

## КАЧЕСТВО ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ, ШТАМПУЕМЫХ ПОЛИУРЕТАНОМ В ОТКРЫТОМ ОБЪЁМЕ

© 2009 Н. А. Ефимов<sup>1</sup>, Е. А. Ефимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

Изложена эффективность процессов вырезки листовых деталей полиуретаном открытым и полукрытым способами. Приведены постановка и результаты численных и экспериментальных исследований данных процессов, влияния неравномерной удельной нагрузки полиуретанового инструмента на плоскостность штампуемых деталей. Разработана эффективная технология штамповки и технологические рекомендации.

*Штамповка, полиуретан, открытый объём, листовые детали, плоскостность, трение, качество, исследования, смазка, технология.*

Листовые детали из металлических и неметаллических материалов составляют значительный производственный объём предприятий авиастроения, судостроения, локомотивного хозяйства и других предприятий общего машиностроения. При этом листовые детали имеют габаритные размеры от нескольких миллиметров до 2-4 метров с различной по сложности конфигурацией внешнего и внутреннего контура и наличием разнообразных по форме, размерам и количеству конструктивных и технологических отверстий. Традиционные технологии изготовления таких деталей требуют последовательного применения различного специализированного оборудования, технологической оснастки и отличаются многооперационностью, большим объёмом доводочных работ и высокой трудоёмкостью.

Весьма эффективным, экономически выгодным и легко внедряемым методом изготовления листовых деталей является штамповка деталей эластичной средой - полиуретаном. Особенно ценен метод штамповки полиуретаном для опытного, ремонтного и мелкосерийного производства, характеризуемого частой сменяемостью изделий и сжатыми сроками подготовки производства. Полиуретан - синтетический резиноподобный материал, обладающий высокой эластичностью и износостойкостью. Этим методом выполняются самые разнообразные разделительные, формоизменяющие, калибровочные и комбинированные операции при штамповке деталей как простой, так и сложной конфигурации из конструкционных сталей толщиной до 1,5-2,0 мм, а из цветных металлов - толщиной до 3-4 мм. Основное достоинство этих процессов - значительное снижение металлоемкости и стоимости технологической оснастки за счет её упрощения. Вместо трудоёмких, металлоёмких и дорогих инструментальных штампов необходимы лишь стальные вырезные шаблоны, повторяющие контур деталей, и универсальный контейнер с полиуретаном. Стоимость данной технологической оснастки составляет (2-10) % от стоимости соответствующих инструментальных штампов. Из практики внедрения штамповки листовых деталей полиуретаном в производство известно, что процесс выгоден при годовой программе изготовления деталей до 8-25 тысяч штук в зависимости от сложности деталей [1].

По виду нагружения заготовки рабочим давлением различают штамповку эластичной средой в замкнутом (до 1000 МПа) и незамкнутом - открытом (до 300 МПа) объёмах, т.е. закрытый, полужакрытый, полукрытый и открытый способы штамповки (рис. 1). Наиболее полно изучена и широко применяется на производстве штамповка деталей полиуретаном в замкнутом объёме. В этом случае полиуретановая пластина 1 заключена в ме-

таллический контейнер 2 (рис. 1, а), представляющий собой толстостенный цилиндр, который крепится на верхней или нижней плите прессы. На противоположной плите прессы устанавливается опорная плита 5. В случае верхнего расположения контейнера на опорной плите 5 размещается вырубной шаблон 4, на котором укладывается заготовка 3. При опускании контейнера в замкнутом объёме создаётся равномерное гидростатическое давление и производится разделение материала по режущим кромкам вырезного шаблона. Детали получают с достаточно высокой точностью 9-12 квалитет (3-5 класс точности) и качеством поверхности среза, т.е. кромок деталей. Возможность создания высоких рабочих давлений позволяет за один ход прессы вырубить детали максимальной толщины по контуру, пробить все отверстия и пазы, отформовать рифты, пуклевки и другие выштамповки. Недостатком закрытого

