

ТЕХНОЛОГИЯ. ХОЛОДНОЙ
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.983.044.4

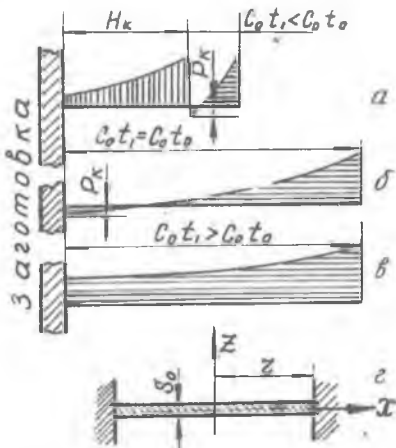
Г.А.Ренин, Е.Н.Смеляков

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ
ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКЕ

В течение последних лет в технической литературе появился ряд сообщений о необходимости учета явления кавитации при анализе способов высокоскоростной штамповки, когда в качестве промежуточной среды используется жидкость [1], [2], [3], [4]. Однако до сих пор остается недостаточно ясным сам механизм образования силового поля на поверхности деформируемой заготовки. Экспериментальные исследования, например процесса ЭГШ, показывают, что характер движения заготовок во многом зависит от их геометрических, массовых и прочностных характеристик, а также от режимов электрического разряда в жидкости. Очевидно, что при различных сочетаниях параметров разряда и заготовки механизм образования силового поля неидентичен.

С целью изучения данного вопроса авторы провели исследование условий возникновения кавитационных разрывов в жидкости при взаимодействии волны давления с заготовкой и их влияния на образование силового поля. Была выбрана следующая модель процесса. Заготовка из тонколистового материала, жестко зажата по фланцу, свободно деформируется в кольцевую матрицу под действием волны давления (сжатия), которая имеет плоскую форму фронта и прямоугольный профиль. Волна возбуждается в жидкости вблизи поверхности заготовки. Известно [3], что при взаимодействии волны сжатия с абсолютно жесткой преградой отраженная волна является также волной сжатия. При взаимодействии со свободной поверхностью волна сжатия после отражения превращается в волну растяжения.

В исследуемой модели под действием волны давления заготовка начинает перемещаться. В результате этого создаются условия, при которых величина давления в отраженной волне быстро снижается и переходит в область отрицательных значений (рис. I). В момент времени t_x на глубине H_x от поверхности заготовки в месте, где суммарная величина давления



Р и с. I. Виды взаимодействия падающей волны в жидкости с заготовкой: а-взаимодействие с образованием разрыва сплошности; б-граничный случай; в-взаимодействие без образования разрыва сплошности; г-исходная схема для расчета параметров процесса

падающей и отраженной волн достигает предела прочности жидкости при растяжении P_x в воде возникает разрыв сплошности, который в дальнейшем развивается в кавитационную каверну.

Поскольку профиль падающей волны принят нами прямоугольным, то разрыв сплошности может возникнуть только за хвостом падающей волны. Это хорошо видно на рис. I, а, в соответствии с которым можно записать:

$$2H_x + C_0 t_1 = C_0 t_0,$$

откуда

$$H_x = 0,5 C_0 (t_0 - t_1), \quad (I)$$

где C_0 - скорость звука в воде;
 $C_0 t_1$ - длина отраженной волны (t_1 - промежуток времени, за который давление в отраженной волне упадет до величины, равной пределу прочности воды на разрыв - P_x);
 t_0 - длительность падающей волны давления.

На основании этого же рисунка можно записать: $t_x = \frac{H_x}{C_0} + t_1$.

Или, с учетом (I):

$$t_x = 0,5 (t_0 + t_1). \quad (2)$$

Процесс формирования отраженной волны происходит на самом начальном этапе взаимодействия падающей волны с заготовкой, т.е. на стадии упругой деформации заготовки. Следовательно, в общем случае в расчетах нельзя пренебрегать жесткостью заготовки [1] или полагать, что она мгновенно приходит в состояние пластичности.

