
УДК 621.7.044+539.373

В.К. Борисевич, А.Г. Нарыжный, С.И. Молодых

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

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕДАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ТОЧНОСТЬ ДЕТАЛИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ

Статья посвящена анализу влияния передающей среды на процесс деформирования и образования окончательных размеров, а также на качество и образование дефектов тонкостенной детали при импульсной ударной штамповке. Слой передающей среды моделируется как распределенная присоединенная к деформирующейся заготовке масса, в которой отсутствует собственное НДС. Результаты получены с помощью численного компьютерного моделирования по методу Уилкинса процесса деформирования осесимметричной упругопластической пластины с присоединенными массами при ударе о жесткую матрицу. Для моделирования использована ограниченная версия пакета LS-DYNA. Варьируется величина давления на заготовку и толщина слоя передающей среды. Раскрыт механизм, основные этапы и факторы деформирования заготовки и образования детали, в том числе дефектов типа недоштамповки и пучности.

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

Выбор и обоснование оптимальных технологических параметров, обеспечивающих качество и точность детали – нерешенная до конца задача проектирования техпроцессов импульсной штамповки. Системной основой разработки рекомендаций по проектированию техпроцессов штамповки является исследование закономерностей и особенностей деформирования заготовки в специфических условиях при действии различных факторов [1, 2]. При традиционной штамповке деформирование заготовки определяется двусторонним ограничивающим действием жесткой штамповой оснастки, что делает исследование кинетики образования детали почти чисто геометрической задачей. При импульсной штамповке заготовка испытывает со стороны оснастки лишь одностороннее действие, что оставляет свободу ее деформирования в сторону от оснастки. При таком спосо-

бе управления деформированием большее значение имеют учет свойств материала заготовки и законы деформирования [3]. Очевидно, возможны два рода дефектов формы детали:

1) непроштаповка, когда заготовка не входит в контакт с формующей поверхностью оснастки;

2) значительный рефлекс, когда заготовка в результате удара по формующей поверхности матрицы получает значительный импульс и отделяется от нее после удара (рис. 1).

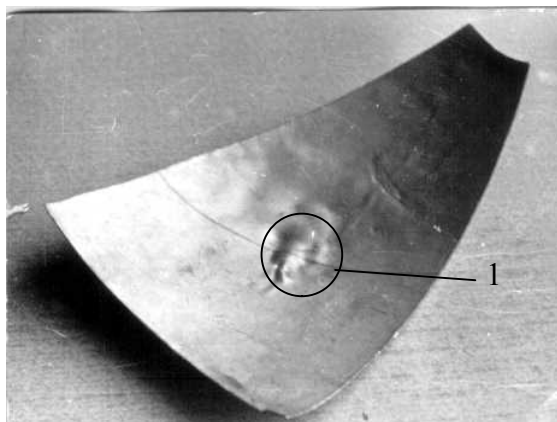


Рис. 1. Сегмент сферического днища с дефектом в виде пучности (1)

влияние передающей среды на деформирование, окончательную форму и точность детали.

При исследовании кинетики образования детали оказывается, что внешние факторы, параметры и условия часто вызывают деформации не непосредственно и тотчас, а в превращенном и опосредованном динамическими процессами виде. Окончательные размеры и форма детали есть накопленный результат остаточных деформаций заготовки, образующихся на разных этапах, чередующихся друг с другом, под действием различных внутренних факторов. Процесс формирования окончательных размеров детали качественно и пространственно неоднороден и протекает во времени с различной интенсивностью [3]. Поэтому важно проводить исследование процесса деформирования заготовки в его реальной сложной пространственно-временной структуре, с учетом смены характерных этапов и

С практической точки зрения необходим поиск факторов и параметров, препятствующих дефекту второго рода. При использовании жидкой или эластичной передающей среды, очевидно, при обращении движения заготовки вследствие удара, среда будет оказывать инерционное сопротивление такому движению. Целесообразно изучить

факторов, механизмов образования деформаций, различной интенсивности и их взаимной обусловленности.

