

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА

STRUCTURE OF THE DECISION-MAKING SYSTEM FOR MANAGEMENT OF THE PROCESS CHEMICAL COMPOSITION OF CASTINGS FROM THE IRON

**A. Korneyev
A. Sukhanov**

Summary. Improvement of the methods of system analysis in the application to the formation of alloys cast iron, in the metallic matrix of which there are composite inclusions — graphite, ferrite, perlite and austenite — is an actual modern task. The purpose of the research carried out by the author is to build a decision-making system for controlling the process of formation of the optimal chemical composition of cast iron alloys whose properties would satisfy the specified quality criteria: Brinell hardness, strength, relative wear resistance and specific heat. To solve the problem, the authors used the system approach: the system-forming properties of castings from cast iron were identified, the main stages of system research were identified, the structure of the decision-making system was structured, the state space of the control object in the system was described, the tasks of the functionals used in the system were formulated, mathematical models based on fuzzy methods were developed logic and algorithms of stochastic optimization.

Keywords: Control system, state of control object, decision making, chemical composition, alloy, fuzzy logic.

Корнеев Андрей Матиславович

*Д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Липецкий государственный
технический университет (г. Липецк)
weenrok@mail.ru*

Суханов Андрей Владимирович

*Ассистент, ФГБОУ ВО Липецкий государственный
технический университет (г. Липецк)
pm03sav@mail.ru*

Аннотация. Совершенствование методов системного анализа в приложении к формированию сплавов чугуна, в металлической матрице которых имеются композитные включения, — графит, феррит, перлит и аустенит, — является актуальной современной задачей. Цель проведенных автором исследований — построение системы принятия решений при управлении процессом формирования оптимального химического состава чугуновых сплавов, свойства которых удовлетворяли бы заданным критериям качества: твердости по Бринеллю, прочности, относительной износостойкости и удельной теплоемкости. Для решения поставленной задачи авторами использовался системный подход: выделены системообразующие свойства отливок из чугуна, определены основные этапы системного исследования, построена структура системы принятия решений, описано пространство состояния объекта управления в системе, сформированы задачи применяемых в системе функционалов, разработаны математические модели на основе методов нечеткой логики и алгоритмов стохастической оптимизации.

Ключевые слова: Система управления, состояние объекта управления, принятие решений, химический состав, сплав, нечеткая логика.

Системный подход к формированию сплавов чугуна, в металлической матрице которых имеются композитные включения, — графит, феррит, перлит и аустенит, — с требуемыми свойствами может рассматриваться как способ конструирования систем совместно с методами их описания и исследования. В ряде случаев в материаловедении уже использовался системный подход. Будучи сложными системами, сплавы из нескольких металлов в соединении с неметаллами обладают системными атрибутами и характерными признаками системы: структура, целостность совокупности элементов, устойчивые существенные связи между элементами системы, определяющие её интегративные свойства [1].

Решение технологических задач с применением системного анализа позволяет рассматривать технологический процесс как сложную систему, в которую входят элементы с различными уровнями дискретности и детализации. Если производить анализ элементарных про-

цессов в системе отдельно, то в большинстве случаев это не позволит установить соответствующие элементарным процессам стадии технологического процесса (например, изменение соотношения графита и перлита в металлической матрице сплава чугуна, изменение процентного содержания аустенита в сплаве чугуна может происходить сразу на нескольких технологических стадиях; то же может касаться добавления или переноса отдельных веществ и химических элементов при формировании состава материала). Аналогично невозможно судить в общем о технологическом процессе без рассмотрения взаимосвязей между отдельными стадиями процесса и окружающей средой.

В работах [1, 2] в качестве основного этапа построения систем управления сложными технологическими процессами выделяют математическое моделирование процессов и оценку их адекватности. Математические модели сложных процессов в большинстве случаев

представляют собой системы уравнений, посредством которых описывают детерминированные законы, которые отражают только общую суть явлений с учётом ограничений и допущений. В реальности процессы протекают в условиях, далёких от идеальных, что приводит к задачам выбора различных коэффициентов и параметров в модели, определяемых экспериментальным путём [3]. Подобный подход успешно ранее применялся при построения систем управления процессом структуризации композиционных материалов [4, 5, 6] и иных сложных производственных систем [7].

