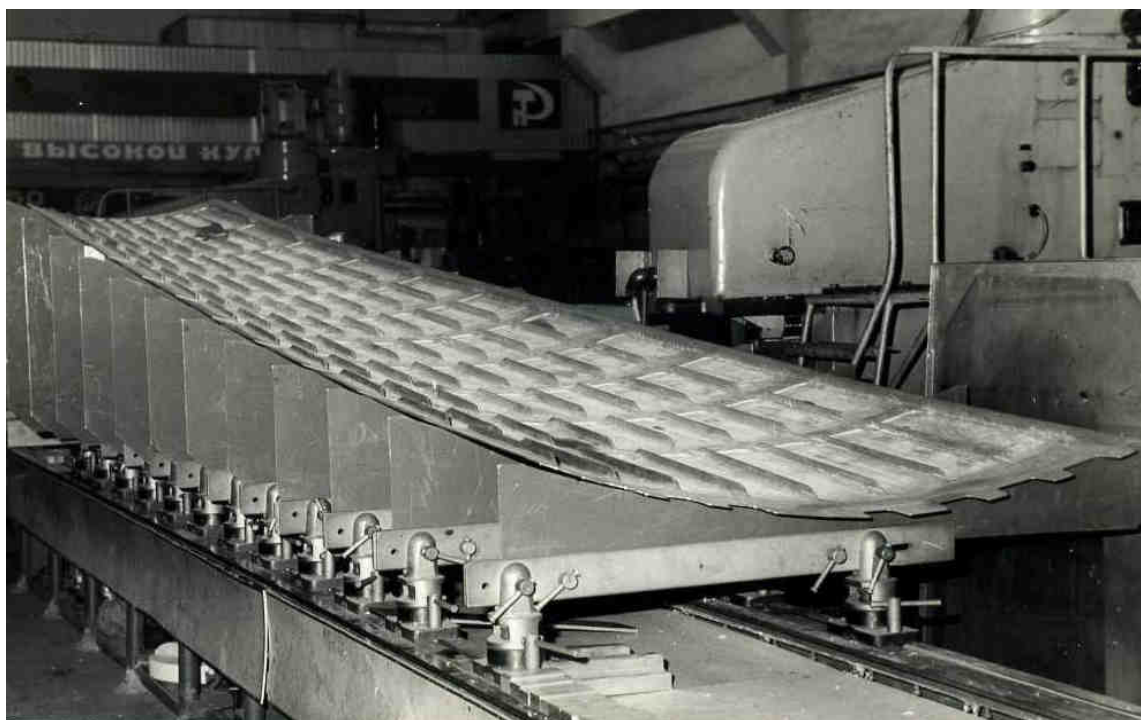


Рис 3. Натурная панель двойной кривизны, полученная последовательной местной разводкой с изгибом

Формование панели осуществлялось разводкой средних зон в штампе в соответствии с приведенной методикой расчета числа воздействий. Экспериментальная проверка различных последовательностей обработки панелей

показала, что панели обладают стабильной формой, не зависящей от последовательности деформирования [3]. Это сохраняется при малых пластических деформациях в зоне между губками посадочного устройства, допускаемых для алюминиевых сплавов.

Натурные подкилевые панели после фрезерной операции получили характерные геометрические отклонения лицевой поверхности от плоскостности, имели небольшую продольную и поперечную кривизну, вызванную образующимися и освободившимися остаточными напряжениями. К другим незначительным геометрическим отклонениям следует отнести крутку поперечного сечения до 5 град, устраняемую нагружением на стенде КРС, а также отклонения местного характера, которые устранялись доводкой формы с помощью того же оборудования.

Выводы

1. Рассмотрены особенности перспективного технологического процесса формообразования ребристых панелей двойной кривизны последовательной местной гибкой с посадкой (разводкой).

2. Предложена методика расчета энергии локального (местного) воздействия при последовательном формообразовании двойной кривизны монолитных панелей с ребрами большой жесткости.

3. На примере получения панели двойной кривизны рассмотрена и апробирована методика расчета процесса формообразования.

Это позволяет сделать вывод о том, что предложенная методика расчета процесса формообразования панелей может быть эффективно использована для изготовления ребристых панелей двойной кривизны.

Список литературы

1. Сикульский, В. Т. Создание технологии правки и доводки формы монолитных панелей без использования прессы [Текст] / В. Т. Сикульский // Авиационно-космическая техника и технология: научно-техн. журн. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2013. – № 3(100). – С. 31 – 35.

2. Сикульский, В. Т. Формообразование монолитных панелей сложных форм [Текст] / В. Т. Сикульский // Авиационно-космическая техника и технология: научно-техн. журн. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2013. – № 5(102). – С. 15 – 19.

3. Исследование процесса формообразования ребристых панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой [Текст] / В. Т. Сикульский, Ю. В. Дьяченко, Е. Е. Хитрых, И. А. Воронько // Авиационно-космическая техника и технология: научно-техн. журн. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2014. – № 4(111). – С. 14–21.

4. Баушев, В.Н. Расчет параметров технологического процесса формообразования монолитных ребристых панелей отрицательной гауссовой кривизны больших прогибов [Текст] / В. Н. Баушев, Я. Б. Львин, С. Г. Кушнаренко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1985. – С.123–133.

Поступила в редакцию 21.11.2016

Методика розрахунку вісесиметричного формозмінення монолітних ребристих панелей подвійної кривизни з жорсткими ребрами послідовним деформуванням

Розглянуто особливості отримання панелей з ребрами подвійної кривизни для виробів аерокосмічної техніки з використанням перспективного технологічного процесу формоутворення послідовним місцевим згинанням з посадкою (розводкою). Описано процес і методику розрахунку необхідної кількості місцевих впливів і енергії місцевого впливу для отримання панелей необхідної форми і розмірів. Проведено експериментальне дослідження методики розрахунку параметрів на натурних панелях з жорсткими ребрами літака великої вантажопідйомності.

Ключові слова: технологічний процес, формоутворення, панель, подвійна кривизна, посадка, розводка, пластична деформація, прогин.

Calculation Methods for Axially Symmetric Form Alteration of Integrally Stiffened Panels with Double Curvature by Consequent Deformation

The paper analyses peculiarities of manufacturing double curved panels for aerospace engineering products with application of advanced manufacturing process of form shaping by consequent local bending with fitting (separation). Given is description of process and calculation methods of required number and energy of local impacts to obtain panels of required shape and dimensions. Experimental research of calculation methods of parameters on full-size stiffened panels at heavy lift aircraft was carried out.

Keywords: manufacturing process, form shaping, panel, double curvature, squeezing, stretching, plastic deformation, deflection.

Сведения об авторах:

Сикульский Валерий Терентьевич – канд. техн. наук, профессор кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Кашеева Валентина Юрьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры финансов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

Сикульский Станислав Валерьевич – студент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.