

УДК 621.762

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ЗАГОТОВКИ

Титов В.Г., Крючков Д.И., Нестеренко А.В., Залазинский А.Г.

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: tit@imach.uran.ru

Приведены результаты экспериментального исследования механических свойств спрессованных и спекённых брикетов из композиций состоящих из порошков, полученных из высокопрочного сплава титана VT-22 распылением плазмой с добавками порошка титана PTM-1, полученного гидридно-кальциевым способом и порошка сплава никель-алюминий ПВ-Н70Ю30. Осуществлена постановка задачи для выбора оптимального состава шихты композитного материала обеспечивающих требуемые механические характеристики и стоимость полуфабрикатов и изделий. Применяя методы нормирования и свертки критериев, обработаны значения плотности, прочности на сжатие и стоимости полученных образцов, и рассчитаны нормированные значения критериев оптимизации. Используя метод наименьших квадратов, определены коэффициенты линейных функций критериев оптимизации и целевой функции оптимизации. Методом линейного программирования с учётом ограничений путем максимизации целевой функции получены оптимальные значения состава шихты композиционного материала.

Ключевые слова: оптимизация, прессование композита, некомпактное титаносодержащее сырьё, плотность, прочность на сжатие

OPTIMIZING OF SELECTION OF THE MIXTURE COMPOSITION FOR THE MAKING OF A COMPOSITE WORKPIECE

Titov V.G., Kryuchkov D.I., Nesterenko A.V., Zalazinskiy A.G.

Institute of Engineering Science, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, e-mail: tit@imach.uran.ru

The results of experimental investigations of mechanical properties of pressed and sintered briquettes from compositions consisting of powders produced from high-strength titanium alloy VT-22 spray by plasma with additives of titanium powder PTM-1, obtained by hydride-calcium method and powder alloy nickel-aluminum PV-N70U30 are given. The statement of problem for select the optimal composition of the mixture of composite material providing required mechanical characteristics and the cost of semi products and products is made. The values of density, compressive strength and cost of the obtained samples are processed, and the normalized values of optimization criteria are calculated using the methods of rationing and convolution of criteria. The coefficients of the linear functions of optimization criteria and target optimization function are determined using the methods of least squares. The optimal values of the mixture composition of the composite material are obtained by the method of linear programming with consideration of constraints by maximizing of the target function.

Keywords: optimization, pressing of composite material, noncompact titanium-based raw material, density, compressive strength

Титаносодержащие материалы применяются во многих областях промышленного производства. В частности, их широко применяют в транспортном и химическом машиностроении, авиакосмической технике и других областях промышленности благодаря высоким показателям удельной прочности, сопротивления усталости, вязкости разрушения и коррозионной стойкости [1]. Вместе с тем производство таких материалов отличается высокой энергоёмкостью и значительным количеством трудно перерабатываемых отходов металлургического производства титана [2]. Широко распространённым методом переработки отходов металлургического производства является порошковая металлургия, позволяющая существенно уменьшить материалоёмкость продукции и объём механической обработки [3, 4]. При этом открываются перспективы для создания новых композиционных материалов, обладающих уникальными свойствами [5].

При создании композиционных материалов возникает задача выбора оптимального состава шихты из порошкообразного сырья. Поскольку компоненты шихты оказывают различное влияние на свойства и стоимость композиционных материалов, требуется за счет варьирования состава обеспечить определенный уровень характеристик получаемых изделий. Для решения этой задачи может быть использован метод линейного программирования [6].

Для решения задач механики деформирования композитов из порошкообразного сырья в институте машиноведения УрО РАН разработан гибридный моделирующий комплекс [7]. Одним из направлений развития комплекса является внедрение средств поддержки принятия решений в области совершенствования технологических процессов получения композитных полуфабрикатов и изделий из некомпактного титаносодержащего сырья. Для его реализации разраба-

тываются и внедряются в математическую подсистему подпрограммы обработки расчетных и экспериментальных данных методами оптимизации, и хранения результатов обработки в базе знаний.

В работе приведены постановка и решение задачи по определению оптимального состава шихты для композитного материала из порошкообразного сырья. В качестве объекта исследования выступают брикеты из порошковых композиций, содержащих переработанные в порошок отходы промышленного производства титана. С использованием метода линейного программирования определён оптимальный состав порошкового композиционного материала.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – порошковый композит, состоящий из порошка, полученного из сплава ВТ-22 распылением плазмой, с добавками порошка титана ПТМ-1, полученного гидридно-кальциевым способом, порошка сплава никель-алюминий ПВ-Н70Ю30.

