

УДК 621.7.044

А.И. ДОЛМАТОВ, М.К. КНЯЗЕВ, Я.С. ЖОВНОВАТЮК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ НАГРУЖЕНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Предложена методика проведения измерений параметров ударных волн, генерируемых разрядными устройствами различного конструктивного исполнения с одной парой электродов и несколькими электродными парами. Методика предусматривает последовательное применение пьезоэлектрических и многоместных мембранных датчиков. Разработаны методы обработки результатов измерений для создания модели импульсного нагружения на большой площади с учетом параметра времени. Методика позволяет существенно улучшить моделирование процессов электрогидроимпульсной штамповки листовых деталей.

импульсная штамповка, мембранный датчик давления, пьезодатчик, ударная волна, характеристическое время, распределение импульсного давления

Введение

Моделирование процессов электрогидроимпульсной штамповки (ЭГИШ) требует определения полей импульсного нагружения по поверхности листовой заготовки с учетом их изменения во времени и пространстве.

Создание моделей на основе только теоретического описания импульса нагружения зачастую дает результаты неадекватные реальным условиям нагружения. Для получения более корректных результатов необходимо проводить экспериментальные исследования.

Применение пьезоэлектрических датчиков давления дает информацию о параметрах нагружения ударными волнами во времени, что является очень существенным для моделирования процессов деформирования листовых заготовок. Однако получение подробной картины нагружения на большой площади преграды требует применения большого количества пьезодатчиков (сотен и даже тысяч). Сложность организации измерений при наличии большого количества таких датчиков, высокая стоимость датчиков и регистрирующей аппаратуры обуславливают практическую невыполнимость такой экспериментальной задачи.

Для измерений полей давления на больших площадях подходят многоместные мембранные датчики давления (ММДД), которые отличаются простотой конструктивного исполнения и низкой стоимостью. Однако по своей природе они регистрируют интегральное действие всех факторов импульсного нагружения, возникающих при высоковольтном разряде в жидкости: ударных волн, гидротоков, квазистатического давления в замкнутых разрядных камерах. Действие импульсного нагружения регистрируется в виде прогиба мембраны (остаточной деформации) в месте расположения отверстия в корпусе датчика. Величина прогиба пропорциональна максимальному (пиковому) значению импульса сжатия, длительности его воздействия и параметрам мембраны. То есть мембранные датчики дают картину распределения максимальных интенсивностей нагружения по поверхности преграды, но не во времени.

В настоящей работе в качестве исследовательской цели определена разработка методики проведения измерений и обработки их результатов, которая позволит получить математическое описание интенсивности нагружения, изменяющегося по поверхности преграды (в пространстве) и во времени.

