

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗДЕЛЕНИЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ВЫРУБКИ ДЕТАЛЕЙ ПОЛИУРЕТАНОМ**

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

В статье авторы описывают результаты исследований механизма разделения листовых материалов давлением полиуретана при использовании различных конструктивных схем вырубного инструмента. Численными и экспериментальными исследованиями установлены оптимальные параметры вырубного инструмента, при которых обеспечивается преобладание сдвигового характера разделения материала заготовки, что напрямую связано с повышением качества вырубного контура детали. Результаты численных исследований подтверждены экспериментами с использованием метода координатной сетки.

Ключевые слова: листовые материалы, давление полиуретана, вырубной инструмент.

Применяемые в производстве летательных аппаратов методы разделительной штамповки листовых деталей давлением полиуретана отличаются разнообразием конструктивных схем вырубного инструмента, от которого зависит качество изготавливаемых деталей [1]. На правильный выбор той или иной конструктивной схемы инструмента влияет знание механизма разделения материала заготовки.

В соответствии с классической схемой рубки деталей полиуретаном процесс разделения заготовки происходит в следующей последовательности (рис. 1).

При замыкании подштамповой плиты полости контейнера (рис. 1б) под действием давления полиуретана производится изгиб припуска листовой заготовки вокруг кромок по периметру вырубного инструмента. При нарастающем усилии прессы и, соответственно, давления полиуретана в полости контейнера происходит защемление припуска между подштамповой плитой и полиуретаном. Материал заготовки подвергается изгибу с растяжением и при достижении критических деформаций происходит отрыв припуска по

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

*Моисеев Виктор Кузьмич, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: fla@ssau.ru*

*Шумков Алексей Петрович, аспирант.*

*Рыжаков Станислав Геннадьевич, председатель совета директоров.*

*Федотова Ирина Юрьевна, аспирант.*

*Громова Екатерина Георгиевна, кандидат технических наук, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.*

режущим кромкам вырубного инструмента. На макрошлифах образцов (рис. 2), как показали экспериментальные исследования, трещина разрушения в материале припуска заготовки возникает в зоне растяжения и не всегда совпадает с режущей кромкой вырубного инструмента.

В результате чего качество вырубляемых деталей часто не удовлетворяет требованиям по чертежу. На фотографиях (рис. 3а, б, в) представлены образцы макрошлифов кромок среза по толщине листового материала из различных сплавов.

Причиной такого качества, как показали ранее проведенные исследования [1], является преобладание изгиба с растяжением в разделительном процессе при штамповке по классической схеме.

Для исключения данного недостатка на кафедре ПЛА и УКМ СГАУ разработаны более эффективные схемы разделения с интенсификацией сдвигового процесса разделения [2].

Для изучения механизма разделения авторами проведен комплекс численных и экспериментальных исследований условий деформирования листовых заготовок из материалов различных марок, отличающихся пластическими свойствами. При математическом моделировании разделения материала заготовки был применен метод “смерти” и “рождения” конечных элементов, суть которого состоит в том, что определенные элементы в модели могут быть “существующими” или “несуществующими”, если часть материала добавлена или удалена из системы.

В таких случаях можно использовать опции рождения и смерти для активации или деактивации отобранных конечных элементов, соответственно.

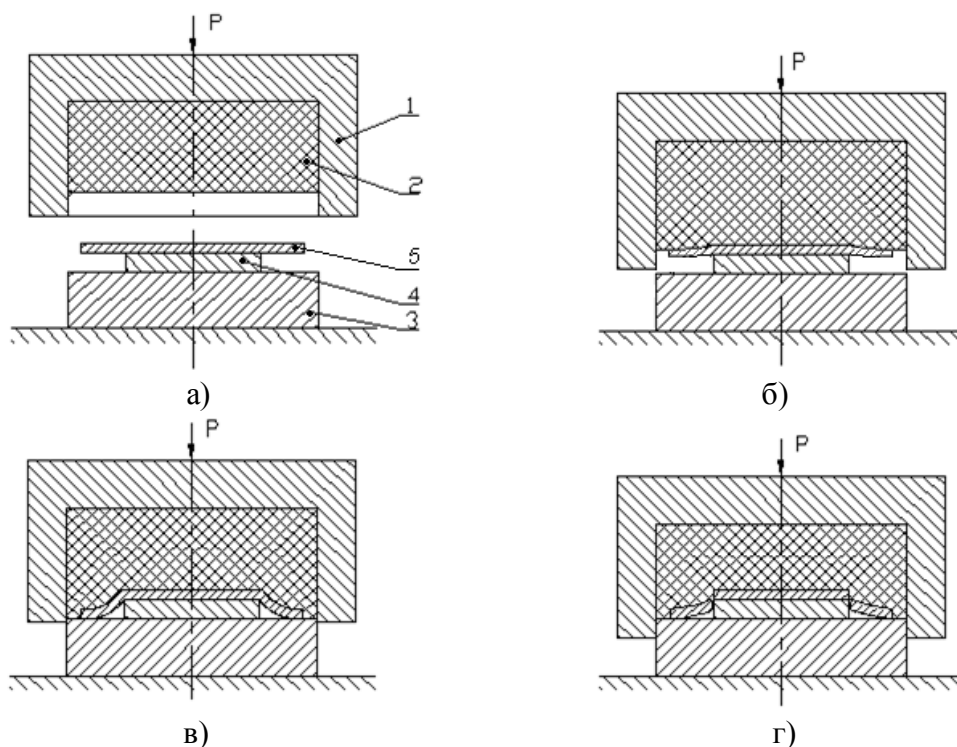


Рис. 1. Последовательность процесса вырубki детали полиуретаном:

