

## **Анализ характеристик НДС в регулярной зоне однострингерной фрезерованной панели в процессе ее локального деформирования**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Проведен анализ характеристик локального напряженно-деформированного состояния в регулярной зоне однострингерной фрезерованной панели при ее формообразовании с помощью технологической операции разводки в специально разработанном штампе с обеспечением необходимого уровня остаточных деформаций в материале панели в результате одного элементарного технологического воздействия.

**Ключевые слова:** формообразование, операция разводки панели, метод конечных элементов, остаточные деформации, перемещения, контактное давление, напряжения.

### **Введение**

Стремление уменьшить число соединяемых деталей и повысить герметичность крыльев, заполняемых топливом, за счет уменьшения числа швов, а также стремление получить гладкое крыло достаточной прочности и жесткости при меньшей массе привели к разработке и внедрению монолитных панелей – конструкций, где обшивка и подкрепляющие ее ребра жесткости образуют единое целое. Крылья с монолитными панелями, имеющими, как правило, большую толщину обшивки, обладают повышенной жесткостью на кручение, обеспечивают гладкую поверхность крыла и возможность получения панели переменного сечения (в соответствии с действующими нагрузками). Это позволяет получать равнопрочную и потому более выгодную в весовом отношении конструкцию перед сборно-клепаной [7].

Чтобы выиграть в массе крыла, улучшить качество его внешней поверхности путем уменьшения числа крепежных деталей и сократить объем сборочно-клепальных работ, необходимо изготавливать панели как можно длиннее (меньше нагруженных поперечных швов, требующих больших затрат массы). Однако изготовление таких габаритных панелей трудоемко, требует сложного дорогостоящего оборудования, связано с большими отходами материала (особенно для фрезерованных панелей) и с большей опасностью (чем в сборно-клепанных конструкциях) распространения усталостных трещин (затруднена задача их локализации) [5, 7].

На сегодняшний день наиболее перспективными методами изготовления длинномерных (более 20 м) монолитных панелей являются технологические процессы прессования (меньше отходов при минимальном припуске на заготовке, меньше трудозатраты на механическую обработку и т.д.) [5, 10].

Применение длинномерных (около 28 м) панелей в крыле самолета Ан-124 позволило уменьшить массу планера на 4100 кг прежде всего за счет сокращения числа поперечных швов. Однако изготовление таких панелей требует разработки специальных технологических процессов и специального оборудования для их формообразования [7].

### **Постановка задачи исследования**

Качество геометрических и физико-механических характеристик панели определяется в первую очередь напряженно-деформированным состоянием

(НДС), которое реализуется в результате технологической операции формообразования монолитной панели требуемой формы, а также зависит от технологических методов и оснастки, применяемых при ее изготовлении.

В работах [10, 13, 14, 15] приведены основные технологические методы, применяемые для формообразования монолитных панелей, и описаны соответствующие проблемы, связанные с получением панелей требуемой формы и с необходимыми конструктивно-прочностными параметрами. Используемые на сегодняшнее время технологические методы обладают низкой производительностью процесса формообразования и контроля формы поверхности панели после процесса формоизменения, не гарантируют достаточную точность формообразования вследствие существенных отклонений геометрических размеров панели после ее механической обработки, а также не обеспечивают равномерное совместное деформирование полотна и ребер панелей и т.д. Анализ технологических погрешностей показал, что наибольшее значение имеет погрешность формоизменения. При этом главной возможностью увеличения точности получаемых деталей сложной формы является широкое использование современных доводочных и правильных процессов, среди которых наибольшими преимуществами обладают процессы локального (местного) деформирования.

На основании проведенного анализа существующих методов формообразования монолитных панелей, а также с учетом современных тенденций к увеличению габаритных размеров панелей и повышению требований к точности формообразования панели вне зависимости от отклонений размеров поперечного сечения ребер и полотна в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" на кафедре технологии самолетостроения разработан технологический метод формоизменения и правки сложных по форме профилей панелей с оребрением с помощью операций локального деформирования, обеспечивающий высокую точность формообразования панели, эффективность использования в промышленности при малой стоимости оборудования и инструмента, а также не требующий рабочих с высокой квалификацией [13 – 15].

В рамках предложенного метода, для формообразования панелей двойной кривизны разработана конструкция штампа, позволяющая деформировать полотно панели совместно с изгибом ребра в его плоскости (рис. 1).

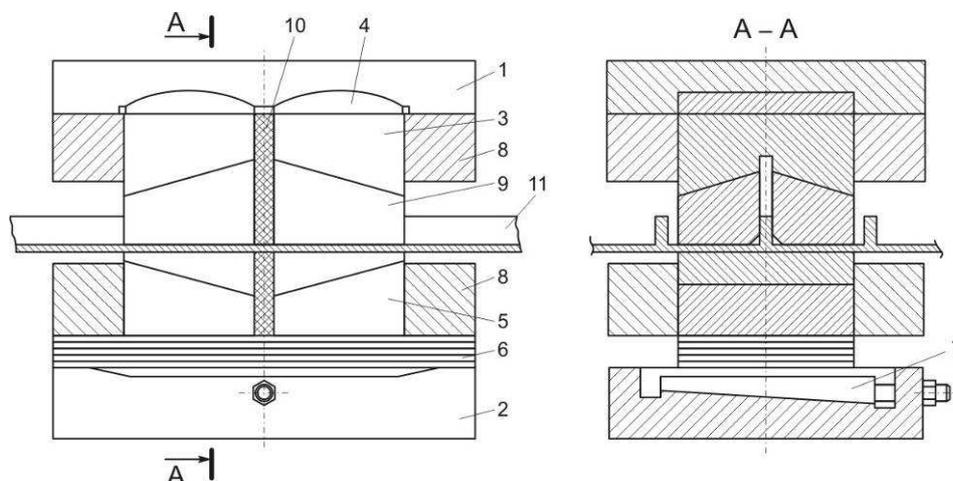


Рис. 1. Схема штампа для формообразования панелей двойной кривизны с помощью операций локального деформирования

Конструкция штампа (см. рис. 1) состоит из верхней (1) и нижней (2) плит, верхней обоймы (3), сегментных вставок (4), нижней обоймы (5), рессоры (6), регулятора прогиба (7), двух силовых рамок (8), верхних и нижних губок штампа (9), амортизатора (10). Локальное деформирование панели (11) осуществляется путем передачи усилия от прессы на верхние обоймы, зажимные губки и на упругий элемент, который деформируясь на величину установленного регулятором прогиба, создает кривизну на участке панели. Трехмерная модель штампа, используемого для формообразования панелей с помощью операций разводки или посадки, созданная в CAD системе CATIA V5, показана на рис. 2.

