

УДК 621.981.06

В. Т. СИКУЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, доц., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ДОВОДКИ 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. Дана классификация методов формообразования панелей с оребрением, в том числе методов формообразования до механической обработки, а также с использованием лазерного профилирования. Сформулированы требования к технологическим процессам формоизменения и доводки формы ребристых панелей сложных форм. Предложен метод формоизменения локальным деформированием с использованием изгибающих моментов и осевых усилий. Рассмотрены возможные схемы деформирования и предложены устройства для реализации процесса. Кратко описаны устройства для доводки и правки панелей с оребрением без применения прессы, а также специальный штамп для получения панелей двойной кривизны разводкой средних зон. Описаны результаты испытания процесса на образцах из алюминиевых сплавов и приведены основные технологические рекомендации.

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

Введение. Применение монолитных узлов и панелей в конструкции самолетов обусловлено рядом преимуществ по сравнению с другими конструкционными материалами, в том числе и с композиционными материалами. Такие панели позволяют уменьшить массу конструкции при равной прочности, повысить ресурс изделия, уменьшить объем сборочных работ, применить местную герметизацию взамен сплошной.

Применение монолитных панелей в конструкциях самолетов оправдано только в случаях существенного улучшения эксплуатационных характеристик изделий. Выбор геометрических размеров монолитных панелей и их места расположения в планере производится с учетом прочности, ресурса и массы конструкции [3]. Перспективные конструкторские решения зависят от эффективности применения монолитных узлов, которая определяется на основе большого числа конструкторских, технологических, экономических и других параметров.

Анализ известных конструктивно-технологических членений самолетов показывает, что перспективными являются применения монолитных панелей в

случаях, когда достигается высокая эффективность массовых и экономических показателей.

Однако при использовании монолитных панелей снижается коэффициент использования материала по сравнению со сборной конструкцией, требуется повышенная мощность станочного оборудования, повышается стоимость полуфабрикатов, удлиняется цикл производства.

Постановка проблемы. Серьезной технологической проблемой является формообразование монолитных панелей особенно в связи с тенденцией увеличения габаритов панелей и, следовательно, усложнением их форм.

Основными методами получения заготовок монолитных панелей являются прокатка, прессование, горячая штамповка и литье. Заготовки монолитных панелей из алюминиевых сплавов Д16 и В95 получают чаще всего прессованием или прокаткой на металлургических заводах, где они дополнительно подвергаются правке и термообработке [1].

На авиационных предприятиях заготовки монолитных панелей обрабатывают на фрезерных станках с программным управлением. В промежутках между фрезерными операциями производится необходимая механическая правка плоскостности панели. Завершающими технологическими операциями являются операции формообразования согласно внешним обводам агрегата, а также операции обеспечения заданного ресурса.

Формообразование плоских монолитных панелей является сложным технологическим процессом, отличающимся большой трудоемкостью и высокой квалификацией рабочего. Трудности, возникающие при формообразовании панелей, ограничивают возможности создания сложных форм поверхности и поэтому в конструкциях самолетов применяются монолитные панели в основном одинарной и небольшой двойной кривизны [2].

По виду образованной поверхности монолитные панели могут быть развертывающимися и неразвертывающимися и разделяются по способу построения поверхности [4]. Панели неразвертывающиеся с перегибом или криволинейной образующей применяются как крыльевые или фюзеляжные обшивки двойной кривизны. Такие панели двойной кривизны ввиду отсутствия эффективных механизированных методов серийного производства считаются нетехнологичными. В отдельных случаях неразвертывающиеся типы

поверхностей могут быть получены на заготовках из разнотолщинной плиты или стрингерной заготовки.

Процесс формообразования проводят после механической обработки, либо при создании сборно–монолитной конструкции плиту обрабатывают после формообразования, либо отказываются от механической обработки и формообразования и применяют лазерное профилирование.

Применяемые методы формоизменения профилей и монолитных панелей представлены на рис. 1.

Проблема получения деталей сложной формы решается в настоящее время путем использования технологий лазерного профилирования или так называемых 3D-принтеров [5].