Статья посвящена теоретическому анализу процесса ударного деформирования заготовки с учетом влияния передающей среды. Предполагается, что собственным напряженно-деформированным состоянием (НДС) передающей среды можно пренебречь, ее влияние на НДС заготовки сказывается во время ускоренного обратного движения заготовки в результате удара о матрицу, то есть основное значение играет свойство инерции некоторого слоя среды. В связи с этим среда рассматривается как распределенная присоединенная масса, величина которой определяется толщиной слоя.

1. Объект и метод исследования

Рассмотрена осесимметричная технологическая система гидродинамической штамповки метанием в матрицу (позиция 3, рис. 2) заготовки в виде круглой пластины (позиция 2). Заготовка выполнена из алюминиевого сплава типа АМГ с характеристиками- модуль упругости второго рода $G = 2,6 \times 10^{10}$ Па, модуль объемного сжатия $M = 6,9 \times 10^{10}$ Па, предел текучести $\sigma_T = 1,6 \times 10^8$ Па, модуль линейного деформационного упрочнения $\eta = 2,4 \times 10^7$ Па, плотность $\gamma = 2700$ кг/м³. Размеры заготовки- начальный радиус $R = 136$ мм, толщина $\Delta = 4$ мм. Матрица считается недеформируемой, ее глубина $H = 45$ мм. Присоединенные массы соответствуют цилиндрическому слою (позиция 1), для определенности, воды толщиной h и радиальным размером $r = 101,5$ мм. Давление на поверхность заготовки определяется в предположении взрыва точечного заряда по формуле

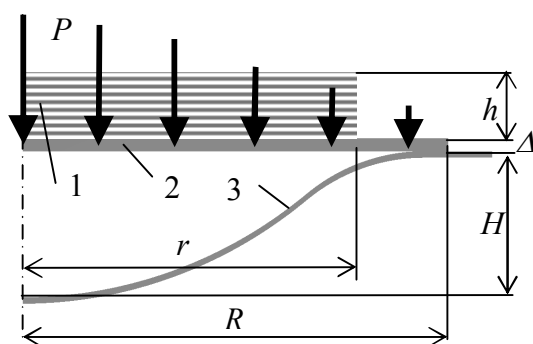


Рис. 2. Технологическая система

для определенности, воды толщиной h и радиальным размером $r = 101,5$ мм. Давление на поверхность заготовки определяется в предположении взрыва точечного заряда по формуле

$$P = K p_0 \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \cos\left(\frac{\pi \rho}{R}\right), \quad (1)$$

где K – варьируемый множитель; $p_0 = 1,123 \times 10^9$ Па – расчетная ам-

плитуда давления; t – время; θ – характеристическое время; ρ – радиальная координата точки приложения давления ($0 \leq \rho \leq R$).

Соответствующая нелинейная осесимметричная нестационарная ударно-контактная задача упруго-пластичности с большими перемещениями решается с помощью ограниченного пакета LS-DYNA версия 971 [4] явным конечно-разностным методом Уилкинса. Рассмотрены 3 варианта технологических систем с различными толщинами слоя передающей среды (0, 10 мм и 100 мм, соответственно, варианты 1, 2 и 3). Для каждого варианта варьируется амплитуда давления с целью поиска сочетания параметров модели, минимизирующих величину отклонения размеров детали от размеров штамповой поверхности матрицы.

Для дискретизации заготовки использовано 1900 четырехугольных ячеек и 2101 узел, в 132 из них заданы присоединенные массы. При дискретизации не использовалось предположение о прямых нормалях, которое неприменимо при анализе ударных процессов пластического деформирования [3].

Для решения использован компьютер с процессором Athlon 64 3000+ с частотой 1,8 ГГц. Потребный объем оперативной памяти 287770 Б, шаг дискретизации по времени из соображений устойчивости процесса решения равен $5,14 \times 10^{-8}$ с. Длительность процесса 0,001 с, длительность решения задачи на компьютере 29 с.