а – исходное положение контейнера, подштамповой плиты и вырубного инструмента с заготовкой; б – замыкание контейнера с подштамповой плитой и изгиб припуска заготовки вокруг вырубного инструмента; в – защемление припуска между подштамповой плитой и полиуретаном; г – обрыв припуска по режущей кромке вырубного инструмента  
1 – контейнер; 2 – полиуретан; 3 – вырубной шаблон; 4 – подштамповая плита; 5 - листовая заготовка

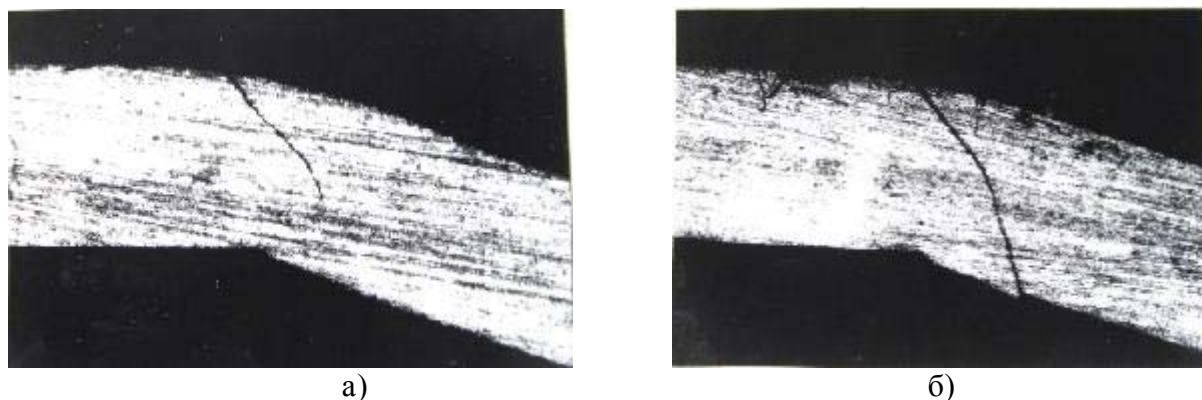


Рис. 2. Стадии разрушения материала заготовки в очаге разделения по классической схеме вырубki детали полиуретаном (x20)

Состояние рождения и смерти элементов зависит от рассчитываемых параметров, напряжения и деформации. Этот прием необходим для того, чтобы моделировать эффект распространения поверхности разрушения (текучести), и другие изменения элемента, обусловленные моделированием.

Условие деактивации элемента можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{ij} > [\sigma]; \quad \varepsilon_{ij} > [\varepsilon], \quad (1)$$

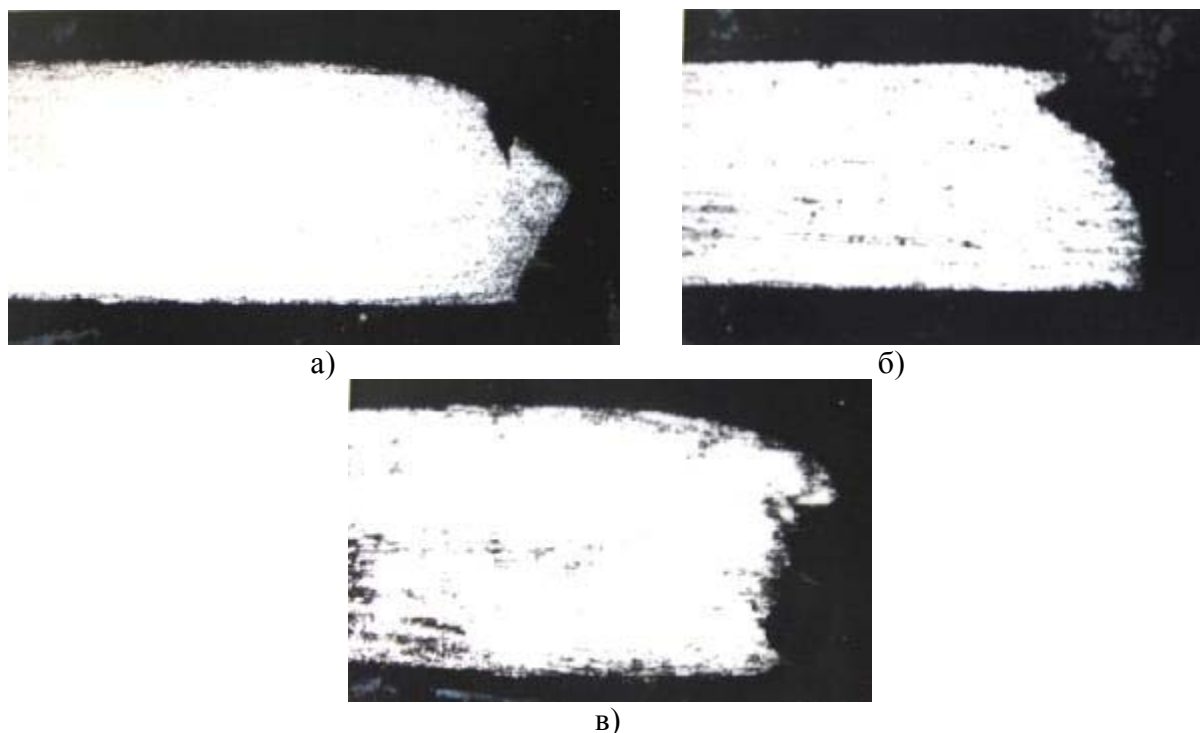
где  $\sigma_{ij}$  - j-тое напряжение i-го элемента;

