

## УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕМ В ОТЛИВКАХ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

### 1. Введение

Параметрическая и функциональная надежность деталей машин зависит от большого количества факторов, в том числе от качества сплава, из которого они изготовлены. Свойства сплава, как хорошо известно, зависят от его химического состава и от параметров микроструктуры, формируемых химическим составом и условиями кристаллизации. Однако, если говорить о чёрных сплавах, следует отметить, что ориентация исключительно на государственные стандарты зачастую не позволяет в полной мере решать вопросы управления качеством сплава, являющемся своего рода фундаментом качества деталей машин. Это связано с тем, что стандарты регламентируют лишь некоторые свойства и (или) химические составы сплава. Примером может служить конструкционный серый чугун для деталей машиностроительного назначения широкого профиля. Регламентом ГОСТ 1412-85 предусмотрены марки, классифицированные лишь по двум показателям: пределу прочности на растяжение и твердости. При этом химический состав включает в себя только основные элементы: содержание углерода, кремния, марганца, серы и фосфора. Очевидно, что большее количество элементов оказывает на свойства куда более сложное влияние, чем «предусматривает» ГОСТ 1412-85. А ведь в реальном чугуне именно такая ситуация и имеет место. Применение же рекомендаций ГОСТ 1412-85 при попытке выплавки чугуна со специальными свойствами вообще не возможно, так как неясно, каким должен быть химический состав, обеспечивающий выполнение требований по специальным свойствам. В этом случае единственным вариантом решения задачи является построение работоспособной математической модели типа «состав – свойство» и оптимизация химического состава по выбранным критериям. Такая модель может быть использована и для поиска оптимального по конечному состоянию управления процессом выплавки сплава. Именно поэтому разработка методологии расчета оптимальных химических составов, удовлетворяющих требованиям различных, в том числе и конкурирующих, свойств, является актуальной задачей прикладных исследований в области процессов управления выплавкой сплавов в машиностроении. Особое место среди отливок, к материалу которых предъявляются специальные свойства, являются отливки, из которых изготавливают корпусные детали, работающие под высоким внутренним давлением. Таким специальным свойством является герметичность, и задача поиска оптимального по конечному состоянию управления предполагает наличие адекватной математической модели, связывающей химический состав чугуна с его герметичностью.

## 2. Анализ литературных данных и постановка задачи исследования

Свойство герметичности корпусной отливки предполагает отсутствие течи при действии внутреннего давления. Ряд исследователей, занимающихся вопросами отработки литейных технологий, обеспечивающих заданные требования по герметичности отливок из конструкционного чугуна, отмечают, что при отсутствии внешних и внутренних дефектов в виде трещин, несплошностей и т.п. свойство герметичности определяющим образом зависит от размера включений графита. Крупный графит обуславливает наличие тонких перемычек металлической матрицы между пластинами графита, вследствие чего при действии внутреннего давления и возникает течь [1–5].

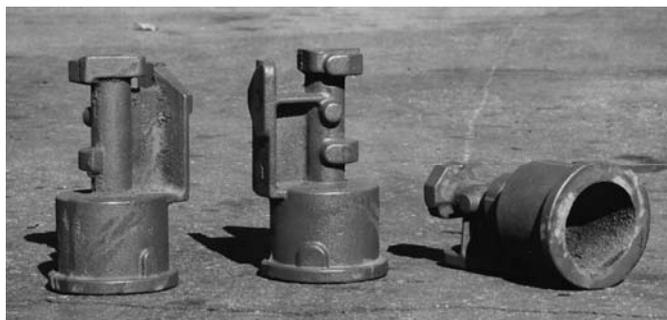
Однако управление процессами формирования структуры и свойств является достаточно сложной задачей, так как зачастую приходится иметь дело с неопределенностями. Поэтому для поиска оптимального управления металлургическими процессами, к числу которых и относится управление процессами структурообразования, необходимо использовать аппарат нечёткой математики и искать нечёткое управление реальными промышленными технологическими процессами [6–15].

