

**А.Г. Нарыжный**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт», Украина*

## **ФАКТОРЫ И ЭТАПЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТОЧНОСТЬ ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Статья посвящена анализу процесса формообразования тонкостенной замкнутой осесимметричной детали с помощью импульсной ударной штамповки. Основные результаты получены с помощью численного компьютерного моделирования по методу Уилкинса процесса совместного деформирования толстостенной стальной матрицы и оболочки вращения с использованием ограниченной версии пакета LS-DYNA. Адекватность компьютерной модели и точность решения задач изучены ранее. Описаны три основных этапа формообразования и соответствующие факторы, определяющие точность детали. Важной особенностью процесса является наличие подвижного локального очага пластического деформирования, обусловленного ударом заготовки о жесткую матрицу. Материал в пластическом очаге чувствителен к воздействиям, что можно использовать для управления процессом формообразования детали. Отмечается неизбежность неточности изготовления детали.

**импульсная штамповка, точность детали, моделирование, удар, остаточные деформации**

С начала внедрения в середине прошлого века методов импульсной штамповки в промышленное производство точность деталей, изготавливаемых этими методами, остается проблемным вопросом. Остаются неразвитыми теоретические представления о формообразовании деталей, в особенности, в результате удара заготовки по матрице. Существующие представления имеют, в основном, эмпирический ограниченный характер. Обеспечение точности детали достигается, по преимуществу, с помощью технологических экспериментов на этапе отладки техпроцесса.

Формообразование при импульсной штамповке отличается быстротекущим характером, высокая интенсивность, а также взаимосвязанность процессов деформирования и ударного взаимодействия элементов технологической системы. Окончательная форма, размеры и, следовательно, точность детали устанавливается путем поэтапного накопления остаточных дефор-

маций, вызванных разнообразными факторами, сменяющимися и обуславливающими друг друга в динамических процессах.

Статья посвящена анализу процесса формообразования детали при импульсной ударной штамповке, выделению основных этапов, их закономерной последовательности, а также внешних и внутренних факторов, придающих специфическую окраску этим этапам, и определяющим в конце концов окончательную форму и точность детали. Под точностью понимается степень соответствия размеров детали размерам штамповой поверхности матрицы.

Основные результаты получены с помощью численного компьютерного моделирования по методу Уилкинса процесса совместного деформирования толстостенной стальной матрицы и тонкостенной трубчатой заготовки с использованием ограниченной версии пакета LS DYNA [1].

Рассмотрена модель технологической системы импульсной гидродинамической штамповки замкнутых осесимметричных деталей (рис.1). Радиус контактной поверхности  $R_2$  и высота заготовки  $H$  равны 70 и 80 мм, соответственно. Толщина оболочки  $\delta$  и величина технологического зазора  $\Delta$  равны 1 мм. Заготовка изготовлена из алюминиевого штампуемого сплава типа АМГ с плотностью  $\rho=2700$  кг/м<sup>3</sup>, модулем упругости  $E=7 \times 10^{10}$  Па, коэффициентом Пуассона  $\nu=0,33$  и предельной кривой вида

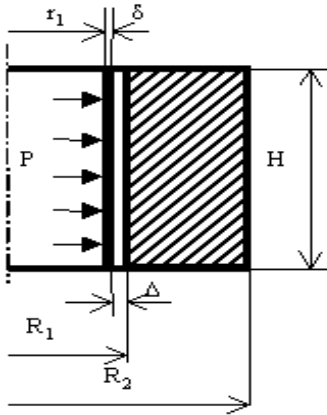


Рис. 1. Схема модели

$$\sigma_i = \begin{cases} E \times \varepsilon, & \sigma_i < \sigma_T; \\ 3 \times 10^8 \times \varepsilon^{0,145}, & \sigma_i \geq \sigma_T, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений,  $\sigma_T = 1,19 \times 10^8$  Па – предел текучести,  $\varepsilon$  – интенсивность деформаций.

Матрица изготовлена из стали типа 40X, обладающей следующими характеристиками:  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;  $E = 1,962 \times 10^{11}$  Па;  $\nu = 0,27$ ;  $\sigma_T = 8,0 \times 10^8$  Па. Предельная кривая имеет вид

$$\sigma_i = \begin{cases} E \times \varepsilon, & \sigma_i < \sigma_T; \\ 1,175 \times 10^9 \times \varepsilon^{0,0702}, & \sigma_i \geq \sigma_T. \end{cases} \quad (2)$$

На внутренней поверхности заготовки действует импульсное давление вида

$$p(t) = \begin{cases} p_0 \times \sin \lambda t, & 0 \leq t \leq \pi/\lambda; \\ 0, & t > \pi/\lambda, \end{cases} \quad (3)$$

где  $p_0 = 1,492 \times 10^8$  Па – расчетная амплитуда давления на внутренней по-

