

МНОГОФАКТОРНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ШАЙБ

Судаков П.В.

Тульский государственный университет

Кафедра механики пластического формоизменения им. Н. Демидова

Научный руководитель: д.т.н., проф. Панфилов Г.В.

Разработана и внедрена в производство технология двухпереходной холодной штамповки специальных сферических шайб с высотой, превышающей высоту листовой заготовки, для монтажа волнообразных криволинейных секций металлических водоотводных труб. Спроектирован двухпозиционный двухрядный штамп с автоматической подачей полосы для реализации предлагаемой технологии. Для изготовления сферической шайбы был разработан двухпереходный технологический процесс, при котором на первом переходе необходимо сформировать сферическую и плоскую торцевые поверхности шайбы и осуществить пробивку отверстия. Одной из задач данного перехода является необходимость увеличения высоты шайбы по сравнению с толщиной полосы, из которой она изготавливается. На втором переходе предусматривается вырубка сферической шайбы.

Материал шайбы – марганцовая низколегированная конструкционная сталь 09Г2 (ГОСТ 17066-94). Механические характеристики данного материала приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование механической характеристики	Обозначение	Единица измерения	Величина
Предел текучести	σ_T	МПа	320
Предел прочности	σ_B	МПа	470
Модуль упругости	E	МПа	$2 \cdot 10^5$
Относительное удлинение	δ	%	43

В качестве исследуемых выходных параметров, удовлетворяющих таким требованиям, как статистическая эффективность, возможность их количественной оценки и чувствительность к изменению факторов, примем ширину b кольцевой торцовой плоскости (y_1) и степень заполнения q сферической торцовой поверхности (y_2). Степень заполнения материалом сферической торцовой поверхности полуфабриката первого перехода оценивалась по соотношению площади полуфабриката, вступившей в контакт с рабочей полостью матрицы, к общей площади этой сферической полости матрицы. Оценка (в процентах) производилась по отпечаткам следов контактной поверхности на сферическом участке полуфабриката предварительного перехода. Геометрические параметры шайбы, принятые в качестве выходных параметров, показаны на рис. 1.

Варьируемыми факторами в данном экспериментальном исследовании [1,2] являлись: угол φ конусности заостренной части пробивного пуансона (X_1) и глубина h вдавливания в полосу плоского пуансона (совмещенного с пробивным) предварительного перехода (X_2), формирующего кольцевой плоский торец и перераспределяющего деформируемый материал в сферический участок полуфабриката шайбы.

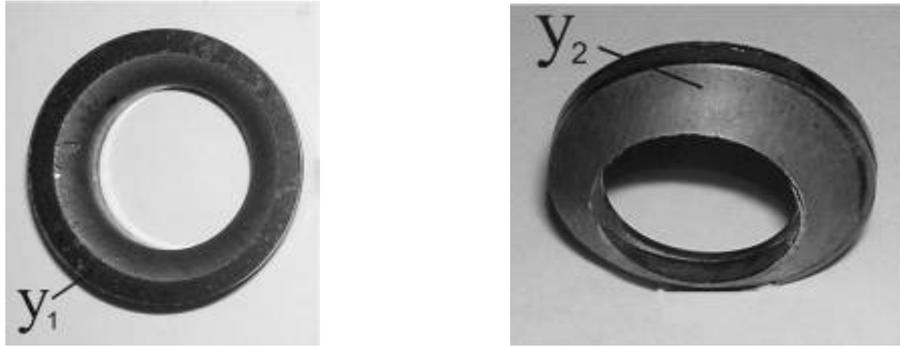


Рис. 1. Принятые выходные параметры: y_1 – ширина кольцевой торцевой плоскости; y_2 - степень заполнения сферической торцевой поверхности

Пробивные пуансоны, используемые в данном многофакторном эксперименте с различными углами конусности заостренного участка, соответствующими различным уровням фактора X_1 , приведены на рис. 2.



Рис. 2. Варианты пробивных пуансонов, соответствующие различным уровням фактора X_1

Принятые значения факторного пространства приведены в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение Фактора	Наименование фактора	Размерность	Область эксперимента			
			Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
X_1	Полный угол конусности заостренной части пробивного пуансона	градус	60	90	120	30
X_2	Глубина вдавливания плоскости пуансона в полосу	мм	0,5	1,0	1,5	0,5

В соответствии с критериями геометрического подобия при планировании и проведении многофакторных исследований предпочтительно использование безразмерных величин факторов и соответствующих им выходных параметров, поэтому, согласно практике моделирования процессов пластической деформации, толщина s изготавливаемой шайбы (исходной полосы) являлась масштабным фактором.

