

УДК 621.98

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОЛИУРЕТАНОМ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ОТКРЫТОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛАСТОМЕРА НА ЗАГОТОВКУ

© 2010 В.А.Барвинок<sup>1</sup>, Ю.В.Федотов<sup>1</sup>, А.П.Шумков<sup>1</sup>, С.Г.Рыжаков<sup>2</sup>, И.Ю.Федотова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup> Ульяновский филиал конструкторского бюро ОАО "Туполев"

Поступила в редакцию 14.05.2010

Представлена методика конечно-элементного математического моделирования процесса взаимодействия эластичной матрицы с листовой заготовкой при штамповке деталей полиуретаном в полузамкнутом объеме. На основе разработанной математической модели и численных исследований установлены оптимальные значения конструктивно-технологических факторов, при которых достигается максимальный уровень и равномерность распределения нормального контактного давления эластичной среды по поверхности заготовки. Получены диаграммы распределения нормального давления эластомера по площади листовой заготовки для различных геометрических форм эластичных матриц, которые используются при разработке технологий разделительной штамповки листовых деталей полиуретаном в полузамкнутом и полуоткрытом объемах.

Ключевые слова: эластичная матрица, полузамкнутый объём, полуоткрытый объём, листовая заготовка, деталь, распределение нормального давления, математическое моделирование

Известно, что на предприятиях аэрокосмической отрасли при изготовлении листовых деталей широкое применение находят методы разделительной штамповки с использованием давления эластомерных материалов (полиуретанов). Данным методам характерны малые сроки подготовки производства, универсальность и простота реализации.

В целях повышения эффективности процессов вырубки на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении (ПЛА и УКМ) СГАУ разработано более десяти способов раскроя листовых деталей давлением полиуретана. Разработанные способы разделительной штамповки отличаются конструктивной схемой вырубного инструмента и принципом передачи давления эластичной среды на заготовку.

За счет конструктивных особенностей вырубного инструмента создается различный механизм разделения листовой заготовки и наиболее благоприятная схема напряженно-деформированного состояния материала заготовки в

очаге деформации, что позволяет управлять качеством контура разделения при вырубке деталей, как из пластичных, так и из малопластичных материалов. В зависимости от принципа передачи давления эластичной среды на заготовку способы штамповки выделены в следующие технологические схемы реализации процесса вырубки: в замкнутом, в полузамкнутом, в полуоткрытом и в открытом объемах эластичной среды, а также с использованием ротационного воздействия эластичного инструмента на заготовку [1]. Наибольшее применение в заготовительно-штамповочном производстве промышленных предприятий нашли методы разделительной штамповки, реализуемые в замкнутом объеме эластичной среды – в контейнерах с различной формой внутренней полости (круглой, квадратной или прямоугольной) [2].

Однако штамповка деталей полиуретаном в контейнерах ограничивается геометрическими размерами и формой вырубаемого контура (не более 1000 мм).

Вместе с тем в номенклатуре листовых деталей летательных аппаратов имеется также конструктивные элементы, размеры которых находятся в пределах от 1500 до 4000 мм. К таким деталям относятся развертки сегментов шпангоутов, панели приборных отсеков, перегородки топливных баков и другие конструктивные элементы. Такие детали, как правило, отличаются сложностью геометрического контура, наличием многочисленных пазов и отверстий (от десятков до нескольких сотен), ребер жесткости, от-

*Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru.*

*Федотов Юрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.*

*Шумков Алексей Петрович, аспирант.*

*Рыжаков Станислав Геннадьевич, председатель совета директоров.*

*Федотова Ирина Юрьевна, аспирант*

бортовок и т.п. Изготовление таких деталей фрезерованием или с применением сложных и металлоемких инструментальных штампов сопряжено с большими материальными затратами. Поэтому исследования изготовления листовых крупногабаритных деталей методами разделительной штамповки давлением полиуретана с использованием “открытых” схем воздействия эластичной среды на заготовку (например, фрагментарно) является актуальной задачей.

Для изучения технологических возможностей “открытых” схем штамповки деталей полиуретаном проводилось конечно-элементное математическое моделирование. Для численных исследований применялась математическая модель, построенная на основании общих соотношений нелинейной механики деформирования твердого тела.

Решение задач с применением конечно-элементного математического моделирования, как известно [2], состоит из следующих основных этапов: идентификация задачи – задание физической модели процесса с правильным представлением геометрической схемы его реализации; разбиение модели конечно-элементной сеткой; приложение к модели граничных условий (фиксация границ геометрической модели, ограничение направления подвижных элементов физической модели и т.п.); решение соответствующих поставленной задаче численных систем уравнений; представление результатов и их анализ.

