

УДК 621.7.044

В.В. ТРЕТЬЯК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗОК С УЧЕТОМ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

В статье освещена концепция, принципы и алгоритмы проектирования импульсных технологических процессов с учетом кавитационных явлений. Также представлены разработанные информационные модели технологической системы изготовления деталей и ее объектов: технологической модели самой детали, модели технологического процесса и модели штампов. Приведены результаты математического моделирования динамического поведения листовой заготовки при разных характерах импульсного нагружения с учетом кавитационных явлений. Результаты расчетов адаптированы для разработки систем автоматизированного технологического проектирования импульсных процессов. Система базируется на фундаментальных исследованиях пластического течения металла, его основных закономерностях, положениях общей теории систем, а также на результатах практики штамповки, опыта и логики технологов при принятии решений в производственных условиях.

Ключевые слова: импульсная штамповка листовых деталей, деформационная модель, кавитационные явления, динамическое поведение заготовки.

Введение

Известно что импульсные методы обработки материалов, в частности метод штамповки взрывом, обладают высокой энергоемкостью, поэтому их можно использовать для обработки деталей больших габаритов и высокопрочных материалов с высокой точностью. Для метода взрывной штамповки в основном используются бризантные взрывчатые веществ (ВВ) и газовые смеси. Импульсные методы штамповки чаще всего применяются для получения осесимметричных деталей из листовых и полых заготовок.

Использование импульсных методов обработки материалов давлением для листовой штамповки объясняется преимуществами этих методов перед обычной прессовой штамповкой – отсутствием громоздкого дорогостоящего оборудования; создания высоких давлений, позволяющих обрабатывать труднодеформируемые материалы, повышение точности изготовления деталей из-за уменьшения пружинения; возможность получения деталей сложных форм за один переход) улучшение качества поверхности штампуемых деталей, значительное упрощение и удешевление оснастки за счет использования только одной части штампа (матрицы или пуансона), а, следовательно, сокращение сроков подготовки производства. Помимо общих достоинств импульсные методы штамповки имеют свои, только им присущие достоинства и недостатки, совместную оценку которых необходимо проводить при назначении метода и оборудования конкретных

процессов листовой штамповки. Таким образом, для правильного выбора процесса и оборудования для импульсной штамповки следует рассмотреть характерные особенности наиболее распространенных импульсных методов.

Энергетические особенности штамповки взрывом БВВ

При взрыве заряда ВВ в воде (наиболее распространенной передающей среде) происходят достаточно сложные явления, в том числе и явление кавитации.

Газы, образующиеся в результате детонации заряда, сжимают прилегающий слой воды до давления порядка 100 тыс. атм. и выше. Образовавшая зона сжатия с большой скоростью перемещается в направлении от источника взрыва. Скорость распространения этой зоны вблизи заряда составляет несколько тысяч метров в секунду. По мере удаления от источника взрыва давление падает, а скорость ее распространения стремится к скорости звука в среде (для воды - 1600 м/с).

Вслед за образованием и распространением в воде этой сжатой зоны (равно ударной волны) очень расширяются сжатые в первый момент продукты детонации.

Давление внутри газов падает, однако вследствие инерции расходящегося потока воды расширение газов продолжается и после того, как давление внутри этих газов сравняется с гидростатическим.

В какой-то момент расширение прекращается, после чего газы начинают сжиматься до давления, превышающего гидростатическое.

При значительной глубине погружения заряда пульсации газов могут повториться. Максимальное давление в первой пульсации не превышает 10-20% давления на фронте ударной волны. Однако продолжительность действия значительно превышает продолжительность действия ударной волны.

Эту кинетическую энергию используют для совершения каких-то полезных технологических процессов, в частности для операций листовой штамповки.

Механизм передачи энергии с учетом кавитационных явлений

Механизм передачи энергии заготовке будет зависеть от расстояния между зарядом и заготовкой. При близких расстояниях (менее 10 радиусов заряда) энергия передается ударной волной, гидропоток и расширяющимся газовым пузырем, при средних (до 60 радиусов) - ударной волной и гидропоток, при длинных (свыше 60 радиусов) - только ударной волной. В целом энергию, выделенную зарядом в воде, можно условно разделить на приблизительно равные части: 50 % энергии уносит с собой ударная волна, а 50% остается в газовом пузыре. Достигнув заготовки, ударная волна частично отразится от нее и частично израсходуется на пластическую деформацию.