Варьирование каждого фактора производилось на трех уровнях. Уровни факторов X_i представим в кодовом масштабе F_i значениями 0, 1, 2. В планы входит фиктивная переменная F_0 , необходимая для расчета свободного члена регрессии и имеющая во всех опытах уровень 0. Запись матрицы планирования полного факторного эксперимента 3^2 приведена в таблице 3.

Таблица 3.

№ опыта	F_0	F_1	F_2	F_1F_2	F_1^2	F_2^2
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	1	2	0
3	0	2	0	2	1	0
4	0	0	1	1	0	2
5	0	1	1	2	2	2
6	0	2	1	0	1	2
7	0	0	2	2	0	1
8	0	1	2	0	2	1
9	0	2	2	1	1	1

Значения уровней для эффектов взаимодействий определены сложением уровней взаимодействующих факторов и делением суммы на число уровней варьирования факторов в эксперименте. Остаток от деления дает значения уровня. Приведенный выше кодированный масштаб применяется при составлении планов, а для обработки данных эксперимента применяют другой кодированный масштаб.

Искомую математическую модель исследуемого процесса аппроксимируем следующим полиномом

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 \quad (1)$$

X_i - факторы в натуральном масштабе, т.е. в МПа, м, кг и т.д.

В кодированном масштабе модель представим в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}z_1 + b_{22}z_2, \quad (2)$$

где x_i - линейная функция от X_i ; z_i - квадратичная функция от X_i .

Приведем зависимости, необходимые для перехода от натуральных значений факторов к кодированным [3,4].

Запишем линейную функцию от X_i в виде

$$x_i = k_i(X_i + A_i), \quad (3)$$

где k_i и A_i - константы.

$$A_i = -\frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{iu} \quad (4)$$

После подсчета A_i коэффициенты k_i подбираем таким образом, чтобы уровни x_i представляли собой небольшие целые числа.

Далее запишем z_i , как квадратичную функцию от x_i ,

$$z_i = k'_i \left(x_i^2 + a_i x_i + c_i \right), \quad (5)$$

где k'_i , a_i , c_i - константы.

$$c_i = -\frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{i_u}^2; \quad a_i = -\frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^3}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2}. \quad (6)$$

Коэффициенты k'_i выбираем из условия, чтобы уровни z_i представляли собой небольшие целые числа.

Расчет средних значений выходных параметров для каждой комбинации факторов (строки в матрице планирования) и построчных дисперсий по результатам параллельных опытов проведем по формулам

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (7)$$

Для расчета кодированных значений факторов с помощью принятых численных натуральных значений их уровней и таблицы 3 приведем столбцы матрицы планирования, определяющие комбинации факторов (условия проведения) для каждого опыта (таблица 4).

Таблица 4

Номер опыта	X_1	X_2	Порядок реализации	Номер опыта	X_1	X_2	Порядок реализации
1	60	0,5	3	6	120	1,0	9
2	90	0,5	7	7	60	1,5	5
3	120	0,5	2	8	90	1,5	6
4	60	1,0	8	9	120	1,5	4
5	90	1,0	1				

По формуле (4) определим константу A_i , входящую в зависимость (3):

$$A_1 = -\frac{810}{9} = -90; \quad A_2 = -\frac{9}{9} = -1.$$

Подберем коэффициенты k_i : $k_1 = \frac{1}{30}$; $k_2 = 2$.

С учетом полученных значений зависимость (3) принимает вид

$$x_1 = \frac{1}{30}(X_1 - 90); \quad x_2 = 2(X_2 - 1) \quad (8)$$

Зависимость (8) позволяет найти кодированные значения уровней, которые для обоих факторов в данном конкретном случае будут одинаковыми: нижний уровень $x_i^n = -1$; основной (нулевой) уровень $x_i^0 = 0$; верхний уровень $x_i^e = 1$.

По формуле (6) определим константы c_i и a_i , входящие в зависимость (5):

$$c_{1,2} = -\frac{6}{9} = -\frac{2}{3}; \quad a_{1,2} = 0.$$

Подберем коэффициенты k'_i : $k'_1 = k'_2 = 3$.

С учетом полученных значений зависимость (5) принимает вид

$$z_{1,2} = 3 \left(x_{1,2}^2 - \frac{2}{3} \right) \quad (9)$$

Зависимость (9) позволяет найти кодированные значения уровней z_i , как квадратичной функции от кодированных значений факторов x_i , которые для обоих факторов в данном конкретном случае будут одинаковыми: нижний уровень $z_i'' = 1$; основной (нулевой) уровень $z_i^0 = -2$; верхний уровень $z_i^s = 1$.

