

УДК 621.7 В.Т. Сикульский, Д.Ю. Дмитренко, В.Ю. Кашеева, С.Г. Васильченко

Исследование процесса правки и доводки формы монолитных панелей локальным деформированием ребер

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

Рассмотрен метод правки и доводки формы ребристых панелей с помощью локального деформирования ребер панели совместно с полотном. Предложен метод повышения точности формы монолитных панелей путем применения многоточечной доводки панелей при их контроле по носителям форм. Описаны возможные схемы устройств для деформирования панели без применения пресса. Предложено экспериментальное устройство и приведены результаты его апробирования на панелях из алюминиевого сплава. Описаны особенности использования метода и опытного устройства в самолетостроительном производстве.

Ключевые слова: монолитные панели, правка, разводка, посадка, прогиб, остаточный прогиб, угол пружинения.

Введение

В конструкции транспортных самолетов и судов нашли широкое применение монолитные панели, которые имеют ряд технологических и конструктивных преимуществ по сравнению со сборной конструкцией. Такие панели позволяют уменьшить массу конструкции при равной прочности, повысить ресурс изделия, уменьшить объем сборочных работ, применить местную герметизацию взамен сплошной.

Однако в случае применения монолитных панелей снижается коэффициент использования материала по сравнению со сборной конструкцией, требуется повышенная мощность станочного оборудования, повышается стоимость полуфабрикатов, удлиняется цикл производства. Серьезной технологической проблемой является формообразование монолитных панелей, особенно в связи с тенденцией увеличения габаритных размеров панелей, а также наличием отклонений размеров поперечного сечения ребер и полотна после их механической обработки. В целях обеспечения высокой точности формоизменения крупногабаритных монолитных панелей повышаются требования, предъявляемые как к качеству внешней поверхности панели, так и непосредственно к процессу контроля формы панели на всех этапах ее изготовления.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Используемые методы обладают низкой производительностью формообразования и контроля формы поверхности после формообразования [1]. В применяемых технологических методах сложным вопросом является обеспечение равномерного совместного деформирования полотна и ребер панелей [2].

Вследствие этих причин, а также нестабильности процесса деформирования панелей с малыми упругопластическими деформациями

формообразование панелей ведут последовательно методом приближений с межоперационным контролем геометрии панелей [3]. Как правило, для контроля формы используют пространственные носители форм и размеров, например, координатный стенд, оснащенный комплектом шаблонов сечений. Поэтому при изготовлении панелей и обшивок большое распространение получили технологические процессы локального деформирования [4], широко используемые на этапах предварительного (чернового) формообразования и окончательной доводки панели, что позволяет существенно повысить качество получаемой обводообразующей поверхности монолитной панели и увеличить точность ее изготовления.

Повышения производительности можно достичь путем использования устройств, позволяющих проводить местную гибку участков панелей непосредственно при контроле геометрии на координатном стенде [5].

В работе [5] рассмотрены основные схемы деформирования ребер при правке, показанные на рис. 1.

