

**ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ
СИЛОВЫХ РЕЖИМОВ КУЗНЕЧНОЙ ПРОТЯЖКИ ЗАГОТОВОК
С ОБКАТКОЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ БОЙКАХ**

Большинство современных технологий кузнечно-штамповочного производства направлено на интенсификацию проработки внутренних слоев слитка при незначительных коэффициентах общего укова за счет реализации макросдвиговых деформаций материала [1, 2]. Разработка научно обоснованных рациональных способовковки требует экспериментального исследования влияния различных режимов протяжки на силовые параметры процесса. При этом основным требованием с точки зрения минимизации отходов материала при дальнейшей доводке поковки до размера детали является высокая геометрическая точность заготовки.

Для оценки варьирования геометрических размеров поковки целесообразно использовать различные инструменты статистического анализа. Однако статистическая обработка экспериментальных данных позволяет оценить только общие изменения исследуемых параметров, при этом не учитывается их влияние на средние значения других факторов.

Для количественного исследования влияния различных факторов на результирующий признак применяют методы однофакторного и многофакторного дисперсионного анализа [3-5], в основе которого лежит гипотеза об однородности групповых дисперсий. Суть дисперсионного анализа заключается в проверке статистической значимости различия между средними значениями для групп или переменных. Если различие между ними значимо, то фактор оказывает существенное влияние на исследуемый параметр, в противном случае влияние фактора незначимо, а все экспериментальные данные принадлежат одной генеральной совокупности.

Целью настоящей работы является статистическая обработка и дисперсионный анализ результатов экспериментального изучения распределения силы обжатия при различных величинах обжатий и углов кантовки цилиндрических заготовок (слитков) в комбинированных бойках.

Проводили экспериментальное исследование влияния режимов протяжки заготовок на контролируемые параметры в соответствии с методикой, изложенной в работе [6].

В качестве экспериментальных образцов использовали шесть одинаковых заготовок с начальным диаметром $D_0 = 50$ мм и длиной $L_0 = 100$ мм, изготовленных из свинца сурьмянистого (ССу), при этом длину начальную L_{0y} уточняли с помощью штангенциркуля. Каждая заготовка представляла собой две спаянные половины полукруглого сечения, причем на тыльную сторону одной из половинок, в соответствии с методикой проведения эксперимента [6], была нанесена координатная сетка.

Для проведения эксперимента были изготовлены стальные (Сталь 45) модели вырезных бойков шириной $B_m = 30$ мм с радиусом выреза в нижнем бойке $R_m = 30$ мм. Бойки закрепляли в штамповом блоке (рис. 1,а) универсальной испытательной машины Р-20 и осуществляли деформирование свинцовых образцов.

В качестве варьируемых параметров для различных режимов протяжки рассматривали угол кантовки $\Delta\phi$, величину обжатия Δd и количество обжатий n до полного поворота заготовки на 360° , в зависимости от которых экспериментальные образцы промаркировали и условно разделили на две группы

В первой группе образцов («0», «1», «2») осуществляли варьирование углом кантовки $\Delta\phi$ при фиксированной величине обжатия $\Delta d = 5$ мм: образец «0» – $\Delta\phi = 30^\circ$, $n = 12$; образец «1» – $\Delta\phi = 60^\circ$, $n = 6$; образец «2» – $\Delta\phi = 90^\circ$, $n = 4$.

Во второй группе образцов («3», «5», «8») осуществляли варьирование величиной обжатия Δd при фиксированной величине угла кантовки $\Delta\phi = 60^\circ$: образец «3» – $\Delta d = 5$ мм, $n = 6$; образец «5» – $\Delta d = 6,6$ мм, $n = 6$; образец «8» – $\Delta d = 9$ мм, $n = 6$.

Исследования проводили при относительных обжатиях: $\varepsilon_d = \Delta d / D_0 = 0,1; 0,132$ и $0,18$.

