

УДК 621.981.06

**В. Т. СИКУЛЬСКИЙ, Ю. В. ДЬЯЧЕНКО, Е. Е. ХИТРЫХ, И. А. ВОРОНЬКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РЕБРИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ СО СЛОЖНОЙ ВНУТРЕННЕЙ ГРАВЮРОЙ**

*Рассмотрены особенности получения панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой для изделий аэрокосмической техники с использованием перспективного технологического процесса формообразования местной гибкой с посадкой (разводкой). Приведены описание применяемого оборудования и методика расчета необходимого количества местных воздействий для получения панелей требуемых формы и размеров. Проведено экспериментальное исследование точности получаемых размеров путем замеров высот точек формованной панели с дальнейшим сравнением полученных данных со значениями координат теоретического контура панели.*

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

**Введение**

В самолетостроении для формообразования, правки и доводки монолитных панелей широко используют дробеударную обработку, свободную местную гибку, прокатку и другие процессы. Указанные методы позволяют получать только панели небольшой двойной кривизны с нежесткими ребрами, так как они не обеспечивают совместное деформирование полотна и ребер панели. Известные методы не обеспечивают также достаточные точность и производительность.

В последние годы наметилась тенденция увеличения габаритов панелей, что ставит задачу получения панелей сложных форм при неизменных габаритах изделия. Наибольшую трудность представляет получение панелей двойной кривизны из плоских орбренных заготовок, панелей конической формы, у которых направление ребер не совпадает с образующей корпуса и т. п.

Получение панелей двойной кривизны является сложной задачей, так как требует создания в материале полотна сложного напряженного состояния при минимальном уровне остаточных напряжений.

Определенную сложность представляет изготовление панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой, имеющих нерегулярную структуру поперечных сечений (включающих разрезные ребра, местные поперечные утолщения и другие элементы).

Для формоизменения панелей, в том числе двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой, в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» на кафедре технологии производства ле-

тательных аппаратов разработан метод локального деформирования панелей посадкой или разводкой ребер совместно с полотном, сочетанием этих методов и др.

**Анализ состояния вопроса и постановка задачи исследования**

Анализ публикаций, направленных на совершенствование технологического процесса формообразования панелей со сложной внутренней гравюрой, показывает, что для успешного применения их на предприятиях они должны обладать следующими качествами [1]:

1. Обеспечивать необходимое поле деформации независимо от сечения панели и формы гравюры.
2. Универсальность устройства, обеспечивающего формообразование разнообразных форм с широким диапазоном размеров поперечных сечений.
3. Возможность монотонного изменения формы с целью поэтапного ее контроля, корректировки процесса и повышения точности формы.
4. Возможность местной правки и доводки панелей с отклонениями формы в разные стороны.

Для создания технологического процесса, удовлетворяющего заданным требованиям, было невозможно использовать процессы деформирования с нагревом, так как для большинства алюминиевых сплавов использование нагрева до температур эффективного деформирования запрещено действующими инструкциями. По этой же причине нельзя использовать процессы, в основе которых применяются явления ползучести или сверхтекучести. Использование процессов вытяжки и других процессов холодного деформирования ограничено от-

сутствием технологических припусков по ширине панели, что связано с особенностями получения заготовок. Кроме того, при деформировании таким образом большое влияние на процесс деформирования оказывают ребра панелей, жесткость которых существенно больше жесткости полотна.

Используемые в отрасли процессы дробеударного формообразования обеспечивают получение панелей с одинарной кривизной поперек оребрению либо небольшой двойной кривизны при маложестком или прерывистом оребрении.

Изготовление панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой отличается рядом особенностей. В частности, такие панели (рис. 1) 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.



Рис. 1. Панель фюзеляжа двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой:  
1 – разрезные ребра; 2 – местные утолщения

При использовании же 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. Поэтому использование предложенного в ХАИ метода получения таких панелей представляется перспективным.

### Цель исследования

Развитие самолетостроения и других отраслей ставит задачу получения целого ряда сложных форм панелей с оребрением (в частности, панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой), что, в свою очередь, требует создания технологических процессов, удовлетворяющих приведенным требованиям [3].

Таким образом, **цель работы** – экспериментальное и теоретическое исследование технологического процесса получения ребристых панелей двой-

ной кривизны со сложной внутренней гравюрой местной гибкой с посадкой (разводкой).