$[\sigma]$  – предельно допустимое напряжение, равное пределу прочности материала;

$\varepsilon_{ij}$  - j-тая деформация i-го элемента;

$[\varepsilon]$  - предельно допустимая деформация.

При математическом описании конечно-элементного моделирования, как отмечалось в работах [3, 4], сформулировано уравнение равновесия на основе равенства виртуальной работы внутренней деформации и внешней работы приложенных к телу нагрузок. При этом форма внутренней энергии деформации элемента записана



**Рис. 3.** Макрошлифы (x20) кромок среза деталей, вырубаемых полиуретаном из материалов: а – Д16АТ, S=1,5 мм; б – МА8М, S=1,5 мм; в – ОТ4-1, S=1,5 мм

через матрицу жесткости элемента и матрицу жесткости упругого основания, которые обратно пропорциональны модулю упругости.

Если придать модулю упругости нулевое значение, то это означает отсутствие конечного элемента. Фактически, чтобы модель учитывала исчезновение элемента, его не нужно удалять физически, а достаточно придать этому элементу нулевой модуль упругости. Это осуществляется умножением матрицы жесткости элементов на ощутимый коэффициент уменьшения. Этот коэффициент равен  $1.0 \cdot 10^{-6}$ .

Нагрузки на элемент, связанные с деактивированными элементами обнуляются в векторе нагрузок, однако, они все еще появляются в списках нагрузок элемента. Обнуленные параметры деактивированных элементов не включаются в суммирование по модели. Деформация элемента также обнуляется, как только этот элемент убит.

После деактивации элемента система продолжает моделироваться до тех пор, пока не возникнет условия для деактивации следующего элемента. Затем процесс продолжается.

Таким образом, можно сказать, что математический взгляд на процесс разрушения имеет следующий вид. Во время процесса нагружений происходит рост нагрузки. До разрушения можно выделить несколько стадий процесса. Тело обычно ведет себя упруго при небольших нагрузках и связь между напряжениями и деформациями линейная и определяется законом Гука. При дальнейшем росте нагрузки связь становится нелиней-

ной, но остается гладкой, этот момент перехода для одномерного случая определяется пределом текучести. При этом в случае понижения нагрузки связь между напряжениями и деформациями снова становится линейной. Поэтому этот процесс по аналогии поведения иногда связывают с трением двух тел, но при этом говорят о внутреннем трении в материале. При сохранении гладкости связи напряжений и деформаций можно говорить о наличии локального деформирования материала. При дальнейшем росте нагрузки возникают нарушения гладкости связи напряжений и деформаций, предельное состояние для этого случая определяются пределом прочности материала  $[\sigma]$ , из-за нарушения гладкости возникают предельно допустимые деформации  $[\varepsilon]$ , являющиеся причиной трещин, или разрыхления. Далее процесс связан с увеличением разрывов в производных и заканчивается полной независимостью напряжений от деформаций или разрушением. Первые две стадии носят достаточно локальный характер, а третья стадия обычно охватывает уже все деформируемое тело.

Используя метод “смерти” и “рождения” элементов и разработанную математическую модель, проведены исследования механизма разделения листовой заготовки с применением четырех схем конструктивного исполнения вырубного инструмента: на локализованном вырубном инструменте без промежуточной опоры между режущими кромками (рис. 4 а); на локализованном вырубном инструменте с промежуточной опорой

между режущими кромками (рис. 4 б); на вырубном инструменте с наклонной опорной рамкой (рис. 4 в); на вырубном инструменте с боковым подпором отхода (рис. 4 г).

Фрагменты поэтапного разделения заготовок для каждой из предложенных схем вырубki представлены на рис. 5 ... 8.

Характерными параметрами процессов является относительная глубина прогиба  $\Delta \bar{l} = \frac{\Delta l}{S}$  и относительная величина пластического сдвига

отхода  $\Delta x = \frac{\Delta x}{S}$ , где  $S$  – толщина заготовки (рис. 5 в).

