

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ЗАКРЫТИЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ В СЛИТКАХ ПРИ КОВКЕ

При ковке, кроме получения требуемой формы и размеров поковки, необходимо обеспечить повышение качества металла, устранить различного рода дефекты и повысить механические свойства металла.

Устранение внутренних дефектов слитка является главным для получения качественных поковок.

Процесс заковки дефектов протекает в две стадии: закрытие дефекта до момента соприкосновения его противоположных стенок и сварка сомкнувшихся стенок дефекта. Исследования [1-6] показывают, что заковка внутренних дефектов в металле при пластической деформации зависит от ряда факторов, и прежде всего от формы слитка, степени деформации, относительной подачи и формы инструмента.

Однако механизм заковки дефектов при кузнечных операциях до сих пор в достаточной степени не исследован. Для прогнозирования заковки дефектов необходимо располагать данными об изменении их размеров при ковке. Различные технологические факторы по разному влияют на характер деформации по сечению поковки и на закрытие внутренних дефектов.

Следовательно, установление влияния этих факторов на степень закрытия внутренних дефектов в слитке является в полной мере обоснованным.

**Цель работы** – получить зависимость степени закрытия внутренних дефектов в слитке от основных технологических параметровковки.

Для количественной оценки связи между факторами, оказывающими влияние на характер и величину распределения деформаций и на закрытие внутренних дефектов, построили статистическую модель процессаковки цилиндрической заготовки на двух-, трех- и четырехлучевые поковки с применением методики математического планирования эксперимента.

В качестве численной характеристики целей исследования при проведении факторного эксперимента выбрали интенсивность закрытия осевого отверстия.

Этот показатель отвечает всем требованиям, предъявляемым к параметру оптимизации, так как является количественной, однозначной и статически определяемой величиной, которая в достаточной степени измеряет эффективность процесса исследования. Устанавливали зависимость величины интенсивности закрытия осевого отверстия  $\varepsilon_{\text{зад}}$  от четырех факторов: отношения радиуса бойка к радиусу заготовки  $R_6/R_3$  (фактор  $x_1$ ), степени обжатия заготовки выпуклым бойком  $\varepsilon$  (фактор  $x_2$ ), подачи заготовки  $\psi$  (фактор  $x_3$ ) и количества симметричных лучей по образующей заготовки в поперечном сечении  $m$  (фактор  $x_4$ ).

Значения факторов варьировали на двух уровнях. Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 1.

**Таблица 1**

**Уровни и интервалы варьирования факторов для  
установления зависимости интенсивности закрытия осевого отверстия от  
технологических факторов**

Факторы	$R_6/R_3$	$\varepsilon$	$\psi$	$m$
Обозначение фактора, $x_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Нижний уровень, $x_{i\underline{\text{н}}}$	0,6	0,07	0,5	2
Верхний уровень, $x_{i\overline{\text{в}}}$	1	0,21	1,5	4
Нулевой уровень, $x_{i\underline{0}}$	0,8	0,14	1	3
Интервал варьирования, $\Delta x_i$	0,2	0,07	0,5	1

Кодированные значения факторов  $z_i$  связаны с натуральными значениями  $x_i$  соотношением:

$$z_i = (x_i - x_{i0}) / \Delta z_i . \quad (1)$$

Кодированные значения факторов на верхнем  $z_{i\bar{a}}$  и нижнем  $z_{i\underline{a}}$  уровнях:

$$z_{i\bar{a}} = (x_{i\bar{a}} - x_{i0}) / \Delta x_i = +1 , z_{i\underline{a}} = (x_{i\underline{a}} - x_{i0}) / \Delta x_i = -1 . \quad (2)$$

Учитывая, что интервалы варьирования являются достаточно широкими, а выбранные уровни факторов являются практически предельными, задача построения статистической модели сводится к нахождению интерполяционной формулы зависимости интенсивности закрытия осевого отверстия от технологических факторов.