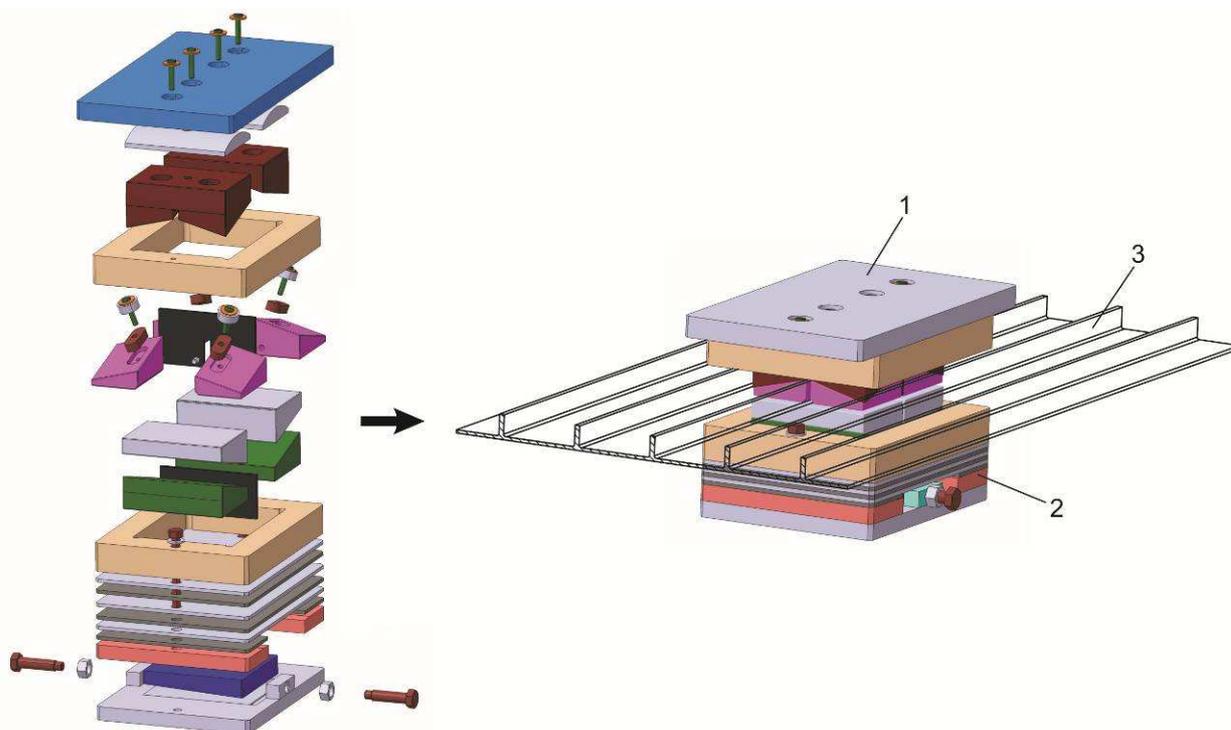


Рис. 2. Трехмерная модель штампа используемого для формообразования панелей с помощью операций локального деформирования

Крыльевые панели из алюминиевых сплавов для современных конструкций среднемагистральных самолетов имеют большие габаритные размеры, двойную знакопеременную кривизну, нерегулярную внутреннюю гравюру, разновысотность и разнотолщинность участков (рёбер) жесткости [10]. Эти конструктивные особенности значительно затрудняют применение теории деформирования тонкостенных оболочечных конструкций при описании деформирования заготовок панелей и требуют решения задач о пространственном напряженно-деформированном состоянии. В то же время решение задач формообразования монолитных панелей связано с нелинейным поведением исследуемой системы “штамп – панель” в процессе технологической операции локального деформирования. Данная задача включает в себя все три типа нелинейностей, встречающихся в строительной механике: физическую, геометрическую и конструктивную. Поэтому в современном авиастроении для изготовления новых деталей сложно-конструктивной формы с высокими требованиями к размерной точности и эксплуатационному ресурсу используется высокоточное численное моделирование, позволяющее обеспечить требуемое качество получаемых изделий [10].

Целью данной работы является разработка метода анализа характеристик локального НДС монолитной панели крыла самолета при ее формообразовании с помощью технологической операции разводки в специально разработанном штампе с обеспечением необходимого уровня остаточных деформаций в материале панели в результате одного элементарного технологического воздействия.

### **Метод решения**

При выполнении инженерных расчетов, связанных с анализом напряженно-деформированного состояния конструкций на практике приходится сталкиваться с проблемой расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. Точное решение таких задач в аналитическом виде возможно лишь в очень немногих случаях, а также требует высокого уровня математической подготовки инженера [4, 9]. Кроме того, как правило, аналитические расчеты позволяют получить решение задач для тел, имеющих достаточно простую геометрическую форму и схему нагружения. Поэтому при комплексном подходе к решению современных инженерных задач особое значение приобрели приближенные, но достаточно точные численные методы их решения.

В последние десятилетия эти методы получили особо активное развитие в связи с применением в инженерной практике современных вычислительных средств.

Одним из самых распространенных численных методов решения прикладных задач является метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет проводить расчет конструкции любых геометрических форм с любыми способами нагружения, с учетом изменяющейся во времени нагрузки, а также при различных видах нелинейного поведения исследуемой системы [6, 8, 11, 12].

Метод конечных элементов, как и многие другие численные методы, основан на представлении реальной континуальной конструкции ее дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами (КЭ), и замене дифференциальных уравнений, описывающих поведение рассматриваемых объектов, системой алгебраических уравнений. Исследуемая геометрическая область разбивается на КЭ таким образом, чтобы на каждом из них неизвестная функция могла быть аппроксимирована полиномом. Эти функции должны удовлетворять граничным условиям непрерывности, совпадающим с граничными условиями, налагаемыми самой задачей [8, 9, 12]. Конечные элементы различают по размерности, форме, числу узлов, числу и типу неизвестных в узлах, а также по виду аппроксимирующих функций. Аппроксимирующие функции чаще всего выбираются в виде линейных, квадратичных или кубических полиномов. Аппроксимация, как правило, дает приближенное, а не точное описание действительного распределения искомых величин в элементе, поэтому результаты расчета конструкции в общем случае также являются приближенными. Способ разбивки рассматриваемой области на конечные элементы, их размер, количество и число степеней свободы, а также вид аппроксимирующих функций в конечном итоге определяют точность расчета исследуемой конструкции.

В настоящее время разработано достаточно много программных CAD/CAE-пакетов реализующих метод конечных элементов. Среди них, в первую очередь, можно назвать такие, как ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, COSMOS.

К числу лидеров в области конечно-элементного анализа всевозможных задач из различных областей физики относится программный комплекс ANSYS [4]. Для решения задач механики деформированного твердого тела (МДТТ) в CAD\CAE-пакете ANSYS реализуется МКЭ в варианте метода перемещений [4, 16]. Для получения основных разрешающих соотношений метода конечных элементов, используемых в системе ANSYS для решения задач МДТТ, применяются вариационные принципы механики.

Учитывая, что скорость деформирования участков панели в процессе технологической операции разводки меньше 0,3 м/с, задачу анализа локального НДС при формообразовании панели можно рассматривать как квазистатическую.

Для статических задач общая система уравнений равновесия в матричной форме для всей конечно-элементной модели (КЭМ) исследуемого деформируемого тела имеет вид [4, 8, 9, 12, 16]

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

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.

Основными неизвестными при статическом анализе, выполненном МКЭ, являются перемещения узлов элементов модели, возникающие в результате статического нагружения исследуемого объекта. После решения системы уравнений (1) относительно неизвестного вектора узловых перемещений напряжения и деформации, возникающие в исследуемой модели, определяются как производные от полученных перемещений конструкции.

Для уменьшения размерности решаемой задачи в качестве объекта исследования в работе рассмотрено локальное деформирование монолитной панели длиной 1 м с одним центрально расположенным ребром, изготовленной из алюминиевого сплава Д16АТ. Поперечное сечение исследуемой панели показано на рис. 3.

