

DOI: 10.18721/JEST.230119

УДК 621.73.011

К.С. Арсентьева

ПРОБЛЕМА СКЛАДКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ И КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ ВЫТЯЖКЕ-ФОРМОВКЕ ТОНКОЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

В рамках конечно-элементного комплекса LS-DYNA разработаны математические модели процессов вытяжки-формовки тонколистовой заготовки с применением импульсного и квазистатического нагружения. В расчетах варьировалась величина зазора между прижимом и матрицей и рассматривалось ее влияние на процесс формоизменения. Диаграммы предельных деформаций рассмотренных процессов импульсной и квазистатической вытяжки-формовки позволили получить общую картину вероятности складкообразования на фланцевой части заготовки. Показана зависимость вероятности складкообразования от величины зазора между прижимом и матрицей при разных скоростях нагружения. Конечно-элементный расчет позволил провести сравнение по величине эффективных пластических деформаций, а также рассмотреть особенности процессов вытяжки-формовки в зависимости от скорости деформирования. Определены наиболее благоприятные величины зазора между прижимом и матрицей для разных видов нагружения.

ИМПУЛЬСНАЯ ВЫТЯЖКА; КВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ ВЫТЯЖКА; СКЛАДКООБРАЗОВАНИЕ; ТОНКОЛИСТОВОЙ МЕТАЛЛ.

Ссылка при цитировании:

К.С. Арсентьева. Проблема складкообразования при импульсной и квазистатической вытяжке-формовке тонколистовых деталей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 190–199. DOI: 10.18721/JEST.230119

X.S. Arsentyeva

WRINKLING ISSUES IN THIN SHEET METAL DURING IMPULSE AND QUASI-STATIC METAL FORMING

The author developed a mathematical model of thin sheet metal drawing processes in impulse and quasi-static forming conditions using the LS-DYNA finite-element complex. During the calculation, a gap magnitude between a holder and a die was varying and its influence on the forming process was studied. Forming limit diagrams of the considered processes allowed obtaining an overall view of wrinkling probability on the flange and center of blank. Moreover, the study showed a wrinkling probability dependence on strain rate and gap magnitude between the holder and the die. Thus, finite element calculation allowed making a comparison of the effective plastic strain magnitudes as well as considering the characteristics of the drawing processes, depending on the strain rate. As a result, favorable gap magnitudes between the holder and the die were determined for different strain rates.

IMPULSE DRAWING; QUASI-STATIC DRAWING; WRINKLING; THIN SHEET METALL.

Citation:

X.S. Arsentyeva, Wrinkling issues in thin sheet metal during impulse and quasi-static metal forming, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 190–199, DOI: 10.18721/JEST.230119

Введение

В современном машиностроении широкое применение нашли тонкостенные осесимметричные детали, получить которые можно при помощи глубокой вытяжки, превращая плоскую заготовку в полу деталь. Для процессов вытяжки характерны сложные пластические деформации, которым подвергаются элементы фланца, в результате чего, особенно при больших степенях деформации и небольшой толщине материала, возможно образование складок [1]. В процессе вытяжки во фланцевой части заготовки возникают растягивающие напряжения в радиальном направлении и сжимающие напряжения в тангенциальном, что может стать причиной гофрообразования (рис. 1) и нарушения нормального хода процесса формообразования [2, 3]. Вспучивание заготовки приводит к увеличению сопротивления вытяжке, что, в свою очередь, может стать причиной отрыва дна [4].

Общая схема процесса статической вытяжки-формовки показана на рис. 2. При вытяжке заготовка 3 устанавливается на матрицу 4 и фиксируется прижимом 2. На среднюю часть заготовки оказывает давление пуансон 1, вытягивая ее в матрицу. Начальная стадия процесса вытяжки происходит за счет растяжения и утонения кольцевого участка, а последующее формоизменение — посредством деформации фланцевой части заготовки и втягивания ее в матрицу [1].

Для повышения устойчивости фланца и предотвращения складкообразования при статической вытяжке тонкостенных деталей рекомендуется использовать прижим. Также известны другие факторы, влияющие на устойчивость фланцевой части заготовки. Одними из основных параметров, имеющих влияние на вероятность гофрообразования в процессе статической вытяжки-формовки, являются геометрические соотношения размеров заготовки и изделия [5, 6], геометрия формоизменяющего инструмента [7], коэффициент вытяжки [8] и другие факторы. Кроме вышеперечисленных параметров, отмечается влияние интенсивности нагружений.