Для верной формулировки физической модели необходимо четкое представление о проис-

ходящих процессах при нагружении эластичной матрицы, о ее взаимодействии с заготовкой и о деформационном изменении последней по контуру вырубного инструмента.

Наиболее рациональными технологическими способами “открытого” взаимодействия эластичного инструмента на заготовку являются технологические схемы с полузамкнутым (рис. 1 а) и полуоткрытым (рис. 1 б) расположением эластичной матрицы в силовой обойме (контейнере). Такое конструктивное решение оснастки [3, 6] делает способ штамповки более универсальным и обеспечивает надежное крепление эластичной матрицы.

Физические модели процессов по первому и второму способам близки по сущности реализации разделения заготовки.

При силовом нагружении эластичной матрицы она деформируется по высоте, увеличивая площадь своей контактной поверхности и одновременно оказывая деформационное воздействие на заготовку. При этом происходит прогиб части заготовки (отхода) в локальной зоне контура разделения. При достижении прогнутой части заготовки определенной жесткости (при нарастающем давлении со стороны эластичной матрицы) происходит пластический сдвиг материала заготовки по режущим кромкам контура вырубного инструмента с последующим возникновением скалывающей трещины по толщине заготовки и по всему периметру контура разделения.

Фрагменты этапов разделения заготовки представлены на рис. 2.

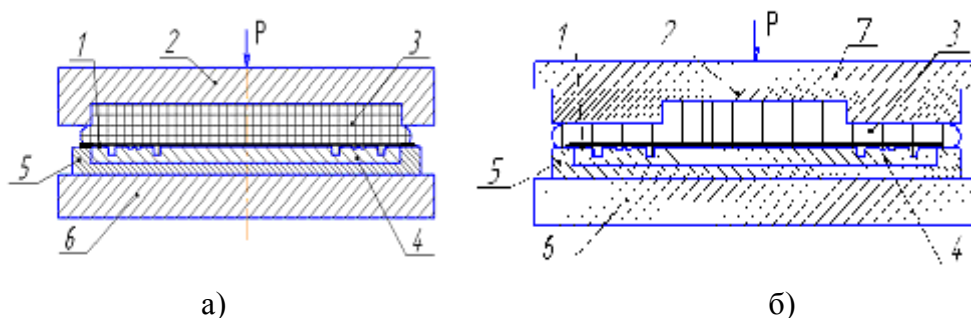


Рис. 1. Конструктивно-технологические схемы вырубки деталей:

а – в полузамкнутом объеме эластичной среды;

б – при полуоткрытом способе воздействия эластичной среды на заготовку;

1 - заготовка; 2 - силовая обойма; 3 - полиуретановый элемент; 4 - формообразующий инструмент; 5 – технологическая обойма; 6 – нижняя подштамповая плита; 7 – верхняя подштамповая плита

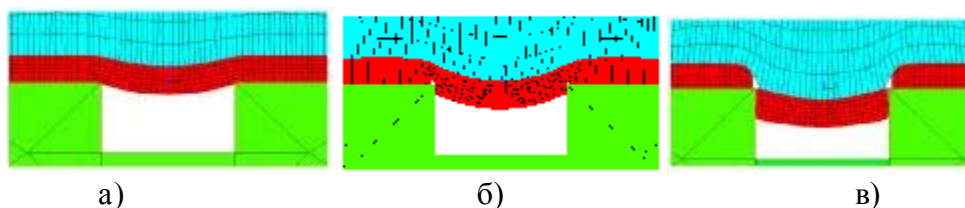
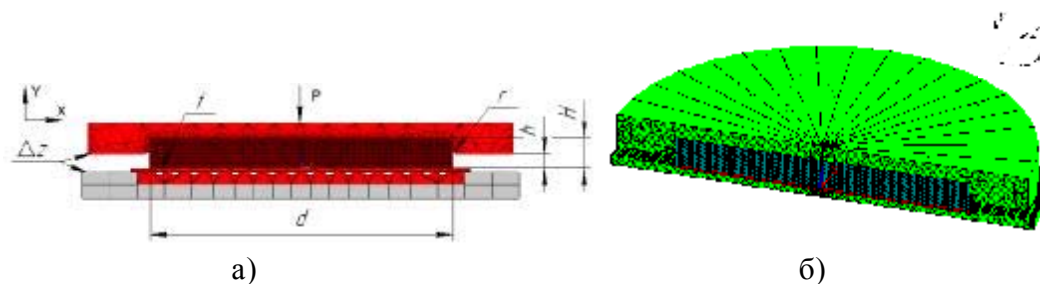


