



УДК 621.983.044

А.В. Мамутов, В.С. Мамутов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ЛИСТОВОЙ ФОРМОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСА LS-DYNA

A.V. Mamutov, V.S. Mamutov

SIMULATING THE ELECTRO-HYDRAULIC SHEET METAL FORMING USING LS-DYNA

Разработана методика моделирования электрогидроимпульсной листовой формовки при помощи конечно-элементного комплекса LS-DYNA, в которой учитывается реальная форма разрядной камеры с соосным расположением электродов и задается полученная экспериментально функция выделения энергии в канале разряда. Представлен пример компьютерного расчета динамики формы плазменной полости канала разряда, давления в разрядной камере, деформации заготовки для процесса вытяжки тонколистовой стали 12X18H10T. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных осуществлялось по прогибу заготовки и интенсивности тензора деформаций.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ЛИСТОВАЯ ФОРМОВКА; РАЗРЯДНАЯ КАМЕРА С СООСНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ; ФУНКЦИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В КАНАЛЕ РАЗРЯДА; КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ КОМПЛЕКС LS-DYNA; ВЫТЯЖКА ТОНКОЛИСТОВОЙ СТАЛИ 12X18H10T.

The technique of simulating the electro-hydraulic sheet metal forming process using finite element complex LS-DYNA is developed. The numerical model takes into account the actual geometry of the discharge chamber with coaxial electrodes as well as experimentally obtained function of energy input in the discharge channel. The results of simulation of electro-hydraulic drawing of stainless steel blank including the shape of the discharge channel, distribution of pulse pressure, and deformation of the blank are presented. The developed model is validated by comparing the numerically predicted and experimentally measured parameters of the blank in a final state after discharge.

ELECTRO-HYDRAULIC SHEET-METAL FORMING; DISCHARGE CHAMBER WITH COAXIAL ELECTRODES; FUNCTION OF ENERGY DEPOSITION IN THE DISCHARGE CHANNEL; COMPUTER SIMULATION; FINITE-ELEMENT CODE LS-DYNA; DEEP DRAWING OF THIN SHEET STAINLESS BLANK.

Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГИШ) применяется в условиях мелкосерийного и индивидуального производства для изготовления деталей из листовых, тонколистовых и особо тонколистовых металлов [1–3]. Одна из особенностей ЭГИШ — возможность создания оптимальных параметров импульсного давления (фронт, амплитуда, общая длительность), требуемых для конкретной технологической операции. Эти параметры определяются разрядным контуром электрогидроимпульсной установки, конструкциями разрядной камеры и инструмента, свойствами жидкости и деформируемой заготовки. Большое число факторов, влияющих на процесс преобразования электрической энер-

гии конденсаторной батареи в полезную энергию пластического деформирования заготовки, затрудняет экспериментальные подходы к определению оптимальных параметров нагружения заготовки. Это приводит к созданию неэффективных технологий ЭГИШ, потерям времени и денег при их отладке. Поэтому компьютерное моделирование ЭГИШ на этапе разработки проектирования процесса. Комплекс LS-DYNA [4] — один из наиболее эффективных конечно-элементных комплексов для компьютерного моделирования процессов импульсного деформирования металлов, в том числе ЭГИШ. Он позволяет рассчитать волновое взаимодействие

между плазменным каналом и рабочей жидкостью, рабочей жидкостью и деформируемой заготовкой, а также заготовкой и инструментом. Расчет физико-механических процессов при ЭГИШ с использованием комплекса LS-DYNA стал возможным после отладки методики моделирования взаимодействия листовой заготовки с жидкостью и с рабочим инструментом [5, 6]. Моделирование физико-механических процессов в целом стало возможным после разработки модели канала разряда в комплексе LS-DYNA 971 [7, 8]. Цель настоящей работы — разработка методики компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых металлов с учетом реальной трехмерной конфигурации разрядной камеры и электродов.

**Исходные данные
для компьютерного моделирования**

Рассматривалось компьютерное моделирование электрогидроимпульсной вытяжки тонколистовой заготовки с применением разрядной камеры с соосным расположением электродов, схема которой с основными размерами представлена на рис. 1

Эксперименты проводились на электроимпульсной установке с максимальным напряжением заряда конденсаторной батареи $U_0 = 6$ кВ, емкостью конденсаторной батареи $C = 300$ мкФ, индуктивностью подводов $L = 0,878$ мкГн. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода с добавлением поваренной соли для увеличения межэлектродного расстояния d (см. рис. 1) при относительно низком напряжении заряда конденсаторной батареи. Изоляция электродов была выполнена из стеклотекстолита (стекловолокно, намотанное на металлическую часть электродов и пропитанное эпоксидной смолой).