Математическую модель процесса, имеющую вид:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4) , \quad (3)$$

запишем в виде линейного уравнения регрессии с учетом всех взаимодействий:

$$\begin{aligned} y = & a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{14} x_1 x_4 + \\ & + a_{23} x_2 x_3 + a_{24} x_2 x_4 + a_{34} x_3 x_4 + a_{123} x_1 x_2 x_3 + a_{124} x_1 x_2 x_4 + a_{134} x_1 x_3 x_4 + \\ & + a_{234} x_2 x_3 x_4 + a_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 , \end{aligned} \quad (4)$$

где  $a_i$  – коэффициенты уравнения в натуральном масштабе, определяемые как:

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{ij}}{N} , j=0,1...k , \quad (5)$$

где  $N = 2^k$  – число опытов в эксперименте (здесь  $k$  – число факторов).

В кодированном масштабе уравнение регрессии запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} y = & a'_0 + a'_1 z_1 + a'_2 z_2 + a'_3 z_3 + a'_4 z_4 + a'_{12} z_1 z_2 + a'_{13} z_1 z_3 + \\ & + a'_{14} z_1 z_4 + a'_{23} z_2 z_3 + a'_{24} z_2 z_4 + a'_{34} z_3 z_4 + a'_{123} z_1 z_2 z_3 + \\ & + a'_{124} z_1 z_2 z_4 + a'_{134} z_1 z_3 z_4 + a'_{234} z_2 z_3 z_4 + a'_{1234} z_1 z_2 z_3 z_4 , \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a'_i$  – коэффициенты уравнения в кодированном масштабе, определяемые как:

$$a'_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i z_{ij}}{N} , j=0,1...k . \quad (7)$$

План полно факторного эксперимента (ПФЭ) представлен в кодовом масштабе матрицей планирования  $2^4$  (таблица 2). По каждому опыту производили пять измерений интенсивности закрытия осевого отверстия (величины  $y_1...y_5$  соответственно), а полученные усредненные результаты ( $y$ ) использовали для вывода регрессионной зависимости.

Переход от кодированных значений к натуральным выполняли как:

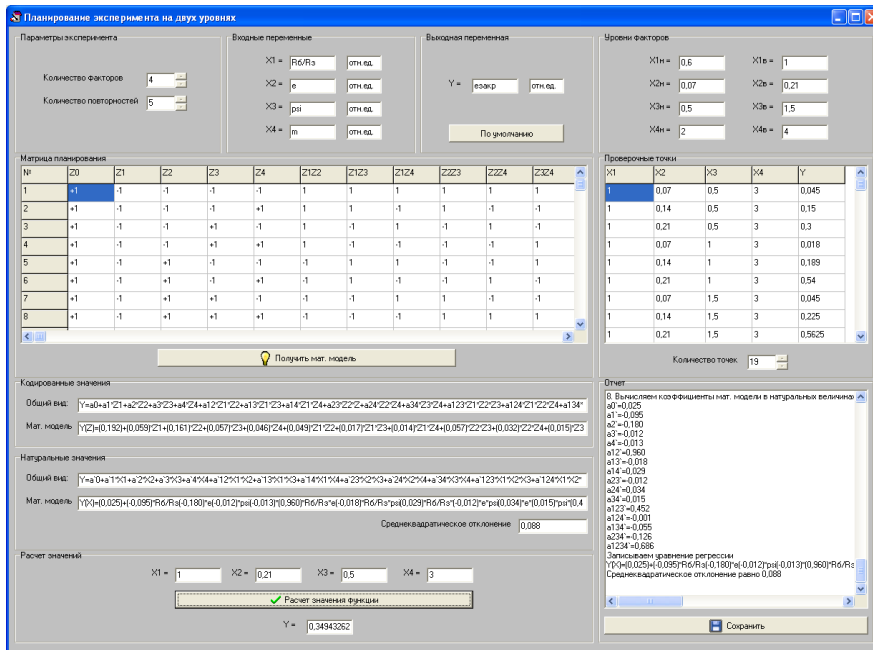
$$\begin{aligned} x_1 = & R_{\bar{a}} / R_{\underline{a}} - 0,8 / 0,2 ; x_2 = \varepsilon - 0,14 / 0,07 ; \\ x_3 = & \psi - 1 / 0,5 ; x_4 = m - 3 / 1 . \end{aligned} \quad (8)$$