### Процесс и оборудование для получения панелей двойной кривизны

Для решения заданной задачи был выбран метод местного деформирования участка ребра с прилегающим полотном, при этом схема деформирования представляла собой местный изгиб в сочетании с посадкой или разводкой.

Сущность процесса получения панели сложной формы состоит в поэтапном придании панели обобщенного поля деформаций, состоящего из отдельных местных (локальных) деформаций. Эти местные деформации должны быть распределены определенным образом по панели и по времени их приложения, чтобы обобщенные деформации соответствовали постепенному приближению к требуемой форме панели при условии образования минимальных остаточных напряжений в полотне и ребрах панели. Исследования показали, что обеспечить эти условия только посадкой или разводкой невозможно. Поэтому в качестве местной деформации было решено применять деформацию участка полотна и ребра панели в направлении оси ребра и совместный изгиб этого участка в плоскости ребра.

Для реализации данного процесса было создано специальное устройство, внешний вид которого показан на рис. 2. Устройство содержит две пары верхних и одну пару нижних губок, закрепленных подвижно на верхней и нижней плитах соответственно.

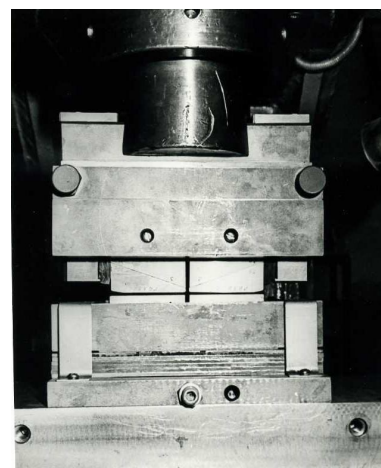


Рис. 2. Устройство для формоизменения панелей разводкой с изгибом

Принципиальная схема работы устройства показана на рис. 3.

В исходном положении верхние губки допускают свободное перемещение панели вдоль штампа, который устанавливается в одностоечный пресс. При нажатии прессы и увеличении усилия до

5...10 кН верхние пары губок захватывают ребро панели. В таком положении верхние губки поддерживают ребро в течение всего процесса деформирования. При возрастании усилия до 200...300 кН штамп изгибает участок ребра с прилегающим участком полотна на нескольких градусах. При столь малых прогибах соседние ребра не оказывают заметного влияния на процесс в очаге деформации. Для изменения величины прогиба штамп снабжен клиновым регулятором с винтовым приводом, установленным под нижними губками.

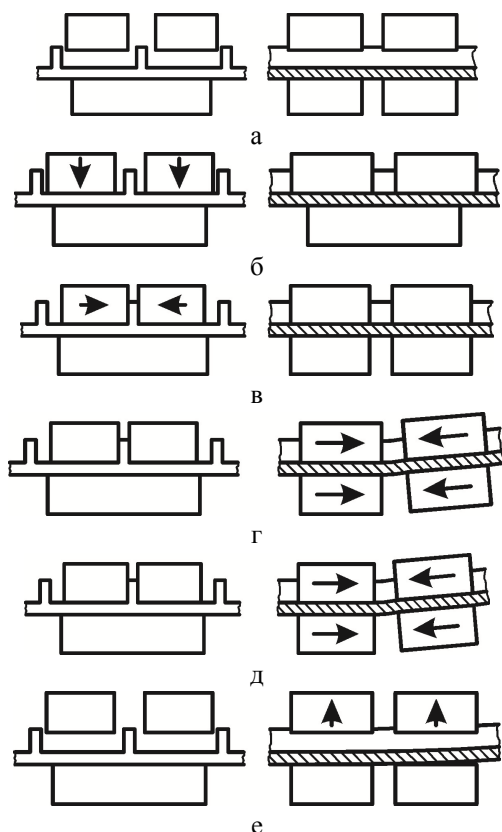


Рис. 3. Принципиальная схема работы устройства: а – исходное положение; б – захват полотна; в – захват ребра; г – изгиб ребра; д – посадка (разводка) ребра; е – возврат в исходное положение

При дальнейшем увеличении усилия до 1500...2000 кН верхние и нижние губки совместно сближаются при посадке либо раздвигаются при разводке. В конструкции штампа предусмотрено осуществление обоих режимов, причем время переключения с одного режима на другой составляет несколько минут. Совместное действие изгибающих и сжимающих (или растягивающих) напряжений уменьшает величину пружинения и положительно отражается на качестве гибки.