Более эффективным методом вытяжки по сравнению с традиционными способами формоизменения является электрогидроимпульсная (ЭГИ) вытяжка. При вытяжке-формовке ЭГИ-методом (рис. 3) воздействие на заготовку про-

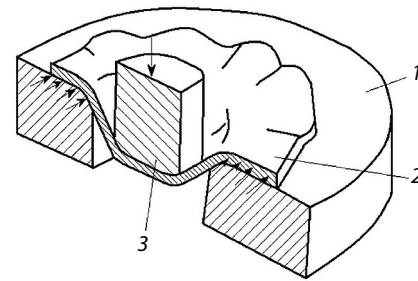


Рис. 1. Схема гофрообразования заготовки при статической вытяжке без прижима: 1 — матрица; 2 — заготовка; 3 — пуансон

исходит за счет импульса давления, переданного через промежуточную среду [9]. Замыкание разрядного контура приводит к образованию канала разряда между двумя электродами и возникновению парогазовой области, которая расширяется и совершает полезную механическую работу. Возникает импульсное давление, которое воздействует на листовую заготовку, тем самым осуществляя формоизменение — выдавливание заготовки в формоизменяющую матрицу [10]. Локализация деформаций и короткое время воздействия импульса могут привести к образованию складок на фланце заготовки, а также к разрушению материала вблизи радиуса закругления кромки матрицы [11].

Некоторые особенности условий потери устойчивости и складкообразования при динамическом нагружении тонкостенных заготовок

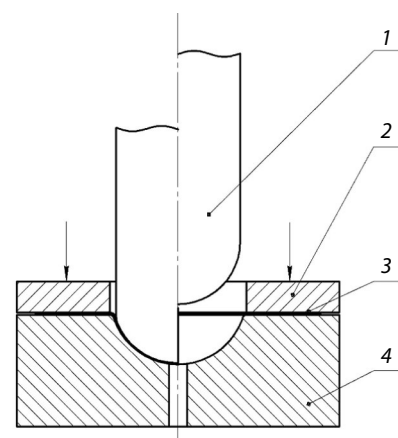


Рис. 2. Схема вытяжки-штамповки в жестком штампе: 1 — пуансон; 2 — прижим; 3 — заготовка; 4 — матрица

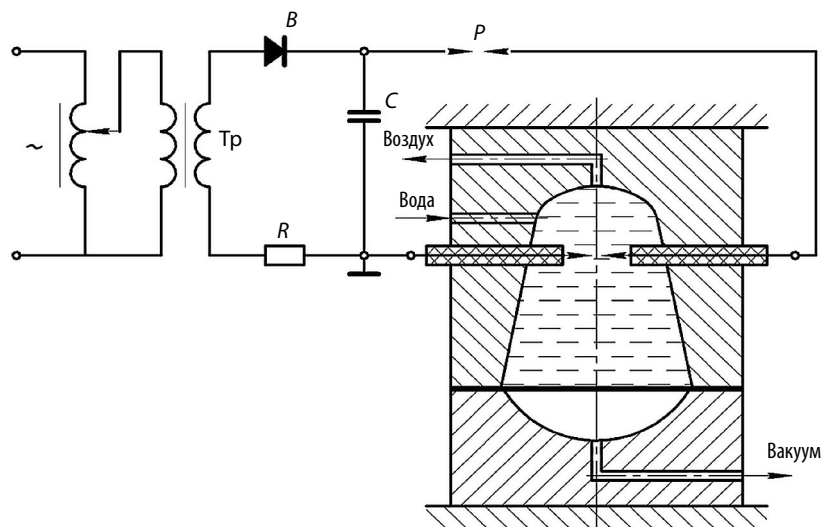


Рис. 3. Принципиальная схема электрогидроимпульсной установки

рассмотрены в работах [12, 13]. Основное отличие от статического формообразования состоит в том, что импульсный процесс имеет волновую природу, в связи с чем процесс вспучивания отстает от изменений напряженного состояния всей оболочки, т. е. носит инерционный характер.

Цель данной работы — сравнение процессов складкообразования на фланце заготовки при статическом и динамическом процессах вытяжки-формовки тонкостенных заготовок.

Исследование процессов квазистатической и динамической вытяжки

Для решения поставленной задачи проводились компьютерные расчеты в конечно-элементном комплексе LS-DYNA. Исследовался материал латунь Л68 толщиной 0,24 мм.

При расчетах динамического решения импульс давления предполагался заданным положительной полуволной синусоиды с длительностью полуволны T_0 и амплитудой p_0 . Величина T_0 складывается из времени нарастания t_n , за которое давление достигает своего амплитудного значения, и времени падения t_p , за которое амплитуда давления падает до нуля. В реальных процессах с применением высоковольтного разряда в жидкости при $t_n = 20$ мкс t_p составляет 120–130 мкс, таким образом, общая длительность импульса может достигать 150 мкс [14]. Согласно работе [15] временем t_p можно пренебречь, поэтому величина T_0 выбиралась рав-

ной 60 мкс и оставалась фиксированной. Величина p_0 подбиралась таким образом, чтобы максимальная деформация была ниже величины деформации, определяемой нижней кривой диаграммы предельных деформаций (FLD) (как это видно из примера расчета, приведенного на рис. 4), и равнялась $p_0 = 44$ МПа.

