

УДК 621.7.044

В. Е. ЗАЙЦЕВ, А. А. ХОДЬКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОРОИДАЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА ВЫСОКОРЕСУРСНОГО ТРУБОПРОВОДА САМОЛЕТА

В статье рассмотрены особенности технологического процесса гидродинамического формообразования деталей авиационных конструкций на примере тороидального компенсатора высокоресурсного трубопровода самолета. Для проведения исследования была построена трехмерная конечно-элементная модель на основе совмещенного метода Эйлера-Лагранжа CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian method) с использованием программного комплекса ABAQUS. Предложенная модель может быть использована для исследования и оптимизации технологических процессов гидродинамической штамповки деталей различных конфигураций, а также других процессов импульсной обработки металлов давлением с использованием жидких передающих сред.

Ключевые слова: импульсная обработка металлов давлением, гидродинамическая штамповка, рабочая жидкость, высокоресурсный трубопровод, компенсатор, численное моделирование.

Введение

Процессы импульсной обработки металлов давлением нашли широкое применение в аэрокосмической, автомобильной и судостроительной промышленности при изготовлении деталей различной конфигурации из большого числа материалов.

Работа пластического деформирования заготовки в данных процессах выполняется в результате ее нагружения кратковременным импульсом сил высокой интенсивности [1]. Скорости деформации находятся, как правило, в диапазоне $10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$, поэтому продолжительность процесса штамповки лежит в пределах нескольких микросекунд или миллисекунд. Для достижения таких высоких скоростей используются различные источники энергии: химическая энергия (штамповка взрывом, детонационно-газовая штамповка), электрическая энергия (электрогидравлическая штамповка, электромагнитная штамповка) и механическая энергия (гидродинамическая штамповка, высокоскоростные механические прессы).

В авиастроении для изготовления деталей приварной арматуры высокоресурсных трубопроводов противообледенительной системы и системы кондиционирования воздуха самолетов широкое применение нашел способ гидродинамической штамповки. Сущность этого способа заключается в преобразовании кинетической энергии поршня в потенциальную энергию рабочей жидкости, под воздействием которой деформируется заготовка. При этом для разгона поршня могут применяться различные

источники энергии, включая порох, газ высокого давления, смесь горючих газов, вакуум, перегретый пар и т.д. Основными достоинствами способа гидродинамической штамповки являются его простота и высокая энерговооруженность (до 100 кДж) при достижении в рабочей камере, не имеющей специальных уплотнений, давлений до 500 МПа [2].

Характер деформирования заготовки и окончательная форма отштампованной детали обусловлены действием жидкости и наоборот, жидкость подчинена воздействию оснастки и формоизменяющейся заготовки. Поэтому исследование особенностей формообразования деталей методом гидродинамической штамповки не может дать полноценного понимания процесса без совместного рассмотрения всех элементов системы.

Вместе с экспериментальными методами исследования подобных процессов крайне перспективными являются также методы численного моделирования, позволяющие получить более глубокое представление об особенностях поведения жидкости и заготовки в замкнутой рабочей камере, где расположение различных датчиков является трудной, иногда невыполнимой, задачей. Применение методов численного моделирования также дает возможность значительно сократить сроки подготовки производства и обеспечить выбор оптимальных параметров технологических процессов гидродинамической штамповки.

Для исследования процесса гидродинамического формообразования деталей сложной формы на примере тороидального компенсатора высокоресурсного

сурсного трубопровода самолета авторами предложена вычислительная модель системы гидродинамической штамповки на основе совмещенного метода Эйлера-Лагранжа CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian method), разработанная с применением программного комплекса ABAQUS. Благодаря тому, что конечно-элементная сетка рабочей жидкости остается неизменной во времени и не искажается, данный подход дает возможность рассматривать движение жидкости в камере сложной формы, где возникают вихревые и струйные течения, разрывы сплошности среды. Использование данной модели дает возможность исследования и оптимизации различных технологических процессов и систем гидродинамической штамповки, а также и других импульсных процессов обработки металлов давлением, где для передачи энергии от источника возмущения к заготовке применяется жидкая передающая среда.

Компенсатор высокоресурсного трубопровода самолета

Воздушные системы, к которым относится противообледенительная система и система кондиционирования воздуха, имеют весьма значительный удельный вес в весовой структуре современного самолета. Еще более значительно влияние этих систем на показатели надежности и ресурса самолета. Поэтому задача их совершенствования является весьма актуальной.

Высокоресурсный трубопровод воздушных систем самолета состоит из большого числа унифицированных элементов и приварной арматуры, которые позволяют получить трубопровод любой конфигурации с использованием минимального числа специальных деталей. В процессе эксплуатации магистрали этих систем подвергаются действию динамических, циклических и повторно-статических нагрузок, поэтому к ним предъявляются высокие требования соответствия критериям качества, технологичности и эффективной замены в процессе эксплуатации. Для обеспечения возможности небольших угловых и линейных перемещений элементов трубопровода под воздействием эксплуатационных нагрузок, связанных с условиями полета (вибрации, колебания, нагрев и т.д.), используют компенсаторы различной формы. Эти элементы приварной арматуры изготавливают из цельнотянутых или сварных одношовных трубчатых заготовок в диапазонах диаметров и толщин, в которых изготавливаются трубопроводы.

Одними из наиболее трудных в изготовлении деталей высокоресурсного трубопровода самолета из-за сложной геометрической формы являются тороидальные компенсаторы (рис. 1). Поэтому исследова-

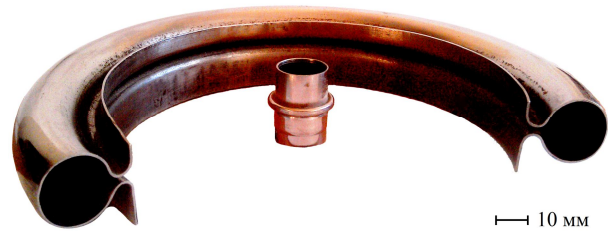


Рис. 1. Тороидальные компенсаторы высокоресурсного трубопровода самолета

дование особенностей формообразования детали такого типа в данной статье является актуальной задачей, решение которой позволяет получить качественное и количественное представление о динамике процесса гидродинамической штамповки.

