

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

*Для изучения технологического процесса литья по выплавляемым моделям был проведен полный факторный эксперимент, на основании которого выданы рекомендации относительно оптимальных режимов работы при точном литье. Построена математическая модель, характеризующая зависимость количества дефектов от температуры расплава после введения под шлак навески металлического хрома, длительности выдержки металла под шлаком и температуры металла после наведения шлака. Выполнена оптимизация методом крутого восхождения (мысленные опыты). С помощью механических испытаний лучших образцов на растяжение была подтверждена эффективность реализации мысленных опытов. Некоторые из реализованных опытов дали лучший результат по сравнению с наилучшим опытом полного факторного эксперимента, что дало возможность еще больше повысить качество сплава.*

*Ключевые слова: планирование эксперимента, литье по выплавляемым моделям, точное литье, полный факторный эксперимент, параметр оптимизации, количество дефектов, режим работы, крутое восхождение.*

**Постановка проблемы.** В деталях из литейного сплава ВНЛ-3 (рис. 1) присутствует большое количество недопустимых дефектов (поры, рыхлоты, засоры). Решить сложившуюся проблему можно путём оптимизации технологического процесса литья по

выплаваемым моделям с помощью методов планирования эксперимента.

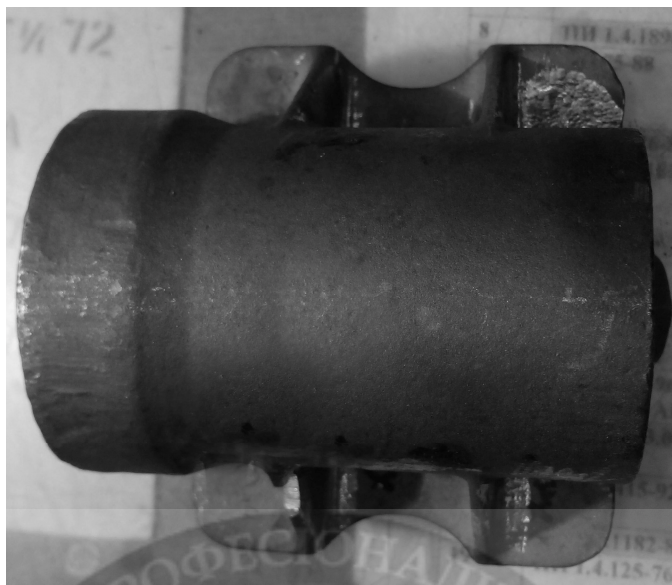


Рис. 1. Деталь из сплава ВНЛ-3, полученная методом точного литья

**Цель работы:** уменьшить количество дефектов в деталях из литейного сплава ВНЛ-3. Минимизировать время и затраты на устранение дефектов уже после изготовления вышеуказанных изделий.

**Анализ последних публикаций.** В последнее время вопрос оптимизации технологического процесса точного литья активно изучают ряд исследователей [1 - 5]. В известных источниках в явном виде не приведены математические модели технологического процесса литья по выплавляемым моделям. Для оптимизации данного процесса целесообразно использовать метод планирования эксперимента [6], с помощью математической модели выполнить крутое восхождение и проверить эффективность реализации серии мысленных опытов.

**Основные результаты исследований.** В качестве параметра оптимизации выберем количество дефектов. Определим доминирующие факторы, с помощью которых можно воздействовать на оптимизируемый объект. В технологическом процессе указаны основные параметры точного литья: температура расплава после введения под шлак навески металлического хрома, длительность выдержки металла под шлаком и температура металла после наведения шлака.

В технологической документации приведены рекомендации по выбору температуры расплава после введения под шлак навески металлического хрома, длительности выдержки металла под шлаком и температуры металла после наведения шлака. Диапазоны этих величин являются верхними и нижними уровнями факторов:

$$X_1 \in (1520^\circ\text{C}; 1540^\circ\text{C}),$$

$$X_2 \in (180\text{сек.}; 240\text{сек.}),$$

$$X_3 \in (1600^\circ\text{C}; 1620^\circ\text{C}),$$

где  $X_1$  – температура расплава после введения под шлак навески металлического хрома;

$X_2$  – длительность выдержки металла под шлаком;

$X_3$  – температура металла после наведения шлака.

План и результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Здесь  $Y$  – количество дефектов;  $Y^*$  – оценка качества сплава по 10-тибальной шкале (10 баллов означает отсутствие дефектов); +1 – верхний предел диапазонов изменения величин температуры расплава после введения под шлак навески металлического хрома, длительности выдержки металла под шлаком и температуры металла после наведения шлака; -1 – нижний предел диапазонов изменения вышеуказанных величин.

