

УДК 621.981.06

В.Т. СИКУЛЬСКИЙ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ФОРМООБРАЗОВАНИЕ МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ФОРМ**

Приведен классификатор монолитных панелей, используемых в конструкции самолетов, получение которых имеет технологические проблемы при их формообразовании: недостаточную точность, высокую трудоемкость доводочных работ и пр. Предложен метод формоизменения локальным деформированием с использованием изгибающих моментов и осевых усилий. Рассмотрены возможные схемы деформирования и предложены устройства для реализации процесса. Описаны результаты испытания процесса на образцах из алюминиевых сплавов и приведены основные технологические рекомендации. Рассмотрен пример реализации предлагаемого метода при формообразовании панели двойной кривизны.

Ключевые слова: *формообразование, посадка, разводка, изгиб, доводка формы, точность формообразования, двойная кривизна.*

Введение

В конструкции современных самолетов широко используются монолитные панели, у которых полотно (обшивка) выполнено цельным с оребрением, обеспечивающим жесткость панелей.

Указанная жесткость панелей является технологической проблемой их формообразования по контуру летательного аппарата, так как большинство заготовок панелей получают в плоском виде.

В работе [1] приведен классификатор форм панелей, применяемых в конструкциях самолетов, который не является достаточно полным.

Реально в конструкции самолетов встречаются ряд конструктивных элементов на панелях и ряд задач формоизменения монолитных панелей, которые представляют собой технологические проблемы, в ряде случаев являющиеся до настоящего времени нерешенными.

Постановка задачи исследования

Среди технологических проблем формообразования панелей следует отметить получение следующих основных форм (рис. 1).

Перегиб крыльевых панелей (рис. 1, а) требует выполнения точного радиуса и места расположения перегиба в целях обеспечения высокой точности соединения с соседними панелями по сборочным базам. Основным методом формоизменения таких панелей является свободная гибка, которая не обеспечивает получение панелей с разными углами гибки ребер α_1 и α_2 (рис. 1, а) и тем более с разноименными углами.

Панели с нерегулярной структурой или преры-

вистым оребрением (рис. 1, б) также ограничивают применение свободной гибки в переходной зоне, так как приложение изгибающего момента к ребру этим методом осуществить невозможно.

В конструкции самолетов иногда применяются панели преимущественно одинарной кривизны с оребрением, расположенным под углом к образующей цилиндрической формы полотна панели (рис. 1, в). Создание такой формы требует изгиба ребра с переменным радиусом кривизны по эллиптическому закону. Причем каждое ребро должно изгибаться по собственному закону кривизны, который выполнить известными методами гибки довольно сложно.

Применяемый в конструкции некоторых самолетов перегиб крыла по размаху требует применения панелей одинарной кривизны с изгибом, ось которого вследствие стреловидности крыла должна располагаться под углом φ к поперечному сечению (рис. 1, г). Положение оси изгиба регламентируется допускаемыми отклонениями внешних форм агрегата и имеет высокую точность. Создание перегиба крыла методом свободной гибки должно учитывать упругое отклонение при разгрузке, которое приводит к изменению положения оси изгиба в момент нагрузки и после разгрузки. Сложным случаем формообразования является получение формы панели близкой к конической, у которой ребра имеют различную кривизну (рис. 1, д).

Панели крыльев самолетов, как правило, имеют переменное сечение, особенно существенное изменение сечения выполняется за счет переменного сечения ребер, таким образом, жесткость сечения по длине панели различается весьма существенно (рис. 1, е).

