

УДК 539.374+621.7.044.4

Нарыжный А. Г. канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: narizniyag@ukr.net

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ РАЗДАЧИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Рассмотрена математическая модель термомеханических процессов в технологической системе свободной раздачи тонкостенной оболочки при действии электрогидравлического эффекта. Модель включает а) пароплазменный канал, расширяющийся в результате выделения импульса джоулева тепла, б) технологическую жидкость, передающую и преобразующую действие расширяющегося канала, в) оснастку, канализующую и направляющую движение жидкости и, наконец, г) технологический объект в виде деформируемой действием жидкости тонкостенной упругопластической оболочки. Модель формально представляет собой сочетание фундаментальных законов механики сплошных сред (уравнения баланса массы, баланса энергии и импульса), неклассических контактных условий, а также реологических моделей материалов элементов модели. В целом модель формально является системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и неравенств, не имеющая решений в виде вычисляемых выражений, поэтому решения ищутся численно. С помощью модели изучены процессы в конкретной технологической системе, для которой в литературе приведены результаты экспериментального исследования, в частности, характеристики импульсного возмущения и соответствующий итоговый вид деформирования оболочки. Показано соответствие эксперименту результатов модели с использованием реологической динамической модели со скоростным упрочнением по Джонсону-Куку для алюминиевых сплавов, одновременно обоснована непригодность статической и динамической по Куперу-Саймондсу моделей алюминиевого сплава, поскольку они обуславливают слишком малую податливость оболочки и, следовательно, неестественно большие остаточные деформации. Сравнением решений с использованием двух типов линейной и нелинейной сжимаемости жидкости обоснована достаточность применения линейного типа, поскольку такой выбор допускает экономное использование ресурсов компьютера. Отмечено, что погрешности вычислений выражают неравномерности формы и движения элементов системы, наблюдающиеся в эксперименте. В целом отмечена адекватность модели, что делает возможным ее использование для изучения других технологических систем, использующих электрогидравлический эффект.

Ключевые слова: математическая модель, оболочка, свободная раздача, эффект Юткина.

Введение. Электрогидравлический эффект (ЭГЭ, эффект Юткина) представляет собой преобразование импульса электрического тока в жидкости в ее движение, является принципом действия импульсной тепловой машины. В результате электрического пробоя жидкости или сублимации проводника тока между электродами образуется тонкий диаметром в 10^{-5} - 10^{-4} м канал, заполненный ионизированным паром, через который затем течет импульсный электрический ток. Выделяющееся при этом тепло омических потерь приводит к росту давления и интенсивному расширению канала с образованием парогазовой полости (ПГП), вследствие чего в окружающей жидкости распространяются три механических фактора: волна давления, расходящиеся потоки жидкости, а также

© А.Г. Нарыжный, 2019

импульсное быстроменяющееся поле давлений, которые взаимодействуют с телами и стенками сосуда, граничащими с жидкостью. На основе ЭГЭ, начиная с середины прошлого века, предложены и разработаны многочисленные технологии и системы, служащие для деформирования или разрушения объектов [1], в частности, для листовой штамповки [2].

Течение процессов в подобных системах отличается рядом особенностей [3]. Электрофизические, тепловые и механические процессы протекают взаимосвязано, отличаясь высокой интенсивностью и кратковременностью; на протяжении 10^{-4} - 10^{-2} с электрический ток достигает 10^6 А, тепловыделение достигает 10^{12} Вт/м³, скорости элементов достигают сотен метров за секунду, скорости деформации

достигают 10^3 с^{-1} , давления достигают 10^9 Па и затем снижаются до нуля. Интенсивные изменения отличаются нелинейностью и неоднородностью. Взаимодействие элементов систем имеет контактный характер, параметры которого ситуационно изменчивы и заранее не определимы. Жидкость в замкнутом объеме образует непроеизводительные вихри, кинетическая энергия которых теряется из-за вязкости. Подобные системы отличаются гетерогенностью, твердые деформируемые, жидкие и газообразные элементы обладают различными механическими свойствами и контрастными характеристиками.

Отмеченные особенности обуславливают трудности исследований, проводимых с целью обеспечения рационального проектирования, эффективного использования и оптимизации технологических систем и процессов. Дополнительные ограничения на проведение экспериментальных исследований накладывают закрытый характер рабочей зоны, влияние датчиков на процессы движения, качественная ограниченность и, одновременно, необходимость интерпретации большого объема информации с погрешностями.

В настоящее время богатые возможности для изучения кинетики сложных гетерогенных систем предоставляет компьютерное моделирование, основанное на численных решениях задач механики сплошных сред. Успех применения моделирования зависит, с одной стороны, от адекватности математической модели, того как она потенциально отражает свойства системы в их совокупности и взаимосвязи, с другой стороны, от точности решения определяющих соотношений модели, от методики решения.