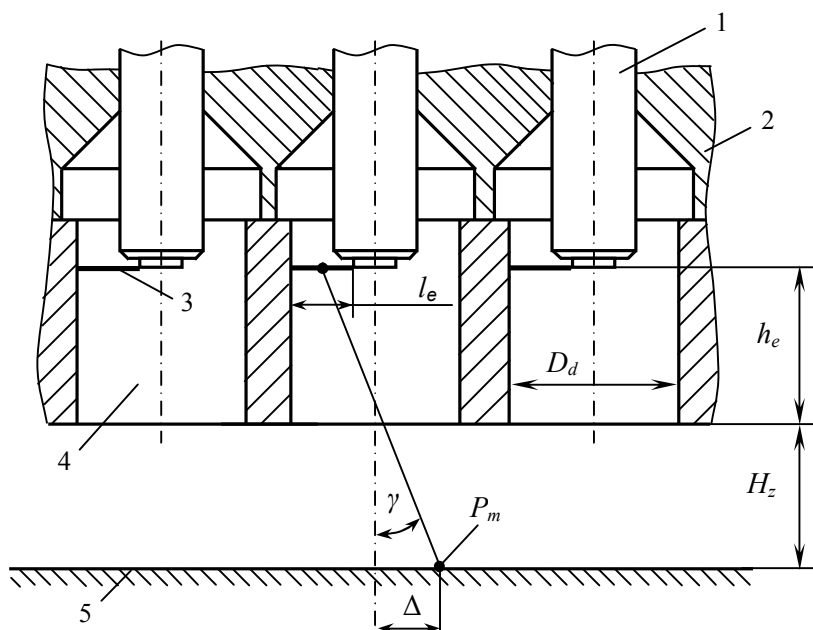


Рис. 1. Конструктивная схема многоэлектродного разрядного блока [1]: 1 – изолированный электрод; 2 – корпус МРБ; 3 – канал электрического разряда; 4 – направляющее отверстие электродной пары (ЭП); 5 – преграда; l_e – длина межэлектродного промежутка; h_e – расстояние от торца МРБ до торца изолированного электрода; D_n – диаметр направляющей полости ЭП; H_z – расстояние от МРБ до преграды; P_m – максимальное давление на преграде от действия одной ЭП

Основной материал

1. Анализ предыдущих исследований. В работе [1] представлено наиболее широкое из известных исследование полей давления, создаваемых многоэлектродными разрядными блоками (МРБ), с помощью многоместных мембранных датчиков. Нагружение производили при неизменных параметрах: зарядное напряжение $U_0 = 25$ кВ, емкость $C = 16,6$ мкФ, индуктивность $L = 5,1$ мкГн, расстояние между торцом электродной пары направленного воздействия и мембраной $H_z = 50$ мм (рис. 1), осевое положение изолированного электрода в разрядной полости $h_e = 95$ мм, межэлектродное расстояние $l_e = 30$ мм. Механические свойства материалов используемых мембран характеризуются параметрами: стали 08кп – предел прочности $\sigma_s = 379$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 234$ МПа, относительное удлинение $\delta = 18\%$; сплава АК4-1 – $\sigma_s = 325$ МПа, $\sigma_T = 290$ МПа, $\delta = 6\%$. Толщина стальных мембран составляла 0,6...0,8 мм, алюминиевых – 0,6 мм.

Результаты исследований [1, 2] показали, что при определенном соотношении геометрических, механических и физических свойств мембраны и нагружающего импульса мембрана, как чувствительный элемент датчика, регистрирует только действие прямой ударной волны. Деформация мембраны происходит в течение характеристического времени θ или за меньший промежуток времени. При этом величина прогиба прямо пропорциональна величине пикового давления ударной волны P_m в определенном диапазоне $\bar{d} = d/s$, где d – диаметр отверстия датчика, s – толщина мембраны (рис. 2). Примерно этот диапазон определен как $\bar{d} < (6...8)$.

Здесь для оценки импульсного нагружения принят параметр «эквивалентное статическое давление», который рассчитывается по известной формуле Лапласа для сферического элемента по измеренному прогибу (остаточной деформации) мембраны. Давления приведены в нормированном виде $\bar{P}_d = P_d / P_m$, где P_m – максимальное (пиковое) давление ударной волны. Относительный прогиб мембраны $\bar{h} = h / d$.

Необходимо отметить некоторую неточность на представленных графиках. Мембрана имеет нижний уровень чувствительности, который определяется пределом пластичности материала, из которого она изготовлена. Если во время нагружения напряжения в мембране не превысят предела текучести, то после снятия нагрузки упругая деформация исчезнет. Поэтому кривые на графиках должны начинаться не с нуля, а с определенного значения, соответствующего началу пластического деформирования материала мембраны.