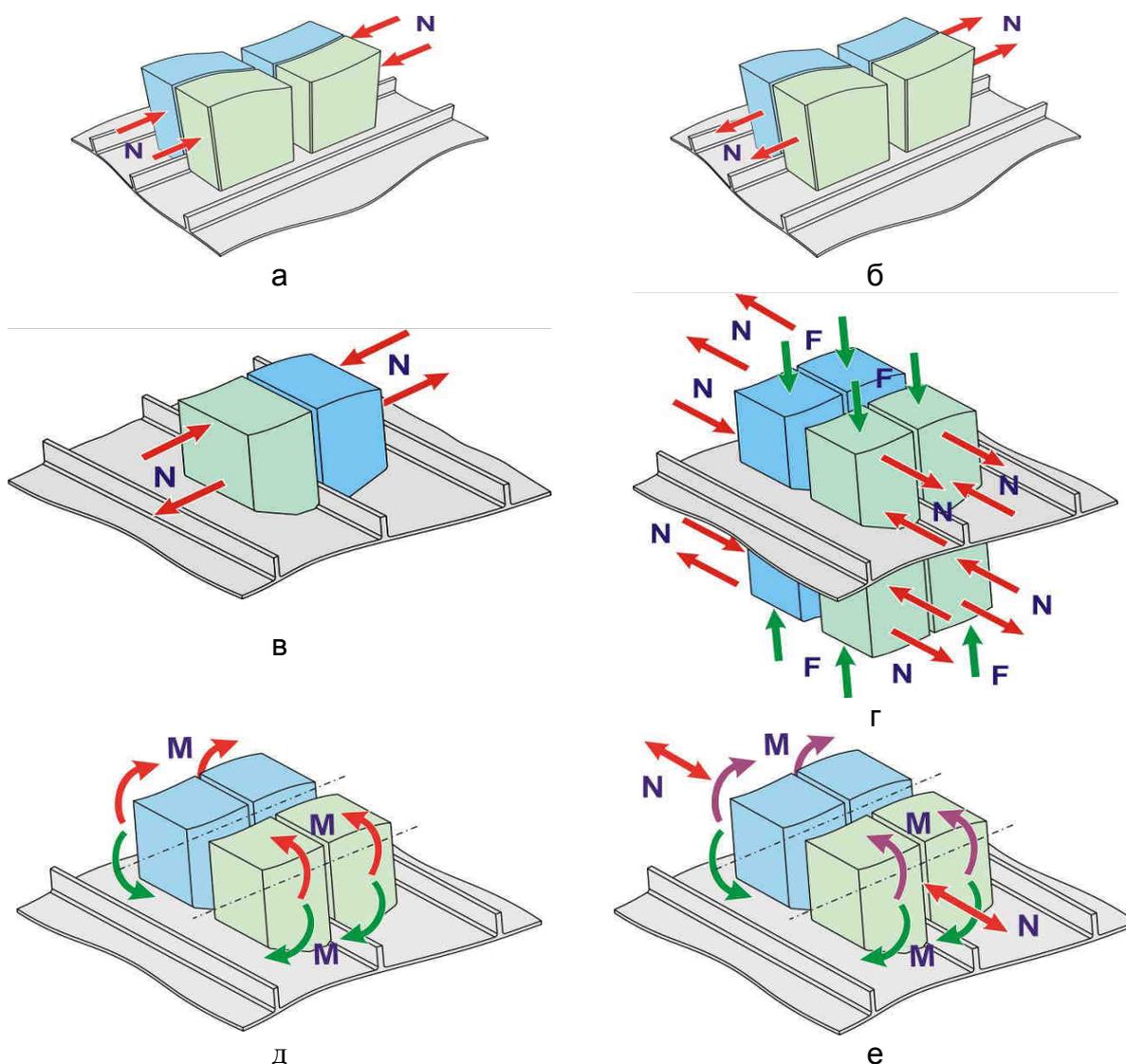


Рис. 1. Основные схемы деформирования ребер панелей при правке

При правке можно существенно уменьшить зону деформирования и угол гибки, если использовать схему, в которой (рис. 1, д) деформирование выполняется двумя моментами, приложенными к двум участкам ребра и направленными навстречу друг другу. Это позволяет существенно уменьшить зону деформирования, а следовательно, угол гибки под нагрузкой и угол пружинения.

Зона упругого деформирования полотна панели и соседних ребер незначительна, и это взаимодействие ребер и полотна не оказывает влияния на процесс в очаге деформации [5,7].

Если к моментам, образующим выпуклость панели, приложить осевые усилия сжатия, то угол пружинения еще более уменьшится вследствие увеличения высоты сечения ребра, которое подвергается пластической деформации. Аналогично этот же эффект будет проявляться, если при образовании моментами вогнутости панели к ребру приложить усилия растяжения.

Данная схема (рис. 1, е) имеет также следующие преимущества: сравнительно небольшое усилие деформирования, возможность правки в обе стороны, возможность использования губок без насечек [5].

Цель и задачи исследований

Цель работы – исследование особенностей и возможностей правки и доводки формы ребристых панелей многоточечным деформированием с применением предложенных устройств локальных воздействий.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выбор эффективной схемы локальных воздействий при формоизменении ребристых панелей и создание оборудования;
- экспериментальные исследования процесса локального формоизменения на образцах панелей с применением опытного устройства;
- апробирование процесса формоизменения и формулирование рекомендаций правки и доводки панелей с помощью опытного устройства.

Методы исследований

С учетом основных схем деформирования ребер панели, применяемых при выполнении доводочных операций [5] (рис. 1), для проведения исследований изменения формы панели в процессе ее локального деформирования разработана конструкция экспериментального устройства, позволяющего в ручном режиме реализовывать операции посадки, разводки и изгиба ребер монолитной панели (рис. 2).

Принцип его работы заключается в том, что на участке ребра жестко закрепляют две консоли. Закрепление консолей осуществляют посредством сил трения с помощью рычажной системы, при этом насечки на губках отсутствуют. Для правки в ту или иную сторону консоли сводятся или разводятся в плоскости ребра панели. Сведение или разведение, т.е. посадку или разводку ребра, выполняют с помощью винтового механизма.

После проведения правки консоли освобождают от ребра и возвращают в исходное положение.