Чем менее податлива заготовка, тем больше энергии отразится обратно в воду. Газовый пузырь расширяясь, раздвигает воду, создавая радиально направленный поток. Если на пути этого потока разместить заготовку, то можно совершить полезную работу. Податливость заготовки способствует камулированию энергии в нужном направлении.

Если заготовка податлива, то, получив ускоренное движение, она может оторваться от воды и могут образоваться условия для кавитации. В этом случае гидропоток снова достигнет заготовку и сообщит ей дополнительный импульс.

Одна из основных характеристик ударной волны, определяющей ее механическое действие на заготовку, давление. Изменение давления в каждой точке жидкой среде после подхода к ней фронта ударной волны определяется уравнением (1).

$$P(t) = P_m \cdot e^{-t/\theta}, \quad (1)$$

где P_m – максимальное давление на фронте ударной волны; e – основание натуральных логарифмов; θ – время, течение которого давления падает в e раз.

Если заготовка неподвижна, то давление в отраженной волне $P_{отр}$ будет равно давлению прямой волны. Если заготовка перемещается, то на $P_{отр}$ бу-

дет накладываться составляющая, пропорциональная скорости перемещения пластины. Тогда давление в отраженной волне

$$P_{отр} = P_{пр} - \rho_o c_o h,$$

где ρ_o , c_o – акустическое сопротивление жидкости; h – скорость перемещения заготовки.

Результирующее давление на заготовке

$$P_{рез} = P_{пр} + P_{отр} = 2 \cdot P_{пр} - \rho_o c_o h.$$

Используя выражение (1), записываем уравнение движения заготовки

$$mh + \rho_o c_o h = 2 \cdot P_m e^{-t/\theta},$$

где m – удельная масса заготовки.

Взаимодействие ударной волны и гидропотока с листовой заготовкой рассматривается в случае, когда расстояние от центра разряда до заготовки будет приблизительно равно радиусу заготовки, а радиус заряда составляет 0.1 радиуса заготовки (рис. 1). При взрыве заряда 1 по воде начинает распространяться ударная волна, движение фронта которой изображено кривой 2. Одновременно расширяется газовый пузырь, граница которого обозначена кривой 3.

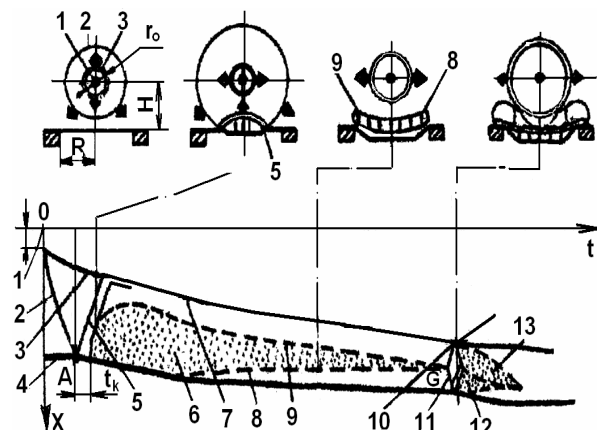


Рис. 1. Схема развития кавитационных явлений вблизи заготовки

Под действием давления ударной волны начинается движение заготовки 4, при этом внутри жидкости распространяется отраженная волна сжатия 5 в результате смещения заготовки, давление в которой быстро падает.

В окрестности заготовки образуется область кавитирующей жидкости 6 частицы в которой продолжают двигаться вслед за заготовкой. В момент образования кавитации t_k прямое воздействие ударной волны на заготовку прекращается.

Энергия ударной волны 2 преобразуется в энергию отраженной волны 5, кинетическую энергию заготовки и кинетическую энергию потока которая может быть значительной.

При выходе волны сжатия 5 на границу пузыря продуктов взрыва 3, возможно возникновение дополнительной зоны кавитации 7, временно исключая действие пузыря в направлении заготовки, так как давление пузыря должно погасить энергию отклонившейся жидкости.

В момент образования кавитации t_k прямое воздействие ударной волны на заготовку прекращается. (рис. 1). При торможении заготовки частицы жидкости из области кавитации будут оседать на заготовку, передавая ей свою энергию, а внутрь области кавитации начнет двигаться граница скачка уплотнения с фронтом 8.