В процессе деформирования на заготовку действует давление волны сжатия, которое определяется в соответствии с положениями линейной акустики [3]:

$$p = \lambda p_0 - \rho_0 c_0 V_n, \quad (3)$$

где $\lambda = 2$ - акустический коэффициент;
 p_0 - давление в падающей волне;
 ρ_0 - плотность рабочей жидкости;
 c_0 - скорость звука в рабочей жидкости;
 V_n - приведенная скорость заготовки [5].

Приведенная скорость заготовки выражается через скорость перемещения ее центральной точки и имеет следующий вид:

$$V_n = K_n \dot{h}, \quad (4)$$

где \dot{h} - перемещение центральной точки заготовки (точкой над символом здесь и в дальнейшем обозначаются производные по времени);
 $K_n = \frac{\sqrt{2} \int_0^z \bar{x}^2 dx}{2h}$ - коэффициент приведения, определяемый из равенства истинной и приведенной кинетической энергии движущейся заготовки.

Противодействуют перемещению заготовки силы инерции заготовки и сопротивление ее деформации.

Составим уравнение равновесия заготовки на этапе начала ее движения:

$$p - \rho s_0 \frac{dV_n}{dt^2} - q(h) = 0, \quad (5)$$

где $q(h)$ - величина сопротивления заготовки деформированию.

Для определения $q(h)$ воспользуемся выражением для прогиба равномерно нагруженной жестко защемленной по контуру круглой пластинки [7]:

$$z = \frac{q z^4}{64D} (1 - \bar{x}^2)^2, \quad (6)$$

где $q = q(h)$ - давление, потребное для создания прогиба (в нашем случае эта величина играет роль сопротивления заготовки деформированию);

$D = \frac{E S_0^3}{12(1-\nu^2)}$ - цилиндрическая жесткость заготовки.

Здесь F - модуль упругости;

ν - коэффициент Пуассона;

S_0 - толщина заготовки;

z - радиус заготовки;

$\bar{x} = \frac{x}{z}$ - безразмерная текущая координата материальной точки.

Сопротивление заготовки деформированию определим из выражения (6), приняв $\bar{x} = 0$:

$$q = \frac{64D}{z^4} h. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) коэффициент приведения (4) будет равен:

$$K_n = \sqrt{0,2}. \quad (8)$$

Запишем уравнение равновесия заготовки в развернутом виде:

$$2\rho_0 - \rho_0 C_0 K_n \dot{h} - \rho S_0 K_n \ddot{h} - \frac{64D}{z^4} h = 0. \quad (9)$$

Поделив уравнение (9) на коэффициент при \ddot{h} , а также на величину $\frac{z}{\theta_m^2}$ (где $\theta_m = \frac{\rho S_0}{\rho_0 C_0}$), получим дифференциальное уравнение движения заготовки в безразмерном виде:

$$\frac{d^2 h^\wedge}{dT^2} + \frac{dh^\wedge}{dT} + \omega^2 h^\wedge = 2Q_0 \frac{1}{K_n}, \quad (10)$$

где $h^\wedge = h/z$; $T = t/\theta_m$; $\omega^2 = \frac{16}{3K_n} K_E^2 S_0^4$;

$$K_E = \frac{\rho C_E}{\rho_0 C_0}; \quad Q_0 = \frac{\rho \rho_0}{(\rho_0 C_0)^2} S_0^\wedge; \quad S_0^\wedge = S_0/z;$$

ρC_E - акустический импеданс материала заготовки.

В зависимости от величины ω^2 решение дифференциального уравнения (10) может иметь различный вид. Воспользовавшись начальными условиями $T=0$, $h^\wedge=0$, $\frac{dh^\wedge}{dT}=0$,

получим перемещение и скорость перемещения поляса заготовки:

$$\text{при } \omega^2 < \frac{1}{4} \\ \hat{h} = \frac{Q_0}{B\omega^2 K_n} \left[2B + (1-B)e^{-\frac{1}{2}(1-B)\tau} - (1+B)e^{-\frac{1}{2}(1+B)\tau} \right]; \quad (11)$$

$$\frac{d\hat{h}}{d\tau} = \frac{2Q_0}{BK_n} \left[e^{-\frac{1}{2}(1-B)\tau} - e^{-\frac{1}{2}(1+B)\tau} \right], \quad (12)$$

