DOI: 10.18721/JEST.240214
УДК 621.7.044

К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫТЯЖКИ-ФОРМОВКИ СФЕРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ОСОБО ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ

В конечно-элементном программном комплексе LS-DYNA разработаны компьютерные модели процессов вытяжки сферических деталей из тонколистового металла в жестком штампе и методом электрогидроимпульсной вытяжки. Показана применимость предлагаемого закона давления для инженерных расчетов. Проводилась сравнительная оценка данных технологий, а также основных факторов, приводящих к возникновению брака при ЭГИ вытяжке-формовке. В расчетах импульсной вытяжки варьировались общая длительность импульса давления, относительное время нарастания давления и величина амплитудного давления. Конечно-элементный расчет позволил оценить заполняемость формоизменяющей матрицы, вероятность складкообразования и разрушения материала, влияние пружинения в зависимости от выбранных параметров нагружения. Определены наиболее благоприятные параметры нагружения, способствующие заполнению формы матрицы и снижающие вероятность возникновения различных типов брака.

Ключевые слова: электрогидроимпульсная вытяжка-формовка, вытяжка в жесткий штамп, конечно-элементный комплекс LS-DYNA 971, импульсное давление, параметры деформирования.

Ссылка при цитировании:
К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов. Компьютерное моделирование вытяжки-формовки сферических деталей из особо тонколистовых металлов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 161–171. DOI: 10.18721/JEST.240214.

X.S. Arsentyeva, V.S. Mamutov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

COMPUTER SIMULATION OF DRAWING SPHERICAL PARTS FROM THIN SHEET METAL

Computer models of the quasi-static rigid-die and electrohydroimpulse sheet metal drawing processes have been developed in the LS-DYNA finite-element complex. The applicability of the proposed impulse pressure law for simulation was shown. A comparative evaluation of quasi-static rigid-die and electrohydroimpulse sheet metal forming processes was carried out. Moreover, estimation of the main factors leading to defect occurrence during electrohydroimpulse sheet metal drawing was done. Total impulse duration, relative pressure increase time and impulse amplitude were varied in the simulation of impulse drawing. Thus, estimation of the spherical die filling rate, wrinkling and cracking tendencies and the influence of the recoil effect on sheet metal blank

dimensions were carried out by finite-element analysis. As a result, the most favorable impulse pressure parameters were determined. These parameters contribute to spherical die filling and reducing the probability of occurrence of different defects.

Keywords: electro-hydraulic sheet metal drawing, quasi-static sheet metal drawing, finite-element software LS-DYNA 971, impulse pressure, deformation parameters.

Citation:
X.S. Arsentyeva, V.S. Mamutov, Computer simulation of drawing spherical parts from thin sheet metal, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(02)(2018) 161–171, DOI: 10.18721/JEST.240214.

Введение

В различных отраслях техники применяются детали сферической, параболической и других криволинейных форм. Подобные детали чаще всего изготавливают штамповкой в жестких инструментальных штампах. При вытяжке сферических деталей возникает ряд технических проблем из-за того, что большая часть поверхности заготовки оказывается неприжатой. На этой части поверхности образуются выпучивания и гофры [1, 2]. Особенно проблематична штамповка сферических деталей при толщине материала 0,5–1 мм и менее [3]. Как указано в цитируемых выше источниках, для решения этой проблемы используют различные методы: применяют матрицы с перетяжными ребрами, варьируют диаметр заготовки, усилие прижима и др. Все это усложняет технологическую оснастку и приводит к увеличению себестоимости получаемых деталей. Следует отметить, что в нашей стране компьютерное моделирование данного процесса на современном уровне не проводилось.

Импульсное нагружение заготовки, например в условиях электрогидроимпульсной (ЭГИ) штамповки [4–6], позволяет при снижении стоимости технологической оснастки и сроков подготовки производства уменьшить складкообразование и пружинение заготовки, что способствует получению более точных деталей. Однако исследования ЭГИ вытяжки касались преимущественно вытяжки-формовки в свободную матрицу [7]. Получаемая при этом деталь может иметь прогиб, близкий к сферической форме, но не обеспечивает требуемых параметров по точности. Исследования ЭГИ штамповки в сферическую матрицу практически не проводились, и поэтому нет научно обоснованных технологических рекомендаций по проектированию таких процессов.

Экспериментальные исследования ЭГИ штамповки с варьированием большого числа параметров на нескольких ЭГИ установках трудоемки и требуют значительного количества экспериментальной оснастки [8]. Аналитические методы строятся на ряде серьезных допущений, не в полной мере учитывая нелинейности физических задач и реальные особенности технологических процессов [9]. Возможность корректных, приближенных к реальным условиям расчетов ЭГИ штамповки появилась с развитием вычислительной техники и универсальных конечно-элементных (КЭ) программных комплексов типа LS-DYNA® [10]. Данный КЭ комплекс создавался специально для расчета ударного воздействия жидкостей на деформируемую преграду и максимально позволяет учитывать физико-механические особенности ЭГИ штамповки, в том числе при формоизменении тонколистовых металлов [11]. Компьютерное моделирование импульсной и квазистатической листовой штамповки с использованием КЭ комплекса LS-DYNA позволяет проводить комплексный анализ технологических процессов, оценивать возможность появления брака и разрабатывать научно обоснованные технологические рекомендации для получения качественных деталей [12, 13].

Целью наших исследований была разработка на основе КЭ комплекса LS-DYNA компьютерных моделей вытяжки-формовки сферических деталей в жестком ин-

струментальном штампе и ЭГИ методом, сравнительная оценка данных технологий, а также основных факторов, приводящих к возникновению брака при ЭГИ вытяжке-формовке.