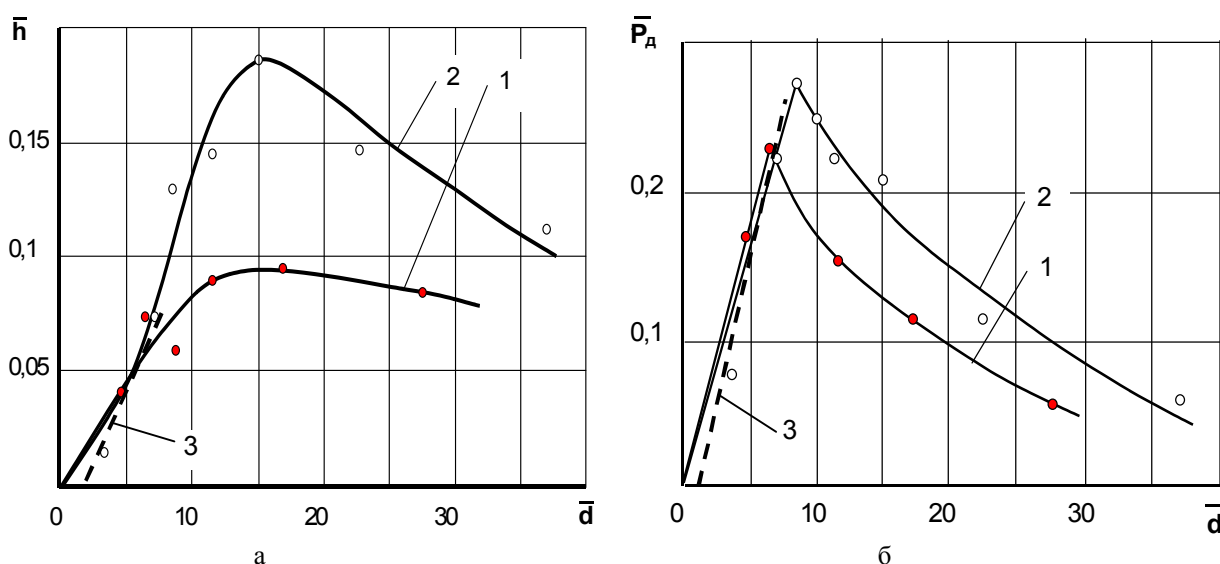


Рис. 2. Изменение относительного прогиба мембраны (а) и относительного эквивалентного статического давления (б) от относительного диаметра мембранного датчика при неизменных параметрах разрядного контура [1]: 1 – сталь 08кп, $s = 0,8$ мм; 2 – сплав АК4-1, $s = 0,6$ мм; 3 – корректировка начальных участков кривых

Весьма существенным здесь является то, что начальные участки кривых практически линейны в указанном диапазоне \bar{d} , физических и механических свойств мембран при заданных параметрах ударной волны P_m и θ , определяемых электрическими параметрами разрядного контура и геометрией разрядного устройства.

Линейная зависимость между деформацией и параметрами \bar{h} и \bar{P}_d означает, что деформация мембраны происходит только за время действия ударной волны. При увеличении параметра \bar{d} величина \bar{P}_d достигает максимума и начинает уменьшаться, что говорит о вовлечении в процесс деформирования других факторов нагружения [1, 2].

Характеристическое время можно рассчитать с достаточной точностью с помощью известных формул [3, 4]:

$$\theta = \tau_{0,1} / \ln 10; \quad \tau_{0,1} = 0,74 \tau_1 \bar{r}^{1/8};$$

$$\bar{r} = r \cdot \left(\frac{\rho_1 l_e}{U_0^2 C^2 L} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

где τ_1 – длительность первого полупериода тока разряда; ρ_1 – плотность передающей среды.

Так, для указанных условий значение характеристического времени, полученное по этим зависимостям, $\theta_{расч} = 30,3 \cdot 10^{-6}$ с, а по данным экспериментов $\theta_{эксп} = 26 \cdot 10^{-6}$ с. Расхождение составляет 16,5%, что вполне приемлемо для инженерных расчетов.

Представленную выше связь между величиной деформации мембраны (см. рис. 2) и параметрами ударной волны можно использовать для определения распределения давления ударных волн по поверхности преграды во времени с помощью комбинированных измерений с одним пьезодатчиком и множественным мембранным датчиком.

2. Методика проведения экспериментов и обработки их результатов. Методика проведения исследований полей нагружения, создаваемых ударными волнами, которые генерируются разрядной камерой определенной конструкции, состоит в поэтапном применении для измерений различных типов датчиков и соответствующей обработки результатов измерений.