Таким образом, совершен переход к кодированному масштабу, в котором план эксперимента симметричен и ортогонален.

План эксперимента в кодированном масштабе представлен в таблице 5.

Таблица 5

№ опыта	Варьируемые факторы						Выходные параметры									
	x_0	x_1	x_2	z_1	z_2	$x_1 x_2$	y_1					y_2				
							y_1^1	y_1^2	y_1^3	\bar{y}_1	$S_{y_1}^2$	y_2^1	y_2^2	y_2^3	\bar{y}_2	$S_{y_2}^2$
1	1	-1	-1	1	1	1	3,1	3,1	3,4	3,2	0,173	61	61	64	62	1,7 3
2	1	0	-1	-2	1	0	1,9	2,0	2,1	2,0	0,1	44	45	43	44	1,0
3	1	1	-1	1	1	-1	2,6	2,5	2,5	2,4	0,173	53	53	53	53	0
4	1	-1	0	1	-2	0	4,6	4,6	4,6	4,6	0	82	79	82	81	1,7 3
5	1	0	0	-2	-2	0	3,2	3,2	3,5	3,3	0,173	64	66	66	65	1,7 3
6	1	1	0	1	-2	0	4,0	3,6	3,5	3,7	0,265	71	75	76	74	2,6 5
7	1	-1	1	1	1	-1	5,9	6,0	6,1	6,0	0,1	101	101	101	101	0
8	1	0	1	-2	1	0	4,9	4,5	4,4	4,6	0,265	84	85	86	85	1,0
9	1	1	1	1	1	1	4,9	5,2	5,2	5,1	0,173	93	96	96	95	1,7 3

Для проведения экспериментальных исследований был использован однорядный двухпозиционный штамп, конструкция и работа которого описаны в разделе 3. Он спроектирован для завершающей экспериментальной отработки технологических процессов и рабочего инструмента, а также для изготовления мелких партий сферических шайб. Фотографии штампа представлены на рис. 6.



Рис. 6. Однорядный двухпозиционный штамп, используемый для проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на предприятии ОАО «Алексинстройконструкция» с использованием механического прессы модели КД2126Е. Скоростной параметр деформирования этого прессы (140 ходов в минуту) соответствует скорости перемещения ползуна основного прессового оборудования, на котором изготавливают сферические шайбы. Технологическая сила – 400кН, регулировка хода ползуна – 70 мм. Для повышения достоверности результатов при одной и той же комбинации факторов проводилось три параллельных опыта, порядок реализации опытов выбран по таблице случайных чисел. Штамповая оснастка и рабочий инструмент первого перехода приведены на рис. 7, а второго перехода – на рис. 8.



Рис. 7. Штамповая оснастка и инструмент первого перехода



Рис. 8. Штамповая оснастка и инструмент второго перехода

При реализации экспериментов с минимальным углом конусности $X_1 = 60^\circ$ заостренной части пробивного пуансона (рис. 9) на первом переходе наблюдается проколка с частичным разрушением отхода перед пробивкой отверстия. Это приводит к тому, что материал заготовки незначительно затягивается в полость матрицы перед пробивкой и, как следствие, при наиболее благоприятных условиях для качественного формообразования сферической поверхности и ширины кольцевой торцевой плоскости шайбы качество поверхности отверстия после пробивки – наихудшее. Текстуальный анализ кольцевого шлифа со стороны сферической поверхности шайбы показал, что трещины частично проникают и в тело шайбы, что отрицательно скажется на прочности соединения при долговременном нахождении трубы в грунте.



Рис. 9. Отштампованная шайба и отход пробивки отверстия при минимальном угле конусности $X_1 = 60^\circ$ заостренной части пробивного пуансона

На рис. 10 показано сквозное проникновение трещин в материал отхода после пробивки, что также подтверждает их продолжение в тело шайбы.



Рис. 10. Характер проникновения макротрещин в материал отхода

Использование пуансонов с углом конусности $X_1 = 90^\circ$ (рис. 11) обуславливает близкое к максимальному уменьшение ширины плоского торцового кольца и ухудшение качества заполнения сферической поверхности шайбы. При этом качество поверхности пробитого отверстия значительно повышается.

Как видно из рис.11, при данном угле конусности пробивного пуансона проколки отхода не наблюдается, а происходит лишь образование макротрещины.