Расчетная модель вытяжки в жестком штампе

Схема квазистатической вытяжки в инструментальном штампе показана на рис. 1, *а*. Заготовка *3* устанавливается на опорную поверхность матрицы *4* и фиксируется прижимом *2*. Пуансон *1* оказывает давление на центральную часть заготовки, вдавливая металл в матрицу и преобразуя лист в полую деталь. На рис. 1, *б* представлена геометрическая оболочечная модель заготовки и элементов технологической оснастки. Поскольку заготовка изотропна и осесимметрична, в расчетах использовалась 1/4 часть модели.

При компьютерном моделировании квазистатическая нагрузка задается осевым перемещением пуансона в требуемом направлении до полного заполнения штампа.

При выборе длительности нагружения используется методика оценки сходимости динамического решения к квазистатическому решению [14]. Была принята модель материала заготовки *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY*. Материал инструмента задавался моделью *RIGID*. Предполагалось кулоновское трение материала образца по материалу инструмента со значениями коэффициента трения $\mu = 0{,}2$ в покое и $\mu = 0{,}15$ при движении.

Расчетная модель ЭГИ вытяжки-формовки

На рис. 2, *а* показана принципиальная схема ЭГИ вытяжки-формовки тонколистовой заготовки. ЭГИ установка содержит конденсаторную батарею *C*, разрядник *D*, повышающий трансформатор, высоковольтный выпрямитель и сопротивление. При разряде конденсаторной батареи происходит пробой промежутка между электродами *1* в рабочей жидкости *2*, заполняющей рабочую камеру *3*. Образуется канал разряда с низкотемпературной плазмой высокого давления. Расширение плазменного канала создает импульсное давление в рабочей жидкости, которое воздействует на листовую заготовку *4* и осуществляет штамповку заготовки в матрицу *5*.

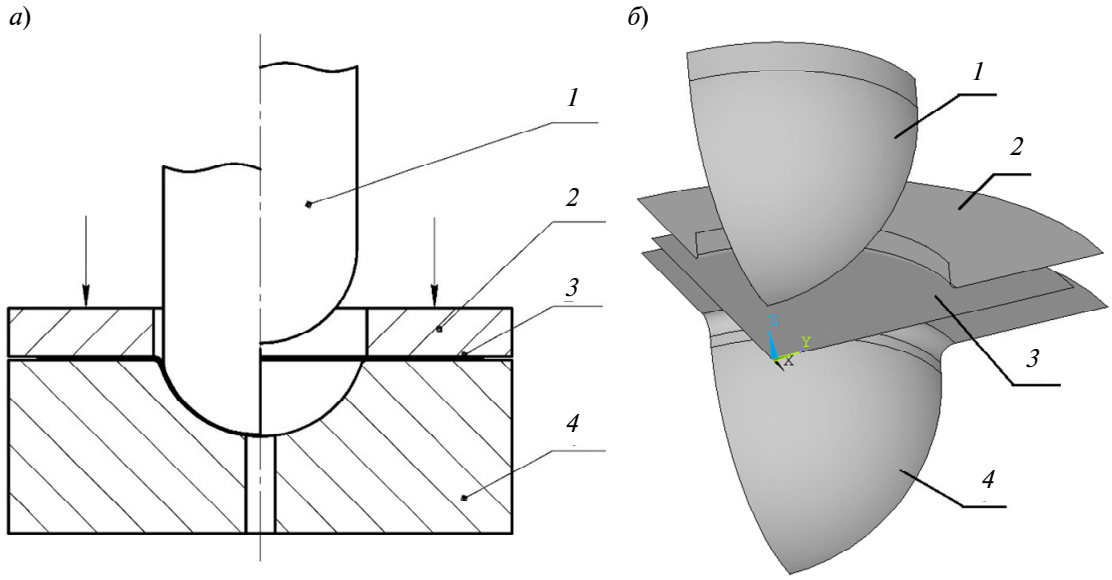


Рис. 1. Принципиальная схема (*а*) и геометрическая модель (*б*) вытяжки в жестком штампе: *1* – пуансон; *2* – прижим; *3* – заготовка; *4* – матрица

Fig. 1. Scheme (*a*) and geometrical model (*б*) of drawing: *1* – punch; *2* – sheet holder, *3* – blank, *4* – die