В работах [4,5,6] приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования с помощью авторской программы свободной задачи цилиндрических тонкостенных оболочек из алюминиевого сплава. Приведены остаточные размеры оболочек после деформирования, имеющих характерную бочкообразную форму, соответствующие определенным электрофизическим параметрам. Описаны параметры и математическая модель электрофизического процесса, отмечено соответствие результатов расчета и экспериментального измерения токов. Для моделирования механических процессов в ПГП и жидкости используется одномерная система определяющих уравнений газовой динамики в эйлеровой системе отсчета с возмущением в виде потока джоулева тепла. Учтена упругая сжимаемость жидкости, для вещества ПГП принята модель идеального газа. При анализе движения оболочки использованы одномерные уравнения баланса энергии, массы и количества дви-

жения, а также упруго-пластическая модель материала со степенным деформационным упрочнением и скоростным упрочнением по Саймондсу-Куперу.

В работе [7] описано моделирование с помощью пакета LS-DYNA [8] расширения ПГП и движения жидкости в плоском двумерном приближении, относительно материальных свойств используются, в общем, те же предположения, что и в ранее рассмотренных работах. Отметим завышенное значение начального радиуса канала разряда, равное 1 мм, что искажает начальное состояние системы. Приведены результаты моделирования, отмечено соответствие результатов моделирования и экспериментального определения давлений жидкости на поверхности жесткой камеры. Там же описано моделирование движений элементов трехмерной технологической системы электрогидравлической раздачи плоской заготовки, для заготовки использована модель материала со степенным деформационным упрочнением (не указан учет скоростного упрочнения); дано сравнение результатов экспериментов и расчетов. Отмечено, что остаточные перемещения и деформации в эксперименте на четверть меньше расчетных.

В работах [9,10,11] использованы упрощенные модели деформирования плоских заготовок под действием ЭГЭ- без рассмотрения ПГП как отдельно выраженного элемента системы. Воздействие ПГП на жидкость выразилось импульсом давления, изменяющегося во времени в форме полусинуса, параметры которого определяются с помощью технологического эксперимента. Для заготовки принята материальная упруго-пластическая модель со скоростным упрочнением по Джонсону-Куку.

В работе [12] описана и исследована объемная вычислительная модель ЭГЭ в замкнутой жесткой камере, которая включала только два элемента – ПГП и жидкость. Отмечены особенности гидродинамики ПГП и жидкости (самопроизвольный переход волновых процессов в колебательный и затем в стационарный режим, «округление» первоначально многоугольного сечения канала разряда, эллиптичность формы первой волны давления в жидкости, превращения первоначально двумерных осесимметричных движений в неосесимметричные трехмерные, специфическая неустойчивость и хаотическое разрушение первоначально сплошной ПГП под действием вихрей жидкости), а также адекватность математической модели и точность ее решения в асимптотическом смысле.

Настоящая статья предназначена для обоснования и уточнения математической модели и методики моделирования процесса деформирования заготовки при действии ЭГЭ [12] и

сравнительного анализа результатов моделирования с результатами экспериментов в условиях свободной раздачи цилиндрических заготовок, описанных в работах [4,5,6]. Своеобразие свободной раздачи в том, что окончательную форму и размеры заготовка приобретает, когда иссякает действие внутренних факторов деформирования, порожденных начальным импульсом тепла, без влияния ограничения в виде матрицы. Иными словами, остаточные форма и размеры оболочки отражают действие первоначального импульса с учетом всех его превращений, расщепления на отдельные факторы и последующего ситуативного объединения и взаимодействия факторов и заготовки на активных этапах процесса. Воспроизведение формы и размеров в модельном расчете является аргументом в пользу адекватности математической модели процессов.

Описание модели. Системы, использующие ЭГЭ, включают две части – электрофизическую и механическую. Первая часть системы обеспечивает электрический разряд в жидкости и управляет им. Математическая модель этой части та же, что в работах [6,7]. Вторая часть организует механическое движение и включает четыре обязательных элемента, каждый из которых играет определенную роль, – ПГП, жидкость, технологический объект и оснастку; ее математическая модель описана ниже.

В ПГП выделяется тепло, она является преобразователем импульса тока в давление и источником импульсного механического возмущения в системе. Жидкость воспринимает и расщепляет уже механический импульс от ПГП в три фактора (волны давления, расходящиеся потоки жидкости, импульсное поле давлений), проводит их и обеспечивает объединенное действие на технологический объект. Оснастка связывает и ограничивает элементы, а также канализирует, направляет и концентрирует действие факторов на объект.

Элементы систем существуют в различных агрегатных состояниях (газообразном, жидком, твердом) и при этом взаимодействуют контактным способом, поэтому особенности поведения элементов имеют системный связанный характер, что необходимо учитывать при исследовании кинетики процессов. Активные этапы процессов протекают в течение десятков миллисекунд, причем образование канала разряда происходит без заметных механических изменений в системе, а последующий импульс тока и тепловыделение во времени протекают одновременно с заметным движением ПГП и жидкости [3].