Рис. 11. Отштампованная шайба и отход пробивки отверстия при угле конусности $X_1 = 90^\circ$ заостренной части пробивного пуансона

Пробивные пуансоны с наибольшим значением угла конусности (рис.12) обеспечивают по сравнению с предыдущим вариантом комбинации факторов увеличение качества заполнения материалом сферической поверхности шайбы, сопровождающееся соответствующим увеличением ширины плоского торцового кольца.



Рис. 12. Отштампованная шайба и отход пробивки отверстия при максимальном угле конусности $X_1 = 120^\circ$ заостренной части пробивного пуансона

Очевидно, что увеличение глубины вдавливания в полосу плоского торца пуансона первого перехода однозначно приводит к увеличению плоского торцового кольца шайбы и качества заполнения ее сферической поверхности, а также к уменьшению общей высоты шайбы.

Поскольку при переходе к кодированному масштабу условия симметричности и ортогональности плана эксперимента были соблюдены, коэффициенты регрессии модели (2) рассчитываем по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{i_u} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2}, \quad (10)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, k$ - номер фактора.

При подсчете дисперсии выходного параметра квадрат разности между значениями x_i и средним значением из n повторных наблюдений \bar{x} (7) нужно просуммировать по числу опытов в матрице планирования N , а затем разделить на $N(n-1)$

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(n-1)}. \quad (11)$$

Формулой (11) можно пользоваться лишь в случае, если все построчные дисперсии однородны, т.е. среди них нет таких, которые бы значительно превышали остальные. Поскольку во всех точках плана число повторных опытов одинаково, для проверки однородности дисперсий воспользуемся критерием Кохрана [5]. Проверку значимости коэффициентов регрессии проведем с помощью критерия Стьюдента.

После расчета коэффициентов регрессии уравнение модели (2) принимает вид

$$y_1 = 3,88 - 0,43x_1 + 1,35x_2 - 0,0025x_1x_2 + 0,29z_1 + 0,0055z_2,$$

а после проверки значимости коэффициентов регрессии:

$$y_1 = 3,88 - 0,43x_1 + 1,35x_2 + 0,29z_1. \quad (15)$$

$$y_2 = 73,22 - 3,5x_1 + 20,5x_2 + 0,5x_1x_2 + 4,28z_1 - 0,78z_2,$$

а после проверки значимости коэффициентов регрессии:

$$y_2 = 73,22 - 3,5x_1 + 20,5x_2 + 0,5x_1x_2 + 4,28z_1. \quad (3.16)$$

Далее проводим проверку адекватности (точности) полученных уравнений регрессии (моделей), которая состоит в выяснении соотношения между дисперсией адекватности $S_{ад}^2$ и дисперсией воспроизводимости S_y^2 с помощью F-критерия Фишера.

Полученные уравнения (15) и (16) записаны в кодированном масштабе и неудобны для практического использования. Для перевода их в натуральный масштаб используем уравнения (8) и (9). В начале члены, содержащие Z_1 , раскрываем в форме функции от X_1 , а затем все члены раскрываем в форме функции от X_1 и X_2 . В процессе раскрытия выражений приводим подобные члены.

Ширина кольцевой торцовой плоскости сферической шайбы определяется по уравнению

$$b = 9,72 - 0,1883\phi + 2,7h + 0,00096 \phi^2, \quad (19)$$

где ϕ - угол конусности заостренной части пробивного пуансона;

h - глубина вдавливания в полосу плоского пуансона.

Степень заполнения сферической торцовой поверхности шайбы (в процентах) определяется по уравнению

$$q = 154,22 - 2,7347\varphi + 38h + 0,03335 \varphi h + 0,01412 \varphi^2. \quad (20)$$

С помощью уравнения (19) построим графические зависимости ширины кольцевой торцевой плоскости от угла конусности заостренной части пробивного пуансона и глубины вдавливания в полосу плоского пуансона первого перехода, а с помощью уравнения (20) – графические зависимости качества заполнения сферической поверхности шайбы от этих же факторов.

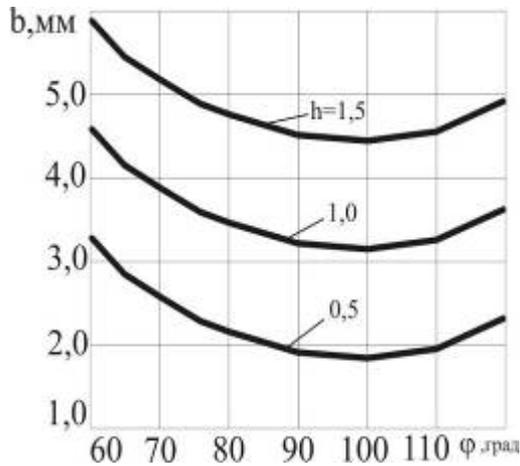


Рис.13. Зависимость степени заполнения сферической поверхности шайбы от угла φ конусности пробивного пуансона для различных значений глубины h вдавливания плоского торца пуансона первого перехода.