На первом этапе используют пьезодатчик для определения параметров P_m и θ при различных электрических параметрах разрядов. Диапазон изменения электрических характеристик разрядных конту-

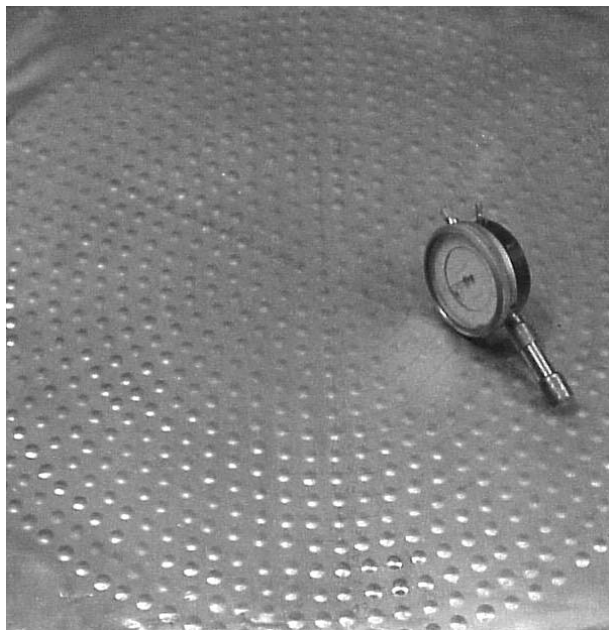


Рис. 3. Мембрана после нагружения и индикаторная головка с приспособлением для измерения прогибов мембраны в местах расположения единичных датчиков: диаметр отверстий в корпусе ММДД 6 мм; шаг их расположения 12 – 13 мм; количество отверстий 1261

ров U_0 , C , L , l_e определяется конструктивным исполнением генератора импульсных токов электрогидроимпульсной установки или прессы. Для регистрации кривой давления можно использовать запоминающий осциллограф (например, марки С8-13) или аналого-цифровой преобразователь для вывода сигнала на персональный компьютер и его последующей обработки. Координаты расположения пьезодатчика согласовывают с предполагаемой точкой максимального давления (см. рис. 1).

На втором этапе выполняют тарирование мембраны из определенного листового материала по ее прогибу $h = f(P_m, \theta)$ или в пересчете по параметру «эквивалентное статическое давление» $P_d = f(P_m, \theta)$ при тех же параметрах разрядов U_0 , C , L , l_e (тех же P_m и θ) для выбранного диаметра отверстия в корпусе мембранного датчика при условии $\bar{d} < (6 \dots 8)$.

На следующем этапе проводят измерения полей нагружения с помощью ММДД при заданных условиях эксперимента и измерение массива данных $H_i =$

$= (h_i; x_i; y_i)$ по прогибам мембраны в местах расположения единичных датчиков (рис. 3).

В ряде операций ЭГШ (калибровка, чеканка, вырубка) заготовка практически полностью прилегает к формозадающей поверхности, то есть является очень жесткой. Для таких процессов определяющим фактором нагружения является пиковое давление ударной волны P_m . Для случая нагружения жесткой заготовки ударными волнами (прямыми и отраженными), исходящими от одной электродной пары, параметр θ можно с удовлетворительной точностью рассчитать по формулам (1). Тем более что характеристическое время θ , которое существенно зависит от величины емкости C , для таких процессов не является определяющей величиной, что убедительно показано в работе [5].

Обработку результатов измерений следует вести с учетом расстояния между каналом разряда и точкой расположения единичного датчика ММДД на преграде $r_i = f(x_i; y_i; z_i)$ и скорости распространения ударных волн в жидкости с тем, чтобы учесть разность во времени воздействия ударной волны на различные участки преграды (см. рис. 1).

Для разрядных куполообразных камер, оснащенных одной электродной парой, необходимо учитывать также разность во времени воздействия прямой и отраженных от купола камеры ударных волн. На отдельных участках (чаще всего периферийных) интенсивность отраженных волн может превышать таковую от действия прямых ударных волн. При наложении прямой и отраженной волны со смещением по времени прихода фронтов практически происходит увеличение длительности их воздействия, которое при обработке будет учтено возрастанием характеристического времени θ .