Нестационарные механические процессы в системах сжимаемых сплошных твердых, жидких и газообразных сред определяются несколькими группами условий, имеющих вид равенств или неравенств. Ниже используются

три системы отсчета: эйлерова неподвижная с координатами x , лагранжева материальная с координатами X , и движущаяся по заданному закону референсная (вспомогательная) с координатами χ . Вводятся в рассмотрение материальная скорость (нижний индекс указывает, в какой системе производится дифференцирование)

$$v(X, t) = \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_X = \frac{\partial x}{\partial t}, \quad (1)$$

скорость переносного движения (скорость точки референсной системы отсчета)

$$\hat{v}(\chi, t) = \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_\chi \quad (2)$$

и относительная скорость (скорость конвекции) точки в референсной системе отсчета

$$c = v - \hat{v}. \quad (3)$$

Уравнение движения (уравнение сохранения импульса) [14]

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} \Big|_\chi + (c \cdot \nabla) v \right) = \nabla \cdot \sigma + \rho b, \quad (4)$$

где ρ – плотность; v – вектор скорости материальной частицы; b – массовая плотность внешних сил; σ – тензор напряжений; ∇ – дифференциальный оператор Гамильтона.

Уравнение сохранения массы [14]

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \Big|_\chi + c \cdot \nabla \rho = \rho \nabla \cdot v. \quad (5)$$

Уравнение баланса энергии [14]

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_\chi + c \cdot \nabla u \right) = \sigma : D + \nabla \cdot q + r, \quad (6)$$

где u – массовая плотность внутренней энергии;

$D = \frac{1}{2}(\nabla v + \nabla^T v)$ – симметричный тензор скоростей деформации, $\sigma : D$ удельная мощность внутренних сил как двойная свертка тензоров; q – поток тепла; r – удельная мощность источников тепла.

Два тела могут двигаться независимо или быть в контактном взаимодействии [15]. В первом случае между каждой граничной точкой одного тела и всеми граничными точками другого тела будет зазор

$$(\Delta x^+ - \Delta x^-) \cdot n^+ - \Delta > 0, \quad (7)$$

где Δx^+ , Δx^- – перемещения граничных точек одного и второго тел, n^+ – вектор внешней нормали в граничной точке первого тела, Δ – зазор. В этом случае границы обоих тел свободны от контактных напряжений

$$\sigma^+ = \sigma^- = 0 \quad (8)$$

В случае контактного взаимодействия поверхность контакта определяется как множество всех граничных точек одного тела, для каждой из которых существует граничная точка другого тела с тем же значением актуального лагранжева радиус- вектора $x^+ = x^-$. Контактные граничные условия выражают непрерывность нормальной составляющей скорости

$$(v^+ - v^-) \cdot n^+ = 0, \quad (9)$$

противоположность тензоров контактных напряжений (третий закон Ньютона)

$$\sigma^+ = -\sigma^- \quad (10)$$

и закон трения

$$\sigma_{\tau\alpha} \leq \sigma_n \tilde{f}((v^+ - v^-) \cdot \tau_\alpha), \quad \sigma_n = \sigma \cdot n, \quad \alpha = 1, 2 \quad (11)$$

где вектор контактное напряжение σ представлено нормальной σ_n и касательными $\sigma_{\tau\alpha}$, ($\alpha = 1, 2$) составляющими, n и τ_α - орты нормали и касательных к поверхности контакта

в актуальной конфигурации, $\tilde{f}((v^+ - v^-) \cdot \tau_\alpha)$ - коэффициент трения, зависящий от направления относительного движения поверхностей.

Уравнения (4)- (11) совместно с естественными граничными и начальными условиями, а также с выражениями для моделей материалов полностью описывают механические процессы в гетерогенной системе. Приведенная система уравнений является нелинейной ввиду конечности деформаций, трения и материальных свойств и поэтому решается численно.

Референсная система отсчета может двигаться по определенному закону относительно эйлеровой, в частности совпадать с материальной или эйлеровой системами отсчета. Уравнения (4)-(6) позволяют эквивалентно переносить изменения функций, определяющих механическое состояние материальной точки, из одной системы отсчета в другую и таким образом снимать методическое различие решения задач в разных системах отсчета. Важным различием задач гидродинамики и твердого деформируемого тела является то, что первые используют эйлеров подход, а вторые - лагранжев. При эйлеровом подходе не возникает затруднений описание характерных для жидкостей и газов больших перемещений, имеющих характер струй и вихрей, но существуют проблемы описания поверхностей раздела как свободных, так, в особенности, - контактных. При лагранжевом подходе в силу того, что материальная система координат просто описывает начальные границы в процессе движения, легко выразить граничные и

контактные условия на старых границах тела. Трудности возникают при образовании новых границ или при больших перемещениях вихревого типа, то есть когда нарушается принцип сплошности, а именно- материальные точки, бывшие бесконечно близкими друг к другу, отдаляются на конечное расстояние или, напротив, отдельные материальные точки занимают одно положение в пространстве одновременно. При исследовании гетерогенных механических систем, включающих элементы, находящиеся в различных фазовых состояниях, разделенных поверхностями, по которым они входят в контактное взаимодействие, необходимо использовать единую систему отсчета или иметь возможность перехода из одной системы отсчета (например, лагранжевой) в другую (например, эйлерову).

