

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПАНЕЛЕЙ С ОРЕБРЕНИЕМ ЛОКАЛЬНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

В самолетостроении и кораблестроении применяются панели с ребрами, выполненные за одно целое, которые получили название монолитные панели. Как правило, такие панели получают из плоских прессованных заготовок. Формообразование монолитных панелей является сложной технологической проблемой в связи с тенденцией увеличения габаритов панелей. Параллельно происходит прочностное совершенствование самолетов, что выражается в применении нерегулярной структуры с внутренней стороны панели [1]. Формообразование таких панелей требует сочетания нескольких известных методов для различных участков панели, например свободной гибки для мест утолщений и дробеударной гибки для мест равномерной толщины [2].

Изготовление панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой отличается рядом особенностей. В частности, такие панели имеют различную форму и, следовательно, различные моменты инерции поперечных сечений в продольном и поперечном направлениях. Поэтому применение традиционных методов, например, свободной гибки, для формообразования таких панелей в некоторых случаях ограничено или невозможно [3,4].

Известен опыт исключения операций формообразования, например с использованием 3D-печати или применением металлокомпозитных конструкций [5]. Такие технологии требуют применения дорогостоящего оборудования, что в условиях мелкосерийного производства не всегда оправдано. Для формоизменения панелей, в том числе двойной кривизны с нерегулярной структурой, коллективом авторов разработан метод локального деформирования панелей посадкой или разводкой ребер совместно с полотном [6].

На рис. 1 представлены основные виды панелей двойной кривизны, которые широко применяются в изделиях самолетостроения: на рис. 1, а, б – панели фюзеляжа и крыла самолета, на рис. 1, в, г – днищевые панели гидросамолетов и морских судов.

При использовании процессов локального пластического деформирования имеется возможность получить любое местное напряженно-деформированное состояние в зоне приложения воздействия. В качестве местного воздействия используется посадка (сокращение) или разводка (удлинение) ребра с прилегающим полотном и одновременным изгибом участка для получения необходимой кривизны.