С целью выбора оптимального состава порошкового композита для производства изделий, работающих в условиях циклических силовых и температурных нагрузок, стойких к воздействию агрессивных сред провели несколько серий отсеивающих экспериментов, результаты которых описаны в [7, 8]. В этих работах исследовали процесс уплотнения смеси порошка, полученного из сплава ВТ-22 распылением плазмой, с добавками порошка титана ПТМ-1, полученного гидридно-кальциевым способом, порошка сплава никель-алюминий ПВ-Н70Ю30. Эти исследования проводились с сотрудниками лаборатории порошковых, композиционных и нано-материалов института металлургии УрО РАН.

Порошок сплава ВТ-22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe) выбран для повышения прочностных свойств композиционного материала. Исследуемый порошок представлен фракцией менее 440 мкм, средний размер частиц – 156 мкм.

Образцы прессовали при давлениях 1000 МПа. Прессование брикетов проводили на гидравлическом прессе МС-500 в закрытой разборной пресс-форме. После прессования получены брикеты плотностью $\rho_{\text{отн}} = 0,71..0,85$ от теоретической. Качество брикетов удовлетворительное. В ряде случаев для неспечённых образцов с содержанием ВТ-22 60% и выше наблюдалось осыпание нижней кромки. Спрессованные образцы спекали в вакууме 10^{-3} МПа в течение 2 часов при температуре 1200 °С, далее нагревались до температуры спекания 1 час. Режим спекания выбран в соответствии с рекомендациями [9]. Использовалась вакуумная электропечь сопротивления камерного типа СНВЭ-9/18.

Прочность брикетов оценивали по результатам опытов на осевое сжатие на универсальной испытательной машине ZWICK BT1-FR050THW/A1K. В момент начала разрушения заготовки фиксировали усилие и определяли предел прочности на сжатие σ_p при текущей плотности.

Результаты экспериментального исследования, после отсеивания опытов с шихтами, показаны в таблице. В ней приведены значения параметров спрессованных и спечённых образцов для каждого состава

шихты. В таблице приведены значения процентного содержания по массе порошков ВТ-22, ПТМ-1, ПВ-Н70Ю30, нормированные значения предела прочности на сжатие $\tilde{\sigma}_p$, относительной плотности $\tilde{\rho}_{\text{отн}}$, стоимостной показатель исходного сырья $\tilde{C}_{\text{п}}$, которые вычислены следующим образом:

$$\tilde{\sigma}_p = \frac{\sigma_p - \min(\sigma_p)}{\max(\sigma_p) - \min(\sigma_p)}, \quad (1)$$

$$\tilde{\rho}_{\text{отн}} = \frac{\rho_{\text{отн}} - \min(\rho_{\text{отн}})}{\max(\rho_{\text{отн}}) - \min(\rho_{\text{отн}})}, \quad (2)$$

$$\tilde{C}_{\text{п}} = 1 - \frac{C - \min(C)}{\max(C) - \min(C)}. \quad (3)$$

Известно, что порошки титана и его сплавов существенно различаются по стоимости. Учитывая невысокую стоимость порошка ВТ-22, полученного из отходов промышленного производства титана, а также сравнительно высокую стоимость порошков ПТМ-1 и ПВ-Н70Ю30, в таблицу добавили стоимостной показатель с целью учёта стоимости исходного сырья ($C_{\text{п}}$). Так как нужен композит с максимальными значениями предела прочности на сжатие $\tilde{\sigma}_p$, относительной плотности $\tilde{\rho}_{\text{отн}}$, и минимальным значением стоимости исходного сырья $\tilde{C}$, то вместо стоимости исходного сырья $\tilde{C}$ использовали обратный ей показатель стоимости $\tilde{C}_{\text{п}}$ (получен по формуле $\tilde{C}_{\text{п}} = 1 - C$), для которого нужно получить максимальное значение.

В результате в табл. 1 X_1, X_2, X_3 – варьируемые факторы, представляющие процентное содержание по массе компонент шихты: X_1 – процентное содержание ВТ-22, X_2 – ПТМ-1, X_3 – ПВ-Н70Ю30. Параметры, выбранные в качестве критериев оптимизации, обозначены так: Y_{σ} обозначает $\tilde{\sigma}_p$, Y_{ρ} – $\tilde{\rho}_{\text{отн}}$, Y_C – $\tilde{C}_{\text{п}}$.