В случае формоизменения заготовки под действием квазистатического нагружения был использован параметр сходимости динамического решения к статическому [16, 17]. Длительность нагрузки выбиралась $T_0 = 0,0055$ с, а величина давления задавалась линейной зависимостью от времени. Максимальное значение p_0 подбирались таким образом, чтобы максимальная деформация была ниже величины, определяемой нижней кривой диаграммы предельных деформаций (FLD). Диаграммы предельных деформаций также были использованы для прогнозирования разрушения и складкообразования.

Для сравнительного расчета был рассмотрен процесс вытяжки-формовки круглой в плане заготовки диаметром 110 мм из материала Л68 толщиной 0,24 мм в матрицу с диаметром очка 60 мм. Материал заготовки принимался изотропным, модель материала задавалась степенной зависимостью MAT_POWER_LAW_PLASTICITY. Были приняты следующие характеристики материала: константы, характеризующие упругость, $E = 1,15 \cdot 10^{11}$ Па (модуль Юнга), $\nu = 0,34$ (коэффициент Пуассона), $\rho = 8600$ кг/м³ (плотность); параметры динамической кривой деформации-

онного упрочнения: $B = 740$ МПа, $m = 0,44$; кулоновское трение со значениями коэффициента при трении покоя $\mu = 0,2$ и при движении $\mu = 0,15$. Заготовка из особо тонколистового материала моделировалась плоской оболочкой и задавалась в виде элемента Thin Shell 163. Зазор между прижимом и матрицей варьировался в диапазоне от $(h + 0,05h)$ до $(h + 3,2h)$, где h — толщина заготовки, причем каждая следующая прибавка была вдвое больше предыдущей.

Результаты расчетов сравнивались по следующим параметрам: графикам эффективных пластических деформаций в центре и на фланце заготовки; диаграммам предельных деформаций в контексте прогнозирования складкообразования и тенденций к складкообразованию, а также модулю перемещения в центральной части заготовки.

Компьютерные расчеты дали следующее. *Диаграммы предельных деформаций для квазистатической вытяжки* (рис. 5, а, б, в) показали, что общая схема процесса не меняется при увеличении зазора между прижимом и матрицей. При установлении зазора $(h + 1,6h)$ и $(h + 3,2h)$ (рис. 5, в) напряженное состояние на фланце заготовке изменяется таким образом, что вероятность складкообразования в области сгиба фланца уменьшается.

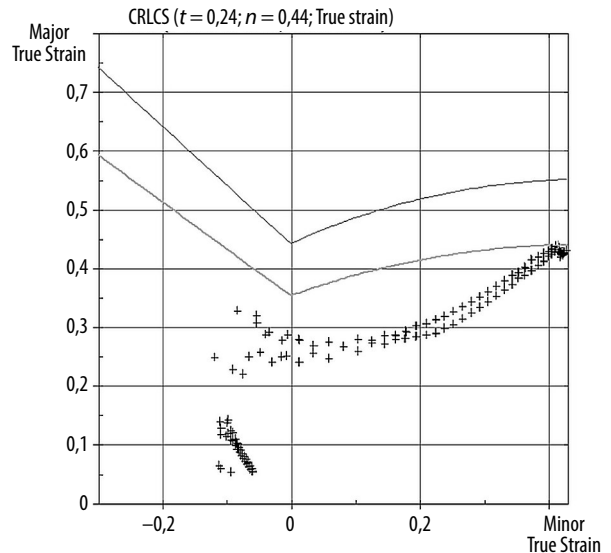


Рис. 4. Диаграмма предельных деформаций заготовки, деформированной импульсом давления, заданным положительной полуволевой синусоиды

Диаграммы предельных деформаций для импульсной вытяжки (рис. 5, г, д, е) показали, что при варьировании зазора между прижимом и матрицей, но при постоянной величине импульса давления общие тенденции к складкообразованию на фланце заготовки меняются незначительно,

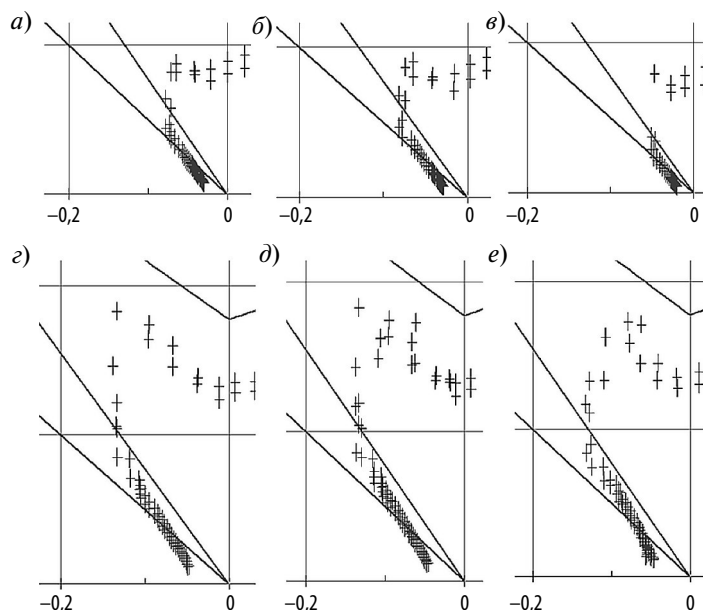


Рис. 5. Диаграммы предельных деформаций при квазистатической вытяжке-формовке (зазор между прижимом и матрицей $h + 0,05h$ (а), $h + 0,4h$ (б), $h + 3,2h$ (в)) и при импульсной вытяжке-формовке (зазор между прижимом и матрицей $h + 0,05h$ (г), $h + 0,4h$ (д) и $h + 3,2h$ (е))

