

УДК 621.7.04

АНАЛИЗ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ВЫРУБКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ЭЛАСТИЧНОЙ СРЕДОЙ

© **Мироненко Владимир Витальевич**¹, e-mail: mironenko_vv@istu.edu;
Ледовских Екатерина Владимировна¹, e-mail: ledovskih.katya@yandex.ru;
Осипов Сергей Александрович², e-mail: osipov_sa@istu.edu;
Ершов Александр Алексеевич³, e-mail: eaa@plm-ural.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет. Россия, г. Иркутск

² Иркутский государственный технический университет. Россия, г. Иркутск

³ ГК «ПЛМ Урал». Россия, г. Екатеринбург

Статья поступила 04.10.2016 г.

Проведено моделирование совмещенного процесса формообразования и вырубки эластичной средой. Проанализировано использование при моделировании двух моделей разрушения. Представлены результаты натурных экспериментов по проведенному моделированию. Сделан вывод о целесообразности использования модели вязкого разрушения при моделировании вырубки.

Ключевые слова: моделирование процессов формообразования; эластоформование; вырубка эластичной средой.

В современном мелко- и среднесерийном штамповочном производстве процессы вырубки элементов детали или контура детали и пробивки отверстий эластичной средой, совмещенные с операциями формообразования, все более широко применяются в связи с низкой стоимостью и простотой оснастки, короткими сроками запуска и освоения производства. Для анализа поведения металла в ходе выполнения этих процессов широко используется технологический инженерный анализ с помощью виртуального моделирования процесса в программных комплексах.

Для определения реалистичного поведения материала в процессе вырубки необходимо создание адекватной модели разрушения материала. В статье рассматриваются две модели разрушения и приведены примеры их использования в виртуальном и натурном экспериментах. Для технологического моделирования использовали программный комплекс PAM-STAMP французской фирмы ESI Group.

Одна из моделей, которая используется при численном моделировании, – модель разрушения, основанная на удалении элементов по заданному критерию. Если в элементе критерий, определенный пользователем, превышает заданное значение, он исключается из расчета, но связи с оставшимися элементами не теряются. Это позволяет более точно моделировать образование трещины (рис. 1). В качестве заданных критериев для удаления элементов чаще всего используют значение утонения или степень пластической деформации.

Для проверки работоспособности модели разрушения по критерию допускаемой степени пластической деформации рассмотрено моделирование процесса вырубки в жестком штампе детали типа «уголок» из алюминиевого сплава Д16АМ толщиной 1,2 мм. Общий вид детали и заготовки представлен на рис. 2.

Параметры модели приведены ниже:

- модуль Юнга 70 ГПа;
- коэффициент Пуассона 0,32;
- плотность 2,6 кг/мм³;
- коэффициенты анизотропии $r_0 = 0,77$; $r_{45} = 0,88$; $r_{90} = 0,72$ (для листового материала определяются по трем образцам, вырезанным вдоль и поперек направления прокатки, а также под углом 45°);

- пластическая часть кривой течения задана через функцию *Krupkowsky Law* [3] (учитывает деформационное упрочнение и связывает эквивалентные напряжения с пластической деформацией): $\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n$. Константы данной функции для сплава Д16АМ: $K = 0,312$ ГПа, $n = 0,21$; $\varepsilon_0 = 0,0003$ (K – математическая постоянная данного материала [3]; n – коэффициент деформационного упрочнения; ε_0 – деформация отсчета начала пластических деформаций; ε_p – переменная пластической деформации).

Для моделирования процесса вырубки заготовки создана модель вырубного штампа (рис. 3). Процесс вырубки смоделирован с помощью пере-разбиения элементов сетки и атрибута удаления элементов по критерию допускаемой степени пластической деформации не более 25% (рис. 4 и 5). В результате была доказана работоспособность модели разрушения по заданному критерию на острых кромках оснастки.

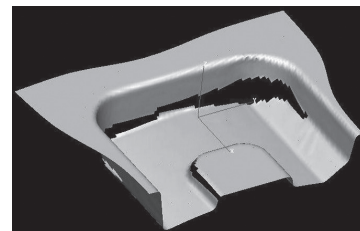


Рис. 1. Визуальное представление модели разрушения с удалением элементов

В качестве примера использования модели разрушения по критерию допустимой степени пластической деформации, равному 20%, рассмотрено моделирование совмещенного процесса пробивки отверстия и формообразования эластичной средой давлением 22,5 МПа для детали типа «окантовка» из сплава Д16АМ толщиной 1 мм. Параметры материала модели заготовки приведены выше. При моделировании процесса заготовка рассчитана по методике, описанной в статье [2] (рис. 6).

