

## **Аналитическое исследование параметров точности вытяжных операций пневмоударной штамповки**

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка  
ОАО «Крюковский вагоностроительный завод»*

Приведены результаты аналитического исследования параметров точности вытяжных операций гидроударной штамповки листовых деталей на основе разработанной математической модели объекта с применением метода многофакторного эксперимента. Определены оптимальные условия процесса вытяжки и оценены константы доминирующих факторов, влияющих на параметры точности штампуемых деталей.

**Ключевые слова:** гидроударная вытяжка жидкостью, точность, факторы влияния, математическая модель, исполнительные размеры штампа.

**Введение.** Важнейшей задачей различных отраслей машиностроения, самолетостроения, приборостроения и других является выпуск высококачественных изделий при одновременном повышении производительности труда, сокращении их металло-, энерго- и трудоемкости производства. Этим требованиям в полной мере отвечают процессы обработки металлов давлением и, в частности, процессы импульсных методов формообразования, отличающихся значительной концентрацией энергии, высокими скоростями деформирования материала и давления в зоне обработки, что положительно сказывается на качестве штампованных деталей.

Перспективным направлением, открывающим широкий спектр возможностей создания эффективных технологий, является метод формообразования на основе технологии и оборудования пневмоударной штамповки жидкостью. Преимущества этого метода – экологичность, безопасность, широкие технологические возможности, низкие энергетические и материальные затраты, универсальность, мобильность и высокая степень автоматизации [1 – 3].

**Формулирование проблемы.** В то же время реализации на практике технико-экономических преимуществ и положительных особенностей метода пневмоударной штамповки препятствует отсутствие научно обоснованных данных по возможностям этого метода штамповки обеспечить необходимую точность при выполнении операций глубокой вытяжки.

Широкое внедрение пневмоударной штамповки для выполнения формообразующих операций листовой штамповки тонколистовых деталей сдерживается из-за отсутствия научно обоснованных данных возможностям этого метода обеспечить необходимую точность.

**Решение проблемы.** Для определения возможностей операций вытяжки пневмоударной штамповки обеспечить необходимую точность проведены специальные исследования с использованием «метода случайного баланса».

На основании анализа условий эксплуатации установок для пневмоударной штамповки, а также результатов экспериментальных исследований, изложенных в работах [1 – 3], при аналитическом исследовании параметров точности процесса пневмоударной вытяжки были выбраны следующие параметры: величины отклонений геометрических размеров и формы штампуемых деталей с учетом

доминирующих факторов, влияющих на величину этих параметров.

Для решения задач такого типа использовали математическую теорию планирования эксперимента [4 – 5], которая позволяет сократить объем работ, отобрать существенные факторы, разработать теоретические модели объекта и оценить их константы, определить оптимальные условия процесса. Решение задачи в данном случае сводится к нахождению математической модели, отражающей связь между входными независимыми переменными и функцией отклика. Например, можно установить связь между конструктивными технологическими особенностями процесса вытяжки и его точностью. Экстремальная задача сводится к поиску таких значений входных параметров, при которых входная функция имеет максимальное или минимальное значение.

Методы планирования эксперимента предполагают кибернетический подход к изучению процессов, внутренние закономерности которых недостаточно ясны ввиду сложности структуры самого объекта, представляя объект исследования в виде «черного ящика» со множеством «входов» (факторы) и «выходов»  $y_i$  (функция отклика, параметр оптимизации, целевая функция).

В нашем случае «черный ящик» представляет собой процесс штамповки со всеми его связями, заданный бесконечно большим количеством дифференциальных уравнений процесса.

Математическое уравнение такого объекта, как правило, неизвестно, поэтому функцию отклика  $y$  можно представить в виде отрезка полинома той или иной степени:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где  $y$  – функция отклика (например, показатель точности штамповки);

$x_i, x_j$  – факторы, влияющие на  $y$ ;  $b_0, b_i, b_{ij}$  – коэффициенты полинома.

Задача состоит в определении величины и знаков коэффициентов полинома.

Необходимо, чтобы как факторы, так и функция отклика (параметр оптимизации) удовлетворяли определенным требованиям. Параметр оптимизации должен иметь ясный физический смысл, выражаться числом, иметь область определения (совокупность всех значений при эксперименте) и т.д.

Отбирая факторы, необходимо стремиться сократить окончательный список факторов до минимума, так как даже небольшое сокращение их числа приводит к значительному сокращению опытов. При составлении предварительного списка факторов используем классификатор (табл. 1). Применение априорной информации не противоречит идее «черного ящика». Чем больше будет информации, тем точнее будет составлена модель объекта исследования.

