

УДК 621.7.044.4+539.374.4

А.Г. НАРЫЖНЫЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

СМЕШАННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ

В статье представлена смешанная вычислительная модель гетерогенной механической системы с импульсным возмущением типа технологической системы гидродинамической штамповки. Для дискретизации жидкости использован бессеточный метод SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), а для дискретизации твердотельных элементов, в том числе деформируемой заготовки, использован сеточный метод конечных элементов. Импульсное возмущение жидкости производится жестким ударником, движущимся свободно с начальной скоростью. Модель предназначена для исследования и оптимизации механических процессов в технологических системах гидродинамической штамповки.

Ключевые слова: импульсная штамповка, деформирование оболочек, жидкость, компьютерное моделирование.

Введение

При производстве тонкостенных деталей в аэрокосмической промышленности, автомобиле- и двигателестроении применяются методы импульсной штамповки с использованием жидкой передающей среды.

Импульсное воздействие на жидкость обеспечивается различными способами: ударом твердого тела, электрическим разрядом в жидкости, взрывом химического заряда или электрического проводника в жидкости и др. Распространяющаяся волна давления, а затем – конвективный поток жидкости упругопластически деформируют и разгоняют заготовку до скорости в десятки и сотни метров за секунду. Пришедшая в движение заготовка сталкивается на своем пути с жесткой матрицей и принимает форму детали. При этом жидкость играет роль пуансона, управляя движением и деформированием заготовки.

Характер деформирования и окончательная форма заготовки обусловлены действием жидкости и наоборот, жидкость подчинена действию оснастки и изменяющей свою форму заготовки. Изучение особенностей деформирования заготовки должно включать также анализ связанных движений жидкости, что расширяет потребный объем исследования и предъявляет особые требования к методу исследования.

Наряду с экспериментальным подходом широкими возможностями изучения подобных гетерогенных импульсных систем обладает метод математического моделирования.

В статье представлена поршневая смешанная вычислительная модель гетерогенной механической системы с импульсным возмущением. Для дискретизации жидкости использован метод SPH (Smooth

Particle Hydrodynamics), а для дискретизации твердотельных элементов, в том числе деформируемой заготовки, использован метод конечных элементов. Модель предназначена для исследования и оптимизации механических процессов в технологических системах гидродинамической штамповки.

Формулирование проблемы

Различие механических свойств жидкости и твердотельных элементов технологической системы приводит к действию оснастки и заготовки на жидкость, в результате чего движение жидкости канализируется, образуются струйные и вихревые течения, а также кавитационные разрывы жидкости в малом замкнутом объеме сложной формы. Механические процессы в таких гетерогенных системах отличаются высокой интенсивностью, пространственным характером и кратковременностью. Кроме того, поведение жидкости и материала заготовки, а также имеющее контактный характер взаимодействие элементов, существенно нелинейны, что снижает возможности использования полученных знаний о процессах в конкретной системе для конструирования или оптимизации иной системы, имеющей иные размеры, форму, прочие технологические параметры.

При проектировании новой технологической системы или технологического процесса либо же определении предельных или оптимальных параметров обнаруживается проблема. Она заключается в недостаточности теоретических знаний о закономерностях преобразования импульсного возмущения жидкой средой в малом объеме и об особенностях деформирования заготовок жидкой передающей средой. В свою очередь отмеченные недостатки

обусловлены методическими проблемами исследования- ограниченностью используемых методик.

Широко используемые при решении задач механики деформируемых твердых тел сеточные методы, такие как методы конечных элементов [1] и конечных разностей, будучи применены для моделирования жидкости при импульсном возмущении, приводят к ложным решениям и прекращению вычислительного процесса из-за его неустойчивости и роста ошибки. Причина непригодности сеточных методов коренится в многочисленных и разнообразных вихрях, неизбежно возникающих в жидкости при этих условиях, а также в кавитации.

В настоящее время для задач механики сплошных сред с большими перемещениями получили развитие так называемые бессеточные методы аппроксимации, в частности метод SPH [2], которые допускают произвольное относительное положение узлов аппроксимации решения и поэтому теоретически нечувствительны к явлению вихреобразования. Однако применение метода SPH для моделирования процессов в жидкости в составе гетерогенных систем импульсного действия в литературе не описано.

Решение проблемы

Для моделирования процессов в гетерогенных механических системах предлагается использовать смешанные модели, использующие конечноэлементные дискретизации твердотельных компонентов и SPH- дискретизации для жидкости. Оба метода реализованы в пакете LS-DYNA [3].