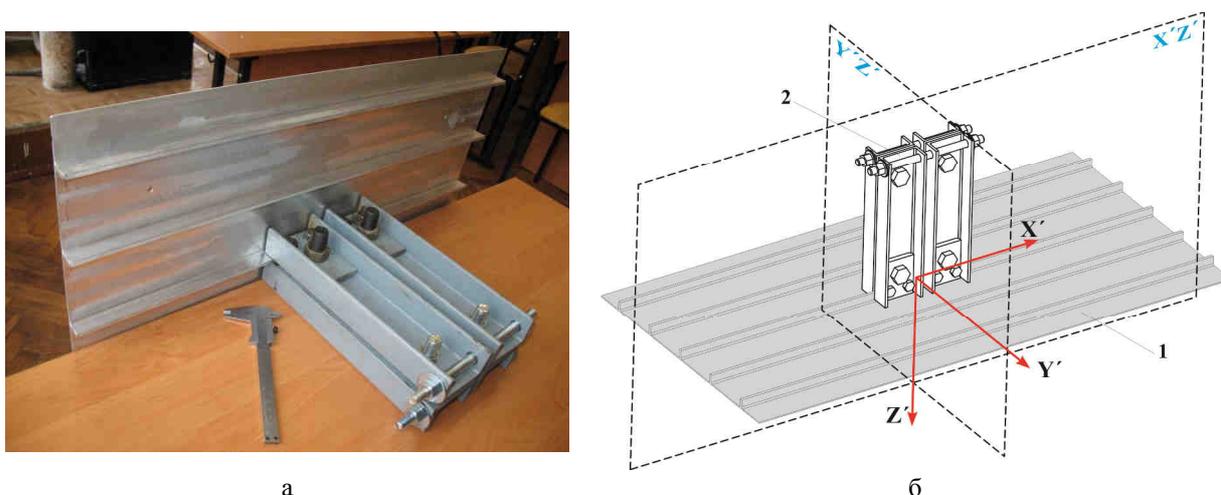


Рис. 2. Образец монолитной панели с установленным экспериментальным устройством для выполнения технологической операции правки и доводки в ручном режиме: а – внешний вид разработанного экспериментального устройства; б – схема установки устройства относительно системы координат панели

Для выполнения доводочной операции на участке ребра монолитной панели с помощью рычажной системы, используя силу трения, жестко закрепляют две консоли (рис.3).

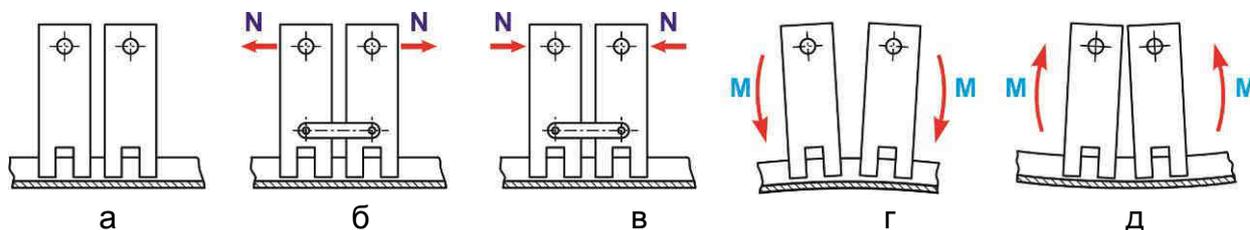


Рис. 3. Основные схемы деформирования ребер панели при выполнении операций правки и доводки с помощью экспериментального инструмента при следующих положениях консолей: а – исходное; б – в момент посадки ребра; в – в момент разводки ребра; г – при изгибе ребра в сторону отрицательной кривизны (вогнутость); д – при изгибе ребра в сторону положительной кривизны (выпуклость)

Усилие захвата участка ребра консолями экспериментального инструмента регулируется затяжкой стяжных болтовых соединений устройства. Для реализации необходимой схемы деформирования ребра панели консоли устройства сводят или разводят в плоскости ребра панели в требуемом направлении в соответствии с выбранной схемой. После выполнения технологической операции правки или доводки участка ребра панели консоли освобождают от ребра и возвращают в исходное положение. При изгибе ребра в сторону отрицательной кривизны, а также при изгибе ребра в сторону положительной кривизны тяга между правой и левой консолями удаляется (рис. 3, г, д).

В качестве объекта исследования использован образец монолитной панели с натуральным сечением ребер (рис. 4) шириной 520 мм, длиной 800 мм, толщиной полотна 2,5 мм и высотой оребрения 30 мм, выполненный из алюминиевого сплава Д16АТ.

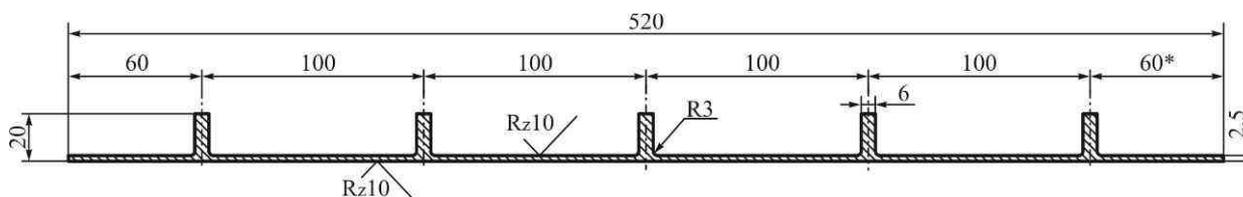


Рис. 4. Геометрические параметры сечения исследуемого образца монолитной панели

Для контроля геометрических параметров обводообразующей поверхности исследуемого образца панели в процессе ее формоизменения с помощью доводочных операций в работе использована координатно-измерительная машина портативного типа – переносная КИМ типа «рука» ROMER Absolute Arm, которая предназначена для оперативного контроля геометрических размеров деталей как в лабораторных условиях, так и в условиях цеха, в том числе без съема детали с места ее обработки [6].