Приведенные формы законов сохранения позволяют ситуативно менять систему отсчета для определения левых частей уравнений, которые определяют зависимость изменения НДС от времени, что является основой подхода АЛЕ, в то время как правые части, определяющие зависимость изменения в пространстве, записаны в традиционной эйлеровой форме и сохраняют свое значение. Такое расширение (унификация) уравнений сохранения получило название квази- эйлерова подхода [14].

На рис. 1 слева показана схема установки для электрогидравлической раздачи трубчатых заготовок из работы [4], которая включает механическую (а) и электрофизическую (б) части. На схеме механической части отмечены: основание (1); нижняя (2) и верхняя (7) стальные плиты, сжатые усилием P ; центрирующие полиэтиленовые кольца (3); трубчатая заготовка их алюминиевого сплава (4); иницирующая проволочка (5); технологическая жидкость (6, вода). В электрофизической части отмечены: сопротивление цепи r (8); воздушный разрядник (9); внутреннее сопротивление R (10); индуктивность L (11) и емкость C (12) батареи конденсаторов.

Справа показана полупрозрачная схема трехмерной вычислительной модели механической части в начальном состоянии с обозначением размеров. Плита (1), а также кольца (3) считаются абсолютно жесткими и неподвижными. Плита (7) также считается жесткой, но имеет возможность движения вниз при осадке заготовки во избежание утечек технологической жидкости. Плиты и кольца условно не показаны. Заготовка по предположению удовлетворяет гипотезе Кирхгофа о прямых нормалях и представлена на схеме срединной цилиндрической поверхностью диаметром D_1 , высотой H_1 . Жидкость занимает все доступное пространство, контактируя с

пластинами, кольцами, оболочкой, отстоя от срединной поверхности оболочки на половину ее толщины. Канал, заполненный пароплазменной фазой, первоначально совпадает с объемом проволоочки, использованной для инициации разряда.

Основные размеры элементов имеют следующие значения: малый диаметр полости камеры $d = 32$ мм, внутренний диаметр оболочки, заполненной жидкостью $D = 67$ мм, средний диаметр оболочки $D_1 = 70$ мм, наибольшая высота камеры $h = 75$ мм, наименьшая высота ка-

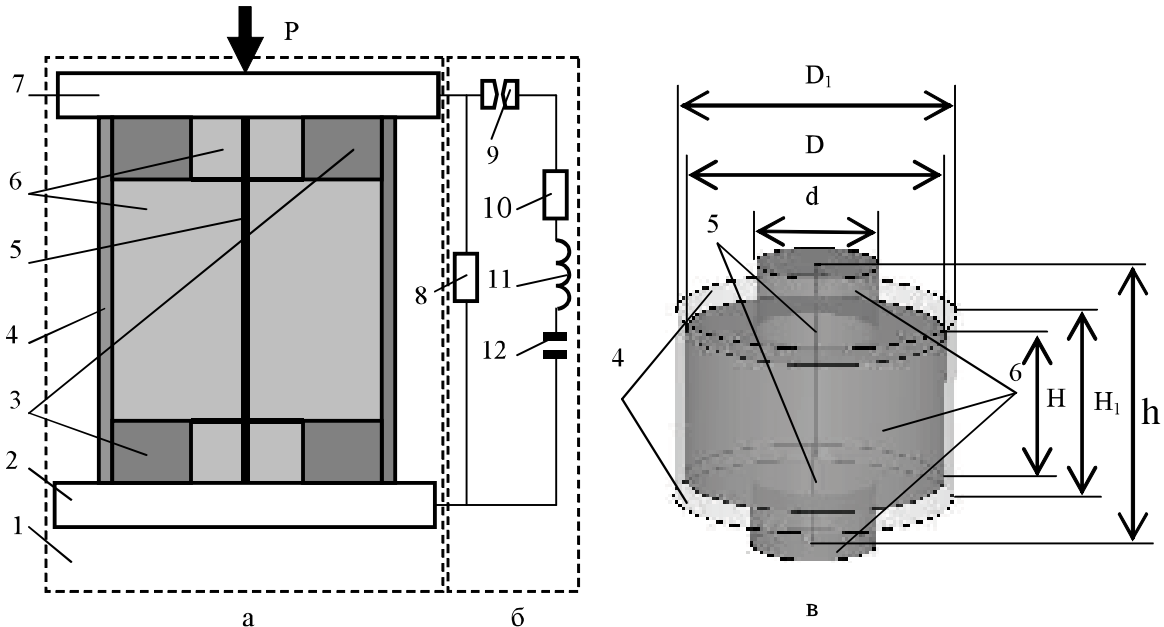


Рис. 1. Схема установки (слева, а- механическая часть, б- электрическая часть) и структура с обозначением размеров (в)

меры $H = 40$ мм, высота оболочки $H_1 = 50$ мм, толщина 5 мм. Поперечные начальные размеры канала разряда $0,5 \times 0,5$ мм, длина канала $h = 75$ мм, объем $1,875 \cdot 10^{-8}$ м³.

Вещество канала разряда, в дальнейшем превращающегося в ПГП, имеет свойства идеального газа с постоянной адиабаты $\gamma = 1,26$ и плотностью при нормальных условиях $1,25$ кг/м³.