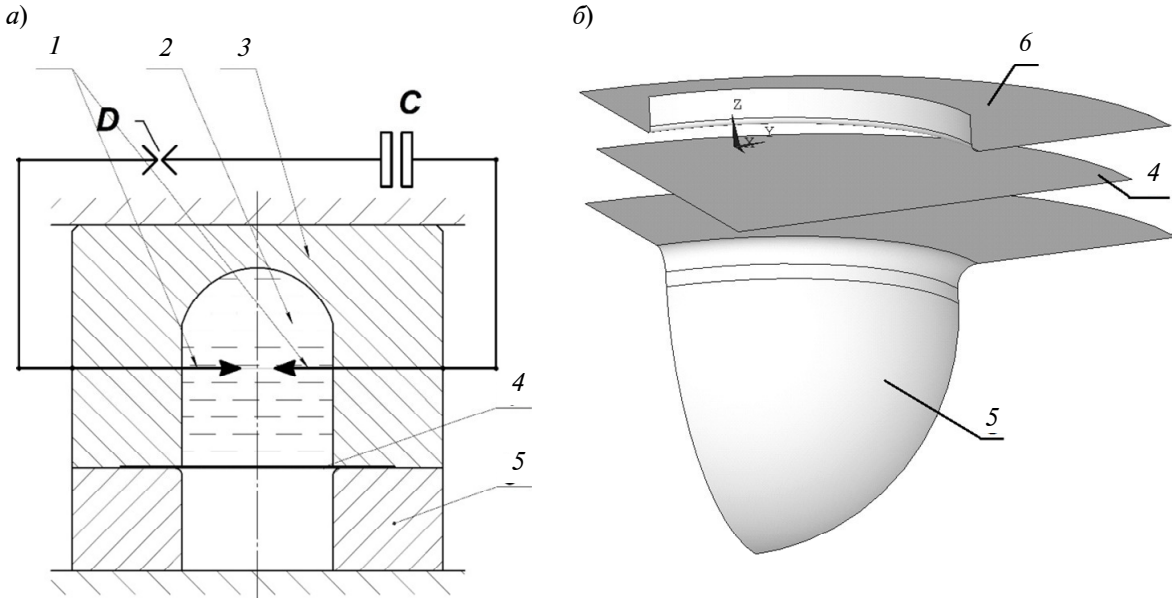


Рис. 2. Принципиальная схема (*а*) и геометрическая модель (*б*) ЭГИ вытяжки-формовки: *1* – электроды, *2* – рабочая жидкость, *3* – разрядная камера, *4* – листовая заготовка, *5* – матрица, *6* – прижим

Fig. 2. Scheme (*a*) and geometrical model (*б*) of electro-hydraulic impulse drawing: *1* – electrodes, *2* – pressure transmitting liquid, *3* – discharge chamber, *4* – sheet metal blank, *5* – die, *6* – blank holder

Аналогично с предыдущей задачей задавались модели материала заготовки и инструмента, кулоновское трение и другие элементы КЭ модели.

Для вытяжки-формовки в жестких штампах и для ЭГИ вытяжки-формовки бралась заготовка диаметром 110 мм из латуни Л68 толщиной 0,24 мм. Диаметр очка матрицы составил 60 мм, радиус скругления кромки на участке перехода фланца в цилиндрическую часть – 3 мм. При задании модели материала заготовки приняты следующие характеристики: E = 115 ГПа (модуль Юнга), ν = 0,34 (коэффициент Пуассона), ρ = 8600 кг/м^3 (плотность); параметры кривой деформационного упрочнения: B = 742 МПа, m = 0,4 для квазистатической штамповки и с учетом коэффициента динамичности – K_d = 1,25 для ЭГИ вытяжки-формовки [15].

При создании компьютерной модели ЭГИ штамповки могут возникнуть определенные трудности, преимущественно связанные с характером импульсной нагрузки. Параметры импульсной нагрузки получаются автоматически при комплексном решении задачи с учетом закона ввода энергии в плазменный канал, гидромеханики жидкости и деформирования заготовки, как это было сделано в работах [16, 17]. Подобные расчеты требуют значительной оперативной памяти и быстродействия, которыми не обладают доступные персональные компьютеры. Однако сделанные расчеты позволяют более точно разобраться в физических явлениях ЭГИ вытяжки-формовки, в частности в параметрах импульсного давления жидкости на подвижную заготовку. Задачей является получение зависимости давления от времени $p(t)$, использование которой без расчета расширения плазменного канала и гидромеханики в более простых инженерных расчетах позволит получить результаты, сопоставимые с экспериментальными данными.

Определение закона импульса давления

Типовая зависимость импульса давления в центре заготовки от времени, полученная при расчете с учетом расширения

плазменного канала и гидромеханики [18], представлена на рис. 3. Для нее характерны множественные пульсации, вызванные отражением волн давления от стенок разрядной камеры, что согласуется с экспериментальными данными, полученными на основе анализа результатов сверхскоростной фотосъемки струи жидкости, вылетающей из небольшого отверстия, в центре деформируемой заготовки [19]. Также следует отметить, что на общую пластическую деформацию заготовки оказывает значимое влияние лишь часть давления гидропотока [20]. В данном случае это часть давления по времени примерно от 360 до 900 мкс. Оставшиеся выбросы давления оказывают незначительное влияние на деформацию заготовки, поскольку их площадь мала по сравнению с площадью давления гидропотока.

Для компьютерных расчетов имеет смысл упростить полученную зависимость с множественными пульсациями гладкой кривой с длительностью, равной длительности воздействия гидропотока (в данном случае приблизительно 540 мкс), и площадью, не превышающей площадь гидропотока. Предлагается задавать форму импульса давления следующим законом:

$$p = p_0 N_p (t/\theta)^a \exp(-bt/\theta), \qquad (1)$$

где t – время; p_0 – амплитудное значение давления; нормирующие величины N_p, a, b определяются соотношениями

$$N_p = \exp(b - 1); \quad a = bt^*;$$
$$b = 1/(1 - t^* + t^* \ln t^*); \quad t^* = t_н/\theta.$$

Такой закон определяет длительность фронта импульса давления $t = t_н$ и уменьшение давления в e раз к моменту времени $t = \theta$.

Применимость предлагаемого закона рассмотрена с помощью компьютерных расчетов и сравнения результатов с экспериментальными данными. На рис. 4 показано перемещение точек заготовки после ее остановки. График *1* соответствует значениям, полученным из натурного эксперимента в ходе ЭГИ вытяжки заготовки из латуни Л68 толщиной 0,24 мм. На графиках *2* и *3* приведены данные, полученные из компьютерных расчетов, в которых импульс давления задавался соответственно сложной зависимостью с множественными пульсациями и законом (1).