Для автоматизации получения регрессионной зависимости интенсивности закрытия осевого отверстия  $\varepsilon_{\text{защ}}^{\text{отв}}$  от технологических факторов было составлено программное обеспечение (рис. 1) в среде программирования Borland Delphi 7.

Таблица 2

**Матрица планирования двухуровневого ПФЭ (2<sup>4</sup>)**  
 для установления зависимости интенсивности закрытия осевого отверстия от  
 технологических факторов

№ п/п	Факторы																y
	Z <sub>0</sub>	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	Z <sub>14</sub>	Z <sub>23</sub>	Z <sub>24</sub>	Z <sub>34</sub>	Z <sub>123</sub>	Z <sub>124</sub>	Z <sub>134</sub>	Z <sub>234</sub>	Z <sub>1234</sub>	
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,0105
2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	0,0275
3	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	0,0110
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	0,0330
5	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	0,1333
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	0,1995
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	0,2500
8	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,4011
9	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0,0225
10	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	0,0600
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	0,023
12	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	0,0600
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	0,2500
14	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	0,3750
15	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	0,4688
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,7500



**Рис. 1. Интерфейс программного обеспечения для планирования двухуровневого ПФЭ**

В результате была получена зависимость интенсивности закрытия осевого отверстия  $\varepsilon_{\text{с\grave{a}e\delta}}$  от отношения радиуса бойка к радиусу заготовки  $R_{\text{б}}/R_{\text{з}}$ , степени обжатия заготовки выпуклыми бойками  $\varepsilon$ , подачи заготовки  $\psi$  и количества симметричных лучей по образующей заготовки в поперечном сечении  $m$  :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{\text{с\grave{a}e\delta}} = & 0,0251 - 0,095 \cdot R_{\text{б}}/R_{\text{з}} - 0,180 \cdot \varepsilon - 0,012 \cdot \psi - 0,013 \cdot m + \\
 & + 0,960 \cdot R_{\text{б}}/R_{\text{з}} \cdot \varepsilon - 0,018 \cdot R_{\text{б}}/R_{\text{з}} \cdot \psi + 0,029 \cdot R_{\text{б}}/R_{\text{з}} \cdot m - 0,012 \cdot \varepsilon \cdot \psi + \\
 & + 0,034 \cdot \varepsilon \cdot m + 0,015 \cdot \psi \cdot m + 0,452 \cdot R_{\text{б}}/R_{\text{з}} \cdot \varepsilon \cdot \psi - 0,001 \cdot R_{\text{б}}/R_{\text{з}} \cdot \varepsilon \cdot m - \\
 & - 0,055 \cdot R_{\text{б}}/R_{\text{з}} \cdot \psi \cdot m - 0,126 \cdot \varepsilon \cdot \psi \cdot m + 0,686 \cdot R_{\text{б}}/R_{\text{з}} \cdot \varepsilon \cdot \psi \cdot m
 \end{aligned} \quad (9)$$

Для упрощения математической модели запишем ее в виде линейного уравнения регрессии с учетом взаимодействий только первого порядка:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_{12}x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 + a_{23}x_2x_3 + a_{24}x_2x_4 + a_{34}x_3x_4. \quad (10)$$