$$\text{при } \omega^2 = \frac{1}{4} \\ \hat{h} = B \frac{Q_0}{K_n} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{2}\tau\right) e^{-\frac{1}{2}\tau} \right]; \quad (13)$$

$$\frac{d\hat{h}}{d\tau} = 2 \frac{Q_0}{K_n} \tau e^{-\frac{1}{2}\tau}, \quad (14)$$

$$\text{при } \omega^2 > \frac{1}{4} \\ \hat{h} = \frac{2Q_0}{\omega^2 K_n} \left[1 - e^{-\frac{1}{2}\tau} \left(\frac{1}{B} \operatorname{tg} \frac{1}{2} B\tau + 1 \right) \cos \frac{1}{2} B\tau \right]; \quad (15)$$

$$\frac{d\hat{h}}{d\tau} = \frac{4Q_0}{BK_n} e^{-\frac{1}{2}\tau} \sin \frac{1}{2} B\tau, \quad (16)$$

$$\text{где } B = \sqrt{|1 - 4\omega^2|}.$$

Перейдем к определению длительности отраженной волны.

Давление в отраженной волне

$$P_1 = P - P_0. \quad (17)$$

С учетом (4), а также выражений для скорости перемещения поляса заготовки (12), (14) и (16), согласно равенству (17), получим выражения для определения давления в отраженной волне:

$$\text{при } \omega^2 < \frac{1}{4} \\ Q_1 = Q_0 \left\{ 1 - \frac{2}{B} \left[e^{-\frac{1}{2}(1-B)\tau} - e^{-\frac{1}{2}(1+B)\tau} \right] \right\}, \quad (18)$$

$$\text{при } \omega^2 = \frac{1}{4} \\ Q_1 = Q_0 (1 - 2\tau e^{-\frac{1}{2}\tau}), \quad (19)$$

$$\text{при } \omega^2 > \frac{1}{4}$$

$$Q_1 = Q_0 \left(1 - \frac{4}{B} e^{-\frac{1}{2} T} \sin \frac{1}{2} B T \right), \quad (20)$$

где $Q_1 = \frac{\rho \rho_1}{(\rho_0 c_0)^2} \hat{S}_0$.

В силу принятых допущений разрыв сплошности рабочей жидкости произойдет в месте, где $\rho = \rho_1 = \rho_\kappa$.

При соблюдении этого равенства в зависимости от величины ω^2 получим три различных трансцендентных уравнения относительно безразмерной длительности отраженной волны:

при $\omega^2 < \frac{1}{4}$

$$e^{-\frac{1}{2}(1-B)T_1} - e^{-\frac{1}{2}(1+B)T_1} = \frac{B}{2} \left(1 + \frac{|Q_\kappa|}{Q_0} \right), \quad (21)$$

при $\omega^2 = \frac{1}{4}$

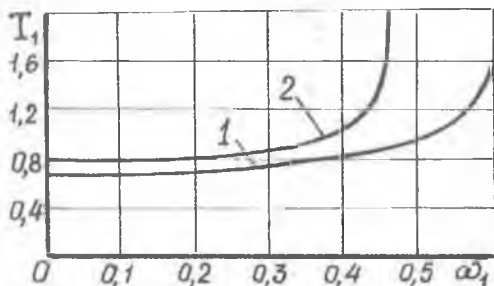
$$T_1 e^{-\frac{1}{2} T_1} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{|Q_\kappa|}{Q_0} \right), \quad (22)$$

при $\omega^2 > \frac{1}{4}$

$$e^{-\frac{1}{2} T_1} \sin \frac{1}{2} B T_1 = \frac{B}{4} \left(1 + \frac{|Q_\kappa|}{Q_0} \right). \quad (23)$$

Решение уравнений (21), (22), (23) произведено в зависимости от приведенной жесткости заготовки $\omega_1 = \hat{S}_0^* K_E$. При расчете было принято, что рабочей жидкостью служит водопроводная вода, для которой $\frac{|Q_\kappa|}{Q_0} \rightarrow 0$ [6].