способа штамповки является наличие высокопрочного металлического контейнера, ограничивающего размеры вырубаемых деталей. На производстве требуется зачастую целый ряд контейнеров с различными диаметрами внутренней полости для достижения необходимого рабочего давления, что является существенным недостатком в сравнении с техническим оснащением при штамповке в открытом объёме (рис. 1, б, в, г) [2, 3, 4]. Преимуществами открытых способов штамповки являются:

- отсутствие высокопрочного, металлоёмкого контейнера;
- расширение технологических возможностей штамповки деталей из ленты, полосы;
- возможность выполнения пошаговой штамповки длинномерных деталей;
- возможность выполнения локальной штамповки на крупногабаритных деталях.

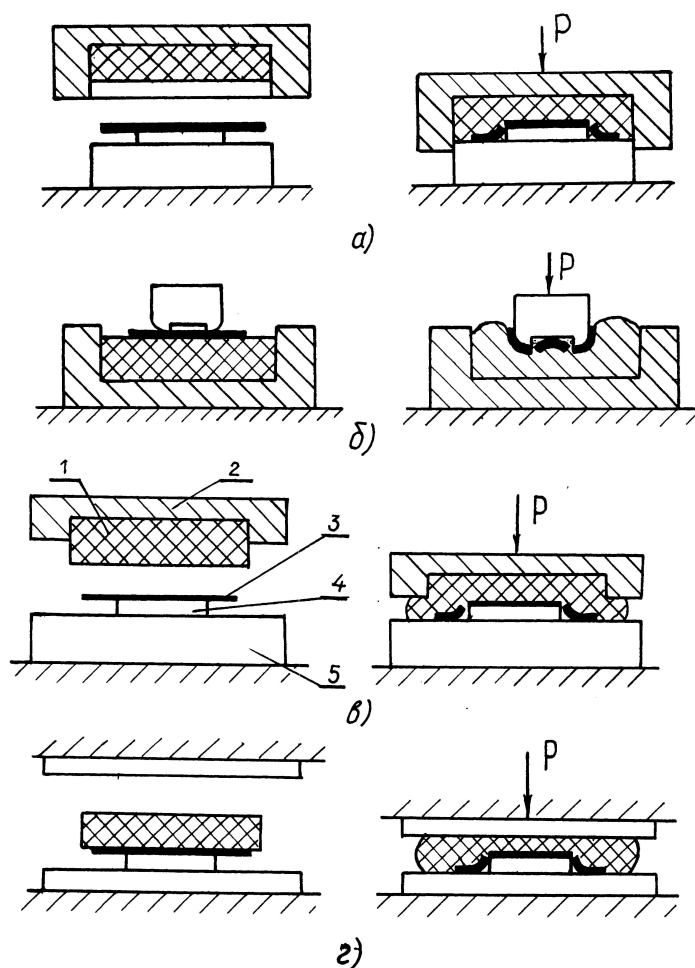


Рис. 1. Схемы способов штамповки деталей эластичной средой:  
а) закрытый; б) полужакрытый; в) полуоткрытый; г) открытый

В связи с этим при открытых способах штамповки применяется менее мощное прессовое оборудование, требующее меньших капитальных вложений.

Известно, что при осадке полиуретана в незамкнутом объеме в зоне контакта с заготовкой и технологическими плитами возникает неравномерная нормальная и касательная нагрузка, т.к. распределение нормального контактного давления носит пиковый характер с максимумом в центре [2]. Вследствие этого заготовка испытывает неравномерные упруго-пластические деформации. После разгрузки в отштампованных деталях возникают различные остаточные деформации, которые могут изменить их плоскую конфигурацию, т.е. детали могут депланировать за допустимые пределы, установленные техническими требованиями к листовым деталям.