Рис. 2. Фрагменты заготовки в очаге разделения на различных этапах деформирования:

а – пластический прогиб отхода; б – пластический сдвиг до возникновения скалывающей трещины;

в – срез отхода по режущим кромкам вырубного инструмента



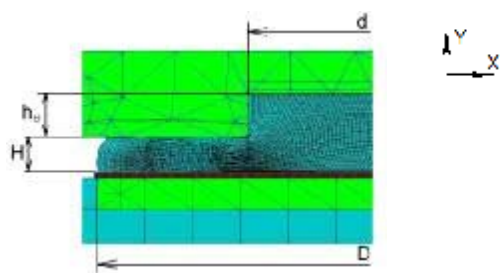
**Рис. 3.** Физическая модель процесса разделения листовой заготовки в полузамкнутом объеме эластичной среды:

а – конструктивно-технологическая схема реализации процесса с обозначением основных конструктивно-технологических параметров; б – трехмерная объемная модель реализации процесса при круговой форме эластичной матрицы

На рис. 3 в качестве примера представлена физическая модель процесса разделения листовой заготовки в полузамкнутом объеме эластичной среды (полиуретана) с разбиением конечно-элементной сеткой, густота нанесения которой зависит от необходимой точности решения задачи моделирования.

На конструктивно-технологической схеме процесса (рис. 3 а) обозначены основные технологические параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность разделительного процесса листовой заготовки в полузамкнутом объеме эластичной среды. К ним относятся:  $P$  – усилие прессы, передаваемое через силовую обойму 2 на эластичную матрицу 3;  $d$  – диаметр (или геометрические параметры  $a, b$  для некруглого полиуретанового элемента) полиуретановой пластины;  $H$  – общая высота полиуретановой пластины (матрицы);  $h$  – высота выступающей части полиуретановой пластины;  $r$  – радиус скругления внутренних кромок силовой обоймы 2;  $f$  – коэффициент трения полиуретана 3 о заготовку 1;  $\Delta z$  – шероховатость торцевых поверхностей силовой и технологической обойм.

На рис. 4 представлена физическая модель процесса разделения в полуоткрытом объеме эластичной среды. Отличительными параметрами для полуоткрытой схемы является (в связи со ступенчатой формой эластичной матрицы)



**Рис. 4.** Физическая модель процесса нагружения заготовки давлением эластичной матрицы в полуоткрытом объеме при деформации  $\epsilon = 30\%$

размеры центрального выступа ( $d$ ) и внешней ступени ( $D$ ) эластичной матрицы,  $h_0$  – высота центрального выступа,  $H$  – толщина открытой части эластичной матрицы.

Для выявления оптимального сочетания значений конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих максимальный уровень и равномерность контактного давления эластичной матрицы на заготовку, и минимальное растекание эластомера в процессе моделирования производится комплексное варьирование значениями данных параметров.

Следует также отметить, что в процессе математического моделирования принят ряд допущений:

- нагружение тел (силовой обоймы, эластичной матрицы и заготовки) считается квазистатическим;
- силовую обойму, технологическую обойму, вырубной инструмент, подштамповую плиту принимаем как абсолютно жесткие тела;
- полиуретановую пластину принимаем абсолютно упругой;
- шероховатости контактных поверхностей силовой и технологической обойм, заготовки и вырубного инструмента имеют фиксированные значения;
- модуль упругости полиуретана принимается равным  $E = 12$  МПа;
- коэффициент Пуассона полиуретана равен  $\nu = 0,496$ .

Для математического описания процесса деформирования использовались основные уравнения механики деформируемого тела [5].

В основу теоретической задачи математического моделирования положен принцип виртуальной работы, согласно которому очень малое (виртуальное) изменение внешней работы приложенных к телу нагрузок должно компенсироваться таким же изменением внутренней энергии деформаций [4],

$$\delta U = \delta V, \quad (1)$$

где  $U$  – энергия деформации (внутренняя рабо-

та);  $V$  – внешняя работа;  $\mathcal{D}$  – символ виртуального приращения.

Уравнение равновесия для одного конечно-го элемента имеет вид:

$$([K_e] + [K_e]^f) \{u\} = \{F_e\}^{pr} + \{F_e\}^{nd}. \quad (2)$$

Здесь  $[K_e] = \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol)$  – матрица жесткости элемента;

$[K_e]^f = k \int_{areaf} [N_n]^T [N_n] d(areaf)$  – матрица жесткости основания;

$\{F_e\}^{pr} = \int_{areap} \{N_n\}^T \{P\} d(areap)$  – вектор сил давления;

$\{F_e\}^{nd}$  – работа узловых сил.