Конструкцией устройства предусмотрено осуществление режимов посадки и разводки, посадки и разводки с изгибом в одну или другую стороны либо только гибки участка панели в обе стороны.

Устройство для посадки и разводки панели не имеет насечек на рабочих поверхностях губок. Предотвращение скольжения достигается путем выбора соотношения деформируемого сечения и площади губок, а также оптимального удельного давления при сжатии материала губками.

### Методика расчета процесса формообразования

Рассмотрим упрощенную методику расчета приложения местных воздействий на примере получения панели двойной кривизны. Представим получение двойной кривизны в два этапа. На первом этапе получают одинарную кривизну поперек продольному ребрению  $R_c$ , на втором – создают поле деформации с изгибом панели с продольным радиусом  $R_n$ . В случае использования процесса разводки с изгибом средние зоны панели должны быть удлинены в зависимости от радиуса  $R_n$ .

На рис. 4 показаны возможные поля деформаций при получении двойной кривизны разводкой средних зон (рис. 4, а) и посадкой периферийных зон (рис. 4, б). При использовании процесса посадки с изгибом для получения радиуса  $R_n$  периферийные части панели должны быть сокращены (рис. 4, б).

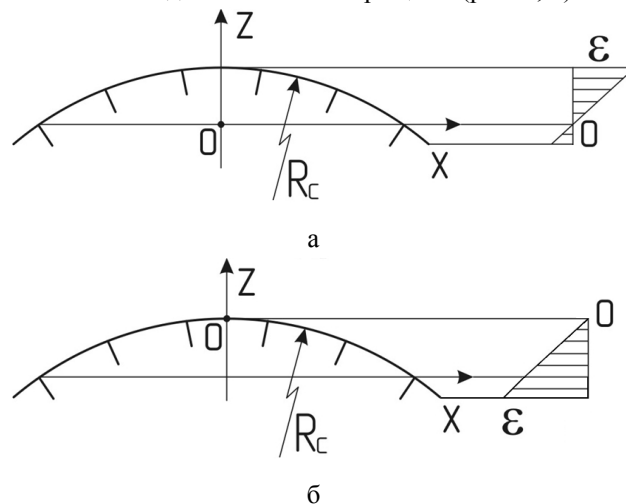


Рис. 4. Относительные деформации при образовании двойной кривизны: а – методом разводки; б – методом посадки

Расстояния между точками воздействия штампа на каждом ребре при получении панелей двояковыпуклой формы разводкой могут быть определены по следующей методике. В этом случае крайние ребра панели не деформируют, а главные относительные деформации вдоль продольных осей средних ребер в точке пересечения вертикальной оси ребра и срединной плоскости полотна

$$\varepsilon_1 = (\sqrt{R_c^2 - x^2} - \sqrt{R_c^2 - \ell^2}) / R_n, \quad (1)$$

где  $R_n$ ,  $R_c$  – продольный и поперечный радиусы кривизны панели соответственно;

$2\ell$  – расстояние между крайними ребрами в поперечном сечении панели (приведенная ширина);  
 $x$  – расстояние от оси симметрии поперечного сечения панели до деформируемого ребра.

При получении панелей двояковыпуклой формы посадкой периферийных ребер расстояние между точками воздействия [4]

$$t_i = ksR_n(R_c - \sqrt{R_c^2 - x^2})^{-1}, \quad (2)$$

где  $s$  – величина сжимаемого участка панели в направлении оси ребра. При посадке эта величина лежит в пределах 4...8 мм.

Число равномерно распределенных элементарных воздействий по длине ребра определяют по формуле

$$n_i = \varepsilon_1 \frac{\ell'}{e_i}, \quad (3)$$

где  $\ell'$  – длина панели.

Результаты вычислений по формуле (5) показывают, что расстояние между точками воздействия при посадке в 3 – 4 раза больше, чем при формообразовании с посадкой. Следовательно, число воздействий при разводке во столько же раз меньше, что выгодно отличает этот процесс при получении панелей двойной кривизны.