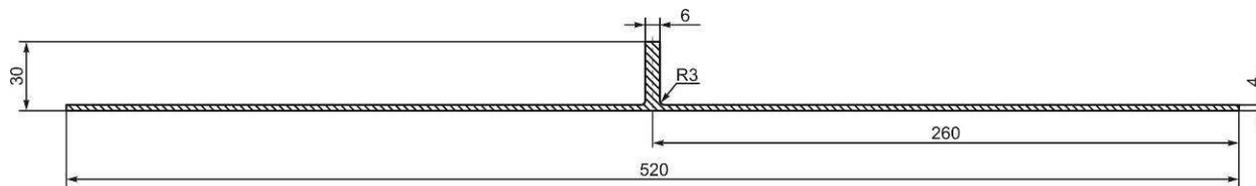


Рис. 3. Поперечное сечение исследуемой монолитной панели

Для анализа характеристик локального НДС панели при ее формообразовании с помощью технологической операции разводки в результате одного элементарного технологического воздействия на базе трехмерной параметрической модели системы “штамп – панель” (см. рис. 2) разработана расчетная схема решаемой задачи (рис. 4). Учитывая геометрическую и силовую симметрию системы “штамп – панель”, в работе рассмотрена 1/4 часть

исследуемой модели. Влияние отброшенных частей компенсировано заданием соответствующих граничных условий симметрии.

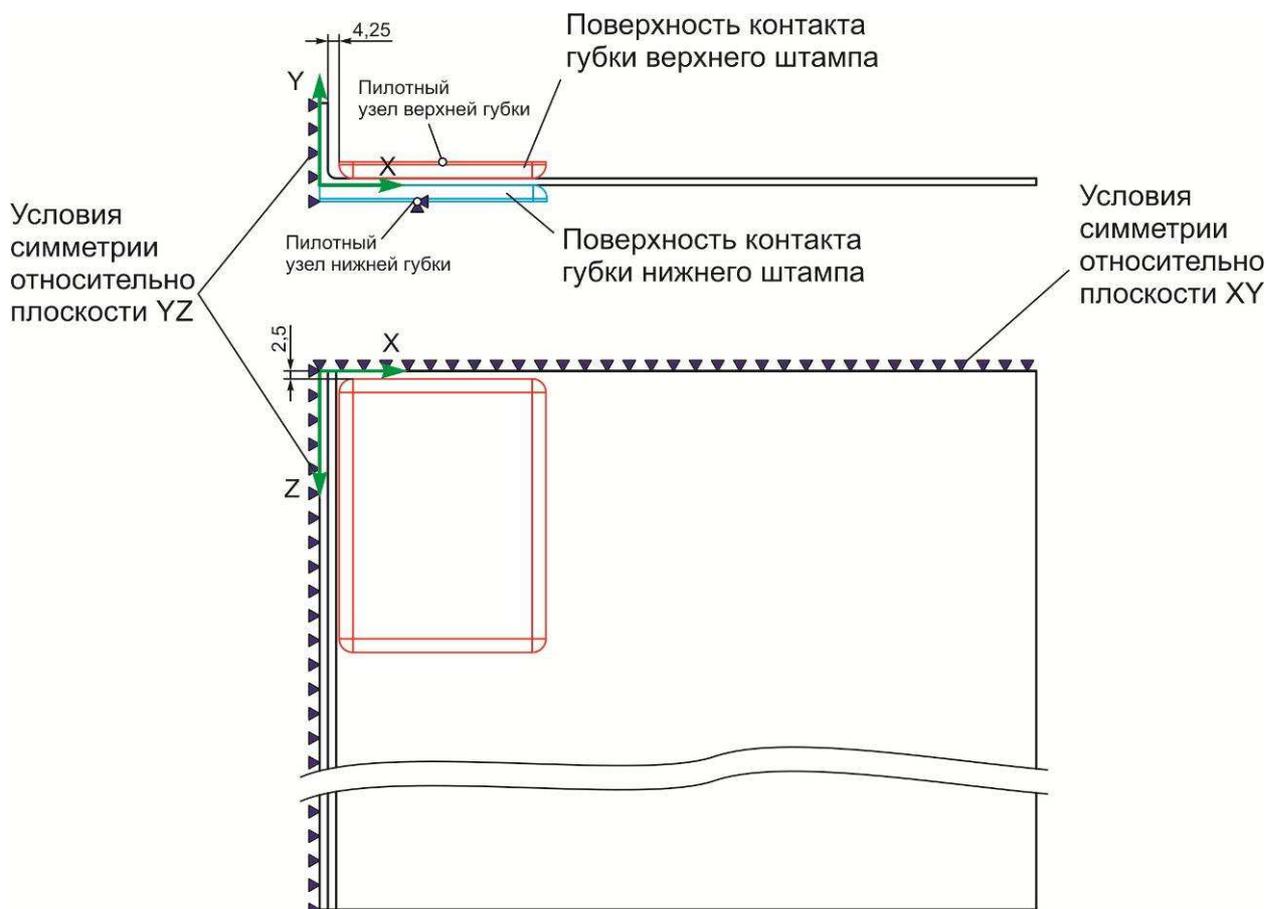


Рис. 4. Расчетная схема для анализа характеристик локального НДС панели при ее формообразовании с помощью технологической операции разводки

Верхняя и нижняя губки штампа моделировались в виде абсолютно жестких контактных поверхностей (рис. 5).

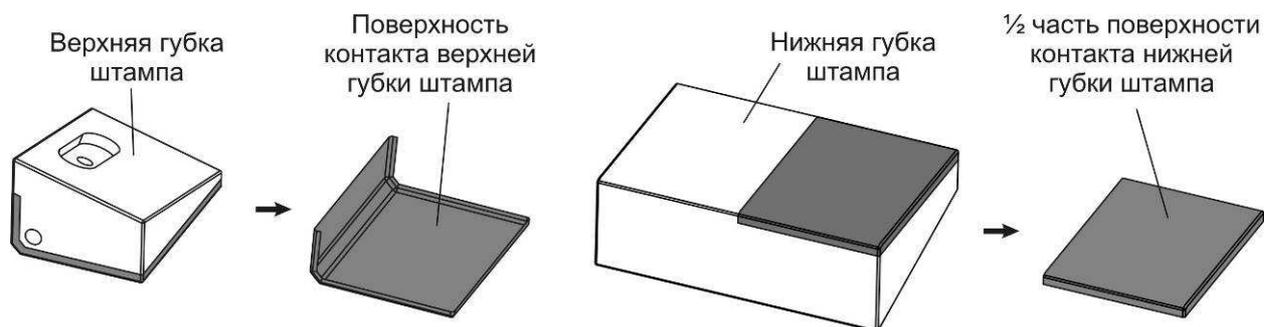


Рис. 5. Поверхности, моделирующие верхнюю и нижнюю губки штампа

Для создания конечно-элементной модели панели (рис. 6) использовались 8-узловые трехмерные конечные элементы деформируемого твердого тела SOLID185, представленные в библиотеке системы ANSYS [3, 16].

Контактное взаимодействие в задаче моделировалось с помощью контактных элементов TARGE170 и CONTA173 (рис. 6 и 11) [3, 16]. В качестве

основного алгоритма контактного взаимодействия использован расширенный метод Лагранжа (Augmented Lagrange Method). Задача локального деформирования 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, возникающей при относительном скольжении губок, с силой нормальной реакции, действующей на панель со стороны деформирующей поверхности, описывалась согласно закону Амонтона – Кулона. При решении задачи для пары материалов сталь – алюминий использован коэффициент сухого трения скольжения  $\nu = 0,65$  [2].