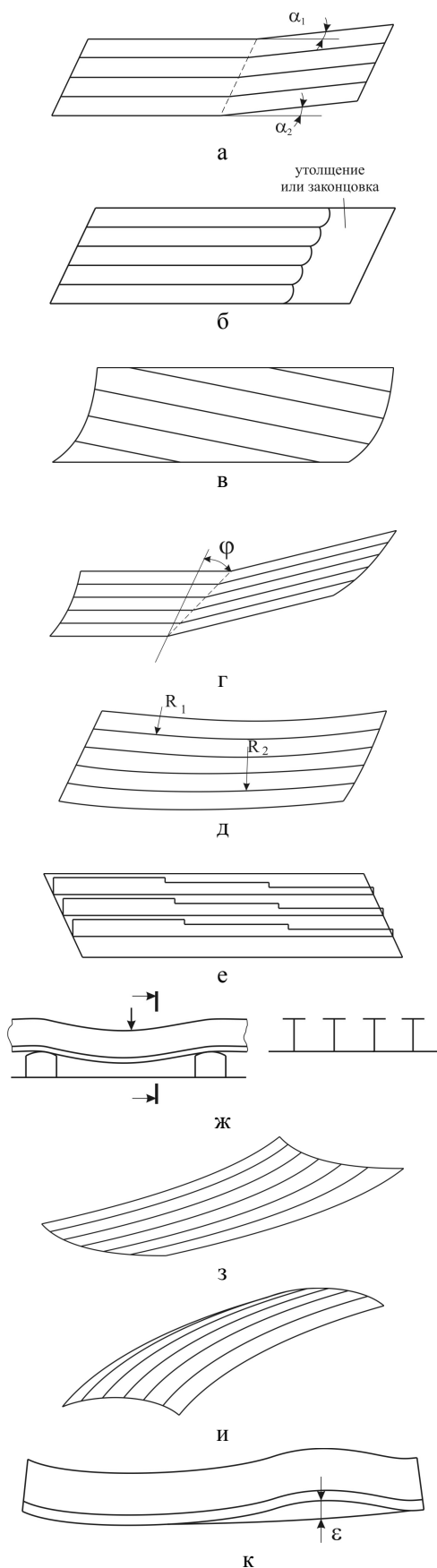


Рис. 1. Технологические задачи формообразования панелей

При формообразовании таких панелей следует учитывать явление изменения формы после разгрузки, а иногда использовать различные методы формообразования или их комбинацию.

Большую технологическую проблему представляет получение изгиба панелей с ребрами большой жесткости, например, панелей центроплана (рис. 1, ж).

При свободной гибке образуется явление, которое получило название «чайка», вследствие преобладания сдвиговых деформаций поперечного изгиба над изгибающими напряжениями от момента. Чтобы избежать этого явления увеличивают базу изгиба или расстояние между опорами, что значительно усложняет гибку из-за упруго-пластических явлений при разгрузке.

Особую группу составляют панели с оребрением, имеющим двойную кривизну (рис. 1, з,и). Такие панели имеют, как правило, радиусы поперечной кривизны около 1,5-3,0 м и продольной 10-15 м. Формообразование панелей двойной кривизны известными методами является трудоемким и сложным процессом, который характеризуется применением специальной оснастки и большим объемом доводочных работ.

На практике кроме доводочных работ при формообразовании панелей одинарной и двойной кривизны возникает необходимость правки и местной доводки панелей на разных этапах их производства (рис. 1, к). В данном случае доводка заключается в создании местных прогибов ребер панелей на величину ϵ .

Для выполнения формообразующих операций на приведенных выше группах монолитных панелей предприятия не имеют оборудования и инструмента, который бы обеспечивал высокое качество формообразования.

Все перечисленные группы монолитных панелей требуют выполнения формообразующих операций исполнителями особо высокой квалификации.

Методика решения задачи

При решении указанных задач учитывали следующие требования к устройствам для реализации технологических процессов. Технологический процесс должен обеспечивать высокую точность формообразования независимо от отклонений размеров поперечного сечения ребер и полотна, а также возможность доводки формы панелей. В связи с тенденцией увеличения габаритных размеров панелей устройства для формоизменения должны предусматривать формовку панелей с учетом дальнейшего увеличения их размеров. Технологическое усилие должно быть минимальным, а оборудование и инст-

румент должны быть универсальными. Новые методы формоизменения должны обладать свойствами управляемости и быть приемлемыми для автоматизации.

Достичь этой цели можно применением схем совместного деформирования ребра и полотна панели. Анализ возможных схем деформирования ребер панелей показал, что для получения панелей сложных форм необходимо создание совместного изгибающего момента в плоскости ребра и осевого усилия в сечении ребра и участке прилегающего полотна.

В результате анализа возможных вариантов сочетания моментов и осевых сил установлено, что все они могут использоваться при получении различных форм панелей.

Таблица 1
Возможные схемы локального деформирования панелей с оребрением

Момент	Осевое усилие		
	$N > 0$	$N = 0$	$N < 0$
$M > 0$	1) $N > 0, M > 0$	2) $N = 0, M > 0$	3) $N < 0, M > 0$
$M = 0$	4) $N > 0, M = 0$		5) $N < 0, M = 0$
$M < 0$	6) $N > 0, M < 0$	7) $N = 0, M < 0$	8) $N < 0, M < 0$

На таблице 1 представлены возможные схемы локального нагружения участка полотна с ребром, где N – осевое усилие в сечении ребра и участка полотна; M – момент изгиба в плоскости ребра. Положительное значение момента здесь соответствует созданию выпуклости вдоль ребер в сторону полотна, отрицательное – выпуклости в сторону ребер; положительное значение осевого усилия соответствует растяжению ребер с прилегающим участком полотна, отрицательное – сжатию. В соответствии с приведенной таблицей созданы устройства для реализации сочетаний действующих изгибающих моментов и осевых усилий, представленных в таблице. Так, деформирование панелей методом раскатки ребер осуществляется по схемам 6, 7 (см. таблицу 1), а специальные устройства в виде штампов позволяют реализовать все указанные схемы. Устройства устанавливаются на гидравлических прессах, используемых на предприятиях. Принцип работы заключается в сочетании действия посадочных губок в плоскости полотна и изгибающих моментов, приложенных к губкам.

