УДК 621.74: 658.2

С. Г. Пелых[1], д-р техн. наук О. И. Пономаренко[2]

[1] Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск
[2] Национальный технический университет “ХПИ”, г. Харьков

ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

Разработана и реализована методика получения железоуглеродистых литейных сплавов с заданными физико-механическими характеристиками при минимальной стоимости шихты для их приготовления.

Постановка проблемы в общем виде

Шихтовые материалы и технология плавки в значительной степени определяют качество жидкого металла, а в конечном итоге, и качество отливки. Значительная часть литейных дефектов отливок возникает из-за несоответствия свойств жидкого металла установленным требованиям. Основными из них являются усадочные и газовые раковины, несоответствие структурно-механических свойств заданным, склонность к образованию отбела, горячие и холодные трещины.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время задача разработки сплавов с заданными физико-механическими и технологическими характеристиками решается на основе физико-механических представлений о механизме их формирования. При этом используются обобщенные двойные диаграммы состояния, данные о механизме и пределах растворимости элементов легирующего комплекса в основном металле, особенности межфазового взаимодействия при формировании элементов структуры, использование различных методов воздействия на процесс формирования макро- и микроструктуры литейного сплава [1-4]. В последние годы на вооружении специалистов по литейному производству появились мощные современные средства и системы компьютерного моделирования, их использование может значительно повысить эффективность решения задачи разработки литейных сплавов с заранее заданными свойствами [5-7].

Выделение нерешенных частей данной проблемы

На данный момент в области решения задачи синтеза литейных сплавов хорошо разработаны физико-химические основы выбора легирующего комплекса для литейных сплавов на различной основе. Решены отдельные задачи по оптимизации их свойств, однако до настоящего времени отсуствует общий метод и алгоритм решения задачи синтеза литейных сплавов с заранее заданными свойствами при условии их минимальной стоимости.

Формулирование целей статьи

Разработать и реализовать методику и алгоритм решения задачи синтеза литейных сплавов с заданными механическими характеристиками и технологическими свойствами при минимальной стоимости шихты для их выплавки.

Изложение основного материала

Для решения задачи оптимального синтеза литейного сплава на основе выбора состава шихты и технологических параметров плавки жидкого металла необходимо:

Изложение основного материала

Для решения задачи оптимального синтеза литейного сплава на основе выбора состава шихты и технологических параметров плавки жидкого металла необходимо:

- определить требования к химическому составу жидкого металла и компонентному составу шихты;
- рассчитать состав шихты, обеспечивающий получение отливок с заданными свойствами;
- выбрать рациональный режим плавки и разливки.

Решение первой задачи производится на основе обработки и обобщения данных производственного опыта, для решения второй используются расчетные методы, третья реализуется на основе использования приемов, отработанных в данных условиях производства. При выборе шихты необходимо регламентировать не только химический состав жидкого металла расплава но и компонентный состав шихты.

Современным методом выбора шихты является ее расчет на основе использования методов оптимизации и аппарата математического программирования. При этом ставится задача получить минимальную по стоимости шихту, обеспечивающую заданный химический состав жидкого металла. Простым и эффективным методом компьютерного решения этой задачи является линейное программирование, хорошо освоенное в технике и экономике.

© С. Г. Пелых, О. И. Пономаренко 2006 р.

При решении задачи управления качеством отливок уже на стадии подготовки шихты и плавки жидкого металла необходимо определить зависимости между параметрами качества отливок, с одной стороны, компонентным составом шихты и химическим составом жидкого металла, с другой. Эти условия можно использовать при математической постановке данной задачи в ограничениях или в критерии оптимизации. Зависимости этого типа обычно получают методом обработки данных планируемого эксперимента, они имеют чаще всего нелинейный вид из-за наличия в них членов в виде парных взаимодействий или составляющих второго и более высокого порядка.

Наличие нелинейных составляющих в этих зависимостях делает необходимым использование нелинейного математического программирования для решения задачи управления качеством отливки на стадии расчета шихты. Существующий опыт решения оптимизационных задач показывает, что использование нелинейных моделей позволяет более точно сформулировать решаемую задачу, однако при этом значительно усложняется математическая процедура поиска оптимального решения и уменьшается надежность и точность получаемого решения. Последнее связано с тем, что существующие методы нелинейной оптимизации гарантируют определение только локального оптимума, в то время как искомое решение может представлять собой глобальный оптимум.