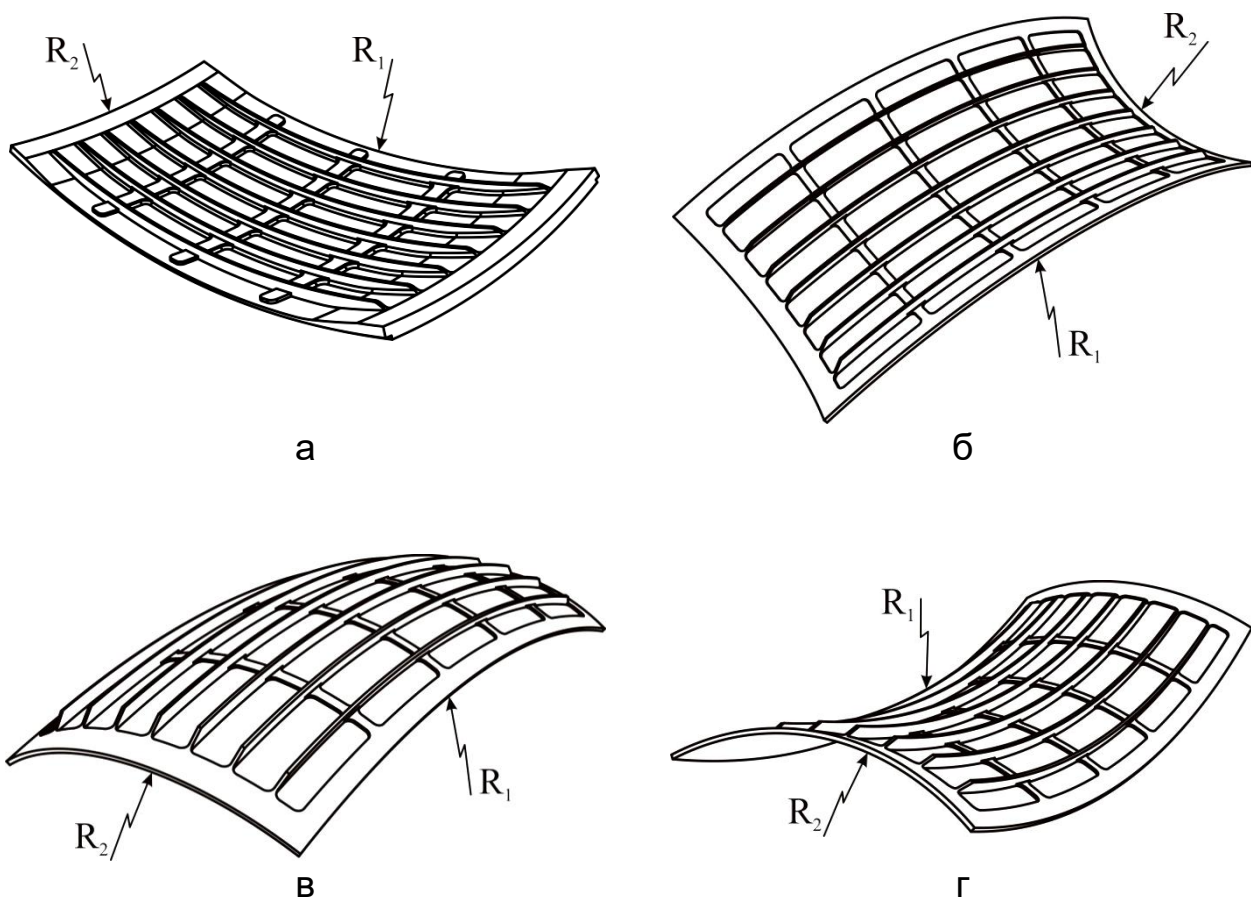


Рисунок 1 – Основные виды панелей двойной кривизны:
 а – двояковыпуклые; б – выпукло-вогнутые; в – двояковогнутые;
 г – вогнуто-выпуклые

Формообразование панели требуемой формы и размеров проводят путем нанесения большого числа локальных воздействий, распределенных определенным образом в соответствии с методикой, изложенной в работе [7].

Достичь этой цели можно применением схем совместного деформирования ребра и полотна панели (рис. 2).

В результате анализа возможных вариантов сочетания моментов и осевых сил определены схемы, которые могут использоваться при получении различных форм панелей. Исследования показали, что обеспечить условия равномерности деформации можно с достаточной степенью точности, если в качестве местной деформации применять деформацию участка полотна и ребра панели в направлении оси ребра и совместный изгиб этого участка в плоскости ребра. В рамках предложенного метода для формообразования панелей двойной кривизны разработана конструкция штампа, позволяющая деформировать полотно панели совместно с изгибом ребра в его плоскости, описанная в работе [6].

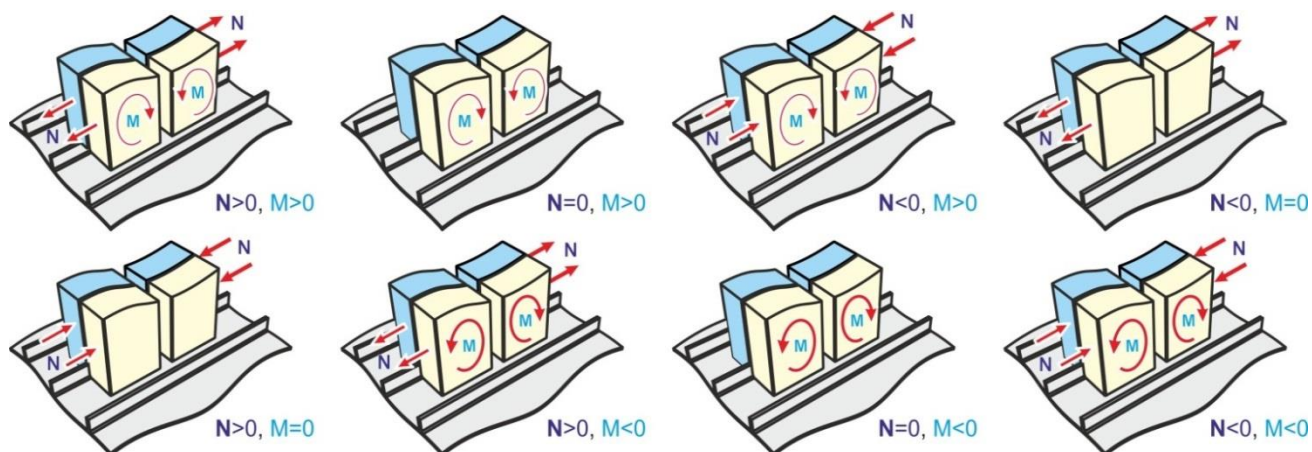


Рисунок 2 – Варианты приложения моментов и нормальных сил при формообразовании местным деформированием

В работе исследовались различные последовательности приложения зональных воздействий: последовательная в отдельных сечениях, последовательная вдоль отдельных ребер, последовательная спиральная и последовательнаяодновременная.