Эта технология гарантирует огромную производственную «гибкость», она идеальна для выпуска деталей небольшими партиями и создания прототипов, в то же время она имеет свои преимущества в единичном производстве или при производстве деталей, снятых с производства.

В серийном производстве экономически целесообразными являются традиционные методы получения заготовок деталей сложных форм.



Рис. 1 – Методы формообразования профилей и монолитных панелей

Основными методами формоизменения профилей и монолитных панелей, которые используются в промышленности, являются: гибка прокаткой на КГЛ; гибка на листогибочных прессах и ЛГС; гибка в рессорных штампах; дробеструйное формование; использование упругих наполнителей или упругих матриц; методы с применением импульсных источников энергии; методы с местным деформированием; методы со свободным изгибом.

Для получения требуемой поверхности применяется формовка по участкам в штампе на гидропрессе, а также посадка или раздача отдельных участков панели.

Панели с вафельным оребрением могут быть отформованы по матрице с помощью гидравлической штамповки или получены в штампах. Для панелей простых форм широко используется свободная гибка и дробеударное формообразование.

В последние годы для получения панелей двойной кривизны используется предварительное формообразование листа или плиты и последующая механическая обработка на специальных 5-координатных станках с регулируемыми приспособлениями. Однако таким методом возможно получение относительно тонких панелей с нежесткими ребрами или утолщениями.

Цель исследования. Основные формы панелей применяемых при производстве летательных аппаратов и методы формоизменения сложных профилей приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Укрупненный конструкторско-технологический классификатор ребристых панелей, используемых в конструкции летательных аппаратов

Технологическая группа	Методы формообразования					
	Гибка-прокатка	Свободная гибка	Обдувка дробью	Зональное деформирование	Раскатка части сечения	Метод отсутствует
1	2	3	4	5	6	7
Панели с перегибами		*		*		
Панели с прерывистым оребрением		*				*
Одинарной кривизны с косым перегибом		*				
Конической формы с образующей под углом к ребрам						*
Панели с разными углами изгиба ребер						*
Панели с ребрами переменной жесткости			*			*

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Панели с ребрами большой жесткости						*
Пологие панели положительной гауссовой кривизны	*	*	*			
Не пологие панели двойной кривизны				*		
Пологие панели двойной отрицательной гауссовой кривизны	*		*		*	
Панели с местными отклонениями ребер панелей						*

Более половины технологических групп деталей, представленных в таблице, являются не технологичными или метод их изготовления не разработан, а в некоторых случаях их применение находится на этапе научно-исследовательских работ.

Анализ существующих способов и оборудования для формоизменения панелей сложных форм с оребрением приведен в работе [4]. Вследствие нестабильности процесса деформирования панелей с малыми упругопластическими деформациями формообразование панелей ведут последовательно методом приближений с межоперационным контролем геометрии панелей. Как правило, для контроля формы используются пространственные носители форм и размеров, например, координатный стенд, оснащенный комплектом шаблонов сечений.

Применяемые технологические методы не обеспечивают достаточную точность формообразования вследствие существенных отклонений геометрических размеров после механической обработки. Используемые методы обладают низкой производительностью формообразования и контроля формы поверхности после формообразования. В применяемых технологических методах сложным вопросом является обеспечение равномерного совместного деформирования полотна и ребер панелей.

Вследствие неточности формы панелей при сборке конструкции часто используют так называемую упругую сборку, которая предусматривает увеличение остаточных напряжений в деталях изделия [6].

Анализ публикаций, направленных на совершенствование технологического процесса формообразования панелей, показывает, что для успешного их применения на предприятиях они должны обладать качествами, описанными в работе [7].

В этой связи является весьма актуальной задача создания технологических процессов и приспособлений для формоизменения и правки сложных по форме профилей и панелей с оребрением, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям и обеспечивающих высокую точность деталей, эффективность использования в промышленности при малой стоимости оборудования и инструмента, а также невысокой квалификации исполнителей.

