

DOI 10.5862/JEST.243.16

УДК 621.983.044+532

В.С. Мамутов, А.В. Мамутов, А.А. Курятников

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ФОРМОВКИ С УЧЕТОМ РАЗРЫВА ВОДЫ

V.S. Mamutov, A.V. Mamutov, A.A. Kuriatnikov

COMPUTER SIMULATION OF AN ELECTROHYDRAULIC SHEET METAL PRESSING IN VIEW OF THE CAVITATION TRESHOLD

Показано присутствие кавитационных эффектов при электрогидроимпульсной штамповке. Оценка влияния кавитации на давление в разрядной камере и на поверхности тонколистовой заготовки сделана с применением разработанной в комплексе LS-DYNA 971 осесимметричной модели разрядной камеры. Ввод энергии в плазму задавался на основе экспериментальных данных, вода моделировалась идеальной сжимаемой жидкостью, заготовка — одномерной оболочечной моделью. Расчеты, проведенные для отрицательных давлений разрыва воды 0,1 и 40 МПа, показали незначительную разницу в параметрах деформированного состояния заготовки при значительном различии импульсного давления на поверхности заготовки.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА; КАВИТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ; ДАВЛЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ; ВВОД ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМУ; ИДЕАЛЬНАЯ СЖИМАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ; ОДНОМЕРНАЯ ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ЗАГОТОВКИ; ДАВЛЕНИЕ РАЗРЫВА ВОДЫ; ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ В КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA 971.

The presence of cavitation effects during electrohydraulic pressing is shown. The effect of cavitation on the pressure in the discharge chamber and at the blank surface is estimated using a numerical model of the axisymmetric discharge chamber developed using the LS-DYNA 971 finite element complex. The energy deposition law in a plasma channel is defined by the experimentally obtained curve. The water is defined as an ideally compressed liquid. The blank is built using one-dimensional elements with axisymmetrical shell formulation. The calculations performed for negative cavitation thresholds of 0.1 MPa and 40 MPa have shown the negligible difference in the blank's deformation despite the fact that pulse pressure at the blank's surface changes significantly.

ELECTROHYDRAULIC FORMING; CAVITATION IN WATER; COMPUTER SIMULATION USING LS-DYNA 971; ENERGY DEPOSITION LAW; IDEALLY COMPRESSED LIQUID; AXI-SYMMETRICAL SHELL; CAVITATION THRESHOLD; NUMERICAL MODEL OF THE AXISYMMETRIC DISCHARGE CHAMBER; NEGLIGIBLE DIFFER.

Электрогидроимпульсная обработка материалов эффективна в различных технологиях, требующих высокой концентрации энергии и давления [1]. Впервые в 1944 году силовой эффект высоковольтного электрического разряда в жидкости описали Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко

[2]. Применения высоковольтного электрического разряда для обработки металлов давлением предложено Л.А. Юткиным в 1955 году [3]. Начиная с середины 60-х годов высоковольтный разряд в жидкости как источник высокого давления нашел широкое применение в машино-

строении при изготовлении сложных высокоточных деталей из листовых и трубных заготовок [4]. В настоящее время процессы электрогидроимпульсной штамповки (ЭГИШ) широко применяются и исследуются в странах с высокоразвитым машиностроением — США, Японии, Германии, Франции [5]. Следует отметить относительно высокий уровень промышленного применения и исследовательской активности в области этих процессов на Украине [6], а также в Беларуси [7]. В России в области машиностроения можно отметить развитие комплексной теории канала плазменного разряда, гидродинамики и деформирования заготовки в условиях ЭГИШ с использованием компьютерного моделирования. Адекватное компьютерное моделирование ЭГИШ стало возможным только с появлением таких универсальных научных конечно-элементных комплексов, как LS-DYNA® [8]. Сначала комплекс LS-DYNA применялся для моделирования ЭГИШ при упрощенной геометрии камеры [9], но позже учитывалась реальная геометрия электродной системы и другие особенности процесса [10–12].

Однако такое моделирование деформирования тонколистовой заготовки не затрагивало вопросы, связанные с кавитацией рабочей жидкости в разрядной камере. Цель нашей работы — оценить на базе компьютерного моделирования процесса при помощи конечно-элементного комплекса LS-DYNA влияние уровня разрыва воды на характер деформирования тонколистовой заготовки.