Тогда зависимость интенсивности закрытия осевого отверстия  $\varepsilon_{\text{заэд}}$  = f  $R_{\text{а}}/R_{\text{с}}, \varepsilon, \psi, m$  от основных факторов ковки будет представлена в виде:

$$\varepsilon_{\text{заэд}} = 0,582 - 0,570 \cdot R_{\text{а}}/R_{\text{с}} - 3,452 \cdot \varepsilon - 0,339 \cdot \psi - 0,104 \cdot m + 3,466 \cdot R_{\text{а}}/R_{\text{с}} \cdot \varepsilon + 0,169 \cdot R_{\text{а}}/R_{\text{с}} \cdot \psi + 0,070 \cdot R_{\text{а}}/R_{\text{с}} \cdot m + 1,617 \cdot \varepsilon \cdot \psi + 0,455 \cdot \varepsilon \cdot m + 0,031 \cdot \psi \cdot m \quad (11)$$

Для полученных уравнений регрессии (8) и (10) определяли среднеквадратическую ошибку, значение которой не должно превышать 0,15...0,2:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i - \tilde{y}_i^2 / N_0}, \quad (12)$$

где  $\bar{y}_i$  – заданные значения;

$\tilde{y}_i$  – значения, полученные по уравнениям регрессии (9) и (11);

$N_0$  – количество значений.

В процессе моделирования с помощью разработанной программы среднеквадратическая ошибка составила 0,088 (рис. 1), что свидетельствует об адекватности полученных функциональных зависимостей (9) и (11). Таким образом, для упрощения расчетов можно применять вместо формулы (9) полученную регрессионную зависимость (11).

Анализ уравнения и полученных данных показывает, что интенсивность закрытия осевого отверстия зависит от всех четырех факторов процесса, причем наибольшее влияние оказывают форма профилированных боков и степень обжатия.

## ВЫВОДЫ

1. Получена зависимость, описывающая связь степени закрытия осевого дефекта в слитке от основных технологических параметров ковки.
2. Установлено, что наибольшее влияние на степень закрытия осевого дефекта в слитке при ковке оказывают форма инструмента и степень обжатия.

### Перечень ссылок

1. *Соколов Л. М.* Технологія кування : підручник для вищих техн. навч. закладів / Л. М. Соколов, І. С. Алієв, О. Є.Марков, Л. І. Алієва. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – 268 с.
2. *Марков О. Е.* Внедрение энергосберегающего технологического процесса ковки крупных слитков без осадки / О. Е. Марков, В. М. Олешко, В. Н. Злыгарев, И. А. Грачев // Кузнечно-штамповочное пр-во. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 10. – С. 33–36.
3. *Марков О. Е.* Эффективная схема ковки крупных слитков с использованием кузнечной протяжки / О. Е. Марков // Кузнечно-штамповочное пр-во. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 8. – С. 44–48.
4. *Тюрин В. А.* Инновационные технологии ковки с применением макросдвигов / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 2007. – № 11. – С. 11–20.
5. *Соколов Л. Н.* Технологические приемы, обеспечивающие проработку осевой зоны кузнечного слитка / Л. Н. Соколов, В. С. Пестов, В. А. Ефимов // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1985. – № 2. – С. 25–27.

6. А.С. 1263413 СССР, МКИ В 21 J 5/00. Способ моделирования заковки внутренних дефектов слитка / А. В. Котелкин, В. Г. Воронцов, А. Б. Найзабеков [и др.]. – № 388899117-27; заявл. 29.04.95; опубл. 15.10.1996, Бюл. № 38. – 2 с.: ил.
7. Лунев В. А. Математическое моделирование и планирование эксперимента: учеб, пособие / В. А. Лунев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 164 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Самотугин С.С.

*Статья поступила 25.10.2013*

Каргин Сергей Борисович, к.т.н., старший преподаватель кафедры обработки металлов давлением ГВУЗ «ПГТУ».  
г. Мариуполь, пр. Metallургов, д. 21, кв. 38, д.т. (0629)33-28-73.