

УДК 621.7.044

В.Я. ЗОРИК, В.В. ТРЕТЬЯК, А.Ю. КОМАРОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО НАГРУЖЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Исследуются теоретические предпосылки математического моделирования технологий импульсной штамповки листовых деталей сложной формы для авиационной техники. Представлена информационная и расчетная модель технологической системы изготовления деталей импульсными нагрузками. Предложен метод расчета напряженно-деформированного состояния заготовки при импульсных нагрузках.

импульсная нагрузка, листовая штамповка, численные методы, дифференциальные уравнения, ударная волна, раздача, обжим, формовка

Технологию импульсной штамповки используют для изготовления листовых деталей малой относительной толщиной заготовки и высокой прочностью штампуемого металла, высокой точностью и сложностью форм поверхностей, наличием на них большого количества фрагментов (рельефа, пуклевок и т.д.). Такие детали с минимальным количеством сварных швов, высокой прочности и точности обеспечивают повышение надежности изделий (прежде всего аэрокосмической техники), их ресурса, снижение металлоемкости. Потребность в производстве их (обечаек, кожухов, ресиверов, панелей жесткости, диафрагм, патрубков и т.д.) постоянно возрастает не только для нужд авиационной техники, но и для судостроения, химического и энергетического машиностроения, как в Украине, так и в России, Китае, Индии и т.д., т.к. взрывная штамповка эффективна, прежде всего, при создании новой аэрокосмической техники.

При разработке новых технологических процессов прежде всего анализируют возможность штамповки деталей сложной формы, обусловленную устойчивостью пластического течения и формообразования [1, 2] поверхностей детали, участки которой деформируются при разных напряженных состояниях, а для расчетов используют соответствующие математические модели.

Процедура получения математических моделей для расчета технологических процессов импульсной

штамповки включала в себя следующие операции (рис. 1):

- выбор свойств объекта, которые подлежат отражению в модели. Этот выбор основан на анализе возможных применений модели и определяет степень универсальности математических моделей;
- сбора исходной информации о выбранных свойствах детали, технологических процессов, оснастки и оборудования.

Источниками сведений являлись отработанные технологии, опыт и знания экспертов, работающих в области импульсных технологий, научно-техническая литература, прежде всего справочная, описания прототипов имеющихся моделей для элементов, близких по своим свойствам к исследуемому, результаты экспериментальных измерений параметров реальных деталей;

- синтез структуры математических моделей элементов системы;
- расчет числовых значений параметров детали в прямой постановке;
- оценка точности, адекватности и экономичности.

В зависимости от места в иерархии описаний использовались модели, относящиеся к микро-, макро- и метауровням (рис. 1).

Модели на микроуровне отражают физику импульсных процессов, протекающих в непрерывных пространстве и времени [3].

Типичными представителями на микроуровне являются дифференциальные уравнения в частных производных (ДУЧП). В них независимыми переменными являются пространственные координаты и время. С помощью этих уравнений рассчитываются поля напряжений и деформаций при математическом моделировании методами прогонки.



Рис. 1. Процесс преобразования математических моделей в технологических расчетах

Возможности применения моделей в виде ДУЧП ограничены отдельными деталями, и попытки анализировать с их помощью типовые процессы не применимы из-за чрезмерного роста затрат машинного времени и памяти.

На макроуровне используют укрупненную дискретизацию пространства по функциональному признаку. Это приводит к представлению моделей на этом уровне в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). В этих уравнениях независимой переменной является время, а вектор зависимых переменных V составляют фазовые переменные, характеризующие состояние укрупненных элементов дискретизированного пространства.

Таковыми переменными являются силы и скорости при деформировании заготовки, напряжения и т.д. Системы ОДУ являются универсальными моделями на макроуровне, пригодными для анализа как динамических, так и установившихся состояний объектов.

Поскольку на метауровне в качестве элементов принимают достаточно сложные совокупности де-

талей, метауровень характеризуется большим разнообразием типов используемых моделей, для многих деталей на метауровне по-прежнему представляются системами ОДУ. Однако в ряде задач удается использовать специфические особенности постановки задачи для их упрощения. В результате математические модели заменяются системой логических

уравнений. Такие логические модели существенно экономичнее предшествующих. При решении обратной задачи для таких моделей используется классификационная обработка данных, и применяются алгоритмы распознавания образов, в частности структурно-аналитические модели.

Таким образом, в программах автоматизированного анализа, используемых в САПР, получение математических моделей обеспечивается реализацией математических моделей элементов и методов формирования системы.

После разработки математических моделей формируются математические знания с помощью входных и выходных переменных. Для обеспечения функционирования проектирующей системы строится метасистема в виде базы знаний производственного типа. При сжатии – растяжении участков заготовки, контактирующих с рабочей поверхностью штампа, потерю формы устраняют их прижатием (например, как фланца при вытяжке) соответствующим усилием [4], а потерю пластического течения – за счет снижения усилий растягивающих участок.