Для доводки формы панелей и их правки создано переносное устройство, в котором гибка ребер производится приложением момента к небольшому участку ребра (см. таблицу, схемы 2, 7). Устройство может также использоваться при правке и доводке панели непосредственно на стенде для измерения формы панелей.

Большое количество панелей сложных форм

можно получать приложением приведенных локальных воздействий моментов и осевых усилий во многих точках, так чтобы обобщенные деформации приводили к изменению формы в требуемом направлении. При местном деформировании панелей пластические деформации поэтапно придают участкам ребра панели и полотну. Кроме того, местные деформации, распределенные определенным образом по панели и во времени их приложения, приводят к постепенному поэтапному достижению требуемой формы. Различным расположением зон обработки панели получают ту или иную форму.

На основе изложенных требований разработан процесс и устройство для его реализации, в котором деформирование участка панели совместно с ребром осуществляется в губках, удерживающих участок полотна и ребра одновременно. При необходимости устройство позволяет также изгибать участок панели совместно с ребром в его плоскости. Изгиб может проводиться в обе стороны, а деформирование полотна – на посадку или разводку. Устройство является достаточно универсальным для получения большого разнообразия форм панелей в широком диапазоне размеров их поперечных сечений. Оно устанавливается в прессах, используемых в отрасли, с технологическим усилием 2500 кН. При небольших усилиях устройство обеспечивает местную правку и доводку панелей путем гибки ребра в его плоскости на базе 10-20 мм.

Устройство содержит две пары верхних губок и одну пару нижних губок, укрепленных подвижно соответственно на верхних и нижних плитах, которые на схеме не показаны (рис. 2).

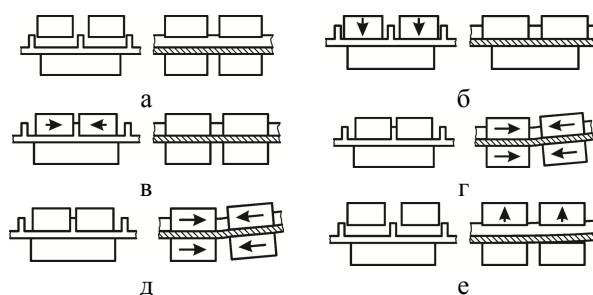


Рис. 2. Принципиальная схема работы штампа:
а – исходное положение; б – захват полотна;
в – захват ребра; г – изгиб ребра; д – посадка (разводка) ребра; е – возврат в исходное положение

В исходном положении (рис. 2, а) верхние губки допускают свободное перемещение панели вдоль оси ребра относительно устройства, которое устанавливается в пресс. При нажатии пресса верхние пары губок захватывают и сжимают ребро панели (рис. 2, в). В таком положении верхние губки поддерживают ребро в течение всего процесса

деформирования. При дальнейшем увеличении усилия левые и правые, верхние и нижние губки совместно сближаются при посадке либо раздвигаются при разводке (рис. 2, д). 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. Внешний вид устройства представлен на рис. 3.



Рис. 3. Рабочий момент деформирования панели в прессе с использованием специального штампа

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.

Результаты исследований

Экспериментальная проверка работы устройства проводилась на образцах панели шириной 520 мм из материала Д16Т. Толщина полотна панели – 2,5 мм, высота ребрения – 30 мм, толщина ребрения – 6 мм, шаг между ребрами – 100 мм.

Измерение деформации проводилось механическим компаратором с точностью 0,01 мм между точками пересечения линий сетки замеров.

Для установки ножек компаратора в панели в точках пересечения были выполнены отверстия диаметром 1 мм на базах 20, 50, 100 и 200 мм симметрично относительно плоскости разъема губок. На рис. 2 показаны контуры губок штампа и ребер панелей. Базовые размеры указаны относительно оси симметрии штампа. Величина деформации определялась по разности показаний компаратора до и после разводки участка панели. Распределение деформации регистрировали при максимальных допустимых значениях деформаций для данного материала. Эпюры распределения деформаций показы-

вают достаточную равномерность деформации полотна панели по ширине губок. Ребро панели и полотно деформируются совместно без существенных отличий. За пределами площади полотна, охватываемой губками, деформации затухают плавно и распространяются на соседние ребра.

При посадке деформации локализуются в зоне между губками, при разводке зона деформирования распространяется на величину до 50 мм вдоль оси ребра. По этой причине разводка является более предпочтительной для получения панелей, имеющих большие кривизны, так как позволяет получить большие деформации при малых относительных деформациях материала.