однако центральная часть заготовки с увеличением зазора между прижимом и матрицей испытывает все большие деформации, вплоть до разрушения. В сравнении с квазистатической вытяжкой заготовка при импульсной вытяжке испытывает большие деформации вблизи фланцевой части заготовки при любой величине зазора в рассмотренном диапазоне.

График величин *эффективной пластической деформации на фланце заготовки при квазиста-*

тической вытяжке (рис. 6, а) показал следующее. Наибольшие деформации фланец испытывает при зазоре между прижимом и матрицей, равном $(h + 0,2h)$. При зазорах $(h + 0,05h)$ и $(h + 0,1h)$ фланец испытывает меньшие деформации, кривые графиков повторяют друг друга с незначительными отличиями. Увеличение зазора между прижимом и матрицей до $(h + 0,4h)$ и $(h + 0,8h)$ также ведет к уменьшению пластических деформаций во фланцевой части заготовки на участке

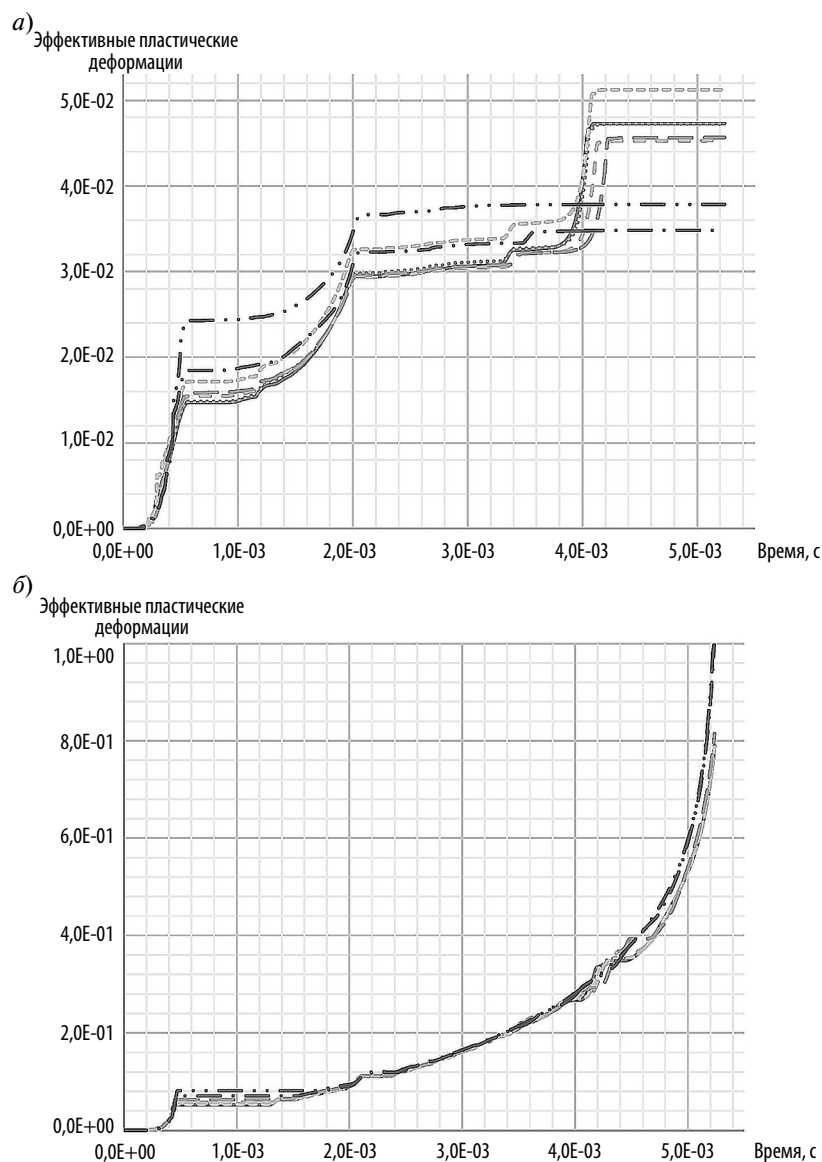


Рис. 6. Эффективные пластические деформации при квазистатической вытяжке-формовке: а — на фланце заготовки; б — в центральной части заготовки

(— $h + 0,05h$; $h + 0,1h$; - - - $h + 0,2h$;
- . - $h + 0,4h$; - - - $h + 0,8h$; - . . $h + 1,6h$; - . . $h + 3,2h$)

после 4 мс. При зазоре, равном $(h + 1,6h)$, фланец испытывает большие пластические деформации на начальных стадиях процесса, по значениям приближаясь к графику пластических деформаций при зазоре $(h + 0,2h)$. Однако в данном случае рост деформаций прекращается при времени около 3,5 мс, и на конечных стадиях процесса при зазоре между прижимом и матрицей, равном $(h + 1,6h)$, показаны наименьшие пластические деформации.

