

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).

Процесс высокоскоростного пластического изгиба изучался на примере магнитно-импульсной штамповки плоской детали с двумя параллельными широкими прямыми бортами. Изгиб бортов производился по схеме консольной гибки на формблочке под действием импульсной поперечной нагрузки  $P(t)$  (рис.1). Экспериментальные исследования проводились на образцах прямоугольной формы из листовых алюминиевых сплавов с высотой борта 20-25 мм, относительным радиусомгиба  $r_0/s = 3$ , с малкой, равной  $0^\circ$ . Штамповка образцов осуществлялась на сконструированной в КуАИ магнитно-импульсной установке МИУ-15 с помощью одновиткового индуктора.

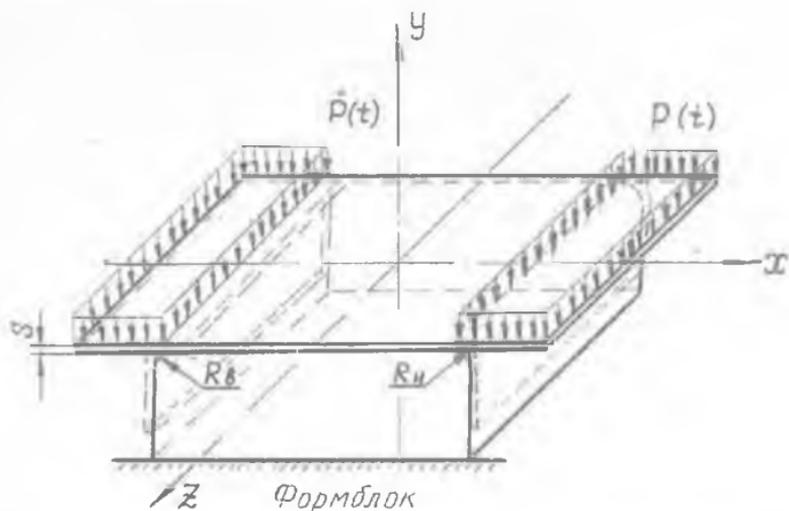
Для исследования механизма и кинематики деформирования заготовки применялся высокоскоростной фоторегистратор типа СФР-2М. Гибка образцов (материал АМГ6М, толщина 1 мм, высота борта 21 мм, радиусгиба 3 мм) осуществлялась при оптимальной энергии 2,31кДж которая обеспечивала полное и нормальное деформирование заготовок. Съёмка процессов гибки производилась с частотой 80-125 тыс.кадров в секунду.

Анализ и обработка полученных кинограмм позволили выявить кинематические особенности деформирования борта, установить изменение во времени его пространственной конфигурации, определить скорости перемещения характерных точек борта А, В и С (рис. 2). Все эти точки расположены на поверхности борта: А- у кромки борта на высоте 19 мм, точка В - на высоте 10 мм и точка С - в месте сопряжения прямолинейного и криволинейного участков борта.

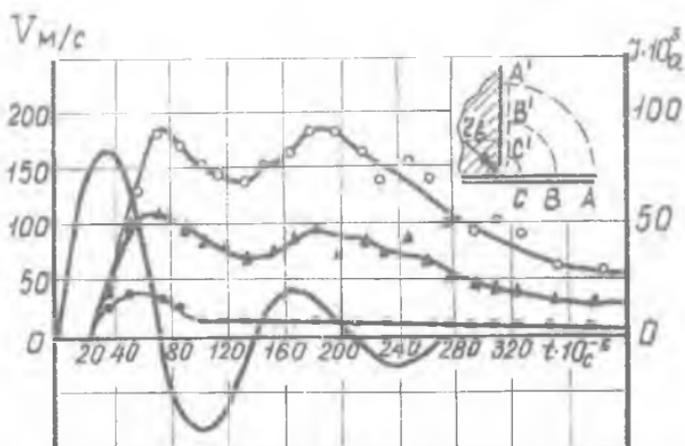
Было установлено, что деформирование заготовки начинается не с момента появления тока в индукторе, а только через некоторый промежуток времени.

Исследование показало, что при оптимальном расположении заготовки относительно индуктора и нагружении образующая борта близка к прямой во время деформирования.