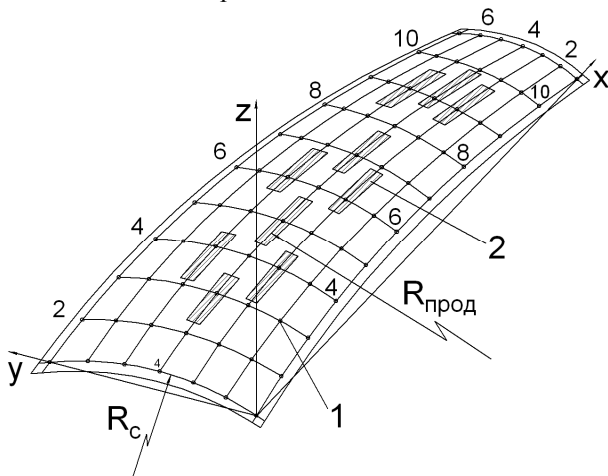


Рис. 5. Эскиз панели: 1 – точки измерений; 2 – участки локального деформирования

Проведем расчет в соответствии с приведенной методикой для панели фюзеляжа со следующими конструктивными и геометрическими характеристиками:

- число ребер, шт. 5;
- длина панели, мм 1050;
- приведенная ширина панели, мм 400;
- расстояние между ребрами, мм 100;
- продольный радиусгиба  $R_n$ , м 5;
- поперечный радиусгиба  $R_c$ , м 1,3.

Определим по формуле (1) потребные продоль-

ные деформации растяжения панели в месте стыка каждого ребра с полотном:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{15} = 0,$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{14} = \frac{1}{5} \left( \sqrt{1,3^2 - 0,1^2} - \sqrt{1,3^2 - 0,2^2} \right) = 2,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\varepsilon_{13} = \frac{1}{5} \left( \sqrt{1,3^2} - \sqrt{1,3^2 - 0,2^2} \right) = 3 \cdot 10^{-3}.$$

По формуле (3) определяем число потребных элементарных воздействий устройства при разводке каждого ребра:

$$n_2 = n_4 = \frac{1,05}{0,02 \cdot 0,05} 2,2 \cdot 10^{-3} \approx 3,$$

$$n_5 = \frac{1,05}{0,02 \cdot 0,05} 3 \cdot 10^{-3} \approx 4.$$

Полученное количество элементарных воздействий распределено равномерно вдоль оси ребра, как показано на рис. 5.

### Экспериментальное исследование процесса получения панелей двойной кривизны

Полученные с использованием предложенной технологии образцы панелей (рис. 6) размерами 500x1000 мм и ребрами высотой 30 мм имели гладкую поверхность без огранки. Дополнительная обработка или зачистка мест разводки двояковыпуклых панелей не требуется. Места посадки с внешней стороны требуется зачищать, так как выступание материала достигает 0,05...0,1 мм над уровнем полотна панели.

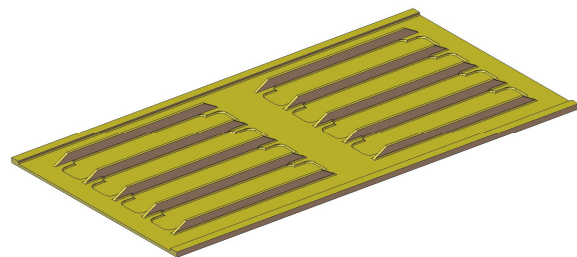


Рис. 6. Панель двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой: а – твердотельная модель заготовки панели с плоским полотном; б – панель, отформованная методом местного изгиба с разводкой

Зачистка ребра в обоих случаях не требуется, так как деформация ребра не локализуется в пространстве между губками. На образцах были достигнуты минимальные радиусы продольной кривизны 6,5 м, поперечной – 3 м.

Двойная кривизна панели достигалась как из плоских образцов, так и с панелей одинарной кривизны. Схема технологического процесса в этом случае оставалась прежней.

Экспериментальная проверка технологии и устройства на образцах панелей из сплава Д16Т показала, что двояковыпуклые панели целесообразно получать разводкой средней части панели, а двояковогнутые – посадкой периферийных участков панелей с соответствующим углом гибки ребер.