Функция мощности выделения электрической энергии в канале разряда определялась через экспериментально измеренные параметры разрядного тока $i(t)$ и напряжения на электродах $u(t)$:

$$N(t) = u(t)i(t).$$

В качестве исходных данных в компьютерном расчете задавалась удельная мощность выделения энергии

$$N^* = N(t)/V_0,$$

где V_0 — начальный объем разрядного канала.

Разрядный ток измерялся поясом Роговского с интегрирующей цепочкой, а напряжение —

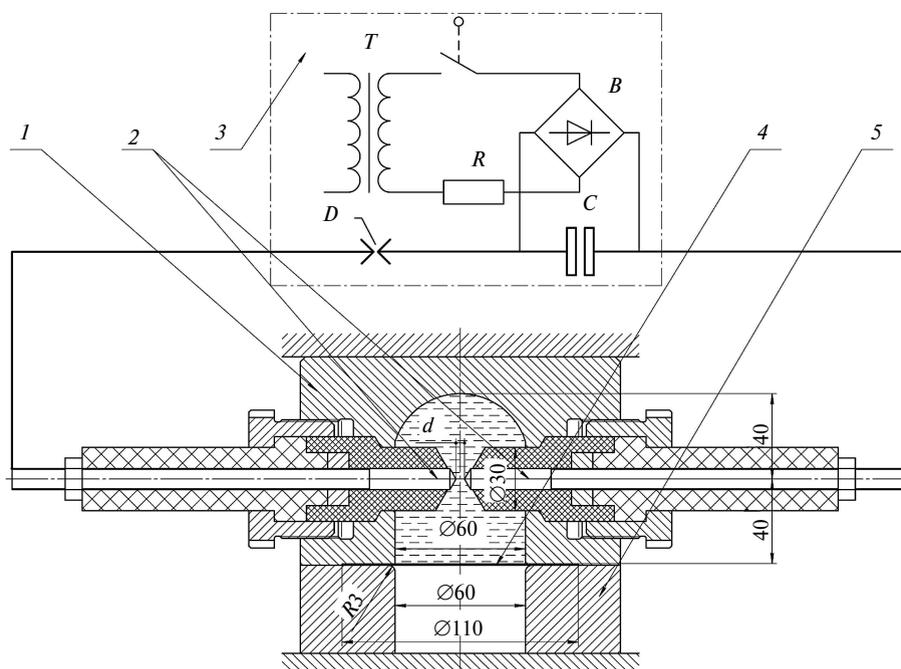


Рис. 1. Схема электрогидроимпульсной вытяжки тонколистового металла:
1 — разрядная камера с водой; 2 — электроды; 3 — электрогидроимпульсная установка;
4 — листовая заготовка; 5 — матрица

при помощи делителя импульсных напряжений. Чтобы электромагнитные наводки, возникающие в элементах делителя напряжений, не сильно искажали функцию мощности, при обработке использовались отдельные точки осциллограмм, где эти наводки не сказываются [9], а именно, где

$$i(t) = 0, \\ di/dt = 0.$$

В эти моменты времени сигнал делителя соответствует чисто активному сопротивлению. После обработки осциллограмм тока и напряжения удельная мощность от времени задавалась кусочно-линейной функцией

$$N^* = N^*_1 t / t_1 \text{ при } t < t_1; \\ N^* = N^*_1 (t_2 - t) / (t_2 - t_1) \text{ при } t_1 < t < t_2; \\ N^* = N^*_2 (t - t_2) / (t_3 - t_2) \text{ при } t_2 < t < t_3; \\ N^* = N^*_2 (t_4 - t) / (t_4 - t_3) \text{ при } t_3 < t < t_4; \\ N^* = 0 \text{ при } t > t_4$$

со следующими параметрами: $t_1 = 24$ мкс, $t_2 = 49$ мкс, $t_3 = 76$ мкс; $t_4 = 102$ мкс, $N^*_1 = 2,457$ МВт/мм³; $N^*_2 = 1,323$ МВт/мм³.

Заготовки выполнялись из стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм, для которой экспериментальная зависимость между напряжением текучести σ_s и интенсивностью тензора логарифмических деформаций ε_i аппроксимировалась степенным соотношением

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

где $m = 0,29$, $B = 1180$ МПа — параметры аппроксимации статической кривой деформационного упрочнения; $k_d = 1,15$ — коэффициент динамичности, учитывающий влияние высокой скорости деформаций при ЭГИШ. Предполагалось, что материал заготовки — изотропный.

