

УДК 621.98.21

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ
ВЫТЯЖНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПНЕВМОУДАРНОЙ ШТАМПОВКИ**

©Фролов Е. А.¹, Ясько С. Г.¹, Кравченко С. И.¹, Дерябкина Е. С.²

Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка¹

Украинская инженерно-педагогическая академия²

Інформація про авторів:

Фролов Євгеній Андрійович: ORCID: 0000-0002-9415-1066; naumova_olga1@mail.ru; доктор технічних наук; завідувач кафедри технології машинобудування; Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка; Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, 36011, Україна.

Ясько Стас Георгійович: ORCID: 0000-0001-6228-705X; s.g.yasko@gmail.com; старший викладач кафедри технології машинобудування; Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка; Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, 36011, Україна.

Кравченко Сергій Іванович: ORCID: 0000-0003-3250-8645; 050ser09@i.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри технології машинобудування; Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка; Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, 36011, Україна.

Дерябкина Євгенія Станіславівна: ORCID: 0000-0002-5531-0124; 216464@mail.ru; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Представлены результаты аналитического исследования параметров точности операций вытяжки методом пневмоударной штамповки тонколистовых деталей жидкостью с использованием математической теории планирования эксперимента. Для аналитического исследования точности процесса вытяжки были выбраны следующие параметры штампуемых деталей: величины отклонений геометрических размеров и формы штампуемых деталей с учетом доминирующих факторов, влияющих на величину этих параметров. Представлена классификация факторов, влияющих на параметры точности деталей при формообразовании.

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

Получены значения коэффициентов для теоретического определения отклонений внутреннего контура штампуемых деталей. Разработана методика расчета исполнительных размеров штамповой оснастки, обеспечивающих необходимую точность штампуемых деталей.

Ключевые слова: ударная штамповка; листовая деталь; точность; погрешность; размеры.

Фролов Е. А., Ясько С. Г., Кравченко С. И., Дерябкина Е. С. «Аналітичні дослідження параметрів точності витяжних операцій пневмоударного штампування».

Представлені результати аналітичного дослідження параметрів точності операцій витяжки методом пневмоударного штампування тонколистових деталей рідиною з використанням математичної теорії планування експерименту. Для аналітичного дослідження

точності процесу витяжки були обрані наступні параметри штамуються деталей: величини відхилень геометричних розмірів і форми штамуються деталей з урахуванням домінуючих факторів, що впливають на величину цих параметрів. Представлена класифікація факторів, що впливають на параметри точності деталей при формоутворенні.

Остаточний вибір факторів здійснювався експериментальним шляхом. При плануванні експерименту всі чинники варіюються в кожному досвіді одночасно. Математична модель у вигляді полінома дозволяє дати кількісну оцінку впливу кожного фактора на функцію відгуку.

Отримано значення коефіцієнтів для теоретичного визначення відхилень внутрішнього контуру деталей, які штамуються. Розроблено методику розрахунку виконавчих розмірів штампового оснащення, що забезпечують необхідну точність штампованих деталей.

Ключові слова: ударне штампування; листовая деталь; точність; похибка; розміри.

Frolov E., Jasko S., Kravchenko S., Deryabkina E. “Analytical study of the accuracy of parameters exhaust air percussion stamping operations”.

The results of analytical studies of accuracy parameters of extraction operations by pneumoshock stamping of sheet parts liquid using a mathematical experiment planning theory. For analytical study of the accuracy of the drawing process were chosen following parameters stamped parts: the value of the geometric dimensions and shape deviations stamped parts, taking into account the dominant factors affecting the value of these parameters. The classification of factors influencing the accuracy of the parameters parts in forming.

The final selection of the factors was carried out experimentally. When planning the experiment all factors vary in each experiment simultaneously. Mathematical model of a polynomial allows to quantify the impact of each factor on the response function.

The values of coefficients for the theoretical determination of the deviations of the inner loop forging details. The method of calculating the size of the executive die equipments, providing the required accuracy stamped parts.

Key words: shock stamping; sheet metal part; precision; accuracy; size.

1. Введение

Обеспечение качественных показателей при снижении трудоемкости изготовления листоштампуемых деталей является одной из важных задач, стоящих перед производством в современных условиях рыночной экономики. Тонколистовые штампуемые детали занимают весомый объем в различных областях машиностроения.

Применение в штамповочном производстве метода высокоскоростной пневмоударной штамповки жидкостью позволяет решить эту задачу [1, 2].