Как видно из графика, характер изменения скоростей перемещения точек А, В, С идентичен. В начальной стадии нагружения наблюдается некоторая задержка движения борта - порядка  $20 \cdot 10^{-6}$ - $25 \cdot 10^{-6}$ с, а затем - резкое возрастание скорости до максимального значения и последующее снижение скорости перемещения по мере увеличения углагиба. Время разгона борта составляет  $20 \cdot 10^{-6}$ - $40 \cdot 10^{-6}$ с. Для точек А и В последующее понижение и заметное колебание скорости вызвано резким уменьшением давления импульсного магнитного поля в связи



Р и с. 1. Схема гибки-штамповки детали с двумя параллельными бортами под действием импульсной нагрузки  $P(t)$



Р и с. 2. Зависимость скоростей перемещения точек А, В, С от времени  $v = f(t)$  при гибке борта и осциллограмма тока  $I$

с уменьшением величины тока в заготовке и изменением его направления при колебательном характере разряда установки, а также с увеличением зазора между индуктором и бортом в процессе деформирования. Некоторое увеличение скорости концевой части борта (точка А) выше максимального значения при разгоне связано с воздействием переместившейся волны изгиба от ребрагиба к свободному концу. Общее время деформирования борта при гибке составило  $360 \cdot 10^{-6}$  с. Оно значительно превышает время первого полупериода тока. Время разгона борта заготовки составляет примерно 10-15% от продолжительности всего процесса деформирования.

Процесс деформирования можно разбить на несколько этапов. В начальный момент в системе индуктор-заготовка возникает и возрастает давление ИМП. Борт заготовки условно остается в покое. Второй этап начинается с ускоренного поступательного перемещения борта в направлении действующей силы. Скорость борта достигает максимальной величины. С момента окончания действия на борт заготовки импульса силы начинается третий этап - деформирование борта под действием инерционных сил. На заключительном этапе борт заготовки ударяется о поверхность формблока. Сила удара пропорциональна оставшейся кинетической энергии.

Таким образом, при импульсном нагружении заготовки подводимая энергия тратится на сообщение элементам борта кинетической энергии и на формоизменение деформируемого элемента.

Работа пластического высокоскоростного деформирования металла в общем случае выражается зависимостью [1]:

$$A = \iiint_V \int_t (E_0 + L_0) dV dt, \quad (1)$$

- где  $E_0$  - функция диссипации энергии, которая характеризует энергию, расходуемую непосредственно на формоизменение детали;
- $L_0$  - скоростная функция, характеризующая ту часть энергии, которая идет на сообщение кинетической энергии деформируемому объему;
- $V$  - объем деформируемого металла;
- $t$  - время.

Для гибки прямого борта функция диссипации энергии и скоростная функция приводятся к выражениям:

$$E_0 = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{R_H + z\delta} \left(1 - \frac{R_H z\delta}{z^2}\right); \quad (2)$$

$$L_0 = \frac{\rho v_0}{(R_H + z\delta)^2} \frac{dv_0}{dt} \left(z^2 + 2R_H z\delta + \frac{R_H^2 z\delta^2}{z^2} + 4z^2 \varphi^2\right), \quad (3)$$

где  $R_H, z\delta$  - радиусы кривизны наружной и внутренней поверхности изгибаемой части заготовки;

$z, \varphi, z$  - текущие цилиндрические координаты;

$v_0$  - скорость изменения радиусов кривизны внутренней и наружной поверхности изгибаемой части заготовки;

$\sigma_s$  - предел текучести;

$\rho$  - плотность.

С учетом зависимостей (2) и (3) уравнение для определения работы деформирования можно представить в виде

$$A = \iiint_V \left\{ \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{R_H + z\delta} \left(1 - \frac{R_H z\delta}{z^2}\right) + \frac{\rho v_0}{(R_H + z\delta)^2} \frac{dv_0}{dt} \left(z^2 + 2R_H z\delta + \frac{R_H^2 z\delta^2}{2} + 4z^2 \varphi^2\right) \right\} dV dt. \quad (4)$$