Рассмотрены две модели сжимаемой жидкости, обладающей плотностью $\rho = 1000$ кг/м³ и давлением кавитации $P_c = 10^5$ Па – линейно-сжимаемая с объемным модулем упругости $K = 2,25 \times 10^9$ Па и нелинейно-сжимаемая с уравнением состояния Тета вида [4]

$$P = G \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^k - 1 \right], \quad (12)$$

где P – давление, ρ, ρ_0 – актуальная и начальная плотности воды, $G = 3,045 \cdot 10^8$ Па, $k = 7,15$ – эмпирические коэффициенты. Отметим, что вид уравнения состояния не играет заметной роли.

Рассмотрены четыре вида предельных кривых для упруго-пластического материала заготовки с начальным значением предела текучести $2,1 \cdot 10^8$ Па, модулем упругости Юнга

$1,3 \times 10^{11}$ Па и плотностью 2700 кг/м³:

- статическая со степенным деформационным упрочнением

$$\sigma_T = A \varepsilon_p^n, \quad (13)$$

где σ_T – актуальный предел текучести,

$A = 5,22 \cdot 10^8$ Па, $n = 0,2609$ – коэффициенты, ε_p – пластическая деформация;

- динамическая со скоростным упрочнением по Куперу-Саймондсу [4]

$$\sigma_T = A(\varepsilon_p + \varepsilon_0)^n (1 + B \dot{\varepsilon}_p^m), \quad (14)$$

где эмпирические коэффициенты $A = 5,22 \times 10^8$ Па,

$\varepsilon_0 = 3,7 \times 10^{-3}$, $n = 0,2609$, $B = 1,88 \times 10^{11}$,

$m = 3,425$;

- динамическая со скоростным упрочнением по Джонсону-Куку [13] для алюминиевого сплава 2024-T351

$$\sigma_T = (B + C \varepsilon_p^m)(1 + D \ln \dot{\varepsilon}_p), \quad (15)$$

где $B = 2,65 \cdot 10^8$ Па, $C = 4,26 \cdot 10^8$ Па, $D = 0,015$,

$m = 0,34$ – эмпирические коэффициенты,

$\dot{\varepsilon}_p$ – скорость пластической деформации;

- динамическая со скоростным упрочнени-

ем по Джонсону-Куку [13] для алюминиевого сплава 7039 с коэффициентами $B = 3,37 \cdot 10^8$ Па,

$$C = 3,43 \cdot 10^8 \text{ Па}, \quad D = 0,01, \quad m = 0,41.$$

Отметим, модели материала заготовки (13) и (14) дали неудовлетворительные результаты в виде больших деформаций и перемещений, не соответствующих экспериментальным данным, что объясняется малой жесткостью заготовок. В то же время две последние материальные модели дали практически совпадающие результаты, приведенные ниже, что говорит о важности и преимуществе модели скоростного упрочнения по Джонсону-Куку в рамках модели раздачи цилиндрической заготовки с помощью ЭГЭ.

На рис. 2 показана зависимость потока тепла в ПГП от времени. Вначале при электрическом пробое (в выбранном масштабе времени практически мгновенно) происходит фазовое превращение материала в канале разряда- сублимация металла с образованием пароплазменной фазы, затем в течение короткого

времени $\tau_1 = 2,5 \times 10^{-4}$ с через ионизированный газ протекает импульсный ток, в результате омических потерь выделяется тепло мощностью

$q_0 = 6,4 \times 10^{12}$ Вт/м³, что соответствует полному количеству тепла величиной 30 кДж. Теплообмен ПГП с жидкостью и потери на вторичное парообразование жидкости выражены отрицательным потоком в течение интервала времени $(\tau_2 - \tau_3)$, где $\tau_2 = 3,5 \times 10^{-4}$ с, $\tau_3 = 4,5 \times 10^{-4}$ с.

Моделирование проведено в среде пакета LS-DYNA [8] с использованием подхода ALE [14].

Результаты и обсуждение. На рис.3 показан общий вид оболочки из материала типа (4) после окончания моделирования, имеющий

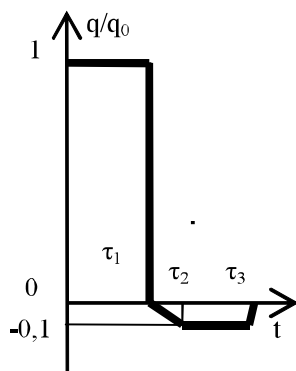


Рис. 2. Изменение потока тепла

характерную бочкообразную осесимметричную форму, повторяющую форму оболочки в эксперименте, формирующуюся в течение 300 мкс. Белыми линиями показаны границы конечных элементов. Отмечены характерные точки; т. 1

на середине образующей, т.3 на торце, т.2 по середине образующей между т.1 и т.3.