Основные результаты исследований. В результате анализа перечисленных требований и особенностей был выбран в качестве базового метод зонального деформирования.

Сущность процесса получения панели сложной формы зональным деформированием 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.

Исследовались различные последовательности приложения зональных воздействий: последовательная в отдельных сечениях, последовательная вдоль отдельных ребер и последовательная спиральная.

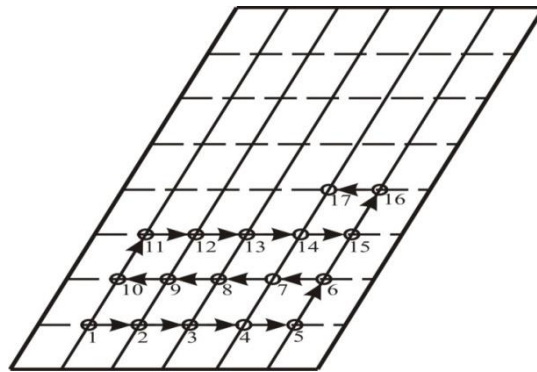


Рис. 2 – Схема последовательного деформирования поперечного сечения панели

Целью исследования было определение величины влияния соседних участков панелей на процесс деформации и конечную пластическую деформацию в каждой зоне, которая определяет процесс формообразования в целом. Для разных образцов были выбраны разные последовательности

перемещения зоны деформирования, которые имели свои технологические преимущества. Первая последовательность представлена на рис. 2, которая получила название схема последовательного деформирования поперечного сечения панели.

В этой схеме местные воздействия прикладываются последовательно к каждому ребру вдоль одного сечения панели, затем зона деформирования перемещается к соседнему сечению и далее процесс продолжается вновь. Такая схема позволяет обеспечить минимальное вспомогательное время на перемещение заготовки вдоль пресса и контролировать форму панели уже после обработки нескольких сечений. Процесс формообразования панели по такому методу для достижения потребной кривизны можно выполнять в несколько этапов. На первом этапе формируется 30% кривизны, производится измерение и выполняется коррекция процесса. На втором и третьем этапах выполняются операции формообразования, которые называют волнами. На последней четвертой волне выполняют доводку формы до окончательных размеров с помощью доводочных устройств с контролем формы на координатном стенде.

Достичь необходимого качества процесса формообразования 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.

На рис. 3 представлены возможные схемы локального нагружения участка полотна с ребром, где используется осевое усилие в сечении ребра и участка полотна и момент изгиба в плоскости ребра.

Положительное значение момента здесь соответствует созданию выпуклости вдоль ребер в сторону полотна, отрицательное – вогнутости полотна; положительное значение осевого усилия соответствует растяжению ребер с прилегающим участком полотна, отрицательное – сжатию.

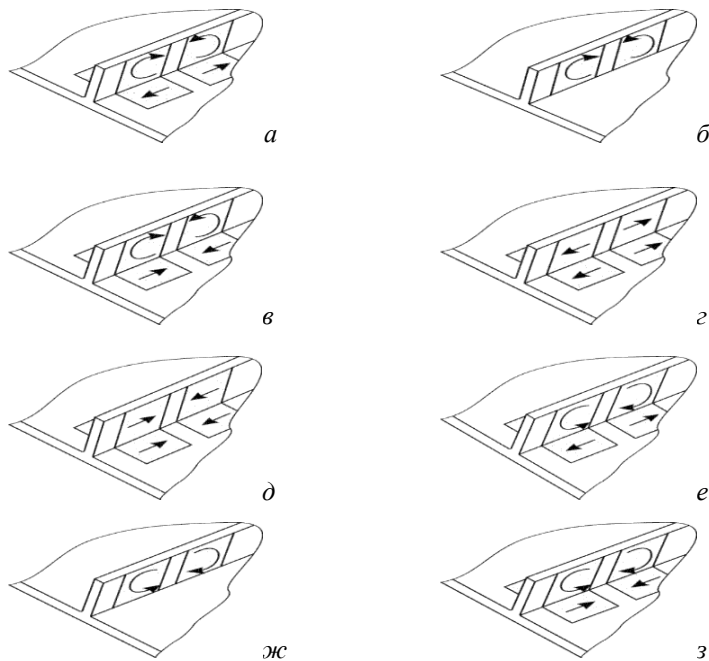


Рис. 3– Варианты приложения моментов и нормальных сил при формообразовании местным деформированием