При установлении зазора, равного $(h + 3,2h)$, фланец заготовки испытывает наиболее интенсивные пластические деформации в период от 0,5 до 4 мс. После 2 мс наблюдается незначительный рост пластических деформаций, и график демонстрирует относительно небольшие пластические деформации на конечной стадии процесса. Однако интенсивность пластических деформаций в самом начале процесса вытяжки-формовки с заданным значением зазора может стать причиной потери устойчивости фланца и разрушения заготовки.

При рассмотрении графиков эффективных пластических деформаций для квазистатической вытяжки-формовки можно отметить, что не существует прямой зависимости между величиной зазора и величиной пластических деформаций на фланце заготовки. Также можно отметить, что фланцевая часть заготовки испытывает деформации в течение всего процесса формоизменения.

График величин *эффективной пластической деформации на фланце заготовки при импульсной вытяжке* (рис. 7, а) показал следующее. При наименьшем в рассматриваемом диапазоне зазоре между матрицей и прижимом $(h + 0,05h)$ фланцевая часть заготовки испытывает наибольшие деформации, значительно превышающие остальные. Зазор, равный $(h + 3,2h)$, также демонстрирует относительно большие деформации, а в рассматриваемом диапазоне показывает средние значения. При зазоре между матрицей и прижимом, равном $(h + 0,4h)$, фланец испытывает наименьшие пластические деформации, чем при других величинах зазора в рассматриваемом диапазоне. При рассмотрении графиков можно наблюдать параболическую зависимость эффективных пластических деформаций от величины зазора и сделать вывод, что существует определенная величина за-

зора между прижимом и матрицей, близкая к $(h + 0,4h)$, при которой фланцевая часть заготовки будет испытывать наименьшие деформации, в то время как любая большая или меньшая величина зазора приведет к увеличению деформаций на фланце заготовки.

При сравнении графиков эффективных пластических деформаций при импульсной и при квазистатической вытяжке можно отметить, что при первом способе вне зависимости от величины зазора формоизменение происходит более равномерно и без значительного изменения формы кривой.

График величин *эффективной пластической деформации центральных точек заготовки при квазистатической вытяжке* (рис. 6, б) показывает, что при зазоре между матрицей и прижимом равном $(h + 1,6h)$ и $(h + 3,2h)$, деформации проходят более равномерно в промежутке между 4 и 5 мс, тогда как при других значениях зазора отмечаются колебания. В целом, при любой величине зазора между прижимом и матрицей в рассматриваемом диапазоне графики эффективных пластических деформаций в центральной части заготовки имеют схожую форму кривых.

График величин *эффективной пластической деформации в центральной части заготовки при импульсной вытяжке* (рис. 7, б) показал, что эффективные пластические деформации растут пропорционально увеличению зазора. При различных величинах зазора графики эффективных пластических деформаций имеют схожую форму, практически идентичную в промежутке от 0 до 25 мкс, а далее отличающиеся по величине испытанных деформаций. Следовательно, при той же величине импульса давления, но при большем зазоре можно добиться больших деформаций без значительных изменений в самом процессе формоизменения.

В обоих случаях, как при квазистатической, так и при импульсной вытяжке-формовке, при увеличении зазора наблюдается увеличение пластических деформаций в центральной части заготовки.

Совокупность графиков величин эффективных пластических деформаций при квазистатической вытяжке-формовке (см. рис. 6, а, б) показала, что наиболее благоприятные условия процесса, обеспечиваются при величине зазора

между прижимом и матрицей, равной $(h + 1,6h)$, при которой фланцевая часть заготовки испытывает наименьшие деформации, а формоизменение центральной части заготовки происходит относительно равномерно.

Совокупность графиков величин эффективных пластических деформаций при импульсной вытяжке-формовке (см. рис. 7, а, б) позволяют

сделать вывод, что наиболее благоприятные условия процесса обеспечиваются при величине зазора между прижимом и матрицей равной $(h + 0,4h)$, при которой фланцевая часть заготовки испытывает наименьшие деформации, а формоизменение центральной части заготовки происходит с относительно небольшим увеличением интенсивности.