Устройство может найти широкое применение при доводке формы панели. Оно позволяет подгибать на малые углы отдельные ребра панели на базе 10...20 мм, что весьма сложно осуществить другими методами.

Было проведено экспериментальное исследование по определению точности получаемых размеров при гибке панелей с посадкой (разводкой) (рис. 5). Для этого на полученную панель была нанесена сетка точек с шагом 100 мм вдоль длинной стороны (всего 11 точек), вдоль короткой стороны точки находились на расстоянии 75 мм (между крайними точками) и 100 мм (между остальными точками) (всего 7 точек).

С помощью измерительного прибора (катетометра В-630) были определены высоты всех  $11 \times 7 = 77$  точек.

Катетометр В-630 предназначен для бесконтактного измерения вертикальных координат точек изделий; предел допустимой основной погрешности прибора для рассматриваемого случая составил не более  $\pm 40$  мкм. Измерения проводились с использованием мерного штихмасса длиной 161,41 мм.

Измеряемая панель устанавливалась на измерительный стол по четырем опорам (по точкам 1-1, 1-7, 11-1 и 11-7), при этом три точки (1-1, 1-7, 11-1)

служили реперными (выставлялись в горизонтальную плоскость), а опора над точкой 11-7 была настраиваемой (выставлялась на уровень плоскости трех реперных точек).

Результаты измерений (значения высот точек относительно нуля прибора) были пересчитаны с учетом длины мерного штихмасса и приведены к нулевой точке (1-1) (см. рис. 5). Полученные данные представлены в табл. 1.

Для анализа были выбраны три продольных (2-2, 4-4 и 6-6) и пять поперечных сечений (2-2, 4-4, 6-6, 8-8 и 10-10) (см. рис. 5). Для выбранных сечений были построены графики (рис. 7, 8), с помощью которых определено, насколько точно получены размеры панели в сравнении с теоретическим контуром фюзеляжа, представленным дугой окружности заданного радиуса.

Анализ точности размеров по всем сечениям панели приведен в табл. 2.

В некоторых случаях для получения заданной формы и размеров панелей их кромки требуют дополнительной посадки, в ряде точек панели требуется последующая доводка по ребрам и кромкам. Для доводки в продольном направлении применяют подгибание ребер на специализированном устройстве, в поперечном – местную посадку (доводку) с помощью посадочного устройства.

Анализ полученных результатов показал, что без учета крайних точек сечений (кромки панели требуют дополнительной посадки) максимальная величина относительной погрешности (разности между высотой панели и теоретическим контуром) не превышает 7 %.

Это позволяет сделать вывод о том, что предложенная технология получения панелей двойной кривизны методом местной гибки с посадкой (разводкой) может быть эффективно использована для изготовления панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой.

Таблица 1

Результаты измерений (приведенные высоты точек панели)

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,00	4,31	7,80	10,51	12,73	13,59	12,73	10,72	7,62	3,97	0,12
2	5,47	10,22	14,23	17,43	19,84	20,96	19,77	17,17	13,93	9,38	5,15
3	11,29	16,74	21,69	26,08	29,44	31,25	30,17	26,00	21,28	16,42	11,15
4	13,05	19,50	25,18	30,30	34,00	35,90	34,85	31,12	25,70	19,74	13,70
5	10,83	16,49	21,34	25,70	29,53	31,46	30,51	26,54	21,91	17,05	11,24
6	5,29	9,23	13,73	17,23	20,06	20,59	19,95	16,96	14,17	10,01	5,52
7	-0,19	3,72	8,60	10,04	12,43	13,02	12,51	10,29	7,87	3,97	-0,05