Сокращение числа альтернатив выбора химического состава (рецептуры) чугуновых сплавов специального назначения (высокопрочных чугунов, белых или серых чугунов) основано на изучении роли составных ингредиентов в формировании интегративных свойств материала как системы. Прочностные, физические и химические свойства сплавов на основе железа и углерода во многом определяются химическим составом и технологией производства, процентным содержанием графитовых и перлитовых фаз в металлической матрице, а также температурой, с которой началось охлаждение чугуна. Высокой степенью зависимости от указанных факторов обладают структурные свойства сплава.

Построение структуры системы принятия решений при формировании свойств и химического состава чугуновых сплавов невозможно без выделения их системообразующих свойств. Как правило, сплавы чугуна полиструктурны, и на разных этапах управления их свойствами необходимо учитывать особенности поведения материала на разных уровнях: субмикроструктурном, микроструктурном и макроструктурном [6]. Например, за счет дисперсного расположения фаз в сплавах чугуна обеспечивается возникновение композитной структуры [8]. В условиях резко различающихся свойствах фаз в сплаве эффект композиционного упрочнения является положительным эффектом, который обуславливается чисто геометрическими факторами: взаимным расположением составляющих фаз, геометрической формой и размерами включений, ориентацией их относительно действующих напряжений [6]. Отметим, что подобный эффект упрочнения имеет место и в других материалах, обладающих композитной структурой [4, 5, 9].

В зависимости от условий, которым должен удовлетворять сплав чугуна, структурная схема управления формированием его свойств и химического состава должна содержать функционалы принятия решений о значениях параметров, характеризующих работу материала на том или ином структурном уровне. Для некоторых видов чугунов необходимым является выполнение требований прочности, износостойкости, твердости, а для других еще и теплопроводности, теплоемкости,

хладостойкости, коррозионной стойкости в жидких и газовых средах и др. Для удовлетворения данным требованиям в процессе формирования структуры и химического состава чугунового сплава достаточно рассмотреть сплав на макроструктурном уровне [8, 10]. Основными факторами, определяющими свойства сплава (для деталей, работающих на простые виды нагружений, а также изгибаемых элементов) на макроструктурном уровне, являются: дисперсность распределения фаз, геометрическая форма и размеры включений, взаимное расположение составляющих фаз, объемное содержание графита, перлита, аустенита и других включений, химическое взаимодействие между отдельными фазами, температура охлаждения сплава и др. [8, 10].

Для построения системы принятия решений по управлению процессом формирования оптимального химического состава чугуна необходимо выделить характеристики, определяющие свойства сплава на макроуровне. Такими свойствами можно считать прочность, твердость, относительную износостойкость и удельную теплоемкость. В зависимости от наличия у чугуновой отливки тех или иных свойств из перечисленных возможно определять состояние объекта управления, — сплава с заданными характеристиками.

Структурная схема системы принятия решений по формированию оптимального химического состава чугунового сплава представлена на рисунке 1. Здесь состояния, в которых может находиться система обозначены символами S_x , где индекс x может принимать первые 16 значений в двоичной форме (0001 ... 1111) и расшифровывается следующим образом: на первом месте — твердость чугунового сплава по Бринеллю (0 — не удовлетворяет требуемому значению, 1 — удовлетворяет), на втором месте относительная износостойкость отливки, на третьем месте — предельная прочность на растяжение, на четвертом месте — удельная теплоемкость. Например, состояние S_{1100} будет обозначать, что для отливки из чугуна с химическим составом, сформированном в процессе принятия решений, требования к твердости и относительной износостойкости удовлетворены, однако прочность и удельная теплоемкость, наоборот, не соответствуют заданным значениям.