Электрический разряд и кавитация воды

В предыдущих работах, в которых проводились конечно-элементные расчеты ЭГИШ [10–12], предполагалось, что разрыв воды происходит вблизи значения отрицательного давления 0,1 МПа. Теоретически вода может выдерживать отрицательные давления до 1000 МПа, но на практике в условиях статических испытаний даже в чистой фильтрованной воде кавитация наступает при отрицательных давлениях уже в 30 МПа [13]. Исследования при импульсном растяжении показали, что прочность воды может достигать 46 МПа [14]. Обычно в технике кавитацию рассматривают в связи с разрушением поверхности

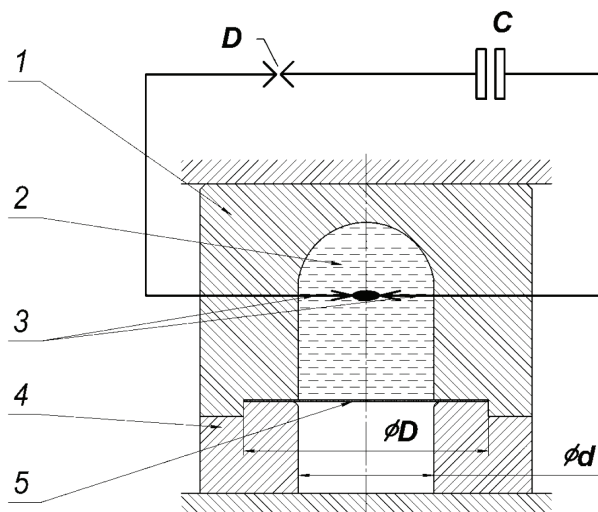


Рис. 1. Схема электрогидроимпульсной вытяжки-формовки: 1 — разрядная камера; 2 — электроды; 3 — рабочая жидкость (вода); 4 — матрица; 5 — тонколистовая заготовка

изделий, происходящим при схлопывании пузырьков [15]. Как будет показано ниже, похожая проблема имеет место и при ЭГИШ.

При ЭГИШ разрядная камера 1 заполнена рабочей жидкостью, в качестве которой чаще всего используется техническая или водопроводная вода 2 (рис. 1).

При разряде предварительно заряженной высоковольтной конденсаторной батареи C на электроды 3 при их расположении в жидкости с определенным расстоянием между концами электродов (межэлектродный промежуток) происходит электрический пробой. Сопротивление промежутка после пробоя сильно падает, а ток резко возрастает, и происходит выделение большей части электрической энергии конденсатора. Образуется плазменный канал; выделение электрической энергии внутри канала приводит к повышению температуры, а также давления в нем и быстрому расширению. Расширение канала образует волну сжатия, которая приводит к деформированию листовой заготовки 5, расположенной на поверхности матрицы 4.

Движение заготовки образует в жидкости вблизи ее поверхности зоны отрицательного давления, которые могут приводить к разрыву жидкости — ее кавитации. Такие зоны перемещаются внутри камеры, и момент разрыва жидкости