Были проведены экспериментальные и численные исследования влияния неравномерной удельной нагрузки полиуретанового инструмента на плоскостность листовых деталей, штампуемых открытым и полукоткры-

тым способами. Эксперименты проводились с листовыми заготовками из металлов 0,8 КП и АМг6М толщиной до  $S=1,5$  мм и эластичным инструментом из полиуретана марки СКУ-7Л твердостью 85 единиц по Шору А с оптимальными размерами [3, 4]. Нагружение производилось при сухом трении и со смазкой поверхности контакта заготовки с полиуретаном минеральным маслом с кинематической вязкостью  $(5-50) \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при 50°С рабочим давлением до 150 МПа, соответствующим давлению вырезки.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что после снятия нагрузки плоскостность листовых деталей толщиной менее 1,0 мм нарушается при штамповке без смазки. На поверхности контакта заготовки с полиуретаном остаются лучеобразные следы от сдвигающей касательной нагрузки, а детали приобретают покоробленную и вогнутую форму. При этом величина прогибов увеличивается с уменьшением толщины заготовки.

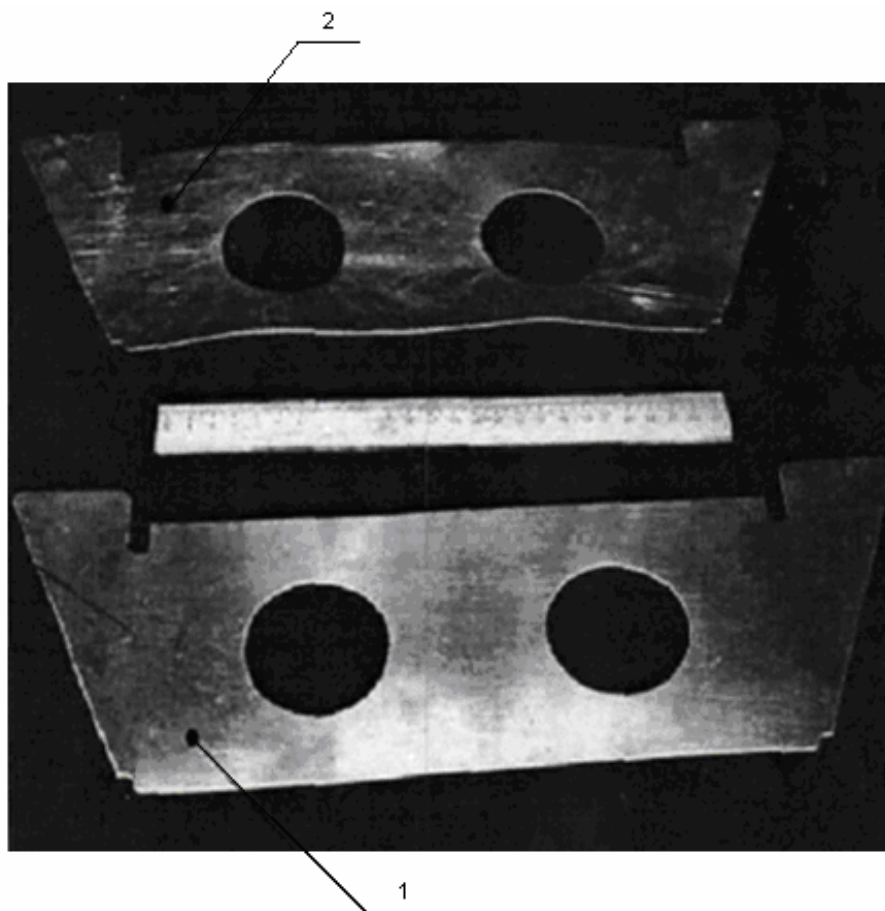


Рис. 2. Детали из АМг6М толщиной  $S=0,5$  мм, вырезанные полиуретаном полукоткрытым способом: 1- со смазкой; 2- без смазки.

В качестве примера на рис. 2 представлены качественная длинномерная деталь 1 из АМг6М толщиной  $S=0,5$  мм, вырезанная пошаговой штамповкой полуоткрытым способом оптимальной с предварительной смазкой контактной с полиуретаном поверхности заготовки и деталь 2, вырезанная без смазки, с видимой деформацией и следами касательной сдвигающей нагрузки.