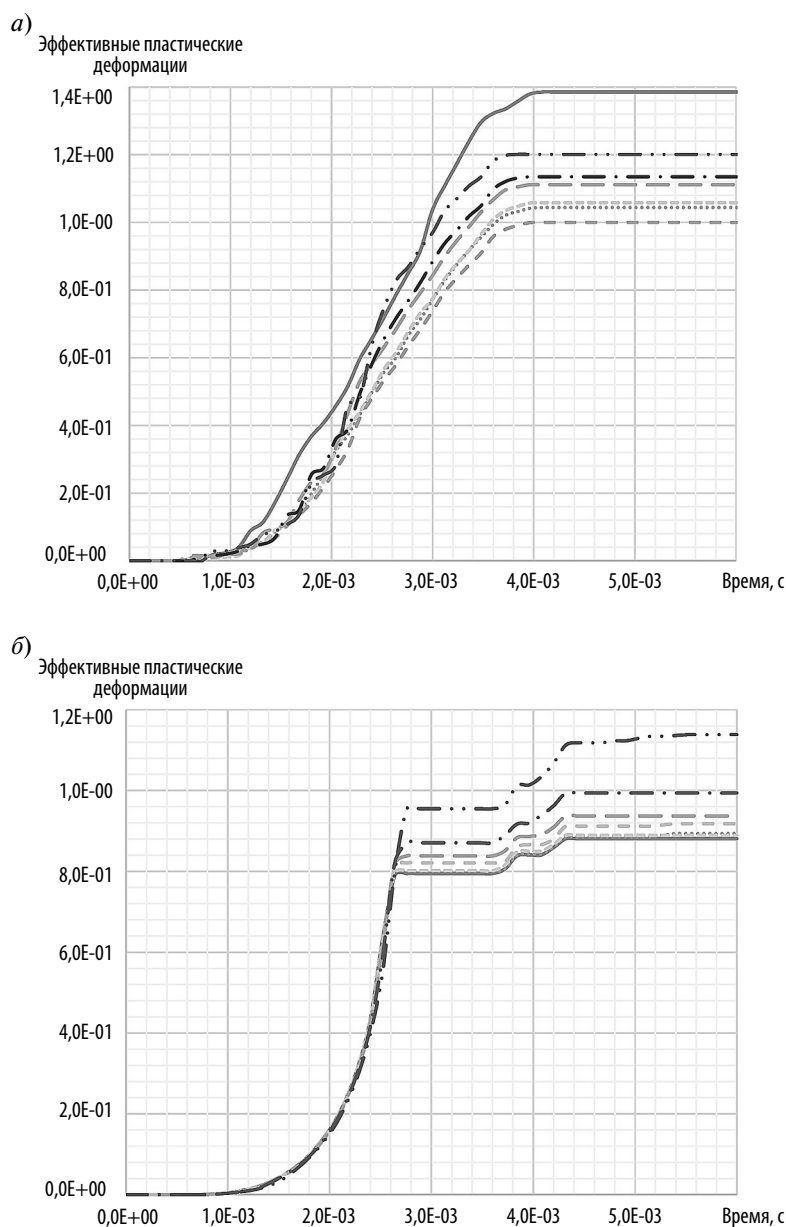


Рис. 7. Эффективные пластические деформации при импульсной вытяжке-формовке:
 а — на фланце заготовки; б — в центральной части заготовки
 (— $h + 0,05h$; — $h + 0,1h$; - - - - - $h + 0,2h$;
 - · - · - $h + 0,4h$; — — — — $h + 0,8h$; — · · — $h + 1,6h$; — · · — $h + 3,2h$)



График *перемещения центральной части заготовки по оси z при квазистатической вытяжке* (рис. 8, а) показал, что с увеличением зазора между прижимом и матрицей, центральная часть заготовки деформируется более равномерно в промежутке между 4 и 5 мс и интенсивно — на конечных стадиях деформации. Заготовка, изготовленная по схеме с наибольшим зазором

между матрицей и прижимом соответственно имеет наибольшую величину купола.

График *перемещения центральной части заготовки по оси z при импульсной вытяжке* (рис. 8, б) показал, что с увеличением зазора между прижимом и матрицей центральная часть заготовки деформируется более интенсивно. При всех значениях зазора отмечается наличие