Конечно-элементная модель процесса гидродинамической штамповки

Расчетная схема технологической системы гидродинамической штамповки тороидального компенсатора, представленная на рис. 2, состоит из камеры с каналом, внутри которой находится рабочая жидкость (в данном случае, вода) поршня и трубчатой заготовки.

Рассматривается нагружение рабочей жидкости в камере поршнем 60 мм в диаметре, массой 3 кг, движущимся до момента соприкосновения с жидкостью со скоростью 60 м/с. Трубчатая заготовка, выполненная из алюминиевого деформируемого сплава AA 5083-H116 (аналог АМг4), имеет следующие размеры: высота 100 мм, диаметр 120 мм и толщина 0,8 мм. Полость матрицы имеет форму тора, макси-

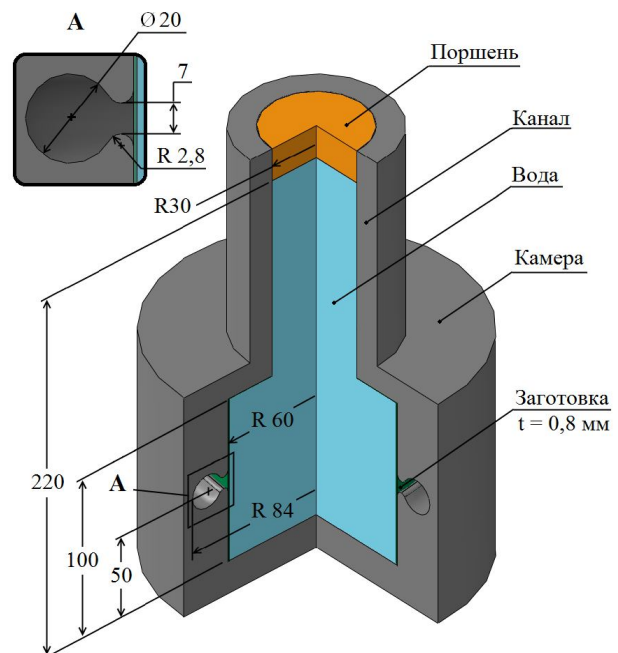


Рис. 2. Расчетная схема технологической системы гидродинамической штамповки

мальный диаметр которого равен 168 мм, диаметр образующей окружности – 20 мм. Радиус перетяжных ребер матрицы равен 2,8 мм, а высота кольцевой щели, через которую проникает материал заготовки в процессе штамповки – 7 мм.

В связи с тем, что рассматриваемая система обладает геометрической и силовой симметрией, расчет проводится для сектора системы в 10° , что при сохранении требуемой точности существенно снижает время расчета. Исследование системы в осесимметричной постановке невозможно из-за особенностей используемого программного комплекса конечно-элементного анализа ABAQUS, о которых будет сказано ниже. Для дискретизации заготовки и оснастки применяются восьмиузловые гексагональные лагранжевы элементы C3D8R с уменьшенным количеством точек интегрирования и контролем безэнергетических форм деформации (hourglass control), доступные в библиотеке элементов программного комплекса ABAQUS [3]. Для правильной передачи изменения напряжений по толщине заготовки при деформировании, она разделена на четыре ряда конечных элементов. Т.к. в настоящем исследовании рассматриваются большие перемещения рабочей жидкости в камере, имеющей переменную площадь поперечного сечения, в процессе формообразования детали сложной формы, для описания движения жидкости целесообразным является подход Эйлера [4]. Программный комплекс ABAQUS на данный момент поддерживает лишь один тип эйлеровых элементов – восьмиузловые гексагональные элементы EC3D8R с уменьшенным количеством точек интегрирования. Наличие только одного, описанного выше, типа эйлеровых элементов в библиотеке элементов комплекса приводит к тому, что создание конечно-элементной сетки воды не может быть реализовано в осесимметричной постановке и возникает необходимость построения объемной модели. Для взаимодействия лагранжевых и эйлеровых элементов внутри одной модели используется совмещенный метод Эйлера-Лагранжа CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian method) [3]. Общее количество конечных элементов в модели составляет 173 098 элементов.

Контактное взаимодействие всех элементов системы реализовано как общий контакт (general contact) [3]. Заготовка и камера взаимодействуют с трением по закону Кулона. Коэффициент трения $\mu_{тр} = 0,05$ [5,6].

Для учета скоростного упрочнения и температурного разупрочнения металла деформируемой заготовки в исследовании применяется модель пластичности Джонсона-Кука, получившая широкое распространение при моделировании импульсных процессов обработки металлов давлением [4,7,8].

Согласно этой модели, динамический предел текучести σ определяется следующим соотношением:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}), \quad (1)$$

где ε - интенсивность пластической деформации, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ - безразмерная скорость пластической деформации, определяемая как отношение мгновенной скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}$ к ее пороговому значению $\dot{\varepsilon}_0$. Уравнение содержит пять материальных констант: A - статический предел текучести, B - модуль деформационного упрочнения, n - показатель степени в законе деформационного упрочнения, C - коэффициент скорости деформаций, m - показатель степени в законе температурного разупрочнения. T^* - гомологическая температура, определяемая как:

$$T^* \equiv \begin{cases} 0, & \text{при } T < T_0 \\ (T - T_0)/(T_{пл} - T_0), & \text{при } T_0 \leq T \leq T_{пл} \\ 1, & \text{при } T > T_{пл} \end{cases}, \quad (2)$$

где T - абсолютная мгновенная температура металла заготовки, T_0 - комнатная температура, $T_{пл}$ - температура плавления металла заготовки.

Согласно модели разрушения Джонсона-Кука граничная величина накопленных пластических деформаций ε_f определяется выражением [9]:

$$\varepsilon_f = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 T^*), \quad (3)$$

где $\eta = -p/q$, p - давление в рассматриваемом конечном элементе, q - эквивалентное напряжение Мизеса, d_1, d_2, d_3, d_4 и d_5 - константы, зависящие от материала.

Разрушение материала происходит, когда параметр разрушения D становится равным единице:

$$D = \sum \frac{\Delta \dot{\varepsilon}}{\varepsilon_f} = 1. \quad (4)$$

В таблице 1 представлены константы моделей пластичности и разрушения Джонсона-Кука и физико-механические свойства алюминиевого деформируемого сплава AA 5083-H116 [9].