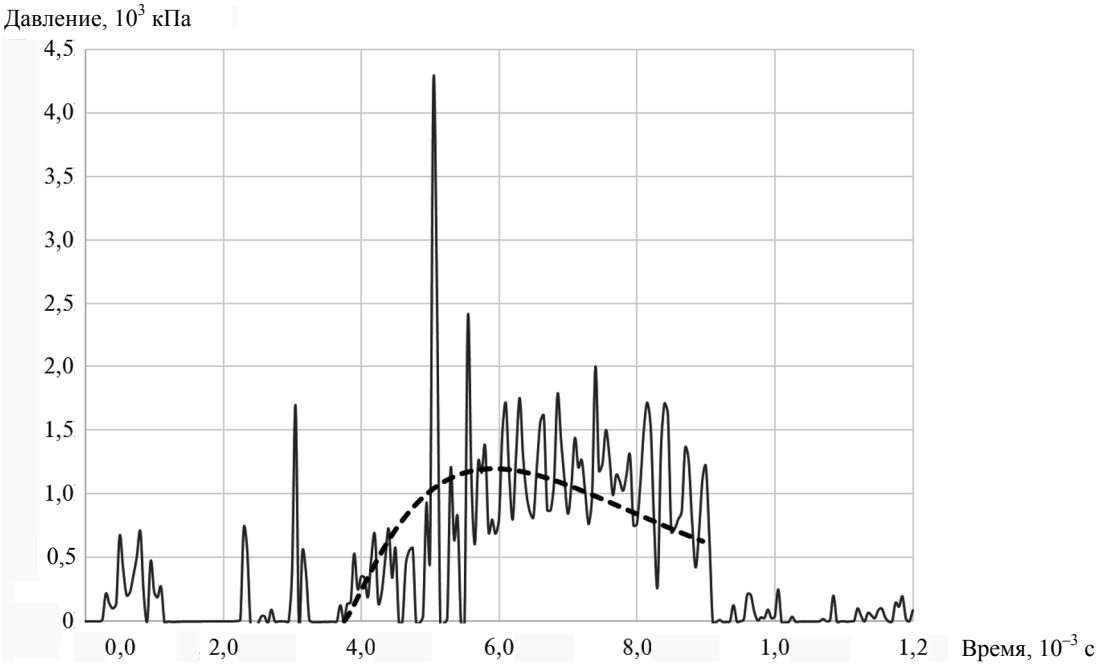


Рис. 3. Расчетный импульс давления жидкости вблизи центральной точки заготовки (_____) и кривая предлагаемого закона давления (_ _ _)

Fig. 3. Estimated impulse pressure near the central point of blank (_____) and the curve of the proposed impulse pressure law (_ _ _)

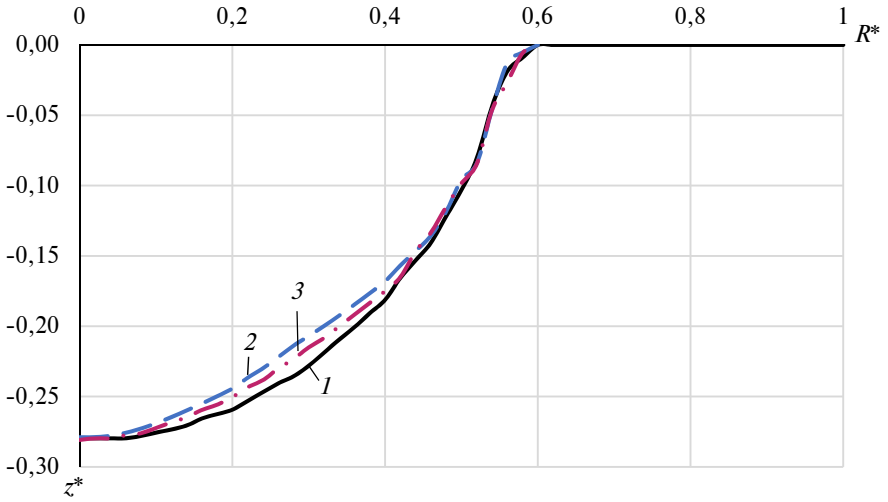


Рис. 4. Форма заготовки, полученная при ЭГИ вытяжке
(z^* – относительный прогиб; R^* – относительный радиус)

Fig. 4. The form of the blank, obtained by EHI drawing
(z^* – relative displacement; R^* – relative radius)

Из рис. 4 видно, что формы заготовок для всех трех вариантов достаточно близки. Таким образом, без особой погрешности при компьютерном моделировании процессов ЭГИ вытяжки-формовки импульс давления можно задавать законом (1). Предлагаемый закон позволяет варьировать параметры нагружения, благодаря чему можно задавать импульсы давления с нормальной или средней длительностью (около 100 мкс), обычно используемые в промышленных ЭГИ установках и разрядных камерах малого объема [19]. Варьируя параметры, можно получить короткий импульс с длительностью около 10 мкс или длительный импульс порядка 1000 мкс и больше.

Численный эксперимент и анализ результатов

При проведении численного эксперимента оценивалось заполнение формы матрицы, образование складок на фланцевой и цилиндрической частях заготовки, а также влияние эффекта пружинения на конечные размеры детали. При расчетах ЭГИ вытяжки также рассматривалось влияние на результаты расчетов варьирование следующих параметров: длительности импульса давления θ (10, 100, 1000 мкс), относительного времени нарастания импульса давления ($t^* = 0.1$ и $t^* = 0.5$) и амплитудного значения импульса давления.