В узловых точках элемента деформации и напряжений вычисляются с помощью уравнений:

$$\{\epsilon^{el}\} = [B] \{u\}, \quad (3)$$

$$\{s\} = [D] \{\epsilon^{el}\}, \quad (4)$$

где  $\{\epsilon^{el}\} = [\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z \epsilon_{xy} \epsilon_{xz} \epsilon_{yz}]^T$  – вектор деформации;  $[B]$  – матрица деформации-перемещения в точке интегрирования;  $\{u\}$  – вектор узловых перемещений;  $[D]$  – матрица упругости;  $\{s\} = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T$  – вектор напряжений.

Деформации и напряжения Мизиса вычисляются по известным формулам механики твердого тела.

Эквивалентные напряжения связаны с эквивалентными деформациями следующим соотношением:

$$\sigma_e = 2 \epsilon_e G, \quad (5)$$

где  $G = E / (2(1 + \nu))$  – модуль сдвига;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Материал эластичной матрицы принимается гиперупругим. Для гиперупругих материалов уравнение связи между напряжениями и деформациями представляется в виде упругого потенциала (или плотности энергии деформации) Муни-Ривлина [4], которое имеет следующий вид для используемой в данном случае двухпараметрической модели:

$$W = a_{10} \cdot (I_1^* - 3) + a_{01} \cdot (I_2^* - 3) + 0.5 \cdot k \cdot (I_3^* - 1)^2, \quad (6)$$

где  $a_{10}$ ,  $a_{01}$  – константы Муни-Ривлина для эластополимерного материала (полиуретана) определяемые экспериментально;  $k$  – объемный модуль;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $I_i^*$  – редуцированные инварианты деформации в  $i$ -ом направлении.

Алгоритм численного решения данной технологической задачи контактного взаимодействия эластичной матрицы с листовой заготовкой и с элементами штамповой оснастки позволил проследить поэтапно весь путь деформирования эластомера с учетом изменения его геометрии от начальной до конечной стадии, учесть характер силового поля, учесть свойства материалов и конструктивные параметры технологической оснастки, а также движение контактирующих поверхностей с учетом трения.

Результаты численных исследований показали, что оптимизированные условия контактного взаимодействия эластичной матрицы с листовой заготовкой ведут к повышению уровня нормального давления эластомера с заготовкой и обеспечивают равномерность распределения его по всей контактной поверхности с листовой заготовкой. Выполнение первой части условия достигается за счет повышенной шероховатости торцевых поверхностей элементов технологической штамповой оснастки (силовой и технологической обойм) (рис. 1). Для этого необходимо на данных поверхностях нанести перекрестную насечку глубиной от 0,3 до 0,8 мм.

На рис. 5, 6 в качестве примера приведены эпюры распределения нормального контактного давления со стороны эластичной матрицы (квадратной по форме) на заготовку по плоскости симметрии в зависимости от различных факторов.

Анализ данных зависимостей показывает, что распределение нормального давления неравномерно. Причем уровень неравномерности уменьшается с увеличением шероховатости торцевых поверхностей оснастки ( $\Delta z$ ), масштабного фактора полиуретановой пластины ( $a$  или  $d$ ) и с уменьшением относительной жесткости эластичной матрицы ( $\bar{H}$ ). Достижение оптимального значения относительной величины открытой части эластичной матрицы относительно силовой обоймы при полузамкнутом объеме

$h/H = 0,33...0,45$  приводит к увеличению нормального контактного давления.