Для определения положения контрольных точек, координаты которых измеряют с помощью КИМ, на обводообразующую поверхность исследуемой монолитной панели была нанесена разметочная сетка с шагом 50 мм и размерностью 15x11 узлов. Выбранный шаг контрольных точек и их количество обеспечивают оптимальную скорость сканирования поверхности и возможность построения электронной модели, математически описывающей форму измеряемой физической поверхности панели с требуемой точностью.

Результаты исследований

В соответствии с исходными геометрическими параметрами исследуемой монолитной панели, а также с учетом параметров разметочной сетки, нанесенной на измеряемую поверхность, было определено положение системы координат панели, а также разработана схема взаимного увязывания системы координат панели с глобальной системой координат в процессе обрабатывания полученных данных измерений (см. рис. 5).

На рис. 5 изображено отклонение координат точек поверхностей, полученных в процессе доводки панели путем приложения изгибающего момента к ее срединному ребру, от координат точек поверхности, восстановленной на этапе предварительного деформирования панели.

Выполнение технологической операции посадки центрального ребра панели от модели поверхности показано на рис. 5,а, доводка панели путем приложения изгибающего момента к ее срединному ребру в сторону создания его отрицательной кривизны от значений модели поверхности – на рис. 5,б. Доводка панели с помощью изгибающего момента, приложенного к срединному ребру панели в сторону создания его положительной кривизны от значений модели поверхности, восстановленной на этапе выполнения процесса доводки панели путем приложения изгибающего момента в сторону создания отрицательной кривизны ребра, изображена на рис. 5,в, выполнение операции изгиба ребра

панели путем приложения момента в сторону создания отрицательной кривизны ребра от значений модели поверхности, восстановленной на этапе ее предварительного деформирования, – на рис. 5,г. Выполнение операции изгиба ребра панели путем приложения момента в сторону создания его положительной кривизны от значений модели поверхности, восстановленной на этапе ее предварительного деформирования, – на рис. 5,д.