Недостаточное исследование вопроса точности вытяжных операций при пневмоударной штамповки объясняется в значительной степени сложностью и трудоемкостью технике исследования данного вида штамповки, многообразием факторов, во взаимосвязи влияющих на процесс вытяжки.

Поэтому авторами применен «Метод случайного баланса», который использует таблицу случайных чисел для случайного распределения уровня по столбцам.

Окончательный выбор факторов на основе метода экспериментального отсеивания представлен в табл. 2.

Таблица 1

Классификация факторов, влияющих на параметры точности деталей при формообразовании методом пневмоударной штамповки

№ п/п	Наименование	Вид		Характер действия	Степень влияния
		конструктивный	технологический		
1	Материал рабочих частей штампа	+		систематический	существенная
2	Толщина штампуемого материала		+	систематический	доминирующая
3	Механические свойства штампуемого материала		+	систематический	доминирующая
4	Скорость деформирования, усилие и работа по деформированию	+		случайный	существенная
5	Конструкция вытяжной матрицы (радиус матрицы, форма рабочего контура)	+		систематический	доминирующая
6	Диаметр заготовки		+	систематический	доминирующая
7	Усилие прижима заготовки		+	случайный	существенная
8	Масса бойка	+		систематический	доминирующая
9	Диаметр рабочего контура матрицы		+	систематический	доминирующая
10	Смазка заготовки матрицы		+	случайный	существенная
11	Точность установки заготовки	+		случайный	малая

Таблица 2

Исследуемые факторы

$U_0$	Свободный член
$U_1$	Толщина штампуемого материала, мм (нормируется)
$U_2$	Диаметр заготовки, мм (нормируется)
$U_3$	Прочностные характеристики штампуемого материала, МПа (нормируется)
$U_4$	Усилие прижима, Н (нормируется)
$U_5$	Количество отштампованных деталей, тыс. шт. (нормируется)

Перемещения  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_s$  характеризуются так, что каждое из них может принимать только два значения. Факторы их обобщения, а также величины верхней и нижней границ интервала варьирования представлены в табл. 3. Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 4.

Таблица 3

## Факторы, их уровень и интервалы варьирования

Кодированное значение факторов	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
	толщина штампуемого материала	диаметр заготовки	прогнозные характеристики штампуемого материала	усилие прижима	количество отштампованных деталей
Основной уровень (0)	1,5	200	300	25	5000
Интервал варьирования (1)	1	50	100	5	1000
Верхний уровень (+)	2	250	600	20	6000
Нижний уровень (-)	0,5	100	400	15	2000

Таблица 4

## Матрица планирования эксперимента

Номер эксперимента	Факторы					Точность внутреннего диаметра, мкм			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_{cp}$	$Y_p$
	1	2,0	250	600	25	6000	30	32	31,0
2	0,5	100	400	20	5000	20	19	19,5	19,9
3	2,0	250	100	15	2000	8	9	8,5	10,7
4	0,5	100	600	25	6000	25	25	25	24,9
5	2,0	250	400	20	5000	26	28	27	25,7
6	0,5	100	100	15	2000	6	7	6,5	5
7	2,0	250	600	25	6000	32	30	31,0	30,6
8	0,5	100	400	20	5000	18	20	19,0	19,9
9	2,0	250	100	15	2000	10	12	11,0	10,8
10	0,5	100	600	25	6000	23	25	24,0	24,8
11	2,0	250	400	20	5000	25	27	26,0	26
12	0,5	100	100	15	2000	5	6	5,5	4,9

Для исследования выбран следующий параметр точности:  $Y$  – отклонение размеров внутреннего контура вытягиваемой детали, мкм.

Окончательный выбор факторов осуществляли экспериментальным путем. При планировании эксперимента все факторы варьируются в каждом опыте одновременно. Полученная математическая модель в виде полинома позволяет дать количественную оценку влияния каждого фактора на функцию отклика

$$Y_p = \sum b_i \cdot U_j, \quad (2)$$

где  $b_i$  – коэффициенты полинома;  $Y_p$  – функция отклика (показатель точности);  $U_j$  – факторы влияния на  $Y_p$ .

В результате эксперимента функция отклика получается в виде приведенного выше полинома. Определение коэффициентов полинома  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ , а также статистический анализ уравнения проводили по известным формулам так же, как и оценку адекватности модели, т.е. пригодность ее для описания реального процесса. Экстремум параметра оптимизации определяют методом крутого восхождения, или симплекс-методом. После проверки полученного уравнения устанавливают окончательную модель. Абсолютная величина коэффициентов  $b_i$ ,  $b_{ij}$  позволяет количественно оценить эффект влияния каждого фактора. Знаки при коэффициенте указывают на увеличение параметра оптимизации: «плюс» – при повышении значения фактора (по сравнению с нулевым уровнем), а «минус» – при его уменьшении.