Оптимизирующими факторами процессов являются конструктивные параметры вырубного инструмента:

- ширина паза  $a$  между режущими кромками инструмента (рис. 4 а, б)
- глубина паза  $h$  (рис. 4 б);
- ширина  $b$  и радиус скругления  $r$  промежуточной опоры (рис. 4 б);

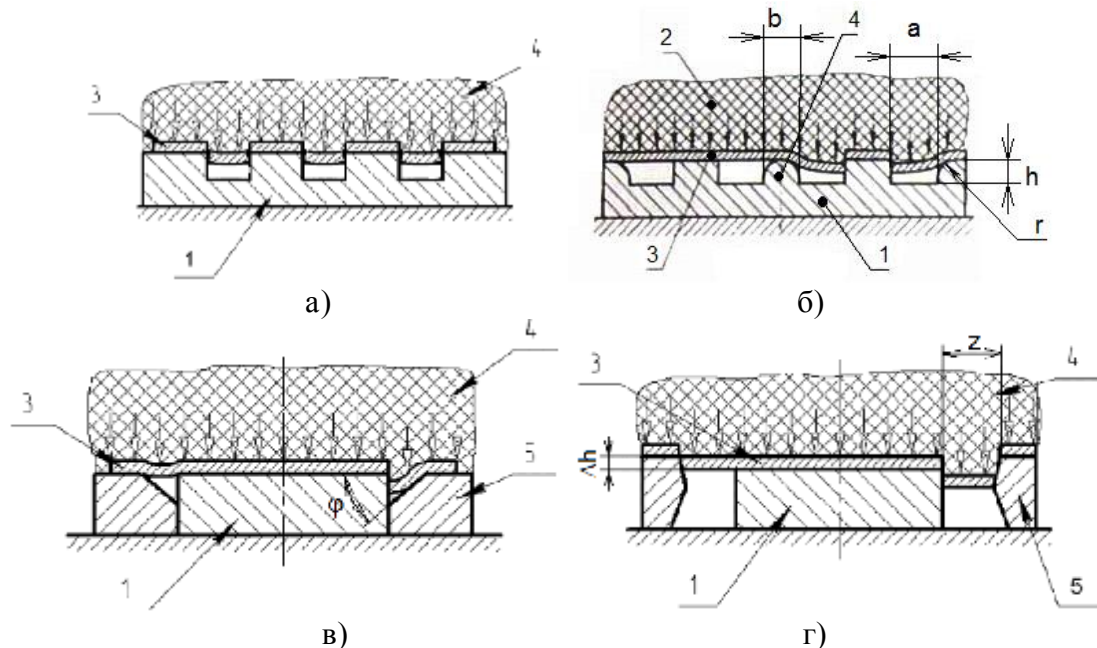


Рис. 4. Конструктивно-технологическая схема вырубного инструмента и процессы разделения листовой заготовки:

- а – на локализованном вырубном инструменте без промежуточной опоры между режущими кромками;
- б – на локализованном вырубном инструменте с промежуточной опорой между режущими кромками;
- в – на вырубном инструменте с наклонной опорной рамкой;
- г – на вырубном инструменте с боковым подпором отхода;
- 1 – вырубной шаблон; 2 – промежуточная опора; 3 – заготовка; 4 – полиуретан

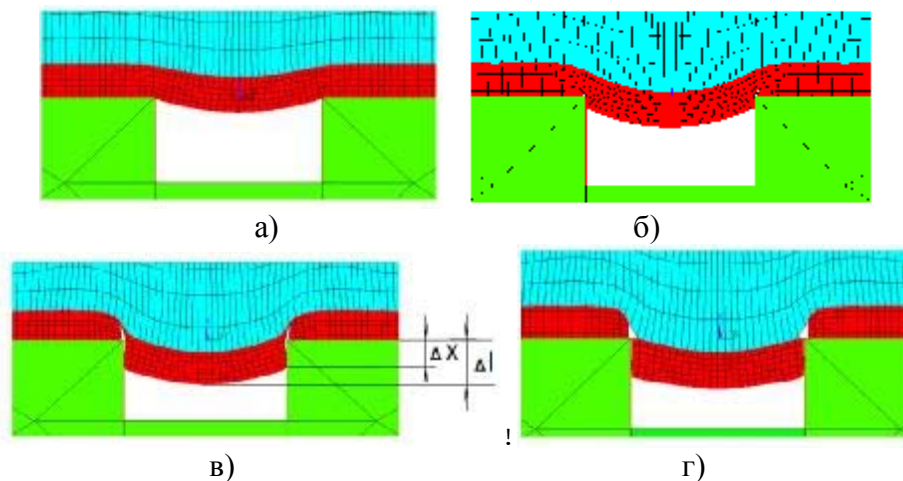


Рис. 5. Поэтапное разделение фрагмента заготовки при вырубке детали на локализованном инструменте без дополнительной опоры