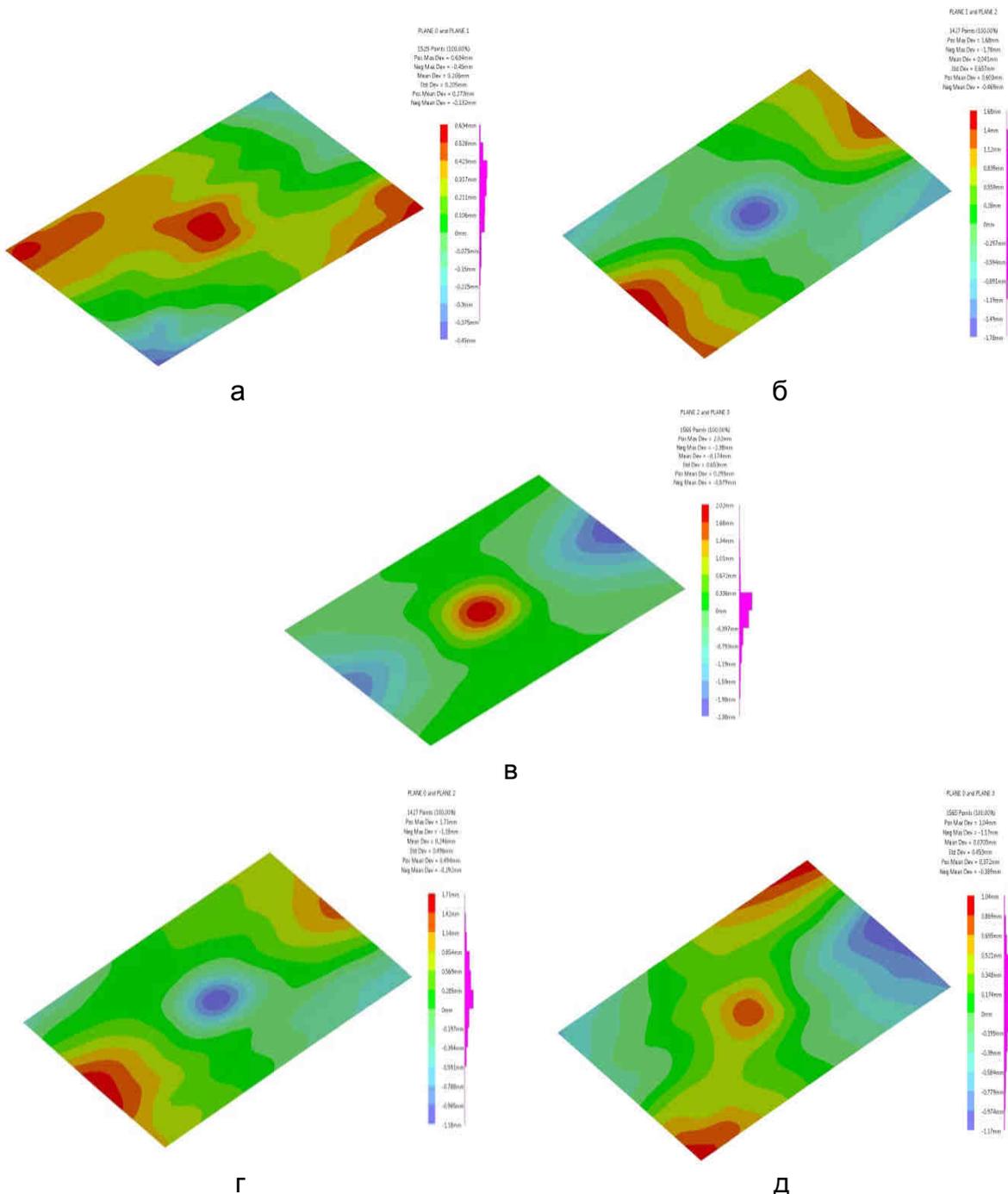


Рис. 5. Отклонение координат точек обводообразующей поверхности исследуемой монолитной панели
Изменение формы обводообразующей поверхности образца панели в результате использования рассмотренных в работе доводочных локальных

воздействий на срединную часть центрального ребра монолитной панели представлено в плоскостях $X'Y'$ и $Y'Z'$ симметрии образца панели (рис. 6). Распределение точек поверхности панели и отклонений их номинальных значений фактических координат от принятых приведены для каждого этапа деформирования.

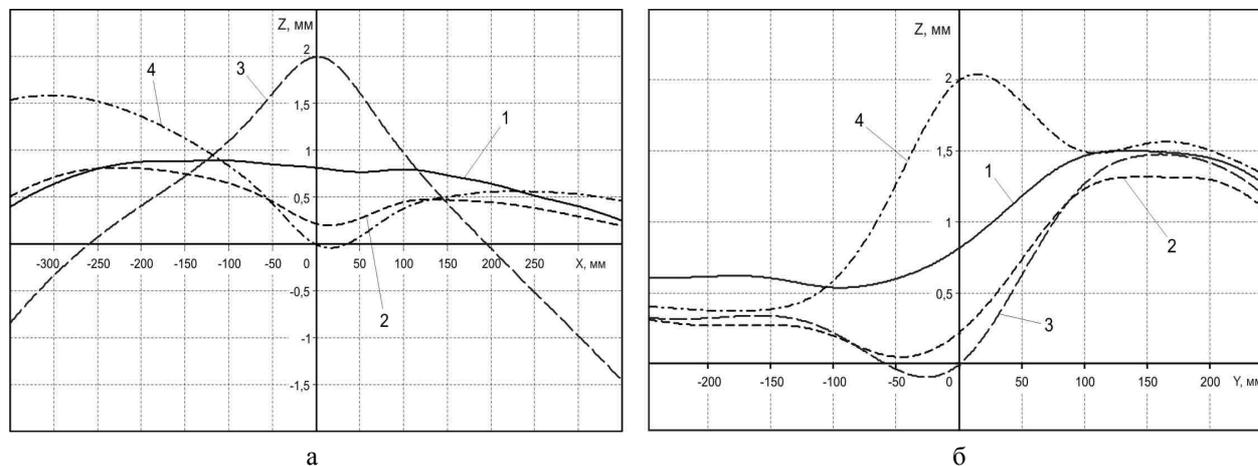


Рис. 6. Распределение точек обводообразующей поверхности монолитной панели, расположенных: а – в сечении $X'Y'$; б – в сечении $Y'Z'$

На рис. 6 кривая 1 соответствует положению точек поверхности панели в глобальной системе координат на этапе ее предварительного (чернового) деформирования. Кривая 2 соответствует положению точек поверхности панели в глобальной системе координат в результате выполнения технологической операции посадки ее центрального ребра. Кривая 3 соответствует положению точек поверхности панели в глобальной системе координат в процессе ее доводки путем приложения к срединному ребру панели изгибающего момента в сторону создания его положительной кривизны. Кривая 4 показывает положение точек поверхности панели в глобальной системе координат в процессе ее доводки путем приложения к срединному ребру панели изгибающего момента в сторону создания его отрицательной кривизны. Кривая 5 получена в процессе приложения момента в сторону создания его отрицательной кривизны от значений модели поверхности, восстановленной на этапе посадки центрального ребра панели. Кривая 6 получена в процессе доводки панели с помощью изгибающего момента, приложенного к срединному ребру панели в сторону создания его отрицательной кривизны, от значений модели поверхности, восстановленной на этапе выполнения процесса доводки панели путем приложения изгибающего момента в сторону создания положительной кривизны ребра.

На рис. 7 показаны такие же величины фактических отклонений.

Анализ данных показал, что максимальное отклонение поверхности панели, полученной при выполнении технологической операции посадки центрального ребра панели от поверхности, восстановленной на этапе ее предварительного деформирования, составило в положительном направлении оси Z выбранной системы координат контрольного стенда 0,634 мм, в отрицательном – 0,45 мм. Среднее значение отклонения точек поверхности составило 0,206 мм, стандартное отклонение изменения формы поверхности панели – 0,205 мм.