На рис. 5, *а* показана заготовка после вытяжки в жестком инструментальном штампе с расшифровкой цветом зон проблемных поверхностей заготовки (Formability key LS-PrePost): разрушение металла (красный), риск разрушения (желтый), вероятность складкообразования (синий), складкообразование (фиолетовый), а также области значительного утонения (оранжевый) и нормального формоизменения (зеленый) без риска нарушения сплошности и потери устойчивости. Согласно работе [13] для заготовки из латуни Л68 с заданными характеристиками и геометрией, динамическое решение сходится к квазистатическому при длительности расчета от 2800 мкс и выше. В данном расчете в момент времени 2800 мкс задавалась остановка пуансона и его последующий подъем.

На рис. 5, *а* видно образование складок на фланцевой части заготовки и их переход в цилиндрическую часть детали. На рис. 5, *б* показано проявление эффекта пружинения, который выражается в изменении конечной формы детали после снятия нагрузки и отходе купольной части от дна матрицы. Увеличение диаметра заготовки или уменьшение зазора между матрицей и пуансоном может привести к разрушению заготовки.

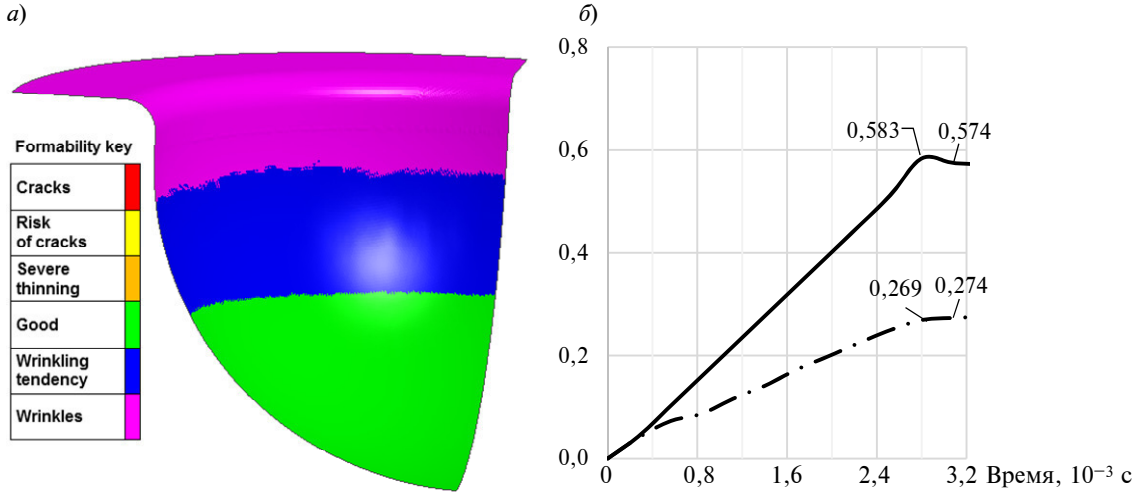


Рис. 5. Заготовка после вытяжки в жестком инструментальном штампе (*а*) и графики зависимости эффективной пластической деформации в центре заготовки (_._.) и относительного прогиба заготовки z^* (——) от времени (*б*)
Fig. 5. Blank after quasi-static drawing (*a*) and plots of effective plastic strain in the center of blank (_._.) and blank relative displacement z^* (——) of time (*b*)

В таблице приведены результаты расчетов ЭГИ вытяжки листовой заготовки в сферическую матрицу при различных параметрах нагружения.

Как видно, при длительностях импульса давления в 10 и 100 мкс (соответственно пп. 1 и 2 таблицы) не происходит заполнения матрицы. Также можно отметить выпучивание металла не только на фланцевой, но и на свободной части заготовки. Увеличение амплитудного давления при длительности 10 мкс не способствует заполнению матрицы. Возникает брак в виде отскока купола заготовки от дна матрицы (п. 3 табл.), а при дальнейшем нарастании амплитудного давления повышается вероятность разрыва материала вдоль скругления кромки матрицы (п. 4 табл.). Также при длительности в 10 мкс возможен разрыв материала заготовки вдоль кромки матрицы даже без передозировки энергии (пп. 1, 3 табл.), что в данном случае связано с малой толщиной выбранного материала.

При увеличении длительности давления до 100 мкс можно наблюдать схожую картину. Передозировка энергии вызывает отскок от дна матрицы (п. 5 табл.); дальнейшее повышение амплитудного давления вызывает разрушение материала свободной части заготовки (п. 6 табл.).

В рассмотренных случаях при длительности импульса в 10 и 100 мкс увеличение относительного времени нарастания давления t^* не оказывает влияния на конечную форму заготовки и образование складок.