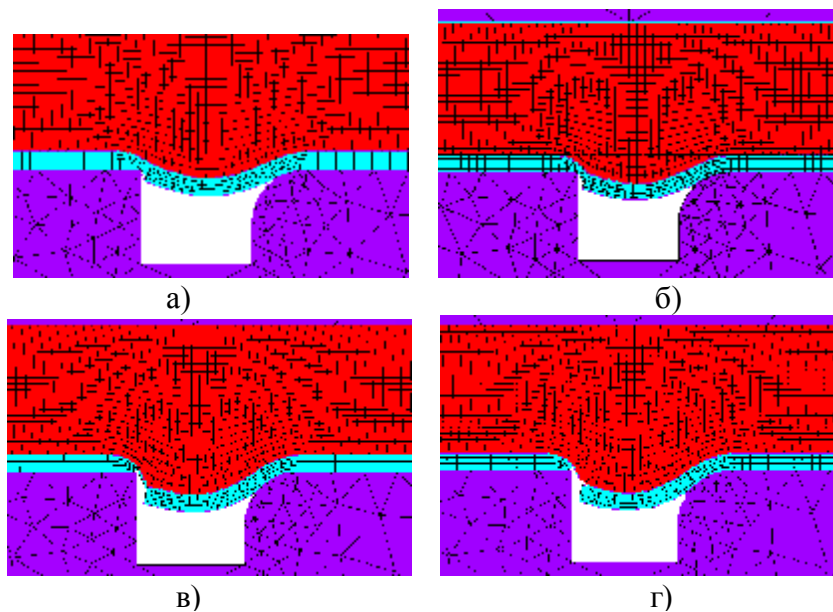


Рис. 6. Поэтапное разделение фрагмента заготовки при вырубке детали на локализованном инструменте с дополнительной опорой

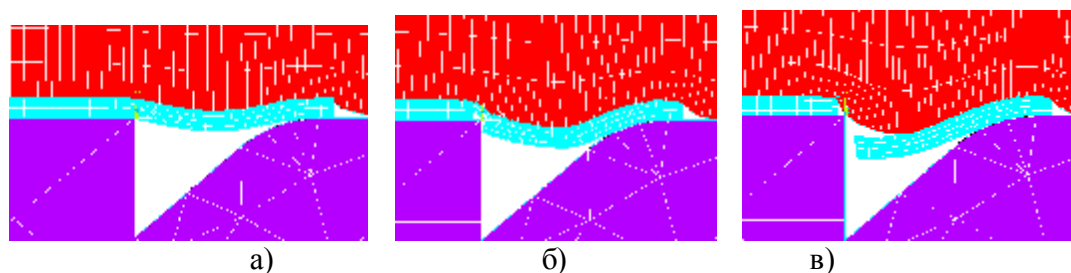


Рис. 7. Поэтапное разделение фрагмента заготовки при вырубке детали на локализованном инструменте с наклонной опорной рамкой вокруг шаблона

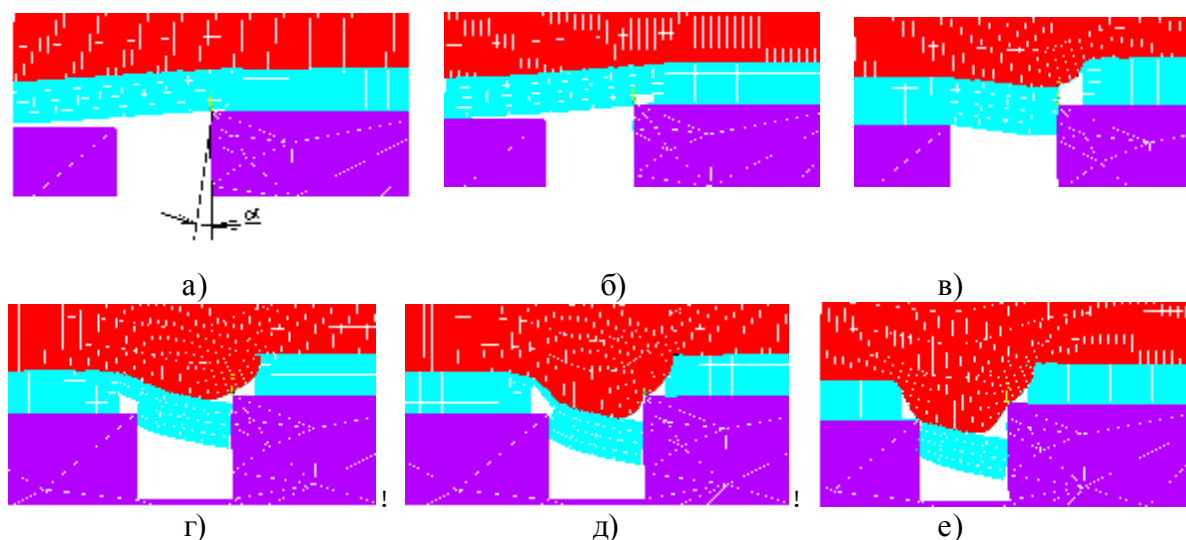


Рис. 8. Поэтапное разделение фрагмента заготовки при вырубке детали с боковым поджатием отделяемого припуска

- угол конусности  $\varphi$  опорной рамки (рис. 4 в);  
 - превышение опорной рамки  $\Delta h$ , зазор между опорной рамкой и вырубным шаблоном  $z$  (рис. 4 г), угол конусности опорной рамки  $\alpha$  (рис. 5 а).