2. Постановка проблемы и анализ известных публикаций

Вопросы качества изготовления тонколистовых деталей пневмоударной штамповкой жидкостью, особенно при операциях штамповки вытяжкой в отечественной и зарубежной литературе исследованы недостаточно. Данный метод штамповки наиболее полно

Технологія машинобудування

исследован для операций пробивки – вырубки эластичной средой [3-6]. Отсутствуют научно обоснованные данные по точностным возможностям пневмоударной штамповки вытяжкой. Недостаточное исследование вопроса точности вытяжных операций пневмоударной штамповки объясняется в значительной степени сложностью и трудоемкостью техники исследования данного вида штамповки, многообразием факторов, во взаимосвязи влияющих на процесс вытяжки. Поэтому окончательный выбор факторов осуществлялся методом многофакторного дисперсионного анализа.

3. Целью работы является аналитическое исследование параметров точности вытяжных операций, осуществляемых пневмоударной штамповкой.

4.Основной материал

Для определения точностных возможностей операций вытяжки пневмоударной штамповки проведены специальные исследования с использованием метода планирования эксперимента.

На основании анализа условий эксплуатации установок для пневмоударной штамповки на предприятиях отрасли, а также результатов экспериментальных исследований для аналитического исследования точности процесса вытяжки были выбраны следующие параметры штампуемых деталей: величины отклонений геометрических размеров и формы штампуемых деталей с учетом доминирующих факторов, влияющих на величину этих параметров.

Для решения задач такого типа в настоящее время широкое распространение получила математическая теория планирования эксперимента [7, 8].

Этим методом решаются интерполяционные и экстремальные задачи [9-11]. Решение интерполяционной задачи сводится к нахождению математической модели, отражающей связь между входными независимыми переменными и функцией отклика.

Методы планирования эксперимента предполагают кибернетический подход к изучению процессов, внутренние закономерности которых недостаточно ясны ввиду сложности структуры самого объекта.

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.

Как факторы, так и функция отклика (параметр оптимизации) должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Факторы должны быть определены операционально.
2. Каждый фактор должен иметь область определения.
3. Желательно иметь жестко фиксированное значение фактора.

4. Важно, чтобы факторы не были скоррелированы друг с другом.

5. Факторы должны быть совместимы.

При составлении предварительного списка факторов используем классификатор (табл. 1).

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

Результаты отбора факторов представлены в табл. 2. Переменные $x_1, x_2, x_3, \dots, x_s$ характеризуется так, что каждая из них может принимать только два значения.

Факторы их обобщения, а также величины верхней и нижней границ интервала варьирования приведены в табл. 3. Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 4.

Расчетное давление прижима находилось по формуле:

$$P_n = C \left[(\beta - 1)^3 + 0,5 \frac{d}{100S} \right] \sigma_b, \quad (2)$$

где β – отношение диаметров заготовки и пуансона перед началом формоизменения;

C – коэффициент, определенный экспериментально, который в данном случае может быть принят равным 0,25.

Технологія машинобудування

Таблица 2 – Исследуемые факторы (нормированные)

U_1	Толщина штампуемого материала, мм
U_2	Диаметр заготовки, мм
U_3	Прочностная характеристика штампуемого материала σ_{ϵ} , МПа
U_4	Относительное отклонение от расчетного давления прижима, %
U_5	Количество отштампованных деталей, тыс. шт.

Таблица 3 – Факторы, их уровень и интервалы варьирования

Кодированное значение факторов	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
	Толщина штампуемого материала, мм	Диаметр заготовки, мм	Прочностная характеристика штампуемого материала σ_{ϵ} , МПа	Относительное отклонение от расчетного давления прижима $\frac{\Delta P_{np}}{P_{np}}$	Количество отштампованных деталей, тыс. шт.
Основной уровень (0)	1,5	175	330	0	4
Интервал варьирования (1)	0,75	75	200	0,2	2
Верхний уровень (+1)	2,0	250	530	0,2	6
Нижний уровень (-1)	0,5	100	130	-0,2	2