При использовании метода планирования многофакторного эксперимента число опытов при достаточной достоверности результатов может быть сокращено в 2 – 5 раз и более.

Рассмотрим построение уравнения регрессии одного параметра

$$x_i = \beta_0 + \beta_i U_i. \quad (3)$$

Обозначим  $x_i$  и  $U_i$  – изменение параметра  $x$  и фактора  $U$ .

Во многих случаях для обобщения наблюдаемой зависимости принята линейная зависимость

$$x = \beta_0 + \beta_i. \quad (4)$$

Образует сумму квадратов отклонений экспериментально полученных значений величины от  $I_i$  линии регрессии.

$$S = \sum_{i=1}^r (x_i - \beta_0 - \beta_i U_i)^2. \quad (5)$$

Будем выбирать значение оценок  $\beta_0$ ,  $\beta_i$  так, чтобы минимизировать сумму  $S$ . Определим  $\beta_0$ ,  $\beta_i$  дифференцированием уравнения (5) по  $\beta_0$ ,  $\beta_i$  и приравниванием частных производных к нулю:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^r (x_i - \beta_0 - \beta_i U_i) = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_i} = -2 \sum_{i=1}^r U_i (x_i - \beta_0 - \beta_i U_i) = 0, \quad (7)$$

откуда имеем

$$\beta_0^y + \beta_i \sum_{i=1}^r U_i = \sum_{i=1}^r x_i, \quad (8)$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^r U_i = \beta_i \sum_{i=1}^r U_i^2 = \sum_{i=1}^r U_i x_i. \quad (9)$$

Эти уравнения называются нормальными, их решение относительно  $\beta_0, \beta_i$  и дает искомые коэффициенты регрессии. Рассмотрим матричный подход к линейной регрессии.

Применение матриц имеет много преимуществ. Как только задача записывается и решается в матричной форме, ее решение можно использовать для любой регрессивной задачи независимо от того, сколько членов содержится в уравнении регрессии.

Введем следующие обозначения:  $\bar{x}$  – вектор наблюдений;  $U$  – матрица независимых переменных;  $\bar{\beta}$  – вектор параметров, подлежащих оцениванию.

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_r \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} i & U_1 \\ i & U_2 \\ \dots & \dots \\ i & U_3 \end{bmatrix}; \bar{\beta} = \begin{bmatrix} \beta \\ \beta_i \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Учитывая, что

$$U^T U = \begin{bmatrix} r & \sum_{i=1}^r U_i \\ \sum_{i=1}^r U_i & \sum_{i=1}^r U_i^2 \end{bmatrix}; \quad (11) \quad U^T x = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^r x \\ \sum_{i=1}^r U_i x_i \end{bmatrix}, \quad (12)$$

нормальные уравнения можно записать как

$$U^T U \bar{\beta} = U^T \bar{x}. \quad (13)$$

Решая это матричное уравнение относительно вектора оценок, получаем

$$\bar{\beta} = (U^T U)^{-1} U^T \bar{x}. \quad (14)$$

Исследуем линейную статистическую систему, имеющую  $m$  входов  $U_1, \dots, U_m$  и один выход  $x$ . Требуется найти линейную модель

$$x = \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \dots + \beta_m U_m. \quad (15)$$

Введем вектор наблюдений  $x_1$ , матрицу независимых переменных  $U$  и вектор параметров  $\bar{\beta}$ :

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_r \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1m} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{r1} & U_{r2} & \dots & U_{rm} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Решив уравнение (14), получим значения коэффициентов  $\beta_i$  для теоретического определения отклонения внутреннего контура детали при выполнении операции вытяжки.

$$\beta_1 = 19,55; \beta_2 = -15,7; \beta_3 = -0,23; \beta_4 = 0,63; \beta_5 = 5,1.$$

Таким образом, расчетная зависимость

$$Y_p = \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \beta_3 U_3 + \beta_4 U_4 + \beta_5 U_5$$

с учетом полученных коэффициентов принимает вид

$$Y_p = 19,55U_1 - 15,7U_2 - 0,23U_3 + 0,63U_4 + 5,1U_5. \quad (17)$$

Проверка зависимости (17) показала, что полученные данные отличаются в пределах 10...12% от расчетных, что вполне допустимо для применения этих зависимостей при разработке технологического процесса, а также для оценки точности штампуемых деталей при эксплуатации штампов. Величины отклонений отштампованных деталей находятся в пределах 7 – 10 -го квалитетов.

Полученные в результате исследований значения величины  $Y$  дают возможность учесть их при разработке технологического процесса, а также на стадии проектирования при расчете исполнительных размеров рабочих частей вытяжных штампов для пневмоударной штамповки.