Решение задачи поиска оптимального управления структурообразованием в отливках из конструкционного чугуна, работающих под высоким давлением, с учетом названных выше особенностей, очевидно, должно включать в себя ряд основных процедур, имеющих целью:

- построение адекватной математической модели типа «состав – свойство», в которой входными переменными являются содержания элементов химического состава чугуна, а выходными – размер включений графита и состав металлической матрицы;
- анализ полученной модели и оптимизация на её основе, имеющая целью определение такого химического состава чугуна, который обеспечивают максимальную герметичность изготавливаемых из него корпусных деталей.

## 3. Построение математических моделей типа «состав – свойство»

Одним из многочисленных примеров отливок машиностроительного назначения с повышенными требованиями к герметичности может служить отливка «Корпус цилиндра выключения сцепления» для грузового автомобиля КрАЗ. Данная отливка изготавливается из серого чугуна с пластинчатым графитом марки СЧ20-СЧ25 ГОСТ1412-85 литьем в разовые песчаные формы (рис. 1).



**Рис. 1** – Отливка «Корпус цилиндра выключения сцепления» для грузового автомобиля КрАЗ

Химический состав чугуна для данной отливки включает в себя помимо основных пяти элементов легирующие элементы: Cr, Ni, Ti, Cu. Целью математического моделирования являлось построение модели, связывающей содержание элементов химического состава (9 входных переменных) с размером графита в осевой зоне и на

периферии в сечении отливки, а также количеством перлита в осевой зоне и на периферии в сечении отливки.

При этом особое внимание уделялось именно составу металлической матрицы (количество перлита и феррита в микроструктуре), так как при наличии грубого крупного графита герметичность тем выше, чем больше количество перлита в металлической матрицы, обеспечивающего большую прочность перемычек между пластинами графита.

Методология построения таких математических моделей подробно описана в цикле работ [16–20] и кратко заключается в реализации следующих процедур-этапов:

Этап 1. Кластеризация точек и расчет функции принадлежности.

Этап 2. Искусственная ортогонализация результатов опытов и построение локальных уравнений регрессии.

Этап 3. Формирование усечённого ортогонального подплана плана полного факторного эксперимента.

Этап 4. Оценивание параметров полного уравнения регрессии.

Математическая модель имеет вид полинома Колмогорова-Габор

$$y_i = a_0 + a_1 F_1 + \dots + a_m F_m + a_{12} F_1 F_2 + \dots + a_{m-1,m} F_{m-1} F_m + \dots + a_{12\dots m} F_1 F_2 \dots F_m, \quad (1)$$

где  $F_i$  – содержание  $i$ -го элемента химического состава – суть нечёткие входные переменные для задачи поиска нечёткого оптимального управления процессом выплавки чугуна,  $y_i$  – параметры микроструктуры (размер графита и количество перлита) в осевой зоне и на периферии в сечении отливки. Итогом реализации методологии является оценивание параметров математических моделей для дальнейшего анализа поверхности отклика, выполняемого с помощью гребневого анализа. Конечной целью такого анализа является определение диапазона  $[F_i^3 - \Delta_i, F_i^3 + \Delta_i]$  по каждому элементу химического состава, который обеспечивает удовлетворение требованиям по микроструктуре сплава. Полученные при этом результаты формируют задание для управления процессом выплавки чугуна.