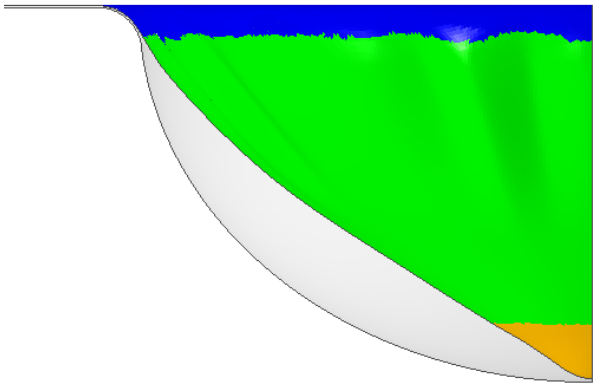
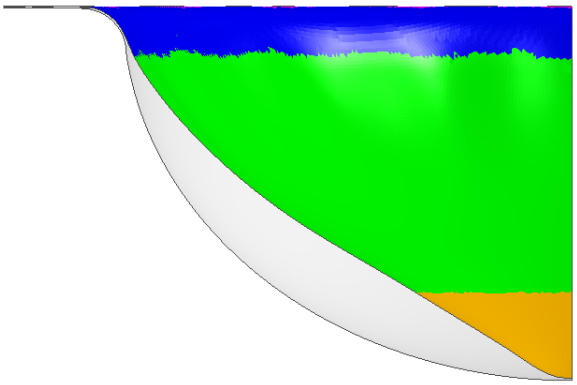
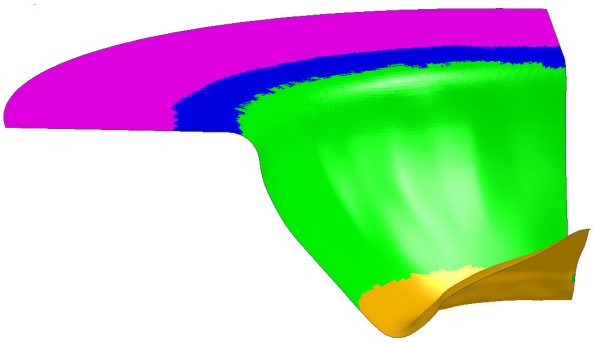
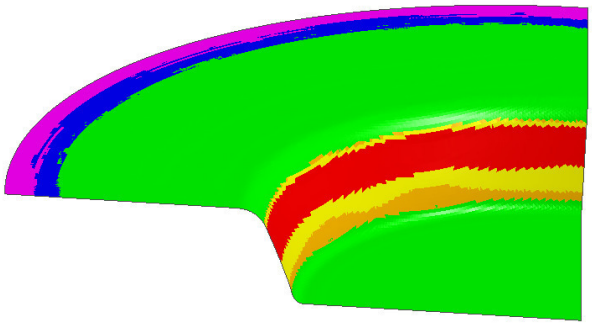
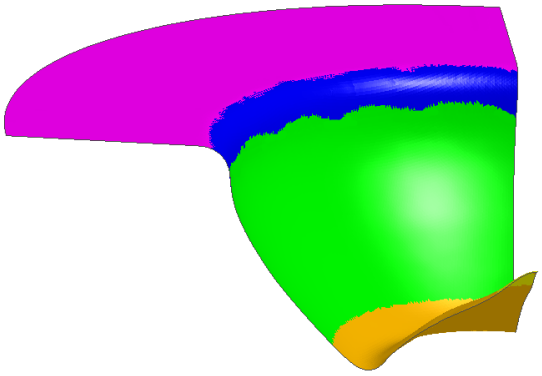
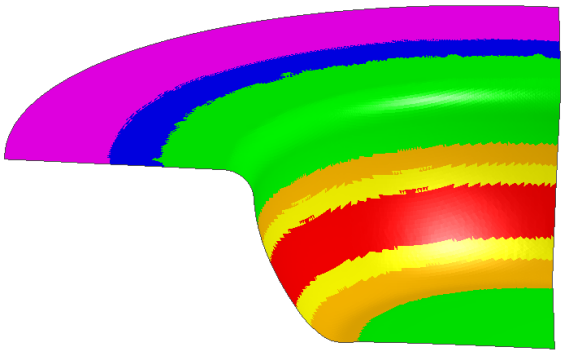
Увеличение длительности импульса давления до 1000 мкс позволяет существенно повысить заполняемость сферической матрицы (п. 7 табл.). При увеличении относительного времени нарастания возможно добиться полного заполнения матрицы (п. 8 табл.), а эффект отскока заменяется эффектом вдавливания материала заготовки в матрицу. Это обеспечивает получение качественной точной детали практически без пружинения заготовки и складкообразования на фланце.

При относительном времени нарастания $t^* = 0{,}1$ в случаях избыточного давления возможен отскок заготовки от дна матрицы (п. 9 табл.). Значительная передозировка энергии приводит к разрушению материала (п. 10 табл.).