После интегрирования по объему получено выражение

$$A = \int_t \left\{ \left[ \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \frac{v_0}{R_H + z\delta} \left( \frac{R_H^2 - z\delta^2}{2} - R_H z\delta \ln \frac{R_H}{z\delta} \right) \frac{\pi}{2} z \right] + \frac{\rho v_0 z}{(R_H + z\delta)^2} \frac{dv_0}{dt} \frac{\pi}{2} \left[ \frac{R_H^4 - z\delta^4}{4} + R_H z\delta (R_H^2 + z\delta^2) + R_H^2 z\delta^2 \ln \frac{R_H}{z\delta} + (R_H^4 - z\delta^4) \frac{\pi^2}{12} \right] \right\} dt \quad (5)$$

Из приведенного уравнения видно, что знание механических характеристик, геометрических параметров и скоростей позволяет определить работу деформирования элементарного объема материала. Производя интегрирование по времени, можно получить полную работу, затраченную в процессе деформирования.

При инженерных расчетах работу деформации при гноте прямолинейного борта приближенно удобнее определять по формуле

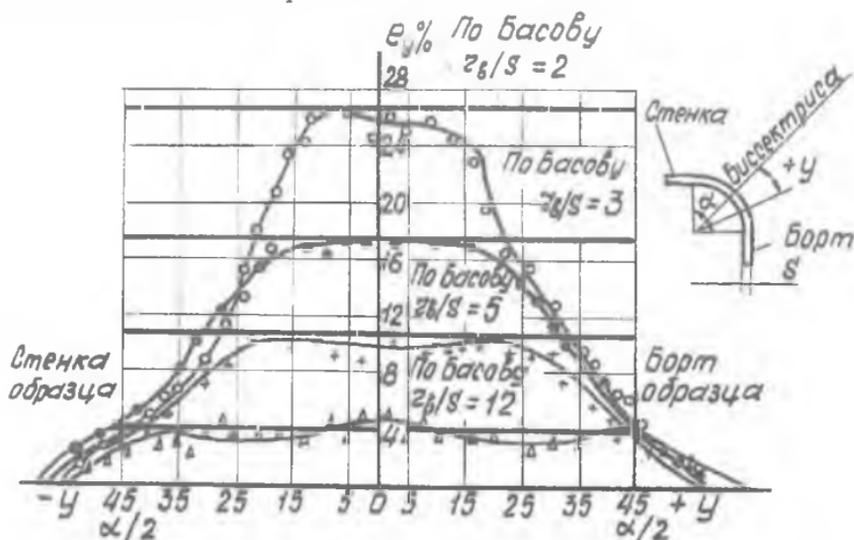
$$A = \frac{\kappa}{(1+n)} \left[ \frac{S}{4(z\delta + S/2)} \right]^{1+n} V, \quad (6)$$

где  $K$  и  $\mu$  - постоянные величины для данного материала, характеризующие интенсивность упрочнения;

$S$  - толщина материала заготовки.

При изучении процессов гибки, в связи с большой неоднородностью напряженно-деформированного состояния деформируемого материала, вводят ряд упрощений. Одно из упрощений при анализе упруго-пластического изгиба заключается в принятии гипотезы плоских сечений [2] и др., которая позволяет выразить деформации растяжения и сжатия в тангенциальном направлении  $\epsilon_y$  через радиусы кривизны нейтральной поверхности и расстояние от рассматриваемой точки до нейтральной поверхности.

Были проведены эксперименты с целью проверки справедливости гипотезы плоских сечений и выяснения действительного распределения тангенциальных деформаций по поверхности листа в зоне изгиба при импульсном нагружении. Образцы из материала Д16 АМ толщиной 1 и 2 мм с нанесенными рисками шагом 0,5 мм изгибались на угол  $90^\circ$  с помощью энергии ИМП на формблоках с относительными радиусамигиба  $z_f/s = 2, 3, 5$  и 12. Полученные кривые распределения относительных тангенциальных деформаций по наружной поверхности изогнутого листа показаны на рис. 3.