Двигающаяся от пузыря жидкость оттесняет верхнюю границу зоны кавитаций 9, сдвигая ее вслед за заготовкой. В точке G происходит захлопывание зоны кавитации, сопровождающееся резким повышением давления. От места соударения жидкости, двигающейся от пузыря, с жидкостью, начинают распространяться волны сжатия 10 и 11. Волна сжатия 11 действует на заготовку, вследствие чего возникают отраженные волны сжатия и разряжения.

У заготовки вновь возможно появление области кавитации 12. Распространяющаяся в направлении пузыря волна сжатия 10 вызывает появление области кавитации на его границе 13.

В ходе процесса разделяют три этапа; первый - от начала взаимодействия ударной волны с заготовкой до образования кавитации, второй - действие на заготовку потока кавитирующей жидкости, третий - нагружение заготовки гидротоком [1].

Особенности технологического расчета

Расчет технологического процесса импульсного деформирования металлов в общем случае сводится к совместному решению уравнений движения, сплошности и состояния с начальными и граничными условиями для последовательности сред, передающих давление от источника импульсной энергии заготовке, и уравнений, описывающих поведение самой заготовки под действием импульсной нагрузки.

Такая задача (смешанная задача математической физики) допускает лишь численное решение вследствие нелинейности уравнений.

Импульсные методы штамповки чаще всего применяются для получения осесимметричных деталей из листовых и полых заготовок. Особенности постановки задач их импульсного деформирования можно рассмотреть на примере операции импульсной формовки деталей из трубчатых тонкостенных заготовок (рис. 2). В этом случае уравнения, описывающие деформирование, сводятся к уравнениям движения одномерной осесимметричной оболочки под действием импульсной нагрузки [2].

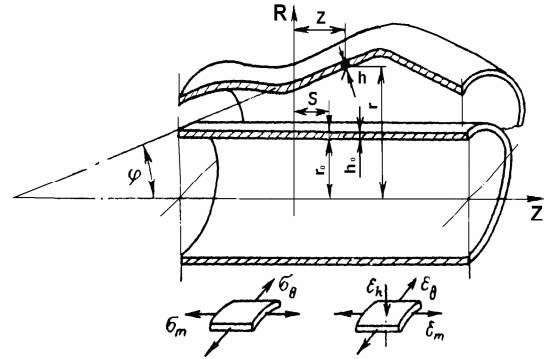


Рис. 2. Математическая модель трубчатой детали

Алгоритм решения технологической задачи с учетом кавитации

Общий алгоритм решения расчетной задачи выглядит следующим образом.

1. Построение математической модели:
 - а) постановка технологической задачи;
 - б) принятие и оценка допущений;
 - в) вывод и выбор подходящего уравнения движения;
 - г) задание начальных условий;
 - д) задание граничных условий (если необходимо);
 - е) выбор определяющего уравнения.

Благодаря постоянному схлопыванию мелких кавитационных пузырьков реализуется осредненное давление на этапе, которое как представление нагрузки используют для случаев предельного формообразования (рис. 3).

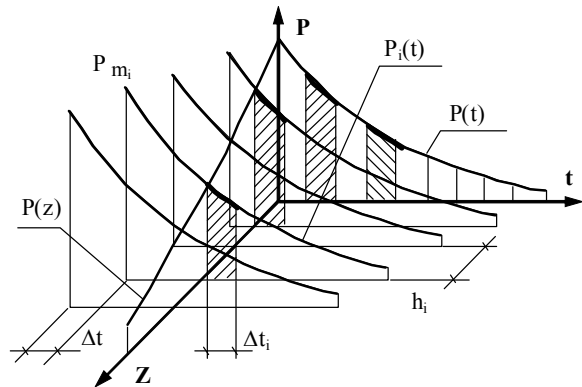


Рис. 3. Характер импульсной нагрузки с учетом кавитационных явлений

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 $t_i = \sum (\Delta t_i + t_i)$ в интервале Δt_i по значениям R_i , Z_i , ΔZ_i определяют логарифмические деформации ϵ_r , ϵ_θ и интенсивность ϵ_i ; определяют интенсивность напряжений σ_i по закону упрочнения $\sigma_i = A \epsilon_i^n$, а также рассчитывают компоненты напряжений.