Устройство позволяет деформировать ребра панелей толщиной до 8 мм и высотой до 40 мм, толщина полотна панели может быть не более 6 мм. Ширина панели определяется подштамповым пространством прессы и не зависит от особенностей устройства. Вследствие того, что губки устройства плоские, радиус получаемой кривизны панели в одном из направлений должен быть не менее 1,2 м. В противном случае на полотне панели остаются следы губок.

Устройство позволяет деформировать панели, имеющие отклонение толщины не более 0,05 мм на 100 мм длины.

Приведенные характеристики устройства и распределение деформации панели позволяют рекомендовать данный процесс для формообразования панелей сложных форм, например, двойной кривизны с поперечным сечением радиусом кривизны R_C и с продольным – R_{II} (рис.4).

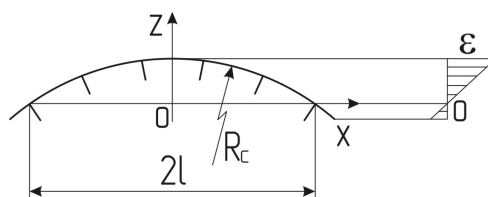


Рис. 4. Схема прогибов и деформаций при образовании двойной кривизны разводкой

Рассматривая переход плоской панели в форму двойной кривизны, из геометрических соотношений получаем закон распределения относительных деформаций вдоль осей ребер по ширине панели для осуществления такого перехода

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{R_C^2 - x^2} - \sqrt{R_C^2 - l^2}}{R_{II}},$$

где x – координата точки пересечения i -того ребра и плоской панели относительно ее середины в поперечном сечении; l – половина расстояния между

крайними ребрами.

Такой закон деформаций достигается приложением различного количества воздействий вдоль каждого ребра по ширине панели, а изгибающие моменты обеспечивают кривизну ребер радиусом $R_{\text{Д}}$. На указанных образцах достигнута приемлемая для панелей конструкции самолетов точность формообразования двойной кривизны.

для доводки формы панелей на различных этапах производства. Разработанные устройства перспективны в качестве инструмента роботизированного комплекса на базе прессы и выравнивающего устройства (манипулятора), оснащенных средствами ЧПУ, более предпочтительны при создании гибкого производственного модуля формообразования панелей.

Заключение

Новые устройства позволяют расширить технологические возможности процесса формообразования панелей, повысить технический уровень механизации заготовительно-штамповочных работ на участках формования панелей, а также решить рассмотренные технологические задачи. Применение текущего контроля формы панели специальными средствами дает возможность повысить точность формы благодаря введению поправок при промежуточных замерах. Устройство можно использовать

Литература

1. Нагаев, И.В. Сборка монолитных панелей с упругой компенсацией отклонений [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Нагаев Игорь Владимирович, Иркутский гос. ун-т. – Иркутск, 2000. – 20 с.
2. Сиккульский, В.Т. Пластическое деформирование оребренной панели [Текст] / В.Т. Сиккульский // Обработка металлов давлением в машиностроении. – 1990. – № 26. – С. 28-32.

Поступила в редакцию 19.09.2013, рассмотрена на редколлегии 25.09.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. графического и компьютерного моделирования И.В. Малков, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Луганск.

ФОРМОУТВОРЕННЯ МОНОЛІТНИХ ПАНЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ФОРМ

В.Т. Сікульський

Наведено класифікатор монолітних панелей, що використовуються в конструкції літаків, отримання яких має технологічні проблеми при їх формоутворенні: недостатню точність, високу трудомісткість доводочних робіт і пр. Запропоновано метод формозміни локальним деформуванням з використанням згинальних моментів і осьових зусиль. Розглянуто можливі схеми деформування і запропоновано пристрої для реалізації процесу. Описано результати випробування процесу на зразках з алюмінієвих сплавів і наведено основні технологічні рекомендації. Розглянуто приклад реалізації запропонованого методу при формоутворенні панелі подвійної кривизни.

Ключові слова: формоутворення, посадка, розводка, вигин, доведення форми, точність формоутворення, подвійна кривизна.

FORMING OF INTEGRAL PANELS OF COMPLEX FORMS

V.T. Sikulskiy

Classifier of integral panels used in aircraft design is given as their obtaining can cause several technological problems when forming: poor accuracy, high labour content of finishing works, etc. Proposed was the method of form change by local deformation using bending moment and axial thrust. The possible strain patterns were considered and devices for process realization were proposed. Test results of the process were described based on the samples of aluminum alloys and main technological recommendations were given. Considered was the example of realization of method proposed when forming panel of double curvature.

Key words: forming, fit, separation, bend, form finish, forming accuracy, double curvature.

Сиккульский Валерий Терентьевич – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: vsikulskiy@mail.ru.