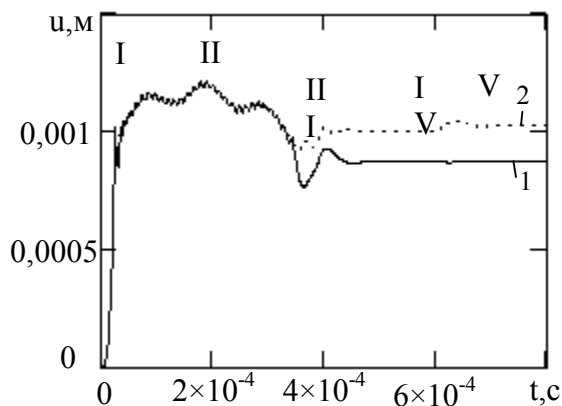


Рис. 2. Перемещения точек заготовки в зависимости от времени

верхности заготовки;

$\lambda = 9,28 \times 10^3$  1/с – постоянная времени.

Адекватность компьютерной модели и точность численных решений изучены ранее [2].

На рис. 2 показана зависимость радиальных перемещений двух точек заготовки от времени. На графике можно выделить пять характерных этапов развития остаточных перемещений.

перемещений.

### I. Свободная раздача в зазоре

Свободная деформирование происходит под действием внешнего да-

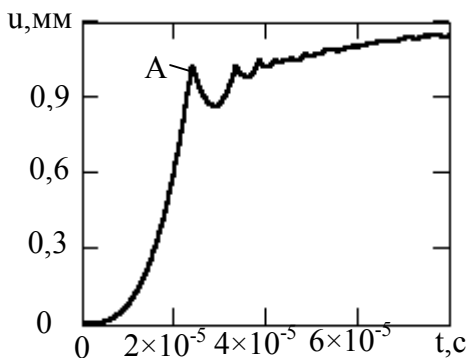


Рис. 3. Начальные перемещения

вления, этап оканчивается первым ударом заготовки по матрице (точка А, рис. 3).

Деформирование заготовки происходит по упруго-пластическому типу из начального естественного состояния.

Особенностью этапа является неоднородность радиальных перемещений и скоростей по длине

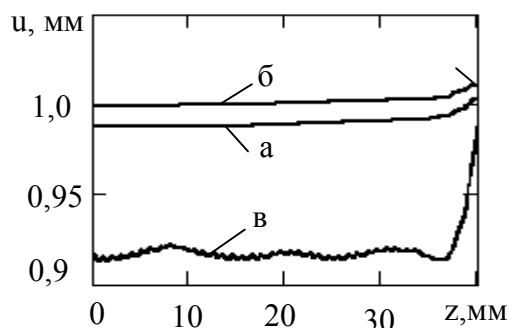


Рис. 4. Распределение перемещений по длине заготовки

в конце первого этапа.

## II. Ударные упруго пластические колебания

На этом этапе происходит формирование размеров детали, следовательно, неточностей и несовершенств формы и размеров.

После первого удара движение заготовки обусловлено действием давления, собственных внутренних сил и реакции матрицы. Заготовка вовлекает в движение матрицу, как видно на рис. 2. Перераспределение энергии является важным фактором снижения амплитуды колебаний на этом этапе. Движение заготовки имеет характер совместных ударных колебаний с матрицей, причем колебания матрицы как более жесткого тела модулируют колебания заготовки.

При ударах возникают поля пластических напряжений и соответствующих деформаций, имеющие волновой характер. Особенность удара как причины пластичности в его кратковременности и малой мощности, в результате чего волны пластических напряжений быстро затухают на протяжении 0,2 мм и дальше распространяются как упругие. Как видно из рис. 5, амплитуда, следовательно, скорость удара, а также контактные ударные напряжения быстро уменьшаются.

Ввиду неодновременности удара из зоны начала соударения распространяются волны продольного изгиба заготовки как показано на рис. 4,

(линии а, б рис. 4; показана симметричная половина графика), в результате чего первый удар заготовки по поверхности матрицы является неодновременным и неоднородным, поскольку контактные напряжения зависят от скорости. Удар и соответствующие контактные напряжения наблюдаются на фоне предварительных неоднородных напряжений заготовки

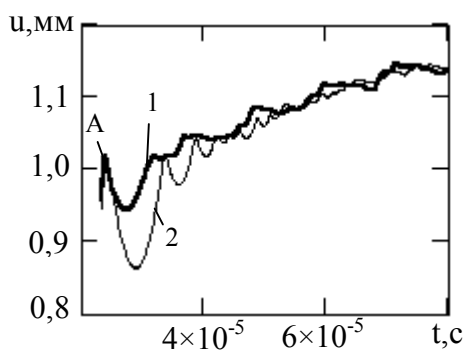


Рис. 5. Перемещение точек матрицы 1 и заготовки 2 после первого удара

встречу друг другу, интерферируют с образованием дефекта в виде корсета в центральном сечении детали.