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 [16]. Для определения точек, описывающих диаграмму растяжения материала, согласно рекомендациям МОС использованы следующие зависимости:

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

где

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

$\sigma_{02}$  – условный предел текучести при растяжении, МПа;

$\delta$  – относительное удлинение, %;

$E$  – модуль упругости.

Функция  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ , проходящая через точки  $(0;0)$ ,  $(\varepsilon_{\text{пл}}; \sigma_{\text{пл}})$ ,  $(\varepsilon_{02}; \sigma_{02})$  и  $(\varepsilon_b; \sigma_b)$ , на различных участках диаграммы описывается следующими зависимостями:

$$\varepsilon = \begin{cases} \sigma/E, & \text{при } 0 < \sigma < \sigma_{\text{пл}} \\ \sigma/E + 0,002 \cdot \left( \frac{\sigma - \sigma_{\text{пл}}}{\sigma_{02} - \sigma_{\text{пл}}} \right)^\alpha, & \text{при } \sigma_{\text{пл}} < \sigma < \sigma_b \\ \alpha = \text{Ln}(\delta/0,002) / \text{Ln} \left( \frac{\sigma - \sigma_{\text{пл}}}{\sigma_{02} - \sigma_{\text{пл}}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

Согласно [1] для описания алюминиевого сплава Д16АТ использованы следующие значения механических параметров материала:  $E = 6950$  МПа;  $\sigma_{\text{пл}} = 260$  МПа;  $\sigma_{02} = 320$  МПа;  $\sigma_b = 435$  МПа и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , соответствующие полуфабрикату толщиной от 2 до 10,5 мм.

В результате того, что в процессе операции формообразования перемещения губок штампа вызывают значительные изменения геометрии панели (нелинейная зависимость между деформациями и узловыми перемещениями исследуемого объекта), задача локального деформирования панели решена с учетом геометрической нелинейности.

Таким образом, при решении задачи формообразования панели путем локального деформирования с учетом физической и геометрической нелинейностей, а также наличия контактного взаимодействия штампа и панели общая система разрешающих уравнений (1) для рассматриваемой конечно-элементной модели становится нелинейной. Для решения системы нелинейных алгебраических уравнений использован полный итерационный метод Ньютона – Рафсона с несимметричными матрицами элементов.

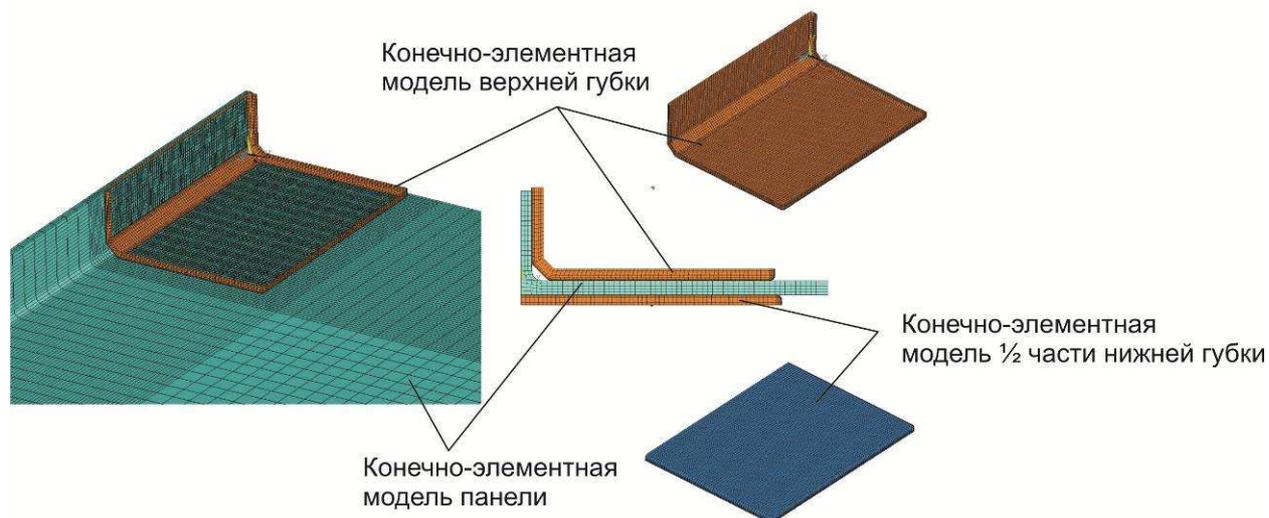


Рис. 6. Конечно-элементная модель панели и контактных поверхностей верхней и нижней губок штампа для анализа локального НДС монолитной панели при ее формообразовании с помощью технологической операции разводки в результате одного элементарного технологического воздействия

Из-за сложного кинематического взаимодействия губок штампа с обоймой и деформируемой панелью очень трудно описать перемещение инструмента в пространстве в результате осуществления операции локального деформирования. Поэтому в работе предложено перемещения губок штампа, а также выполнение одного элементарного технологического воздействия операции формообразования путем разводки разделить на три этапа:

1. Этап захвата губками штампа локально деформируемой зоны исследуемой панели.

2. Этап выполнения операции разводки панели.

3. Этап разгрузки – отвод губок штампа от рассматриваемой панели.

Для моделирования этапа захвата губками штампа зоны локального деформирования исследуемой панели решена задача по определению потребной величины вертикальных перемещений  $\Delta u_y$  контактной поверхности верхней губки штампа, обеспечивающих необходимый для выполнения процесса захвата уровень контактных давлений на поверхности панели. При решении задачи контактная поверхность верхней губки штампа моделировалась с учетом зоны контакта губки не только с полотном панели, но и с поверхностью ребра (см. рис. 6). Принято допущение, что верхняя губка штампа взаимодействует с поверхностью ребра только лишь за счет сил трения.

Графики зависимости величин максимальных эквивалентных пластических деформаций  $\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{\text{pl}}$  и эквивалентных напряжений Мизеса  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  от величины вертикальных перемещений контактной поверхности верхней губки штампа  $\Delta u_y$  показаны на рис. 7 и 8 соответственно.

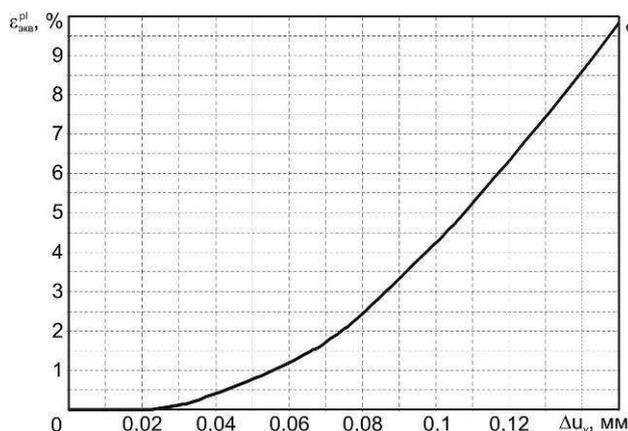


Рис. 7. График зависимости максимальных эквивалентных пластических деформаций  $\varepsilon_{\text{ЭКВ}}^{\text{pl}}$  от величины вертикальных перемещений контактной поверхности верхней губки штампа  $\Delta u_y$