Большая жесткость элементов оснастки по сравнению с деформируемой заготовкой дает возможность рассматривать их как абсолютно жесткие тела, тем самым ускоряя вычислительный процесс.

Физико-механические свойства материала оснастки (конструкционная сталь) приведены в таблице 2.

Для описания поведения воды в объеме рабочей камеры под воздействием ударного нагружения поршнем в настоящем исследовании применяется уравнение состояния Ми-Грюнайзена [6]:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E, \quad (5)$$

где p – давление, ρ_0 – начальная плотность среды, c_0 – скорость звука в среде, $\eta = 1 - \rho_0/\rho$, где ρ – текущая плотность среды, s – эмпирический коэффициент, Γ_0 – постоянная Грюнайзена, E – внутренняя энергия.

Свойства воды и константы уравнения состояния Ми-Грюнайзена для нее представлены в таблице 3 [6,10].

Таблица 1

Параметры моделей Джонсона-Кука и физико-механические свойства материала заготовки АА 5083-Н116 [9]

Параметры	Значения	Единицы измерения
A	167	МПа
B	596	МПа
n	0,551	-
C	0,001	-
m	0,859	-
$\dot{\epsilon}_0$	1	с ⁻¹
T ₀	293	К
T _{пл}	893	К
d ₁	0,0261	-
d ₂	0,263	-
d ₃	-0,349	-
d ₄	0,147	-
d ₅	16,8	-
E	70	ГПа
ν	0,3	-
ρ	2700	кг/м ³
c_p	910	Дж/(кг·К)

Таблица 2

Физико-механические свойства материала оснастки (конструкционная сталь)

Параметры	Значения	Единицы измерения
E	200	ГПа
ν	0,3	-
ρ	7800	кг/м ³

Таблица 3

Свойства воды и константы уравнения состояния Ми-Грюнайзена [6,10]

Параметры	Значения	Единицы измерения
ρ_0	1000	кг/м ³
c_0	1490	м/с
s	1,79	-
Γ_0	1,65	-
μ	$1,002 \cdot 10^{-3}$	Па·с

Примечания к таблицам 1-3: E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, ρ – плотность, μ – динамическая вязкость среды.

Универсальность предложенной в данном разделе модели состоит в том, что она может быть использована как для исследования и оптимизации технологических процессов гидродинамической штамповки деталей различных конфигураций, так и для других процессов импульсной обработки металлов давлением с использованием жидких передающих сред.

Результаты и обсуждение

В данном разделе рассматриваются и обсуждаются основные результаты численного исследования процесса гидродинамической штамповки тороидального компенсатора высокоресурсного трубопровода самолета.

Ударное взаимодействие движущегося поршня с невозмущенной рабочей жидкостью генерирует в ней волну давления (рис. 3, а), распространяющуюся вдоль канала в сторону рабочей камеры. При движении в канале наблюдается повышение максимального давления во фронте волны, а сам фронт имеет плоскую форму (рис. 3, б). При выходе из канала переходника ствола в рабочую камеру фронт волны давления получает возможность двигаться также и в радиальном направлении, тем самым приобретая сферическую форму (рис. 3, в). Дальнейшее распространение волны по камере приводит к понижению максимального давления (в полтора раза по сравнению с тем, которое возникает в канале), что объясняется отдаленностью фронта волны от источника возмущения, увеличением площади фронта и выполнением работы по деформированию заготовки (рис. 3, г). На данном этапе зоны максимального давления наблюдаются в канале переходника ствола непосредственно под поршнем, а также на участке фронта волны давления в форме диска, диаметр которого, поначалу равный диаметру канала (рис. 3, в), постепенно уменьшается с отдалением от устья канала (рис. 3, г). За фронтом ударной волны образуется область разрежения (отрицательного давления), в которой действуют большие растягивающие напряжения, распространяющаяся в сторону поршня. Когда величина отрицательного давления превышает прочность жидкости на разрыв, в объеме рабочей жидкости возникает кавитация [11]. Это критическое давление P_k носит название порога кавитации. Для воды, используемой в качестве рабочей жидкости в процессах гидродинамической штамповки, $P_k = 1 \cdot 10^4$ Па [12]. Образование областей разрежения в объеме исследуемой среды является характерной особенностью ударного нагруже-