ж) определение связи между компонентами перемещений и компонентами деформаций.

2. Выбор подходящего метода решения системы уравнений математической модели.
3. Решение исходных уравнений.
4. Оценка адекватности модели, например путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными. Корректировка исходных уравнений и сужение допущений в случае, если модель неадекватно описывает процесс.
5. Оценка области применения модели, например путем оценки области задания допущений.
6. Анализ технологического процесса при помощи построенной модели.

Математическая модель штампа

В описании образующей рабочих поверхностей штампа, отражают общую структуру функциональных поверхностей и их последовательность. Заготовка, как правило, базируется по торцам, для чего в штампе предусматривают соответствующую поверхность. Высота матрицы H_m определяется высотой образующей H_0 , и технологическим припуском $H_{т.п.}$. Ограничительная поверхность матрицы размещается от формирующей на расстоянии δ_m .

В модели штампа отражают наличие закрытых полостей, которые не позволяют извлечь деталь из цельной формообразующей поверхности (рис. 4).

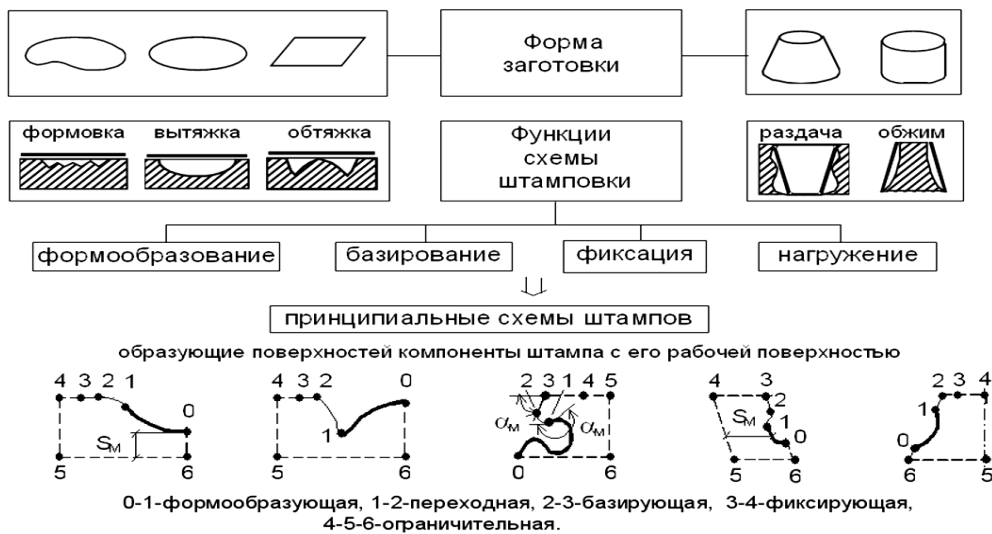


Рис. 4. Особенности формирования модели зеркала штампа

Возможность извлечения определяет местный угол α_m . При $\alpha_m > \pi/2$ формообразующая поверхность не может быть цельной, половинки матрицы соединяют с помощью дополнительных элементов (бандажных колец, толстостенных цилиндров и т.д.), обеспечивая свойство цельности формирующей поверхности при деформировании заготовки. Эти элементы по-разному могут крепиться на полуматрицах, плоскости разъема матрицы в зависимости от конструкторско-технологических свойств детали выполняют вдоль оси или перпендикулярно ей.

Последнее исполнение составной матрицы реализуют, когда на какой-либо образующей элемента угол $\alpha_m > \pi$, а фрагменты на поверхности детали.

Согласно представленному алгоритму (рис. 5) по методике объектного подхода [3, 4] разработан технологический процесс осесимметричной детали сложной формы, выполняемый за 2 перехода.

Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния заготовки реально получаемой детали, подтверждающий правильность выдвинутых гипотез.