Таблица 2

Отклонения полученного профиля от теоретического контура

Сечения		Точки											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
		Значения отклонений (мм/%)											
продольные	2-2	1,43	–	0,77	0,95	0,53	–	0,39	0,79	0,44	–	2,16	
		35,40	–	5,41	5,50	2,67	–	1,97	4,60	3,16	–	72,24	
	4-4 (середина панели)	2,76	–	1,48	1,48	0,85	–	0,06	0,77	1,14	–	3,11	
		26,82	–	5,88	4,88	2,50	–	0,17	2,47	4,44	–	29,37	
	6-6	2,34	–	0,40	0,42	0,25	–	0,05	1,08	0,54	–	1,59	
		79,32	–	2,91	2,44	1,26	–	0,25	6,37	3,81	–	40,46	
поперечные	2-2	2,65	–	0,57	–	0,32	–	3,42					
		159,60	–	3,40	–	1,94	–	1140,00					
	4-4	4,69	–	1,04	–	1,32	–	4,49					
		80,60	–	3,99	–	5,14	–	80,90					
	6-6 (середина панели)	6,18	–	0,98	–	0,58	–	6,12					
		83,40	–	3,14	–	1,84	–	88,70					
	8-8	6,15	–	1,67	–	1,03	–	6,01					
		134,57	–	6,42	–	3,88	–	58,41					
	10-10	3,70	–	0,66	–	0,34	–	2,83					
		1370,40	–	4,02	–	1,99	–	248,25					

Анализ полученных данных также показал, что в ряде точек панели (например, точка 3 на рис. 7, точка 8 на рис. 8) требуется доводка панели по ребрам и кромкам. Для доводки в продольном направлении применяют подгибание ребер на специализированном устройстве, в поперечном – местную посадку (доводку) с помощью посадочного устройства.

Сравнение полученных размеров панели по трем продольным и пяти поперечным сечениям показало, что максимальная величина относительной погрешности (разности между высотой панели и теоретическим контуром) без учета крайних точек не превышает 7 % и составляет 1,48 мм для продольных сечений и 1,67 мм – для поперечных.

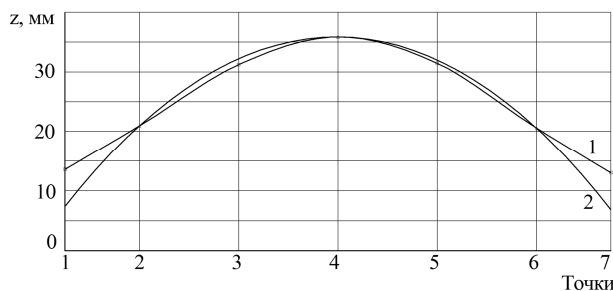


Рис. 7. Отклонения высот точек панели от теоретического контура (поперечное сечение 6-6, середина панели): 1 – экспериментальные значения; 2 – теоретический контур

При сравнении полученных значений высот четырех угловых точек 1-1, 1-7, 11-1 и 11-7 с координатами  $z$  соответственно 0, –0,19, 0,12 и –0,05 мм было установлено, что максимальная разница по высоте между угловыми точками панели составляет 0,31 мм. Это позволяет заключить, что при изготовлении панелей с оребрением методом местной гибки с посадкой (разводкой) крутка имеет малые значения и не приводит к искажению ее формы. Указанная крутка может легко компенсироваться при упругой сборке конструкции.

Относительная волнистость наружной поверхности панели по всем сечениям (без учета крайних точек) имеет удовлетворительные значения: не более 1,5 % для продольных сечений и не более 2 % – для поперечных.

## Выводы

1. Рассмотрены особенности перспективного технологического процесса формообразования ребристых панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой местной гибкой с посадкой (разводкой).

2. Приведено описание конструкции разработанного для реализации процесса формообразования штампа и описан порядок его работы.



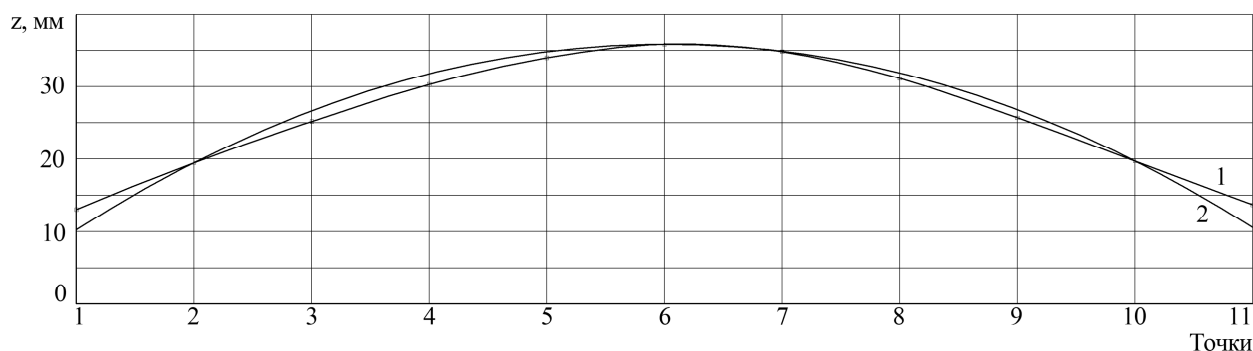


Рис. 8. Отклонения высот точек панели от теоретического контура (продольное сечение 4-4, середина панели): 1 – экспериментальные значения; 2 – теоретический контур