Процесс формообразования детали разбит на четыре перехода. Вырубка отверстия происходит на втором переходе. После второго и третьего переходов проводится отжиг. С целью упрощения расчета при моделировании отжиг учтен упрощенно путем обнуления деформаций и напряжений в заготовке. Модели оснастки для выполнения переходов представлены на рис. 7.

Коэффициент трения между оснасткой и заготовкой, заготовкой и прижимом составляет 0,1 (со смазкой ЦИАТИМ*). Результаты моделирования показаны на рис. 8 (значения максимальной деформации отмечены красным цветом).

При проведении натурального эксперимента на прессе эластоформования с разверткой детали из сплава Д16АМ на первом переходе произошел разрыв в зоне радиусного перехода от стенки к фланцу, несмотря на то, что моделирование процесса не выявило разрушения (рис. 9).

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- выбранный способ моделирования разрушения недостаточно учитывает локализацию деформации вне острых кромок;
- трение между заготовкой и поверхностями матрицы и прижима оказалось достаточно большим, что ограничило перемещение фланца и привело к образованию трещины.

В повторном эксперименте величина трения снижена до 0,05 вследствие использования полиэтиленовой пленки со смазкой ЦИАТИМ между заготовкой и поверхностями оснастки и прижима. В этом случае на первом переходе было обеспечено необходимое перемещение фланца, и вытяжка произошла на заданную глубину без разрушения. На втором переходе произведена пробивка отверстия в отбортовке. Третий и четвертый переходы прошли без появления дефектов. В результате была получена деталь требуемой формы (рис. 10).

Для устранения недостатков описанной выше модели разрушения предложено использовать модель разрушения, удаляющую элементы исходя из более сложного закона. Такой закон должен учитывать накопительно-деформационное разрушение: после инициации трещины могут соединиться в группы, если последующая нагрузка имеет сдвиговой характер. Т.е. при деформации недостаточно учитывать критические значения напряжений в одной точке. Их необходимо определять на некоторой длине, которая является характерным свойством микроструктуры для каждого материала. Этот закон лежит в основе модели вязкого разрушения ESI–Wilkins–Kamoulakos [3]. Удаление элементов производится тогда, когда на заданном критическом расстоянии при определенной скорости деформации превышает коэффициент (артикул повреждения $D_{EWK} = \int W_1 W_2 \epsilon_p$, где W_1 – гидростатическое напряжение; W_2 – асимметричная деформация; ϵ_p – скорость деформации), зависящий от интенсивности внутренних напряжений и асимметричных деформаций [3].

Для проверки работоспособности этой модели было произведено моделирование пробивки отверстия в стальной заготовке в жестком штампе с использованием объемных гексагональных элементов. В конечно-элементной сетке по толщине заготовки использовали 24 элемента (рис. 11).

Результаты моделирования показали, что при вырубке происходит локализация напряжений в заготовке в районе воздействия острых кромок режущего инструмента, которые постепенно возрастают, превышая предел упругости материала заготовки. Это приводит к перемещению нейтрального слоя в противоположных направлениях в отделяемой и основной частях заготовки, и далее происходит скалывание и разделение частей заготовки (рис. 12).

Результаты моделирования пробивки отверстия в стальной заготовке сходятся с теоретическими исследованиями, описанными В.П.Романовским и А.Ю.Аверкиевым [4, 5].

Для подтверждения результатов использования модели разрушения ESI–Wilkins–Kamoulakos выполнено моделирование процесса формообразования эластичной средой детали типа «диафрагма» толщиной 1 мм из сплава Д16АМ (рис. 13). В процессе формообразования происходят формовка и обрезка борта по контуру, формовка и пробивка отверстия отбортовки. Материал модели заготовки Д16АМ задан теми же параметрами, что и в первом примере.

* ЦИАТИМ – антифрикционная многоцелевая смазка, разработанная в СССР. Представляет собой смесь маловязкого нефтяного масла, загущенного стеаратом лития, содержит антиокислительную присадку, обладает морозостойкими и тугоплавкими свойствами.