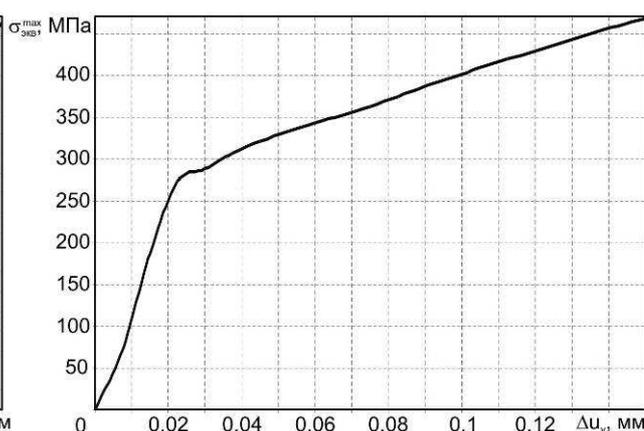


Рис. 8. График зависимости максимальных эквивалентных напряжений Мизеса  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$  от величины вертикальных перемещений контактной поверхности верхней губки штампа  $\Delta u_y$

Зависимость величины максимальных контактных давлений  $\sigma_{\text{cont}}^{\text{max}}$  от величины вертикальных перемещений контактной поверхности верхней губки штампа  $\Delta u_y$  показана на рис. 9. На рис. 10 приведена зависимость усилий  $F_{\text{cont}}$ , возникающих на контактной поверхности панели, от значений вертикальных перемещений контактной поверхности верхней губки штампа  $\Delta u_y$ .

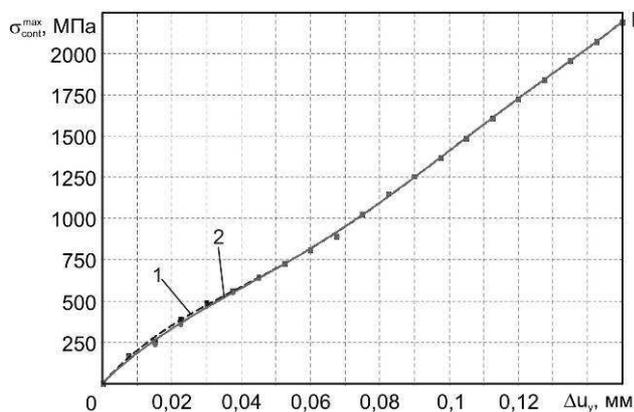


Рис. 9. График зависимости максимальных контактных давлений  $\sigma_{\text{cont}}^{\text{max}}$  от величины вертикальных перемещений контактной поверхности верхней губки штампа  $\Delta u_y$ :

- 1 – значения на поверхности панели, контактирующей с верхней губкой штампа;
- 2 – значения на поверхности панели, контактирующей с нижней губкой штампа

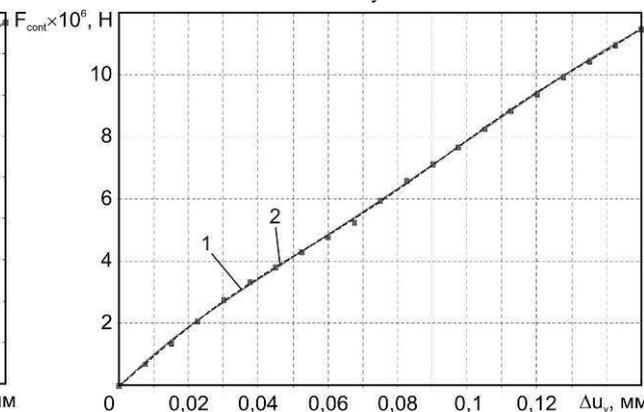


Рис. 10. График зависимости усилий  $F_{\text{cont}}$ , возникающих на контактной поверхности панели от величины вертикальных перемещений контактной поверхности верхней губки штампа  $\Delta u_y$ :

- 1 – значения на поверхности панели, контактирующей с верхней губкой штампа;
- 2 – значения на поверхности панели, контактирующей с нижней губкой штампа

Согласно экспериментальным данным, приведенным в работах [13 – 15], процесс формообразования монолитной панели выполнялся на прессе с рабочими усилиями от 200 до 250 т. Для верхней губки штампа с габаритными размерами 70x100 мм с учетом реальной площади контакта и количества верхних губок в конструкции штампа определена величина контактных давлений соответствующая усилию 250 т. Величина требуемых контактных давлений составила  $\sigma_{\text{cont}}^{\text{lim}} = 96 \text{ МПа}$ .

В результате решения задачи моделирующей этап захвата губками штампа локально деформируемой зоны исследуемой панели определена необходимая величина вертикальных перемещений контактной поверхности верхних губок штампа, в результате которой на поверхности панели возникают необходимые контактные давления, соответствующие усилию захвата. Данные вертикальные перемещения составили  $\Delta u_y^{\text{потр}} = 0,007 \text{ мм}$ .

Анализ полученных результатов показал, что усилия, возникающие на поверхности ребра на этапе захвата панели, незначительны по сравнению с силами, возникающими на поверхности полотна панели. Поэтому на этапе моделирования процесса разводки панели модель контактной поверхности верхней губки штампа была упрощена (рис. 11).

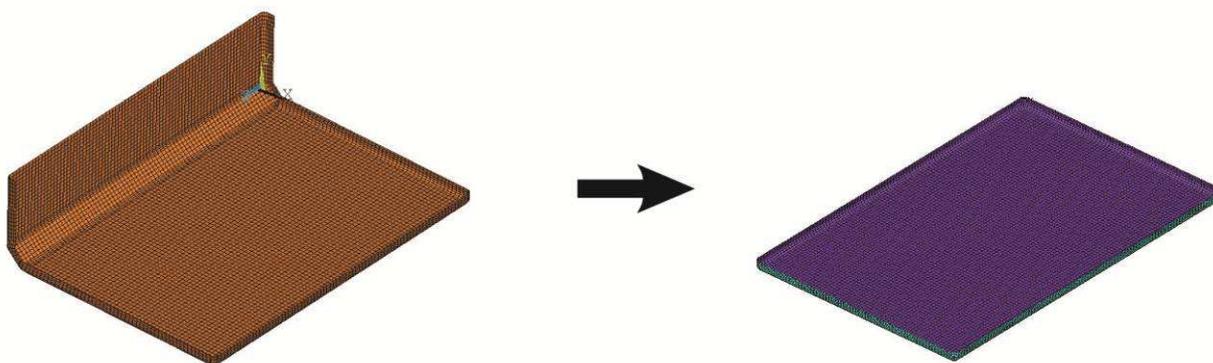


Рис. 11. Конечно-элементная модель контактной поверхности верхней губки штампа на этапе моделирования процесса разводки панели

Величина продольных перемещений верхней и нижней губок штампа в процессе операции разводки определена как среднее значение перемещений точек исследуемой зоны панели от действия инструмента, полученных в результате эксперимента [13 – 15]. На этапе моделирования операции разводки панели элементы контактных поверхностей верхней и нижней губок перемещаются вдоль ребра панели на расстояние  $\Delta u_z = 0,5 \text{ мм}$ .

Для обеспечения на третьем этапе формоизменения панели полной потери контакта между штампом и панелью, контактные поверхности верхней и нижней губок отводятся от поверхностей панели в нормальном направлении на расстояние 1 мм.

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. 12 и 13 соответственно. На рис. 12 хорошо видно расположение очага пластического деформирования в растягиваемой зоне панели в результате выполнения технологической операции разводки.