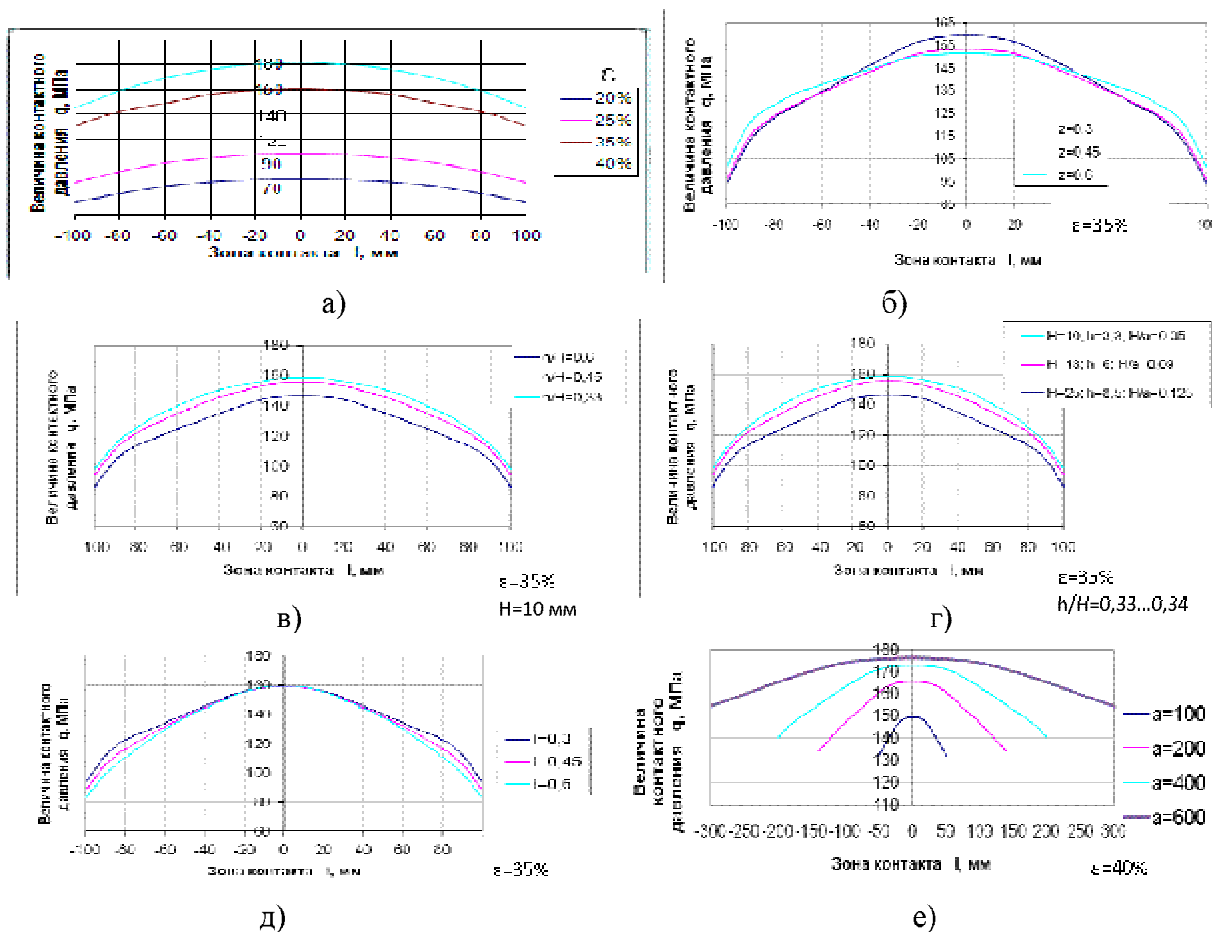
Из анализа зависимостей (рис. 5) следует, что при достижении максимальных значений относительной высоты центрального выступа  $h_B/H = 0,8$

и относительного диаметра центрального выступа  $d/D = 0,7...0,8$  наблюдается существенное увеличение нормального контактного давления, но вместе с тем повышается и неравномерность. При меньших же значениях данных параметров

( $h_B/H = 0,4...0,6$  и  $d/D = 0,5...0,6$ ) уровень нормального давления выравнивается при незначительном снижении его максимальной величины.

Следует отметить, что для обеих схем нагружения эластичной матрицы уровень нормального давления возрастает в 1,5 раза при увеличении относительной осадки эластомера по высоте от 25% до 35%. Неравномерность нормального давления снижается увеличением масштабного фактора эластичного элемента  $d$  (или  $a$ ) от 150 мм до 600 мм (рис. 5 е).