Матрица оптимальных значений входных переменных имеет вид

$$F_{onm}(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа,

$A$  – матрица коэффициентов математической модели

$$y(F, \lambda) = a_0 + 2a'F + F'aF + \lambda(r^2 - F'F) \quad (3)$$

при ограничении вида

$$r^2 = F'F. \quad (4)$$

Условие существования стационарной точки представляется в виде

$$\frac{1}{2} \frac{\partial y}{\partial F'} = a + AF' - \lambda F'F = 0 \quad (5)$$

Верхняя и нижняя границы решения определяются на основе зависимостей

$$r_{onm}(\lambda) = \sqrt{F'_{onm} F_{onm}} \quad (6)$$

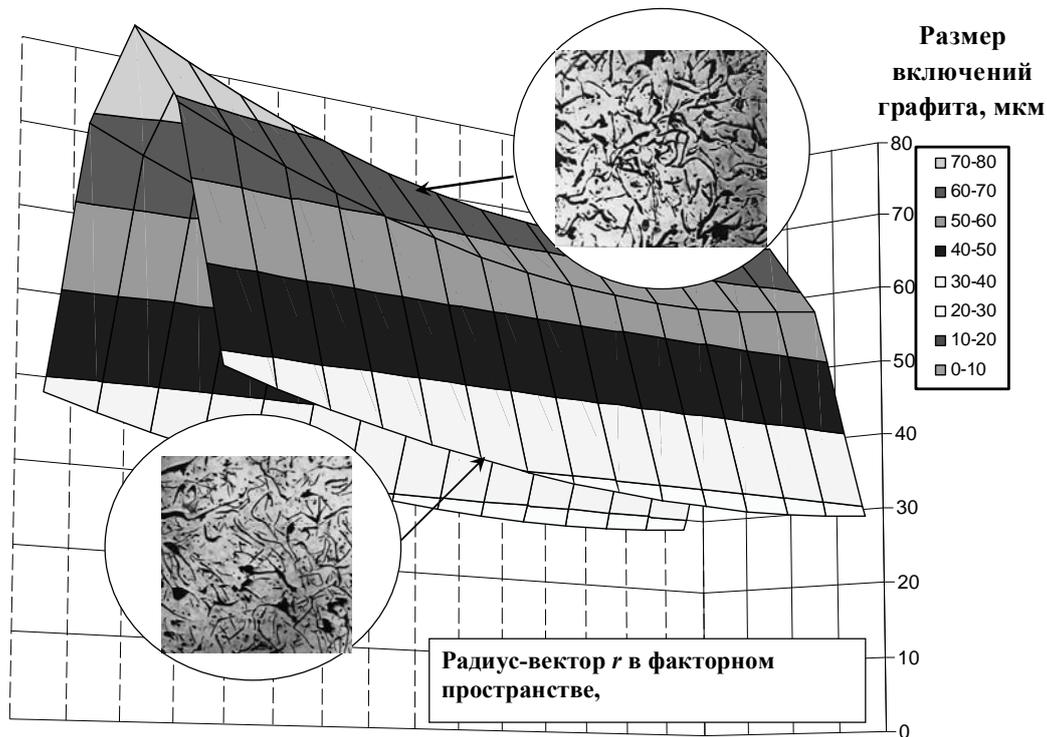
$$y_{onm}(\lambda) = a_0 + 2a'F_{onm} - F'_{onm} A F_{onm}, \quad (7)$$

где  $r$  – радиус-вектор в факторном пространстве,  
 $a$  – матрица оценок линейных коэффициентов модели.

Решения уравнений (2), (6) и (7), представляющие собой параметрическое описание линий гребней, являются функциями  $\lambda$ , оптимальные значения входных переменных могут быть найдены из уравнения (2).

#### 4. Результаты оптимизации и их интерпретация

На рис. 2 представлена поверхность отклика, описывающая распределение размера графита в осевой зоне и на периферии в сечении отливки «Корпус цилиндра выключения сцепления» в зависимости от удаленности от центра плана в факторном пространстве, оцениваемой параметром  $r$  в уравнении (4).



**Рис. 2** – Поверхность отклика, описывающая распределение размера графита в осевой зоне и на периферии в сечении отливки «Корпус цилиндра выключения сцепления»

На рис. 3, 4 представлено решение задачи по определению оптимальных интервалов значений нечётких входных переменных  $[F_i^3 - \Delta_i, F_i^3 + \Delta_i]$ , обеспечивающих выполнение требований по количеству перлита в микроструктуре.