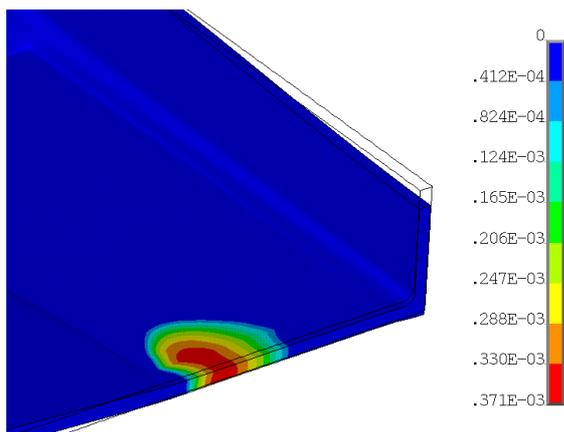


Рис. 12. Характер распределения эквивалентных пластических деформаций в панели при продольных перемещениях губок штампа на расстояние  $\Delta u_z = 0,143$  мм

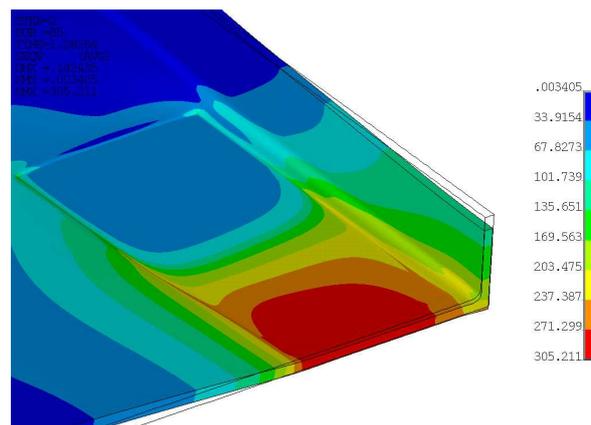


Рис. 13. Характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса в панели при продольных перемещениях губок штампа на расстояние  $\Delta u_z = 0,143$  мм

График зависимости величины эквивалентных пластических деформаций  $\epsilon_{\text{ЭКВ}}^{\text{pl}}$  и эквивалентных напряжений Мизеса  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , возникающих в точке начала развития пластических деформаций в панели (см. рис. 12), от величины продольных перемещений  $\Delta u_z$  контактных поверхностей верхней и нижней губок штампа, показаны на рис. 14 и 15 соответственно.

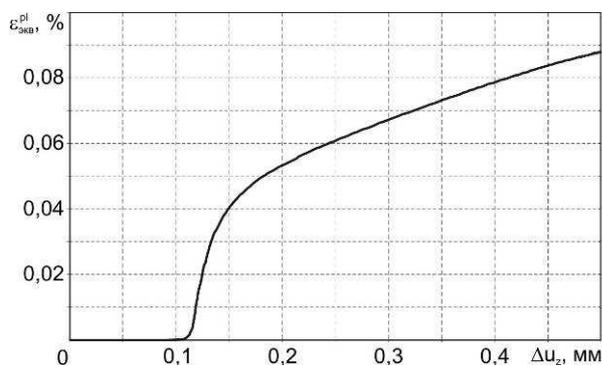


Рис. 14. График зависимости эквивалентных пластических деформаций  $\epsilon_{\text{ЭКВ}}^{\text{pl}}$ , возникающих в точке начала развития пластических деформаций, от величины продольных перемещений контактных поверхностей верхней и нижней губок штампа  $\Delta u_z$

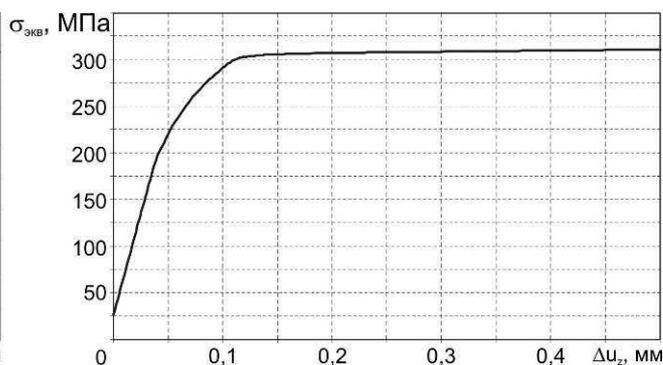


Рис. 15. График зависимости эквивалентных напряжений Мизеса  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , возникающих в точке начала развития пластических деформаций, от величины продольных перемещений контактных поверхностей верхней и нижней губок штампа  $\Delta u_z$

Для анализа локального НДС системы "штамп – панель" на этапе отвода губок штампа от поверхностей панели (этап разгрузки) разработана схема расположения характерных сечений нейтральной плоскости панели (рис. 16), вдоль которых построены распределения эквивалентных пластических деформаций (рис. 17и 18) и вертикальных перемещений точек панели (прогибов) (рис. 19 и 20). Распределения эквивалентных пластических деформаций на рис. 17 и 18 представлены только в том диапазоне геометрических размеров сечений панели, в которых их значения отличны от нуля.

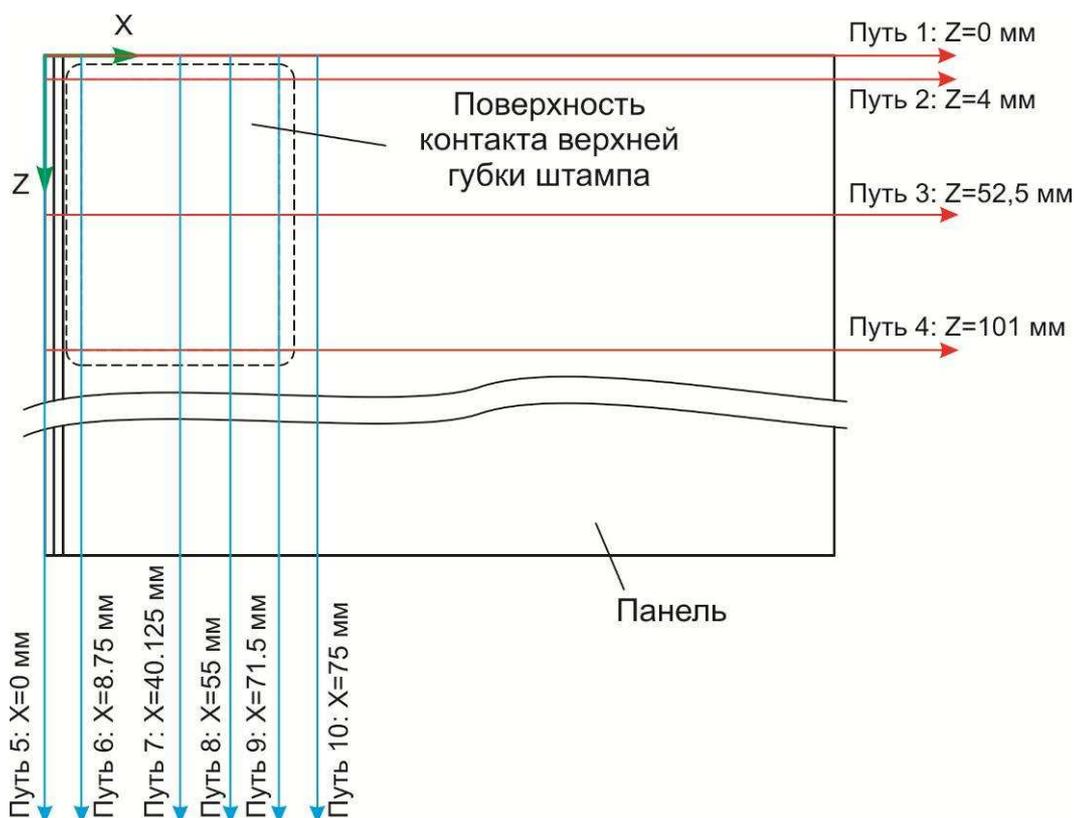


Рис. 16. Схема путей в нейтральной плоскости панели для построения распределения параметров локального НДС в зависимости от расположения продольных и поперечных сечений