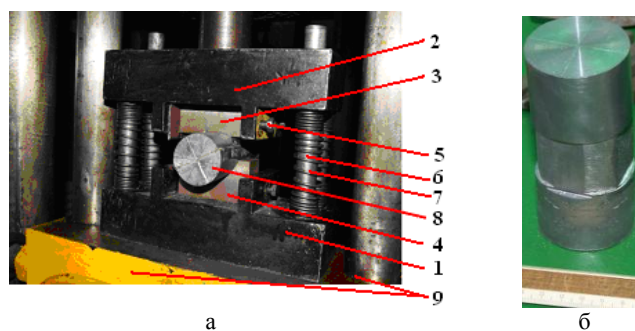


Рис. 1. Штамповый блок для исследования протяжки заготовок (а) и деформированный образец (б):

1 и 2 – нижняя и верхняя плиты; 3 и 4 – верхний плоский и нижний вырезной бойки; 5 – крепёж; 6 и 7 – направляющие и пружины; 8 – образец; 9 – испытательная машина.

В ходе эксперимента фиксировали силу деформирования P на каждом обжатии, выполненном при заданном режиме.

С целью выполнения статистической обработки экспериментальных данных для каждого режима прокатки использовали 5 идентичных образцов, т.е. количество параллельных опытов (измерений) принимали равным 5.

Статистическая обработка включала в себя проверку воспроизводимости эксперимента по критерию Кохрена, однофакторный дисперсионный анализ на основе критерия Фишера, а также определение абсолютной и относительной погрешности измерений.

Проверка воспроизводимости эксперимента по критерию Кохрена. Воспроизводимость опытов определяли путем проверки равенства генеральных дисперсий. После проведения замеров геометрических размеров опытных образцов рассчитывали среднее значение, т.е. математическое ожидание серии измерений:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n, \quad (1)$$

где $i=1, 2, \dots, n$ – номер параллельного опыта (измерения); x_i – значение i -го измерения.

Значение дисперсии для каждой серии измерений рассчитывали как

$$D_x = S_x^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1). \quad (2)$$

Среднеквадратическую погрешность результатов серии измерений рассчитывали по формуле:

$$S_x = \sqrt{D_x}. \quad (3)$$

Однородность ряда дисперсий $S_1^2, S_2^2, \dots, S_i^2$ проверяли по критерию Кохрена. Проверка воспроизводимости эксперимента по критерию Кохрена основана на законе распределения отношений максимальной оценки дисперсии $\left(\overset{2}{\underset{\text{max}}{S_i}} \right)$ к сумме всех сравнительных оценок дисперсий:

$$G_p = \left(\overset{2}{\underset{\text{max}}{S_i}} \right) / \sum_{i=1}^n \left(\overset{2}{\underset{\text{max}}{S_i}} \right). \quad (4)$$

Затем проверяли однородность ряда дисперсий $S_1^2, S_2^2, \dots, S_i^2$, определяющую достоверность учета всех сильнодействующих факторов каждого опыта на одном уровне.

Если вычисленное по данным эксперимента (эмпирическое) значение G_p меньше критического значения $G_{кр} \left(\overset{2}{\underset{\text{max}}{S_i}}, n-1 \right)$ (здесь k – количество опытов; n – ко-

личество параллельных измерений), определяемого, например, по источнику [7], т.е. если $G_p < G_{\text{сб}}$, то гипотезу об однородности выборочных дисперсий S_i^2 можно считать справедливой, в том числе для оценки генеральной дисперсии воспроизводимости эксперимента.

Однофакторный дисперсионный анализ на основе критерия Фишера. Осуществляли проверку однородности всех выборок, т.е. определяли принадлежность всех экспериментальных значений одной генеральной совокупности. Для этого использовали процедуру однофакторного дисперсионного анализа, суть которого заключается в оценке влияния уровня фактора на полученные экспериментальные значения.