Для решения задачи синтеза литейного сплава с заданным уровнем механических и эксплуатационных свойств необходимо соединить точную постановку задачи управления качеством отливок на стадии расчета шихты при использовании нелинейных моделей с простой и эффективной линейной процедурой поиска оптимума. Для решения этой задачи разработан и реализован на ЭВМ следующий алгоритм.

1. На основании экспертных оценок ситуации определяется набор технологических параметров сплава (T_j) и его механических свойств (P_j), имеющих существенное значение для формирования качества отливок в изучаемых условиях.

2. По результатам обработки данных лабораторных или промышленных экспериментов определяются зависимости изучаемых свойств сплава от параметров технологии:

$$P_s = f_s(X_1, X_2, X_3), \tag{1}$$

$$T_k = f_k(X_1, X_2, X_3), \tag{2}$$

где X_1, X_2 – векторы, описывающие, соответственно, компонентный и химический состав шихты;

X_3 – вектор технологических параметров процесса приготовления жидкого металла;

f_s, f_k – функциональные зависимости.

3. Определяется исходная информация, содержащая вид компонентов шихты, их химический состав, стоимость, а также величины угара или пригара различных химических элементов при плавке.

4. Формулируется целевая функция и ограничения решаемой задачи. В качестве критерия оптимизации в решаемой задаче принята наименьшая стоимость шихтовых материалов:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{n} c_i x_i \Rightarrow \min, \tag{3}$$

где c_i – стоимость i-го компонента шихты;

x_i – относительная доля i-го компонента в шихте;

n – количество шихтовых материалов.

При решении задачи вводятся ограничения на химический состав жидкого металла, компонентный состав шихты и требуемые пределы технологических и механических свойств выплавляемого металла, имеющие следующий вид:

$$Э_{jн} < Э_j < Э_{jв}, \tag{4}$$

$$X_{iн} < X_i < X_{iв}, \tag{5}$$

$$P_{sн} < P_s < P_{sв}, \tag{6}$$

$$T_{kн} < T_k < T_{kв}, \tag{7}$$

где $Э_{jн}, X_{iн}, P_{sн}, T_{kн}$ – нижние допустимые пределы, соответственно, j-го химического элемента, i-го компонента шихты, s-го механического свойства литого сплава, k-го технологического свойства сплава;

$Э_{jв}, X_{iв}, P_{sв}, T_{kв}$ – верхние допустимые пределы тех же величин.

Приведенные ограничения и величины их пределов формируются технологом исходя из необходимости обеспечения заданного уровня качества отливки. Подставив (1) и (2) в (6) и (7), получим:

$$P_{sн} < f_s(X_1, X_2, X_3) < P_{sв}, \tag{8}$$

$$T_{kн} < f_k(X_1, X_2, X_3) < T_{kв}. \tag{9}$$

В итоге сформулирована нелинейная оптимизационная задача с целевой функцией (3) и ограничениями (4), (5), (8), (9).

5. Методом подбора определяется нулевое приближение к решению задачи. В качестве нулевого можно использовать любое решение, удовлетворяющее ограничениям на химический состав жидкого металла и компонентный состав шихты.

6. Нелинейные ограничения (8), (9) разложением в ряд Тейлора линеаризуются в окрестностях нулевого приближения.

7. Линеаризованная задача решается на ЭВМ по критерию минимума стоимости шихты методом линейного программирования, в результате этого находим первое приближение к искомому результату.

8. На основе полученного решения определяются новые значения коэффициентов линеаризованных

уравнений нелинейных ограничений.

9. Полученные значения коэффициентов используются для корректировки данных, вводимых в ЭВМ для решения задачи методом линейного программирования.

10. Решается новая линейная оптимизационная задача, в результате получается второе приближение к искомому результату.

11. Повторяются пункты алгоритма 8-10 до получения заданной точности решения задачи.

12. Итерационный процесс поиска решения прекращается в случае, если относительный модуль погрешности решения, получаемого на двух соседних итерациях, становится меньше заранее заданной величины.