Р и с.3. Кривые распределения относительных тангенциальных деформаций:

○ -  $\frac{z_f}{s} = 2$ ; ● -  $\frac{z_f}{s} = 3$ ; + -  $\frac{z_f}{s} = 5$ ; △ -  $\frac{z_f}{s} = 12$

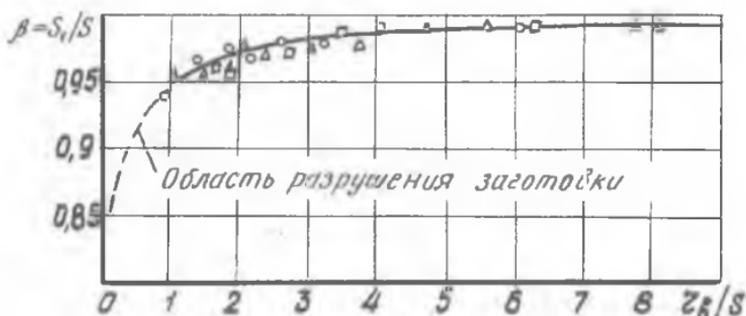
Для сравнения на этом же графике представлены данные Н.Н.Басова [3], рассчитанные для таких же значений относительных радиусов при допущении гипотезы плоских сечений.

Сопоставление показывает, что экспериментальные кривые, построенные для случая гибки листовых образцов с использованием энергии ИМП, в средней части почти совпадают с расчетными прямыми Н.Н.Басова, а также очень близки к аналогичным экспериментальным кривым, полученным А.Д.Комаровым при штамповке-гибке резной [4]. Для всех экспериментальных кривых характерно то, что деформация не заканчивается на изогнутой части образца, а распространяется и на плоские участки тем дальше, чем меньше относительный радиусгиба.

Для технологических расчетов, в частности для определения размеров заготовок изогнутых деталей, применяются формулы, в которые входит коэффициент утонения [5] и др. Коэффициент утонения представляет собой отношение толщины материала после изгиба к первоначальной толщине  $\beta = \frac{S_1}{S}$  и определяется, как правило, экспериментально.

Для определения коэффициентов утонения при гибке с использованием энергии ИМП были проведены экспериментальные исследования на листовых образцах из материала Д16АМ, Д16АТ и АМг6М толщиной 1 и 2 мм. Гибка образцов производилась на угол  $90^\circ$  с относительными радиусами  $z_g/S = 1,0 - 8$  при оптимальной энергии для каждой марки материала и толщины.

По полученным экспериментальным данным построен график коэффициентов утонения  $\frac{S_1}{S} = f(z_g/S)$  (рис. 4).



Р и с.4. График коэффициентов утонения  $S_1/S = f(z_g/S)$  для материалов АМг6М, Д16АМ; Д16АТ

Из рисунка видно, что коэффициент утонения для сплавов марок Д16АМ, Д16АТ и АМг6М при прочих равных условиях примерно одинаков. Изменение величины коэффициента наблюдается при малых относительных радиусахгиба. С увеличением кривизны утонение растет. Таким образом, оказалось, что коэффициент утонения при гибке с использованием энергии ИМП мало чем отличается от его значений, полученных при штамповке-гибке обычными методами.

При изучении процессов гибки большое внимание уделялось вопросам качества и точности получаемых деталей. Величина упругой отдачи при гибке с помощью энергии ИМП зависит от следующих факторов: величины упругой деформации изгибаемого листа в зоне изгиба, величины упругой деформации материала борта и материала формблока при соударении, величины кинетической энергии борта в момент полного соприкосновения с поверхностью формблока. Последние три фактора тесно связаны между собой, и их влияние зависит от количества подведенной энергии.

Упругая отдача материала при гибке исследовалась на образцах из материала Д16АМ, АМг6М и Д16АТ толщиной 0,5; 1 и 2 мм при  $z/s \approx 3$ . Длина заготовок выбиралась так, чтобы высота борта составляла 20 мм. Каждый опыт повторялся 3 раза.

Было установлено, что величина угла отскока борта значительно возрастает при увеличении подводимой энергии до сверх оптимального значения. Например, при гибке образца из АМг6М толщиной 1 мм на стальном формблоке увеличение подводной энергии в 1,5 раза сверх оптимальной привело к возрастанию угла отскока примерно в 1,7 раза. Более резкое возрастание угла отскока с увеличением энергии наблюдается на образцах толщиной 0,5 мм, на которых появляется искажение прямолинейности формы борта из-за коробления.