При оптимальных сочетаниях значений перечисленных конструктивно-технологических фак-



**Рис. 5.** Эпюры распределения нормального давления эластичной матрицы (квадратной по форме) в полузамкнутом объеме на заготовку по оси симметрии в зависимости от конструктивно-технологических факторов:

а – от относительной деформации по высоте  $\epsilon$ ; б – от шероховатости торцевых поверхностей силовой и технологической обойм  $\Delta z$ ; в – от относительной толщины эластичной матрицы  $\bar{h} = h/H$ ; г – от относительной жесткости полиуретановой пластины  $\bar{H} = H/a$ ; д – от коэффициента трения контактной зоны  $f$ ; е – от масштабного фактора эластичной пластины

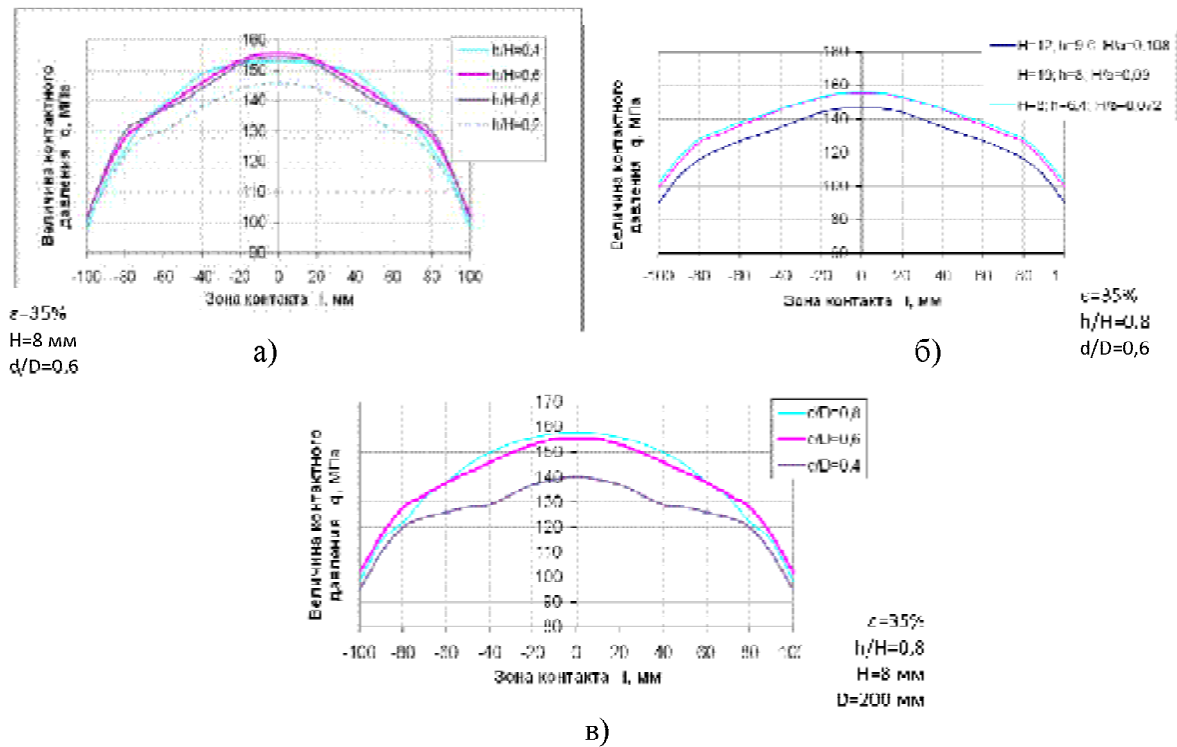
торов возможно достижение уровня нормального давления эластичной среды (при габаритных размерах эластичной матрицы от 150 до 600 мм и относительном ее сжатии по высоте до 35%) для полузамкнутой и полуоткрытой технологических схем в пределах 135...180 МПа, что достаточно для выполнения разделительных операций при вырубке деталей широкого диапазона толщин и марок материалов листовых заготовок.

В целях повышения уровня равномерности распределения нормального давления в контактной зоне проведены численные исследования с использованием эластичной матрицы с внутренней конусностью контактной (с заготовкой) поверхности (рис. 7).

Результаты численных исследований представлены на рисунке 8 применительно к круглой форме эластичной матрицы.