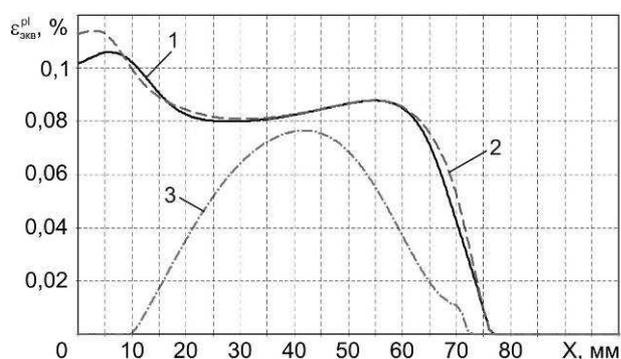


Рис. 17. Распределение эквивалентных пластических деформаций в поперечных сечениях нейтральной плоскости панели после процесса отвода штампа:

- 1 – сечение  $z=0$  мм;
- 2 – сечение  $z=4$  мм;
- 3 – сечение  $z=52.5$  мм

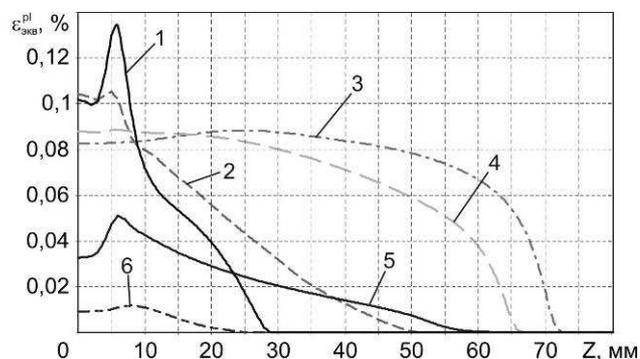


Рис. 18. Распределение эквивалентных пластических деформаций в продольных сечениях нейтральной плоскости панели после процесса отвода штампа:

- 1 – сечение  $x=0$  мм;
- 2 – сечение  $x=8.75$  мм;
- 3 – сечение  $x=40.125$  мм;
- 4 – сечение  $x=55$  мм;
- 5 – сечение  $x=71.5$  мм;
- 6 – сечение  $x=75$  мм

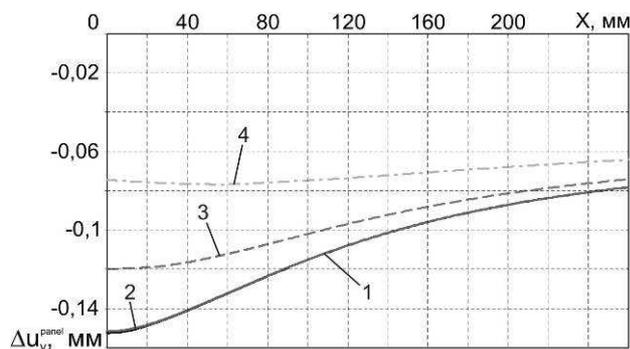


Рис. 19. Распределение величины вертикальных перемещений точек панели в поперечных сечениях нейтральной плоскости панели после процесса отвода штампа:

- 1 – сечение  $z=0$  мм;
- 2 – сечение  $z=4$  мм;
- 3 – сечение  $z=52.5$  мм

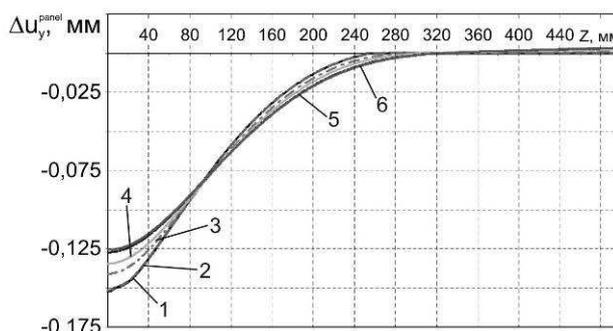


Рис. 20. Распределение величины вертикальных перемещений точек панели в продольных сечениях нейтральной плоскости панели после процесса отвода штампа:

- 1 – сечение  $x=0$  мм;
- 2 – сечение  $x=8.75$  мм;
- 3 – сечение  $x=40.125$  мм;
- 4 – сечение  $x=55$  мм;
- 5 – сечение  $x=71.5$  мм;
- 6 – сечение  $x=75$  мм

Характер распределения эквивалентных пластических деформаций и величины вертикальных перемещений точек панели после выполнения операции отвода губок штампа показан на рис. 21 и 22 соответственно.

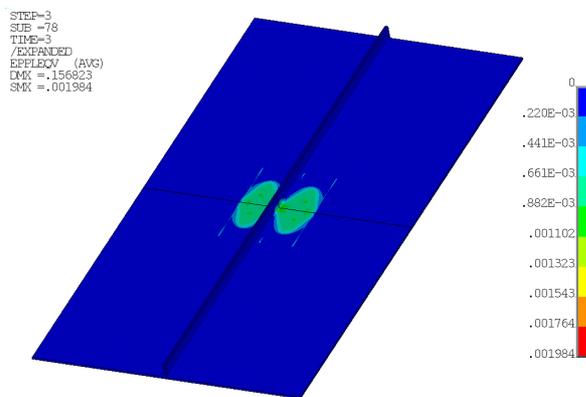


Рис. 21 Характер распределения эквивалентных пластических деформаций в исследуемой панели после отвода губок штампа

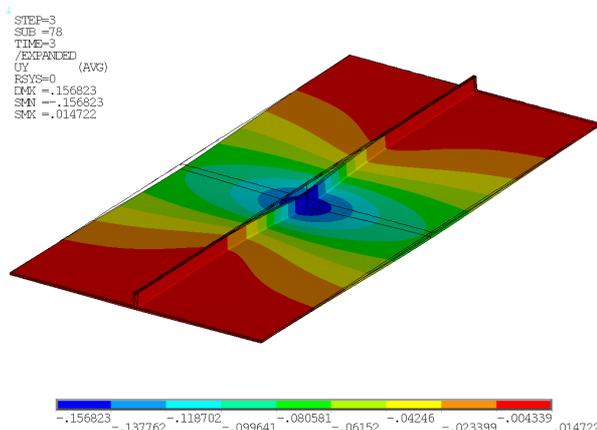


Рис. 22 Характер распределения вертикальных перемещений точек панели в исследуемой панели после отвода губок штампа (масштаб отображения перемещений 100:1)

Характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса в деформируемой панели на этапе выполнения операции разводки (а) и этапе отвода губок штампа (б) показан на рис. 23.