На основании приведенного на рис.2 графика зависимости $T_1 = \omega_1$ и



Р и с.2. Зависимость безразмерной длительности отраженной волны от параметра жесткости заготовки: 1 - $\frac{\rho_\kappa}{\rho_0} = 0$, 2 - $\frac{\rho_\kappa}{\rho_0} = 0,1$

в соответствии с формулой (1) всю область возможных значений параметра $T_0 = t_0 / Q_m$ разбивают на две зоны, граница между которыми определяется равенством $C_\kappa = T_1 / T_0 = 1$. Величину C_κ назовем кавитационным критерием оценки режима нагружения заготовки.

В случае, когда длительность падающей волны T_0 больше длительности отраженной волны T_r , соблюдается неравенство $C_k < 1$, которое характеризует условие, необходимое для возникновения кавитационных разрывов в рабочей жидкости. Достаточное условие образования кавитационной каверны получим, исходя из времени дифракции $t_d = \frac{z}{C_0}$, или в безразмерном виде:

$$T_d = t_d / a_m = \frac{\rho_0}{\rho} \frac{1}{S_0} \cdot \quad (24)$$

В соответствии с формулой (2) в безразмерном виде время возникновения кавитации

$$T_k = 0,5 T_0 (1 + C_k). \quad (25)$$

Величину отношения $C_d = T_k / T_d$ назовем дифракционным критерием оценки режима нагружения заготовки, который с учетом формул (24) и (25) примет вид

$$C_d = 0,5 \frac{\rho}{\rho_0} S_0 T_0 (1 + C_k). \quad (26)$$

При $C_d < 1$ соблюдается достаточное условие образования кавитационной каверны, означающее, что кавитация в жидкости наступит раньше, чем волна дифракции схлопнется в центре заготовки.

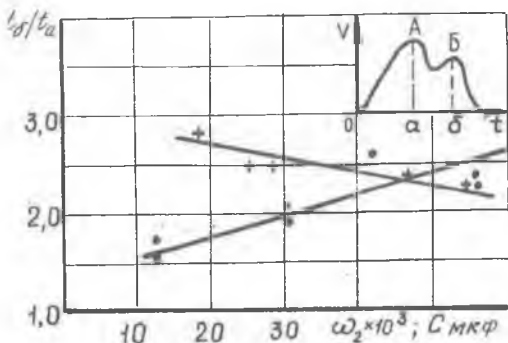
При наличии кавитации приток энергии к заготовке происходит за счет перетекания жидкости через каверну и последующего захлопывания ее. В результате процесс передачи энергии заготовке замедляется, деформирование ее становится плавным, растянутым во времени. Такой режим нагружения заготовки можно назвать "мягким" ($C_k < 1$, $C_d < 1$).

В случае, когда хотя бы один из упомянутых критериев по величине будет больше единицы, реализуется, так называемый, "жесткий" режим нагружения. При этом смягчающий фактор кавитации отсутствует, и длительность процесса деформирования заготовки имеет порядок длительности силового воздействия падающей и отраженных от стенок разрядной камеры волн давления.

В практике электрогидроимпульсной штамповки обычно используются листовые заготовки с малыми относительными толщинами. Для процесса деформирования таких заготовок характерен "мягкий" режим нагружения. Исследование движения заготовок при помощи скоростно-

го фоторегистратора СФР-1М позволило выявить особенности этого режима. На полученных СФР-граммах наблюдаются несколько участков разгона заготовки. На начальном участке движения заготовка разогнётся за счет энергии, передаваемой ей прямой волной давления. По мере расхода энергии скорость деформирования снижается, а затем вновь наблюдается разгон. Повторное нагружение заготовки производится вторичным силовым полем, образованным отраженными и вторичными волнами давления, которые генерируются при захлопывании кавитационной каверны. Механизм формирования силового поля при последующих возможных разгонах заготовки в процессе ее деформирования аналогичен описанному.

Степень "жесткости" режима нагружения заготовки может быть охарактеризована величиной соотношения времени наступления первых двух пиков скорости ее материальных точек. И действительно, с увеличением длительности падающей волны и уменьшением длительности волны отраженной, согласно формуле (1), возрастает глубина первичного разрыва сплошности, а значит, и глубина проникновения кавитации в рабочую жидкость. С другой стороны, с увеличением глубины проникновения кавитации возрастает и время, необходимое для захлопывания кавитационной каверны. Поэтому и второй пик скорости наступит позже.