Эффективность процессов оценивалась по параметрам, характеризующим качество контура разделения, а именно: минимальное отклонение вырубаемого контура, вертикальность профиля среза (выражается через угол скола  $\beta$ ) [3].

Следует отметить, что численные исследования проводились для наиболее распространенных в аэрокосмической отрасли марок алюминиевых сплавов (АмцАМ, Д16АМ, Амг6М, Д16АТ).

В результате моделирования поэтапного разделения заготовок (для каждой технологической схемы вырубки) численно определены главные напряжения и главные деформации материала заготовки в очаге разделения. На рис. 9 в качестве примера представлены графические зависимости значений главных деформаций по высоте (толщине) заготовки в очаге разделения при вырубке контура детали без промежуточной опоры между режущими кромками вырубного инструмента.

При этом для оптимальных значений конструктивных параметров вырубного инструмента, как показали вычисления характеристик качества контуров среза заготовки, численно определены значения показателя деформированного состояния материала заготовки  $V_\epsilon$ , по формуле [6]

$$V_\epsilon = \frac{2\epsilon_3 - \epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_i$  - главные компоненты деформаций.

По значениям показателя деформированно-

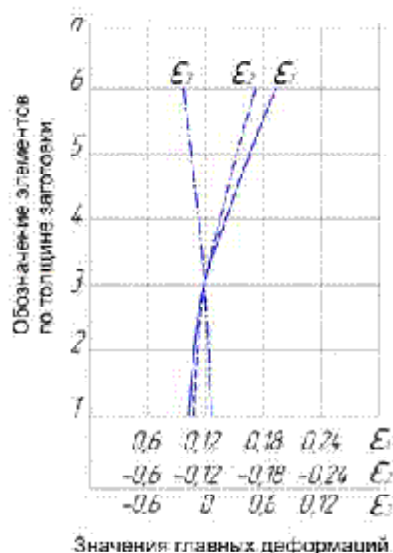
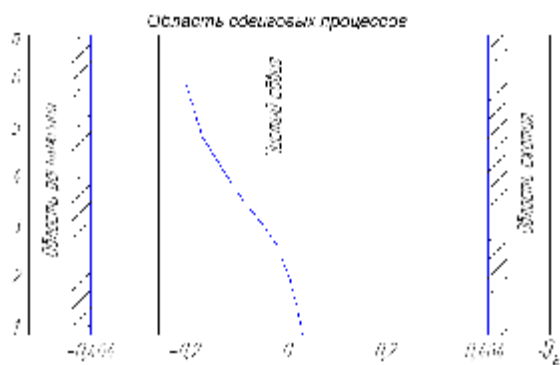


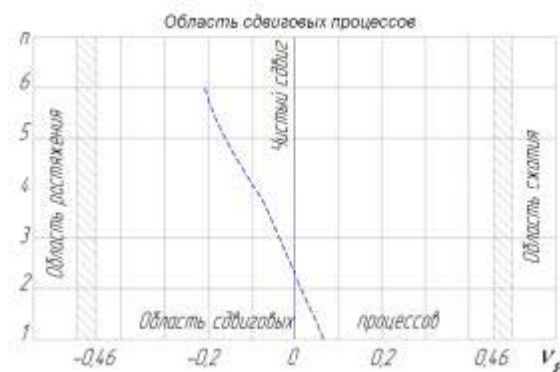
Рис. 9. Распределение главных деформаций по высоте заготовки в очаге разделения при вырубке без промежуточной опоры между режущими кромками вырубного инструмента

го состояния ( $V_\epsilon$ ) построены соответствующие графические зависимости по высоте контура среза (рис. 10).

Как видно из данных зависимостей разделение



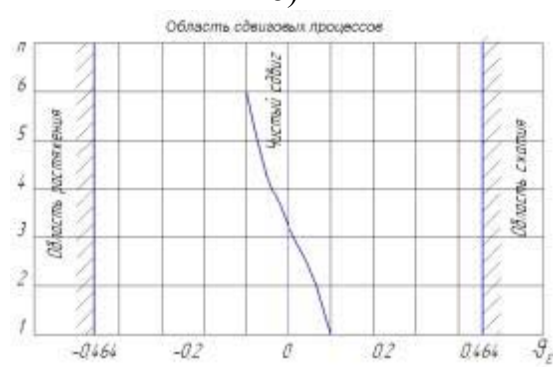
а)



б)



в)



г)

Рис. 10. График зависимости показателя деформированного состояния в каждой узловой точке по толщине листовой заготовки при вырубке контура детали:

- а) на локализованном инструменте без дополнительной опоры; б) на локализованном инструменте с дополнительной опорой; в) на вырубном инструменте с наклонной опорной рамкой вокруг шаблона; г) на вырубном инструменте с боковым поджатием

