

УДК 621.735.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫПУКЛОСТИ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ ОТ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ

Антонюк Ф.И., Кузнецов И.В., Сорокин П.С., Степанов Е.Д.

*Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,
Калуга, e-mail: antonyuk.f.i.@yandex.ru*

Исследование выпуклости боковой поверхности цилиндрических заготовок из меди М1 при холодной осадке было выполнено с помощью полных факторных экспериментов. Полученные на основе обработки их результатов уравнения регрессионного анализа были дополнены дисперсионным анализом для более объективной оценки влияния исследуемых факторов и их взаимодействий на отклик – величину выпуклости, которую определяли разностью ее максимального и минимального диаметров. В результате определено, что сила и характер влияния относительной степени деформации и условий контактного трения (со смазкой и без нее) на величину выпуклости зависит от относительной высоты осаживаемых исходных заготовок. В частности, при осадке относительно низких исходных заготовок ($h_0/d_0 = 1,0$) влияние относительной степени деформации на величину выпуклости в 1,66 раза сильнее влияния условий контактного трения, а при осадке относительно высоких ($h_0/d_0 = 1,75$) – влияние этих факторов на выпуклость практически одинаково. Наряду с этим также выявлены сила и характер влияния относительной высоты исходных заготовок и степени их деформации на величину выпуклости осаживаемых поковок после их осадки как со смазкой, так и без нее.

Ключевые слова: осадка, бочкообразность, выпуклость, степень деформации, многофакторный эксперимент, дисперсионный и регрессионный анализ

INVESTIGATION OF DEPENDENCE OF THE BULGE OF THE SIDE SURFACE OF COPPER CYLINDRICAL WORKPIECES IN COLD UPSETTING FROM PARAMETERS OF OPERATION

Antonyuk F.I., Kuznetsov I.V., Sorokin P.S., Stepanov E.D.

*Moscow State Technical University n.a. Bauman (National Research University), Kaluga Branch,
Kaluga, e-mail: antonyuk.f.i.@yandex.ru*

Investigation of the bulge of the side surface of cylindrical workpieces made of copper M1 in cold upsetting was carried out with the help of complete factor experiments. The regression analysis equations obtained on the basis of the processing of their results were supplemented by a dispersion analysis for a more objective assessment of the influence of the factors investigated and their interactions on the response of the amount of bulge, which was determined by the difference in its maximum and minimum diameters. As a result, it was determined that the force and the nature of the influence of the upset ratio and contact friction conditions (with and without lubrication) on the bulge depends on the aspect ratio of the initial upsetting workpieces. In particular, when the relatively low initial workpieces are upsetting ($h_0/d_0 = 1,0$), the influence of the upset ratio on the bulge is 1.66 times stronger than the effect of contact friction conditions, and when the upsetting is relatively high ($h_0/d_0 = 1,75$) – the influence of these factors on the bulge is almost the same. Along with this, the strength and character of the effect of the aspect ratio of the initial workpieces and the upset ratio on the magnitude of the bulge of the upsetting forgings after their upsetting with or without lubrication were also revealed.

Keywords: upsetting, barreling, bulge, upset ratio, multifactorial experiment, dispersion and regression analysis

Осадка цилиндрических заготовок в холодном состоянии применяется для изготовления штучных заготовок, используемых для различных операций холодной объемной штамповки.

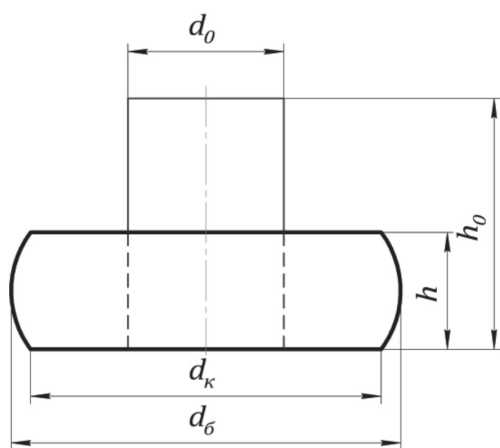
Как и при горячей осадке, наличие сил трения на торцах приводит к искажению формы боковой поверхности осаживаемых заготовок, которая приобретает выпуклость. Однако различия в технологическом назначении заготовок после горячей и холодной осадки приводят к необходимости использования различных оценок эффекта проявления сил трения.