Однофакторный дисперсионный анализ основан на проверке значимости оценок дисперсии с помощью критерия Фишера (F), расчетное значение которого определяется соотношением между факторной дисперсией $s_{\text{факт}}^2$ и остаточной дисперсией $s_{\text{инд}}^2$:

$$F = s_{\text{факт}}^2 / s_{\text{инд}}^2 . \quad (5)$$

Факторную дисперсию $s_{\text{факт}}^2$, характеризующую рассеивание по факторам, т.е. изменение среднего значения величины при изменении уровня фактора, при числе степеней свободы $f = k - 1$ (здесь k – количество опытов) рассчитывали по формуле:

$$s_{\text{факт}}^2 = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x}_c)^2 / f , \quad (6)$$

где \bar{x}_c – оценка общего среднего, определяемая как

$$\bar{x}_c = \sum_{j=1}^k \bar{x}_j / k . \quad (7)$$

Остаточную дисперсию $s_{\text{инд}}^2$, характеризующую рассеивание внутри партии, при числе степеней свободы $f_1 = k(n - 1)$ вычисляли как

$$s_{\text{инд}}^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / f_1 . \quad (8)$$

Полную (общую) дисперсию s^2 , отражающую общее рассеяние как внутри партии, так и за счет уровня фактора, при числе степеней свободы $f_0 = kn - 1$ определяли следующим образом:

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_c)^2 / f_0 . \quad (9)$$

Полученные значения F сравнивали с табличными $F_{\text{кр}}(k, k(n - 1))$, приведенными в источнике [7] (здесь k – количество опытов; n – количество параллельных измерений).

Если $F < F_{\text{сб}}$ при заданном уровне значимости λ , то нет оснований считать, что независимый фактор оказывает влияние на разброс средних значений, т.е. все полученные результаты эксперимента принадлежат к одной генеральной совокупности, распределенной нормально.

Если $F > F_{\text{сб}}$, то независимый фактор оказывает существенное влияние на разброс средних значений.

Определение абсолютной и относительной погрешности измерений. Задав коэффициентом надёжности $\alpha = 1 - \lambda$, находили коэффициент Стьюдента $t_{\alpha, f}$ при количестве степеней свободы $f = n - 1$ согласно источнику [7].

Абсолютную погрешность измерений определяли как

$$\Delta x = t_{\alpha, f} \cdot S_x . \quad (10)$$

Истинное значение измеряемой величины находили в границах доверительного интервала:

$$\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x . \quad (11)$$

Окончательный результат записывали как

$$x = \bar{x} \pm \Delta x . \quad (12)$$

Точность измерения исследуемых параметров зависит от ряда факторов, которые вносят в результаты измерения определённую погрешность.

Относительная погрешность серии измерений:

$$\delta_{\bar{x}} = \pm \Delta x / \bar{x} \cdot 100\% . \quad (13)$$

Результаты исследований. Выполняли статистическую обработку экспериментальных данных по распределению силы обжатия при различных режимах протяжки с обкаткой заготовок в комбинированных бойках. Пример расчета статистических показателей силы обжатия Р образца «0» приведен в табл. 1.

Таблица 1

Статистическая обработка измерений силы обжатия Р (кН) образца «0»

Номер образца	Номера проведенных опытов					\bar{P}	S_p^2	S_p	ΔP	$P = \bar{P} \pm \Delta P$	δ_p
	1	2	3	4	5						
$\varphi=30$	30,2	29,8	30,3	29,7	30,1	30,0	0,07	0,3	0,7	$30,0 \pm 0,7$	2,4%
$\varphi=60$	34,4	34,1	33,6	34,2	33,8	34,0	0,10	0,3	0,9	$34,0 \pm 0,9$	2,6%
$\varphi=90$	31,7	32,2	31,8	32,4	32,1	32,0	0,08	0,3	0,8	$32,0 \pm 0,8$	2,5%
$\varphi=120$	32,1	32,2	31,7	31,8	32,3	32,0	0,07	0,3	0,7	$32,0 \pm 0,7$	2,2%
$\varphi=150$	30,1	29,6	29,8	30,3	30,1	30,0	0,08	0,3	0,8	$30,0 \pm 0,8$	2,6%
$\varphi=180$	28,4	28,2	27,8	28,1	27,7	28,0	0,08	0,3	0,8	$28,0 \pm 0,8$	2,9%
$\varphi=210$	38,5	38,1	37,7	37,6	38,1	38,0	0,13	0,4	1,0	$38,0 \pm 1,0$	2,6%
$\varphi=240$	40,4	40,3	39,7	39,6	40,2	40,0	0,13	0,4	1,0	$40,0 \pm 1,0$	2,5%
$\varphi=270$	25,1	25,3	24,8	24,7	25,3	25,0	0,08	0,3	0,8	$25,0 \pm 0,8$	3,1%
$\varphi=300$	29,7	29,8	30,4	30,1	30,2	30,0	0,08	0,3	0,8	$30,0 \pm 0,8$	2,7%
$\varphi=330$	33,1	33,4	32,8	32,8	33,1	33,0	0,06	0,3	0,7	$33,0 \pm 0,7$	2,1%
$\varphi=360$	40,3	40,4	39,6	39,7	40,2	40,0	0,13	0,4	1,0	$40,0 \pm 1,0$	2,5%
$G_p = 0,12 ; G_{кр} = 0,288 ;$ $G_p < G_{\epsilon p}$						$\bar{P}_c = 32,69$			$s_{\text{факт } P}^2 = 109,38$		
$s_{\text{ост } P}^2 = 0,09$			$s_p^2 = 20,47$			$F = 1194,36 ; F_{кр} = 2,41 ;$ $F > F_{\epsilon p}$					