Таблица 1

План полного факторного эксперимента, результаты исследования и расчет коэффициента  $X_{ji}$

№ опыта (i)	№ фактора (j)			Y	Y*
	1	2	3		
1	-1	-1	+1	1	9
2	+1	-1	-1	1	9
3	-1	+1	-1	3	7
4	+1	+1	+1	1	9
5	-1	-1	-1	4	6
6	+1	-1	+1	0	10
7	-1	+1	+1	3	7
8	+1	+1	-1	0	10

С целью минимизации количества дефектов на данном этапе проведения эксперимента можно дать следующие рекомендации: температура расплава после введения под шлак навески металлического хрома должна иметь значение 1540°C, время выдержки металла – 180-240 секунд, температура металла после наведения шлака – 1600-1620°C. Нельзя использовать температуру расплава после введения под шлак навески металлического хрома значением 1520°C с длительностью выдержки металла 180 секунд и температурой металла после наведения шлака – 1600°C.

Модель исследуемого процесса, которую мы будем получать – алгебраический полином первой степени:

$$Y^* = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3,$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – неизвестные коэффициенты модели.

По результатам эксперимента найдем значение данных коэффициентов. Их оценки вычислим по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} Y_i^*}{N}, \quad j=0,1,2,3,$$

где  $N$  – число опытов;

$j$  – номер фактора;

$i$  – номер опыта.

После вычисления получим математическую модель:

$$Y^* = 8,375 + 1,125X_1 + 0,125X_2 + 0,375X_3.$$

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов на параметр оптимизации.

Для оптимизации качества литейного сплава проведём крутое восхождение (мысленные опыты), т. е. движение в направлении градиента функции отклика [7]. В таблицах 2, 3 приведены параметры планирования серии мысленных опытов до тех пор, пока оценка качества образца достигнет  $Y^{**} \geq 20$  баллов.

Таблица 2

Исходные данные для проведения кругого восхождения

Параметры плана	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Основной уровень	1530	210	1610
Интервал варьирования $I_j$	10	30	10
Верхний уровень	1540	240	1620
Нижний уровень	1520	180	1600
$b_j$	1,125	0,125	0,375
$b_j \times I_j$	11,25	3,75	3,75
Шаг	3	1	1

Таблица 3

План оптимизации технологического процесса литья по выплавляемым моделям  
методом кругого восхождения (мысленные опыты)

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y^{**}$
1	1543	241	1621	10,38
2	1546	242	1622	10,76
3	1549	243	1623	11,14
4	1552	244	1624	11,52
5	1555	245	1625	11,89
6	1558	246	1626	12,27
7	1561	247	1627	12,65
8	1564	248	1628	13,03
9	1567	249	1629	13,41
10	1570	250	1630	13,79
11	1573	251	1631	14,17
12	1576	252	1632	14,55
13	1579	253	1633	14,93
14	1582	254	1634	15,30
15	1585	255	1635	15,69
16	1588	256	1636	16,07
17	1591	257	1637	16,45
18	1594	258	1638	16,83
19	1597	259	1639	17,21
20	1600	260	1640	17,56
21	1603	261	1641	17,97
22	1606	262	1642	18,35
23	1609	263	1643	18,73
24	1612	264	1644	19,10
25	1615	265	1645	19,48
26	1618	266	1646	19,86
27	1621	267	1647	20,24

Некоторые из мысленных опытов были реализованы на практике. Результаты исследований приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты практической реализации некоторых мысленных опытов

№ п/п	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y^{**}$	$Y^*$
1	1549	243	1623	11,14	10
2	1558	246	1626	12,27	10
3	1564	248	1628	13,03	10

Здесь  $Y^{**}$  – теоретическая оценка качества литейного сплава.

Чтобы сравнить качество образцов из сплава ВНЛ-3 первой и второй серии опытов необходимо провести механические испытания лучших образцов на растяжение (рис. 2). Результаты испытаний указаны в таблицах 5, 6.



Рис. 2. Образец после проведения механических испытаний

Таблица 5

Результаты исследования лучших образцов на растяжение, полученных при реализации мысленных опытов

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y^{**}$	$Y^*$	$P$ , кгс
1549	243	1623	11,14	10	2690
1558	246	1626	12,27	10	2870
1564	248	1628	13,03	10	2550

Здесь  $P$  – усилие, прикладываемое для разрыва образца.