В зависимости от условий, которым должен удовлетворять сплав чугуна, структурная схема управления формированием его химического состава должна содержать функционалы принятия решений о значениях параметров, характеризующих работу материала на том или ином структурном уровне.

На основе выбранных системообразующих свойств сплавов чугуна в структуре системы определены

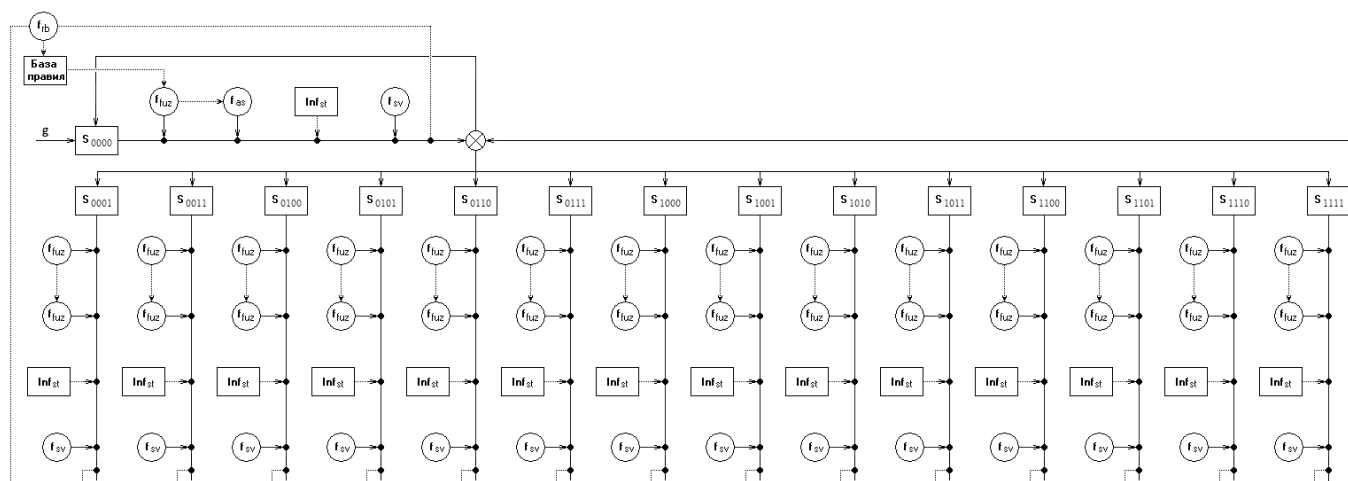


Рис. 1. Структурная схема системы принятия решений по формированию оптимального химического состава чугуна

функционалы принятия решений, содержащие алгоритмы и математические модели, позволяющие оптимизировать свойства и структуру сплавов, содержащих графитовые и перлитовые включения. С учётом требований, предъявляемых к системам принятия решений по управлению процессами оптимальной структуризации материалов с композитной структурой [1, 2, 6, 8, 10], определены следующие функционалы (рис. 1):

- ◆ f_{fuz} — функционал, осуществляющий фаззификацию входной информации о требованиях, предъявляемых к сплаву (посредством дефаззификации результатов работы функционала задаются границы поиска оптимальных значений процентного содержания отдельных химических элементов в сплаве);
- ◆ f_{as} — функционал, осуществляющий поиск оптимальных значений процентного содержания отдельных химических элементов в сплаве чугуна (поиск значений осуществляется с помощью методов стохастической оптимизации в многомерном пространстве на основе алгоритма имитации отжига и его модификаций [11]);
- ◆ f_{sv} — функционал, определяющий свойства чугуна в зависимости от его химического состава (аналитические зависимости) и металлографии;
- ◆ f_{fb} — функционал, осуществляющий информационную поддержку при формировании (изменении) базы правил, используемой функционалом f_{fuz} при формировании границ поиска.

Входной информацией системы, является вектор $g \in R^{13}$, содержащий значения процентного содержания для каждого химического элемента чугуна образца выбранной марки (C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Cu, V, Mo, Ti, Al, Sb).