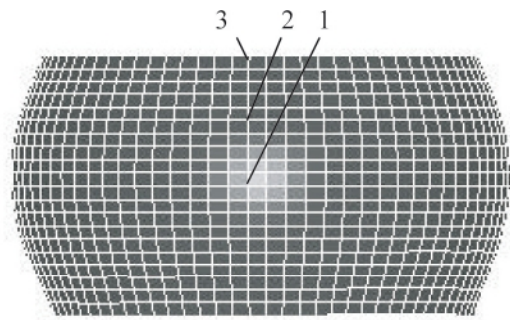


Рис. 3. Вид заготовки после деформации

На рис. 4 дано сравнение результатов моделирования и эксперимента [5,6]. Кривая а) представляет форму образующей оболочки, измеренную в эксперименте, кривые б) и в) представляют форму диаметрально противоположных образующих, полученных при моделировании свободной раздачи. Различие кривых б) и в), заметное вначале графика, объясняется ошибкой вычислений. Теоретически решение должно быть симметричным относительно плоскости, перпендикулярной оси оболочки, проведенной через ее середину. Впрочем, экспериментальная кривая также не симметрична, чему в статье авторов нет объяснения. По-видимому, в столь сложной гетерогенной системе при высокоинтенсивном возмущении в эксперименте не удается контролировать все факторы, влияющие на течение механических процессов как внутри элементов, так и на контактное взаимодействие между ними. Отметим, вычислительные погрешности, как это бывает, играют роль реальных случайных факторов.

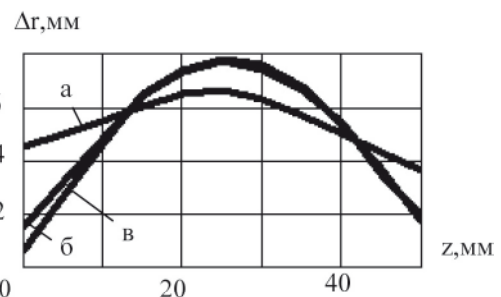


Рис. 4. Остаточная форма образующей оболочки

Поскольку жидкость является посредником между ПГП и оболочкой, то бочкообразность оболочки говорит в пользу адекватного воспроизведения процессов в ПГП и ее взаимодействия с жидкостью. Следует отметить, что в эксперименте образующая оболочки имеет меньшую кривизну, чем при моделировании.

Выводы. Большое значение имеет выбор модели поведения материала при действии ЭГЭ, а именно, - учет и вид скоростного упрочнения.

Несмотря на теоретическую противоречивость эмпирической формулы Джонсона-Кука, которая при малых скоростях деформации дает отрицательные значения предела текучести, она в целом удовлетворительно описывает поведение материала заготовки в условиях действия ЭГЭ. Следует отметить, что значения коэффициентов предельной кривой Джонсона-Кука зависят, в частности, от базовой скорости деформации и, вообще говоря, могут быть различными для одного и того же материала. Это обуславливает возможность повышения точности моделирования посредством подбора подходящих коэффициентов формулы. Неучет скоростного упрочнения (статическая предельная кривая) и учет по Саймондсу-Куперу обуславливают высокую податливость заготовки в условиях действия ЭГЭ.

Учет сжимаемости жидкости в модели важен, поскольку она определяет волновой этап процесса и начало деформирования оболочки. Законы сжимаемости, линейный или Тэта, обуславливают практически одинаковые результаты моделирования свободной задачи заготовки при действии ЭГЭ.

Высокая степень изменения объема ПГП, а также вихревые течения жидкости в замкнутом объеме требуют специальных методов решения задач механики сплошных сред; метод ALE позволяет преодолеть трудности, возникающие при использовании чисто эйлеровых или лагранжевых математических моделей подобных гетерогенных механических систем с большими деформациями. Рассмотренная трехмерная вычислительная модель технологической системы на этапах активного деформирования заготовки имеет осесимметричный характер и воспроизводит различные эмпирически известные особенности механических процессов, а также остаточных состояний, имеющих накопленный характер. В конце импульсного этапа и на этапе затухания наблюдаются различные отклонения от осесимметричного движения ПГП, жидкости и оболочки, имеющие вычислительное происхождение, но подобные тем, которые наблюдаются в реальности, что подчеркивает адекватность математической вычислительной модели.

В целом рассмотренная математическая модель адекватно отражает известные особенности процессов и состояний элементов и может служить средством количественного исследования, проектирования и оптимизации технологической системы задачи, например, с целью повышения коэффициента использования тепла, являющегося источником ЭГЭ. Параметры модели многочисленны и имеют различный характер: конструктивные, технологические, электрофизические, механические,

тепловые. Модель можно уточнять и оптимизировать за счет выбора значений параметров, а также применять для других систем, использующих ЭГЭ.