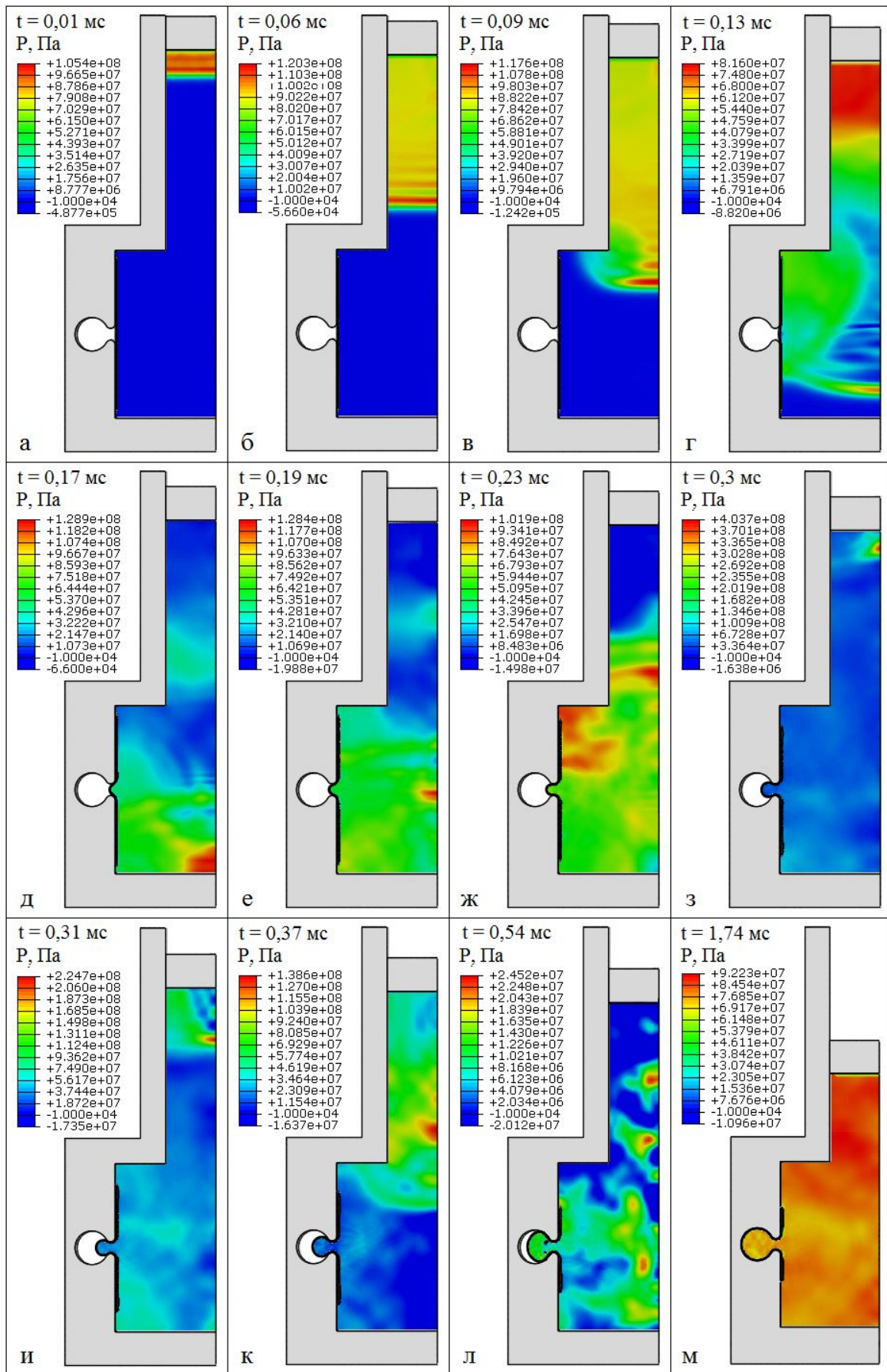


Рис. 3. Контурные графики распределения давления в рабочей жидкости в различные моменты времени

ния [13]. При отражении волны давления от дна рабочей камеры происходит увеличение максимального давления во фронте волны приблизительно в полтора раза (рис. 3, д), после чего отраженная волна начинает обратное движение в сторону поршня (рис. 3, е). В то же время, с приходом волны разрежения к поршню, в верхней части канала образуется зона кавитации. При прохождении фронта волны обратно в канал наблюдается частичное отражение от верхней стенки рабочей камеры, что приводит к понижению максимального давления во фронте (рис. 3, ж). При достижении фронтом волны верхней части канала и схлопывании верхней кавитационной зоны движущимся поршнем происходит отражение волны от поршня, что, как и в случае отражения от дна камеры, ведет к локальному повышению давления в этой области (рис. 3, з). К этому моменту времени кавитационные разрывы образуются по всему объему рабочей жидкости. Максимальное давление во фронте вновь отраженной превышает то, которое возникло при первоначальном движении волны по каналу, однако участок фронта, несущий это максимальное давление, существенно меньше (рис. 3, и). Движущаяся ко дну камеры волна давления захлопывает кавитационные зоны, находящиеся на ее пути (рис. 3, к). С все большим деформированием заготовки интенсивность волны давления значительно ослабевает. Зона повышенного давления ста-

новится неоднородной (рис. 3, л), что связано с многократным отражением и интерференцией. После окончательного оформления заготовки по матрице распределение давления во всем объеме рабочей жидкости становится более равномерным (рис. 3, м), кавитационные разрывы пропадают, что обусловлено повышением давления в жидкости в результате движения поршня.

На рисунке 4 показаны графики зависимости давления в жидкости от времени в различных точках камеры. Начальная задержка, присутствующая на каждом из графиков, обусловлена удаленностью точек, в которых измеряется давление от источника возмущения. С приходом волны давления к этим точкам наблюдается резкий скачок давления (первый острый пик на графиках). Последующие пики на графиках отражают волновые процессы, происходящие в рабочей жидкости (приблизительно до 0,38 мс). Затем волновые процессы накладываются на колебания движущейся жидкости, давление в камере ослабевает (0,38-1,2 мс). После того, как заготовка приняла форму матрицы, происходит рост давления (с 1,2 мс), вызванный сжатием жидкости в замкнутом объеме поршнем, продолжающим движение внутрь камеры. Это давление является непродуктивным [12]. Оно воспринимается оснасткой и определяет ее прочность и долговечность. Варьируя параметрами нагружения (в общем случае скоро-