Для численных исследований применялась математическая модель, построенная на основании общих соотношений нелинейной механики деформирования твердого тела. Модель опирается на вариационное уравнение Лагранжа, ассоциированный закон пластического течения и нелинейные геометрические соотношения между тензором Альманси и вектором перемещения. В уравнениях состояния использована поверхность нагружения Мизеса с нелинейным упрочнением изотропного материала. Нагружение тела считается квазистатическим. При этом массовые и инерционные силы не учитываются. Для таких процессов можно записать вариационное уравнение Лагранжа, соответствующее принципу возможных перемещений:

$$\int_V T : \nabla \delta u dV - \int_{\Omega} P_n \delta u d\Omega - \int_{\Omega} P_t \delta u d\Omega = 0, \quad (1)$$

где  $P_n$  – силы, действующие по нормали  $n$  и касательной  $t$  к поверхности тела  $\Omega$ ;  $\delta$  – знак вариации;  $T$  – тензор напряжения Коши;  $V$  – объем, занимаемый телом;  $\nabla$  – набла-оператор Гамильтона;  $:$  – двойное скалярное произведение;  $u$  – вектор перемещения.

Для решения матричных уравнений применялся шаговый метод по нагрузке с внутренним итерационным циклом. Решение задач производилось методом конечных элементов. В качестве конечного элемента использовался совместный девятиузловой изопараметрический элемент лагранжевого семейства. Алгоритм численного решения технологических задач даёт возможность проследить поэтапно весь путь деформирования тела с учётом сжимаемости и изменение его геометрии от начального до конечного состояния, учесть характер силового поля и его изменение во времени, учесть свойства материалов и конструктивные параметры техно-

логической оснастки, а также движение контактирующих поверхностей в процессе деформирования с трением. Для определения сил трения, возникающих на контактирующих поверхностях, использовался закон Амонтона-Кулона. В качестве коэффициента трения для полиуретана использовались известные эмпирические зависимости Е. И. Исаченкова при сухом трении:

$$K_{TP} = 1,595 \cdot 10^{-1} \frac{T_B^{0,876}}{g} + 1,52 \cdot 10^{-3} T_B^{0,915} \quad (2)$$

и А. Д. Комарова при смазке:

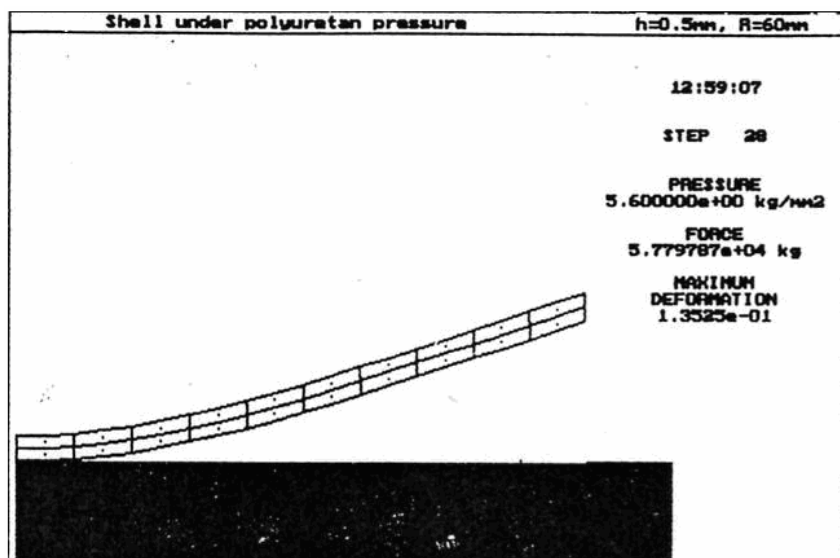
$$K_{TP} = \frac{2,11}{6,2 + g} + 0,00364, \quad (3)$$

где  $g$  – нормальное давление;  $T_B$  – твёрдость полиуретана в ед. по Шору А [1].