Особую сложность представляет обработка результатов измерений полей давлений, создаваемых многоэлектродными разрядными блоками (см. рис. 1). При наложении на преграде ударных волн, исходящих от нескольких разрядных каналов, происхо-

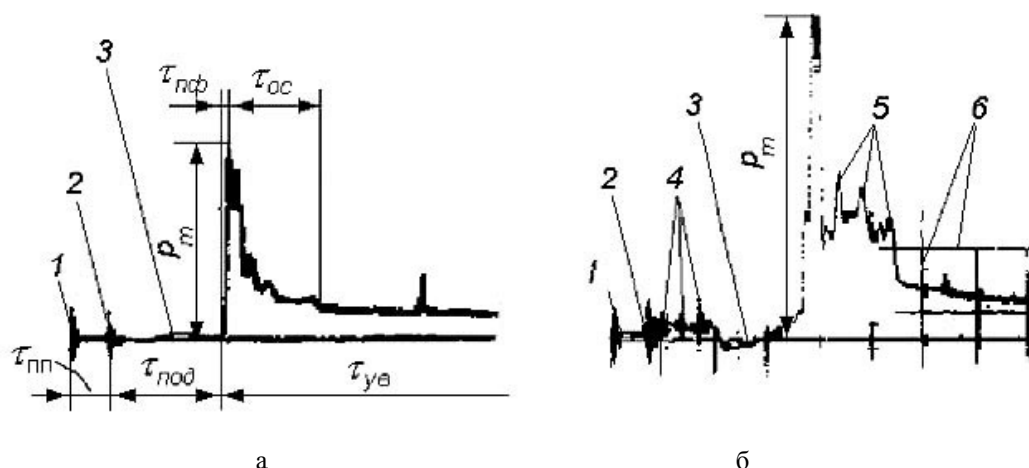


Рис. 4. Типовые осциллограммы ударных волн, генерируемых МРБ: а – при разряде на одной ЭП; б – при совместном разряде на семи ЭП; 1 – метка от помехи при запуске развертки (момент замыкания разрядного контура); 2 – метка от помехи при пробое межэлектродного промежутка; 3 – наводка от разрядного тока; 4 – метки от помех пробоев при совместном разряде; 5 – пики P_{mi} ударных волн от удаленных ЭП; 6 – экранная сетка; $\tau_{n\phi}$ – предпробойный промежуток времени; $\tau_{под}$ – время подхода ударной волны; $\tau_{нф}$ – время нарастания переднего фронта; $\tau_{ос}$ – время спада давления; $\tau_{ув}$ – время действия ударной волны

дит их нелинейное взаимодействие, что приводит к нелинейно-большому возрастанию результирующего давления [1]. Работа МРБ характеризуется довольно большим разбросом по времени срабатывания отдельных электродных пар, что существенно влияет на стабильность результатов. В целом эффекты нелинейного взаимодействия и несинхронности разрядов приводят к увеличению параметров P_m и θ (рис. 4).

Конечно, такие сложные кривые (см. рис. 4) невозможно восстановить только по прогибу мембраны, образовавшемуся в результате пластического деформирования. Реальная кривая импульса ударной волны будет аппроксимирована и представлена в типовом виде

$$P_{ij} = P_{mij} \cdot e^{-\frac{\tau}{\theta_{ij}}}, \quad (2)$$

где P_{mij} – пиковое давление ударных волн в i -й точке на преграде с координатой $r_{ij} = f(x_{ij}; y_{ij}; z_{ij})$ от j -го количества учитываемых ударных волн; θ_{ij} – характеристическое время ударной волны в i -й точке.