Проверка по критерию Кохрена подтвердила воспроизводимость всех экспериментов ($G_p < G_{кр}$), при этом максимальная величина $G_p = 0,30$ зарегистрирована для образца «2» при $G_{кр}(4;4) = 0,6287$ ($\alpha = 0,95$).

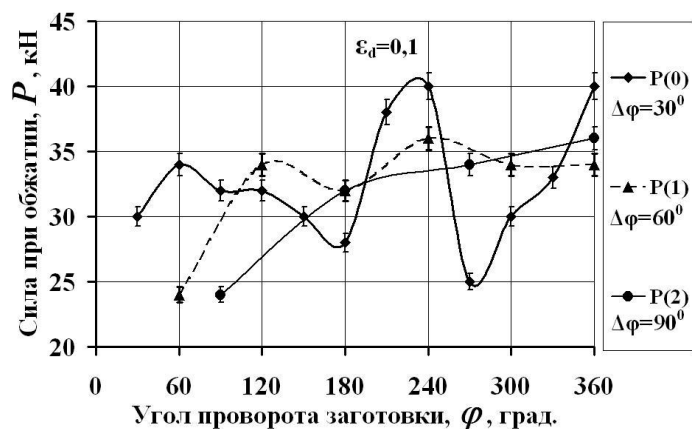
Проверка по критерию Фишера показала, что для всех исследуемых параметров независимый фактор (угол поворота заготовки φ) оказывает существенное влияние на разброс средних значений ($F_p > F_{кр}$), при этом максимальная величина $F_p = 1342,21$ зарегистрирована для образца «3» при $F_{кр}(5;24) = 2,41$.

По результатам экспериментальных данных и статистической обработки были построены графические зависимости силы при обжатии образцов «0», «1», «2» (рис. 2,а) и «3», «5», «8» (рис. 2б) от угла поворота заготовки φ при различных величинах относительного обжатия ϵ_d и углах кантовки $\Delta\varphi$. Экспериментальные значения Р лежат в диапазоне варьирования значений $P = \bar{P} \pm \Delta P$, при этом допустимые отклонения ΔP не превышают 1 кН, т.е. величина относительной погрешности $\delta_p \leq 3,3\%$.

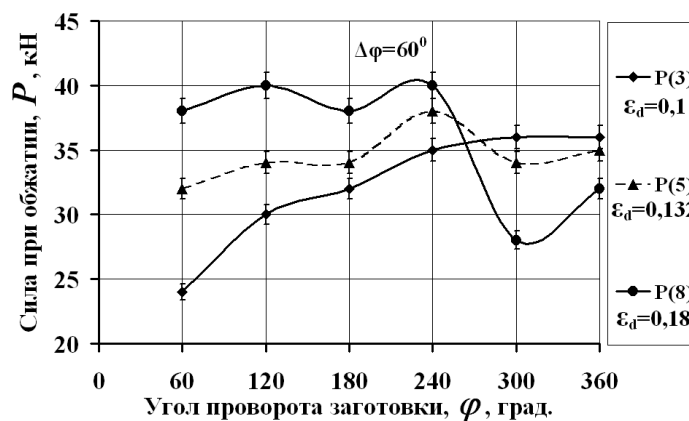
Из графика следует, что при одинаковых величинах относительного обжатия и разных углах кантовки минимальные силовые затраты наблюдаются на начальных этапах деформации, а на завершающих этапах обкатки по диаметру при протяжке

силовые затраты возрастают. При этом максимальные перепады силы при обжатии на различных стадиях обкатки зафиксированы при наименьших углах кантовки $\Delta\varphi$.