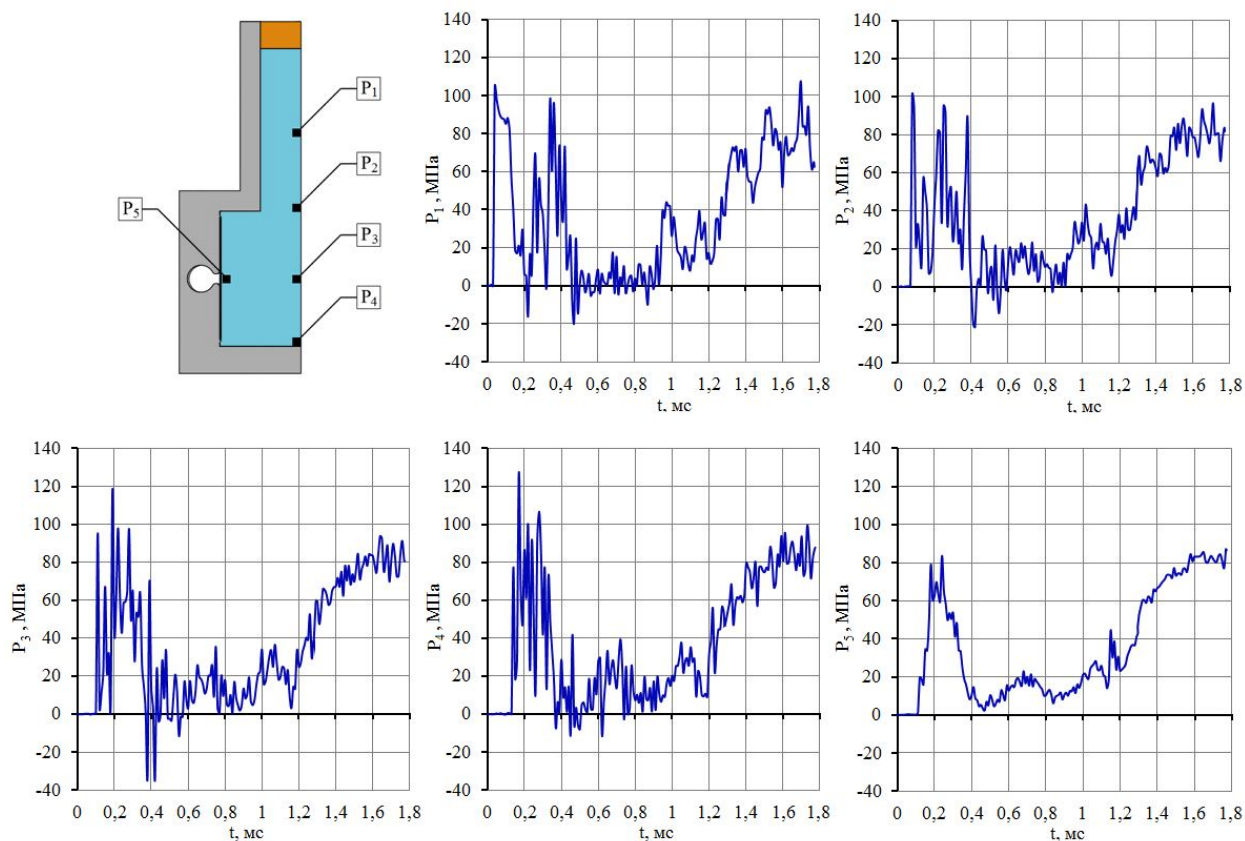


Рис. 4. Зависимость давления жидкости от времени в различных точках рабочей камеры

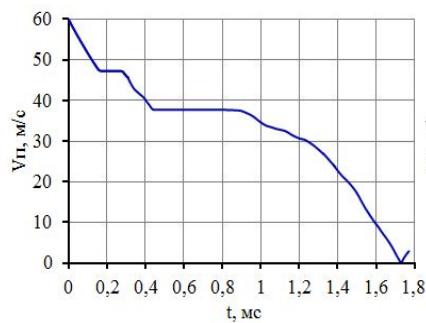


Рис. 5. Зависимость скорости поршня от времени

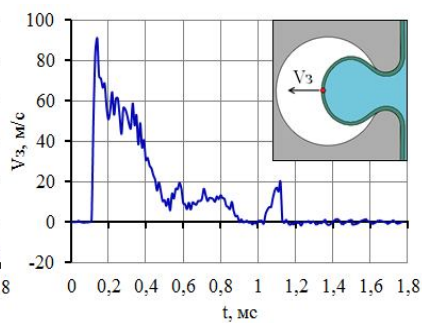
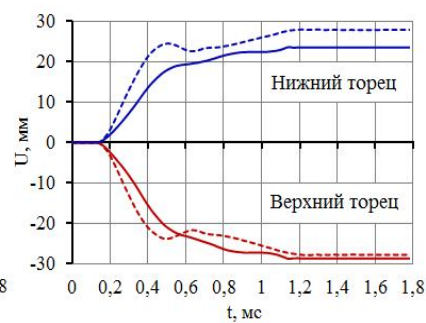


Рис. 6. Зависимость радиальной скорости средней точки заготовки от времени

Рис. 7. Осевое смещение торцов трубчатой заготовки:
— — $\mu_{тр} = 0,05$; - - - - $\mu_{тр} = 0$

стью и/или весом поршня) можно получить минимально требуемый уровень этого давления, что повысит качество штампуемого изделия и срок службы оснастки. Спад давления (с 1,7 мс) обусловлен отскоком поршня и началом его движения в обратном направлении. Следует отметить, что максимальных значений давление достигает в точках P_1 – P_4 , расположенных на оси рабочей камеры. В районе щели с протяжными ребрами, через которую заготовка заходит в полость матрицы, давление меньше, что обусловлено отдаленностью от участка фронта волны с максимальной величиной давления, а также с выполнением работы по деформированию заготовки (точка P_5).

На рисунке 5 представлен график изменения во времени скорости поршня. Соударение поршня с рабочей жидкостью приводит к резкому снижению его скорости (до 0,15 мс). На данном этапе зависимость скорости поршня от времени имеет линейный характер. При взаимодействии волны разрежения с поршнем давление перед ним падает, и поршень продолжает движение с практически постоянной скоростью (0,15 – 0,28 мс). Выход поршня из области разрежения при схлопывании кавитационной зоны приводит к дальнейшему снижению скорости поршня (0,28 – 0,45 мс). Второй горизонтальный участок на графике (0,45 – 0,9 мс) также обусловлен прохождением поршня области разрежения, образовавшейся перед ним. Далее следует завершающий этап торможения поршня (0,9 – 1,7 мс), на котором зависимость скорости поршня от времени с 1,2 мс снова приобретает практически линейный характер, что обусловлено окончательным оформлением контура детали и сопутствующим ростом давления в камере. Затем происходит отскок поршня и его движение в обратном направлении (с 1,7 мс).

График изменения во времени радиальной скорости средней точки образующей трубчатой заготовки приведен на рис. 6. Начальная задержка по времени обусловлена отдаленностью точки от источника возмущения, а значит необходимостью затраты времени на распространение волны давления

в передающей среде. С приходом волны давления к заготовке, она начинает двигаться в радиальном направлении с высокой скоростью, которая превышает скорость поршня в момент удара о жидкость. Далее наблюдается постепенное снижение скорости. Радиальное движение заготовки имеет колебательный характер.

Осевое смещение торцов трубчатой заготовки неравномерно (рис. 7). В большей степени смещается верхний торец, перемещение которого превосходит нижний на 18%. Силы трения оказывают значительное влияние на перемещение торцов заготовки, что в результате приводит к несимметричности распределения деформаций по контуру штампуемой детали. При отсутствии трения смещение торцов практически одинаково. Из этого можно сделать вывод, что с целью повышения качества штампуемых деталей необходимо добиваться снижения коэффициента трения между заготовкой и матрицей, что может быть достигнуто путем нанесения специальных технологических сред (смазок).