Первая (рис. 3) и вторая схемы имеют преимущество в производительности, третья схема предпочтительна при формообразовании двойной кривизны на панелях большой ширины. Последовательная одновременная схема является наиболее производительной, но она является сложной в изготовлении.

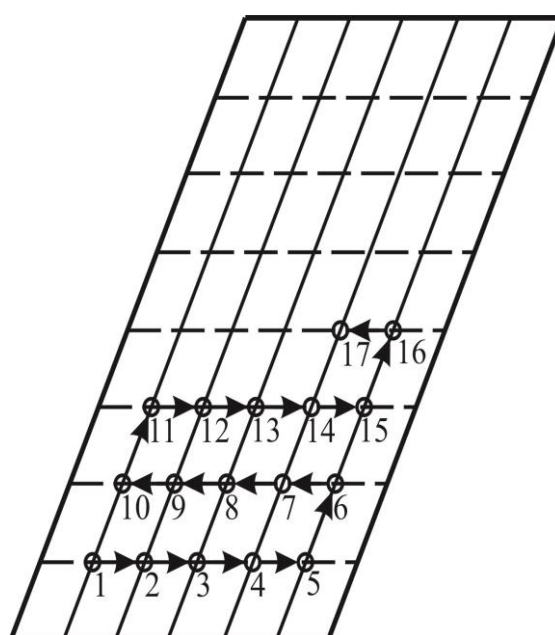


Рисунок 3 – Схема последовательного деформирования панелей с ребрением в отдельных сечениях

Технологической проблемой является создание минимального влияния соседних зон на очаг деформирования, что позволяет получать стабильное качество панелей больших габаритов.

С этой целью экспериментальные исследования проводились в следующем порядке. Общее количество воздействий определялось в соответствии с методикой, изложенной в работе [7], и принималось за 100%. При образовании двойной кривизны технологический процесс формообразования панели разбивался на несколько этапов. На первом этапе последовательным деформированием в соответствии с методикой расчета осуществлялось 30% воздействий по всей площади панели пропорционально по каждому ребру. По сформированной кривизне выполнялось измерение формы и проводилась необходимая коррекция числа обжатий. Далее выполнялся второй этап (волна) деформаций до 60% от числа расчетных. На третьем этапе число воздействий доводилось до 90% и проводился контроль формы панели. По результатам измерений на последнем этапе проводилась окончательная корректировка числа воздействий и доводка формы панели в соответствии с техническими требованиями на координатно-размерном стенде (КРС). Пример такой последовательной обработки панели приведен на рис. 4.