Гидродинамическая штамповка часто применяется при изготовлении осесимметричных деталей. Ниже рассмотрена технологическая система штамповки элемента подвижного сферического соединения трубопровода.

Описание модели

На рис. 1 показан состав модели технологической системы: а – матрица, б – ударник, в – заготовка, г – столб жидкости.

Заготовка представляет собой цилиндрическую оболочку высотой 88 мм, средним диаметром 45 мм, толщиной 1 мм. Между матрицей и заготовкой установлен первоначальный зазор 0,5 мм. Матрица представляет собой недеформируемую и неподвижную цилиндрическую оболочку со сферическим расширением и плоским дном. Высота матрицы 90 мм, средний диаметр оболочки в цилиндрической части 50 мм, средний диаметр сферической части 60 мм, толщина матрицы 2 мм. Ударник представляет собой квадратную в плане жесткую пластину массой 1 кг. Жидкость, наполняющая заготовку, имеет форму цилиндра диаметром 44 и высотой 86 мм.

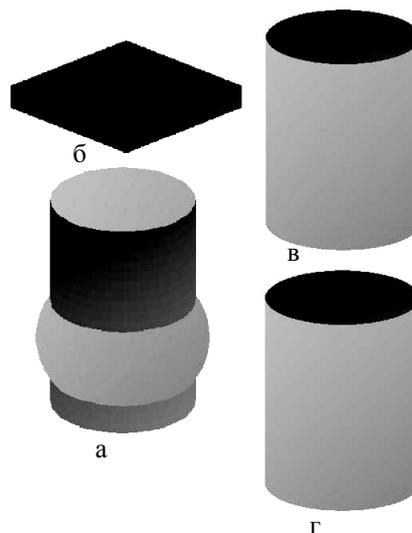


Рис. 1. Состав модели:
а – матрица, б – ударник, в – заготовка,
г – столб жидкости

Жидкость – сжимаемая, вязкая (коэффициент вязкости 0,1), кавитирующая при растягивающем напряжении 0,1 атм, плотностью 1000 кг/м³.

Заготовка из алюминиевого сплава плотностью 2700 кг/м³, деформирующаяся по упругопластическому типу. Модуль упругости первого рода – 8×10^{11} Па, коэффициент Пуассона – 0,33, начальный предел текучести – 200 МПа. Закон степенного деформационного упрочнения имеет вид

$$\sigma_T = 4,6285 \times 10^8 \times \epsilon^{0,122}. \quad (1)$$

Все элементы системы взаимодействуют друг с другом по контактному типу с неопределенной зоной контакта и возможностью отделения. Матрица и заготовка взаимодействуют с трением, коэффициент трения 0,1.

Ударник до соударения с жидкостью движется со скоростью 100 м/с.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны последовательные фазы деформирования заготовки (профильная проекция). Вначале (а) раздача имеет цилиндрический равномерный характер за исключением верхнего венца, который практически не испытывает действия жидкости. Затем начинается раздача в зоне сферического расширения заготовки (б). Формирование сферического расширения происходит в два этапа. После прохождения первого этапа расширение имеет форму конуса вершиной вниз (в). Далее на следующем этапе происходит расширение заготовки, проходящее снизу вверх (г), временно принимающее форму конуса вершиной вверх. В конце этапа заготовка принимает окончательную форму (д). Такой харак-

тер деформирования объясняется особенностями струйного течения жидкости. Первоначально струя движется вниз с небольшим поперечным расширением, затем после отражения от днища в запертой ударником камере возникают интенсивные боковые движения жидкости.

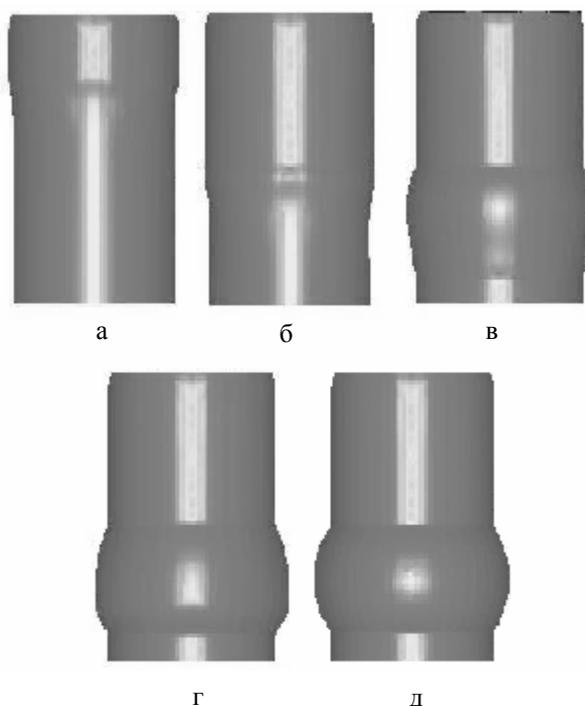


Рис. 2. азФы раздачи заготовки
(а – $t = 60$ мкс, б – $t = 120$ мкс, в – $t = 210$ мкс,
г – $t = 260$ мкс, д – $t = 300$ мкс)

Радиальная раздача сопровождается неоднородными осевыми перемещениями точек заготовки. На рис. 3 показана картина осевых перемещений в виде изополос.