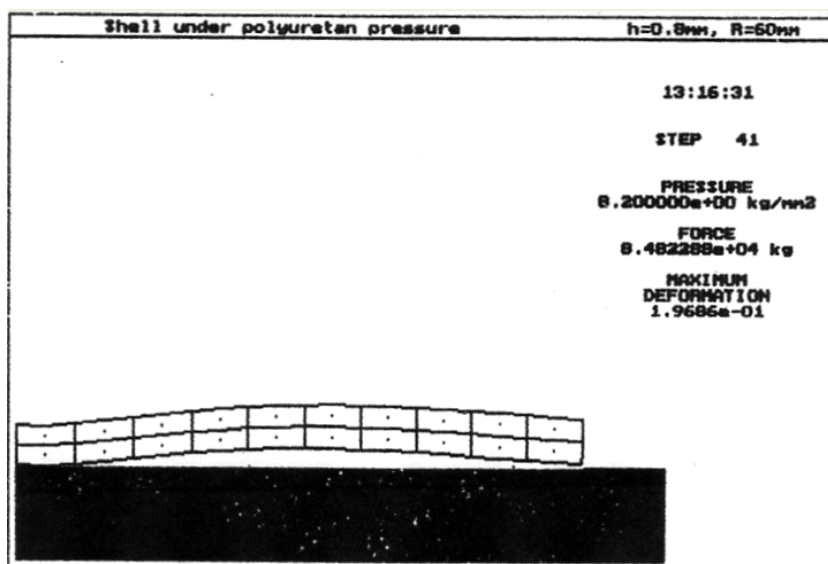
По результатам численных исследований установлено, что при толщине заготовок менее 1,0 мм плоская конфигурация отштампованных деталей существенно нарушается, детали приобретают чашеобразную форму (рис. 3, а, б). При уменьшении коэффициента трения до значений, соответствующих наличию смазки на определённой части поверхности контакта полиуретанового инструмента и заготовки, детали остаются плоскими, что полностью подтверждает результаты экспериментальных исследований (рис. 3, в).

Таким образом, выполнение процессов штамповки – вырезки листовых деталей из металла толщиной до 1,0 мм полиуретаном открытым и полуоткрытым способами следует производить при наличии смазки кинематической вязкостью  $35 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с и более при температуре 50°С на центральной части поверхности контакта заготовки и полиуретанового инструмента в пределах (0,7-0,8), что позволяет изготавливать качественные листовые детали, удовлетворяющие техническим условиям [5].

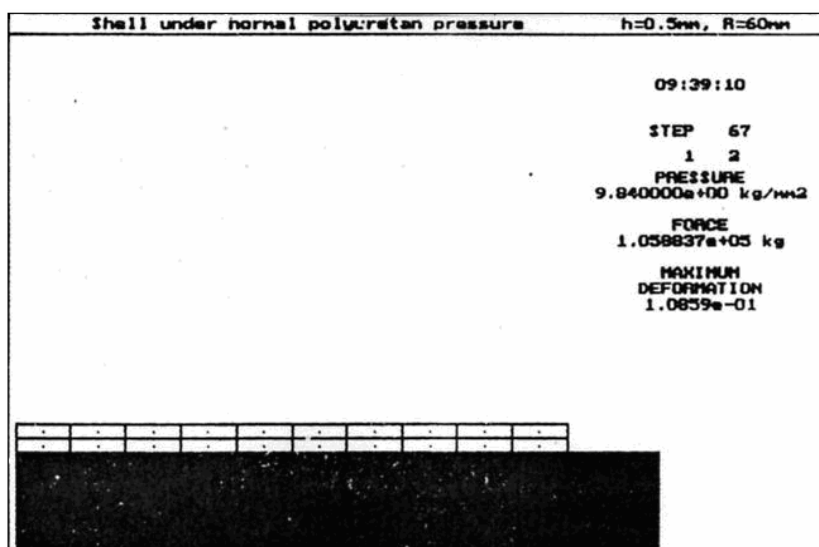
В результате экспериментальных и численных исследований установлено влияние неравномерной удельной нагрузки полиуретанового инструмента на плоскостность отштампованных листовых деталей. Определены меры, исключающие нарушение плоскостности, и разработаны соответствующие технологические рекомендации.



