

ЛОКАЛЬНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПАНЕЛИ С ОРЕБРЕНИЕМ

В процессе изготовления конструкции самолетов при формообразовании панелей сложных форм с ребрением возникает необходимость местного деформирования полотна панели совместно с ребром. В зависимости от формы панели, получаемой из плоской заготовки, возможны различные схемы деформации материала панели [1]. Чаще всего для этой цели применяется местный изгиб ребра панели совместно с полотном, который выполняется, как правило, свободной гибкой [2]. В ряде случаев, например при получении панелей двойной кривизны, возникает необходимость деформирования полотна и ребра в плоскости полотна или необходимость такого деформирования совместно с изгибом [3]. Технологический процесс в этом случае представляет собой поэтапное деформирование участков срединной части панели и придание панели обобщенного поля деформации, состоящего из отдельных местных (локальных) деформаций. Эти местные деформации распределены определенным образом по панели и во времени их приложения, чтобы обобщенные деформации соответствовали постепенному приближению к требуемой форме панели. В качестве местной деформации было решено применять деформацию участка полотна и ребра панели в направлении оси ребра и совместный изгиб в плоскости ребра [4].

К процессу деформирования панелей предъявляются следующие требования. Процесс должен обеспечивать высокую равномерность деформации полотна и гладкость его поверхности, совместность деформирования полотна и ребра, исключать возможность местной потери устойчивости ребра и полотна. Необходимым условием равномерности является совместность деформирования ребра панели и прилегающего участка полотна в момент нагружения.

В Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» разработаны 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...20мм.

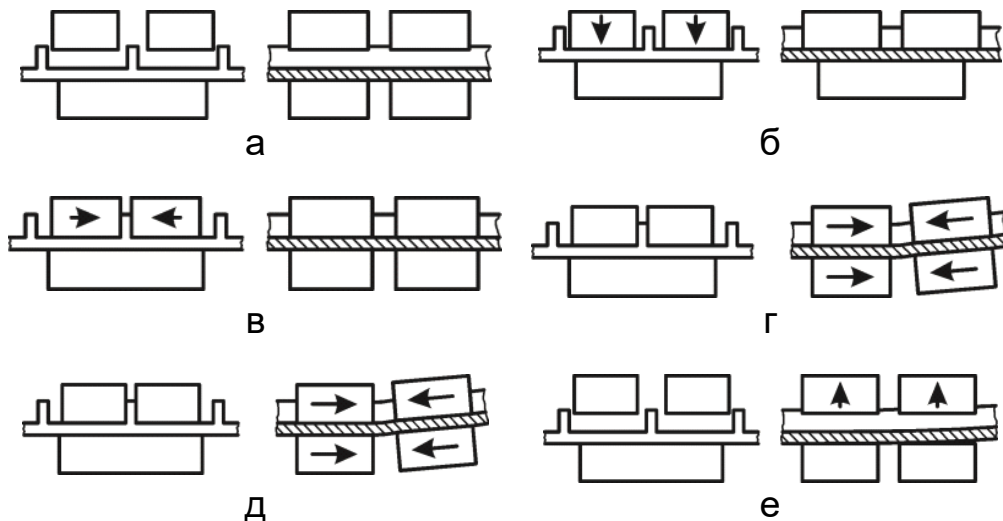


Рисунок 1 – Схема работы губок устройства в процессе деформирования панели

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.1).

В исходном положении (рис. 1, 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 вначале полотно (рис. 1, б), а при дальнейшем нажатии пресса – ребро панели (рис. 1, 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. 1, г). Конструкцией устройства предусмотрено осуществление режимов посадки и разводки, при необходимости может быть выполнена только гибка участка панели.

Подробно конструкция устройства для посадки и разводки панели описана в работах [5,6].

В целях достижения совместности деформирования панели проведен анализ характеристик локального НДС участка панели при ее формообразовании с помощью технологической операции разводки с изгибом с обеспечением необходимого уровня остаточных деформаций в материале панели в результате одного элементарного технологического воздействия.