Р и с.3. Зависимость соотношения времен t_b/t_a от параметра жесткости заготовки и емкости накопителя ($C = 6$ мкФ, $U = 45$ кВ, $V = V(t)$ -схематическая зависимость скорости движения полдуса заготовки от времени:

+ - $t_b/t_a = f(\omega_2)$; · - $t_b/t_a = f(\omega_2)$

В результате обработки СФР-грамм перемещения материальных точек заготовки получена зависимость соотношения времени наступления пиков скорости от приведенной жесткости заготовки при фиксированных значениях емкости и напряжения заряда конденсаторов (рис.3). Как и следовало ожидать, с возрастанием приведенной жесткости заготовки

величина этого соотношения снижается, что указывает на повышение жесткости нагружения. Это явление обусловлено возрастанием длительности отраженной волны, результатом чего является уменьшение глубины проникновения кавитации в рабочую жидкость.

Однако, согласно предложенной гипотезе, степень "жесткости" нагружения заготовки зависит еще и от длительности падающей волны

$$t_0 \sim \sqrt{c}$$

Было проведено исследование двух материалов: АМг6М-1,5 и Д16АМ - 2,5 при энергиях 4 и 10 кДж соответственно. Изменялась емкость накопителя энергии при одновременном изменении напряжения зарядки. Приведенная на рис. 3 зависимость подтверждает правильность гипотезы о возрастании "мягкости" нагружения заготовки с увеличением длительности падающей волны.

В ы в о д ы

1. Режим нагружения заготовки при электрогидравлической штамповке зависит от процесса взаимодействия волны давления с заготовкой на стадии ее упругих деформаций.

2. Получены два критерия оценки режима нагружения заготовки: кавитационный - C_K и дифракционный - C_d .

3. В зависимости от параметров заготовки и длительности падающей волны режим нагружения заготовки будет либо "мягким" (при наличии кавитации), либо "жестким" (без кавитации).

4. В методике расчета параметров процесса электрогидроимпульсной штамповки должны учитываться особенности образования силового поля при деформировании заготовок.

Л и т е р а т у р а

1. Штамповка взрывом. Сборник статей. Отв. ред. М.А.Анучин. М., "Машиностроение", 1972.

2. Р а й н х а р т Д., П и р с о н Д. Взрывная обработка металлов. Пер. с англ. М., "Мир", 1966.

3. К о у л Р. Подводные взрывы. Перевод с англ., М., "И.-Л.", 1950.

4. Ч а ч и н В.И., Ш а р и н Ю.Е. Критерии эффективности процесса при электрогидравлической штамповке. Доклады АН БССР т. XIV, 1970. № 4.

5. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. Л., Судпромгиз, 1961.

6. Гавриленко Т.П., Топчиан-М.Е. Исследование динамической прочности воды на разрыв. "Прикладная механика и техническая физика", 1966, № 4.

7. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. Пер.с англ. М., Физматгиз, 1963.

УДК 621.7.044.7

Г.М.Лебедев, Г.В.Исарович, Л.С.Вислова

ШТАМПОВКА-ГИБКА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТА
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ (ИМП)

В заготовительно-штамповочном производстве для получения деталей из листовых заготовок широко применяется операция гибки. При штамповке деталей гибка применяется как отдельная операция, а также сопутствует ряду формовочных операций.

С применением импульсных способов штамповки для технологических процессов гибки и гибки-формовки листовых заготовок возникла необходимость теоретического и экспериментального исследования процесса высокоскоростного пластического изгиба, а также разработки рекомендаций по определению технологических параметров.

Деформирование металлов в условиях импульсного нагружения имеет свои особенности. Заключаются они в том, что металл при деформировании кроме внешних нагрузок испытывает действие инерционных усилий. Вследствие этого возникает ряд явлений, в частности локализация области пластической деформации, изменение механических свойств металла за счет изменения температуры вследствие выделяемого тепла при пластической деформации, которые приводят к изменению технологических параметров.

В данной статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований механизма и кинематики деформирования заготовки, работы деформирования, поля деформаций, а также технологических возможностей операции гибки (минимальные радиусы, минимальные высоты загибаемых бортов, величины упругой отдачи материала).