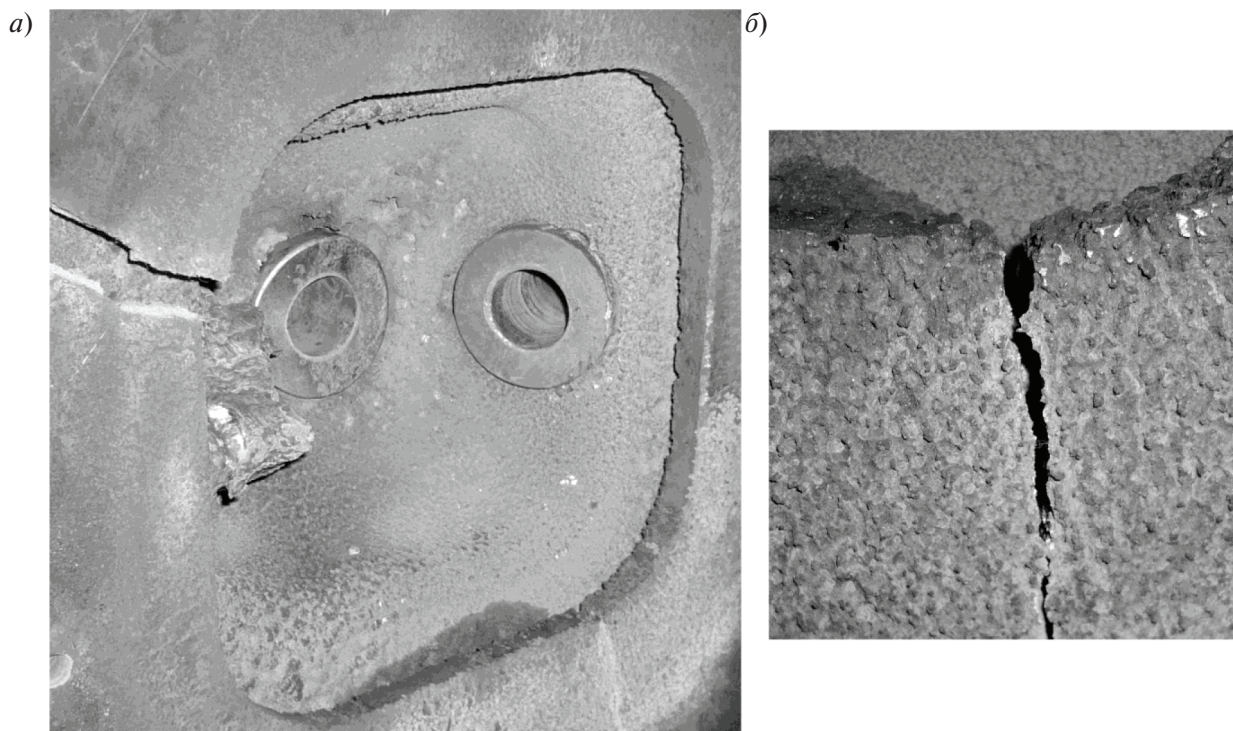


Рис. 2. Разрядная камера: *а* — разрушение стенки и дна камеры; *б* — локальное местное разрушение

может произойти, когда зона отрицательного давления находится вблизи стенки камеры. Если время воздействия отрицательного давления на жидкость достаточно для образования пузырьков, образуется слой пузырьковой жидкости. При приходе волны сжатия происходит сокращение (схлопывание) пузырьков, прилегающих к поверхности камеры или находящихся на некотором расстоянии от поверхности. В этом случае возможно локальное возникновение импульсного давления порядка нескольких сотен МПа [15], многократное воздействие которого приводит к разрушению поверхности камеры. Так как переменное давление в жидкости создает переменные, преимущественно растягивающие напряжения внутри корпуса камеры, то возможно образование сначала микротрещин, затем их увеличение и разрушение разрядной камеры.

В качестве примера на рис. 2, *а* показана разрядная камера из коррозионностойкой стали (размер выходного окна — 150×150 мм) с трещиной (слева, вверху рисунка).

На кромке дна камеры при увеличении можно увидеть разрушение поверхности и мелкие трещины в нескольких местах (рис. 2, *б*). Общее разрушение камеры произошло после примерно нескольких сотен тысяч разрядов, что сопоставимо с ресурсом работы электрогидроимпульсной установки. Кроме того, металл в районе трещины ранее был ослаблен сваркой при частичной модификации конструкции камеры, которая могла бы иметь значительно больший ресурс работы. Поэтому с точки зрения промышленного применения ЭГИШ разрушение поверхности разрядной камеры вследствие кавитации нельзя считать критичным.

Влияние кавитации на давление в жидкости вблизи заготовки

Судя по виду поверхности камеры на фотографии (рис. 1), а также данным многочисленных исследователей кавитация реально имеет место при ЭГИШ. Поэтому при проектировании технологий важен вопрос, каким образом кавитация влияет на давление в камере и как это в итоге влияет на деформирование заготовки.

Технологические процессы ЭГИШ можно условно разделить на две группы: процессы с «податливой» заготовкой (например, тонколистовая формовка) и процессы с незначительной податливостью заготовки («жесткая» заготовка). Ко второй группе можно отнести калибровку, снятие остаточных напряжений, получение мелкодисперсных материалов и др., когда движение поверхности объекта воздействия давления незначительно смещает рабочую жидкость в направлении действующего давления. В варианте такой «жесткой» технологической оснастки и заготовки, как показывают компьютерные расчеты [11], отрицательное давление может не возникать. В этом случае кавитации рабочей жидкости на этапе нагружения не происходит. В работе [16] при помощи компьютерных расчетов с учетом гидродинамики пузырьковой жидкости показано, что созданием слоя пузырьковой жидкости вблизи заготовки на этапе, предшествующем прохождению волны сжатия от канала разряда, можно увеличить амплитуду давления, что служит положительным фактором для «жестких» операций ЭГИШ.

Деформирование заготовки в формовочных процессах в условиях ЭГИШ с большой податливостью заготовки происходит преимущественно за счет давления гидротока жидкости, теорию которого применительно к ЭГИШ разработал В.Н. Чачин [4]. При этом имеют место кавитационные разрывы жидкости вблизи деформируемой заготовки, когда давление в жидкости становится отрицательным. Однако возможности аналитических методов гидромеханики, которыми пользовались в прошлом веке В.Н. Чачин и другие исследователи нагружения заготовки, не позволяли адекватно оценить давление в разрядной камере и вблизи деформируемой заготовки, а также влияние разрыва жидкости при кавитации на давление.

Компьютерная модель процесса и исходные данные для компьютерного моделирования

Моделирование осуществлялось в конечно-элементном комплексе LS-DYNA 971. Использовалась компьютерная модель осесимметричного разряда в жидкости аналогично тому, как это

сделано в работе [9]. Жидкость, расположенная в разрядной камере сверху электродов (рис. 1), в случае «податливой» деформируемой заготовки из тонколистового металла будет иметь незначительное перемещение по сравнению с жидкостью вблизи заготовки. Двумерная модель, получаемая в этом случае, более экономична с точки зрения общего количества конечных элементов и времени счета по сравнению с трехмерной моделью при учете электродной системы [10].