**Таблица 1.** Значения показателей качества вырубаемого контура детали в зависимости от параметров вырубного инструмента

Наличие опоры	Марка материала заготовки	Ширина паза, $d_n/S$	Угол наклона поверхности среза по контуру детали, $\beta$ , град	Отклонение размера детали по вырубемому контуру, $\Delta Y/S$
с опорой	Д16АМ, АМг6АМ	20	118...124	0,29...0,37
		8	99...101	0,16...0,2
		5	92...93	0,03...0,06
		3	90...93	0,1...0,13
		1,5	Полного разделения не произошло	
	Д16АТ	20	112...121	0,25...0,33
		8	96...98	0,12...0,14
		5	89...92	0,02...0,05
		3	88...90	0,06...0,08
		1,5	Полного разделения не произошло	
без опоры	Д16АМ, АМг6АМ	6	95...97	0,04...0,11
	Д16АТ	6	92...96	0,04...0,09

заготовки с применением локализации находится в области сдвиговых процессов ( $-0,46 < v_\varepsilon < 0,46$ ), в результате чего обеспечивается повышение качества контура среза детали [6].

Для подтверждения этого в качестве примера в табл. 1 представлены показатели качества контура среза заготовки в зависимости от конструктивных параметров вырубного инструмента применительно к шаблонам с дополнительной и без дополнительной опоры между режущими кромками вырубного инструмента.

Достоверность результатов численных исследований проверена экспериментами с использованием метода деформирования координатных сеток [6]. Для этого координатная сетка наносилась на торцевую поверхность предварительно разрезанных по диаметральной плоскости заготовок, половинки которых составлялись вместе, после чего производилась вырубка детали на том

или ином виде вырубного инструмента.

Далее производился обмер деформированной координатной сетки в очаге разделения, а затем по известной методике [6] расчетным путем определялись главные компоненты деформации и значения показателя деформированного состояния  $v_\varepsilon$  в каждой узловой точке по толщине образца. На рис. 11 показан пример деформированной координатной сетки в очаге разделения заготовок из материала Д16АМ, толщиной 1,5 мм при вырубке на локализованном инструменте с дополнительной опорой.

На фотографии макрошлифа (рис. 11) четко прослеживается пластический сдвиг материала заготовки, момент возникновения скалывающей трещины и будущий профиль среза по высоте (толщине) детали.

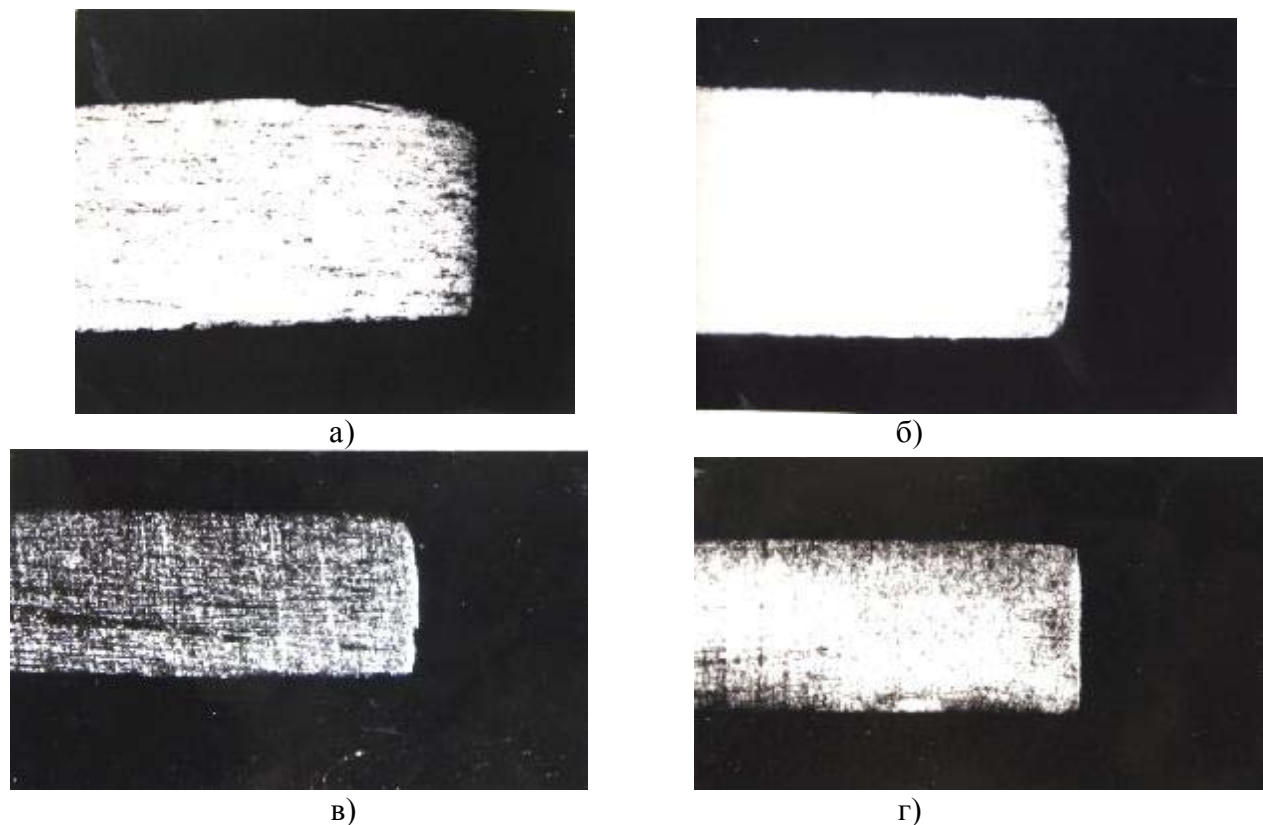
Проведение экспериментальных исследований подтверждают результаты численных исследований с погрешностью не превышающей 10...15%.