Линейный характер начального участка кривых \bar{P}_d (см. рис. 2, б) дает основания предположить, что зависимость $\bar{P}_d = f(P_m)$ будет также линейна в дос-

точно широком диапазоне P_m при заданных параметрах d и s ($\bar{d} < (6 \dots 8)$) и материала мембраны. По результатам опытов можно построить семейство прямых $\bar{P}_d = f(P_m)$ для различных \bar{d} и материала мембраны. При этом для построения прямой достаточно двух точек (двух опытов), полученных для больших и малых значений P_m .

Так кривая, представленная на рис. 4, а, хорошо описывается выражением $P = 50 \times e^{-\frac{\tau}{30 \times 10^{-6}}}$, МПа.

При этом $P_m = P_d / \bar{P}_d = 12,5 / 0,25 = 50$ МПа. В этом случае параметр \bar{P}_d служит коэффициентом преобразования величины давления P_d , рассчитанного по фактическому прогибу мембраны, в величину пикового давления ударной волны P_m .

Таким образом, по результатам измерений с помощью многоместных мембранных датчиков для каждой i -й точки (i -го единичного датчика) с координатами $(x_i; y_i)$ на поверхности мембраны можно определить параметры P_{mi} и θ_i для формулы (2). Соответственно, можно описать распределение давления на поверхности преграды в различные моменты времени.

Для случая нагружения ударными волнами, исходящими от нескольких электродных пар, когда происходит наложение и нелинейное взаимодействие нескольких ударных волн (см. рис. 4, б), параметр θ можно определить двумя методами.

Первый метод предполагает статистическую обработку результатов измерений с помощью пьезодатчиков по параметру θ . Затем в формулы (1) вводят поправочные коэффициенты, которые будут учитывать количество работающих электродных пар, несинхронность разрядов и разность во времени подхода ударных волн к заданной точке на преграде. То есть комбинированное нагружение несколькими ударными волнами (см. рис. 4, б) выполняется простой аппроксимацией по формуле (2), что вполне соответствует задаче моделирования технологических операций с жесткой заготовкой.

Второй метод подходит для моделирования технологических операций с податливой заготовкой. Здесь все факторы нагружения играют важную роль. Прямая ударная волна определяет начальный этап деформирования податливой заготовки, обеспечивает условия возникновения явления кавитации. Отраженные волны и ударные волны, исходящие от удаленных электродных пар, вторичные ударные волны осуществляют последующее нагружение заготовки, что существенным образом сказывается на величине прогиба и форме деформированной заготовки.

Поэтому здесь необходимо представить сложную кривую нагружения ударными волнами (см. рис. 4, б) как совокупность отдельных ударных волн с учетом их нелинейного взаимодействия (рис. 5). Пиковые значения $P_{\Sigma m2}$ и $P_{\Sigma m3}$ не являются результатом простого алгебраического суммирования величин давления двух или трех ударных волн в заданный момент времени. Величины $P_{\Sigma m2}$, $P_{\Sigma m3}$ получены путем умножения алгебраической суммы на коэффициент, учитывающий особенности нелинейного взаимодействия: количество ударных волн, ин-