При горячей осадке коэффициент относительной бочкообразности характеризу-

ет относительную часть объема исходной заготовки, затрачиваемую на образование выпуклости. Он является объемным показателем, не отражающим форму выпуклости, так как не учитывает ее наибольший диаметр (d_6) (см. рисунок). В отличие от горячей, при холодной осадке форма выпуклости учитывается и оценивается разностью диаметра в срединном сечении (d_6) и диаметра контактной поверхности торцов (d_k). При этом наибольший диаметр в срединном сечении осаживаемой заготовки (d_6) является важнейшим показателем качества штучных заготовок [1].

Еще одним существенным отличием холодной осадки от горячей является фактор

контактного трения, который в технологии принято условно определять величиной коэффициента контактного трения (μ). По сравнению с горячей осадкой, при холодной величина сил трения зависит от значительно большего количества факторов, важнейшими из которых, наряду с типом технологической смазки, являются твердость материала осаживаемой заготовки, интенсивность его упрочнения, а также микрогеометрия контактных поверхностей заготовки и рабочих деталей штампа [2]. Поэтому величина коэффициента трения при холодной осадке изменяется в значительно более широком диапазоне. По этой причине количество исследований по определению показателей изменения формы боковой поверхности цилиндрических заготовок при холодной осадке заметно больше по сравнению с горячей.



Параметры формоизменения цилиндрической заготовки в процессе осадки

Следует отметить, что подавляющее большинство таких исследований являются экспериментальными, основанными на однофакторных экспериментах. Однако технологическая система – операция холодной осадки – является многофакторной, и поэтому ее идентификация с помощью однофакторных экспериментов недостаточно информативна.

Исходя из изложенного, определена цель выполненной работы: на основе многофакторных экспериментов с использованием статистических методов анализа исследовать зависимость выпуклости боковой поверхности ($\Delta d = d_b - d_k$) заготовок из термически разупрочненной электротехнической меди М1 от относительной высоты исходных заготовок (h_0/d_0), относительной степени их деформации $\varepsilon = (1 - h/h_0)$ и условий контактного трения (μ).

Обзор литературных источников

Анализ показывает, что чаще всего авторы в своих исследованиях определяют зависимость величины выпуклости от относительной высоты исходных заготовок и степени их деформации, значительно меньше уделяя внимание условиям контактного трения, осуществляя осадку заготовок из различных сплавов, как правило, при отсутствии технологической смазки. При этом, исходя из величины выпуклости и высоты осаживаемой заготовки, определяют радиус дуги окружности, который, по мнению авторов, с достаточной для практических целей точностью соответствует форме выпуклости.

Например, в работе [3] автор исследовал влияние относительной высоты осаживаемых заготовок из коммерчески чистого алюминия, а также степени их деформации на величину радиуса дуги окружности, аппроксимирующей форму выпуклости их боковой поверхности. Он выявил линейный характер зависимости между относительной высотой и максимальным диаметром выпуклости в условиях отсутствия технологической смазки.

В работе [4] авторы исследовали влияние шероховатости контактных поверхностей на величину контактного трения при осадке заготовок из различных сплавов, ограничив эксперименты относительно узким диапазоном степеней деформации заготовок с одинаковой относительной высотой.

Авторы работы [5], выполнив многофакторные эксперименты, учитывали практически все факторы, влияющие на величину относительной бочкообразности при осадке заготовок из алюминиевого сплава АД31: относительную высоту исходных заготовок, степень их деформации и условия контактного трения (со смазкой и без нее). Наряду с этим они также учитывали влияние на бочкообразность заготовок скорости деформирования при осадке на гидравлическом и кривошипном прессах. В результате было определено, что повышение скорости деформирования с 4 мм/сек до 200 мм/сек способствует уменьшению относительной бочкообразности в 1,5...4 раза в зависимости от уровней исследуемых факторов. Однако свои исследования авторы ограничили сравнительно малой величиной относительной высоты осаживаемых заготовок ($h_0/d_0 \leq 1,3$) и малой степенью осадки ($\varepsilon \leq 0,36$).