Движение рабочей жидкости внутри оформляемого контура рассмотрено на рис. 8. В нулевой момент времени жидкость находится в невозмущенном состоянии (рис. 8, а). С приходом волны давления к заготовке начинается процесс деформирования. Давление жидкости, воздействуя на внутреннюю поверхность трубчатой заготовки, вынуждает ее проникать через перетяжные ребра матрицы в узкую щель (рис. 8, б). Движение жидкости в зоне оформляемого контура на данной стадии процесса ограничено радиальным направлением. После выхода материала деформируемой заготовки из щели в тороидальную полость матрицы, у него появляется возможность движения в осевом направлении, поэтому движение жидкости приобретает, помимо радиальной, и осевую составляющую (рис. 8, в). Следующая стадия процесса характеризуется образованием вихрей в рабочей жидкости при выходе из щели и появлением разрывов ее сплошности – каверн (рис. 8, г).

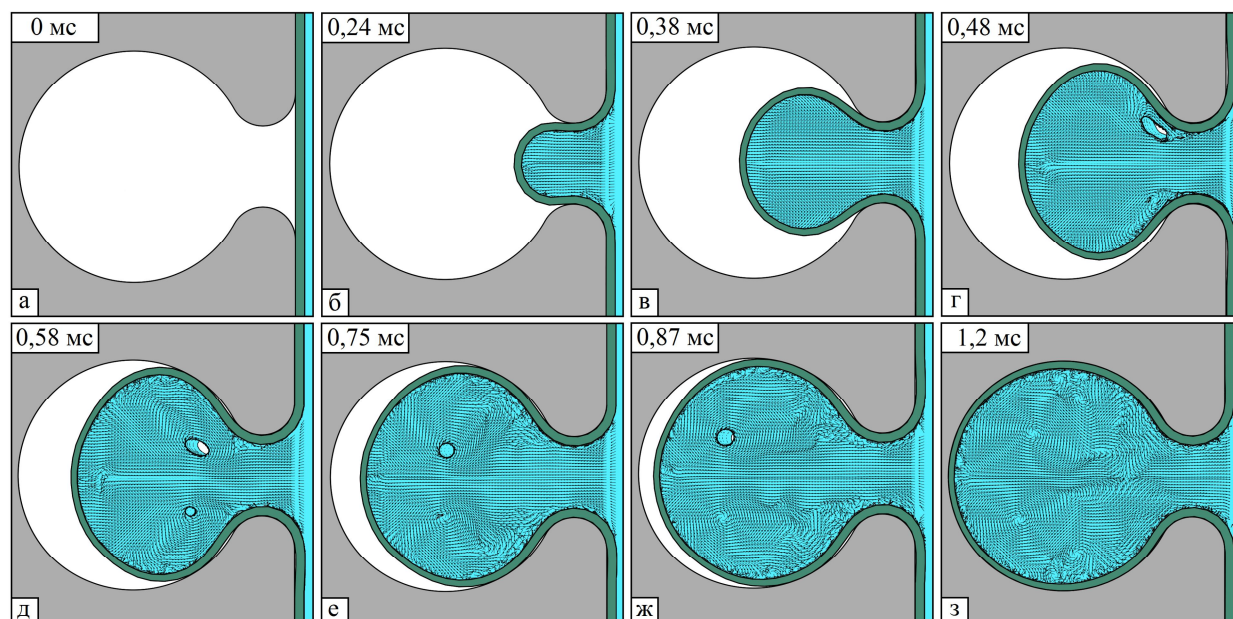


Рис. 8. Движение рабочей жидкости внутри оформляемого контура в различные моменты времени

Наблюдаемый процесс носит название щелевой кавитации [11]. Последующее движение жидкости вынуждает деформируемую заготовку вступить в контакт с тороидальной полостью матрицы (рис. 8, д). Как видно, поверхности контакта оформляемой заготовки с тороидальной полостью матрицы находятся не сразу за внутренними перетяжными ребрами, а имеются зоны, в которых контакт отсутствует. Это обусловлено снижением давления жидкости в этих областях в результате вихревых течений, а также большой жесткостью образованных элементов. Последующие этапы характеризуются всенаправленным движением жидкости. В результате чего происходит оформление заготовки по матрице в осевом направлении и свободное ее движение в радиальном направлении (рис. 8, е, ж). Каверны движутся в радиальном направлении, отдаляясь от мест своего образования. После того, как деформируемая заготовка ложится по матрице в радиальном направлении, происходит оформление зон за перетяжными ребрами, в которых до этого момента контакт заготовки с матрицей отсутствовал (рис. 8, з). На данном этапе каверны захлопываются, что приводит к резкому повышению давления в областях их локализации (рис. 9). Такое локальное повышение давления является характерным для подобных процессов и описано в работе [11]. Последующее движение жидкости в оформленном контуре приобретает довольно хаотичный характер. Количество вихрей увеличивается, но скорости движения жидкости в них ничтожно малы, поэтому каверны не образуются.

На рис. 10 показано распределение напряжений (а), пластических деформаций (б) и температур (в) в

оформленном контуре. Наибольшие значения пластических деформаций и температур локализованы в зонах детали, которые при деформировании первыми прошли через перетяжные ребра матрицы. Эти зоны, из-за действия сил трения, расположены несимметрично – в верхней части тороидальной поверхности детали наблюдается больший участок