На этапе технологической операции доводки панели путем приложения изгибающего момента к ее срединному ребру в сторону создания его положительной кривизны максимальное отклонение полученной поверхности от поверхности, восстановленной на этапе предварительного деформирования панели, составило 1,68 мм в положительном направлении оси Z и 1,78 мм – в отрицательном. Среднее значение отклонение точек поверхности составило 0,041 мм. Стандартное отклонение изменения формы поверхности панели составило 0,657 мм.

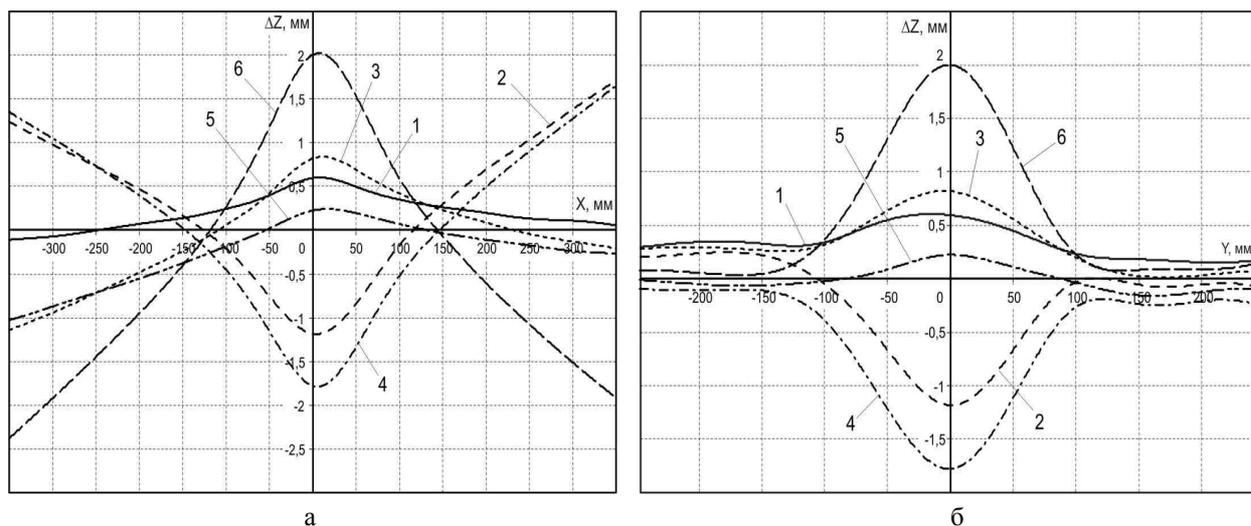


Рис. 7. Фактические отклонения обводообразующей поверхности монолитной панели на каждом этапе деформирования для точек поверхности, расположенных: а – в сечении X'Y'; б – в сечении Y'Z'

На этапе технологической операции доводки панели с помощью изгибающего момента, приложенного к срединному ребру панели в сторону создания его отрицательной кривизны, максимальное отклонение поверхности от поверхности, восстановленной на этапе предварительного деформирования панели, составило 2,02 мм в положительном направлении оси Z, и 2,38 мм – в отрицательном. Среднее значение отклонения точек поверхности составило 0,174 мм. Стандартное отклонение изменения формы поверхности панели составило 0,653 мм.

Процесс правки и доводки панелей исследовали также на образце панели из материала Д16Т натурального сечения. Измерение геометрии проводили с точностью 0,01 мм до и после правки вдоль ребра панели.

Панель базировалась до и после правки на измерительном столе по трем точкам. Измерение геометрии образцов производили до и после деформирования.

Измеряли следующие величины:

- прогиб в момент приложения нагрузки на базе 600 мм;
- остаточный прогиб на базе 600 мм;

- угол пружинения, который определялся расчетным путем по величине прогиба.

В рамках проведенной работы по исследованию процессов формообразования крупногабаритных монолитных панелей методом локального

деформирования ребер предложена конструкция экспериментального универсального устройства (рис. 8), предназначенного для выполнения технологических операций правки и доводки.