Для статических задач общая система уравнений равновесия в матричной форме для всей конечно-элементной модели (КЭМ) исследуемого деформируемого тела имеет вид

$$[K]\{U\} = \{F\} + \{F\}^q + \{F\}^g + \{F\}^{\varepsilon_0} + \{F\}^{\sigma_0}, \quad (1)$$

где $\{U\}$ – вектор узловых перемещений для всей модели;

$[K]$ – ”глобальная” матрица жесткости;

$\{F\}$ – общий вектор заданных внешних узловых сил;

$\{F\}^q$, $\{F\}^g$, $\{F\}^{\varepsilon_0}$, $\{F\}^{\sigma_0}$ – общие (”глобальные”) векторы узловых сил, эквивалентных распределенным поверхностным и массовым силам, начальным деформациям, напряжениям.

Расчетная схема для анализа характеристик локального НДС панели при ее формообразовании с помощью технологической операции разводки с изгибом приведена на рис. 2.

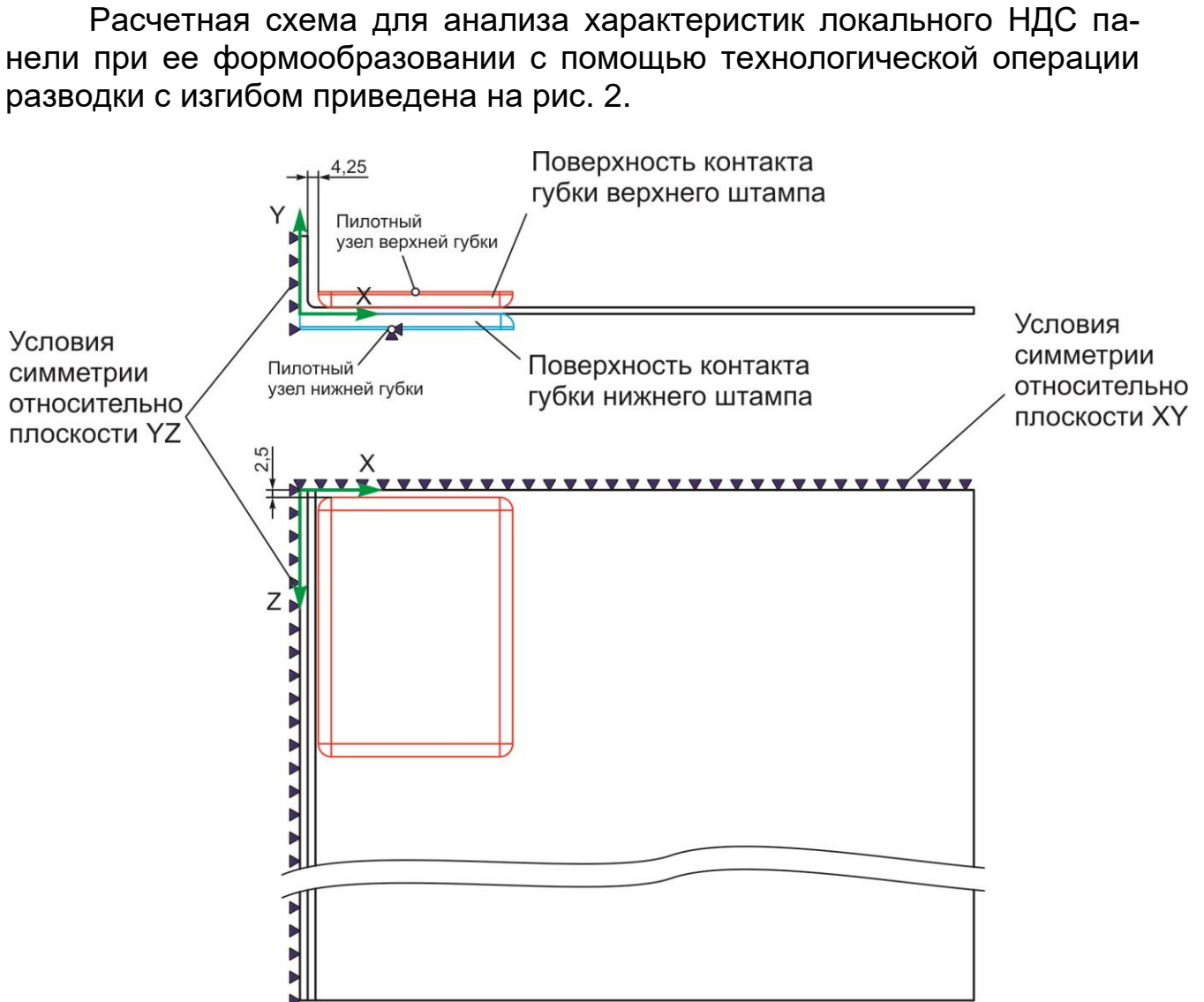


Рисунок 2 – Расчетная схема для анализа характеристик локального НДС панели при выполнении технологической операции разводки

Для создания конечно-элементной модели панели использовались 8-узловые трехмерные конечные элементы деформируемого твердого тела SOLID185, представленные в библиотеке системы ANSYS.

Контактное взаимодействие в задаче моделировалось с помощью контактных элементов TARGET170 и CONTA173. В качестве основного алгоритма контактного взаимодействия использован расширенный метод Лагранжа (AugmentedLagrangeMethod). Задача локального деформи-

вания монолитной панели с помощью операции разводки решалась с учетом трения между контактирующими поверхностями, а также с учетом начального внедрения и геометрического смещения контактных элементов системы “штамп – панель”. Связь между поверхностной силой трения и силой нормальной реакции описывалась согласно закону Амонтона – Кулона. При решении задачи для пары материалов сталь – алюминий использован коэффициент сухого трения скольжения $\nu = 0,65$.