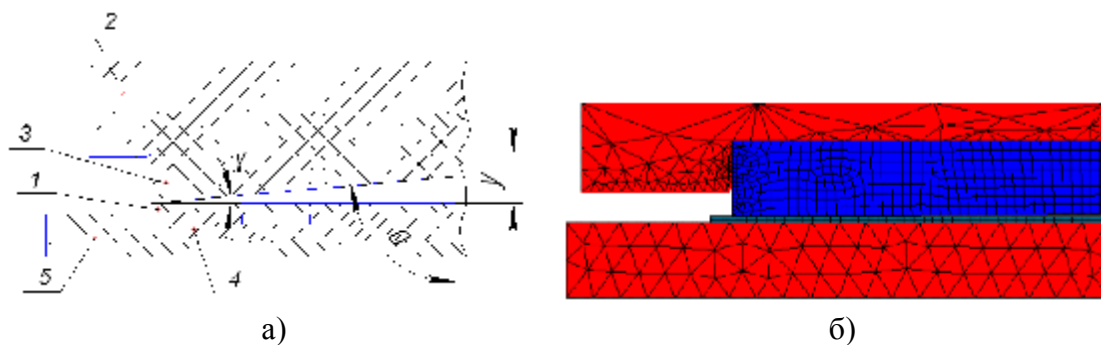
Как видно из графических зависимостей (рис. 7) с увеличением угла конусности  $\gamma$  от 0 до  $1^\circ$  уровень распределения нормального давления выравнивается, но вместе с тем уменьшается величина нормального давления в 1,5 раза. Численные исследования показывают, что оптимальным значением является конусность в пределах  $0,5^\circ \dots 1^\circ$ . При этом с увеличением масштабного фактора, при сохранении значений коэффициента относительной формы  $H/D(a)$  и относительной величины выступания эластичной матрицы ( $h/H$ ) уровень нормального контактного давления имеет диапазон значений 90...120 МПа (для круглых по форме эластичных матриц), 100...140 МПа (для квадратных и прямоугольных).

Для проверки результатов численных исследований и адекватности разработанных матема-



**Рис. 6.** Эпюры распределения нормального давления эластичной матрицы (квадратной по форме) в полуоткрытом объеме на заготовку по оси симметрии в зависимости от конструктивно-технологических факторов:

а – от относительной высоты центрального выступа  $h_B/H$ ; б – от относительной жесткости полиуретановой пластины  $(H + h_B)/a$ ; в – от относительного диаметра центрального выступа  $d/D$



**Рис. 7.** Эластичная матрица с внутренней конусностью в схеме с заделкой эластичной матрицы в полузамкнутом объеме:

а – конструктивная схема; б – математическая модель для численных исследований; 1 – заготовка; 2 – силовая обойма; 3 – полиуретановый элемент; 4 – формообразующий инструмент; 5 – технологическая обойма

тических моделей были проведены экспериментальные исследования распределения нормального контактного давления по поверхности листовых заготовок из различных марок материалов. В экспериментальных исследованиях определялось влияние тех же конструктивно-технологических факторов и в том же диапазоне их варьирования, что и при численном моделировании. Для проведения экспериментов применялась специальная

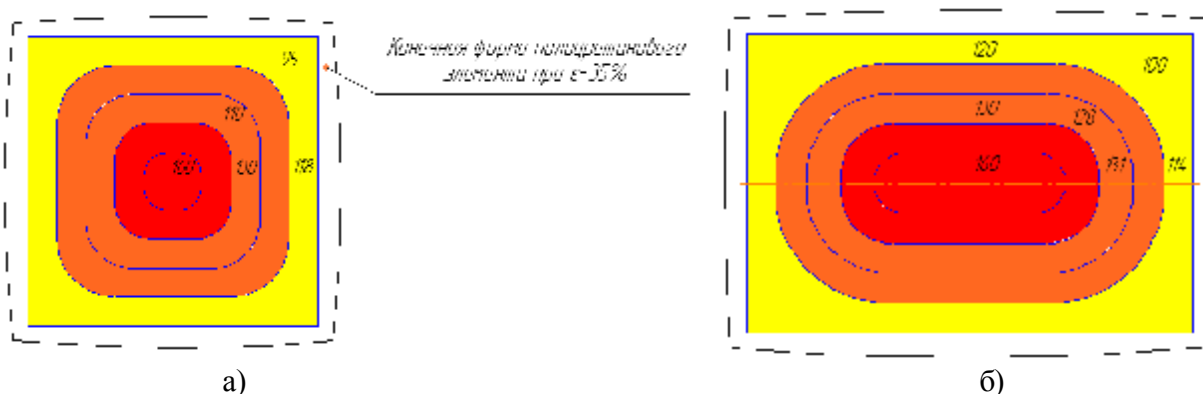
оснастка и метод измерения давления с помощью профилированных листовых датчиков [1], изготовленных из пластичных материалов (из свинца или алюминиевого сплава АД1) методом отпечатков специальным инструментом и предварительно протарированных в замкнутом объеме контейнера на различный уровень давления.