Входной информацией системы, является вектор $g \in R^{13}$, содержащий значения процентного содержания для каждого химического элемента чугуна образца выбранной марки (C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Cu, V, Mo, Ti, Al, Sb).

Функционал f_{fuz} осуществляет фаззификацию данных о требуемых свойствах отливок из чугуна и предполагаемой области их применения. Для тех или иных марок чугунов (согласно ГОСТ 7769–82) необходимым является наличие следующих свойств:

- ◆ жаростойкость (ЧХ1, ЧХ2, ЧХ3, ЧХ32, ЧС5, ЧС5Ш, ЧЮХШ, ЧЮ6С5, ЧЮ30);
- ◆ коррозионностойкость (ЧХ22С, ЧХ28, ЧХ28Д2);
- ◆ коррозионностойкость в жидкой среде (ЧС13, ЧС15, ЧС17, ЧС15М4, ЧС17М3);
- ◆ коррозионностойкость в газовых средах ДВС (ЧНХТ, ЧНХМД, ЧНМШ, ЧНДХМШ);
- ◆ износостойкость (ЧХ3Т, ЧХ9Н5, ЧХ16, ЧХ16М2, ЧХ22, ЧХ28Д2, ЧГ6С3Ш, ЧГ7Х4, ЧГ8Д3, ЧН2Х, ЧН4Х2, ЧН3ХМДШ, ЧН4Х2, ЧН15Д7);
- ◆ стойкость в цинковом расплаве (ЧХ28П);
- ◆ хладостойкость (ЧН20Д2Ш);
- ◆ маломагнитность (ЧГ8Д3, ЧН11Г7Ш, ЧН15Д3Ш, ЧН15Д7, ЧН19Х3Ш).

В зависимости от степени необходимости в наличии у сплава того или иного свойства, пользователем автоматизированной системы управления задаются оценки такой необходимости по шкале от 0 до 100.

В качестве области применения выделены следующие: холодильные плиты доменных печей, колосники и балки агломерационных машин, детали коксохимического оборудования, детали газотурбинных двигателей и компрессоров, детали контактных аппаратов химического оборудования, мелющие детали рудоразмельных