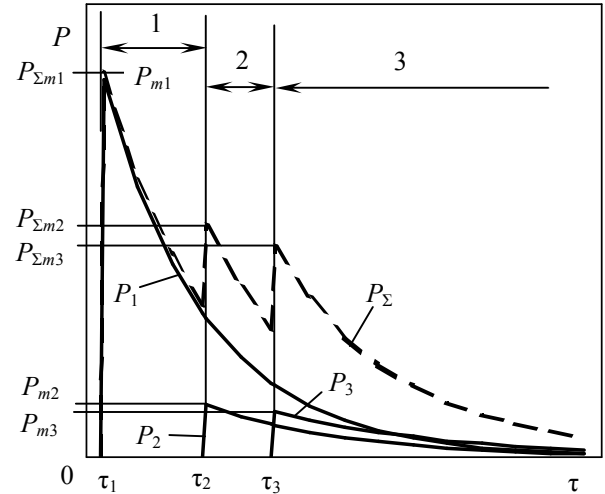


Рис. 5. Аппроксимация кривой давления при взаимодействии нескольких ударных волн: 1, 2, 3 — периоды действия одной, двух, трех ударных волн соответственно; P_1 , P_2 , P_3 — кривые давления первой, второй, третьей ударных волн соответственно; P_{m1} , P_{m2} , P_{m3} — пиковые значения давления ударных волн; P_{Σ} — кривая давления, полученная в результате взаимодействия ударных волн; $P_{\Sigma m1}$, $P_{\Sigma m2}$, $P_{\Sigma m3}$ — пиковые значения результирующего давления от одной, двух, трех ударных волн соответственно; τ_1 , τ_2 , τ_3 — время достижения преграды первой, второй, третьей ударной волной соответственно

тенсивности ударных волн в данный момент времени и рассматриваемой точке взаимодействия, углы распространения ударных волн по отношению друг к другу и к преграде, форма и жесткость преграды, акустические свойства передающей среды и другие.

В таких задачах значения коэффициентов, учитывающих особенности нелинейного взаимодействия, более точно можно определить из сравнительных опытов с применением пьезоэлектрических датчиков, а также многоместных мембранных датчиков, позволяющих получить подробную картину интегрального воздействия всех ударных волн с учетом их нелинейного взаимодействия. Моменты времени τ_1 , τ_2 , τ_3 рассчитывают по траектории движения ударных волн с учетом скорости их распространения в определенной передающей среде.

Величины P_{m1} , P_{m2} , P_{m3} , θ_1 , θ_2 , θ_3 можно рассчитать по известным эмпирическим формулам [3, 4] и внести корректировку по результатам измерений с

помощью пьезоэлектрических датчиков при импульсном нагружении в разрядном устройстве исследуемой конструкции.

При разработке математической модели и алгоритма расчета необходимо учитывать ту особенность, что при измерениях на жесткой преграде давление ударных волн примерно удваивается за счет их отражения. Поэтому расчетную модель нужно строить с учетом реальной податливости преграды (заготовки) на различных этапах ее деформирования.

Заключение

Предложенный метод измерения параметров нагружения различными разрядными устройствами (с одной парой электродов и несколькими парами), которые применяются для импульсного формообразования листовых деталей, позволяет определить параметры импульса давления на больших площадях нагружения с учетом фактора времени. При этом получаемые аппроксимации имеют более высокую точность, чем теоретические методы, несмотря на погрешности, вносимые принятыми допущениями, так как они основываются на результатах измерений.

Разработка моделей, учитывающих другие факторы нагружения (явление кавитации, вторичные ударные волны от схлопывания парогазовой и кавитационной полостей, гидротоки от расширяющихся парогазовых полостей, квазистатическое давление парогазовой полости и другие), требует дальнейшего исследования, как литературных источников, так и экспериментального, для количественного определения их влияния на процесс деформирования листовой заготовки.

Кроме этого, заготовка в процессе деформирования изменяет свою податливость, фланец заготовки

также перемещается в процессе штамповки, материал заготовки подвергается упрочнению в результате пластического деформирования. Для корректного моделирования необходимо также учитывать и эти изменяющиеся параметры заготовки.

Литература

1. Князев М.К. Исследование, разработка и внедрение технологических процессов электрогидравлической штамповки с применением многоэлектродных разрядных блоков / Дис. ... канд. техн. наук. – Х.: ХАИ, 1995. – 223 с.
2. Антоненко А.А., Чебанов Ю.И., Князев М.К. Исследование процессов электрогидравлической штамповки на установках с многоэлектродными разрядными блоками // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2004. – № 1 (7). – С. 23-32.
3. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с.
4. Шамко В.В. Интегральные характеристики плазмы подводного искрового разряда // Журн. техн. физики. – 1978. – 48. – Вып. 5. – С. 967-971.
5. Князев М.К., Чебанов Ю.И., Мананков О.В. Согласование параметров оборудования с характером технологических задач электрогидравлической листовой штамповки // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. Сб. научн. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Х.: НАКУ "ХАИ", 2004. – Вып. 36 (1). – С. 95-102.

Поступила в редакцию 31.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.