При пневмоударной штамповке существующие методики расчета исполнительных размеров формообразующих частей инструментальных штампов не могут применяться, так как жесткий пуансон при проведении формообразующих операций отсутствует, а его функции выполняет жидкость. В существующих методиках не учитывают величины отклонений размеров отштампованных деталей под влиянием факторов согласно зависимости (17), что, в свою очередь, не позволяет оценить величины этих отклонений в любой момент времени эксплуатации штампа, прогнозируя их величину.

Поэтому предлагается при беспуансонной штамповке рассчитывать исполнительные размеры вытяжных матриц с учетом результирующей точности штампуемых деталей по следующим зависимостям:

$$D_m = d_\partial + \Delta\partial + y - \delta_m, \quad (18)$$

где  $D_m$  – исполнительный размер матрицы;  $\Delta\partial$  – допуск на изготовление детали;  $y$  – величина отклонения размеров штампуемых деталей под влиянием комплекса доминирующих факторов (17);  $\delta_m$  – допуск на изготовление матрицы;  $d_\partial$  – исполнительный размер детали.

Тогда, после изготовления вытяжного штампа для пневмоударной штамповки размеры отштампованной детали можно определить по зависимости

$$d_{\partial} = D_m - \Delta\partial - y + \delta_m. \quad (19)$$

Обозначив  $D_m^{\phi} = D_m - \Delta\partial + \delta_m$ , получим

$$D_{\partial}^{\phi} = D_m^{\phi} + y, \quad (20)$$

где  $D_m^{\phi}$  – фактический размер вытяжной матрицы после ее изготовления;  $D_{\partial}^{\phi}$  – фактический размер отштампованной детали.

### Выводы

1. Разработана математическая модель объекта с использованием метода многофакторного эксперимента на основе «случайного баланса» действующих факторов, позволяющая сократить объем выполняемой работы, определить оптимальные условия процесса штамповки и оценить константы доминирующих факторов, влияющих на величину этих параметров.

2. Предложена методика расчета размеров формообразующих элементов вытяжных штампов для пневмоударной штамповки с учетом влияния доминирующих факторов на протекание процесса вытяжки деталей.

3. В результате экспериментально-аналитических исследований параметров точности деталей, получаемых вытяжкой методом пневмоударной штамповки, установлено, что точность штампуемых деталей соответствует 7 – 10 м квалитетам.

### Список литературы

1. Пневмоударная и статико-динамическая штамповка сложнорельефных листовых деталей упругими средами [Текст]: моногр. / Е.А. Фролов, А.Я. Мовшович, И.В. Манаенков и др. – Х.: УкрГАЗТ, – Краматорск: ДГМА, 2010. – 287 с.
2. Фролов, Е.А. Пневмоударная штамповка сложнопрофильных листовых деталей [Текст] / Е.А. Фролов, М.М. Буденный, И.В. Манаенков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. пр. НТУ «ХПІ». – Вип. 32. – Х., 2009. – С. 57 – 62.
3. Фролов, Е.А. Показатели качества современных технологических систем импульсного формообразования сложнорельефных деталей [Текст] / Е.А. Фролов // Технологические системы. – 2002. – № 6. – С. 23 – 26.
4. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 282 с.
5. Налимов, В.В. Теория эксперимента [Текст] / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1997. – 207 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович  
Украинская инженерно-педагогическая академия

Поступила в редакцию 02.12.13

## **Аналітичне дослідження параметрів точності витяжних операцій пневмоударного штампування**

Приведены результаты аналитического исследования параметров точности вытяжных операций гидроударной штамповки листовых деталей на основе разработанной математической модели объекта с применением метода многофакторного эксперимента. Определены оптимальные условия процесса вытяжки и оценены константы доминирующих факторов, влияющих на параметры точности штампуемых деталей.

Наведено результати аналітичного дослідження параметрів точності витяжних операцій гідроударного штампування листових деталей на основі розробленої математичної моделі об'єкта із застосуванням методу багатофакторного експерименту. Визначено оптимальні умови процесу витяжки і оцінено константи домінуючих факторів, що впливають на параметри точності деталей, що штампуються.

**Ключові слова:** гідроударна витяжка рідиною, точність, фактори впливу, математична модель, виконавчі розміри штампа.

## **Analytical research in accuracy parameters of extrusion operations under pneumatic mechanical forming**

Analytical research results of extrusion operation accuracy parameters under pneumatic mechanical forming of sheet parts on the basis of developed object mathematical model using a method of multi-factorial experiments have been given. Extrusion procedure optimum conditions of dominating factors producing effect on accuracy parameters of formed parts have been determined and estimated.

**Keywords:** pneumatic mechanical extrusion using a liquid, accuracy, effecting factors, mathematical model, die manufacturing dimension.