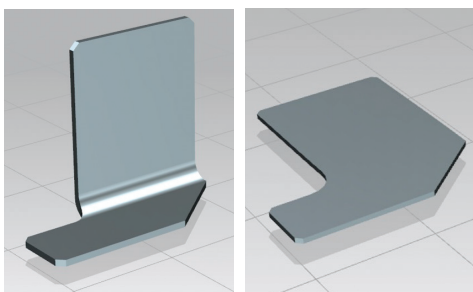


Рис. 2. Общий вид детали и заготовки

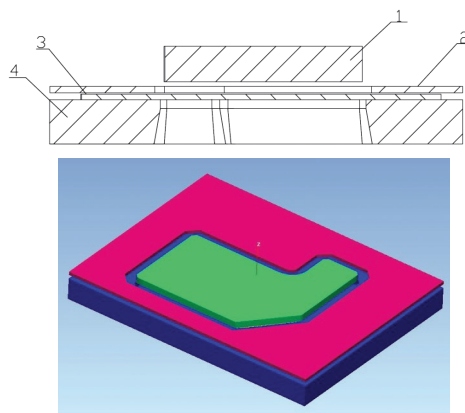


Рис. 3. Модель вырубного штампа: 1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – заготовка; 4 – матрица

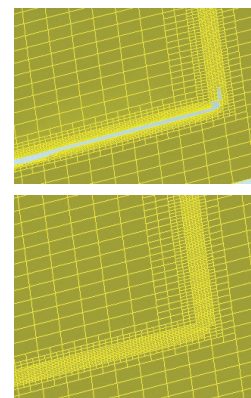


Рис. 4. Переразбиение элементов сетки и их удаление

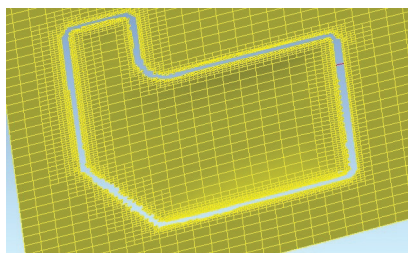


Рис. 5. Полученный контур заготовки для детали типа «уголок»

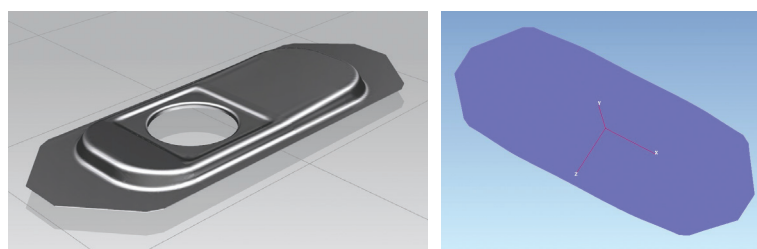


Рис. 6. Модель детали типа «окантовка» и заготовки для нее

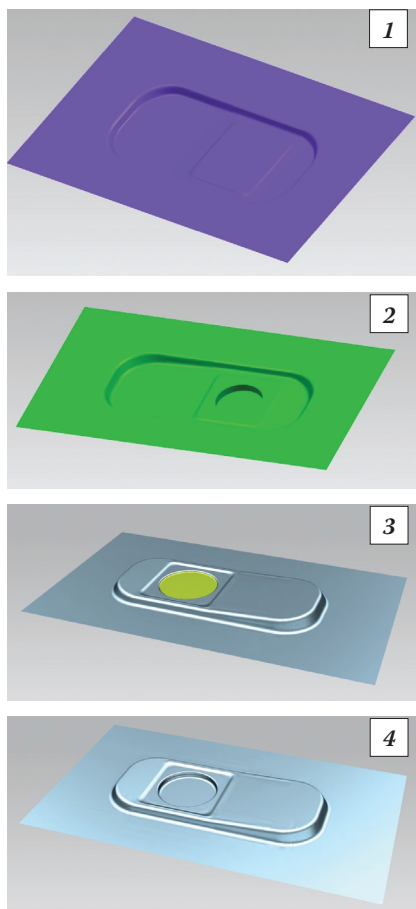


Рис. 7. Модели оснастки для выполнения переходов:

1 – матрица на неполную глубину детали; 2 – матрица для пробивки отверстия; 3 – пуансон-матрица на неполную глубину отбортовки; 4 – пуансон для окончательного формообразования детали