Таблица 4 – Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Факторы (натур. знач.)					Факторы (код. знач.)					Точность внутреннего диаметра, мкм			
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	x_1	x_2	x_{cp}	x_p
	1	0,5	100	130	0,2	6	-1	-1	-1	1	1	41	39	40
2	2	100	130	-0,2	2	1	-1	-1	-1	-1	40	44	42	42,5
3	0,5	250	130	-0,2	6	-1	1	-1	-1	1	31	31	31	30,8
4	2	250	130	0,2	2	1	1	-1	1	-1	35	34	34	33,2
5	0,5	100	530	0,2	2	-1	-1	1	1	-1	15	14	15	14,9
6	2	100	530	-0,2	6	1	-1	1	-1	1	67	67	67	67,2
7	0,5	250	530	-0,2	2	-1	1	1	-1	-1	4	7	6	5,1
8	2	250	530	0,2	6	1	1	1	1	1	57	56	57	57,9
9	1,5	175	330	0	4	0	0	0	0	0	37	41	39	41,1
10	1,5	175	330	0	4	0	0	0	0	0	41	43	42	41,1

Образцы листового материала (АМг1, 08кп, 12Х18Н10Т) вытягивались на глубину предельной степени вытяжки.

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

Окончательный выбор факторов осуществлялся экспериментальным путем. При планировании эксперимента все факторы варьируются в каждом опыте одновременно. В целях снижения объема и стоимости эксперимента ограничимся главными линейными эффектами. Математическая модель в виде полинома позволяет дать количественную оценку влияния каждого фактора на функцию отклика

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

где b_i – коэффициенты полинома;

x_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. Абсолютная величина коэффициентов b_i, b_{ij} позволяет количественно оценить эффект влияния каждого фактора.

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.

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

Определим β_0, β_i дифференцированием уравнения (5) по β_0, β_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

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

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

Эти уравнения называются нормальными, их решения относительно β_0 , β_i и дает искомые коэффициенты регрессии. Рассмотрим матричный подход к линейной 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

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

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

нормальные уравнения можно записать как

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

Решая это матричное уравнение относительно вектора оценок, получаем

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

Исследуя линейную статистическую систему, имеющую m входов U_1, \dots, U_m и один выход x , необходимо найти линейную модель

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

Введя вектор наблюдений \bar{x} , матрицу независимых переменных U и вектор параметров $\bar{\beta}$ получим модель системы в векторной форме, которая принимает следующий вид:

$$x = \bar{\beta}^T \bar{U}. \quad (16)$$

Скалярную сумму S квадратичных ошибок оценивания можно определить по формуле:

$$S = (\bar{x} - U\bar{\beta})^T (\bar{x} - U\bar{\beta}) = S_p [(\bar{x} - U\bar{\beta})(\bar{x} - U\bar{\beta})^T]. \quad (17)$$

где S_p – обозначает след матрицы.

Для минимизации суммы квадратичных ошибок S по искомым параметрам β необходимо решить систему уравнений в векторной форме по отношению к $\bar{\beta}$:

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_1} = \frac{\partial t_r \left[(\bar{x} - U\bar{\beta})(\bar{x} - U\bar{\beta})^T \right]}{\partial x} = \frac{\partial t_r \left(\bar{x}\bar{x}^T + U\bar{\beta}\bar{\beta}^T U^T - U\bar{\beta}\bar{x}^T - \bar{x}\bar{\beta}^T U^T \right)}{\partial \bar{\beta}} = 0. \quad (18)$$

решив которое относительно $\bar{\beta}$ найдем

$$\bar{\beta} = (U^T U)^{-1} U^T \bar{x}. \quad (19)$$

Заметим, что это уравнение имеет такой же вид, как и в случае регрессивной модели с одним входом, записанной в матричной форме (14). Рассмотрим идентификацию системы, имеющей m входов и n выходов.

Линейная модель этого процесса может быть описана таким образом:

$$\begin{aligned} x_1 &= \beta_{11}U_1 + \beta_{12}U_2 + \dots + \beta_{1m}U_m \\ x_2 &= \beta_{21}U_1 + \beta_{22}U_2 + \dots + \beta_{2m}U_m \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ x_n &= \beta_{n1}U_1 + \beta_{n2}U_2 + \dots + \beta_{nm}U_m \end{aligned}, \quad (20)$$

или в векторной форме $\bar{x} = \beta \bar{U}$, где

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_m \end{bmatrix}; \quad \bar{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \dots & \beta_{nm} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

В этом уравнении каждая строка имеет точно такой же вид, как и в уравнениях для системы с одним выходом. Следовательно, для любого i -го выхода можно записать

$$x_i = \bar{\beta}_i^T \bar{U}, \quad (22)$$

где $\bar{\beta}_i$ – i -я строка матрицы β

$$\beta_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3}, \dots, \beta_{im}]. \quad (23)$$