Компьютерная модель процесса

Предполагалась адиабатичность стенок разрядного канала и слабое влияние дополнительного испарения жидкости на размеры канала [10]. Для моделирования канала разряда использовалось уравнение баланса энергии

$$\frac{d}{dt} \frac{p_k V_k}{\gamma - 1} + V_k \frac{dV_k}{dt} = N(t), \quad (2)$$

где $\gamma = 1,26$ — показатель адиабаты для плазмы, образованной из водопроводной воды; V_k и p_k —

объем канала и давление в нем; $N(t)$ — мощность выделения энергии в канале.

Материалы электродов, как и стенок камеры, полагались абсолютно жесткими, что допустимо (в сравнении со сжимаемостью рабочей жидкости). Эти материалы моделировались как *MAT_RIGID*.

При моделировании воды в комплексе LS-DYNA использовалась модель идеальной сжимаемой жидкости *MAT_ELASTIC_FLUID*, в которой зависимость между давлением и плотностью имеет вид

$$p = -K \ln(\rho_0/\rho),$$

где ρ — плотность воды, $\rho_0 = 1000$ кг/м³ — начальная плотность; K — модуль объемного сжатия. Аппроксимация адиабаты Тэта в пределах $p \in [0, 1-100]$ МПа дает значение $K \cong 2,35$ ГПа. Предполагалось, что вода не выдерживает отрицательного давления больше $1 \cdot 10^5$ Па.

Для особо тонколистового металла предполагалось целесообразным моделировать заготовку оболочкой с заданием в *SECTION_SHELL* в качестве формулировки элементов оболочки опции *ELFORM = 16* для полноинтегрируемого оболочечного элемента. В качестве материала выбрана модель *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY* со следующими параметрами степенной кривой деформационного упрочнения: $B = 1357$ МПа, $m = 0,29$. Задавались упругие константы материала: $E = 202$ ГПа — модуль Юнга; $\nu = 0,31$ — коэффициент Пуассона; плотность $\rho = 7800$ кг/м³. Коэффициент кулоновского трения $\mu = 0,2$ для трения покоя и $\mu = 0,15$ при движении заготовки. Зазор между прижимом и матрицей был постоянным и равным 0,21 мм.

В качестве модели материала для плазменного канала использовалась модель *MAT_NULL*, определяющая начальную плотность плазмы ρ_{p0} совместно с уравнением состояния *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL_WITH_ENERGY_LEAK*, определяемым уравнением баланса энергии (2). При этом в качестве зависимости, задающей ввод энергии, принимались соотношения (1). Начальная плотность плазмы задавалась $\rho_{p0} = 500$ кг/м³. Начальный объем канала — $V_0 = 2$ мм³. Для расчета плазмы и жидкости использовался алгоритм ALE, что совместно с техникой Multi-Material и FSI (Fluid-Structure Interaction) позволяет решить проблему искажения сетки и рассчитать процессы с камерами сложной формы.