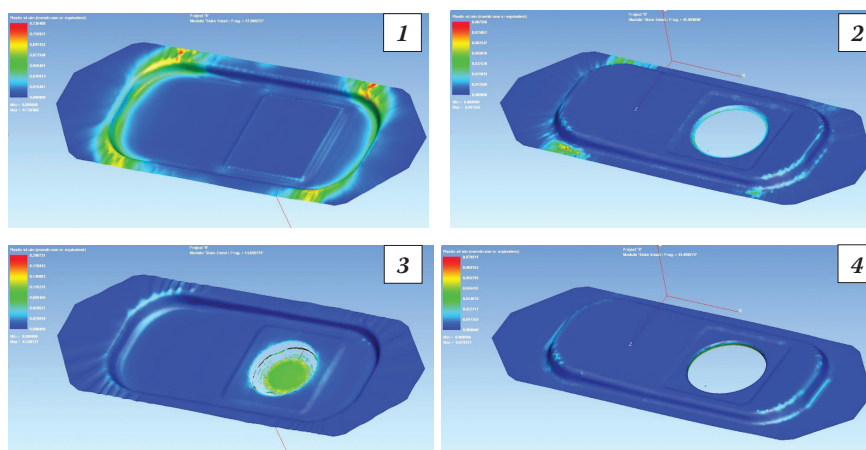


Рис. 8. Распределение пластических деформаций в заготовке при максимальной деформации: 1 – 13%; 2 – 20%; 3 – 9%; 4 – 8%

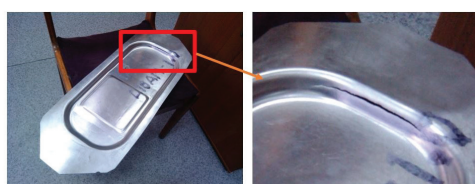


Рис. 9. Результаты первого натурального эксперимента

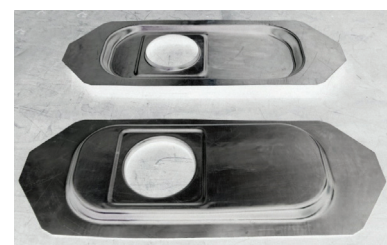


Рис. 10. Отформованные детали

В конструкции оснастки предусмотрен нож для обрезки контура борта по высоте и нож для пробивки отверстия в конце формообразования (рис. 14).

Заготовка детали имеет припуски по контуру борта и отверстия под шпильки для базирования (рис. 15).

В связи с использованием складкодержателя в процессе формовки происходит образование ребра жесткости, которое препятствует



Рис. 11. Конечно-элементная сетка заготовки на ее торце

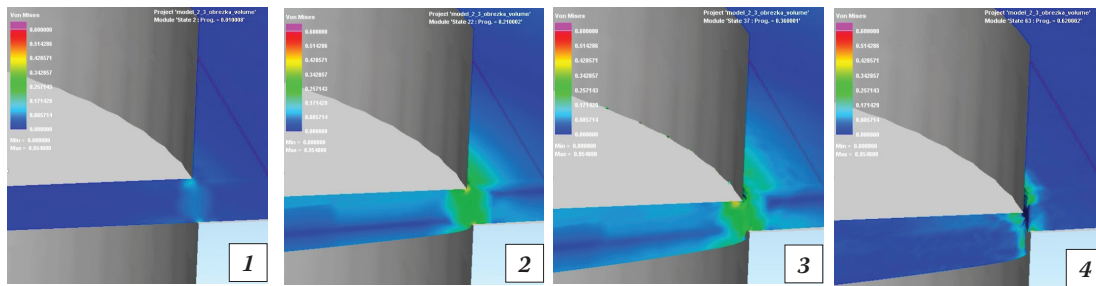


Рис. 12. Результаты моделирования процесса вырубki в штампах; максимальные напряжения – 450 МПа (красный цвет): 1 – упругая стадия; 2 – пластическая стадия; 3 – начало скалывания; 4 – отделение частей заготовки

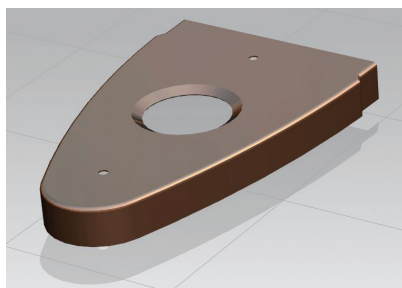


Рис. 13. Проверка модели разрушения ESI-Wilkins-Kamoulakos на детали типа «диафрагма»