Таблица 6

Результаты исследования лучших образцов на растяжение, полученных при реализации полного факторного эксперимента

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y^*$	$P$ , кгс
1540	180	1620	10	2660
1540	240	1610	10	2500

**Выводы.** Учитывая результаты исследования необходимо придерживаться следующих параметров литья по выплавляемым моделям: температура расплава после введения под шлак навески металлического хрома должна иметь значение  $1549^{\circ}\text{C}$ , время выдержки металла – 243 секунды, температура металла после наведения шлака –  $1623^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки металла должно составлять 180 секунд, температура расплава после введения под шлак навески металлического хрома –  $1540^{\circ}\text{C}$ , температура металла после наведения шлака –  $1620^{\circ}\text{C}$ . Наивысший показатель разрывного усилия был достигнут при температуре расплава после введения под шлак навески металлического хрома величиной  $1558^{\circ}\text{C}$ , длительностью выдержки металла – 246 секунд, температуре металла после наведения шлака –  $1626^{\circ}\text{C}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Знаменский, Л.Г. Ресурсосбережение в процессах формообразования для литья по выплавляемым моделям [Текст] / Л.Г. Знаменский, А.С. Варламов, С.С. Верцюх // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Metallургия. – 2014. – Т. 14, вып. 1. – С. 28 – 32.

2. Заславская, О.М. Рециклинг в литье по выплавляемым моделям [Текст] / О.М. Заславская, Л.Н. Сабирова, Д.А. Кольцо // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Metallургия. – 2012. – Вып. 19. – С. 137 – 138.

3. Комбинированные формооболочки для литья по выплавляемым моделям [Текст] / В.К. Дубровин, Л.Г. Знаменский, О.М. Пашнина и др. // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Metallургия. – 2006. – Вып. 7. – С. 98 – 100.

4. Плакированные обсыпки в литье по выплавляемым моделям [Текст] / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, А.С. Варламов и др. // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Metallургия. – 2008. – Вып. 10. – С. 37 – 40.

5. Повторное исследование остатков этилсиликатных суспензий в литье по выплавляемым моделям [Электронный ресурс] / В.С. Конотопов, М.И. Тимохина, Е.В. Проминская // ИТБ "Литьё Украины". – 2012. – № 9. – Режим доступа к журн. : <http://lityo.com.ua/статьи/566-повторное-исследование-остатков-этилсиликатных-суспензий-в-литье-по-выплавляемым-моделям> – 3.09.2012 г.

6. Чистикова, З. Э. Оптимизация технологического процесса литья по выплавляемым моделям [Текст] / З. Э. Данилишина // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2014 : тез. докл. всеукраинской научно-технической конференции, Харьков, 11 – 14 ноября 2014 г. – X., 2014. – С. 58.

7. Кошевой, Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента [Текст]: моногр. / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко. – Полтава: издатель Шевченко Р.В., 2013. – 317 с.

**Рецензент:** д.т.н, проф. Угрюмов М. Л., профессор кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

**Чистикова З.Е., д.т.н., проф. Кошевой М.Д.**

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ ПО ВИПЛАВЛЮВАНИХ МОДЕЛЯХ**

*Для вивчення технологічного процесу лиття по виплавлюваних моделях був проведений повний факторний експеримент, на підставі якого видано рекомендації щодо оптимальних режимів роботи при точному литті. Побудовано математичну модель, що характеризує залежність кількості дефектів від температури розплаву після введення під шлак навішування металевого хрому, тривалості витримки металу під шлаком і температури металу після наведення шлаку. Виконано оптимізацію методом крутого сходження (уявні досліді). За допомогою механічних випробувань кращих зразків на розтяг була підтверджена ефективність реалізації уявних дослідів. Деякі з реалізованих дослідів дали кращий результат у порівнянні з найкращим дослідом повного факторного експерименту, що дало можливість ще більше підвищити якість сплаву.*

*Ключові слова:* планування експерименту, лиття по виплавлюваних моделях, точне лиття, повний факторний експеримент, параметр оптимізації, кількість дефектів, режим роботи, круте сходження.

**Chystikova Z. E., Prof. Koshevoj N.D.**

#### **STUDY AND OPTIMIZATION PROCESS INVESTMENT CASTING**

*The recommendations about the optimum modes of casting work were issued based on full factorial technological process of investment casting experiment that had been performed. A mathematical model, which defines the dependence of the number of defects on the temperature of the molten slag after the introduction of a sample of metallic chromium, the duration of exposure of the metal under the slag and the temperature of the metal after pointing slag, was drawn up. The optimization by a steepest ascent method (mental experiment) was carried out. The effectiveness of the mental experiments was confirmed by mechanical stretching tests of the best models was proved. Some of implemented experiments gave better results as compared with the best experience of the complete factorial experiment that made it possible to improve further quality of the fusion.*

*Keywords:* experimental design, investment casting, precision casting, full factorial experiment, parameter optimization, defects, operation, steep climb.