Для обеспечения варианта «податливой» заготовки рассматривалась электрогидроимпульсная свободная вытяжка осесимметричной заготовки из латуни Л68 диаметром $D = 110$ мм, толщиной 0,24 мм в матрицу с диаметром очка $d = 60$ мм (см. рис. 1). Фиксированный зазор между прижимом и матрицей был 0,3 мм. С учетом особо тонколистового металла предполагалось целесообразным моделировать заготовку плоской оболочкой, которая в силу симметрии задавалась в виде балочного элемента по типу *BEAM*. Материалы камеры, матрицы и прижима предполагались абсолютно жесткими и задавались моделями *MAT_RIGID*.

Динамическая кривая деформационного упрочнения аппроксимировалась в степенном виде (по Холломану):

$$\sigma_s = B \varepsilon_i^m,$$

где σ_s — напряжение текучести; ε_i — интенсивность тензора логарифмических деформаций. Величины динамической кривой деформационного упрочнения для латуни Л68 взяты по данным работы [17]: $B = 925$ МПа и $m = 0,44$. Выбрана модель материала *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY* с указанными выше параметрами кривой деформационного упрочнения степенного вида и упругими константами: $E = 1,15 \cdot 10^{11}$ Па — модуль Юнга; $\nu = 0,35$ — коэффициент Пуассона и плотностью $\rho = 8300$ кг/м³. Коэффициент кулоновского трения задавался равным $\mu = 0,2$ для трения покоя и $\mu = 0,15$ при движении заготовки.

В качестве модели материала для плазменного канала использовалась модель *MAT_NULL*, совместно с уравнением состояния *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK*. При этом в качестве кривой, задающей ввод энергии, принималось отношение мощности

ввода энергии к начальному объему сферического канала разряда. Начальный радиус канала брался 0,5 мм. Вводимая мощность определялась зависимостью, аналогичной принятой в работе [9]. Зависимость мощности от времени представляла три последовательных треугольных импульса длительностью 57,4 мкс; 57,5 мкс; 54,1 мкс и с амплитудами соответственно 9,1; 4,9 и 1,69 МВт. Данные были получены экспериментально для последующей верификации результатов расчета по измеренным параметрам деформированного состояния заготовки, также представленным в работе [9].

В качестве модели жидкости использовалась модель идеальной сжимаемой жидкости *MAT_ELASTIC_FLUID* с начальной плотностью $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ и модулем объемного сжатия $K = 2,35 \text{ ГПа}$. Во второй карте опции **MAT_ELASTIC_FLUID* величина отрицательного давления разрыва воды варьировалась в пределах от 0,1 до 40 МПа.

При конечно-элементной разбивке обеспечивалась регулярная прямоугольная сетка на подвижных границах «плазма–жидкость» и «заготовка–жидкость». С учетом значительного формоизменения канала разряда делалось экспоненциальное сгущение сетки вблизи границ канала разряда. Расчет осуществлялся в лагранжево-эйлеровой постановке (ALE).

Результаты расчетов

Пример результатов расчетов при отрицательном давлении разрыва жидкости 0,1 и 40 МПа представлен на графиках рис. 3. Элемент №1 находился на границе с каналом разряда, а элемент №514 находился вблизи центра поверхности заготовки. Можно отметить существенное различие графиков давления, действующего на заготовку, при разных уровнях давления разрыва жидкости.

На рис. 4 представлены графики зависимости эффективной деформации заготовки от времени при отрицательных давлениях разрыва жидкости 0,1 и 40 МПа.

Элемент №12639 находился вблизи радиуса закругления кромки матрицы, а элемент №12685 — в центре заготовки. Следует отметить, что графики эффективных деформаций при отрицатель-

ных давлениях разрыва жидкости 0,1 и 40 МПа имеют различия только в начале, когда деформация не превышает 10–20 % от конечной деформации. Расчеты показали, что во всем диапазоне от 0,1 до 40 МПа давления разрыва воды различие конечных значений эффективной деформации имеет порядок 1–3 %, что обусловлено больше погрешностью вывода результатов расчета. При этом в работе [9] показано, что экспериментальные значения деформаций для разных точек заготовки различаются на 10–15 % от расчетных значений при заданной из опытов функции ввода мощности электрической энергии в канал разряда.

Для данного случая «податливой» заготовки данный эффект достаточно хорошо объясняют графики кинетической энергии системы (глобальной), представленные на рис. 5 в нормированном виде (текущее значение отнесено к максимальной величине кинетической энергии).