В соответствии с приведенными схемами созданы устройства для реализации сочетаний действующих изгибающих моментов и осевых усилий. Так, деформирование панелей методом раскатки ребер осуществляется по схеме *г* (см. рис. 3), 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. рис. 3 схемы *б*, *ж*). Устройство может также использоваться при правке и доводке панели непосредственно на стенде для измерения формы панелей.

Для панелей с оребрением прямоугольного типа создано механическое устройство правки ребер панели непосредственно при комплектовании или при сборке монолитной конструкции в сборочном стапеле.

На рис.4 показано устройство, не требующее подвода энергии, т.е.

автономное устройство, которое может использоваться в условиях сборочного производства. Устройство закрепляется на ребре панели на базе 160 мм и способно выполнить корректирующие нагрузки по схемам *а, б, ж, з* (рис. 3).



Рис. 4 – Внешний вид механического устройства для правки и доводки панелей с ребрением

Разработанный и изготовленный в Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» инструмент для правки и доводки с ребрами большой жесткости панелей работает по принципу местной гибки ребер панелей с малыми упругопластическими деформациями. Внешний вид инструмента представлен на рис. 5.

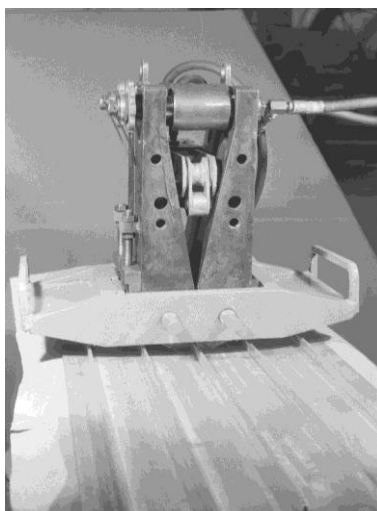


Рис 5 – Устройство для правки и доводки ребристых панелей

Принцип его работы заключается в том, что на участке ребра жестко закрепляются две консоли. Закрепление консолей осуществляется за счет сил трения с помощью гидравлического усилителя и рычажной системы, при этом насечки на губках отсутствуют. Для осуществления правки в ту или иную

сторону консоли сводятся или разводятся в плоскости ребра панели. Сведение или разведение, т.е. посадка или разводка ребра производится с помощью пневматического цилиндра. После проведения правки консоли освобождаются от ребра, а сами консоли возвращают в исходное положение.

Исследования процесса правки и доводки панелей проводились на образце панели из материала Д16Т натурального сечения. Измерение геометрии проводилось с точностью 0,01 мм до и после правки вдоль ребра панели. Панель базировалась до и после правки на измерительном столе по трем точкам. Исследование режимов деформирования проводилось с помощью инструмента, имеющего губки без насечек, обработанные с шероховатостью около 2,5–4,0. Такая шероховатость позволяет использовать губки без насечек, обеспечивает надежное сцепление с материалом ребра, позволяет исключить последующую зачистку места правки.

Инструмент обеспечивает достаточную стабильность угла пружинения, что объясняется отсутствием существенного проскальзывания губок. Некоторые отклонения угла гибки объясняются контактными явлениями на местах захвата ребра. Смятие ребер отсутствует, однако имеются на поверхности ребер следы шероховатости губок инструмента высотой около 0,01 мм. Величина пружинения при минимальных деформациях не превышает одного градуса, что намного меньше угла пружинения, который допускают оребренные панели при гибке. Инструмент показал одинаковую эффективность разводки и посадки ребер различной высоты. Высота ребра практически не влияет на процесс деформирования, что объясняется малой зоной деформирования, которая составляет величину около 15 мм.