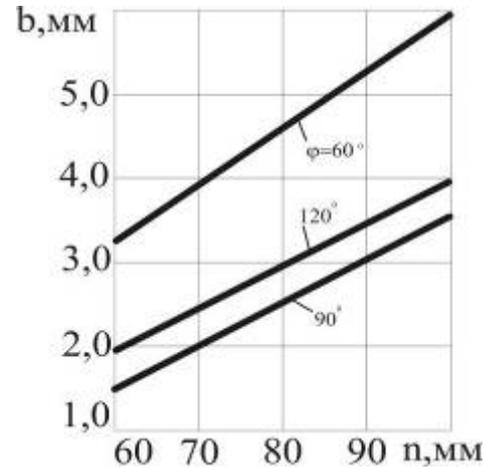


Рис.14. Зависимость степени заполнения сферической поверхности шайбы от глубины h вдавливания плоского торца пуансона первого перехода для различных значения угла φ конусности пробивного пуансона.

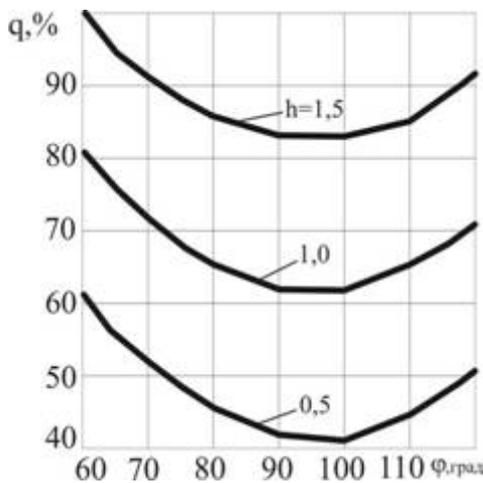


Рис.15. Зависимость ширины кольцевой торцевой плоскости шайбы от угла φ конусности заостренной части пробивного пуансона для различных значений глубины h вдавливания плоского торца пуансона первого перехода.

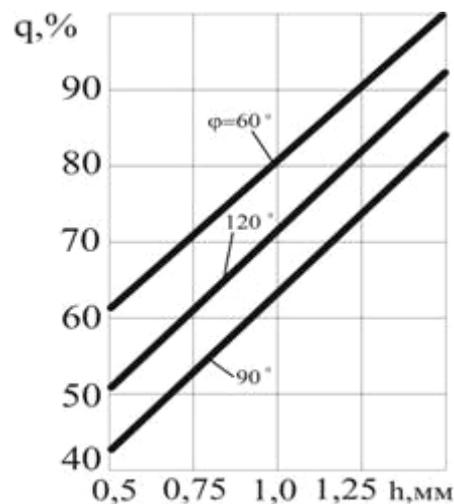


Рис.16. Зависимость ширины кольцевой торцевой плоскости шайбы от глубины вдавливания плоского торца пуансона первого перехода для различных значений угла φ конусности заостренной части пробивного пуансона.

Анализ уравнений (19), (20) и полученных графических зависимостей, иллюстрирующих эти уравнения, показал, что для штамповки сферических шайб с размерами, указанными на рис.3.3, целесообразно использовать пробивной пуансон с углом конусности заостренной части 120° и назначать глубину вдавливания в полосу плоского торца пуансона первого перехода, равную 1 мм.

Использование пробивных пуансонов с небольшими углами конусности, также обеспечивающих хорошее качество заполнения сферической поверхности шайбы и необходимую ширину кольцевой торцовой плоскости, нецелесообразно из-за неудовлетворительного качества поверхности пробитого отверстия и наличия трещин в получаемой шайбе.

Литература

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: «Наука», 1976. – 279с.
2. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов. М.: «Наука», 1970. – 287 с.
3. Дмитриев А.М., Капустин А.И. Технология листовой штамповки. М.: «НПП – Темп»,1993. – 34 с.
4. Григорович В.Г., Кершенбаум В.Я., Козочкин Д.А., Шильдин В.В., Юдин С.В. Информационно-статистические методы в технологии машиностроения. Пособие по обработке результатов эксперимента. М.: «Нефть и газ»,2000. – 183с.