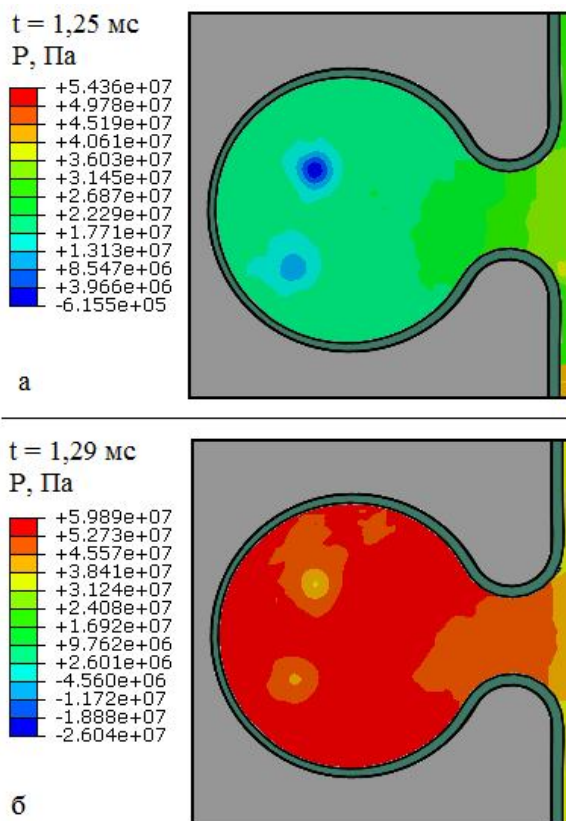


Рис. 9. Повышение давление жидкости при схлопывании каверн

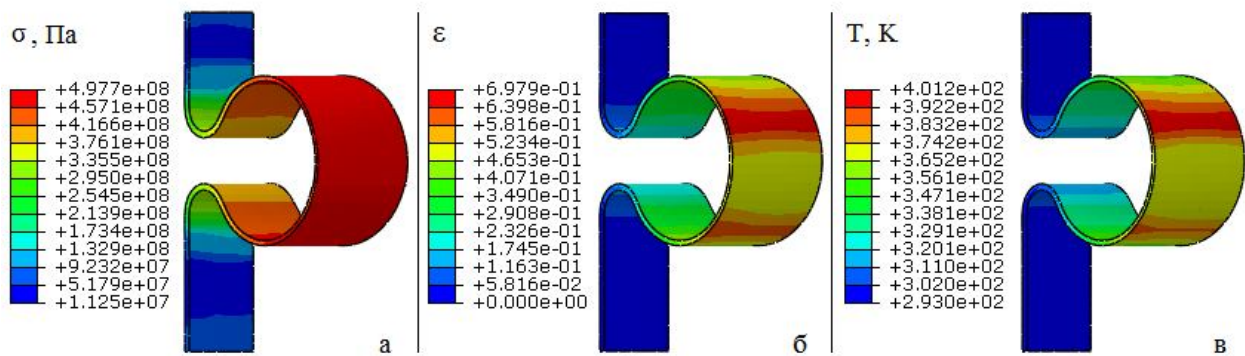


Рис. 10. Распределение напряжений (а), деформаций (б) и температур (в) в оформленном контуре

локализации. В процессе формообразования заготовки наблюдается значительный прирост температуры, максимальное значение которого составляет почти 110 градусов в слое алюминия, где зафиксированы наибольшие значения деформаций. Величины накопленных пластических деформаций не превышают граничных значений, поэтому разрушение материала не происходит.

На рисунке 11 показано распределение толщины металла по образующей отштампованной детали.

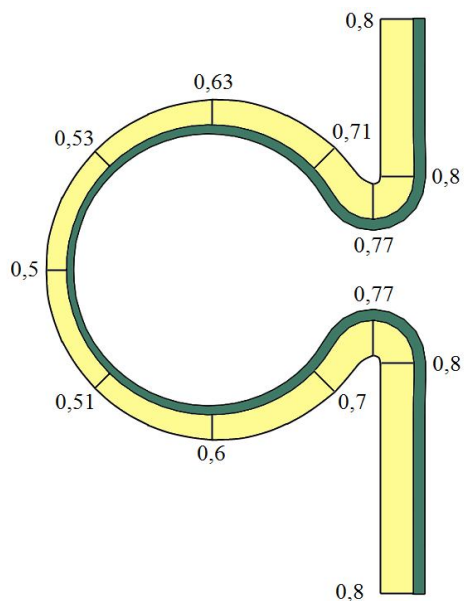


Рис. 11. Распределение толщины металла (в мм) по образующей отштампованной детали

Утонения верхней и нижней части детали, которые не прошли через перетяжные ребра матрицы в процессе штамповки, практически не происходит. Уменьшение толщины металла наблюдается в зоне от перетяжных ребер в сторону тороидальной полости матрицы. Максимальное утонение металла заготовки составляет 38% в сечении, соответствующему наибольшему диаметру отштампованной детали.

Выводы

Для численного исследования особенностей импульсных технологий формообразования деталей авиационных конструкций с применением жидких передающих сред авторами предложена трехмерная конечно-элементная модель на примере процесса гидродинамической штамповки тороидального компенсатора высокоресурсного трубопровода самолета. В основе модели лежит совмещенный метод Эйлера-Лагранжа CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian method), реализованный в программном комплексе конечно-элементного анализа ABAQUS. Применение данного метода позволяет использовать модель для исследования технологических процессов изготовления деталей сложных геометрических форм в камерах переменного сечения, где возникают вихревые и струйные течения, разрывы сплошности рабочей жидкости.

Для учета скоростного упрочнения и температурного разупрочнения металла деформируемой заготовки, которые являются неотъемлемыми атрибутами всех импульсных процессов обработки металлов давлением, в исследовании применяется модель пластичности Джонсона-Кука.

Модель отражает наблюдаемые в экспериментальных исследованиях явления, к которым относятся волновой характер распространения давления в рабочей жидкости (и как следствие волновой характер деформирования заготовки), образование кавитационных разрывов сплошности жидкости, утонение материала деформируемой заготовки и т.д., что свидетельствует о ее адекватности.

Кавитационные процессы, возникающие в жидкости при гидродинамической штамповке, могут привести к кавитационному износу (эрозии) оснастки и заготовки. Высокочастотные удары, возникающие при захлопывании каверн, способствуют появлению усталостных явлений в металлах. Разрушение происходит в форме выкрашивания, выбивания отдельных кристаллов. В результате чего по-

верхность металла становится губчатой. Описанные выше негативные явления могут быть сведены к минимуму путем задания подходящих режимов процесса, что чаще всего достигается снижением скорости поршня и одновременным увеличением его массы.

Из-за неравномерного распределения давления по длине формирующей камеры силы трения, действующие на верхний и нижний пояс трубчатой заготовки неодинаковы, поэтому смещение верхнего торца больше, чем нижнего. На рис. 1 можно увидеть эту особенность на фотографии реального изделия. Неравномерность распределения давления может быть снижена изменением схем нагружения. Степень влияния трения на характер деформирования заготовки будет усиливаться по мере увеличения габаритов детали и усложнения ее контура. Для создания более благоприятных условий процесса необходимо добиваться снижения коэффициента трения в контактной паре «заготовка-матрица», что может быть достигнуто путем нанесения специальных технологических сред.