2. Результаты и обсуждение

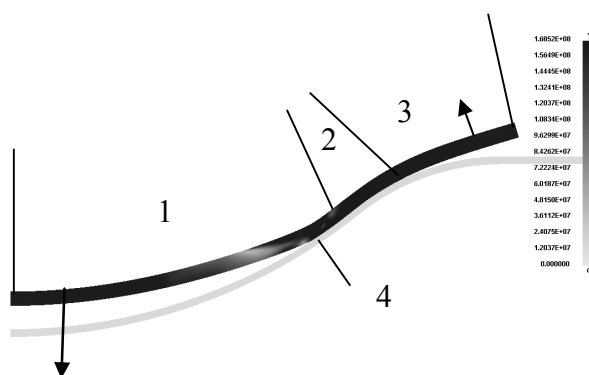


Рис. 3 Характерные зоны деформируемой заготовки

На рис. 3 показана картина распределения интенсивности напряжений в заготовке, штампуемой без участия передающей среды, в момент времени 0,00027 с. Плотность тона соответствует величине интенсивности

напряжений, максимальное значение которой равно $1,617 \times 10^8$ Па. Стрелками показано преимущественное направление движения точек заготовки. Зона 1 соответствует свободному безударному деформированию заготовки под действием давления. Зона 2 соответствует прилеганию заготовки к поверхности матрицы. На границе зон 1 и 2 наблюдается локальный очаг пластичности 4, движущийся справа налево и сверху вниз. Зона 3 соответствует отрыву заготовки от поверхности матрицы. Очаг пластичности, представляющий собой концентрическую тороидальную зону, соответствует волне изгиба, возникающей при ударе заготовки по матрице. Перемещаясь от периферии пластины к центру, очаг пластичности принимает в момент удара центральной части форму сплошной области с повышенным значением интенсивности напряжений, равным $1,634 \times 10^8$ Па. При ударе о матрицу материал в очаге пластичности получает импульс и начинает обратное движение. В силу конечности (по энергии и времени действия) удара как источника пластичности в результате пластической диссипации энергии происходит скорый переход к упругому характеру движения заготовки и завершается накопление остаточных деформаций. После рассеяния энергии упругих движений заготовка замирает, принимая окончательную форму и размеры детали.

На рис. 4 и 5 показана система в конце процесса моделирования, когда деталь приобретает окончательную форму. Плотность серого тона пропорциональна величине накопленных остаточных пластических деформаций (см. шкалу справа от рисунка), максимальные значения которых наблюдаются на оси симметрии и указаны ниже для вариантов.

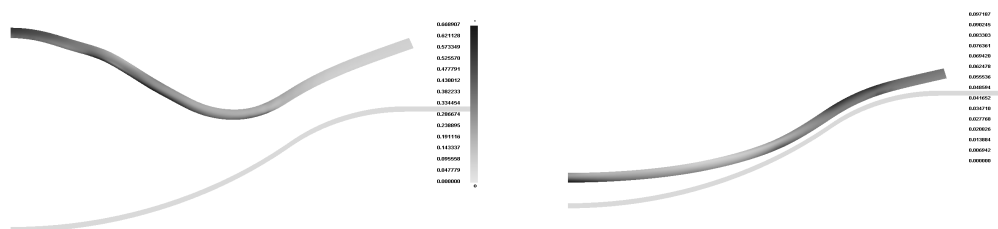


Рис. 4. Вид детали с дефектом в виде пучности (слева) и недоштамповки (справа)

На рис. 4 слева показана форма детали, полученная без учета передающей среды ($K = 0,2$; максимальная накопленная пластическая деформация $\varepsilon_{eff}^p = 66,8\%$). В результате значительного рефлекса в центре образовался дефект в виде пучности. На этом же рисунке справа показана деталь,

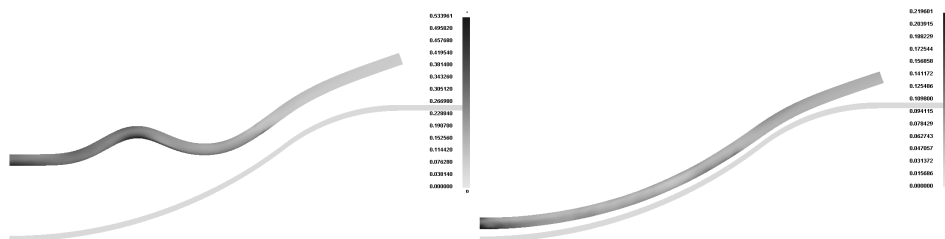


Рис. 5. Окончательная форма и распределение остаточных деформаций при неблагоприятном (слева) и оптимальном (справа) сочетании давления и толщины слоя среды (вариант 3)

полученная с учетом слоя передающей среды толщиной 100 мм при недостаточной величине импульса давления ($K = 0,09$; $\varepsilon_{eff}^p = 9,7\%$). В результате средняя часть заготовки непроштампована.