Комплексные теоретические и экспериментальные исследования формы боковой

поверхности осаживаемых заготовок представлены в работе [6]. Их автор исходил из того, что задача определения формы боковой поверхности заготовок при осадке является вариационной, и поэтому для ее решения применил метод Ритца. Полученные автором решения позволяют описать форму боковой поверхности осаживаемой заготовки сечениями, в которых диаметры определяются исходя из размеров исходной заготовки с учетом коэффициента контактного трения и конечных размеров осаживаемых заготовок. Однако при экспериментальной проверке теоретических решений автор для осадки заготовок из сплава АД1 принял следующие значения коэффициентов трения: $\mu = 0,5$ (без смазки) и $\mu = 0,3$ (со смазкой), которые, как известно, характерны для горячей деформации.

В заключение отметим, что зачастую авторы ограничивают свои исследования анализом одного, двух и реже трех факторов, влияющих на величину выпуклости боковой поверхности заготовок в процессе холодной осадки. Поэтому актуальной задачей является не только комплексное исследование всех факторов, влияющих на величину выпуклости, но и раскрытие их сложного взаимного влияния на основе уравнений регрессионного анализа, полученных с помощью многофакторных экспериментов.

Материалы и методы исследования

При планировании и выполнении полного факторного эксперимента (ПФЭ 2³) учитывали основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на величину исследуемого параметра (отклика) – выпуклости боковой поверхности ($\Delta d = d_6 - d_k$). Все факторы устанавливали на двух уровнях: относительная высота исходных заготовок (h_0/d_0) – 1,75 и 1,0; относительная степень деформации $\varepsilon = (1 - h/h_0) - 0,5$ и 0,2; условия контактного трения (μ) – $\mu = 0,3$ (без применения смазки) и $\mu = 0,1$ (со смазкой). Материал заготовок – термически разупрочненная электротехническая медь М1. Диаметр исходных заготовок – 25 мм. Их

осадку выполняли на гидравлическом прессе П481А с номинальной силой 400 кН; скорость деформирования – 4 мм/сек. В качестве технологической смазки использовали животный жир.

В таблице представлен план полного факторного эксперимента (ПФЭ 2³) и результаты его обработки. Все опыты в эксперименте дублировали равномерно ($n = 3$).

Результаты исследования и их обсуждение

В результате обработки эксперимента было получено следующее уравнение регрессионного анализа, в котором уровни факторов представлены в нормализованном масштабе:

$$y(\Delta d) = 1,25 + 0,68 \cdot \varepsilon + 0,565 \cdot \mu + 0,44 \cdot h_0/d_0 + 0,23 \cdot \varepsilon \cdot \mu + 0,271 \cdot \varepsilon \cdot h_0/d_0 + 0,318 \cdot \mu \cdot h_0/d_0 + 0,127 \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot h_0/d_0. \quad (1)$$

В (1) величина коэффициентов свидетельствует о силе (степени) влияния того или иного фактора или эффекта взаимодействия факторов на отклик (Δd). Знак перед коэффициентом указывает на характер влияния: если перед коэффициентом регрессии стоит знак (+) – это значит, что при увеличении фактора (при его переходе от меньшего значения к большему) отклик увеличивается. Если перед коэффициентом стоит знак (–), то при переходе фактора от меньшего значения к большему – отклик уменьшается.

Основываясь на изложенном, анализируя (1), можно заключить, что наиболее сильное влияние на величину выпуклости (Δd) оказывает степень деформации (ε). Влияние этого фактора в 1,2 раза сильнее влияния коэффициента контактного трения (μ) и в 1,5 раза сильнее влияния относительной высоты исходных заготовок (h_0/d_0).