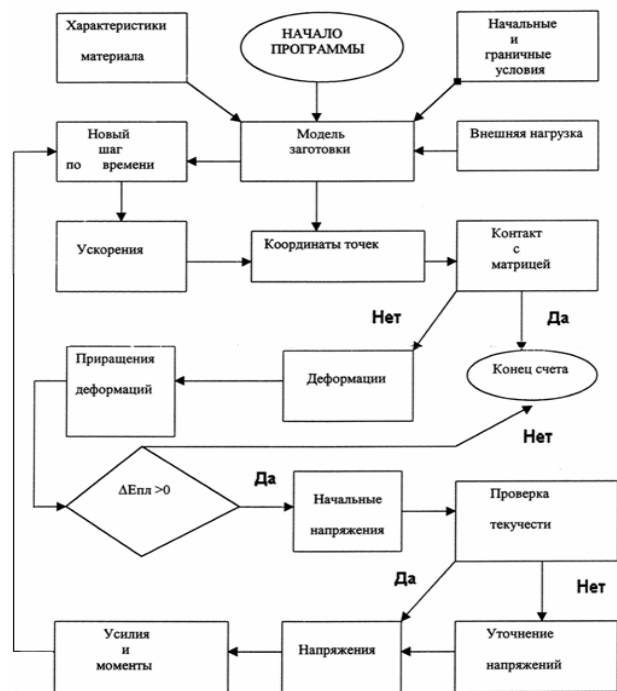


Рис. 5. Блок-схема динамического расчета

Литература

1. Чачин В.М. Листовая штамповка с использованием импульсной нагрузки / В.М. Чачин, Ю.Е. Шамарин, А.Ю. Журавский, В.С. Петраковский, А.Л. Скрипниченко; под ред. В.М. Чачина. – К.: Наук. думка, 1989. – 101 с.

2. Орешников А.И. Высокоскоростные методы листовой штамповки / А.И. Орешников, В.А. Вагин, В.С. Мамутов: Учеб. пособие под ред. К.Н. Бо-

го-явленского. – Л.: ЛПИ, 1984. – 80 с.

3. Зорик В.В. Расчет импульсного нагружения объектов технологической системы / В.Я. Зорик, В.В. Третьяк А.Ю. Комаров // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №7 4(43). – С. 86-11.

4. Третьяк В.В. Объектный подход к проектированию ресурсосберегающих импульсных технологий. / В.В. Третьяк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 3 (29). – С. 26-31.

Поступила в редакцию 1.06.2009

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

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАГОТІВКИ ПІД ДІЄЮ ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕНЬ З УРАХУВАННЯМ КАВІТАЦІЙНИХ ЯВИЩ

В.В. Третьяк

В статті освітлена концепція, принципи і алгоритми проектування імпульсних технологічних процесів з урахуванням кавітаційних явищ. Також представлені розроблені інформаційні моделі технологічної системи виготовлення деталей і її об'єктів: технологічної моделі самої деталі, моделі технологічного процесу і моделі штампів. Приведені результати математичного моделювання динамічної поведінки листової заготовки при різних характерах імпульсного навантаження з урахуванням кавітаційних явищ. Результати розрахунків адаптовані для розробки систем автоматизованого технологічного проектування імпульсних процесів. Система базується на фундаментальних дослідженнях пластичного перебігу металу, його основних закономірностях, положеннях загальної теорії систем, а також на результатах практики штампування, досвіду і логіки технологів при ухваленні рішень у виробничих умовах.

Ключові слова: імпульсне штампування листових деталей, деформаційна модель, кавітаційні явища, динамічна поведінка заготовки.

ANALYSIS OF THE TENSE-DEFORMED STATE OF PURVEYANCE UNDER ACTION OF IMPULSIVE LOADING TAKING INTO ACCOUNT THE KAVITATION PHENOMEN

V.V. Tretyak

In the article the conception, principles and algorithms of planning of impulsive technological processes, taking into account the kavitration phenomena is lighted up. The developed informative models of the technological system of making of details and its objects are also presented: technological model of detail, model of technological process and model of stamps. The results of mathematical design of dynamic conduct of sheet purveyance at different characters of the impulsive loading taking into account the kavitration phenomena are resulted. The results of computations are adapted for development of technological computer-aided designs of impulsive processes. The system is based on fundamental researches of plastic flow of metal, his basic positions of general theory of the systems, and also on the results of practice of stamping, experience and logic of technologists at acceptance of decisions in production terms.

Key words: impulsive stamping of sheet details, deformation model, kavitration phenomena, dynamic conduct of purveyance.

Третьяк Владимир Васильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mai:mint_khai@rambler.ru.