Видно, что для вариантов давления разрыва жидкости 0,1 (1) и 40 (2) МПа графики изменения кинетической энергии — ее накопления в виде энергии гидротока и последующего преобразования в энергию пластического деформирования — достаточно близки, а в конце движения заготовки практически совпадают. Этим можно объяснить близость величин эффективной деформации точек заготовки для разных давлений разрыва. По графикам также видно, что для принятого варианта исходных данных примерно 20 % кинетической энергии оказались не преобразованными в энергию пластического деформирования, что, по сути, определяет величину гидродинамического КПД процесса в этом варианте расчетных данных. Следует отметить, что аналогичная картина имеет место и для других значений давления разрыва жидкости в указанном выше диапазоне. Поэтому можно согласиться с автором работы [4] относительно преобладающего влияния гидротока жидкости на свободное формоизменение «податливой» заготовки. С точки зрения прогнозирования пластической деформации заготовки можно считать расчеты при помощи конечно-элементного комплекса LS-DYNA с моделью фиксированного давления разрыва воды вполне приемлемыми

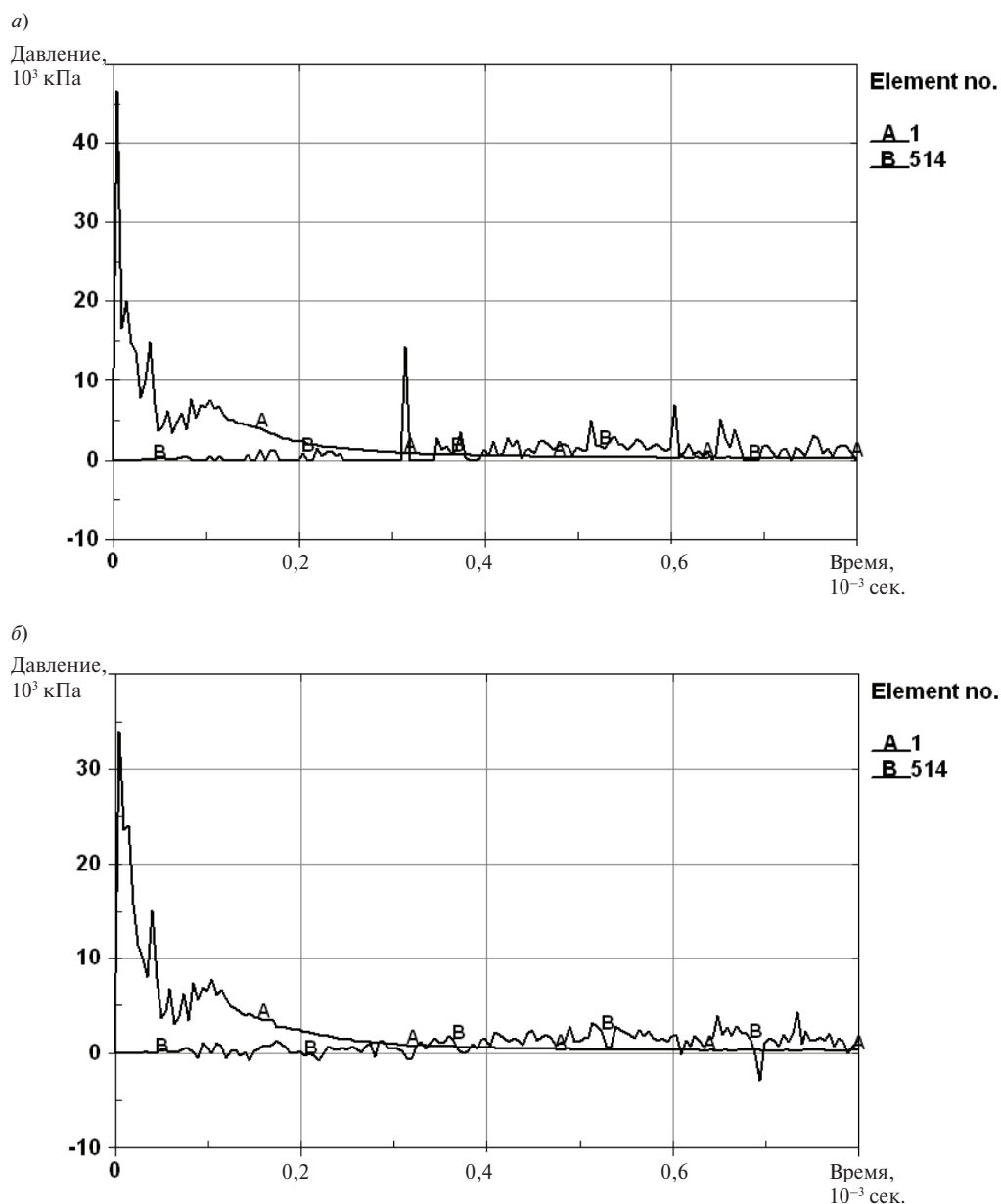


Рис. 3. Графики зависимости давления от времени в жидкости вблизи канала разряда (*A*) и над центром заготовки (*B*) при отрицательном давлении разрыва жидкости (*a* – 0,1 МПа; *б* – 40 МПа)

для расчета процессов ЭГИШ в случае «податливой» заготовки.