Литература

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности [Текст] / Л.А. Юткин. Л-д: Машиностроение, 1986, 253 с.
2. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы [Текст] / М.Е. Тараненко.- Харьков: ХАИ, 2011 – 207 с.
3. Мазуровский Б.Я. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке [Текст] / Б.Я. Мазуровский, Ф.Н. Сизев. Киев: Наукова думка, 1983, 192 с.
4. Косенков В.М. Влияние длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность пластического деформирования цилиндрической оболочки [Текст] / В.М. Косенков // Журн. техн. физ. 2011. Т. 81, вып. 10. С. 133-139.
5. Косенков В.М. Экспериментальное исследование влияния электрических разрядов большой длины в воде на энергию деформации цилиндрической оболочки [Текст] / В.М. Косенков, В.М. Бычков, В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов // Письма в журн. техн. физ. 2012. Т. 38, вып. 9. С. 103- 110.
6. Косенков В.М. Электрические разряды большой длины в воде и их влияние на энергию пластической деформации цилиндрической оболочки [Текст] / В.М. Косенков, В.М. Бычков, В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов // Электронная обработка материалов- 2013.Т 49(3). С. 63- 69.
7. Mamutov V. Simulation of high-voltage discharge channel in water at electro- hydraulic forming using LS-DYNA [Текст] / V. Mamutov, S. Golovashchenko, A. Mamutov // 13 th international LS-DYNA users conference, 8-10 jun 2014. P. 1-1– 1-9.
8. LS-DYNA Keyword user's manual [Текст].- Livermore: LSTC, 2006. 2130 P.
9. Mane T. Finite element modeling of electro-hydraulic forming of sheets [Текст] / T. Mane, V. Goel, S.D. Kore // 3rd international conference on materials processing and characterisation (ICMPC 2014), Procedia materials science, 2014. V. 6 P. 105- 114.
10. Atieh S. First results of SFR cavity fabrication by electro- hydraulic forming at CERN [Текст] / S. Atieh, A.A. Carvalho, I.A. Santillana et all // Proceedings of SFR 2015, Whistler, BC, Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015. P.1- 7.
11. Bjorkstrom D. FEM simulation of electro-hydraulic forming / D. Bjorkstrom // Diploma thesis. Stockholm: Kungliga Tekniska Hogskolan. 2008. 88 p.

12. Нарыжный А.Г. Вычислительная модель электрогидравлического эффекта [Текст] / А.Г. Нарыжный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2012.- Вып. 54. С.112- 124.

13. Johnson G.R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [Текст] / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the 7th international symposium on ballistics. 1983. P.541-547.

14. Donea J. Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods [Текст] / J. Donea, A. Huerta, J.-Ph. Ponthot, A. Rodrigues- Ferran // Encyclopedia of computational mechanics. Vol. 1. Fundamentals. Wiley, 2004. P.1-25.

15. Бурого Н.Г. Численное решение задач МСС с подвижными границами раздела. [Текст] Дисдокт. физ.- мат. наук. 01.02.04./Бурого Николай Георгиевич.- М. 2003.- 222 с.

Поступила в редакцию 25.06.2019

О.Г. Нарыжный. Моделирование вільного деформування циліндричної оболонки за умов дії електрогидравлічного ефекту

Розглянута математична модель термомеханічних процесів в технологічній системі вільного деформування тонкошарової оболонки за умов дії електрогидравлічного ефекту. Модель включає а) пароплазменний канал, що поширюється з-за виділення імпульсу Джоулевого тепла, б) технологічну рідину, що передає та перетворює дію поширеного каналу, в) технологічне оснащення, що каналізує та направляє рух рідини та на сам кінець г) технологічний об'єкт у вигляді деформуємої дією рідини тонкошарової пружно-пластичної оболонки. Формально модель являє собою поєднання фундаментальних законів механіки суцільних середовищ (рівняння балансу маси, енергії та імпульсу), неklasичних контактних умов, а також реологічних моделей матеріалів елементів моделі. В цілому модель виявляється системою нелінійних диференціальних рівнянь в часткових похідних та нерівностей, що не має рішень у вигляді обчислюваних виражень, тому рішення шукаються в числовому вигляді. За допомогою моделі вивчені процеси конкретної технологічної системи, для якої в літературі наведені результати експериментального дослідження, зокрема, характеристики імпульсного збурення та відповідні остаточні деформації оболонки. Показана відповідність експерименту результатів моделі з використанням реологічної динамічної моделі змінення за Джонсоном- Куком для алюмінієвих сплавів, одночасно обґрунтована непридатність статичної та динамічної за Купером-Саймондсом моделей, бо вони обумовлюють надто малу жорсткість оболонки, отже, надто великі остаточні деформації. Порівнянням рішень з використанням двох видів стисливості (лінійної та нелінійної) обґрунтована достатність саме лінійного виду, бо він потребує менших ресурсів комп'ютеру. Відзначено, що розрахункові похибки відображують нерівномірності форми та руху елементів, що спостерігаються в експерименті. В цілому відзначено адекватність моделі, що робить її використання можливим для вивчення інших технологічних систем, що використовують електрогидравлічний ефект.

Ключеві слова: математична модель, оболонка, вільне деформування, ефект Юткіна.