При разных величинах относительного обжатия и одинаковых углах кантовки силовые затраты при обкатке по диаметру возрастают при суммарном угле поворота $\varphi \leq 240^\circ$, в то время как силовые затраты при $240 < \varphi \leq 360^\circ$ принимают меньшие значения.



а



б

Рис. 2. Результаты эксперимента по исследованию распределения силы обжатия при различных режимах протяжки с обкаткой в комбинированных бойках:
а – для образцов «0», «1», «2»; б – для образцов «3», «5», «8»

Таким образом, относительное обжатие ε_d и угол кантовки $\Delta\varphi$ оказывают значительное влияние на распределение силы обжатия P при различных режимах протяжки с обкаткой в комбинированных бойках.

ВЫВОДЫ

По результатам статистической обработки опытных данных установлено, что полученные экспериментальные значения силы обжатия P при различных режимах протяжки с обкаткой в комбинированных бойках принадлежат нормальному закону распределения, причем границы погрешностей измерений при доверительной вероятности $P = 0,95$ не превышают $\delta \leq 3,3\%$.

Воспроизводимость экспериментов подтверждена проверкой по критерию Кохрена ($G_p < G_{кр}$), при этом максимальная величина $G_p = 0,30$ зарегистрирована для величины h (высота образца) при $G_{кр}(4;4) = 0,6287$ ($\alpha = 0,95$).

Однофакторный дисперсионный анализ на основе критерия Фишера показал, что угол поворота заготовки ϕ (независимый фактор) оказывает существенное влияние на разброс средних значений силы обжатия P ($F > F_{кр}$), а выборки данных нельзя свести к одной генеральной совокупности. Варьируемые параметры режимов протяжки, такие, как угол кантовки $\Delta\phi$ и величина относительного обжатий ϵ_d , оказывают значительное влияние на распределения силы обжатия для всех опытных образцов.

Получены графические зависимости силы при обжатии P от угла поворота заготовки ϕ при различных величинах угла кантовки $\Delta\phi$ и относительного обжатия ϵ_d . На основании результатов статистической обработки определены и отражены на графиках интервалы варьирования исследуемых величин. Установлено, что варьируемые параметры режимов протяжки ($\Delta\phi$ и ϵ_d) оказывают значительное влияние на распределения силы обжатия для всех опытных образцов.

Перечень ссылок

1. Технологія кування / Л.М. Соколов, І.С. Алієв, О.Є. Марков, Л.І. Алієва. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – 268 с.
2. Тюрин В.А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов / В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 11. – С. 15–20.
3. Еришова Н.М. Дисперсионный анализ данных наблюдений с помощью пакета анализ приложения Excel / Н.М. Еришова // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ: ПДАБПА, 2009. – № 3. – С. 12–22.
4. Ландо Е.А. Корреляционный и дисперсионный анализ данных исследований свободных колебаний массивно-плитных фундаментов под машины с вертикальной импульсивной нагрузкой / Е.А. Ландо // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. – № 3. – С. 25–29.
5. Петров А.А. Применение дисперсионного анализа для оценивания отношения сотрудников к природоохранным мероприятиям организации / А.А. Петров, В.А. Самарин // Вестник Югорского государственного университета. – Ханты-Мансийск: ЮГУ, 2008. – Выпуск 3 (10). – С. 64–66.
6. Кухарь В.В. Экспериментальные исследования режимов кузнечной протяжки заготовок с обкаткой в комбинированных бойках / В.В. Кухарь, О.В. Василевский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – С. 139 - 148.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
8. Бешенков С.Н. Экономико-математические методы в управлении / С.Н. Бешенков. – Смоленск: Маджента, 2005. – 54 с.

Рецензент: д. ф.-м. н., проф. Гранкин В.П.

Статья поступила 29.11.2013