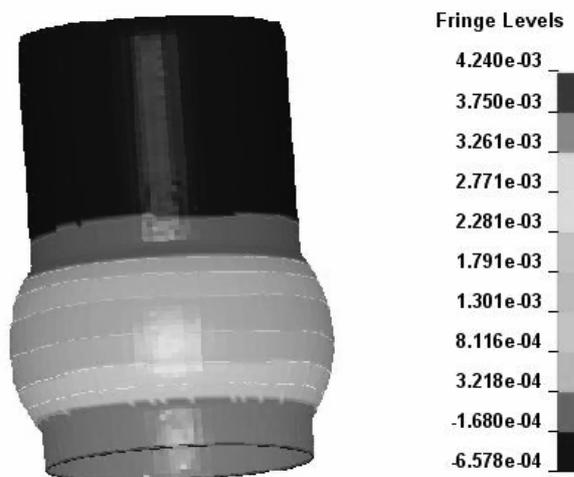


Рис. 3. Картина осевых перемещений точек заготовки

Верхняя цилиндрическая часть (до сферического расширения, отмечена черным) перемещается вниз во время формирования сферического расширения, максимальные перемещения равны 0,65 мм и наблюдаются на верхнем торце заготовки. Нижняя часть движется вверх во время радиальной раздачи верхней части, максимальные перемещения равны 4,23 мм и наблюдаются на нижнем торце заготовки. Такой характер перемещений объясняется трением, первоначально проявляющем себя при раздаче верхней части, а также явлением поперечной деформации.

В столбе жидкости возникают при ударе сначала волновые, а затем колебательные движения.

На рис. 4 показана зависимость силы давления ударника на жидкость от времени. Вначале наблюдается задержка 0,01 мс, обусловленная начальным зазором между ударником и жидкостью, затем три острых пика, отражающих волновые процессы (до 0,08 мс).

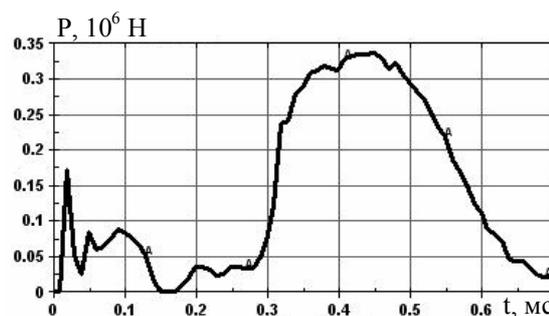


Рис. 4. Зависимость силы давления ударника от времени

Волновые процессы накладываются на колебания движущейся жидкости, имеющие затухающий характер (в интервале 0,03-0,27 мс). Затем в связи с тем, что заготовка уже приняла форму матрицы, наблюдается непродуктивный рост давления, обусловленный сжатием жидкости в замкнутом объеме движущимся ударником. Это давление воспринимается матрицей и определяет ее прочность и долговечность. Спад давления объясняется началом обратного движения ударника.

На рис. 5 показана зависимость импульса силы давления ударника на жидкость I от времени t

$$I(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad (2)$$

равного количеству движения жидкости, которое может быть преобразовано в дальнейшем в движение заготовки.

Видно, что количество движения жидкости линейно растет до начала образования сферического

расширения (0,12 мс), в течение образования сферы импульс растет незначительно, поскольку он расходуется на деформирование заготовки, достигая в конце величины 12 Н с.

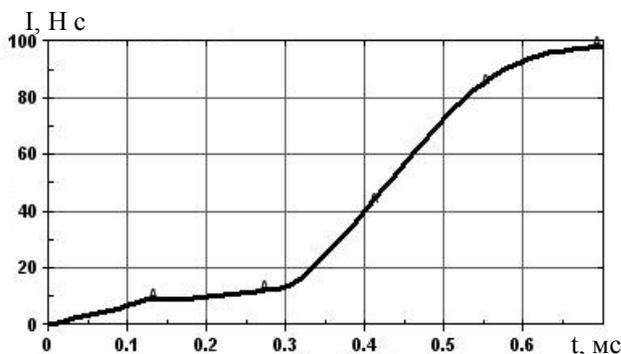


Рис. 5. Зависимость импульса силы давления от времени

После завершения деформирования заготовки (0,3 мс) импульс растет интенсивно и непродуктивно, более чем в пять раз превосходя потребный для получения детали уровень.