Авторами предложен численный метод решения задачи деформирования заготовки взрывом при упрощающих допущениях, базирующихся на установленных закономерностях процесса деформирования и передачи энергии от ударной волны к подвижной преграде (заготовке). Для реализации численных методов разрабатывались: математическая модель деформирования заготовок, алгоритмы численных методов решения, модель внешней нагрузки, учитывающая взаимодействие заготовки с возмущениями в жидкости от взрыва и возникновение кавитации, а также ее влияние на передачу энергии заготовке.

Модель деформирования заготовки представлена системой уравнений: движения, связи напряжений и деформаций, пластичности (условием Губера-Мизеса).

Дифференциальные уравнения движения аппроксимированы конечно-разностными уравнениями для выделенных элементов заготовки (рис. 2).

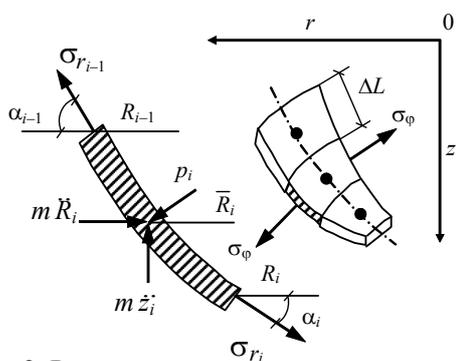


Рис. 2. Расчетная модель элементов заготовки

У деталей, штампуемых взрывом, генеральная форма, на которой предусматривают для ужесточе-

ния их конструкции различные фрагменты (рельеф, рифты, пуклевки и т.д.) представлена оболочкой. Поэтому изгибающие моменты и перерезывающие силы можно не учитывать. На элементы свободной зоны заготовки действует (рис. 2, 3) импульсное давление P , инерционные силы $m\ddot{z}$, $m\ddot{R}$, меридиональные и широтные усилия, обусловленные взаимодействием с соседними участками. Уравнения движения для таких элементов имеют вид

$$\begin{aligned} &(\sigma_r RS \cos \alpha)_i - (\sigma_r RS \cos \alpha)_{i-1} + (P \Delta L R_y \cos \alpha_y)_i = (m \cdot \ddot{Z}_y)_i; \\ &(\sigma_r RS \sin \alpha)_{i-1} - (\sigma_r RS \sin \alpha)_i - \\ & - (\sigma_\phi SR \Delta L)_i + (P \Delta L R_y \sin \alpha_y)_i = (m \cdot \ddot{R}_y)_i, \end{aligned}$$

где $m_i = \rho \Delta L_0 R_{0i} S_0$ – масса i -го элемента.

Для элементов в зоне контакта в уравнениях учитывают силы трения, а для элементов на перетяжном ребре – усилия, необходимые для их изгиба – спрямления и на преодоление сил трения на ребре.

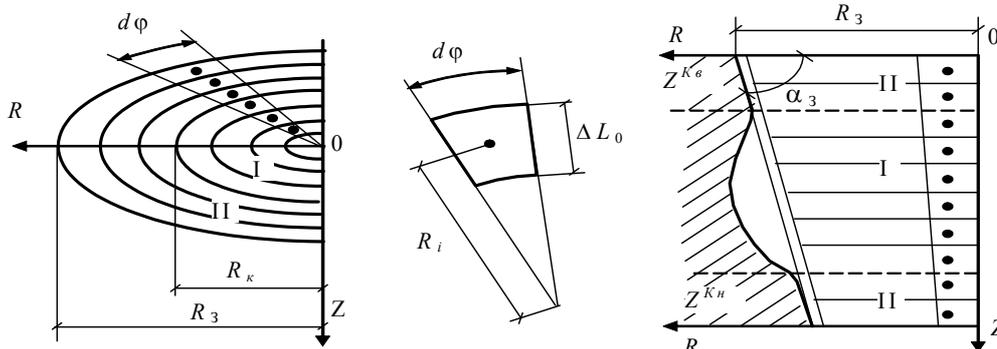


Рис. 3. Полная расчетная модель заготовки

Величину усилий на ребре в листовой штамповке определяют по известным [5] зависимостям:

$$\sigma_{uz2} = (\sigma_i)_{\bar{R}} S_0 \cdot (2r_m + S)^{-1}; \quad \sigma_{mp.k} \approx (\sigma_i)_{\bar{R}} \cdot \mu \alpha,$$

При вытяжке кромка фланца плоской заготовки утолщается, поэтому силы трения приложены только к крайнему элементу со стороны свободной поверхности

$$N_{mp} = q\mu(R_3^2 - R_o^2),$$

где q – давление прижима; μ – коэффициент трения; R_3, R_o – радиусы заготовки и очка матрицы.