Неравномерность распределения остаточных деформаций по образующей готовой детали может приводить к появлению концентраторов напряжений и различного рода дефектам, что неприемлемо для авиационных деталей. Поэтому в задачи оптимизации технологического процесса гидродинамической штамповки должны обязательно входить рассмотрение вариантов перераспределения остаточных деформаций по контуру отштампованной детали.

Предложенная модель дает широкие возможности для исследования и оптимизации технологических процессов гидродинамической штамповки и других гидроимпульсных процессов обработки металлов давлением, позволяя определить необходимые для качественного формообразования деталей сложной конфигурации параметры внешнего нагружения, прогнозировать толщины изготавливаемых деталей, разрушение материала заготовки и другие важные технологические особенности.

Литература

1. Один из новых вариантов обеспечения энергетического цикла гидродинамической штамповки листовых деталей летательных аппаратов [Текст] / В. Е. Зайцев, А. П. Брагин, С. А. Полтарушников, А. А. Ходько // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ» – 2012. - № 66 (972). – С. 23-31.
2. Брагин, А. П. Технологические операции гидродинамической штамповки подвижного сферического соединения трубопроводов [Текст] /

А. П. Брагин, А. П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 6 (63). – С. 24–29.

3. *Abaqus 6.12 Documentation [Electronic resource]*. - Access mode: https://www.tu-chemnitz.de/projekt/abq_hilfe/docs/v6.12. – 10.01.2015.

4. Ходько, А. А. Особенности выбора модели пластичности металла деформируемой заготовки при численном исследовании процесса гидродинамической штамповки [Текст] / А. А. Ходько // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 5 (112). – С. 11–24.

5. Wijayathunga, V. N. *Experimental evaluation and finite element simulation of explosive forming of a square cup forming of a brass plate assisted by a lead plug*[Text] / V. N. Wijayathunga, D. C. Webb // *J. Mat. Proc. Tech.* – 2006. - № 172. – P. 139-145.

6. Akbari Mousavi, S. A. A. *Experimental and numerical analyses of explosive free forming* [Text] / S. A. A. Akbari Mousavi, M. Riahi, A. Hagh Parast // *J. Mat. Proc. Tech.* – 2007. - № 187-188. – P. 512-516.

7. Johnson, G. R. *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures* [Text] / G. R. Johnson, W. H. Cook // *Proceedings of the 7-th International Symposium on Ballistics*. – The Hague, The Netherlands. – 1983. - P. 541-547.

8. Моделирование процесса свободной растяжки трубчатой заготовки при гидродинамической штамповке [Текст] / В. Е. Зайцев, В. А. Сукайло, В. Г. Корбач, А. А. Ходько // *Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2013. - № 42 (1015). – С. 69-77.

9. Mokadem, A. E. EI. *A study on the UNDEX cup forming* [Text] / A. E. EI. Mokadem, A. S. Wifi, I. Salama // *Journal of Achievements and Manufacturing Engineering*. – 2009. - № 37, issue 2. – P. 556-562.

10. Shah, S. A. *Water impact investigation for aircraft ditching analysis* [Text] : M. S. thesis / Sawan A. Shah. – RMIT University, Australia, 2010. – 160 p.

11. Кривченко, Г. И. *Гидравлические машины: Турбины и насосы* [Текст] : учебник для вузов / Г. И. Кривченко. – М. : Энергия, 1978. – 320 с.

12. Нарыжный, А. Г. Смешанная модель технологической системы гидродинамической штамповки [Текст] / А. Г. Нарыжный // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 6 (73). – С. 13–17.

13. Галиновский, А. Л. Анализ эффективности различных средств индивидуальной бронезащиты [Электронный ресурс] / А. Л. Галиновский, В. И. Колпаков, С. Г. Муляр // *Наука и образование* – 2012. – № 3. – С. 1–13. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/342101.html>. – 10.01.2015.

Поступила в редакцию 14.01.2015, рассмотрена на редколлегии 20.01.2015

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ТОРОІДАЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА ВИСОКОРЕСУРСНОГО ТРУБОПРОВОДУ ЛІТАКА

В. Є. Зайцев, О. О. Ходько

У статті розглянуто особливості технологічного процесу гідродинамічного формоутворення деталей авіаційних конструкцій на прикладі тороїдального компенсатора високоресурсного трубопроводу літака. Для проведення дослідження була побудована тривимірна скінченно-елементна модель на основі поєднаного методу Ейлера-Лагранжа CEL (Coupled Eulerian-Lagrangian method) з використанням програмного комплексу ABAQUS. Запропонована модель може бути використана для дослідження та оптимізації технологічних процесів гідродинамічної штамповки деталей різних конфігурацій, а також інших процесів імпульсної обробки металів тиском з використанням рідких передавальних середовищ.

Ключові слова: імпульсна обробка металів тиском, гідродинамічна штамповка, робоча рідина, високоресурсний трубопровід, компенсатор, чисельне моделювання.

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC FORMING PROCESSES OF TOROIDAL COMPENSATOR FOR AIRCRAFT HIGH DURABILITY PIPELINES

V. E. Zaytsev, O. O. Khodko

This article describes the features of hydrodynamic forming process of aircraft structures parts on the example of a toroidal compensator for aircraft high durability pipelines. To conduct the study three-dimensional finite element model based on the Coupled Eulerian-Lagrangian method (CEL) was constructed using ABAQUS finite element code. The proposed model can be used to study and optimize the hydrodynamic forming processes of parts with various configurations, as well as for investigation of other high-velocity metal forming processes using a liquid transmission medium.

Keywords: high-velocity metal forming, hydrodynamic forming, working liquid, high durability pipeline, compensator, numerical simulation.

Зайцев Віталій Егорієвич – д-р техн. наук, професор, професор кафедри технології виробництва летательних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: vitaliy.zaytsev@gmail.com.

Ходько Александр Алексеевич – аспірант кафедри технології виробництва летательних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: aleksandr.khdk@gmail.com.