На рис. 5 слева показана форма детали, полученной с учетом слоя среды толщиной 100 мм. Дефект пучности под действием передающей среды принимает более сложную волнообразную форму ($K = 0,2$; $\varepsilon_{eff}^p = 53,4\%$). На том же рисунке справа показана деталь, полученная с учетом оптимальной величины импульса в процессе обратного движения ($K = 0,1$; $\varepsilon_{eff}^p = 22,0\%$). Видно, что деталь расположена эквидистантно поверхности матрицы, дефекты пучности или непроштамповки отсутствуют. В варианте отсутствия передающей среды удовлетворительная форма детали наблюдается при значении параметра давления $K = 0,087$, малый слой (10 мм) требует оптимального значения $K = 0,088$, а большой слой (100 мм) требует наибольшего же значения параметра $K = 0,1$. При меньших, чем оптимальное значение параметра K , во всех вариантах наблюдается дефект типа непроштамповки. При бóльших, чем оптимальное значение K , наблюдается дефект типа пучности. Подчеркнем, что одни и те же параметры давления в одном варианте являются оптимальными, в другом – избыточными, в третьем – недостаточными.

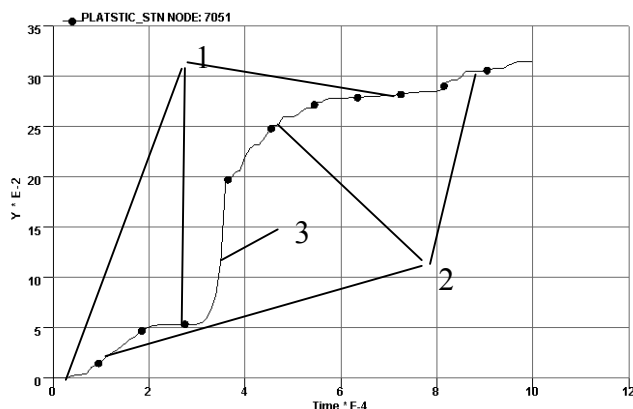


Рис. 6. Накопление остаточных деформаций в куполе детали

Максимальные накопленные остаточные деформации наблюдаются в куполе детали со стороны матрицы; их величины падают с ростом толщины слоя передающей среды — 31%, 25,8% и 22% для вариантов 1, 2 и 3, соответственно. Характер накопления остаточных деформаций показан на рис. 6 для варианта 1 с оптимальным нагружением. Помечены характерные этапы изменения деформаций — паузы, соответствующие упругому деформированию материала (1), плавное увеличение, вызванное пластическим изгибом (2), скачок, вызванный ударом (3). Наблюдается три этапа деформации, вызванной изгибом, и единственный этап деформации, вызванной ударом. Полное изменение в равной степени обусловлено изгибом и ударом. Удару предшествовало упругое деформирование материала в куполе детали, вообще говоря, этапы пластического деформирования перемежаются с этапами упругого деформирования. Пластический изгиб и паузы, по-видимому, обусловлены изгибными колебаниями оболочки.

На рис. 7 показана зависимость скорости центральной точки заготовки

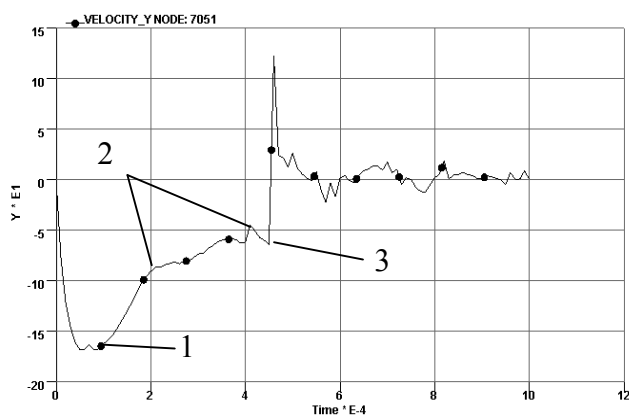


Рис. 7. Зависимость скорости движения заготовки

от времени при толщине слоя 100 мм и оптимальном сочетании параметров (обозначены: 1 — максимальная скорость, 2 — зона медленного роста скорости, 3 — момент удара о матрицу). Удовлетворительная форма детали не зависит от толщины слоя