а)  $S=0,5$  мм



б)  $S=0,8$  мм



в)  $S=0,5$  мм

Рис. 3. Конфигурация отштампованных листовых деталей из АМг6М:  
а), б) без смазки; в) со смазкой

### Библиографический список

1. Комаров А. Д., Романовский В. П. Вырезка деталей полиуретаном. - Л.: ЛДНТП, 1986. - 36 с.
2. Барвинок В. А., Ефимов Н. А., Комаров А. Д., Федотов Ю. В. Штамповка длиномерных листовых деталей полиуретаном. - Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. №10. - С. 14-17.
3. Авт. свид. №1741952 СССР, МКИ В21D 28/18. Штмп для вырубки-пробивки/Ефимов Н. А., Федотов Ю. В., Кравчен-

ко В. Е. и др.

4. Авт. свид. №1760682 СССР, МКИ В21D 28/18. Устройство для вырубки-пробивки деталей из листового материала эластичной средой в открытом объеме/Ефимов Н. А., Федотов Ю. В., Щеголеватых В. Д.

5. Патент 2280524 РФ, МПК В21D 28/18. Способ вырубки-пробивки деталей из листового материала эластичной средой в открытом объеме/Ефимов Н. А.

### References

1. Komarov A. D., Romanovsky V. P. Blanking of articles by polyurethane. L.: LHSTE, 1986, 36 pp.
2. Barvinok V. A., Yefimov N. A., Komarov A. D., Fedotov Yu. V. Forging of long sheet articles by polyurethane // Press forging 1995, No. 10 pp. 14-17.
3. Author's certificate 1741952 USSR, IPC

Â21D 28/18. Blanking and piercing press tool.

4. Author's certificate 1760682 USSR, IPC Â21D 28/18. Device for flanking and piercing of sheet articles by an elastic material in the open volume.

5. Patent 2280524 Russian Federations, IPC B21D 28/18. Method of blanking and piercing sheet articles by an elastic material in the open volume.

## QUALITY OF SHEET ARTICLES FORGED BY POLYURETHANE IN THE OPEN VOLUME

© 2009 N. A. Yefimov<sup>1</sup>, Ye. A. Yefimov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University

The paper shows the efficiency of blanking sheet articles by polyurethane using open and semi open methods. The results of numerical and experimental analysis of these processes are given. The influence of non-uniform unit load of a polyurethane tool on the plane ness of the articles forged is shown. An efficient forging technology and technological recommendations are developed.

*Forging, polyurethane, open volume, sheet articles, plane ness, friction, quality, analysis, lubrication, technology.*

### Информация об авторах

**Ефимов Николай Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрический железнодорожный транспорт», Самарский государственный университет путей сообщения; e-mail: yuefimov@mail.ru. Область научных интересов: исследование технологических процессов штамповки листовых деталей изделий машиностроения.

**Ефимов Евгений Александрович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, Самарский государственный аэрокосмический университет; e-mail: efimov.nikolai@mail.ru. Область научных интересов: математическое моделирование технологических процессов.

**Yefimov Yevgeny Alexandrovitch**, candidate of physical and mathematical science, associate professor of the department of higher mathematics, Samara State Aerospace University, e-mail: yeyefimov@mail.ru. Area of research: mechanics of deformable rigid bodies, mathematical modeling of inelastic body shaping processes.

**Yefimov Nicolay Alexandrovitch**, candidate of technical science, associate professor of the department «Electric railway transport» of the Samara State Communications University, e-mail: efimov.nikolai@mail.ru. Area of research: plastic metal working, forging by polyurethane.