Для более объективной оценки факторов и их взаимодействий результаты эксперимента были подвергнуты дисперсионному анализу, на основании которого можно судить о вкладе того или иного фактора в дисперсию отклика [7].

План ПФЭ 2³ и его результаты

№ п/п	ε	μ	d/h	Δd , мм	№ п/п	ε	μ	d/h	Δd , мм
1	0,5	0,3	1,75	3,885	5	0,5	0,3	1,0	1,566
2	0,2	0,3	1,75	1,278	6	0,2	0,3	1,0	0,548
3	0,5	0,1	1,75	1,411	7	0,5	0,1	1,0	0,872
4	0,2	0,1	1,75	0,219	8	0,2	0,1	1,0	0,255

В частности, дисперсионный анализ (1) свидетельствует, что вклад фактора ε в дисперсию отклика (Δd) составляет 37,8%, коэффициента трения (μ) – 26% и фактора h_0/d_0 – 16,2%.

Из анализа (1) можно отметить относительно заметное влияние на отклик эффектов совместного влияния факторов (ε и h_0/d_0) и (μ и h_0/d_0). Столь относительно большая величина коэффициентов при парных эффектах взаимодействия, с участием фактора относительной высоты исходных заготовок (h_0/d_0), говорит о том, что влияние факторов ε и μ следует рассматривать отдельно с учетом уровней фактора h_0/d_0 : осадку относительно высоких ($h_0/d_0 = 1,75$) и относительно низких ($h_0/d_0 = 1,0$) заготовок.

Следуя этому, для высоких исходных заготовок (опыты 1...4, таблица) получили следующее уравнение регрессионного анализа:

$$\Delta d = 1,7 + 0,95 \cdot \varepsilon + 0,88 \cdot \mu + 0,35 \cdot \varepsilon \cdot \mu. \quad (2)$$

Из анализа (2) легко заметить, что влияние степени деформации (ε) на величину выпуклости (Δd) относительно высоких исходных заготовок ($h_0/d_0 = 1,75$) лишь в 1,08 раза сильнее влияния коэффициента контактного трения (μ) и в 2,7 раза сильнее влияния их парного взаимодействия. Дисперсионный анализ (2) показывает, что вклад фактора ε в дисперсию отклика составляет 49%, а фактора μ – 44%. Это говорит об их сравнительно равной силе влияния на отклик.

Обработка ПФЭ 2^2 (опыты 5...8, таблица) позволила получить следующую модель регрессионного анализа выпуклости при осадке относительно низких исходных заготовок ($h_0/d_0 = 1,0$):

$$\Delta d = 0,81 + 0,41 \cdot \varepsilon + 0,24 \cdot \mu + 0,1 \cdot \varepsilon \cdot \mu. \quad (3)$$

Из (3) видно, что влияние степени деформации (ε) на величину выпуклости (Δd) в 1,66 раза сильнее влияния фактора трения (μ) и в 4 раза сильнее влияния их парного взаимодействия. Дисперсионный анализ (3) показывает, что доминирующий вклад фактора степени деформации (ε) в дисперсию отклика составляет 70%, а фактора (μ) лишь 25,5%.

В (2) и (3) коэффициенты при мнимых факторах (1,7 и 0,81) означают, что их величина численно равна отклику, если все факторы установлены на нулевом уровне. Это позволяет по отношению указанных коэффициентов ($1,7/0,8 = 2,1$) судить о соотношении выпуклостей относительно высоких ($h_0/d_0 = 1,75$) и низких ($h_0/d_0 = 1,0$) заготовок,

если уровень фактора $\varepsilon = \frac{0,5 + 0,2}{2} = 0,35$,

а фактора $\mu = \frac{0,3 + 0,1}{2} = 0,2$.

Известно, что на практике очень часто осадку из меди и алюминиевых сплавов могут выполнять как со смазкой ($\mu = 0,1$), так и без нее ($\mu = 0,3$), вследствие этого изменяется величина выпуклости их боковой поверхности.