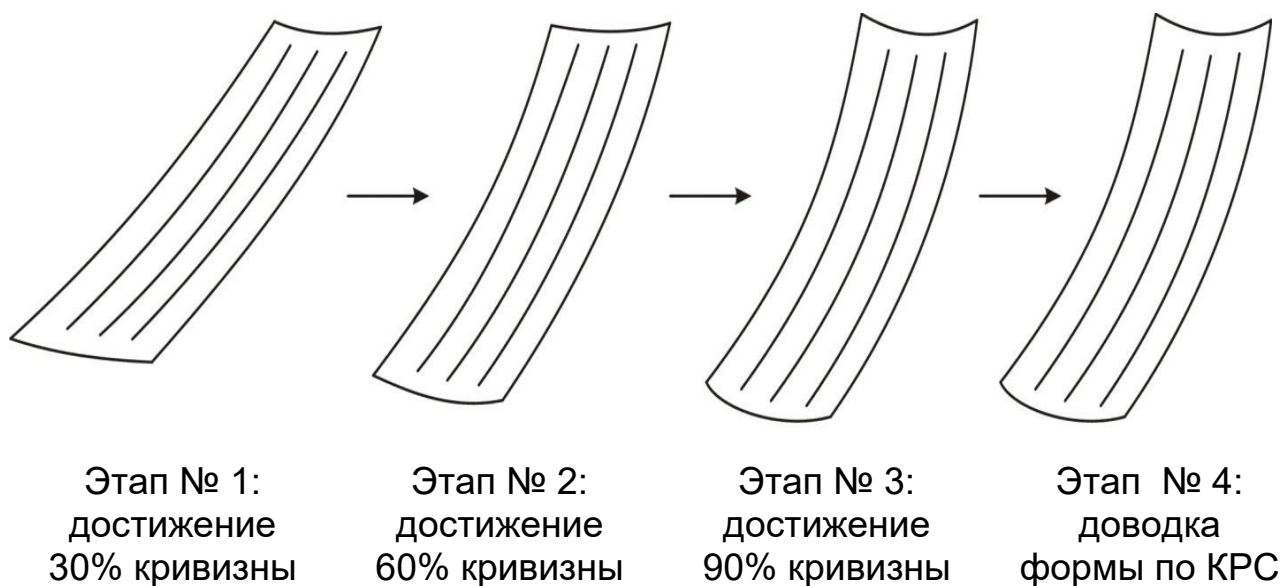


Рисунок 4 – Схема последовательного этапного (волнового) метода получения панели двойной кривизны

В связи с тем, что технологический переход формообразования панели по признакам оставался прежним, процесс формообразования панели назван волновым, т. е. при котором деформации осуществляются волнами.

Различные последовательности деформирования ребер экспериментально проверялись на образцах из алюминиевого сплава Д16чТ (рис. 5).



Рисунок 5 – Панель двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой, отформованная методом местного изгиба с разводкой

Эскиз образца размером 550x1000 мм с оребрением высотой 30 мм, а также схема расположения точек замера прогибов образца приведены на рис. 6. Для данного плоского образца ставилась задача получения панели двойной кривизны с заданными радиусами.

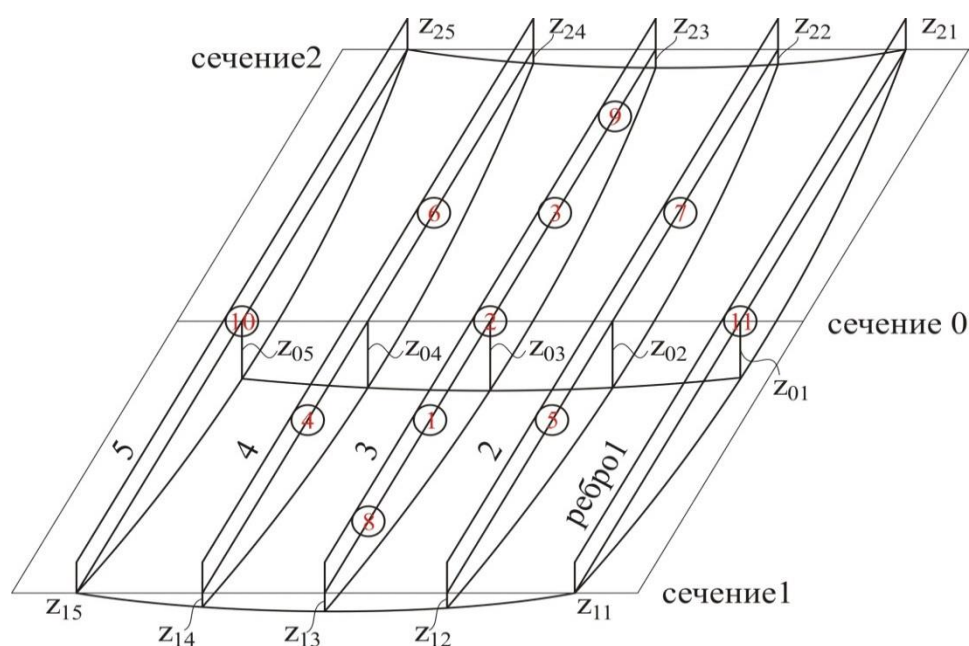


Рисунок 6 – Схема расположения воздействий на панели и точек измерений прогибов по координате Z_{ij}

В связи с дефицитностью образцов панелей исследования проводились на образце, в котором прогибы регистрировались по признакам соблюдения симметрии прогибов после каждого воздействия инструмента.

В табл. 1 представлены результаты прогибов Z_{ij} по этапам зонального деформирования приведенного образца при последовательном деформировании ребер с учетом последовательности приложения воздействий и прогибов полотна панели. Здесь индекс i означает номер сечения, а величина j – номер ребра. В качестве воздействия применялась разводка с изгибом полотна и ребер панели.