A.G. Naryzhnyj. Simulation of the free deformation of the cylindrical shell subjected to electro- hydraulic effect

Is discussed the mathematical model of thermomechanical processes in technological systems for free deformation of thin-wall blank subjected to electro- hydraulic effect. The model includes a) gas-vapor channel expanding as a result of extraction of the Joule heat pulse, b) technological liquid, sending and converting action of the expanding channel, c) technological facilities, canalizing and directing motion of liquids and, finally, d) technological object in the manner of thin-wall elastoplastic shell deformed by liquid. The model formally presents combination of fundamental continuum mechanics laws (the equations of the balance of the mass, balance of energy and pulse), of non-classical contact conditions, as well as material rheological rules for model's elements. As a whole model formally is a system of the nonlinear differential equations in quotient derived and inequalities, not having decisions in the manner of computable expressions so decisions are searched for numerically. By means of models studied processes

in concrete technological system, for which in literature are brought results of the experimental study, specifically, features of the impulse action and corresponding type of residual deformation of shell. It is shown compliance of experimental data and results of models with use rheological dynamic hardening model by Johnson - Cook for aluminum alloy, is simultaneously motivated impracticability steady-state and dynamic hardening model by Cowper and Symonds for the aluminum alloy since they derive too small softness of the shell and, consequently, unnatural greater residual deformation. The comparison of the decisions with use two kinds (linear and nonlinear) compressibility to liquids is motivated sufficiency of the using the linear type since such choice allows economical use of computer resource. It is noted that inaccuracy of the calculations reflects irregularity of forms and motions of system elements, existing in experiment. As a whole Is it noted adequacy of models that permits its use for study other technological systems, using electro-hydraulic effect.

Key words: mathematical model, shell, free deformation, Yutkin's effect.

References

1. Jutkin L.A. Jelektrohidravlicheskiy jeffekt i ego primeneniye v promyshlennosti [Electro- hydraulic effect and its using in industry]. Leningrad, Machine Building Publ., 1986. 253 p.
2. Taranenko M.E. Jelektrohidravlicheskaja shtampovka: teorija, oborudovanie, tehprocessy [Electro- hydraulic stamping: theory, equipment, technological processes].- Kharkov, KhAI Publ., 2011.- 207 p.
3. Mazurovskij B.Ja., Sizev F.N. Jelektrohidravlicheskiy jeffekt v listovoj shtampovke [Electro- hydraulic effect in sheet stamping] Kiev, Naukovadumka Publ., 1983. 192 p.
4. Kosenkov V.M. Vlijanie dliny kanala vysokovol'tnogo razrjada v vode na jeffektivnost' plasticheskogo deformirovanija cilindricheskoy obolochki [Influence of the length of the channel of the high-tension category in water on efficiency plastic deformation of cylindrical shell], Technical Physics, 2011, t.81, no.10, pp.133-139.
5. Kosenkov V.M., Bychkov V.M., Zhekul V.G., Poklonov S.G. Jeksperimental'noe issledovanie vlijaniya jelektricheskikh razrjadov bol'shoj dliny v vode najenergiju deformacii cilindricheskoy obolochki [Experimental study of the influence electric category big length in water on energy of the deforming the cylindrical shell]. Technical Physics Letters, 2012, t.38, no.9, pp.103-110.
6. Kosenkov V.M., Bychkov V.M., Zhekul V.G., Poklonov S.G. Jelektricheskie razrjady bol'shoj dliny v vode i ih vlijanie najenergiju plasticheskoy deformacii cilindricheskoy obolochki [Electric categories of the big length in water and their influence upon energy of the plastic deforming the cylindrical shell], Electronic processing material, 2013, t.49(3), pp.63- 69.
7. Mamutov V., Golovashchenko S., Mamutov A. Simulation of high-voltage discharge channel in waterat electro- hydraulic forming using LS-DYNA, 13 th international LS-DYNA users conference, 8-10 jun 2014, pp.1-1- 1-9.
8. LS-DYNA Keyword user's manual.- Livermore, LSTC, 2006. 2130 P.
9. Mane T., Goel V., Kore S.D. Finite element modeling of electro-hydraulic forming of sheets.3rd international conference on materials processing and characterisation (ICMPC 2014), Procedia materials science, 2014, V. 6, pp. 105-114.
10. Atieh S., A.A.Carvalho, I.A.Santillana et al.First results of SFR cavity fabrication by electro- hydraulic forming at.Proceedings of SFR 2015, Whistler, BC, Canada. Pre-press Release 25 sept. 2015, pp.1- 7.
11. Bjorkstrom D. FEM simulation of electrohydraulic forming. Diplomathesis. Stockholm, Kungliga Tekniska Hogskolan, 2008. 88 p.
12. Naryzhnyj A.G. Vychislitel'naja model' jelektrohidravlicheskogo jeffekta [Computing model electro- hydraulic effect], Opened information and computer integrated technologies.- Kharkov, KhAI Publ,2012.- no.54.pp.112- 124.
13. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and datafor metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th international symposium on ballistics. 1983. pp. 541-547.
14. Donea J., Huerta A., Ponphot J.-Ph., Rodrigues-Ferran A. Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods. Encyclopedia of computational mechanics. Vol. 1. Fundamentals. Wiley, 2004. pp. 1- 25.
15. Burago N.G. Chislennoe reshenie zadach MSS s podvizhnymi granicami razdela. [Numerical decision of the continuum mechanics problems with moving border of the section]. Dis. doct. thesis.- Moscow, Academy of Science, 2003.- 222 p.