Рост величины импульса указывает на избыточность скорости ударника в сравнении с потребной для получения детали. Следовательно, скорость ударника и энергозатраты на его разгон могут быть уменьшены. Достаточная для совершения деформирования величина скорости ударника может быть определена в численном эксперименте с использованием данной модели.

Заключение

Рассмотренная механико-математическая модель гетерогенной системы отражает важные механические свойства и взаимодействия элементов системы (сжимаемость и кавитацию жидкости, упруго-пластический характер деформирования заготовки, контактный характер взаимодействия), что обеспечивает адекватность модели и достоверность результатов.

Модель отражает важные особенности поведения систем, наблюдаемые на практике – волновые и конвективные движения жидкости, характер деформирования заготовки и др., что подтверждает адекватность модели.

Смешанная модель позволяет, в отличие от известных сеточных моделей, анализировать процессы в системе от начала движения до образования детали, что дает возможность целостного исследования

закономерностей и особенностей процесса штамповки и использования для определения предельных возможностей и оптимизации технологической системы и технологического процесса. При использовании модели деформируемого материала матрицы возможен анализ механических процессов не только в жидкости и заготовке, но и в матрице.

Процесс деформирования заготовки протекает в несколько этапов:

- деформирование под действием волн давления, распространяющихся в неподвижной еще жидкости;
- деформирование нисходящим потоком жидкости (рис. 2, в);
- деформирование восходящим потоком жидкости при ее расширении (рис. 2, г).

В конце наблюдается непроизводительный рост давления жидкости.

При нисходящем потоке формируется, в основном, нижняя часть сферы. Это объясняется тем, что течение жидкости представляет собой расходящуюся книзу струю и угол падения жидкости на поверхность заготовки растет, приближаясь к прямому, наиболее продуктивному с точки зрения воздействия на заготовку.

При восходящем потоке формируется, напротив, верхняя часть сферы, так как струя расширяется кверху и углы падения жидкости близки к прямому на верхней части. Важным фактором деформирования является также рост давления, обусловленный движением ударника до его остановки.

После окончания деформирования сферического расширения, когда заготовка полностью лежит на поверхности матрицы, наблюдается интенсивный рост давления, что обусловлено скачкообразным ростом сопротивления расширению полости и продолжающимся движением ударника.

В конце процесса давление жидкости приводит к обратному движению ударника, который таким образом играет роль сдерживающего давления клапана, препятствующего разрушению оснастки.

Литература

1. *Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимации / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.*
2. *Belytschko T. Meshfree and Particle Methods / T. Belytschko, J.S. Chen. – John Wiley and Sons Ltd. 2007. – 712 p.*
3. *LS-DYNA Keyword User's Manual. – Livermore: LSTC, 2006. – 2130 p.*

Поступила в редакцию 8.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.Я. Мовшович, ГП «Харьковский НИИ технологии машиностроения», Харьков.

ЗМІШАНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ШТАМПУВАННЯ

О.Г. Нарижний

В статті розглянута змішана обчислювальна модель гетерогенної механічної системи з імпульсним збуренням типу технологічної системи гідродинамічного штампування. Для дискретизації рідини використаний без сітковий метод SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), а для дискретизації твердих елементів, в тому числі заготовки, використаний сітковий метод скінчених елементів. Імпульсне збурення рідини здійснюється жорстким ударником, що рухається з початковою швидкістю. Модель призначена для дослідження та оптимізації механічних процесів в технологічних системах гідродинамічного штампування.

Ключові слова: імпульсне штампування, деформування оболонок, рідина, комп'ютерне моделювання.

MIXED MODEL OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM HYDRO-DYNAMIC STAMPING

A.G. Narizhni

The mixed computing model of the mixed mechanical system with pulsed indignation of the type of the technological system hydro- dynamic stampings is presented. For sampling the liquids is used meshless method SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), for sampling hard elements, including deformed stocking, traditional finite element method is used . The pulsed indignation to liquids is produced by hard firing pin, moving liberally with initial velocity. Model is intended for study and optimization of the mechanical processes in technologic system of the hydro- dynamic stamping.

Key words: pulse stamping, shell deformation, liquid, computer simulation.

Нарижный Александр Георгиевич – канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической механики и машиноведения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: narizniyag@ukr.net.