Если осадку заготовок из меди М1 выполняют без смазки ($\mu = 0,3$), тогда уравнение регрессионного анализа (опыты 1, 2, 5, 6, таблица) получит вид

$$\Delta d = 1,82 + 0,91 \cdot \varepsilon + 0,76 \cdot h_0/d_0 + 0,397 \cdot \varepsilon \cdot h_0/d_0. \quad (4)$$

Из (4) видно, что влияние степени деформации (ε) на отклик (Δd) в 1,2 раза сильнее влияния фактора h_0/d_0 и в 2,3 раза сильнее влияния парного взаимодействия этих факторов ($\varepsilon \cdot h_0/d_0$). Дисперсионный анализ (4) показывает, что вклад степени деформации в дисперсию отклика (Δd) составляет 52,65%, а фактора относительной высоты исходных заготовок – 37,24%. Вклад эффекта взаимодействия факторов – 10%.

Если осадка заготовок выполняется со смазкой ($\mu = 0,1$), тогда уравнение регрессионного анализа (опыты 3, 4, 7, 8, таблица) получит вид

$$\Delta d = 0,69 + 0,45 \cdot \varepsilon + 0,126 \cdot h_0/d_0 + 0,144 \cdot \varepsilon \cdot h_0/d_0. \quad (5)$$

Из (5) следует, что при осадке со смазкой влияние степени деформации на величину выпуклости в 3,6 раза сильнее влияния фактора h_0/d_0 и в 3,2 раза сильнее эффекта их взаимодействия. Дисперсионный анализ (5) свидетельствует о доминирующем влиянии степени деформации: ее вклад в дисперсию отклика составляет почти 85%, фактора h_0/d_0 – 6,5%, а их совместного влияния – 8,6%.

Выводы

1. Определено, что сила и характер влияния степени деформации и коэффициента контактного трения на величину выпуклости боковой поверхности существенно зависят от относительной высоты исходных заготовок.

2. При осадке относительно высоких исходных заготовок ($h_0/d_0 = 1,75$) величина выпуклости их боковой поверхности практически в равной степени зависит от коэффициента контактного трения и относительной степени деформации исходных заготовок. В частности, вклад относительной степени деформации в дисперсию отклика (Δd) составляет 49%, а условий контактного трения – 43%.

3. При осадке относительно низких исходных заготовок ($h_0/d_0 = 1,0$) вклад относи-

тельной степени деформации в дисперсию выпуклости доминирует и составляет 70%, в то время как вклад фактора трения – лишь 25%.

4. Определено, что при осадке заготовок из меди М1 без применения смазки вклад относительной степени деформации в дисперсию выпуклости составляет 52,6%, а относительной высоты исходных заготовок – 37%. При осадке со смазкой на величину выпуклости доминирующее влияние оказывает относительная степень деформации. Ее вклад в дисперсию выпуклости составляет почти 84%, а фактора относительной высоты осаживаемых заготовок – лишь 6,5%, что сопоставимо с эффектом взаимодействия этих факторов – 8,5%.

Список литературы

1. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков: Высшая школа, 1987. – 144 с.
2. Kroi B., Engel U., Merklein M. Comprehensive approach for process modeling and optimization in cold forging considering interactions between process, toll and press // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213, № 7.7. – P. 1118–1127.
3. Mukhopadhyay A. A systematic approach to determine the impact of upsetting ratio during free cold forging operation of commercially pure aluminium in dry condition // *Procedia Materials Science*. – 2014. – Vol. 5. – P. 1281–1290.
4. Sahu K., Jha A.K. Effect of Height to Diameter Ratio on Barreling of Cylindrical Billets Deformed During Cold Forging under Different Inter-Facial Friction Conditions // *International Journal of Manufacturing Technology and Research*. – 2012. – № 8 (2). – P. 1–6.
5. Антонюк Ф.И., Калмыков В.В., Сорокина И.И. Формоизменение цилиндрических заготовок при холодной осадке на кривошипном и гидравлическом прессах // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2016. – № 6. – С. 13–18.
6. Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: Учебное пособие: в 2 т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
7. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. – Киев: Наукова думка, 1990. – 187 с.