Большое количество панелей сложных форм, в том числе панелей двойной кривизны, можно получать приложением приведенных локальных воздействий моментов и осевых усилий во многих точках, так чтобы обобщенные деформации приводили к изменению формы в требуемом направлении.

Для реализации данного процесса был создан специальный штамп, внешний вид которого приведен на рис. 6. Штамп содержит две пары верхних губок и одну пару нижних губок, укрепленных подвижно соответственно на верхних и нижних плитах.

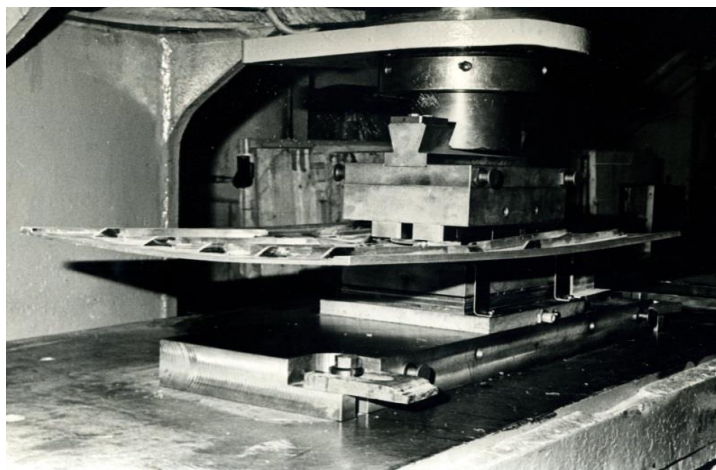


Рис. 6 – Штамп для формоизменения панелей разводкой с изгибом

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 угол до нескольких градусов. 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.

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 переналадки с одного режима на другой занимает не более нескольких минут. Совместное действие изгибающих и сжимающих (или растягивающих) напряжений уменьшает величину пружинения и положительно отражается на качестве гибки. Экспериментальная проверка различных последовательностей обработки панелей показала, что панели обладают стабильной формой, не зависящей от последовательности деформирования. Это правило выполняется при малых пластических деформациях в зоне между губками посадочного устройства, допускаемых для алюминиевых сплавов.

Используя последовательную волновую обработку 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. 7).

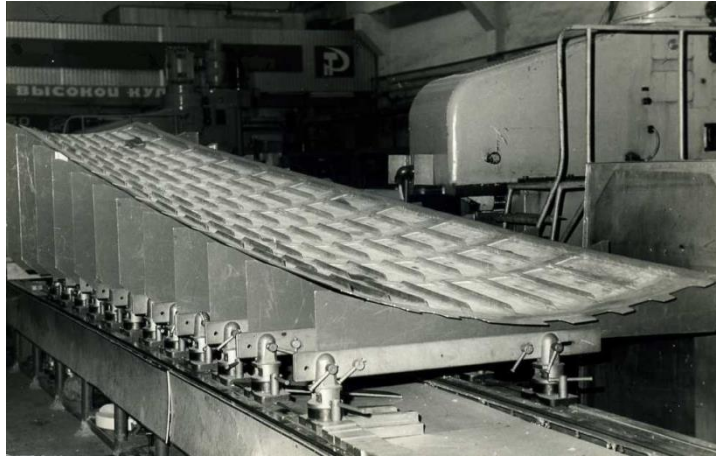


Рис. 7 – Фюзеляжная панель двойной кривизны, полученная разводкой средних зон

Панель имеет 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.

Формование панели осуществлялось разводкой средних зон в штампе в соответствии с разработанной методикой расчета числа воздействий.

Натурные подкилевые панели после фрезерной операции получили характерные геометрические отклонения лицевой поверхности от плоскостности, имели заданную продольную и поперечную кривизну. Шероховатость поверхности панели после фрезерования и зачистки шлифовальными машинками находилась в пределах R_a 2,0–2,5. Устранение местных и общих отклонений геометрических отклонений, отклонений толщины полотна перед формообразованием не требовалось и не проводилось вследствие специфики процесса.