от времени при толщине слоя 100 мм и оптимальном сочетании параметров (обозначены: 1 — максимальная скорость, 2 — зона медленного роста скорости, 3 — момент удара о матрицу). Удовлетворительная форма детали не зависит от толщины слоя

среды и достигается при замедлении скорости по достижении ею значения 70-80 м/с, более высокие скорости удара вызывают значительный рефлекс материала заготовки, находящегося в очаге пластичности, и дефект пучности. Уменьшение слоя передающей среды изменяет характер зависимости скорости перед ударом: наблюдается сокращение зоны 2, что, по-видимому, связано с колебаниями оболочки.

К моменту удара заготовки по матрице давление падает до нуля, поэтому оно не оказывает препятствия выпучиванию детали.

Выводы

Использование передающей среды не позволяет в общем случае избежать дефекты типа пучности или непроштамповки, однако существует возможность оптимального выбора эффективной толщины слоя среды при заданной функции давления, которая обеспечивает минимизацию дефектов, позволяет повысить точность и качество детали. Целесообразно исследовать влияние иных, чем инерционное демпфирование, видов действия на заготовку со стороны передающей среды, например, вязкое сопротивление и действие конвективного массопотока.

Значение параметров (амплитуда давления и толщина слоя), гарантирующие удовлетворительную форму детали, лежат между значениями этих параметров, обуславливающих дефекты первого и второго рода.

Механизм деформирования заготовки и образования дефектов детали основан на сочетании динамического изгиба и удара по поверхности матрицы. Образующиеся в условиях неоднородного и неодновременного удара волны упруго-пластического изгиба интерферируют с образованием очага пластичности и одновременным рефлексом от удара о матрицу. Материал в очаге пластичности находится в состоянии, близком к всестороннему сжатию, и при этом весьма чувствителен к внешним воздействиям, поэтому рефлекс может приводить к большим перемещениям материала заготовки, которые из-за пластической диссипации «замерзают», искажая проектную форму детали. В рассмотренном в статье случае образующаяся единственная сходящаяся к оси волна интерферирует сама с собой. При штамповке осесимметричных замкнутых обечаек образуются и интерфе-

рируют две волны, сходящиеся к плоскости симметрии системы [3]. В случае, показанном на рис. 1, интерферируют три волны изгиба: две волны, распространяющиеся поперек длинных ребер и третья волна от ближнего ребра заготовки.

Образование окончательной формы детали происходит в форме накопления остаточных деформаций в несколько этапов. На одних этапах преобладает фактор динамического изгиба, на других – влияние удара. Этапы, на которых происходит приращение остаточных деформаций перемежаются этапами упругого деформирования заготовки. В целом поле деформаций сильно неоднородно.

Удовлетворительная форма детали связана с особым характером изменения скорости движения- снижением ее величины до 70-80 м/с после достижения максимальной величины 170-200 м/с.

Литература

1. Борисевич В.К. Разработка научных основ оптимального проектирования технологических процессов листовой штамповки взрывом летательных аппаратов и двигателей. – Дис... докт. техн. наук. – Х., 1979. – 409 с.
2. Научные основы математического моделирования и экспериментальных исследований для новых импульсных технологий создания аэрокосмических изделий: Отчет о НИР / Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского (ХАИ). – №ГР0103U004037. – Х., 2005.
3. Нарыжный А.Г. Накопленное окончательное напряженно-деформированное состояние взаимодействующих с ударом тел вращения. – Дис... канд. техн. наук: 01.02.04. – Х., 2006. – 157 с.
4. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971. – Livermore Software Technology Corporation, 2006. – 2130 p.

Поступила в редакцию 12.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.