Проведенные эксперименты показали, что отличие результатов численных и эксперимен-





**Рис. 8.** Распределение нормального давления по заготовке при различных углах конусности эластичной матрицы (при технологических параметрах процесса:  $d=100$  мм;  $H=10$  мм;  $h=3.3$  мм;  $r=1$  мм;  $\Delta z=0,3$  мм;  $f=0,3$ ;  $\varepsilon =35\%$ )



**Рис. 9.** Диаграммы распределения нормального давления в (МПа) полиуретана по плоскости листовой заготовки:

а – квадратная форма эластичной матрицы, б – прямоугольная форма эластичной матрицы ( $b=2a$ )

(для технологических параметров  $a=200$  мм;  $\bar{H} = H/a = 0,05$ ;  $\bar{h} = h/H = 0,33$ ;  $r=3$  мм;  $\Delta z=0,6$  мм;  $\varepsilon = 35\%$ )

тальных исследований не превышает 10%, что подтверждает адекватность разработанных математических моделей.

Для практического использования результатов численных исследований получены диаграммы распределения нормального давления по всей площади контактного взаимодействия эластичной матрицы с листовой заготовкой для каждого из исследуемых способов штамповки. В качестве примера на рисунках 9 (а, б) приведены диаграммы распределения нормального давления полиуретана по поверхности заготовки для двух форм эластичных матриц (с квадратной и прямоугольной формой контактной поверхности) при нагружении эластичной матрицы в полузамкнутом объеме.

Подобное представление распределения нормального контактного давления при нагружении эластичной матрицей заготовки позволяет оценить реальные возможности раскроя детали (фигурная вырубка внешнего контура, перфорация пазов и отверстий) на этапе разработки технологии изготовления деталей вырубкой-пробив-

кой в полузамкнутом (или полуоткрытом) объеме эластичной среды. А также позволяет подобрать прессовое оборудование с меньшим усилием и сформулировать технические условия на проектирование штамповой оснастки для фрагментарной вырубки при изготовлении крупногабаритных деталей. Разработанные методические указания на проектирование технологии разделительной штамповки деталей давлением полиуретана широко используется на базовых предприятиях аэрокосмической отрасли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов / В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров, В.К. Моисеев, В.П. Самохвалов, Ю.В. Федотов. М.: Наука и технологии, 2002. 394 с.
2. Математическое моделирование контактного взаимодействия эластичного инструмента в процессах ротационного раскроя листовых деталей изделий машиностроения / В.А. Барвинок, Ю.В. Федотов, Е.Г. Громова, А.П. Шумков, Н.Ю. Поникарова // Пробле-

- мы машиностроения и автоматизации. 2008. №1. С. 128-132.
3. Федотов Ю.В. Авторское свидетельство СССР № 1741952. Штамп для вырубки-пробивки. Ю.В. Федотов, Н.А. Ефимов, В.Е. Кравченко, А.В. Порядин, К.В. Козлов. Опубликовано в БИ. 1992. №23.
  4. ANSYS, Inc. Theory Reference / Ansys Release 5.6 Ansys Inc., 1998.
  5. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высш. Школа, 1982. 264 с.
  6. Федотов Ю.В. Авторское свидетельство СССР № 1760682. Устройство для вырубки-пробивки деталей из листового материала эластичной средой в открытом объеме. Ю.В. Федотов, Н.А. Ефимов, В.Д. Щеголевых. Опубликовано в БИ. 1992. №2.

## SHEET DETAIL SEPARATION PUNCHING TECHNOLOGY EFFICIENT RISE BY USING POLYURETHANES AND DEFERENT UNCLOSED SCHEMES OF INTERACTION OF ELASTIC AGENT AND BLANK

© 2010 V.A. Barvinok<sup>1</sup>, U.V. Fedotov<sup>1</sup>, A.P. Shumkov<sup>1</sup>, S.G. Rizhakov<sup>2</sup>, I.U. Fedotova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>Public Stock Company "Tupolev", Ulyanovsk Branch - Design Bureau

A finite element mathematical modeling of elastic basis - sheet blank interaction during semi-closed dimension polyurethane pressure punching is presented. Optimal structural technological parameters values are detected based on numerical computing in the network of developed mathematical models. Optimal values allow reach the maximum pressure level and its distribution evenness level. Elastic polymer contact pressure distribution diagrams are developed (pressure distributes on sheet blank area). The diagrams are used for sheet details separating punching by semi-closed dimension polyurethane pressure technology developing.

Key words: elastic basis (mould), semi-closed dimension, semi-open dimension, sheet blank, detail, contact pressure distribution, mathematical modeling

---

*Vitaly Barvinok, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru.*

*Yuri Fedotov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.*

*Alexey Shumkov, Graduate Student.*

*Stanislav Rizhakov. Chairman of the Board of Directors*

*Irina Fedotova, Graduate Student.*