Минимальные и максимальные значения для Y_{σ} соответственно 406 МПа, 1360 МПа, для Y_{ρ} соответственно 0,751, 0,815, для Y_C соответственно 1650 у.е., 2300 у.е.

Данные экспериментов использовали для оптимизации свойств композитного материала в зависимости от состава шихты для прессования заготовок.

Результаты исследования и их обсуждение

Задача оптимизации композиционного материала заключается в следующем: определить оптимальный состав шихты, при котором прессованием некомпактного титансодержащего сырья получается заготовка с максимальными механическими свойствами, при минимальных затратах на их получение.

Для определения значений целевой функции методом свертки критериев использована следующая формула [10]:

$$Y = \alpha_{\sigma} Y_{\sigma} + \alpha_{\rho} Y_{\rho} + \alpha_C Y_C. \quad (4)$$

Так как считаем $Y_{\sigma}, Y_{\rho}, Y_C$ равнозначными, приняли $\alpha_{\sigma} = \alpha_{\rho} = \alpha_C = 1$. Вычисленные значения Y по формуле 4 представлены в таблице.

Результаты прессования композитного материала из титансодержащего материала

№ п/п	Варьируемые факторы			Критерии оптимизации			
	X_1	X_2	X_3	Y_σ	Y_ρ	Y_C	Y
1	50	50	0	0,99	0,828	0	1,818
2	50	50	0	0,996	0,859	0	1,855
3	50	50	0	1	0,906	0	1,906
4	60	30	10	0,729	0,922	0,5	2,15
5	60	30	10	0,731	0,953	0,5	2,184
6	60	30	10	0,734	1	0,5	2,234
7	60	20	20	0,444	0,438	0,668	1,55
8	60	20	20	0,449	0,5	0,668	1,617
9	60	20	20	0,455	0,531	0,668	1,654
10	60	10	30	0,13	0,313	0,832	1,275
11	60	10	30	0,135	0,391	0,832	1,358
12	60	10	30	0,139	0,453	0,832	1,425
13	65	25	10	0,677	0,563	0,661	1,901
14	65	25	10	0,681	0,594	0,661	1,936
15	65	25	10	0,684	0,625	0,661	1,971
16	65	15	20	0,376	0,016	0,835	1,227
17	65	15	20	0,379	0,078	0,835	1,293
18	65	15	20	0,383	0,109	0,835	1,328
19	65	5	30	0	0	1	1
20	65	5	30	0,004	0,047	1	1,051
21	65	5	30	0,006	0,109	1	1,115
22	70	30	0	0,195	0,266	0,646	1,107
23	70	30	0	0,197	0,313	0,646	1,156
24	70	30	0	0,201	0,359	0,646	1,207
25	70	25	5	0,584	0,469	0,766	1,819
26	70	25	5	0,588	0,531	0,766	1,885
27	70	25	5	0,593	0,563	0,766	1,922

Для обеспечения требуемого качества композита и из физических соображений наложим следующие ограничения:

$$Y_\sigma \geq 0,3 \quad (\sigma_p \geq 700 \text{ МПа}) \quad (5)$$

$$Y_\rho \geq 0 \quad (\rho_{\text{отн}} \geq 0,751) \quad (6)$$

$$Y_C \geq 0,9 \quad (C \leq 2035 \text{ у.е./кг}) \quad (7)$$

$$0 \leq X_1 \leq 100, 0 \leq X_2 \leq 100, 0 \leq X_3 \leq 100; \quad (8)$$

$$X_1 + X_2 + X_3 = 100. \quad (9)$$

Зависимость целевой функции от варьируемых факторов представим линейной моделью:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3. \quad (10)$$

Таким образом, поставленная задача свелась к решению задачи линейного программирования: требуется найти состав шихты для прессования композитного материала,

при котором целевая функция (10) достигает максимума с учётом ограничений (5–9).

Модель для Y искали в виде (10) методом наименьших квадратов, решив задачу определения неизвестных коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3 . Была составлена совместная система уравнений для Y путём формирования матрицы из значений X_1, X_2, X_3 . Получен следующий результат:

$$Y = 0,01 X_1 + 0,032 X_2 + 0,015 X_3. \quad (11)$$

Невязка между экспериментальными и модельными значениями Y составила 0,09.