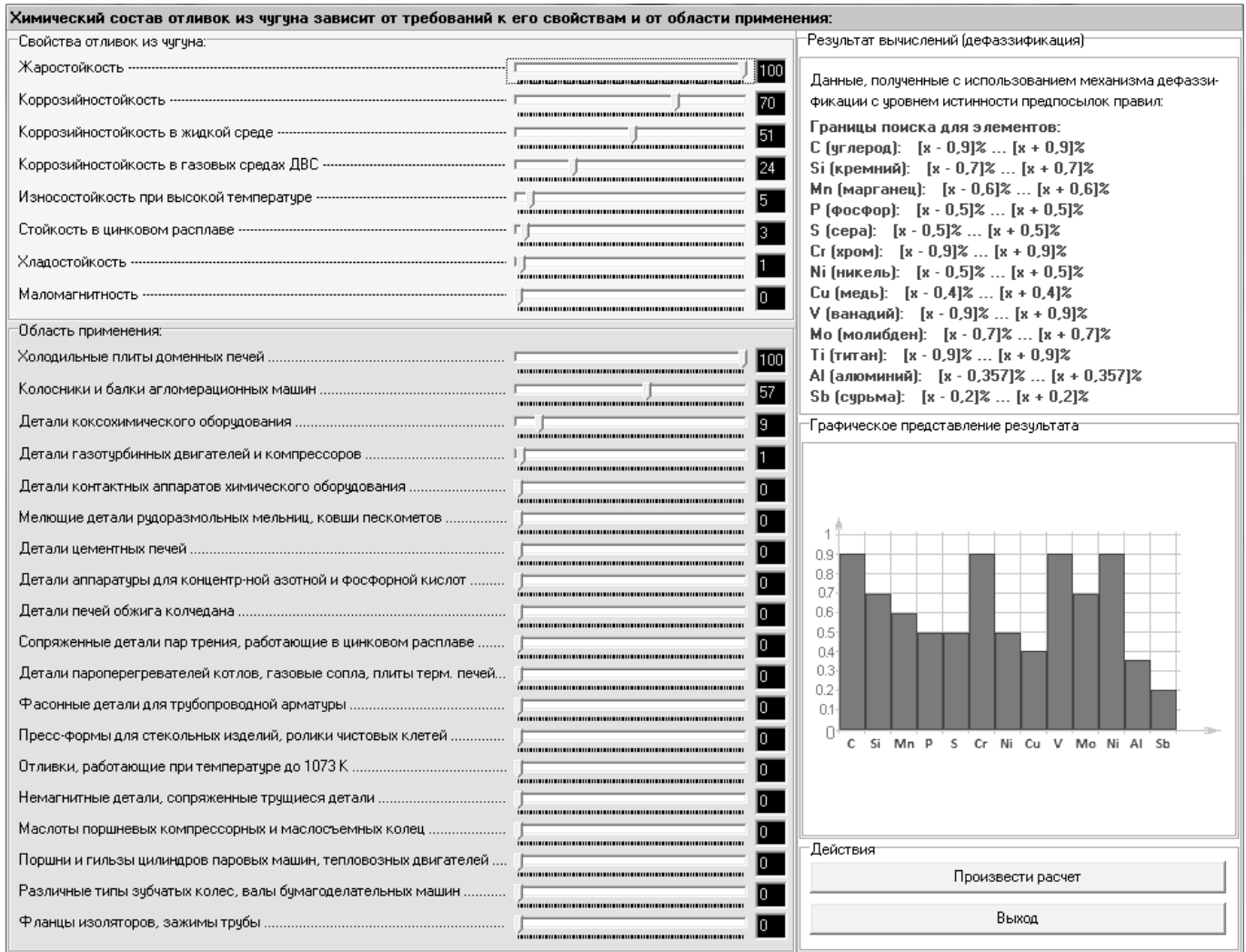


Рис. 2. Дефаззификация данных о границах поиска значений процентного содержания химических элементов в сплаве

мельниц, ковши пескометов, детали цементных печей, детали аппаратуры для концентрированной азотной и фосфорной кислот, сопряженные детали пар трения, детали пароперегревателей котлов, газовые сопла, фасонные детали для трубопроводной арматуры, немагнитные детали, маслоты поршневых компрессорных и маслоъемных колец, поршни и гильзы цилиндров паровых машин, зубчатые колеса, валы бумагоделательных машин, фланцы изоляторов, зажимы труб и др. Так же, как и в случае со свойствами отливок из чугуна, здесь пользователь автоматизированной системы управления задает оценку вероятности использования детали из формируемого сплава в той или иной области по шкале от 0 до 100.

На рисунке 2 представлено окно модуля автоматизированной системы принятия решения, в котором показан результат дефаззификации работы функционала *ffuz*

для чугуна марки ЧХ1 с повышенными требованиями к жаростойкости и коррозионностойкости и с возможностью применения в качестве сплава для отливок холодильных плит доменных печей. Результатами дефаззификации здесь являются границы поиска оптимальных значений процентного содержания каждого элемента в рецептуре сплава.

Пунктирными линиями в структуре системы (рис. 1) показаны информационные связи. Дефаззификация результатов работы функционала *ffuz* содержит информацию о границах поиска оптимальных значений процентного содержания химических элементов в сплаве, которая передается функционалу *fas*. Также на каждом этапе при переходе системы в новое состояние информация о свойствах и структуре сплава с новым химическим составом передается функционалу *frb* для формирования новых правил принятия решений или изменения

существующих. База данных *Infst* (рис. 1) формируемая на основе экспериментальных данных в лаборатории предприятия, содержит информацию о металлографии сплава; данная информация служит для расчета удельной теплоемкости (зависит от вида и дисперсности фаз) отливок из чугуна.