Множественность соударений, неоднородность и неодновременность соударений заготовки и матрицы приводят к своеобразному хаосу осциллограмм деформаций при экспериментальном исследовании НДС матриц с использованием электротензометрических датчиков. Датчики воспринимают и суммируют волновые деформации, источники которых, удары заготовки по формирующей поверхности матрицы, на втором этапе быстро меняют свое положение и интенсивность.

Неоднородность ударов и интерференция волн различной природы порождает локальные подвижные очаги пластичности. Материал в очаге чувствителен к внешним воздействиям, что дает возможность управления формообразованием детали.

При неоднородных и неодновременных ударах происходит искривление прямых нормалей, что нарушает основную гипотезу теории оболочек.

### III. Затухающие ударные упругие колебания

На этом этапе не происходит изменения остаточных перемещений и напряжений в заготовке.

С уменьшением амплитуды ударных колебаний заготовки контактные напряжения и в целом напряжения снижаются и движения заготовки при-

кривая в. Волны продольного изгиба захватывают всю длину заготовки. В результате пластической диссипации волны изгиба «замерзают», формируя рельеф поверхности, что следует рассматривать как родовой дефект метода.

Волны напряжений интерферируют, усиливая эффект неоднородности остаточных напряжений и деформаций. Волны изгиба, распространяясь с двух концов на-

обретают упругий характер. При этом происходит рассеяние энергии колебаний за счет различных факторов: вязкое рассеяние в материале заготовки и матрицы, трение заготовки и матрицы, акустическое излучение в окружающую среду. Этап заканчивается установлением стационарного состояния системы. Возможны два варианта состояния – с натягом и без натяга. В последнем случае в конце данного этапа деталь принимает окончательную форму.

#### IV. Стационарное состояние детали в матрице

Этот этап соответствует технологической паузе, в течение которой деталь не меняет своего состояния.

#### V. Освобождение детали, образование вторичных деформаций

В случае образования в конце III этапа натяга при освобождении детали из матрицы происходит разгрузка напряжений натяга и деталь изменяет свои размеры и форму за счет вторичных остаточных деформаций, как показано на рис. 6. Кривая 1 соответствует положению детали в матрице, кривая 2 – после освобождения из матрицы.

На рис. 7 показано приращение остаточных деформаций (вторичных пластических деформаций) как функция толщины детали. Наибольшие изменения остаточных деформаций наблюдаются поверхностях детали

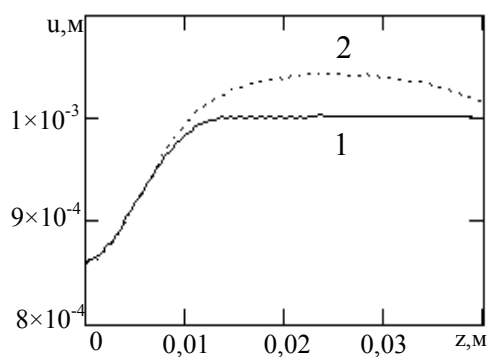


Рис. 6. Вторичные перемещения детали

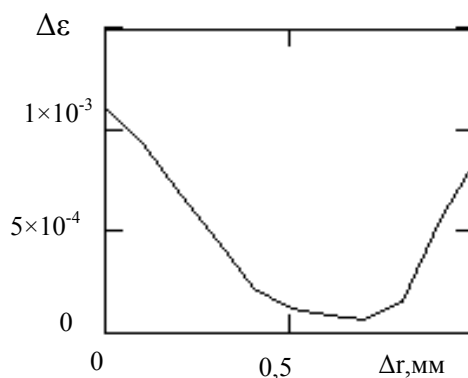


Рис. 7. Приращение остаточных деформаций при освобождении детали

## Выводы

1. Образование формы и размеров (в том числе – неточности изготовления) детали протекает и накапливается на трех этапах за счет внешнего давления, ударного взаимодействия с матрицей и разгрузки напряжений натяга (если таковой существует)

2. Удар, как кратковременный и конечной мощности источник, порождает специфические волны напряжений, которые без поддержки источника и в силу пластической диссипации энергии быстро затухают, откладывая остаточные деформации по преимуществу вблизи поверхности удара.

3. В общем случае деталь не копирует в точности форму поверхности матрицы, дефекты формы неизбежны, речь может идти о минимизации величины дефектов.

4. Нарушение гипотезы о прямых нормалях ограничивает применение моделей оболочек для теоретического исследования задач ударного формообразования.

## Литература

1. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971. – Livermore Software Technology Corporation, 2006. – 2130 p.

2. Нарыжный А.Г. Накопленное окончательное напряженно-деформированное состояние взаимодействующих с ударом тел вращения. Дис...канд. техн. наук: 01.02.04. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 157 с.

*Поступила в редакцию 10.04.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.