При изучении гибки прямолинейных бортов с использованием энергии ИМП определялись углы отскока, которые на 10-20% были меньше значения углов пружинения при штамповке-гибке резиной и в штампах [4], [5], [6] и др. Эксперименты показали, что направление волокон материала по отношению к оси изгиба не оказывает существенного влияния на величину угла отскока.

Весьма важным параметром, определяющим технологические возможности процесса гибки, является минимально допустимый радиус гибки  $z_{min}$ . Минимальные радиусыгиба устанавливаются по предельно допустимым деформациям крайних волокон. Как отмечается в [5],

минимально допустимый радиус зависит от ряда факторов: температуры деформирования и состояния материала, углагиба, расположения осигиба относительно направления волокна в заготовке, состояния кромок заготовки в зонегибки и от скорости деформирования.

Были проведены исследования по определению минимальных радиусовгиба при штамповке-гибке с использованием энергии ИМП. Гибке на угол  $90^{\circ}$  подвергались образцы из материала Д16АМ, Д16АТ и АМГ6М толщиной 0,5; 1,0 и 2 мм.

Экспериментально было установлено, что минимальные радиусыгиба несколько меньше, чем при обычной штамповке. Для материалов АМГ6М и Д16АМ толщиной 2 мм были получены  $r_{min} = 1,5$  мм, а для Д16АТ толщиной 2 мм -  $r_{min} = 3$  мм. Для исследованных материалов расположение оси изгиба по отношению к направлению волокон не изменяет значений  $r_{min}$ .

Разрушение образцов при гибке с помощью энергии ИМП происходит с наружной стороны. Начинается оно с появления трещины на биссектрисе угла в средней части заготовки. У исследуемых алюминиевых сплавов разрушению предшествует появление, так называемой, "апельсиновой корки" - ярко выраженной текстуры деформации.

Для установления возможностигибки минимально допустимых низких бортов с помощью энергии ИМП были проведены эксперименты на заготовках из материала Д16АМ и АМГ6М толщиной 0,5; 1; 1,5 и 2 мм. Результаты экспериментов показали, что с помощью энергии ИМП можно получать борта с любыми минимальными высотами - равными радиусугиба борта и менее, что невозможно при штамповке эластичными средами даже со сверхвысокими давлениями (более  $1000 \text{ кг/см}^2$ ).

## Л и т е р а т у р а

1. А л е к с е е в Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением прокаткой и резанием. ХГУ, 1969.
2. Л ы с о в М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методомгибки. М., "Машиностроение", 1966.
3. Б а с о в Н.Н. Определение размеров листовых деталей и рабочих частей гибочных штампов. "Исследование в области оборудования и технологии штамповки", Сб. Московского станкостроительного института, № 4, ГИТИ, "Машиностроение", 1958.
4. Р а з у м и х и н М.И., К о м а р о в А.Д. Определение упругой отдачи листовых материалов при штамповке-гибке резиной прямолинейных бортов. "Кузнечно-штамповочное производство", 1962, № 9.

5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке, М., "Машиностроение", 1971.

6. Комаров А.Д. Удругающая отдача листовых металлов при гибке в штампах. "Кузнечно-штамповочное производство", 1965, № II.

УДК 621.7.044.7

Ю.П.Курьянов, Ю.М.Овчинников, Д.Н.Лысенко,  
В.А.Глуценков

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ОЖЕВАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК  
ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ (ИМП)

Для ожевальных оболочек из сварных конусных заготовок в зависимости от их габаритов и энергетических параметров магнитно-импульсной установки формообразование ИМП возможно по 5 схемам (рис.1).

Однопереходная и многопереходная штамповки (рис.1,П) изучены достаточно.

Схемы однопереходной многоимпульсной и элементной штамповки (рис.1, Ш, IV) имеют некоторые особенности, обусловленные тем, что контур индуктора

Вид штамповки	Номер схемы	Контурь рабочих поверхностей матриц 1 и индуктора 2	Схемное рабочее положение матрицы, индуктора, заготовки
Однопереходная	I		
Многопереходная в один шаг	II		
Многопереходная многоимпульсная	III		
Комбинированная	IV		
Элементная	V		

Р и с.1. Схемы формообразования ожевальных оболочек ИМП из сварных конусных заготовок