Экспериментальная верификация параметров импульсного давления в жидкости вблизи тонкой деформируемой заготовки представляет технически сложную задачу. Как показывают компьютерные расчеты [10], давление в конкретный момент времени даже для разрядной камеры небольшого объема сильно различается в

разных, достаточно близких точках камеры. Поэтому измерение на стенке камеры, например пьезоэлектрическим датчиком, не дает корректной картины давления на заготовку. С этой точки зрения интересен способ, основанный на измерении при помощи фотосъемки сверхскоростным фоторегистратором скорости вылета струи жидкости через небольшое отверстие в заготовке в процессе нагружения и деформирования заготов-

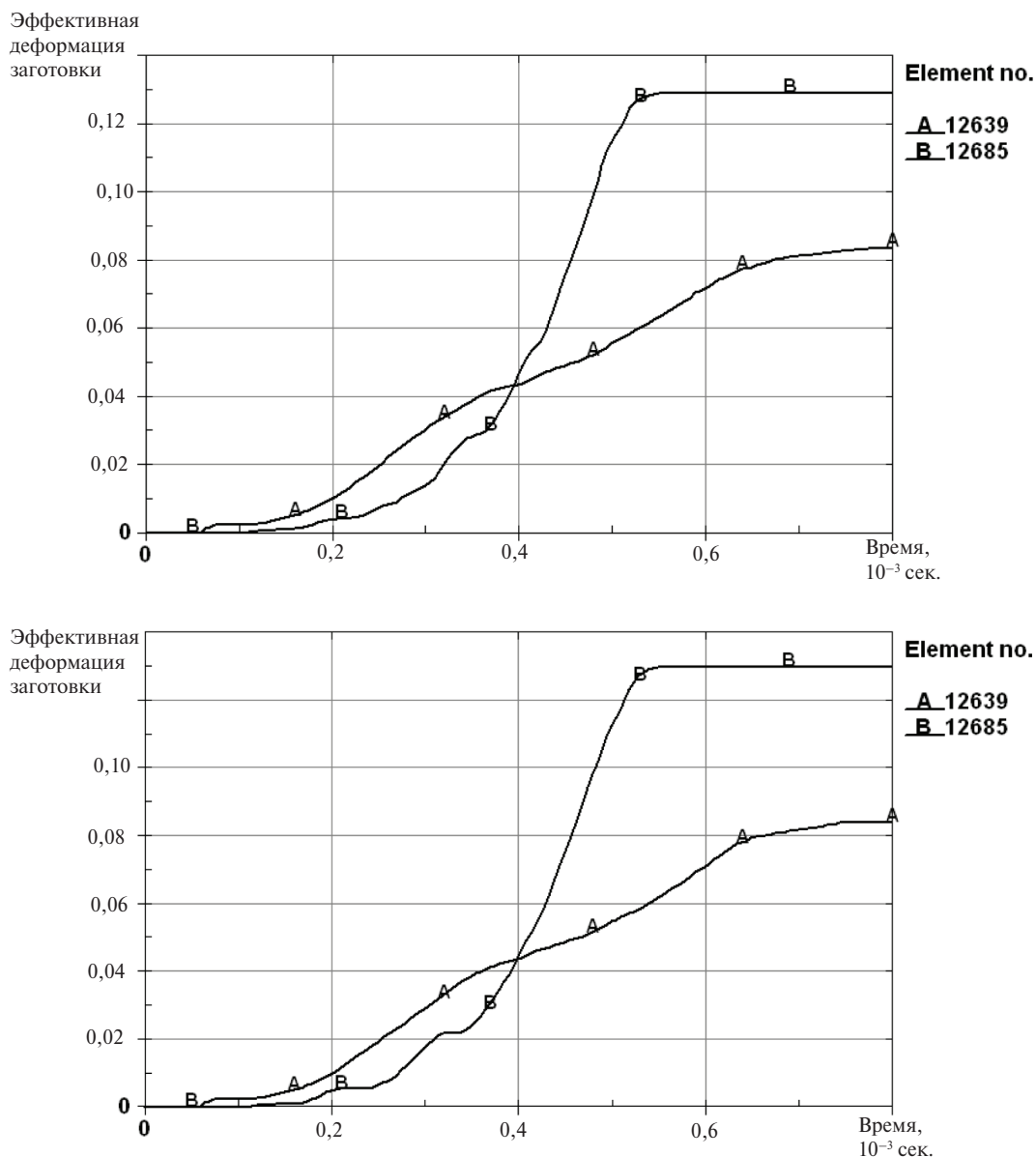


Рис. 4. Графики зависимости эффективной деформации заготовки от времени вблизи радиуса закругления кромки матрицы (A) и в центре заготовки (B) при отрицательных давлениях разрыва жидкости (a – 0,1 МПа; б – 40 МПа)

ки [17]. Представленные в этой работе результаты таких измерений показывают пульсирующий характер давления, действующего на подвижную тонколистовую заготовку, аналогично тому, как это показывают и расчеты (см. рис. 3).