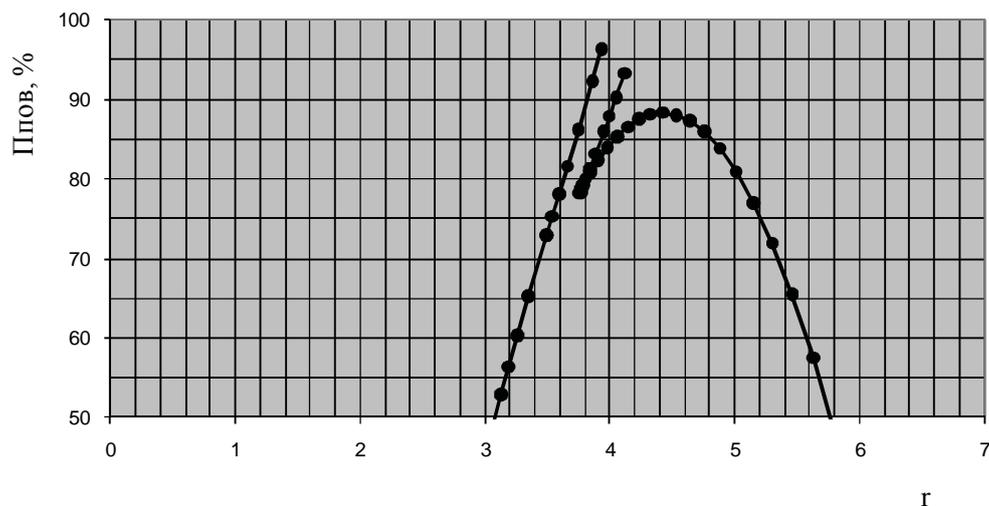


Рис. 3 – График зависимости количества перлита на периферии сечения отливки (П<sub>пов</sub>) от удаленности от центра плана в факторном пространстве

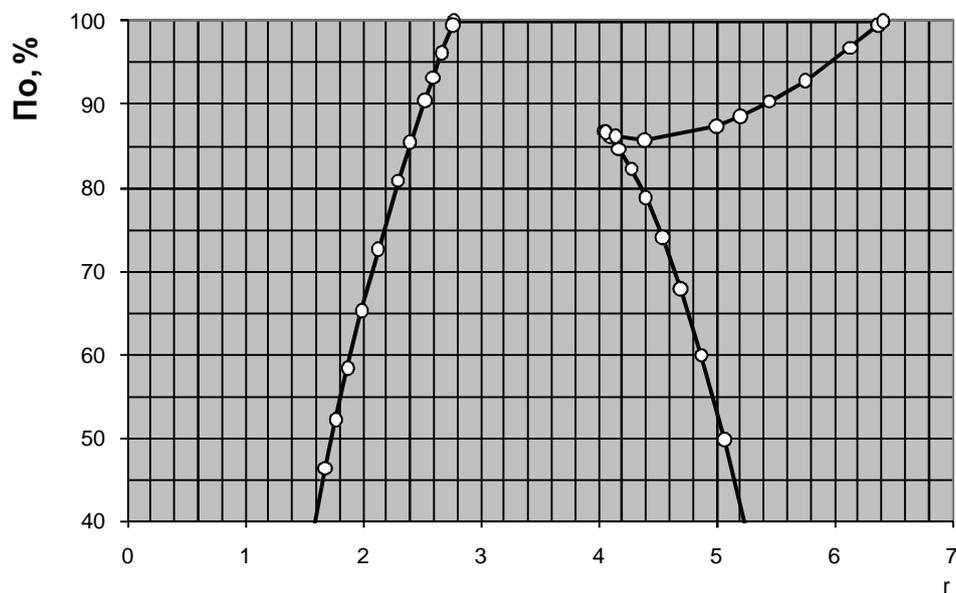


Рис. 4 – График зависимости количества перлита в осевой зоне сечения отливки (П<sub>ос</sub>) от удаленности от центра плана в факторном пространстве

Конечная цель оптимизации может быть достигнута наложением интервалов  $[F_i^3 - \Delta_i, F_i^3 + \Delta_i]$  для выходных переменных, описывающих параметры микроструктуры (размер графита и количество перлита) в осевой зоне и на периферии в сечении отливки. Результатом этого является определение значений интервалов, формирующих задание для управления процессом выплавки чугуна для отливок с повышенными требованиями к герметичности.