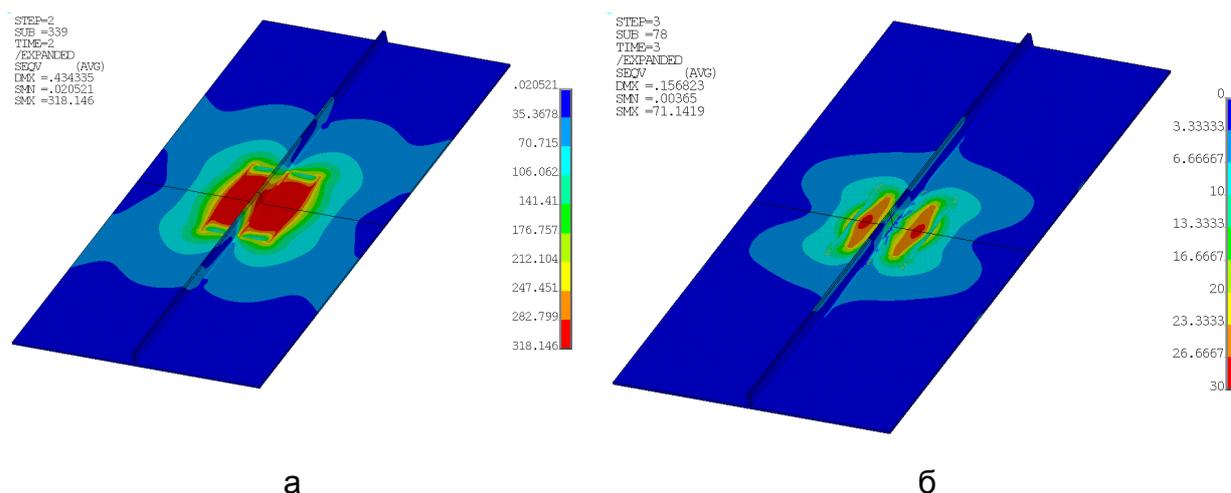


Рис. 23 Характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса в исследуемой панели в процессе выполнения технологической операции разводки

### Выводы

1. Проведен анализ характеристик локального НДС монолитной панели при ее формообразовании с помощью технологической операции разводки в специально разработанном штампе с обеспечением необходимого уровня остаточных деформаций в материале панели в результате одного элементарного технологического воздействия.
2. Исследовано влияние перемещений контактных поверхностей верхних и нижних губок штампа на характеристики локального НДС панели на различных этапах технологической операции разводки. Определена необходимая величина вертикальных перемещений контактной поверхности верхних губок штампа, в результате которой на поверхности панели возникают требуемые контактные давления  $\sigma_{\text{cont}}^{\text{lim}} = 96 \text{ МПа}$ , соответствующие усилию захвата панели штампом. Данные вертикальные перемещения составили  $\Delta u_y^{\text{потр}} = 0,007 \text{ мм}$ .
3. В результате анализа локального напряженно-деформированного состояния панели, полученного в процессе технологической операции разводки, определено приблизительное положение точки зарождения пластических деформаций. Уровень эквивалентных пластических деформаций в установленной точке, достигаемый в ходе выполнения локального деформирования панели, не превышает 0,1%, что соответствует необходимому уровню остаточных деформаций в материале панели в результате одного элементарного технологического воздействия штампа. Характер изменений эквивалентных напряжений Мизеса в точке начала развития пластических деформаций в процессе выполнения операции разводки соответствует принятой упругопластической модели поведения материала панели. При величине достигаемых на этапе разводки панели остаточных деформаций  $\varepsilon_{\text{эКВ}}^{\text{pl}} = 0,088\%$  эквивалентные напряжения Мизеса составили  $\sigma_{\text{эКВ}} = 310,5 \text{ МПа}$ .

4. Согласно разработанной схеме расположения характерных сечений нейтральной плоскости панели построены распределения эквивалентных пластических деформаций и вертикальных перемещений точек панели в диапазоне геометрических размеров панели, в которых значения данных параметров отличны от нуля. Анализ полученных распределений показал, что после отвода губок штампа от поверхности деформируемой монолитной панели в результате одного элементарного технологического воздействия штампа максимальные нормальные перемещения точек свободного края полотна панели максимально удаленных от зоны локального деформирования составляют 0,0036 мм. В зоне же деформирования панели нормальные перемещения точек имеют противоположное направление и составляют 0,151 мм.

### Список литературы

1. Авиационные материалы: справ. – М.: ОНТИ, 1982: – Т.4, ч.1. – 627 с.
2. Александров, В.Г. Авиационный технический справочник. – Изд. 2-е / В.Г. Александров, А.В. Майоров – М.: Транспорт, 1975. – 430 с.
3. Басов, К. А. ANSYS. Справочник пользователя / К. А. Басов. – М.: ДМК “Пресс”, 2005. – 640 с.
4. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова и др. – Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2010. – ч.1 – 271 с.
5. Гиммельфарб, А.П. Основы конструирования в самолетостроении: учеб. пособие для высш. авиац. заведений / ред. А.В. Кожина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 367 с.
6. Еременко, С.Ю. Метод конечных элементов в механике деформируемых тел / С.Ю. Еременко. – Х.: Изд-во “ОСНОВА” при Харьк. ун-те, 1991. – 272 с.
7. Житомирский, Г.И. Конструкция самолетов: учебник для студентов авиац. спец. вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. - 406 С.
8. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Изд-во “МИР”, 1975. – 543 с.
9. Лукашевич, А.А. Современные численные методы строительной механики: учеб. пособие / А.А. Лукашевич. – Хабаровск: Изд-во Хабар. госуд. техн. ун-та, 2003. – 135 с.
10. Олейников, А.И. Интегрированное проектирование процессов изготовления монолитных панелей / А.И. Олейников, А.И. Пекарш – М.: Эком, 2009. – 112 с.
11. Постнов, В.А. Численные методы расчета судовых конструкций / В.А. Постнов. – Л.: Изд-во “СУДОСТРОЕНИЕ”, 1977. – 280 с.
12. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М.: Изд-во “МИР”, 1979. – 392 с.
13. Сикульский, В.Т. Формообразование монолитных панелей сложных форм / В.Т. Сикульский. – Авиационно-космическая техника и технология: №5 (102): Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2013. – С. 12 – 16.

14. Исследование процесса формообразования ребристых панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой / В.Т. Сикульский, Ю.В. Дьяченко, Е.Е. Хитрых, И.А. Воронько. – Авиационно-космическая техника и технология: №4 (111): Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2014.– С. 14 - 21.
15. Сикульский, В.Т. Формообразование панелей с продольным оребрением местной гибкой и посадкой (разводкой) / В.Т. Сикульский. – Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПИ» Сер.: Іновац. технологія для обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії, №5 (1048). – Х., 2014. – С. 74 – 80.
16. ANSYS 15.0, Ansys Help Viewer / Mechanical APDL.

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.В.Сухов  
Национальный технический университет «КПИ»

Поступила в редакцию 22.12.2014

### **Аналіз характеристик НДС в регулярній зоні однострингерної фрезерованої панелі в процесі її локального деформування**

Проведено аналіз характеристик локального напружено-деформованого стану в регулярній зоні однострингерної фрезерованої панелі при її формоутворенні за допомогою технологічної операції розведення у спеціально розробленому штампі із забезпеченням необхідного рівня залишкових деформацій у матеріалі панелі в результаті одного елементарного технологічного діяння.

**Ключові слова:** формоутворення, операція розведення панелі, метод скінченних елементів, залишкові деформації, переміщення, контактний тиск, напруження.

### **Analysis of Stress-Strain Behavior Characteristics in Regular Zone of Single Stringer Milled Panel in the Process of Its Local Deformation**

Conducted is analysis of stress-strain behavior characteristics in regular zone of single stringer milled panel in the process of its generation of geometry by means of technological operation of stretching in specially designed punch providing the required level of residual deformation in the panel material as a result of one simple technological action.

**Keywords:** generation of geometry, panel stretching operation, finite elements method, residual deformation, displacements, contact pressure, stress.