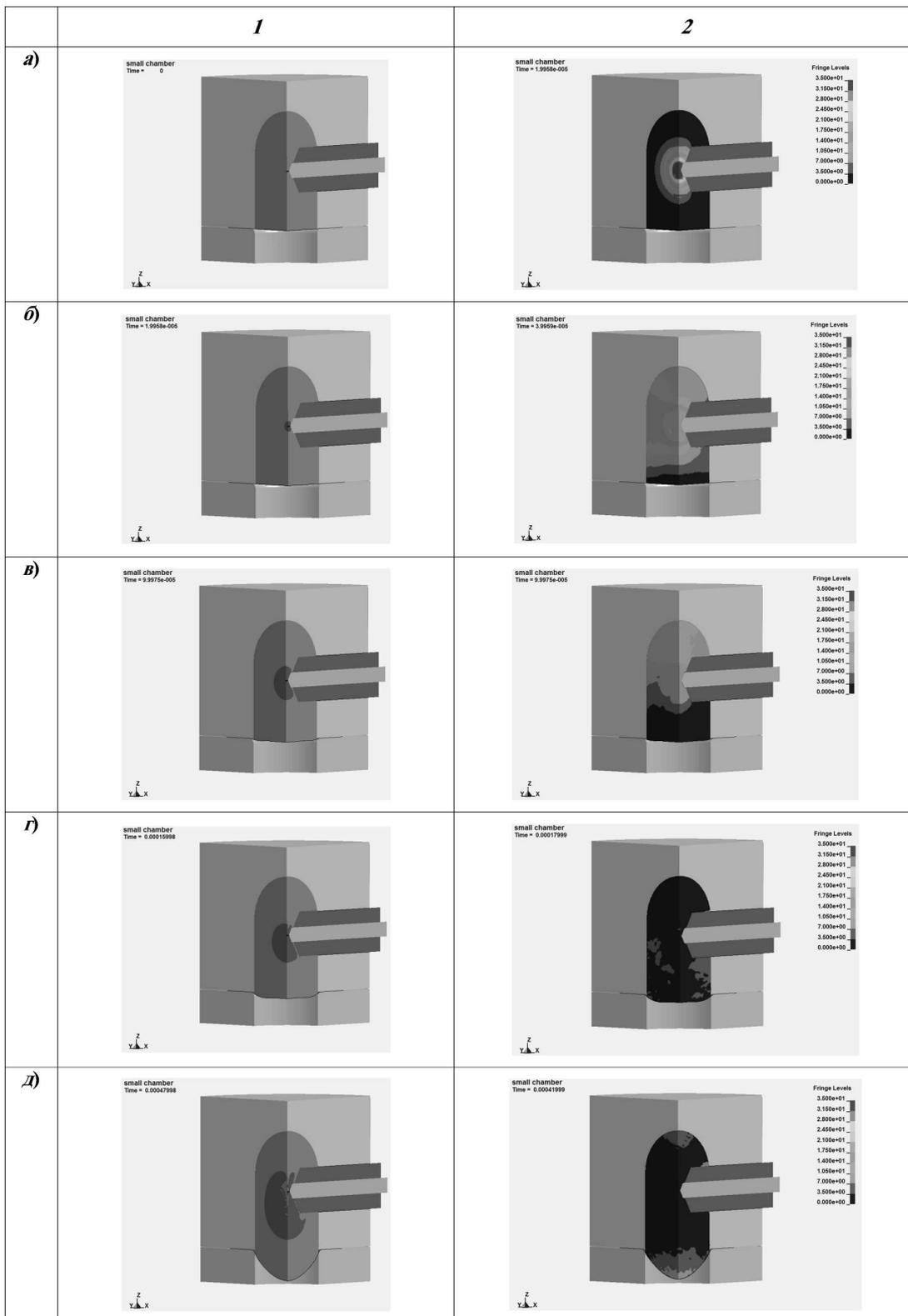


Рис. 2. Динамика развития плазменной полости (1) и давления в разрядной камере (2):
 $1a - t = 0$, $1б - t = 20$, $1в - t = 100$, $1г - t = 160$, $1д - t = 480$; $2a - t = 20$, $2б - t = 40$, $2в - t = 100$,
 $2г - t = 180$, $2д - t = 420$ (время t – в мкс)

Результаты расчетов

Особенность размеров выбранной разрядной камеры — относительно малый ее объем (меньше 1 литра). Поэтому специфика результатов расчета в значительной степени будет определяться данным фактором. Для камер большого объема, для заготовки и функции выделения энергии с другими характеристиками можно ожидать отличий в картине давлений в жидкости, протекании процесса нагружения и деформировании заготовки.

С учетом плоскости симметрии для уменьшения времени счета использовалась геометрическая модель $\frac{1}{4}$ части камеры (см. рис. 1).

На рис. 2 показано развитие канала разряда, формы жидкости и заготовки (1), а также давление в разрядной камере (2) для характерных стадий процесса. Начальный канал разряда (1а) превращается в сферу (1б, 1в). Дальше на форме полости начинает сказываться геометрия электродов и податливость заготовки, смещающая полость в сторону заготовки (1в, 1г). В конце процесса деформирования полость разрушается на фрагменты (1д). Картина давления в камере сильно меняется на этапе выделения энергии в канале разряда (2а, 2б, 2в). Область повышенного давления возникает в районе купола камеры (2б, 2в). При начале деформирования заготовки давление в значительной степени выравнивается по объему камеры (2г, 2д). Деформирование заготовки практически осуществляется за счет кинетической энергии движущейся жидкости — гидротока.

Изменение давления в разрядной камере во времени для двух характерных точек показано на рис. 3. Видна разница в форме давлений в жидкости вблизи плазменной полости и вблизи заготовки. При начале движения заготовки давление в камере падает.