Процесс формообразования панели с использованием операций локального деформирования связан с возникновением нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ в материале панели. Для описания поведения материала панели во время ее деформирования выбрана упругопластическая модель материала с кинематическим упрочнением, учитывающая эффект Баушингера. Для определения точек, описывающих диаграмму растяжения материала, согласно рекомендациям МОС использованы следующие зависимости:

$$\varepsilon_{\text{плц}} = \frac{\sigma_{\text{плц}}}{E}; \quad \varepsilon_{02} = \frac{\sigma_{02}}{E} + 0,002; \quad \varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E} + \delta, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{плц}}$ – предел пропорциональности при растяжении, МПа;

σ_{02} – условный предел текучести при растяжении, МПа;

δ – относительное удлинение, %;

E – модуль упругости.

При описании алюминиевого сплава Д16АТ использованы следующие значения механических параметров материала: $E = 6950 \text{ МПа}$; $\sigma_{\text{плц}} = 260 \text{ МПа}$; $\sigma_{02} = 320 \text{ МПа}$; $\sigma_b = 435 \text{ МПа}$ и коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, соответствующие полуфабрикату толщиной от 2 до 10,5 мм.

В связи с тем, что в процессе операции формообразования перемещения губок штампа вызывают значительные изменения геометрии панели, задача локального деформирования панели решена с учетом геометрической нелинейности.

Для решения системы нелинейных алгебраических уравнений использован полный итерационный метод Ньютона – Рафсона с несимметричными матрицами элементов. Характер распределения эквивалентных пластических деформаций и эквивалентных напряжений Мизеса при продольных перемещениях губок штампов на расстояние $\Delta u_z = 0,143 \text{ мм}$ показан на рис. 3 и 4 соответственно.

Результаты, полученные методом МКЭ, экспериментально проверялись 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.