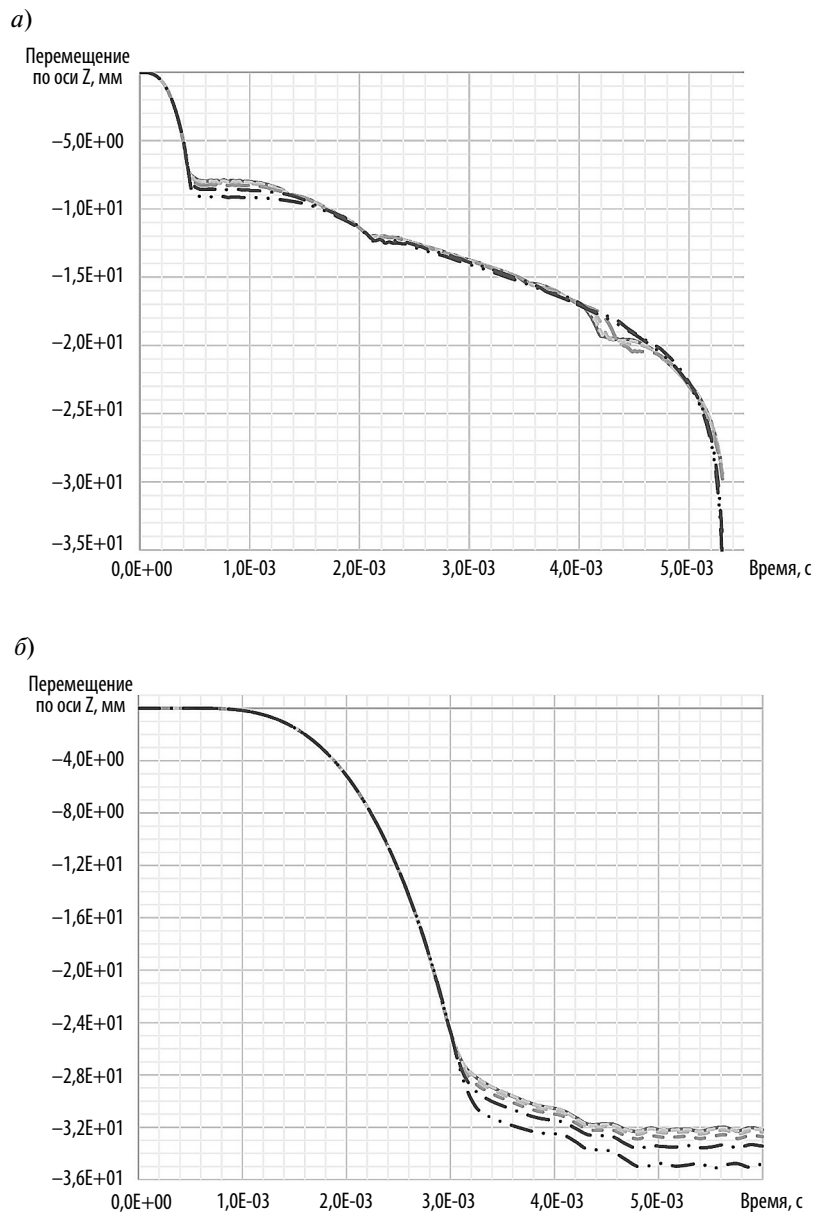


Рис. 8. Перемещение центральной части заготовки по оси z:

а — при квазистатической вытяжке-формовке;

б — при импульсной вытяжке-формовке

(— — $h + 0,05$ — h ; $h + 0,1h$; - - - - - $h + 0,2h$;

- - - - - $h + 0,4h$; — — — — — $h + 0,8h$; — . . . — $h + 1,6h$; — . . . — $h + 3,2h$)

пульсаций, что вызвано отражением волн давления от стенок камеры. Итоговое перемещение центральной части заготовки по координате z при схожих параметрах в случае импульсного формоизменения имеют большие значения, чем при квазистатическом.

Заключение

В рамках конечно-элементного комплекса LS-DYNA 971 разработаны компьютерные модели процессов вытяжки-формовки тонколистовой заготовки при импульсном и квазистатическом нагружении. Расчет производился для заготовки из материала латунь Л68 толщиной 0,24 мм. В процессе расчетов варьировалась величина зазора между прижимом и матрицей в диапазоне от $(h + 0,05h)$ до $(h + 3,2h)$. Установлена зависимость эффективных пластических деформаций и перемещения центральной части заготовки от выбираемой величины за-

зора. Получена общая картина вероятности складкообразования на фланце заготовки при импульсной и квазистатической вытяжке при помощи диаграмм предельных деформаций. Установлено, что наиболее благоприятная величина зазора между прижимом и матрицей в рассмотренном диапазоне с учетом напряженного состояния на фланце и в центральной части заготовки равна $(h + 1,6h)$ для квазистатического нагружения и $(h + 0,4h)$ для импульсного нагружения.