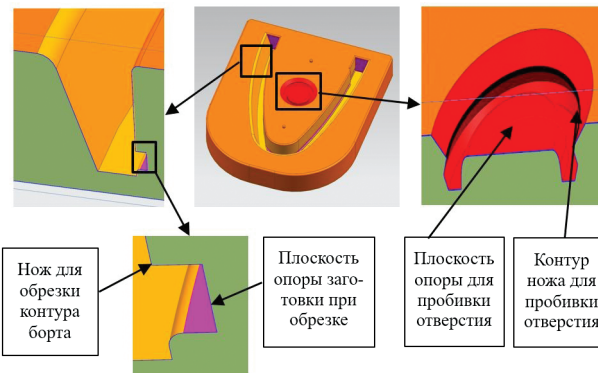


Рис. 14. Оснастка для формoобразования и обрезки борта и отбортовки

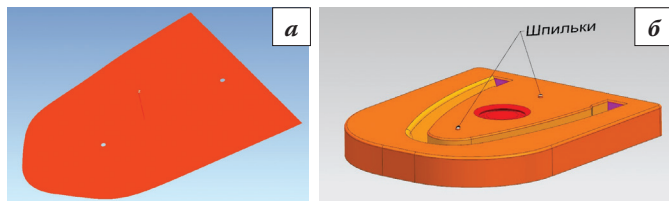


Рис. 15. Развертка с отверстиями для шпилек и положение шпилек на оснастке: а – заготовка с припусками; б – шпильки на оснастке

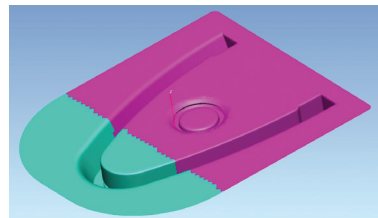


Рис. 16. Распределение коэффициента трения по оснастке:
 ■ – коэффициент трения 0,1 (со смазкой ЦИАТИМ);
 ■ – коэффициент трения 0,05 (с пленкой и смазкой ЦИАТИМ)

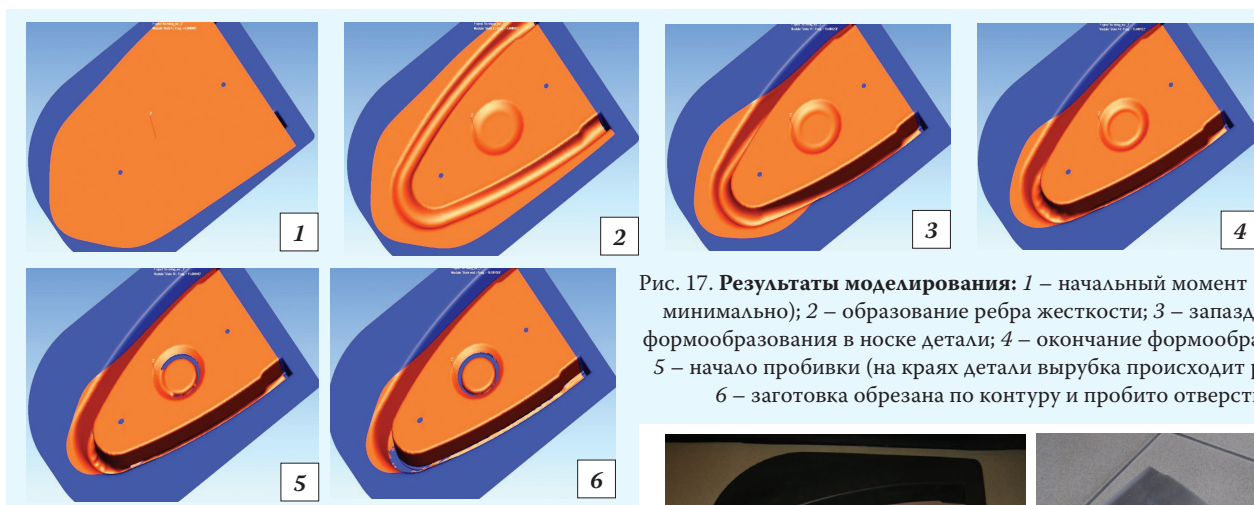


Рис. 17. Результаты моделирования: 1 – начальный момент (давление минимально); 2 – образование ребра жесткости; 3 – запаздывание формoобразования в носке детали; 4 – окончание формoобразования; 5 – начало пробивки (на краях детали вырубка происходит раньше); 6 – заготовка обрезана по контуру и пробито отверстие

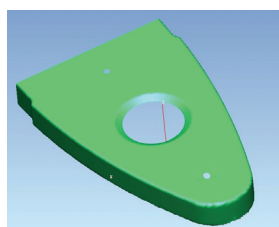


Рис. 18. Геометрия детали после формoобразования и обрезки



Рис. 19. Оснастка для формoобразования и отформованная деталь

образованию гофр. Так как в носовой части детали ребро имеет меньший радиус кривизны, чем в боковых частях, то возникает избыточная жесткость, что приводит к запаздыванию движения металла по складкодержателю. Для смягчения этого эффекта применено зональное распределение коэффициента трения (в носике детали на оснастке трение меньше, чем в остальной части, рис. 16).