Результаты численных и экспериментальных исследований механизма разделения заготовок с локализацией очага разделения материала показали, что для повышения качества вырубки деталей полиуретаном необходимо создать условия деформирования материала заготовки близкие к сдвиговому характеру разделения.

Для подтверждения данных выводов на вырубном инструменте с локализацией очага разделения материала заготовки при оптимальных условиях процесса и параметрах инструмента был проведен раскрой деталей из различных марок материалов с последующим препарированием зоны среза и изготовлением макрошлифов. На фотографиях макрошлифов (x20) видно, что профиль среза контура детали по толщине заго-



**Рис. 11.** Макрошлиф (x20) очага разделения при вырубке детали на локализованном инструменте с дополнительной опорой



**Рис. 12.** Фотографии макрошлифов (x20) зоны среза образцов деталей, полученных на вырубном инструменте с локализацией очага разделения:

- а – при вырубке деталей из материала марки Амг6М,  $S=1,5$  мм на шаблоне с опорной рамкой;
- б – при вырубке деталей из материала марки Д16АТ,  $S=1,5$  мм на локализованном вырубном инструменте с дополнительной опорой;
- в – при вырубке деталей из материала марки МА8М,  $S=1,2$  мм на локализованном вырубном инструменте без дополнительной опоры;
- г – при вырубке деталей из материала марки ОТ4-1,  $S=1$  мм при вырубке с боковым поджатием заготовки

товки (для всех марок материалов – Амг6М, Д16АТ, МА8М, ОТ4-1) имеет высокое качество, вертикальность поверхности среза и минимальную утяжку (рис. 12).

На основании полученных результатов сформулированы оптимальные условия разделения листовых материалов давлением полиуретана и разработаны методические указания для проектирования технологии разделительной штамповки листовых деталей полиуретаном.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование технологических возможностей вырубки деталей из малопластичных материалов эластичной средой // Барвинок В.А., Федотов Ю.В. и др. / Проблемы машиностроения и автоматизации - 1997. №2. С.73-76.
2. Федотов Ю.В. Высокие технологии в обеспечении качества и надежности изделий машиностроения // Труды всероссийской конференции (21-25 июня 2004). самара: СамНЦ РАН, 2004. С. 336-344.
3. Высокоэффективные технологические процессы изготовления элементов трубопроводных и топливных систем летательных аппаратов / В.А. Барвинок, А.Н. Кирилин, А.Д. Комаров и др. М.: Наука и технологии, 2002. 394с.
4. Математическое моделирование контактного взаимодействия эластоплимерной матрицы с листовой заготовкой в разделительных процессах / В.А. Барвинок, Ю.В. Федотов, Е.Г. Громова и др. // “Актуальные проблемы трибологии”. Сб. трудов международной научно-технической конференции. 2007. М.: Машиностроение, 2007 г., в 2-х томах. Т.1. С.93-104.
5. Математическое моделирование контактного взаимодействия эластичного инструмента в процессах ротационного раскрытия листовых деталей изделий машиностроения / В.А. Барвинок, Ю.В. Федотов, Е.Г. Громова и др. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. №1. С. 128-132.
6. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л.:Машиностроение, 1972, 360 с.



**SHEET MATERIALS SEPARATING MECHANISM RESEARCH  
DURING DEFERENT CUTTING METHODS BY POLYURETHANES**

© 2010 U.V. Fedotov<sup>1</sup>, V.K. Moiseev<sup>1</sup>, A.P. Shumkov<sup>1</sup>, S.G. Rijakov<sup>2</sup>, I.J. Fedotova<sup>1</sup>, E.G. Gromova<sup>1</sup>

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

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

Sheet materials separating mechanism by polyurethanes pressure during deferent cutting tools using is researched. Cutting tool optimal parameters are determinate by mathematical and experimental research. Optimal parameters provide shear nature of sheet blank separating process, eon ipso provides high quality of details. Mathematical research results are supported by experiments using coordinate net method.

Key words: Sheet materials, polyurethanes pressure, cutting tools.

---

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

*Victor Moiseev, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: fla@ssau.ru*

*Alexey Shumkov, Graduate Student.*

*Stanislav Rizhakov. Chairman of the Board of Directors*

*Irina Fedotova, Graduate Student.*

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