Пример. Разработать технологию выплавки ковкого чугуна марки КЧ 30-6 ГОСТ 1215-79 с заданным уровнем технологических и механических свойств при минимальных затратах. Для выплавки чугуна в индукционной печи ИЧТ-10 использовались следующие шихтовые материалы:

- возврат собственного производства (x_1),
- стружка чугунная (x_2),
- высечка стальная (x_3) ГОСТ 2787-75,
- чугун зеркальный (x_4) ГОСТ 4755-80,
- чугун литейный (x_5) ДСТУ 3132-95,
- коксик (x_6) ГОСТ 3340-88,
- ферросилиций (x_7) ГОСТ 1415-78.

В результате обработки производственной информации найдено, что для получения качественных отливок из ковкого чугуна необходимо регламентировать его прочность при растяжении (s), относительное удлинение (d) и жидкотекучесть по спиральной пробе (r). После отсеивания незначимых факторов в качестве независимых переменных задачи выбраны содержание углерода (C,%), кремния (Si, %) и количество стальной высечки в шихте (z, %).

После обработки результатов реализации ПЭ типа 2^3 в производственных условиях были найдены нелинейные зависимости регламентируемых параметров качества от изучаемых переменных, которые в натуральном масштабе имеют следующий вид:

$$s = 83{,}6 - 13{,}2\,C - 24{,}9\,Si - 0{,}28\,z + 5{,}5\,C\,Si + 0{,}08\,C\,z\,, \quad (10)$$

$$d = 22 - 3{,}3\,C - 3{,}5\,Si - 0{,}05\,z + 0{,}43\,C\,Si\,, \quad (11)$$

$$r = -77{,}3 + 4\,C + 21{,}5\,Si + 1{,}26\,z + 15{,}1\,C\,Si - 0{,}39\,C\,z\,. \quad (12)$$

При решении задачи введены следующие ограничения:

на химический состав жидкого металла (с учетом угара):

$$2{,}6 < C < 3{,}05\,, \quad (13)$$

$$1{,}3 < Si < 1{,}6\,, \quad (14)$$

на компонентный состав шихты:

$$0{,}3 < x_1 < 0{,}4\,, \quad (15)$$

$$x_3 < 0{,}4\,, \quad (16)$$

$$\sum x_i = 1\,, \quad (17)$$

на свойства ковкого чугуна:

$$s \geq s_н\,, \quad (18)$$

$$d \geq d_н\,, \quad (19)$$

$$r \geq r_н\,, \quad (20)$$

где $s_н$, $d_н$, $r_н$ – нижние допустимые значения предела прочности при растяжении, относительного удлинения и жидкотекучести.

В качестве нулевого приближения к решению задачи был принят состав шихты, используемый на Луганском литейно-механическом заводе для выплавки ковкого чугуна марки КЧ 30-6 ГОСТ 1215-79: x_1 = 0,375; x_2 =0; x_3 = 0,38; x_4 = 0; x_5 = 0,23; x_6 = 0,0075; x_7 = 0,0075. Стоимость шихты составляла 1025,9 грн., среднее содержание химических элементов составляло: 2,73 % углерода, 1,44 % кремния, 0,5 % марганца, средние значения механических свойств имели следующие значения: прочность – 326 МПа, относительное удлинение – 9,7 %, жидкотекучесть – 0,51 м.

Разложив уравнения (10)-(12) в ряд Тейлора и ограничившись только линейными членами разложения, получим в окрестности нулевого приближения:

$$s = 62{,}1 - 5{,}3\,C - 10{,}1\,Si - 0{,}062\,z\,, \quad (21)$$

$$d = 20{,}3 - 2{,}67\,C - 2{,}32\,Si - 0{,}051\,z\,, \quad (22)$$

$$r = -136{,}8 + 35{,}8\,C + 62{,}8\,Si - 0{,}182\,z\,. \quad (23)$$

В уравнениях (18)-(20) задаем значения характеристик ковкого чугуна, отвечающих марке КЧ 30-6: $s_н$ = 300 МПа, $d_н$ = 6%, $r_н$ = 0,5 м и, подставив в них уравнения (21)-(23), получим линейные ограничения, которые в совокупности с неравенствами (13)-(17) представляют собой полную систему ограничений решаемой задачи. Решая ее по критерию (3) методом линейного программирования, находим первое приближение к искомому решению: x_1 = 0,3; x_2 = 0,55; x_3 = 0,15; стоимость шихты составила 690,03 грн.