### Выводы

Решение задачи поиска оптимального управления структурообразованием в отливках из конструкционного чугуна, работающих под высоким давлением, может быть получено

реализацией методологии искусственной ортогонализации и последующим анализом поверхности отклика, описывающей связь входных переменных – содержания элементов химического состава чугуна, и выходных переменных, определяющих герметичность отливок. К последним относятся размеры графита в осевой зоне и на периферии в сечении отливки, а также количество перлита в осевой зоне и на периферии в сечении отливки. Последние две выходных переменных должны быть максимизированы, так как при грубом пластинчатом графите с крупными пластинами, формирующими минимальную толщину перемычек металлической матрицы в микроструктуре, увеличение количества перлита повышает прочность межграфитовых перемычек. Реализация описанной методологии позволяет получать работоспособные математические модели, которые могут быть использованы при решении задач поиска оптимального по конечному состоянию управления процессами выплавки сплавов. Предложенная методология особенно хороша в том случае, когда качество готового сплава оценивается по нескольким выходным переменных (механическим или специальным свойствам), в том числе в условиях наличия нескольких конкурирующих выходных переменных.

**Список использованных источников:**

1. Повышение герметичности отливок из серого чугуна / Л. А. Иванова, П. В. Доценко, И. В. Прокопович, П. В. Каспревич // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. – Одесса, 1995. – С. 11-13.
2. Иванова, Л. А. Причины потери герметичности отливок из серого чугуна / Л. А. Иванова, И. В. Прокопович, П. В. Каспревич // Моделирование в прикладных научных исследованиях : материалы семинара / Одесский гос. политехн. ун-т. – Одесса, 1996. – Вып. 3. – С. 25–28.
3. Иванова, Л. А. Зависимость герметичности серого чугуна от длины графитовых включений / Л. А. Иванова, И. В. Прокопович // Моделирование в прикладных научных исследованиях : материалы семинара / Одесский гос. политехн. ун-т. – Одесса, 1996. – Вып. 3. – С. 28–32.
4. Иванова, Л. А. Влияние графитовых включений на герметичность серых чугунов / Л. А. Иванова, И. В. Прокопович // Литейное производство. 1997. – № 2. – С. 7–9.
5. Прокопович, И. В. Підвищення герметичності тонкостінних виливків з сірого чавуну : автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. В. Прокопович: – Одесса, 1997. – 16 с.
6. Раскин, Л. Г. Нечеткая математика: моногр. / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Харьков: Парус, 2008. – 352 с.
7. Данилова, Н. В. Применение нечеткой логики для разработки модели количественной оценки содержания меди в штейне / Н. В. Данилова // Проблемы рудной и химической электротермии: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием «Электротермия-2010». – СПб., 2010. – С. 172–177.
8. Данилова, Н. В. Применение метода нечетких с-средних для построения функций принадлежности параметров технологического процесса / Н. В. Данилова // Инновационные

технологии, моделирование и автоматизация в металлургии Сб. научн. тр. Семинара. – СПб., 2010. – С. 11–12.

9. Параметрическая идентификация Varmax моделей процесса кристаллизации крупногабаритных монокристаллов / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, А. В. Соболев, И. И. Тавровский // Науковий вісник КУЕІТУ. – 2009. – № 4 (26). – С. 23 – 29.

10. Суздаль, В. С. Редукция модели при синтезе регуляторов для управления кристаллизацией / В. С. Суздаль // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – № 2/3 (50). – С. 31–34.