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

4. Проведено экспериментальное исследование точности изготовления панели фюзеляжа двойной кривизны. Максимальная величина полученной относительной погрешности (разности между высотой панели и теоретическим контуром) не превышает допустимых значений. Это позволяет сделать вывод о том, что предложенная технология получения панелей местной гибкой с посадкой (разводкой) может быть эффективно использована для изготовления ребристых панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой.

## Литература

1. Веручев, С. Н. *Forming of monolithic stiffened double-curvature Panels of Aircraft Structures [Текст]* / С. Н. Веручев, В. Н. Максименко, С. В. Левяков // *Proceedings of 2009 International Forum on Strategic Technologies, October 21 – 23. Ho Chi Minh City, Vietnam: Vietnam National University, Ho Chi Minh City Publishing House.* – С. 185 – 187.

2. Сиккульский, В. Т. *Создание технологии правки и доводки формы монолитных панелей без использования прессы [Текст]* / В. Т. Сиккульский // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2013. – № 3/100. – С. 31 – 35.

3. Сиккульский, В. Т. *Формообразование монолитных панелей сложных форм [Текст]* / В. Т. Сиккульский // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2013. – № 5-102. – С. 15 – 19.

4. Сиккульский, В. Т. *Формообразование панелей с продольным ребрением местной гибкой с посадкой (разводкой) [Текст]* / В. Т. Сиккульский // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: сб. науч. тр. Нац. техн. ун-та «Харьк. политехн. ин-т».* – 2014. – № 5 (1048). – С. 73 – 80.

Поступила в редакцию 5.06.2014, рассмотрена на редколлегии 10.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии производства летательных аппаратов С. И. Планковский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ОРЕБРЕНИХ ПАНЕЛЕЙ ПОДВІЙНОЇ КРИВИЗНИ ЗІ СКЛАДНОЮ ВНУТРІШНЬОЮ ГРАВЮРОЮ

**В. Т. Сікульський, Ю. В. Д'яченко, Є. Є. Хитрих, І. О. Воронько**

Розглянуто особливості отримання панелей подвійної кривизни зі складною внутрішньою гравюрою для виробів аерокосмічної техніки з використанням перспективного технологічного процесу формоутворення місцевим згинанням з посадкою (розводкою). Наведено опис обладнання, що використовується, та методику розрахунку потрібної кількості місцевих дій для отримання панелей потрібної форми та розмірів. Проведено експериментальне дослідження точності отриманих розмірів шляхом вимірювання висот точок від-

формованої панелі з подальшим співставленням отриманих даних зі значеннями координат теоретичного контуру панелі.

**Ключові слова:** технологічний процес, формоутворення, панель, подвійна кривизна, складна внутрішня гравюра, посадка, розводка, пластикна деформація, угин.

#### INVESTIGATION OF SHAPING OF DOUBLE CURVED STIFFENED PANELS WITH COMPLEX INNER GEOMETRY

*V. T. Sikulskiy, Y. V. Dyachenko, E. E. Khytrykh, I. O. Voronko*

The article analyzes the peculiarities of manufacturing of double curved (spoon) panels with complex inner geometry for aircrafts by use of prospective manufacturing process of shaping by local bending with squeezing (stretching). The description of used equipment and the method of calculating required number of local deforming that guarantees getting of panels of required shape and dimensions, were stated. Experimental study of dimensions' accuracy was performed by measuring of shaped panel points' heights with further comparison of measurement data with theoretical contour points' values.

**Key words:** manufacturing process, shaping, panel, double curvature, complex inner geometry, squeezing, stretching, plastic deformation, deflection.

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

**Дьяченко Юрий Вениаминович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Хитрых Евгений Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: E.Khytrykh@yahoo.com.

**Воронько Ирина Александровна** – младший научный сотрудник кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.