В окрестностях полученного решения была произведена новая линеаризация уравнений (10)-(12), с учетом этого была решена новая задача линейного программирования, в результате которой было получено второе приближение к искомому решению: x_1 = 0,3; x_2 = 0,48025; x_3 = 0,21765; x_6 = 0,00210; стоимость шихты составила 681,51 грн. Ввиду расхождения между решениями, полученными в первом и втором приближениях, итерационный процесс был продолжен. В третьем приближении был получен результат: x_1 = 0,30; x_2 = 0,48; x_3 = 0,218; x_6 = 0,002, стоимость шихты составила 680,92 грн.

Сравнение результатов, полученных во втором и третьем приближениях, показывает, что они практи-

чески совпадают, поэтому последний состав шихты является оптимальным: возврат – 30 %, стружка чугунная – 48 %, высечка стальная – 21,8 %, коксик – 0,2 %. Проверка полученных рекомендаций с помощью опытно-промышленных плавок в условиях Луганского литейно-механического завода показала, что рекомендованный состав оптимальной шихты обеспечивает получение ковкого чугуна с заданным уровнем его физико-механических и технологических свойств. Значительное снижение стоимости металлошихты получено за счет существенного изменения ее состава и технологического процесса плавки чугуна в индукционной печи, это позволило устранить из состава шихты дорогостоящий передельный чугун, уменьшить количество возврата и стального лома, а в качества основы шихты использовать чугунную стружку. Для получения высокого качества расплава он подвергался высокому перегреву и выдержке при этой температуре, а обеспечение неоходимого содержания углерода в нем регулировалось с помощью науглераживания коксиком.

Вывод

Разработана и испытана в производственных условиях на процессе выплавки ковкого чугуна методика оптимального синтеза литейных сплавов, обеспечивающая получение заданных его технологических и физико-механических свойств при минимальных затратах на шихтовые материалы.

Список литературы

1. Гуляев Б.Б. Синтез сплавов. М.: Металлургия. 1984. – 160 с.
2. Воздвиженский В. М., Грачев В. А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение. 1984. – 432 с.
3. Ketscher N., Herfurth K., Steller I. Giessereitechnik in Deutschland - Wirtschflicher Hintergrund und Chancen der Giebverfahren // Konstruction. – 1999. – Vol. 51, № 5. – S. 13-17.
4. Drovacek J. Mit Andradonik zur Selbsthilfe auf der Suche einer verantwortliche Globalitat // Giesserei Rundschau. – 1999. – V. 46. – № 7– 8. – S. 3 – 8.
5. Рысев М.А. Системы компьютерного моделирования литейных процессов. // Литейное производство. – 2000. – №1. – С. 29-32.
6. Rabf B., Sebastian D/ Zielgerechte Custeilgestaltung wird durch C-Techniken unter-stuz // Maschinenmarkt. – 2001. – Vol. 107. – S. 44-47.
7. Under Bernhard. Virtuelltr Enticklungsprozess von Gussbauteilen // Giesserei Rundschau. – 2002. – Vol. 49. – № 7-8. – S. 109-113.

Одержано 27.04.2006 р.

Розроблено та реалізовано методику одержання залізовуглецевих ливарних сплавів з фізико-механічними характеристиками за мінімальною вартістю шихти для їх приготування.

Method of iron-carbon cast alloys with fixed physicomechanical characteristics production using charge materials of minimal cost for their preparation is developed and realized.

УДК 669.28:519/87

Канд. техн. наук С. М. Григорьев, канд. техн. наук Ю. И. Нагорный, С. Ю. Былим

Национальный технический университет, г. Запорожье

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЗОВАННОГО МОЛИБДЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Разработана и оптимизирована математическая модель многофункиональных технико-экономических показателей производства металлизованного молибденового концентрата и выплавки стали 08Х17Н15М3Т с его применением.

Главным итогом настоящей работы является разработка математической модели технико-экономических показателей получения металлизованного молибденового концентрата из рудных концентратов в промышленных условиях. Установлены оптимальные пределы ведущих функциональных зависимостей, при этом выявлены ряд преимуществ по сравнению с действующим техническим регламентом и достигнутыми

© С. М. Григорьев, Ю. И. Нагорный, С. Ю. Былим 2006 р.