Уравнения движения для элементов конической заготовки на поверхности контакта представлены так:

$$\begin{aligned} &[(\sigma_r RS)_{i+1} - (\sigma_r RS)_i] \cos \alpha_3 + \\ & + \sigma_{\phi i} \Delta h_i S_i - F_{mp} \cdot \cos \alpha_3 = m_i \ddot{R}_i; \end{aligned}$$

$$[(\sigma_r RS)_{i+1} - (\sigma_r RS)_i] \sin \alpha_3 - F_{mp} \cdot \sin \alpha_3 = m_i \ddot{Z}_i.$$

Благодаря возможному осевому перемещению торцев заготовки к середине образующей элементы большего (верхнего) основания будут обжиматься ($\sigma_\phi < 0$), а на нижнем – раздаваться ($\sigma_\phi > 0$).

Сила трения обусловлена величиной реакции Q со стороны матрицы

$$F_{mp_i} = \mu \cdot Q = \mu(P \cdot R + \sigma_\phi \cdot S)_i \Delta L_i.$$

Трудности определения внешней нагрузки на заготовку обусловлены сложностью явлений, проте-

кающих при взаимодействии возмущений в жидкости от взрыва в ней заряда на подвижную преграду.

Поэтому при разработке методик определения режимов обработки для листовой штамповки использовали значения параметров возмущений, установленные для безграничной жидкости [4]. Так для калибровочных операций в расчетах использовали величину амплитудного давления P_m .

Для процессов формообразования ставали в соответствие удельную энергию ударной волны $E_o = P_m^2 \theta / \rho_o c_o$ работе, требуемой для деформирования, определяемой по аналитическим зависимостям. В методиках расчета, базирующихся на определении деформированного состояния детали аналитическими методами, использовали [5] импульсные характеристики возмущений $I = \int P(t) dt$, время действия нагрузки принимали как для безграничной среды ($t \approx 6\theta$). Таким образом, внешняя нагрузка на заготовку представлена рядом последовательных импульсов (рис. 4) ударной волны и гидротока, установленных с учетом подвижности заготовки.

Благодаря постоянному схлопыванию мелких кавитационных пузырьков реализуется осредненное давление на этапе, т.е. $\bar{P}_c = I_i (t_c + \Delta t_c)^{-1}$. Такое представление нагрузки используют для случаев предельного формообразования.

Алгоритм решения задачи импульсного деформирования заготовки:

– заготовку разделяют на элементы длиной $\Delta L = (5 \dots 8)S$ и рассчитывают их массу m_i ;

– определяют внешнюю нагрузку на каждый элемент: до наступления кавитации через промежуток $t_i = \Sigma(\Delta t_i + t_i)$ в интервале Δt_i по значениям R_i , Z_i , ΔZ_i определяют логарифмические деформации e_r , e_ϕ и интенсивность e_i ;

– интенсивность напряжений σ_i определяют по закону упрочнения $\sigma_i = A e_i^n$, а также рассчитывают компоненты напряжений.

Трудности определения внешней нагрузки на заготовку обусловлены сложностью явлений, протекающих при взаимодействии возмущений в жидкости от взрыва в ней заряда на подвижную преграду.

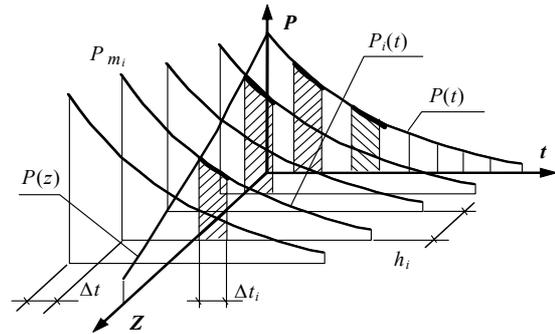


Рис. 4. Параметры нагрузки с учетом кавитационных явлений

Экспериментальные исследования процесса взаимодействия заготовки с ударной волной, практика взрывной штамповки [5] показала, что при штамповке тонколистовых заготовок образование и схлопывание кавитационных пузырьков ($r < 10^{-3}$ м) происходит не одновременно, их зона распространяется от заготовки вглубь жидкости. При этом заготовкой воспринимается основная часть энергии ударной волны, доля безвозвратных потерь из-за отраженных волн составляет 5–8%, длительность процесса нагружения заготовки существенно больше (на порядок – два), чем время спада давления ударной волны в безграничной жидкости.

Литература

1. Головлев В.Д. Расчеты процессов листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
2. Баркая В.Ф., Рокотян Е.С., Рузанов Ф.И. Формоизменение листового металла. – М.: Металлургия, 1976. – 262 с.
3. Норенков И.П. САПР. Принципы построения и структура. – Минск: Высшая школа, 1987. – 122 с.
4. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: Иностранная литература, 1950. – 483 с.
5. Борисевич В.К. Расчет величины заряда при штамповке бризантными взрывчатыми веществами в воде. Беспрессовые методы формообразования листового металла. – М.: МДНТП, 1962. – 23 с.

Поступила в редакцию 25.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.