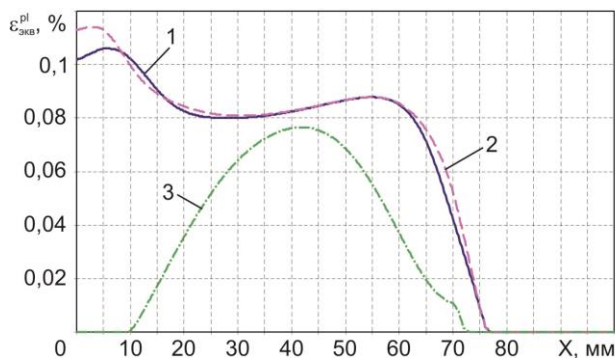


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных пластических деформаций в поперечных сечениях нейтральной плоскости панели после процесса отвода штампа:

1 $-z = 0$ мм; 2 $-z = 4$ мм;
3 $-z = 52,5$ мм

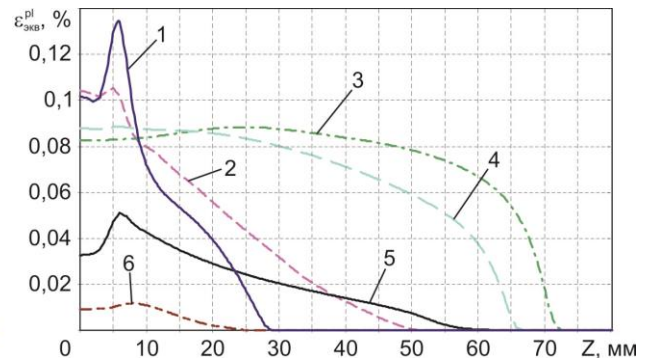


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных пластических деформаций в продольных сечениях нейтральной плоскости панели после процесса отвода штампа:

1 $-x = 0$ мм; 2 $-x = 8,75$ мм;
3 $-x = 40,125$ мм; 4 $-x = 55$ мм;
5 $-x = 71,5$ мм; 6 $-x = 75$ 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. 5 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 показывают хорошую равномерность деформации полотна панели по ширине губок по сравнению с результатами расчетов, полученными методом МКЭ. Это отличие, очевидно, объясняется более жесткими допущениями о контактных взаимодействиях губок штампа и материала панели. Ребро панели и полотно деформируются совместно без существенных отличий. За пределами площади полотна, охватываемой губками, деформации затухают плавно и незначительно распространяются на соседние ребра.

При посадке деформации локализируются 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.