Система может переходить из одного состояния в другое, но конечное состояние, в котором сплав обладает химическим составом, обеспечивающим выполнение всех критериев, должно быть максимально близко к состоянию S_{1111} или в идеальном случае система должна достигнуть данного состояния. Заметим здесь, что система может находиться в одном и том же состоянии на протяжении нескольких фазовых переходов. Фазовое пространство состояний в данном случае является четырёхмерным математическим пространством. Пространство состояний объекта управления, таким образом, представлено шестнадцатью

точками, при этом переход возможен между любыми из них.

Автоматизированная система принятия решений в процессе формирования оптимального химического состава чугуна сплава последовательно применяет к объекту управления, — отливке из чугуна, — последовательность функционалов, изменяющих количественную меру процентного содержания каждого химического элемента, и осуществляя при этом поэтапный поиск оптимальной рецептуры на основе данных математических моделей, аналитических расчётов, лабораторных испытаний и с учётом заданных пользователем требований, предъявляемых к свойствам и области применения отливок из чугуна. В настоящее время автоматизированная система на основе представленной в работе структуры проходит апробацию на производственном предприятии ООО «Липецкая трубная компания «Свободный Сокол».

ЛИТЕРАТУРА

1. Прангишвили И. В. Системный подход и общесистемные закономерности: научное издание / И. В. Прангишвили — М.: СИНТЕГ, — 2000. — 528 с.
2. Прангишвили И. В. Повышение эффективности управления сложными организационными и социально-экономическими системами / И. В. Прангишвили // Проблемы управления. — 2005. — № 5. — С. 28–32.
3. Гинсберг К. С. К вопросу об общей методологии идентификации / К. С. Гинсберг, Д. М. Басанов // Идентификация систем и задачи управления SICPRO-06: Труды V Международной конференции ИПУ РАН. — М., — 2006. — С. 131–141.
4. Корнеев А. М. Математическое моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния неоднородных сред с непрерывными и дискретными волокнами / Корнеев А. М., Бузина О. П., Суханов А. В. // Фундаментальные исследования. — 2016. — № 8. — С. 39–44.
5. Корнеев А. М. Детерминированная математическая модель и алгоритм анализа напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с дискретными волокнами / Корнеев А. М., Бузина О. П., Суханов А. В. // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — № 9 (1). — С. 57–62.
6. Гарькина, И. А. Опыт оптимизации многоцелевой системы / И. А. Гарькина, Т. Н. Волкова // Современные научные исследования и инновации. — 2014. — № 10. — Ч. 1. — С. 120–124.
7. Корнеев А. М. Моделирование сложных производственных систем с помощью вероятностных автоматов / А. М. Корнеев, Т. А. Сметанникова, Л. С. Абдуллах // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2014. — № 1. — С. 39–43.
8. Печенкина Л. С. Оптимизация состава самозакаливющихся чугунов / Л. С. Печенкина // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2017. — № 6. — С. 117–121.
9. Корнеев А. М. Вероятностная математическая модель оценки начальной надежности изгибаемых элементов, дисперсно-армированных дискретными волокнами / Корнеев А. М., Бузина О. П., Суханов А. В., Шипулин И. А. // Фундаментальные исследования. — 2016. — № 9 (3). — С. 25–31.
10. Корнеев А. М. Системная методология в приложении к прогнозированию свойств чугуных сплавов / А. М. Корнеев, А. В. Суханов, И. А. Шипулин // Theoretical & Applied Science. — 2018. — № 2 (58). — С. 181–186.
11. Корнеев А. М. Варианты организации и общие схемы алгоритма стохастической оптимизации на основе метода имитации отжига / А. М. Корнеев, А. В. Суханов, И. А. Шипулин // Theoretical & Applied Science. — 2018. — № 3 (59). — С. 1–5.

© Корнеев Андрей Матиславович (weenrok@mail.ru), Суханов Андрей Владимирович (pm03sav@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»