Сравнение квазистатического и динамического процессов вытяжки-формовки тонколистовой заготовки показало, что данные процессы отличаются по скорости деформирования, однако имеют сопоставимые конечные деформации. Процесс импульсной вытяжки-формовки в целом протекает более равномерно, чем квазистатический процесс, и позволяет достичь больших деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Ленинград: Машиностроение, 1979. 520 с.
2. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980. 431 с.
3. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 367 с.
4. Челноков Н.М. Технология горячей обработки материалов. Москва: Высш. школа, 1972. 286 с.
5. Кокорин В.Н. Технологические расчеты в процессах холодной листовой штамповки. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2002. 36 с.
6. Morigvati M.R. [et al.] A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in deep drawing // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. P. 1738–1747.
7. Бакиев А.В., Абдеев Р.Г., Мотус Э.П. Технология изготовления штампованных деталей и деталей из неметаллических материалов, горячая вытяжка днищ. Уфа: Изд-во Уфим. нефт. ин-т, 1989. 111 с.
8. Бурцев К.Н. Металлические сильфоны. М., Л.: Машгиз, 1963. 163 с.
9. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
10. Ракошиц Г.С. Электрогидроимпульсная штамповка. М.: Высш.шк., 1984. 192 с.
11. Вагин В.А. Численное моделирование и оптимизация импульсной вытяжки // Математическое моделирование в проектировании технологических процессов. 1995. С. 16–26.
12. Гординенко Б.А., Нечипорук Г.С. Тен Ен Со. Реакция цилиндрических и конических оболочек на осевой удар // Труды VIII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. 1973. С. 431–436.
13. Шигабутдинов Ф.Г., Муртазин Р.З., Мухутдинов Р.Ф. Численные эксперименты с выпучиванием оболочек переменной толщины под действием продольной нагрузки // Труды XXI Международной конференции по теории оболочек и пластин / СГТУ. СПб., 2005. С. 229–235.
14. Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 207 с.
15. Арсентьева К.С., Насс С.Е. Мамутов В.С. Давление при электрогидроимпульсной вытяжке-формовке тонолистовой заготовки // Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. 2016. С. 80–83.
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® // 11th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming. Dearborn. 2014. P. 1.1–1.9.
17. Арсентьева К.С., Мамутов В.С. Расчет процессов квазистатической формовки подвижными средами с применением комплекса LS-DYNA // Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. 2014. С. 114–117.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: xenia.ars@gmail.com

REFERENCES

1. **Romanovskiy V.P.** Spravochnik po kholodnoy shtampovke. L.: Mashinostroyeniye, 1979. 520 s. (rus.)
2. **Zubtsov M.Ye.** Listovaya shtampovka. L.: Mashinostroyeniye, 1980. 431 s. (rus.)
3. **Isachenkov Ye.I.** Shtampovka rezinoy i zhidkostyu. M.: Mashinostroyeniye, 1967. 367 s. (rus.)
4. **Chelnokov N.M.** Tekhnologiya goryachey obrabotki materialov. M.: Vyssh. shkola, 1972. 286 s. (rus.)
5. **Kokorin V.N.** Tekhnologicheskiye raschety v protsessakh kholodnoy listovoy shtampovki. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2002. 36 s. (rus.)
6. **Morovvati M.R. [et al.]** A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in deep drawing. *Jouranl of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210. P. 1738–1747.
7. **Bakiyev A.V., Abdeyev R.G. Motus E.P.** Tekhnologiya izgotovleniya shtampovannykh detaley i detaley iz nemetallicheskih materialov, goryachaya vytyazhka dnishch. Ufa: Izd-vo Ufim. nef. in-t, 1989. 111 s. (rus.)
8. **Burtsev K.N.** Metallicheskiye silfony. M.; L.: Mashgiz, 1963. 163 s. (rus.)
9. **Yutkin L.A.** Elektrogidravlicheskiy effekt i yego primeneniye v promyshlennosti. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1986. 253 s. (rus.)
10. **Rakoshits G.S.** Elektrogidroimpulsnaya shtampovka. M.: Vyssh.shk., 1984. 192 s. (rus.)
11. **Vagin V.A.** Chislennoye modelirovaniye i optimizatsiya impulsnoy vytyazhki. *Matematicheskoye modelirovaniye v proyektirovanii tekhnologicheskikh protsessov*. 1995. S. 16–26. (rus.)
12. **Gordinenko B.A., Nechiporuk G.S. Ten Yen So.** Reaktsiya tsillindricheskikh i konicheskikh obolochek na osevoy udar. *Trudy VIII Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plastin*. 1973. S. 431–436.
13. **Shigabutdinov F.G., Murtazin R.Z., Mukhutdinov R.F.** Chislennyye eksperimenty s vypuchivaniyem obolochek peremennoy tolshchiny pod deystviyem prodolnoy nagruzki. *Trudy XXI Mezhdunarodnoy konferentsii po teorii obolochek i plastin*. SGTU. SPb., 2005. S. 229–235.
14. **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniya vysokoskorostnogo deformirovaniya metall-ov. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 207 s.
15. **Arsentyeva K.X., Nass S.E. Mamutov V.S.** Davleniye pri elektrogidroimpulsnoy vytyazhke-formovke tonolistovoy zagotovki. *Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnogo foruma s mezhdunarodnym uchastiyem. Luchshiy doklady*. 2016. S. 80–83. (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®. *11th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming*. Dearborn. 2014. P. 1.1–1.9. (rus.)
17. **Arsentyeva X.S., Mamutov V.S.** Raschet protsessov kvazistaticheskoy formovki podvizhnymi sredami s primeneniyyem kompleksa LS-DYNA. *Nedelya nauki SPbGPU: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. 2014. S. 114–117. (rus.)

AUTHORS

ARSENTEVA Xenia S. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: xenia.ars@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 12.12.2016.