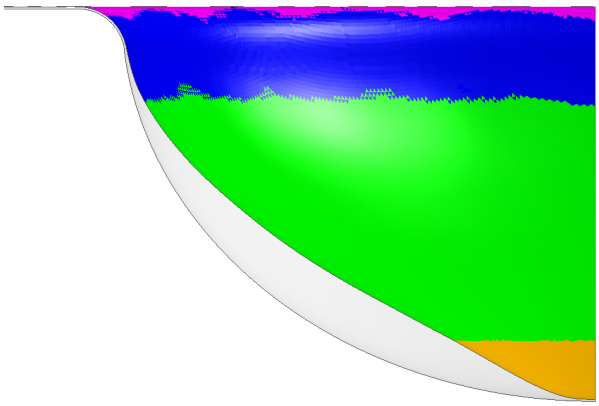
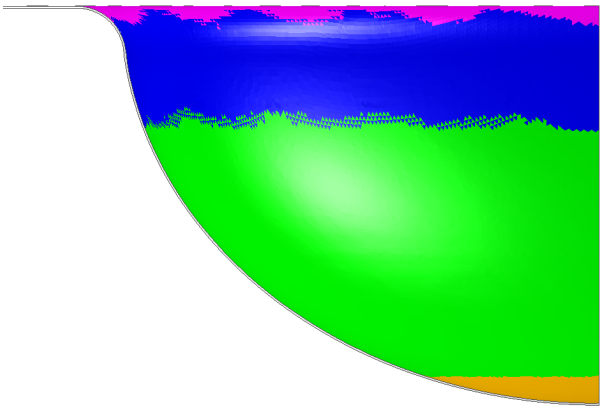
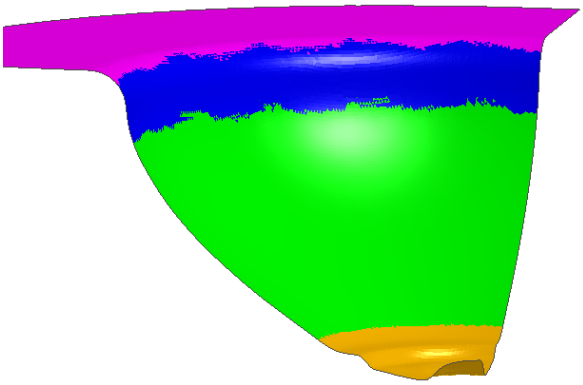
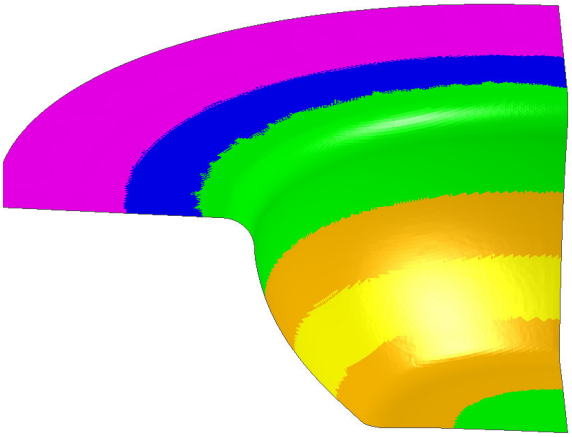
Таким образом, путем компьютерного моделирования можно определить параметры импульсного давления, обеспечивающие получение качественной точной детали практически без пружинения заготовки и складкообразования на фланце.

Влияние параметров импульса давления на деформирование заготовки

Influence of impulse pressure parameters on blank deformation

1	*2*
	
θ = 10 мкс, t^* = 0.1, p_0 = 41 МПа	θ = 100 мкс, t^* = 0,1, p_0 = 4,95 МПа
3	*4*
	
θ = 10 мкс, t^* = 0,1, p_0 = 60 МПа	θ = 10 мкс, t^* = 0,1, p_0 = 90 МПа
5	*6*
	
θ = 100 мкс, t^* = 0,1, p_0 = 7,25 МПа	θ = 100 мкс, t^* = 0,1, p_0 = 15 МПа

Окончание таблицы

7	*8*
	
θ = 1000 мкс, t^* = 0,1, p_0 = 2,5 МПа	θ = 1000 мкс, t^* = 0,5, p_0 = 5 МПа
9	***10***
	
θ = 1000 мкс, t^* = 0,1, p_0 = 3 МПа	θ = 1000 мкс, t^* = 0,1, p_0 = 9 МПа

Заключение

С применением конечно-элементного комплекса LS-DYNA были построены компьютерные модели вытяжки-формовки тонколистовой заготовки в закрытую сферическую матрицу в жестком инструментальном штампе и методом ЭГИ штамповки. Расчеты на примере вытяжки-формовки из особо тонколистового металла (латуни Л68 толщиной 0,24 мм) показали, что путем компьютерного моделирования можно определить параметры импульсного давления, обеспечивающие получение качественной точной детали практически без пружинения и складкообразования на фланце, чего невозможно добиться при штамповке в жестком инструментальном штампе.

Показаны основные причины возможного брака: избыточное давление, приводящее к отскоку заготовки от матрицы; недостаточное давление, приводящее к не заполнению рельефа матрицы. Установлено, что увеличение длительности импульса давления положительно сказывается на процессе ЭГИ вытяжки-формовки заготовок, позволяя добиться более полного заполнения формы матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Романовский В.П.** Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. 1979. 520 с.
2. **Зубцов М.Е.** Листовая штамповка. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. 431 с.
3. **Малов А.Н.** Технология холодной штамповки. М.: Государственное научно-техническое издательство «Оборонгиз», 1963. 564 с.
4. **Гулый Г.А., Малюшевский П.П.** Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев: Наукова думка, 1977. 174 с.
5. **Здор Г.Н.**, **Исачевич Л.А., Качанов И.В.** Технологии высоковольтного деформирования материалов: монография. Минск: Изд-во БНТУ, 2010. 456 с.
6. **Тараненко М.Е.** Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. 272 с.
7. **Чачин В.Н., Шадуя В.Л., Журавский А.Ю., Здор Г.Н.** Электрогидроимпульсное формообразование с использованием замкнутых камер. Минск: Наука и техника, 1985. 200 с.
8. **Сорокин В.В.** Исследование некоторых особенностей вытяжки на электрогидравлических прессах // Электрический разряд в жидкости и его применение. Киев: Наукова думка, 1977. С. 104–109.
9. **Щеглов Б.А.** Динамика осесимметричного формообразования тонкостенных оболочек // Расчеты процессов пластического течения металлов. М.: Наука, 1973. С. 54–62.
10. **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA. 2006. 498 p.
11. **Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых металлов с применением программного комплекса LS-DYNA 971 // Металлообработка: Научно-производственный журнал. 2012. № 3(69). С. 23–29.
12. **Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 1(190). С. 101–107.
13. **Арсентьева К.С., Мамутов В.С.** Расчет процессов квазистатической формовки подвижными средами с применением комплекса LS-DYNA // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2014. С. 114–117.
14. **Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Расчеты процессов штамповки подвижными средами при помощи комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. 2012. № 2–1(147). С. 127–131.
15. **Мамутов В.С., Мамутов А.В.** Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 188 с.
16. **Mamutov V.S., Mamutov A.V., Golovaschenko S.F.** Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA® // 1th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming, Dearborn, USA, 2014, 9 p.
17. **Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Mamutov V.S., Bonnen J.F.** Modeling of electro-hydraulic forming of sheet metal parts. Original Research Article // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 219. May 2015. P. 84–100.
18. **Арсентьева К.С., Насс С.Е., Мамутов В.С.** Давление при электрогидроимпульсной вытяжке-формовке тонколистовой заготовки // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. СПб.: Изд-во Политехн. унт-та, 2016. С. 80–83.
19. **Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С.** Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 207 с.
20. **Mamutov V.S., Zdor G.N.** Mechanics of loading and deforming of thin-sheet blank at electro-hydraulic forming // International Review of Mechanical Engineering (IREME). 2017. Vol. 11. No 5. P. 332–336.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна – *аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: xenia.ars@gmail.com