Таблица 1 – Результаты измерений координаты Z_{ij}

Этап	Зональное нагружение	Сечение	Ребро				
			1	2	3	4	5
1	Разводка ребра № 3 в точках 1, 2, 3	0	2,5	13,5	17,5	13,0	2,5
		1	0	6,5	8,4	6,5	0
		2	0	7,5	9	7,8	0
2	Разводка ребра № 2 и № 4 в точках 4, 5, 6, 7	0	3,1	17,5	19,5	16,7	3,0
		1	0	7,3	9,5	7,2	0
		2	0	8,4	10,1	8,7	0
3	Разводка ребра № 3 в точках 8, 9	0	6,0	18,3	21,5	18,0	6,3
		1	0	7,5	9,7	7,3	0
		2	0	8,7	10,5	9,0	0
4.	Доводка подгибкой ребер 1, 5 в точках 10, 11	0	6,0	18,0	20,5	17,8	6,1
		1	0	7,6	9,7	7,4	0
		2	0	8,9	10,3	9,0	0

Базирование панели при измерении осуществлялось в точках на концах крайних ребер.

Координаты Z_{ij} регистрировались в трех сечениях 1, 0, 2 на пяти ребрах, т.е. в 15 точках после каждого зонального воздействия.

В качестве зонального воздействия использовалась указанная в таблице последовательность деформирования в специальном штампе, в котором реализуется разводка с изгибом. Контроль величины деформации осуществлялся по усилию прессы на основании ранее подобранных режимов на образцах. Усилие прессы для разводки с изгибом составляло 205 тс, для подгибки ребер при разводке – 160 тс.

Эксперименты по отработке последовательности деформирования подтвердили необходимость использования последовательного деформирования панели зональным (волновым) методом.

Результаты формообразования последовательным волновым методом имели наилучшие показатели по отклонениям от теоретического контура и относительной волнистости. 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.

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. Это дает основания рекомендовать волновой метод для использования при формообразовании панелей сложной формы, особенно двойной кривизны, когда в процессе формообразования вследствие образования кривизны возрастает жесткость полотна панели. Волновой метод позволяет уменьшить в несколько раз влияние жесткости полотна, имеющего двойную кривизну, на процесс деформирования в зоне контакта с инструментом.

В серийном производстве при установившемся технологическом процессе этап доводки панели можно сократить за счет увеличения числа воздействий на предыдущих этапах формоизменения. Таким образом, можно значительно уменьшить объем доводочных работ.

Выводы

1. Экспериментальная проверка различных последовательностей обработки панелей показала, что панели обладают стабильной формой, не зависящей от последовательности деформирования. Это условие выполняется при малых пластических деформациях в зоне между губками посадочного (разводного) устройства, допускаемых для алюминиевых сплавов.

2. Экспериментальные исследования подтвердили правомерность применения методики расчета процесса формообразования панелей с регулярной и нерегулярной структурами последовательным волновым методом.

Список использованных источников

1. Сикульский, В. Т. Формообразование монолитных панелей сложных форм / В. Т. Сикульский // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2013. – № 5(102) – С. 15 – 19.

2. Пашков, А. Е. Технологический комплекс для формообразования длинномерных панелей и обшивок на базе отечественного

оборудования / А. Е. Пашков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №1(5). – С. 1528–1536.

3. Yu, Y. FEM modelling for press bend forming of doubly curved integrally stiffened aircraft panel / Yan Yu , Wang Haibo , Wan Min // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – № 22. – 2012. – P. 39–47.

4. Yu, Y. Prediction of stiffener buckling in press bend forming of integral panels / Yan Yu , Wang Haibo , Wan Min // Transactions of Nonferrous Metals Society of China.– 2011. – № 21. – P. 2459 – 2465.

5. Олейников, А. И. Интегрированное проектирование процессов изготовления монолитных панелей/ А. И.Олейников, А. И.Пекарш. – М.: Эком, 2009. – 112 с.

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

7. Сикульский, В. Т. Расчет основных параметров симметричного формоизменения монолитных ребристых панелей двойной кривизны последовательным деформированием/ В. Т. Сикульский, М. Е. Тараненко, В. Ю. Кащеева, С. В. Сикульский // Обработка материалов давлением. – 2017.– №1(44). – С. 143–148.

Поступила в редакцию 23.02.2018.

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