На основании опытной отработки технологии разработаны технические требования к устройствам для зонального деформирования панелей, а также технологический процесс правки и доводки.

Выводы. Проведенные опытно-конструкторские работы по созданию механизированного инструмента для доводки и правки оребренных панелей, экспериментальные исследования технологического процесса правки и доводки

методом местного деформирования ребра показали эффективность процесса и возможность его использования одновременно с процессом контроля формы панелей на контрольном стенде.

Экспериментальные исследования получения панелей двойной кривизны из плоских оробренных заготовок из алюминиевых деформируемых сплавов, работы по отработке устройства позволили получить положительные результаты его применения в производственных условиях.

Проведенные работы подтвердили преимущества технологического процесса: малая масса и стоимость инструмента, возможность правки и доводки на контрольном стенде, высокая точность формоизменения, возможность получения панелей сложных форм, что позволяет рекомендовать разработанный технологический процесс и инструмент для внедрения в заготовительно-штамповочных цехах авиационных предприятий.

Список литературы: 1. *Белянин, П.Н.* Технология и оборудование для производства широкофюзеляжных самолетов в США [Текст]/ П.Н. Белянин. – М.: Машиностроение, 1979. – 255 с. 2. *Шелков, В.С.* Геометрический анализ монолитных панелей летательных аппаратов [Текст]/ В.С. Шелков // *Авиационная промышленность*. – 1984. – №8. – С. 7–11. 3. *Олейников, А.И.* Интегрированное проектирование процессов изготовления монолитных панелей [Текст]/ А.И. Олейников, А.И. Пекарш – М.: Эком, 2009. – 112 с. 4. *Сиккульский, В.Т.* Формообразование монолитных панелей сложных форм [Текст] / В.Т. Сиккульский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – № 5/102. – 2013. – С. 15–19. 5. Airbus заключил контракт с Китаем на производство деталей для самолётов при помощи 3D-принтеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.happy-wheel-2-full.com/>. 6. *Березюк, А.Н.* Упругая сборка конструкций – резерв повышения качества изделия [Текст]/ А.Н. Березюк, А.И. Бабушкин, Н.М. Пархоменко // *Вопросы авиационной науки и техники, серия авиационные технологии*. – Вып. 5(8). – М.: НИАТ, 1988. – С. 61–62.

Bibliography (transliterated): 1. Belianin, P.N. Tekhnologiiia i oborudovanie dlia proizvodstva shirokofuzeliashnykh samoletov v SShA [Tekst]/ P.N. Belianin. – Moscow: Mashinostroenie, 1979. – 255 p. 2. Shelkov, V.S. Geometricheskii analiz monolitnykh panelei letatel'nykh apparatov [Tekst] / V.S. Shelkov // *Aviatsionnaia promyshlennost'*. – 1984. – N8. – P. 7–11. 3. Oleinikov, A.I. Integrirovannoe proektirovanie protsessov izgotovleniia monolitnykh panelei [Tekst]/ A.I. Oleinikov, A.I. Pekarsh – Moscow: Ekom, 2009. – 112 p. 4. Sikul'skii, V.T. Formoobrazovanie monolitnykh panelei slozhnykh form [Tekst] / V.T. Sikul'skii // *Aviatsionno-kosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiiia*. – N5/102. – 2013. – P. 15–19. 5. Airbus zakliuchil kontrakt s Kitaem na proizvodstvo detalei dlia samoletov pri pomoshchi 3D-printerov [Elektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.happy-wheel-2-full.com/>. 6. Bereziuk, A.N. Uprugaia sborka konstruktssii – rezerv povysheniia kachestva izdeliia [Tekst]/ A.N. Bereziuk, A.I. Babushkin, N.M. Parkhomenko // *Voprosy aviatsionnoi nauki i tekhniki, seriia aviatsionnye tekhnologii*. – Vyp. 5(8). – Moscow: NIAT, 1988. – P. 61–62.

Поступила (received) 30.01.2015