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович – *доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*
E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 04.05.2018

REFERENCES

[1] **Romanovskiy V.P.,** Spravochnik po kholodnoy shtampovke. 6-ye izd., pererab. i dop. Leningrad: Mashinostroyeniye. 1979. 520 s. (rus.)

[2] **Zubtsov M.E.,** Listovaya shtampovka : uchebnik. 3-ye izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye, 1980. 431 s. (rus.)

[3] **Malov A.N.,** Tekhnologiya kholodnoy shtampovki. M.: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatelstvo «Oborongiz», 1963. 564 s. (rus.)

[4] **Gulyy G.A., Malyushevskiy P.P.,** Vysokovoltnyy elektricheskiy razryad v silovykh impulsnykh sistemakh. Kiyev: Naukova dumka, 1977. 174 s. (rus.)

[5] **Zdor G.N., Isachevich L.A., Kachanov I.V.,** Tekhnologii vysokovoltnogo deformirovaniya materialov: monografiya. Minsk: BNTU, 2010. 456 s. (rus.)

[6] **Taranenko M.E.,** Elektrogidravlicheskaya shtampovka: teoriya, oborudovaniye, tekhprotsessy. Kharkov: Izd-vo KhAI, 2011. 272 s.

[7] **Chachin V.N., Shaduya V.L., Zhuravskiy A.Yu., Zdor G.N.,** Elektrogidroimpulsnoye formoobrazovaniye s ispolzovaniyem zamknutykh kamer. Minsk: Nauka i tekhnika, 1985. 200 s. (rus.)

[8] **Sorokin V.V.**, Issledovaniye nekotorykh osobennostey vytyazhki na elektrogidravlicheskikh pressakh, *Elektricheskiy razryad v zhidkosti i yego primeneniye*. Kiyev: Naukova dumka, 1977. S. 104–109. (rus.)

[9] **Shcheglov B.A.,** Dinamika osesimmetrichnogo formoobrazovaniya tonkostennykh obolochek, *Raschety protsessov plasticheskogo techeniya metallov*. M.: Nauka, 1973. S. 54–62. (rus.)

[10] **Hallquist J.O.,** LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, SA, 2006, 498 p.

[11] **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.,** Metodika kompyuternogo modelirovaniya elektrogidroimpulsnogo formoizmeneniya tonkolistovykh metallov s primeneniyem programmnogo kompleksa LS-DYNA 971, *Metalloobrabotka: nauchno-proizvodstvennyy zhurnal*. 2012. № 3(69). S. 23–29. (rus.)

[12] **Mamutov A.V., Mamutov V.S.,** Simulating the electro-hydraulic sheet metal forming using LS-DYNA, *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2014. № 1(190). S. 101–107.

[13] **Arsentyeva X.S., Mamutov V.S.,** Raschet protsessov kvazistaticheskoy formovki podvizhnymi sredami s primeneniyem kompleksa LS-DYNA, *Nedelya nauki SPbGPU: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. SPb., 2014. S. 114–117. (rus.)

[14] **Mamutov A.V., Mamutov V.S.,** Raschety protsessov shtampovki podvizhnymi sredami pri pomoshchi kompleksa LS-DYNA, *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ser.: Nauka i obrazovaniye*. 2012. №2–1 (147). S. 127–131. (rus.)

[15] **Mamutov V.S., Mamutov A.V.,** Teoriya obrabotki metallov davleniyem. Kompyuternoye modelirovaniye protsessov listovoy shtampovki. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 188 s. (rus.)

[16] **Mamutov V.S., Mamutov A.V., Golovaschenko S.F.,** Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®, *1th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming*. Dearborn, USA, 2014, 9 p.

[17] **Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Mamutov V.S., Bonnen J.F.,** Modeling of electro-hydraulic forming of sheet metal parts. Original Research Article, *Journal of Materials Processing Technology*. May 2015. Vol. 219. P. 84–100.

[18] **Arsentyeva X.S., Nass S.Ye., Mamutov V.S.,** Davleniye pri elektrogidroimpulsnoy vytyazhke-formovke tonkolistovoy zagotovki, *Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiyem. Luchshiye doklady*. SPb.: Izd-vo Politekhn. unt-ta, 2016. S. 80–83. (rus.)

[19] **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.,** Metody issledovaniya vysokoskorostnogo deformirovaniya metallov. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 207 s. (rus.)

[20] **Mamutov V.S., Zdor G.N.,** Mechanics of loading and deforming of thin-sheet blank at electro-hydraulic forming, *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2017. Vol. 11. No 5. P. 332–336.

THE AUTHORS

ARSENTYEVA Xeniia S. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: xenia.ars@gmail.com
MAMUTOV Viatsheslav S. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Received: 04.05.2018

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018