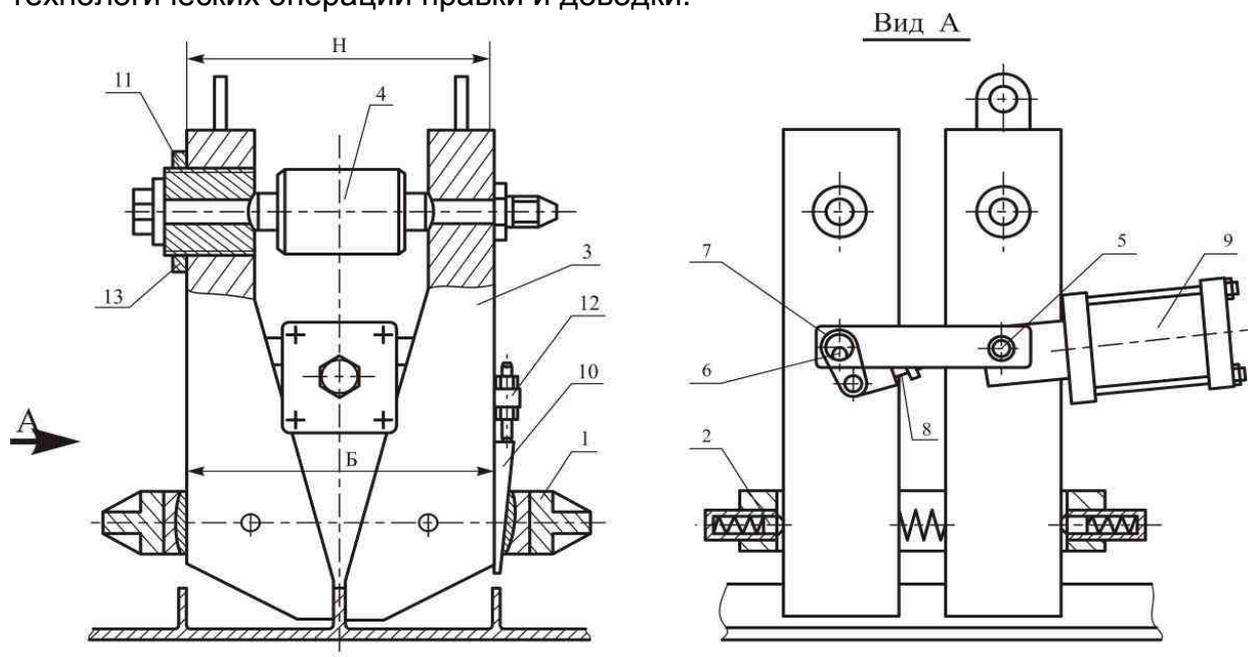


Рис. 8. Конструкция экспериментального универсального устройства, предназначенного для выполнения технологических операций правки и доводки формы монолитных панелей: 1 – рама; 2 – центры; 3 – рычаги; 4 – гидравлические цилиндры; 5, 6 – оси механического усилителя; 7 – усилитель; 8 – тяга; 9 – пневмоцилиндр; 10 – клиновые механизмы; 11 – буксы; 12, 13 – гайки фиксации регуляторов

Разработанное экспериментальное устройство позволяет выполнять доводочные операции монолитных панелей сложных форм непосредственно на координатном стенде, что существенно увеличивает производительность технологического процесса формообразования, а также повышает точность получаемой обводообразующей поверхности монолитной панели (рис.9).

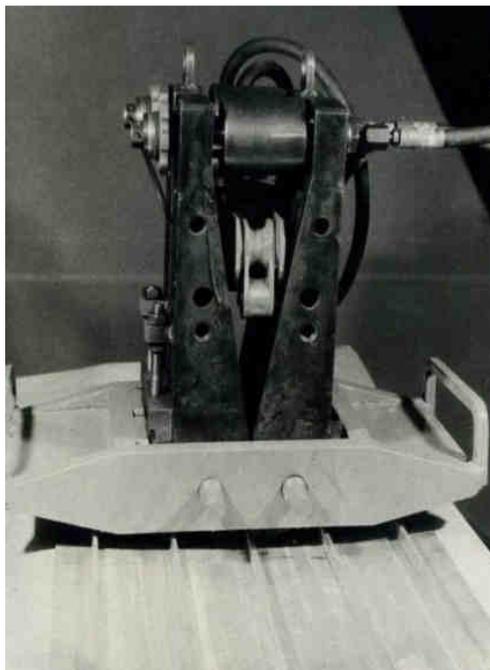


Рис. 9. Внешний вид инструмента для правки и доводки оребренных панелей

Режимы деформирования исследовали 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 около 15 мм.

График изменения остаточного прогиба образца показан на рис.10.

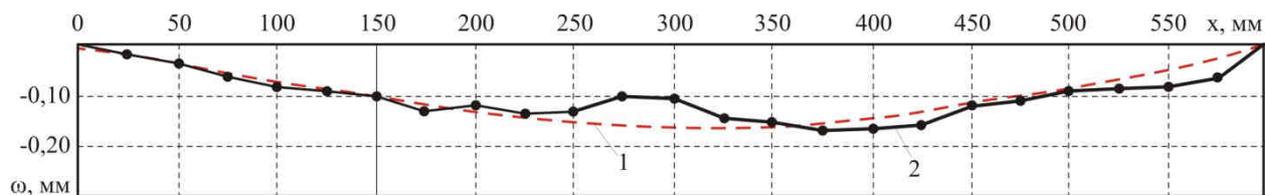


Рис. 10. График изменения остаточного прогиба, вызванного инструментом, вдоль образца

Основным фактором при гибке образцов, влияющих на остаточное изменение прогиба $\omega_{ост}$, является изменение прогиба, вызванное воздействием инструмента $\omega_{и}$. Поскольку расстояние между губками в инструменте не регулируется, угол гибки следует изменять регулировкой хода пневмоцилиндра, который предназначен для создания изгибающего момента.

Анализ результатов исследований

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.

Экспериментальное устройство для правки и доводки оребренных панелей из алюминиевых деформируемых сплавов, работы по отработке устройства позволили получить положительные результаты его применения в производственных условиях.

Разработаны технические требования к устройствам для правки и доводки панелей деформированием ребер, а также технологический процесс правки и доводки.