Введем (подобно процессу с одним выходом) вектор r измерения величины x_i и матрицу независимых переменных U

$$\bar{x}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{ir} \end{bmatrix}; \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1m} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{r1} & U_{r2} & \dots & U_{rm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1^T \\ U_2^T \\ \dots \\ U_r^T \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Тогда наилучшая (в смысле регрессии по методу наименьших квадратов) оценка вектора β_i может быть получена из следующего матричного уравнения:

$$\bar{\beta}_i = (U^T U)^{-1} U^T \bar{x}_i. \quad (25)$$

Следовательно, все коэффициенты могут быть получены в результате решения n раз нормальных уравнений. С этой целью сформируем матрицу выходных элементов x размером $r \times n$, столбцами которой являются r измерений n выходных переменных

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{r1} & x_{r2} & \dots & x_{rm} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Тогда матрица примет вид

$$\beta \left[(U^T U)^{-1} U^T x \right]^T. \quad (27)$$

Заметим, что идентификация регрессионными методами возможна только тогда, когда существует матрица $(U^T U)^{-1}$, а, следовательно, матрица U должна быть неособенной, кроме того, число измерений r должно быть больше, чем число независимых переменных $r \geq m$.

Если $r = m$, в оценке β шум измерений не будет сглажен. Поэтому для адекватной идентификации требуется $m + 1$ измерений. При идентификации системы с m входами и n выходами также необходимо выполнять условие $r \geq m + 1$, поскольку при определении модели по всем входам используется одна и та же матрица измерений U .

Решая уравнение (22) получим значение коэффициентов b_i для теоретического определения регрессионной зависимости отклонения внутреннего контура детали при выполнении операции вытяжки.

$$b_1 = 18,25; b_2 = -0,0637; b_3 = -0,00119; b_4 = 0,63; b_5 = 6,31.$$

Таким образом, расчетная зависимость

$$x_p = b_1 \cdot U_1 + b_2 \cdot U_2 + b_3 \cdot U_3 + b_4 \cdot U_4 + b_5 \cdot U_5,$$

с учетом полученных коэффициентов принимает вид

$$x_p = 18,25 \cdot U_1 - 0,0637 \cdot U_2 - 0,00119 \cdot U_3 + 0,63 \cdot U_4 + 6,31 \cdot U_5. \quad (28)$$

Проверка полученной зависимости (28) 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 качества.

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

Известно, что при проектировании специальных вытяжных штампов с применением традиционных методов формообразования деталей матрицы оформляют наружный контур, а размеры пуансона – внутренний контур штампуемых деталей. Это правило лежит в основе существующих методик расчета исполнительных размеров рабочих частей штампа.

В то же время при пневмоударной штамповке существующие методики расчета исполнительных размеров формообразующих частей штампов не могут быть применимы, так как жесткий пуансон при выполнении разделительных, и в ряде вытяжных операций отсутствует, а его функции выполняет жидкость или эластичная среда. В существующих

методиках не учитывается величины отклонений размеров отштампованных деталей под влиянием факторов согласно зависимости (28), что позволяет оценить величины этих отклонений в любой момент времени эксплуатации штампа, прогнозируя их величину.

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

$$D_m = d_\partial + \Delta\partial + x - \delta_m, \quad (29)$$

где D_m – исполнительный размер матрицы; $\Delta\partial$ – допуск на изготовление детали; x – величина отклонения размеров штампуемых деталей под влиянием комплекса доминирующих факторов (28); δ_m – допуск на изготовление матрицы; d_∂ – исполнительный размер детали.

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

$$d_\partial = D_m - \Delta\partial + x + \delta_m. \quad (30)$$

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

$$D_\partial^\phi = D_m^\phi + x, \quad (31)$$

где D_m^ϕ – фактический размер вытяжной матрицы после ее изготовления;

D_∂^ϕ – фактический размер отштампованной детали.

Выводы

1. Получено аналитическое решение по оценке точностных параметров процесса пневмоударной листовой штамповки вытяжкой.

2. Предложена методика расчета исполнительных размеров штампа, обеспечивающая необходимую точность штампуемых деталей.