Для корректного определения импульсного давления на «податливой» заготовке в процессах ЭГИШ нужны, по крайней мере, экспериментальные данные о времени разрыва воды в за-

висимости от величины отрицательного давления, времени воздействия давления на жидкость, температуры, степени загрязнения воды посторонними примесями. Имея такие зависимости, а также создав в рамках конечно-элементного комплекса соответствующую модель жидкости, можно более точно прогнозировать давление на подвижной заготовке. К сожалению, такие экспериментальные данные пока недоступны.

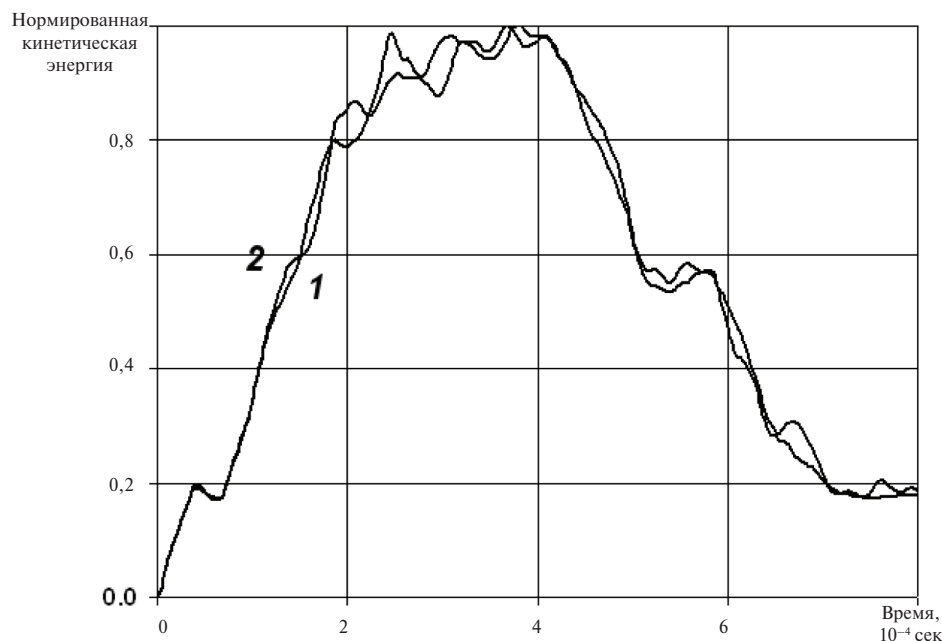


Рис. 5. Зависимость нормированной кинетической энергии от времени при отрицательных давлениях разрыва жидкости 0,1 (1) и 40 (2) МПа

Заключение

На примере разрушения поверхности разрядной камеры показано влияние кавитационных эффектов при ЭГИШ. Для оценки влияния кавитации на давление в разрядной камере и на поверхности подвижной деформирующейся тонколистовой заготовки выбрана осесимметричная модель, разработанная на основе техники ALE с применением программного комплекса LS-DYNA 971. Расчеты производились на примере

конкретной «податливой» заготовки в пределах отрицательных давлений воды от 0,1 до 40 МПа, при которых возможна ее кавитация. Результаты расчетов показали незначительную разницу в параметрах деформированного состояния заготовки и одновременно значительное различие импульсного давления на поверхности заготовки. Это подтверждает теорию преимущественного влияния гидротока на деформацию «податливой» заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г.А. Гулого. М.: Машиностроение, 1977. 320 с.
2. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов. Вып. 1/2. М.: Госэнергоиздат, 1944. 60 с.
3. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.: Машгиз, 1955. 50 с.
4. Чачин В.Н. Электрогидроимпульсная обработка машиностроительных материалов. Минск: Наука и техника, 1978. 184 с.
5. Rohatgi A., Stephens E.V., Davies R.W., Smith M.T., Soulami A., Ahzi S. Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212. № 5. P. 1070–1079.
6. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. 272 с.
7. Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования металлов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
8. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006. 498 p.
9. Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых

металлов с применением программного комплекса LS-DYNA 971 // Металлообработка, 2012. № 4(69). С. 23–29.

10. **Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2014. № 1(190). С. 101–107.

11. **Mamutov V.S., Mamutov A.V., Golovaschenko S.F.** Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA® // 13th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming. Dearborn, USA. 2014. P. 9.

12. **Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Mamutov V.S., Bonnen J.F.** Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 219. P. 84–100.

13. **Пирсол И.** Кавитация. М.: Мир, 1975. 95 с.