Проведенные работы подтвердили преимущества технологического процесса: малая масса и низкая 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.

Разработанный инструмент может быть использован при проектировании автоматизированного стенда для формоизменения и доводки формы панелей [8].

Выводы

1. Выбор схемы локальных воздействий при симметричном формоизменении монолитных ребристых панелей с жесткими ребрами показал, что наиболее эффективной схемой является местный изгиб ребра на малой базе размером 10...20 мм. Реализация такой локальной деформации возможна при жестком приложении изгибающих моментов к участкам ребра. Показана возможность локального деформирования ребер панели как разводкой (удлинением), так и посадкой (сокращением) участков ребер вдоль их осей

2. Экспериментальные исследования процесса локального формоизменения на образцах панелей с применением экспериментального устройства свидетельствуют о эффективности предложенного устройства. При воздействии экспериментального устройства прогибы полотна панели находятся в пределах упругой деформации при ограничении размеров зоны пластического деформирования. Полученные величины отклонений точек поверхности указывают на незначительную зону деформирования с максимальными значениями прогибов, что позволяет сделать вывод о том, что соседние ребра панели и полотно не оказывают значительного влияния на процессы в очаге деформации.

3. Апробирование процесса формоизменения с применением опытного устройства правки и доводки методом местного изгиба ребра свидетельствует о эффективности процесса и возможности его использования одновременно с процессом контроля формы панелей на контрольном стенде. Сформулированы рекомендации по выполнению правки и доводки панелей с помощью опытного устройства.

Список литературы

1. Yoon, J.S. Feasibility study of flexibly reconfigurable roll forming process for sheet metal and its implementation / J.S. Yoon, J. Kim, H.H. Kim, B.S. Kang // Advanced forming technology for lightweight components: from theory to application, Hindawi publishing corporation, vol. 6. – 2014. – P.45-63.

2. Пашков, А.Е. Автоматизированная технология комбинированного формообразования панелей самолетов // Тр. V Всерос. конф. «Современные наукоемкие инновационные технологии» / Самарский гос. архит.-строит. ун-т – Самара., 2013. – С. 454 – 457

3. Yue, F. Knowledge base research on the incremental press bending technology of the integral wing-skin panel [Text] / Fengli Yue, Jinsong Liu, Shihong Zhang, Yuansong. Zeng // Materials Science and Technology. – № 16(3). – 2008. – P. 306–309.

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

5. Сикульский, В.Т. Создание технологии правки и доводки формы монолитных панелей без использования пресса / В.Т. Сикульский. – Авиационно-космическая техника и технология. – № 5 (102). Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2013. – С. 12 – 16.

6. Пекарш, А.И. Координатно-измерительные машины и комплексы / Пекарш А.И., Феоктистов С.И., Колыхалов Д.Г., Шпорт В.И. – Наука и технологии в промышленности. - Вып. 3. – М., 2011. – С. 36 – 48.

7. Сикульский, В.Т. Анализ характеристик НДС в регулярной зоне однострингерной фрезерованной панели в процессе ее локального деформирования/ В.Т. Сикульский, Д.Ю. Дмитренко, В.В. Воронько. – Открытые информационные и компьютерные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». - Вып.66. – Х., 2014. – С. 123 – 138.

8. Сикульский, В.Т. Автоматизированный комплекс для правки и доводки монолитных панелей с контролем формы обводообразующей поверхности панели в процессе ее деформирования [Текст]/ В.Т. Сикульский, Д.Ю. Дмитренко, О.В. Трифонов // Открытые информационные и компьютерные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 69. – Х., 2015. – С. 84-96.

Поступила в редакцию 21.11.2017

Дослідження процесу правки і доведення форми монолітних панелей локальним деформуванням ребер

Розглянуто метод формоутворення і доведення форми ребристих панелей методом локального деформування ребер панелі спільно з полотном. Запропоновано метод підвищення точності форми монолітних панелей шляхом застосування багатоточкового доведення панелей при їх контролі за носіями форм. Запропоновано можливі схеми пристроїв для деформування панелі без застосування преса. Наведено опис експериментального пристрою і результати його апробації на панелях з алюмінієвого сплаву. Описано особливості використання методу і дослідного пристрою в літакобудівному виробництві.

Ключові слова: монолітні панелі, правка, розводка, посадка, прогин, залишковий прогин, кут пружинення.

Investigation of the Process of the Shaping and Refinement Forms of Monolithic Panels by Local Deformation of Ribs

The method of shaping and refinement of ribbed panel forms by local straining of panel ribs in joint with blade. The method of accuracy increase for integral panel forms by means of panel multipoint refinement at controlling over form carriers was proposed. The possible structure diagrams for panel deformation without press employment were proposed. The description of experimental device and results of its testing on panels of aluminum alloy was given. The peculiarities of applying the method and experienced device in aircraft manufacturing were described.

Key words: integral panels, shaping, stretching, shrinking, deflection, permanent deflection, springback angle.

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.

Дмитренко Дмитрий Юрьевич – заведующий лабораторией CAD/CAM/CAE, 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.

Васильченко Сергей Григорьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.