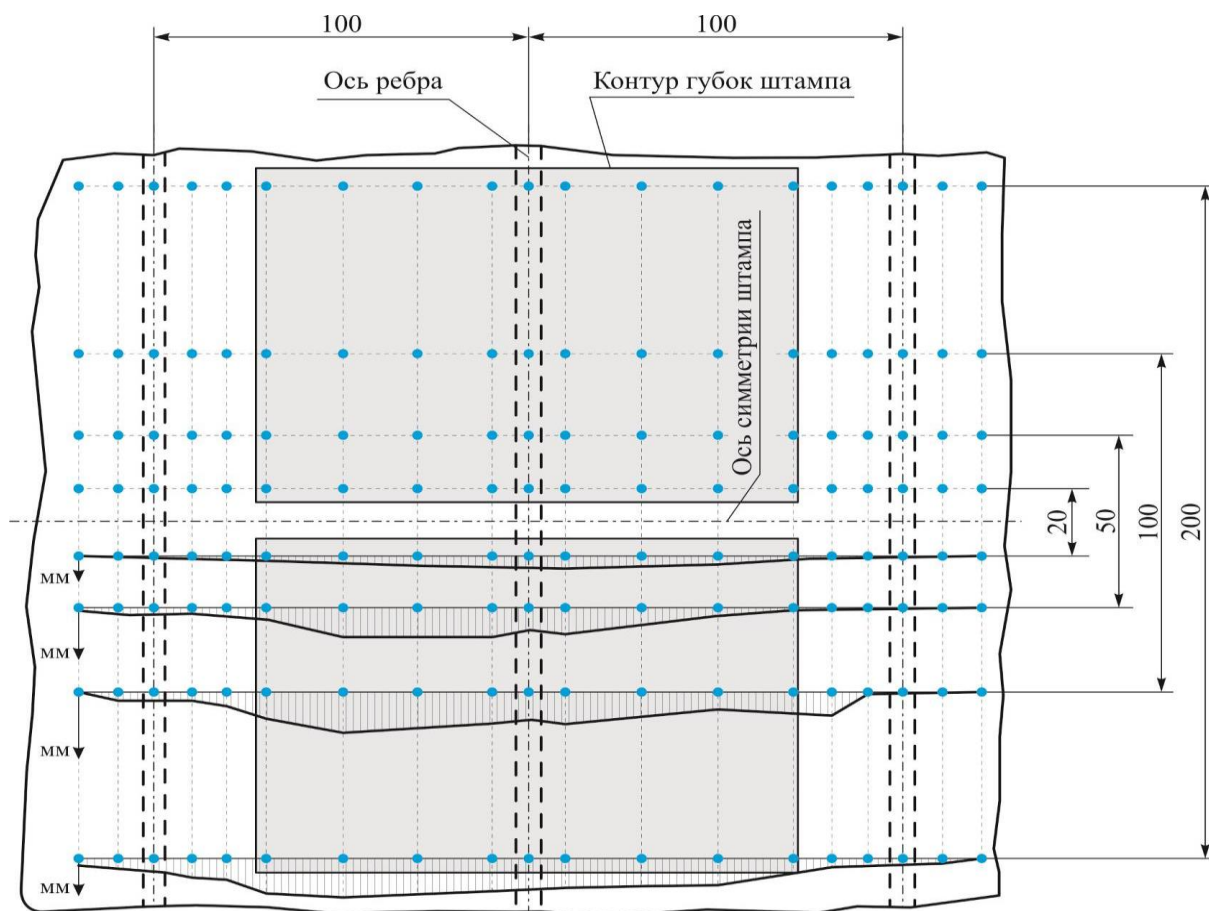


Рисунок 5 – Схема расположения базовых отверстий и эпюра деформаций

Проведенные исследования позволили установить приемлемые соотношения губок устройства для достижения необходимой равномерности процесса деформирования. На основании теоретических и экспериментальных данных установлено, что длина губок каждой половины устройства должна быть в пределах $0,8 \dots 1,0$ от расстояния между ребрами, а ширина в поперечном направлении к ребру – $0,4 \dots 0,5$ от расстояния между ребрами. Данное соотношение обеспечивает также достаточные условия для передачи усилий от губок к материалу панели за счет сил трения без использования насечек на губках.

Выводы

Проведенные исследования распределения деформаций в материале панели показали удовлетворительную их равномерность в полотне панели и ребре, что позволяют рекомендовать данный процесс для формообразования панелей сложных форм, например двойной кривизны. Описанное устройство обеспечивает совместные изгиб ребра и деформацию при разводке полотна, что позволяет достигать более рав-

номерной деформации по высоте ребра и получать необходимую остаточную деформацию участка панели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Веричев, С.Н. Forming of monolithic stiffened double-curvature Panels of Aircraft Structures /С.Н. Веричев, 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. Yue, F. Knowledge base research on the incremental press bending technology of the integral wing-skin panel/ FengliYue, Jinsong Liu, Shihong Zhang, Yuansong. Zeng // Materials Science and Technology/ – № 16(3). – 2008. – P. 306–309.

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. Сикульский, В.Т. Методика расчета осесимметричного формоизменения монолитных ребристых панелей двойной кривизны с жесткими ребрами последовательным деформированием / В.Т Сикульский, В.Ю. Кашеева, С.В. Сикульский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии :сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 74. – Х., 2016. – С. 78-87.

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

6. Сикульский, В.Т. Формообразование панелей с продольным оребрением 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.

Поступила в редакцию 07.12.2017.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Сухов,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»
им. И. Сикорского, г. Киев.*