Результаты моделирования с использованием модели разрушения ESI–Wilkins–Kamoulakos показывают, что формообразование идет без образования дефектов при скольжении заготовки по складкодержателю, с дальнейшей обрезкой основного контура и пробивкой отверстия (рис. 17). В результате моделирования была определена геометрия детали (рис. 18).

Проведение натурного эксперимента формообразования и обрезки детали на оснастке, изготовленной по модели разрушения ESI–Wilkins–Kamoulakos, имеет хорошую сходимость с результатами реальных экспериментов по обрезке и пробивке отверстий эластичной средой (рис. 19).

Заключение. Таким образом, найдена рациональная модель вязкого разрушения материала, которая показала хорошую сходимость с натурными испытаниями. Это дает возможность применять виртуальное моделирование в процессах вырубки эластичной средой, а также помогает изготавливать оснастку с использованием вырубных и обрезных элементов для деталей разной номенклатуры. Применение вырубных элементов в формообразующей оснастке дает возможность объединять операции обрезки и формообразования для любых материалов, что упрощает технологические процессы и снижает себестоимость изготовления деталей в мелко- и среднесерийном производствах.

Статья подготовлена по материалам работ, выполненных при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов

изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Библиографический список

1. РДМУ 95-77. М. : НИИПТМАШ, 1978. Электронный ресурс <http://mashinport.ru/gost.php?id=1494> (дата обращения 03.10.2016).
2. МIRONENKO В.В., ЧЕСЛАВСКАЯ А.А. Расчет разверток деталей летательных аппаратов с учетом изменения толщины листа в результате формовки // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2014. Т. 1, № 1 (17). С. 13–17.
3. PAM-STAMP 2012 User's Guide, ESI Group, 2012. 960 p.
4. РОМАНОВСКИЙ В.П. Справочник по холодной штамповке. М. : Машиностроение, 1971. 782 с.
5. АВЕРКИЕВ Ю.А., АВЕРКИЕВ А.Ю. Технология холодной штамповки. М. : Машиностроение, 1989. 304 с.
6. БЕЛЫХ С.В., ФЕОКТИСТОВ С.И., СТАНКЕВИЧ А.В. и др. Использование специального программного обеспечения для анализа технологии изготовления деталей летательных аппаратов из листового материала: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. и Междунар. молодежной школы-семинара «Фундаментальные исследования в области создания инновационных технологий и новых материалов, направленных на развитие авиационных и космических комплексов. Достижения фундаментальной науки и образования – в инновационные технологии» (Комсомольск-на-Амуре. 12–16 мая 2015 г.). Комсомольск-на-Амуре : КНАГТУ, 2015. С. 86–90.
7. ЧЕСЛАВСКАЯ А.А., МИРОНЕНКО В.В., КОЛЕСНИКОВ А.В. и др. Выбор рационального метода формообразования детали средствами инженерного анализа с применением CAE-систем // Металлург. 2014. № 12. С. 24–31.
8. ДАЕВА Н.Н. Теоретические и экспериментальные исследования процессов разделения листового металла эластичными средами // Изв. вузов. Машиностроение. 2011. № 6. С. 38–43.
9. AKSENOVA S.A., CHUMACHENKO E.N., KOLESNIKOV A.V., OSIPOV S.A. Determination of optimal gas forming conditions from free bulging tests at constant pressure // J. of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 217. P. 158–164.

ANALYSIS OF COMBINED PROCESS OF FORMING AND BLANKING OF SHEET DETAILS BY ELASTIC MEDIUM

© Mironenko V.V., Ledovskikh E.V., Osipov S.A., Ershov A.A.

The simulation of the combined process of forming and blanking by elastic medium is carried out. The analysis of the use in the simulation of the two models of destruction is made. Results of field experiments to the simulations performed are presented. The conclusion about expediency of using the model ductile fracture at the blanking simulation is given.

Keywords: modeling forming processes; elastoforming; blanking by elastic medium.