Список использованных источников:

1. Ударная листовая штамповка / В. Н. Чачин, А. Я. Мовшович, Е. А. Фролов и др. – М. : Информтехника, 1991. – 224 с.
2. Фролов Е. А. Оценка качественных показателей деталей из листа при операциях пробивки – вырубки эластичной средой на пневмоударном оборудовании / Е. А. Фролов, И. В. Манаенков, Т. В. Дякова // *Зб. наук. праць / Укр. держ. акад. заліз. трансп. – Харків, 2008. – Вип. 89. – С. 250-256.*
3. Пути повышения качества технологической системы пневмоударной штамповки деталей / Е. А. Фролов, С. С. Тимофеев, И. В. Манаенков, Т. В. Дякова // *Зб. наук. праць / Укр. держ. акад. заліз. трансп. – Харків, 2008. – Вип. 88. – С.116-122.*
4. Манаенков И. В. Распределение погрешности при выполнении разделительных операций ПУШ / И. В. Манаенков, А. Я. Мовшович, М. М. Буденый // *Сб. науч. тр. НТУ ХПИ. – Харьков, 2008. – Вып. 88. – С.41-44.*
5. Технологические предпосылки получения высокоточных деталей вытяжкой из листа методом пневмоударной штамповки / А. Я. Мовшович, Л. Г. Кузнецова, Е. А. Фролов, И. В. Манаенков // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. ДДМА. – Краматорськ, 2009. – С. 352-356.*
6. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 282 с.
7. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М. : Наука, 1997. – 207 с.
8. Kukhar V. V. Producing of elongated forgings with sharpened end by rupture with local heating of the workpiece method / V. V. Kukhar // *Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 6. – P. 122-132.*

Технологія машинобудування

9. Kukhar V. V. Experimental research of distribution of strains and stresses in work-piece at different modes of stretch-forging with rotation in combined dies / V. V. Kukhar, O. V. Vasylevskiy // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2014. – № 3. – P. 71-78.
10. Dragobetskii V.V. Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions / V.V. Dragobetskii, A. A. Shapoval, V. G. Zagoryanskii // *Steel in Translation*. – 2015. – Vol. 45, Issue 1. – P. 33-37.

References

1. Chachin, V, Movshovich, V & Frolov, E 1991, *Udarnaya listovaya shtampovka*, Informtehnika, Moskva.
2. Frolov, E, Manayenkov, I & Dyakova, T 2008, 'Otsenka kachestvennykh pokazateley detaley iz lista pri operatsiyakh probivki – vyrubki elastichnoy sredoy na pnevmoudarnom oborudovanii', *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, iss. 89, pp. 250-256.
3. Frolov, E, Timofeyev, S, Manayenkov, I & Dyakova, T 2008, 'Puti povysheniya kachestva tekhnologicheskoy sistemy pnevmoudarnoy shtampovki detaley', *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, iss. 88, pp. 116-122.
4. Manayenkov, I, Movshovich, A & Budenyi, M 2008, 'Raspredeleniye pogreshnosti pri vypolnenii razdelitelnykh operatsiy PUSH', *Sbornik nauchnykh trudov NTU "KhPI"*, iss. 88, pp. 41-44.
5. Movshovich, A, Kuznetsova, L, Frolov, E & Manayenkov, I 2009, 'Tekhnologicheskiye predposylki polucheniya vysokotochnykh detaley vytyazhkoy iz lista metodom pnevmoudarnoy shtampovki', *Udoskonalennia protsesiv i obladnannia obrobky tyskom v metalurhii i mashynobuduvanni*, pp. 352-356.
6. Adler, Yu, Markova, E & Granovskiy, Yu 1976, *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy*, Nauka, Moskva.
7. Nalimov, V 1997, *Teoriya eksperimenta*, Nauka, Moskva.
8. Kukhar, V 2015, 'Producing of elongated forgings with sharpened end by rupture with local heating of the workpiece method', *Metallurgical and Mining Industry*, no. 6, pp. 122-132.
9. Kukhar, V & Vasylevskiy, O 2014, 'Experimental research of distribution of strains and stresses in work-piece at different modes of stretch-forging with rotation in combined dies' *Metallurgical and Mining Industry*, no. 3, pp. 71-78.
10. Dragobetskii, V, Shapoval, A & Zagoryanskii, V 2015, 'Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions', *Steel in Translation*, vol. 45, iss. 1, pp. 33-37.

Стаття надійшла до редакції 29 листопада 2016 р.