Зависимости Y_σ, Y_ρ, Y_C от варьируемых факторов так же представили линейными моделями:

$$Y_\sigma = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3, \quad (12)$$

$$Y_\rho = c_0 + c_1 X_1 + c_2 X_2 + c_3 X_3, \quad (13)$$

$$Y_C = d_0 + d_1 X_1 + d_2 X_2 + d_3 X_3. \quad (14)$$

Модели для Y , Y_p , Y_c искали соответственно в виде (12, 13, 14) методом наименьших квадратов, решив задачу определения неизвестных коэффициентов $b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3, d_0, d_1, d_2, d_3$. Получен следующий результат:

$$Y_c = -0.003X_1 + 0.024X_2 + 0.006X_3, \quad (15)$$

$$Y_p = -0.0035X_1 + 0.024X_2 + 0.009X_3, \quad (16)$$

$$Y_c = 0.017X_1 - 0.017X_2 + 0.0002X_3. \quad (17)$$

Невязка между экспериментальными и модельными значениями Y , Y_p , Y_c составила соответственно 0,02, 0,03, 0,00008.

Оптимальный состав шихты был получен поиском минимума функции (11), умноженной на -1 , с ограничениями $Y_c \geq 0,3$, $Y_p \geq 0$, $Y_c \geq 0,9$ равенством $X_1 + X_2 + X_3 = 100$ и в следующих границах $0 \leq X_1 \leq 100$, $0 \leq X_2 \leq 100$, $0 \leq X_3 \leq 100$ посредством линейного программирования. Получены следующие оптимальные значения:

$$X_1 = 77, X_2 = 23, X_3 = 0.$$

Также зависимость целевой функции от варьируемых факторов представили квадратичной моделью:

$$\begin{aligned} Y = & 0,0015X_1X_2 + 0,0017X_1X_3 - \\ & -0,0005X_2X_3 - 0,0003b_7X_1^2 - \\ & -0,0005X_2^2 - 0,0017X_3^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Для этой модели оптимальный состав шихты был получен с теми же ограничениями, равенством и в тех же границах симплекс-методом. Получены следующие оптимальные значения:

$$X_1 = 75, X_2 = 21, X_3 = 4.$$

Заключение

На основе анализа данных экспериментов даны рекомендации по выбору оптимального состава композиционного материала. Для этого разработана программа и использована методика оптимизации получения ком-

позита из некомпактного титансодержащего сырья, включающая в себя нормирование, метод наименьших квадратов, поиск минимума целевой функции методом линейного программирования. По этой методике было определено, что для получения композита из титансодержащего сырья с относительной плотностью не менее 0,751, пределом прочности не менее 700 МПа и стоимостью не более 2035 у.е./кг должен быть следующий состав шихты: 77% порошка из сплава ВТ-22, 23% порошка титана ПТМ-1. Этот результат был подтвержден оптимизацией симплекс-методом, который дал следующий состав шихты: 75% порошка из сплава ВТ-22, 21% порошка титана ПТМ-1, 4% порошка сплава никель-алюминий ПВ-Н70Ю30.

Список литературы

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Андреев А.А., Аношкин Н.Ф., Борзцовская К.М. и др. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 383 с.
3. Фроус Ф.Х., Смугерски Дж.Е. Порошковая металлургия титановых сплавов. Сб. науч. трудов. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – 263 с.
4. Устинов В.С., Олесов Ю.Г., Дрозденко В.А., Антипин Л.Н. Порошковая металлургия титана. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1981. – 248 с.
5. Кобелев А.Г., Лысак В.И., Чернышев В.Н., Кузнецов Е.В. Материаловедение и технология композиционных материалов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 365 с.
6. Банди Б. Основы линейного программирования. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
7. Крючков Д.И., Залазинский А.Г. Гибридный моделирующий комплекс для оптимизации процессов прессования неоднородных материалов. // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 9. – С. 22–28.
8. Крючков Д.И., Залазинский А.Г., Березин И.М., Романова О.В. Моделирование процессов компактирования титановых композитов из порошкообразного сырья // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – № 1. – Р. 48–60.
9. Моисеев В.Н., Сысоева Н.В., Ермолова М.И. Термическая обработка гранулированного сплава ВТ22. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 1. – С. 7–10.
10. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.