14. **Богач А.А., Уткин А.В.** Прочность воды при импульсном растяжении // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т.41. №4. С. 198–205.

15. **Корнфельд М.** Упругость и прочность жидкостей. М., Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. 108 с.

16. **Мамутов В.С.** Взаимодействие волны сжатия со слоем кавитированной воды при электрогидроимпульсной обработке // Труды XXVI Международной конференции «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций». СПб.: ИД «ФАРМиндекс», 2015. С. 205–206.

17. **Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С.** Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 208 с.

REFERENCES

1. **Oborudovaniye i tekhnologicheskiye protsessy s ispolzovaniyem elektrogidravlicheskogo effekta.** [Equipment and technological processes with using of electrohydraulic effect.] / Pod red. G.A. Gulogo. M.: Mashinostroyeniye, 1977. 320 p. (rus)

2. **Lazarenko B.R., Lazarenko N.I.** Elektricheskaya eroziya metallov. [Electrical erosion of metals.] Vyp. 1/2. M.: Gosenergoizdat, 1944. 60 p. (rus)

3. **Yutkin L.A.** Elektrogidravlicheskiy effekt. [Electrohydraulic effect.] M.: Mashgiz, 1955. 50 p. (rus)

4. **Chachin V.N.** Elektrogidroimpulsnaya obrabotka mashinostroitelnykh materialov. [Electrohydraulic processing of machine-building materials.] Minsk: Nauka i tekhnika, 1978. 184 p. (rus)

5. **Rohatgi A., Stephens E.V., Davies R.W., Smith M.T., Soulami A., Ahzi S.** Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212. № 5. P. 1070–1079.

6. **Taranenko M.Ye.** Elektrogidravlicheskaya shtampovka: teoriya, oborudovaniye, tekhnoprotsessy. [Electrohydraulic stamping: the theory, the equipment, technological processes.] Kharkov: Izd-vo KhAI, 2011. 272 p. (rus)

7. **Zdor G.N., Isayevich L.A., Kachanov I.V.** Tekhnologii vysokoskorostnogo deformirovaniya metallov. [Technologies of high-speed deforming of metals]. Minsk: BNTU, 2010. 456 s. (rus)

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

9. **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Metodika kompyuternogo modelirovaniya elektrogidroimpulsnogo formoizmeneniya tonkolistovykh metallov s primeneniym programmnogo kompleksa LS-

DYNA 971 [Using LS-DYNA 971 code for computer simulation of electro-hydro-impulse forming of thin-sheet metals]. *Metalloobrabotka*. 2012. № 4(69). S. 23–29. (rus)

10. **Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Modelirovaniye elektrogidroimpulsnoy listovoy formovki s primeneniym kompleksa LS-DYNA [Simulating the electro-hydraulic sheet metal forming using LS-DYNA]. *St.Petersburg State Politechnical Universiti Journal*. St.Petersburg: SPbGPU Publ. 2014. №1(190). P. 101–107. (rus)

11. **Mamutov V.S., Mamutov A.V., Golovaschenko S.F.** Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®. *13th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming*. Dearborn, USA. 2014. P. 9.

12. **Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Mamutov V.S., Bonnen J.F.** Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 219. P. 84–100.

13. **Pirsol I.** Kavitatsiya. [Cavitation.] M.: Mir, 1975. 95 p. (rus)

14. **Bogach A.A., Utkin A.B.** Prochnost vody pri impulsnom rastyazhenii [Tensile strength of water at impulse tension]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2000. T.41. №4. S. 198–205. (rus)

15. **Kornfeld M.** Uprugost i prochnost zhidkostey. [Elasticity and strength of fluids.] M., L.: Gosudarstvennoye izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1951. 108 s. (rus)

16. **Mamutov V.S.** Vzaimodeystviye volny szhatiya so sloyem kavitirovannoy vody pri elektrogidroimpulsnoy obrabotke [Interaction of wave of compression with layer of water after cavitation at electro-hydraulic process]. *Tруды XXVI Mezhdunarodnoy konferentsii «Matematicheskoye i kompyuternoye modelirovaniye v*

mekhanike deformiruyemykh sred i konstruksiy». SPb.: ID «FARMindeks», 2015. S. 205–206. (rus)

17. **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniya vysokoskorostnogo deformirovaniya

metallov. [Methods of research of high-speed deformation of metals.] Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 208 s. (rus)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

MAMUTOV Vicheslav S. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

МАМУТОВ Александр Вячеславович — кандидат технических наук, приглашенный ученый Оклендского университета (Мичиган, США).

2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309.

E-mail: A.Mamutov@yahoo.com

MAMUTOV Aleksandr V. — Oakland University.

2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309.

E-mail: A.Mamutov@yahoo.com

КУРЯТНИКОВ Александр Алексеевич — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: kuriatnikov91@mail.ru

KURIATNIKOV Aleksandr A. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: kuriatnikov91@mail.ru