11. Суздаль, В. С. Оптимизация задачи синтеза управления для процессов кристаллизации / В. С. Суздаль // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – № 6/3 (54). – С.41–44.

12. Бондарчук, А. А. Модели управления твердостью металла в условиях стохастической и нечеткой неопределенности / А. А. Бондарчук, М. Г. Матвеев, Ю. А. Полянский // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – №4.1. – С. 124–128.

13. Бондарчук, А. А. Анализ моделей управления твердостью стали в процессе плавки / А. А. Бондарчук, М. Г. Матвеев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 3. – С. 37–40.

14. Бондарчук, А. А. Модели выбора состава в системе «состав-свойство» / А. А. Бондарчук, М. Г. Матвеев // Математические методы в технике и технологиях : материалы XX Междунар. науч. конф. – Ярославль: Изд-во Яросл. гос. техн. ун-та, 2007. – Т. 2. – С. 139–140.

15. Бондарчук, А. А. Прогнозирование и управление твердостью выплавляемой стали на основе моделей нечеткого логического вывода : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Бондарчук. – Воронеж, 2006. – 16 с.

16. Серая, О. В. Оценивание параметров уравнения регрессии в условиях малой выборки / О. В. Серая, Д. А. Дёмин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 6/4 (42). – 2009. – С. 14–19.

17. Дёмин, Д. А. Метод обработки малой выборки нечетких результатов ортогонализированного пассивного эксперимента / Д. А. Дёмин, Т. И. Каткова // Вісник Інженерної Академії України. – 2010. – № 2. – С. 234–237.

18. Серая, О. В. Оценка представительности усеченных ортогональных подпланов плана полного факторного эксперимента / О. В. Серая, Д. А. Дёмин // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2010. – № 3. – С. 84–88.

19. Раскин Л. Г. Искусственная ортогонализация пассивного эксперимента в условиях малой выборки нечетких данных / Л. Г. Раскин, Д. А. Дёмин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 1 (80). – С. 20–23.

20. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – № 44 (7). – P. 34–48.

*Дёмин Д.А.* «Управление структурообразованием в отливках из серого чугуна с целью повышения их герметичности».

В статье изложены результаты исследований в области процессов управления структурообразованием в отливках из серого чугуна, к которым предъявляются повышенные требования по герметичности. Показано, что применение методов искусственной ортогонализации для построения математических моделей типа «состав – свойство» и гребневого анализа поверхностей отклика, описывающих связь входных и выходных переменных процесса, является эффективным инструментом в задаче поиска оптимального управления процессами структурообразования в отливках.

**Ключевые слова:** процесс управления, математическая модель, герметичность, надежность деталей машин.

*Дьомін Д.А.* «Управління структуроутворенням у відливках з сірого чавуну з метою підвищення їх герметичності».

У статті викладені результати досліджень в області процесів управління структуроутворенням у відливках з сірого чавуну, до яких пред'являються підвищені вимоги по герметичності. Показано, що застосування методів штучної ортогоналізації для побудови математичних моделей типу «склад - властивості» і гребневого аналізу поверхонь відгуку, що описують зв'язок входних і вихідних змінних процесу, є ефективним інструментом в задачі пошуку оптимального управління процесами структуроутворення в відливках.

**Ключові слова:** процес управління, математична модель, герметичність, надійність деталей машин.

*Demin D.A.* "Management structure formation in castings from gray cast iron to improve their tightness".

This article presents the results of research in the field of management processes of structure formation in castings from gray cast iron, which increased demands on tightness. It is shown that the use of artificial methods of orthogonalization to construct mathematical models of the "structure – property " and the ridge surface analysis report describing the relationship of input and output variables of the process, is an effective tool in the task of finding the optimal process management structure in the casting.

**Key words:** process control, mathematical model, integrity, reliability of machine parts.

Стаття надійшла до редакції 2 грудня 2013 р.