Для оценки корректности расчетов используются величины интенсивности тензора логарифмических деформаций в заготовке и максимального прогиба. Для центральной точки заготовки эффективная деформация совпадает с интенсивностью тензора логарифмических деформаций ε_{i0} , величина которой в эксперименте может быть определена по утонению:

$$\varepsilon_{i0} = \ln(h_0/h),$$

где h_0 — начальная толщина материала заготовки, h — толщина материала после деформирования.

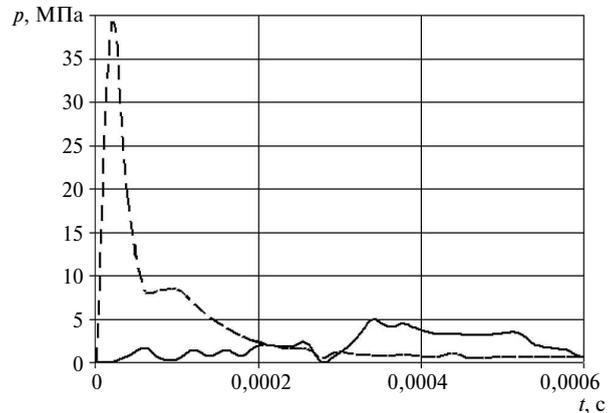


Рис. 3. Давление в жидкости: сплошная линия — на нижней границе плазменной полости, пунктирная — вблизи центра заготовки

Листовая заготовка после остановки движения представлена на рис. 4, а. Для пяти характерных точек заготовки представлены зависимости эффективных деформаций от времени (рис. 4, б). Следует отметить, что деформации в точках по плоскостям вдоль и поперек оси электродов практически совпадают (кривые 2, 3 и 4, 5). Это показывает, что для камеры данного объема при длительности выделения энергии порядка 100 мкс электродная система практически не влияет на распределение деформаций в заготовке в окружном направлении.

Результаты расчетов, представленные на рис. 4, сопоставлялись с экспериментальными данными. Для центральной точки заготовки экспериментальные значения максимального прогиба составили $16,1 \pm 0,08$ мм, а интенсивности тензора логарифмических деформаций — $\varepsilon_{i0} = 0,21 \pm 0,04$. Эксперимент проводился для 5 образцов. Погрешность задания напряжения разряда конденсаторной батареи не превышала 2%. Доверительные интервалы рассчитывались для вероятности 95%. Соответствующие расчетные значения были: максимальный прогиб — 19,42 мм, эффективная деформация — 0,2831 (кривая 1 на горизонтальном участке, рис. 4). Относительная разница деформаций в окружных направлениях (кривые 2, 3 и 4, 5 на рис. 4) в эксперименте также не превышала 2–3%.

На основе техники ALE с применением программного комплекса LS-DYNA 971 разработана методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения

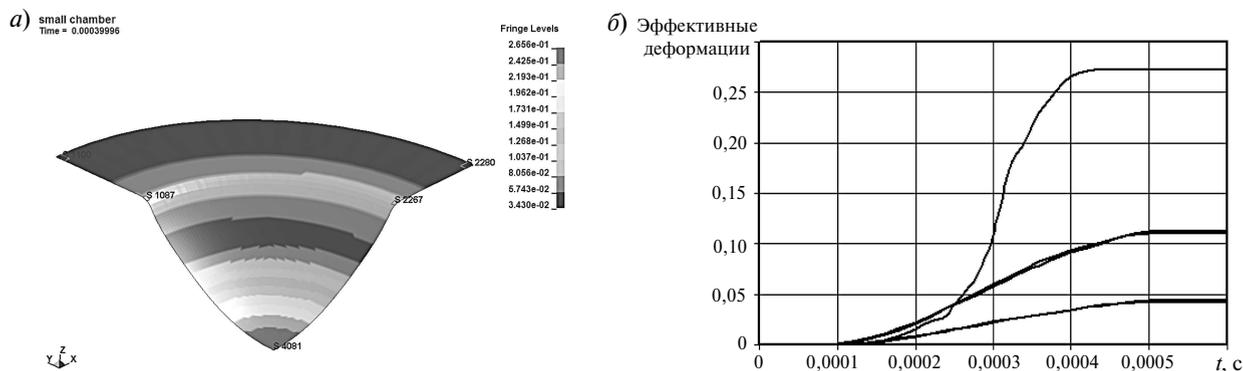


Рис. 4. Деформация листовой заготовки:

a — распределение эффективных деформаций после остановки заготовки; *b* — зависимость эффективных деформаций от времени для центральной точки (1), вблизи радиуса закругления кромки матрицы (2, 3) и на краю заготовки (4, 5)

тонколистовых металлов с учетом реальной трехмерной конфигурации разрядной камеры и электродов. Методика апробирована для варианта вытяжки тонколистовой заготовки в камере малого объема. Анализ результатов расчета показывает, что для камер малого объема до начала движения заготовки распределение давления в камере сильно неравномерное. При деформировании заготовки давление выравнивается, и влияние

электродов практически не сказывается на характере деформаций в окружном направлении заготовки. Компьютерный расчет позволяет оценивать гидродинамические параметры в жидкости и напряженно-деформированное состояние точек заготовки для процесса ЭГИШ и на этой базе создавать научно обоснованные технологии и технологические устройства для изготовления конкретных деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здор, Г.Н. Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования металлов Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
2. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: ХАИ, 2011. 272 с.
3. Golovashchenko S., Mamutov V. Electrohydraulic Forming of Automotive Panels / Sixth Global Innovations Symposium: Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries // Proc. of TMS. San Francisco. 2005. P. 65–70.
4. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA. 2006. 498 p.
5. Мамутов В.С. Компьютерные расчеты листовой электрогидроимпульсной формовки в закрытую матрицу произвольной формы // Матер. VII Международной школы-семинара «Импульсные процессы в механике сплошных сред». Николаев: Изд-во института импульсных процессов и технологий НАН Украины, 2007. С. 58–60.
6. Mamutov A.V., Mamutov V.S. Computer simulation of electrohydraulic sheet metal forming / International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering // Proc. of SPIE. Vol. 6297. Olsztyn. 2007. P. OY1–5.
7. Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Применение комплекса LS-DYNA для расчета канала разряда при электрогидроимпульсной штамповке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. №2(147). Т.1. С. 116–121.
8. 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.
9. Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 208 с.
10. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды. М: Наука, 1971. 155 с.

REFERENCES

1. **Zdor G.N., Isaevich L.A., Kachanov I.V.** Tekhnologii vysokoskorostnogo deformirovaniya metallov. Minsk: BNTU, 2010. 456 p. (rus.)
2. **Taranenko M.E.** Elektrogidravlicheskaya shtampovka: teoriya, oborudovanie, tekhnoprotsessy. Khar'kov: KhAI, 2011. 272 p. (rus.)
3. **Golovashchenko S., Mamutov V.** Electrohydraulic Forming of Automotive Panels. Sixth Global Innovations Symposium Trends in Materials and Manufacturing Technologies for Transportation Industries. *Proc. of TMS*. San Francisco. 2005. P. 65–70.
4. **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA. 2006. 498 p.
5. **Mamutov V.S.** Komp'yuternye raschety listovoi elektrogidroimpul'snoi formovki v zakrytuiu matritsu proizvod'noi formy. *Materialy VII Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Impul'snye protsessy v mekhanike sploshnykh sred*, Nikolaev, 2007. P. 58–60. (rus.)
6. **Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Computer simulation of electrohydraulic sheet metal forming. *International workshop: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering. Proc. of SPIE*. Vol. 6297. Olsztyn, 2007. P. OY1–5.
7. **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Primenenie kompleksa LS-DYNA dlya rascheta kanala razryada pri elektrogidroimpul'snoi shtampovke. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU: Nauka i obrazovanie*. 2012. № 2(147). T.1. P. 116–121. (rus.)
8. **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Metodika komp'yuternogo modelirovaniia elektrogidroimpul'snogo formoizmeneniia tonkolistovykh metallov s primeneniem programmnoho kompleksa LS-DYNA 971. *Metalloobrabotka*. 2012. № 4 (69). P. 23–29. (rus.)
9. **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniia vysokoskorostnogo deformirovaniia metallov. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 208 p. (rus.)
10. **Naugol'nykh K.A., Roy N.A.** Elektricheskie razriady v vode. Moscow: Nauka, 1971. 155 p. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович — доктор технических наук профессор кафедры машин и технологии обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: vmamutov@mail.ru

МАМУТОВ Александр Вячеславович — кандидат технических наук, приглашенный ученый Оклендского университета; e-mail: a.mamutov@yahoo.com

AUTHORS

MAMUTOV Viacheslav S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: vmamutov@mail.ru

MAMUTOV Alexander V. — Oakland University, 2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309, USA; e-mail: A.Mamutov@yahoo.com