УДК 621.762-419.8

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ КОМПОЗИТА ИЗ НЕКОМПАКТНОГО ТИТАНСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

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

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: kru4koff@bk.ru, tit@imach.uran.ru

Исследованы механические свойства спрессованных и спечённых образцов из композиций порошков на основе титана. На основе анализа плотности и прочности на сжатие полученных прессовок даны рекомендации по выбору оптимального состава композиционного материала. Посредством оптимизации плотности, прочности на сжатие, качества и стоимости прессовок получен оптимальный состав композиционного материала.

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

OPTIMIZATION OF PRESSING PROCESS OF COMPOSITE FROM NONCOMPACT TITANIUM-BASED RAW MATERIAL

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

Institute of Engineering Science, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, e-mail: kru4koff@bk.ru, tit@imach.uran.ru

The article considers a research on the mechanical properties of the pressed and sintered samples made of titanium-based powders. The recommendations on the selection of the optimal composition of composite material are given on base of analysis of density and compressive strength of the pressed pieces. The optimal composition of composite material are got by means of optimization of density, compressive strength, quality, and cost of the pressed pieces.

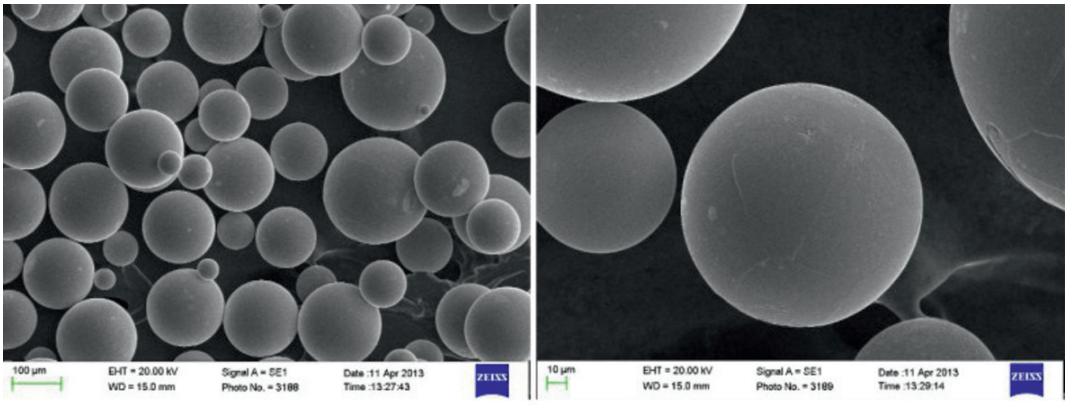
Keywords: optimization, pressing of composite material, noncompact titanium-based raw material, density, compressive strength

Титансодержащие материалы применяется 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].

Пластическое деформирование является основой процессов изготовления изделий из композиционных материалов методами порошковой и волоконной металлургии. Исследование процессов неупругого деформирования и разрушения таких структурно-неоднородных тел является актуальной задачей, для решения которой требуется привлечение современных информационных и компьютерных технологий. Применение компьютерного моделирования совместно с подходами механики структурно-неоднородных тел и оптимизации [6] открывает новые возможности комплексного анализа уплотнения, формоизменения и консолидации частиц, что позволяет совершенствовать процессы формования без применения уникального экспериментального оборудования.

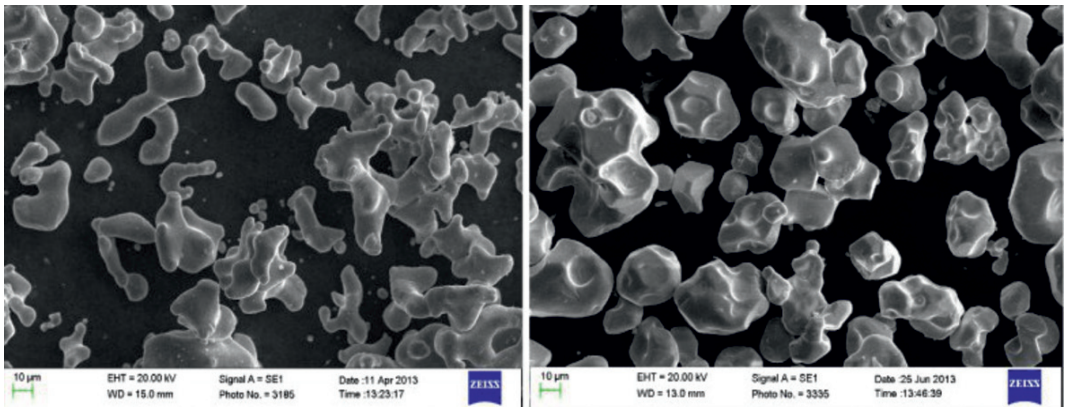
Для решения задач механики деформирования композитов из порошкообразного сырья в институте машиноведения УрО РАН разработан гибридный моделирующий комплекс [7]. Он представляет собой проблемно-ориентированную оболочку, интегрирующую CAD/CAE системы с системой компьютерной математики, построенную на базе математических библиотек языка Python. Для определённого типа задач разработан программный модуль с интерфейсом, в который вводятся данные, с возможностью варьирования основных технологических параметров исследуемых процессов.

Экспериментальные данные накапливаются в базе данных и передаются в математическую подсистему, в которой обрабатываются методом регрессионного анализа.



а) *б)*

Рис. 1. Морфология порошка, полученного из сплава ВТ-22 распылением плазмой (а); топография поверхности частиц порошка (б)



а) *б)*

Рис. 2. Морфология частиц порошков: ПТМ-1 (а); сплава никель-алюминий, полученного восстановлением, марки ПВ-Н70Ю30 (б)

В работе проведено изучение процесса уплотнения некомпактного титансодержащего сырья в процессе прессования и определены механические свойства порошковых композиций, содержащих переработанные в порошок отходы промышленного производства титана. С использованием симплекс метода оптимизации определён оптимальный состав порошкового композиционного материала.

Характеристика титансодержащего сырья и результаты экспериментального исследования процесса прессования композитного материала

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 [7-9]. 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. В качестве пластифицирующих добавок использовали медный порошок ПМС-1 и стеарат цинка.

Порошок сплава ВТ-22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe) выбран для повышения прочностных свойств композиционного материала. В материалах на основе титана алюминий повышает прочностные характеристики и жаропрочность, ванадий повышает пластичность и снижает охрупчивание материала при эксплуатации. Сплав ВТ-22 в отожженном состоянии является наиболее

прочным среди серийных сплавов, используется, например, для изготовления силовых крупногабаритных деталей летательных аппаратов. Гранулометрический состав порошков определяли на анализаторе частиц по размерам и форме CAMSIZER –XT (retsch Technology, Германия). Исследуемый порошок представлен фракцией менее 440 мкм, средний размер частиц – 156 мкм. Частицы порошка имеют округлую и сферическую форму, коэффициент сферичности – 0,722, коэффициент симметричности – 0,876. Морфология и топография поверхности порошка представлена на рис. 1.

Процентное содержание пластифицирующих добавок варьировалось с учётом рекомендаций специалистов лаборатории порошковых, композиционных и нано-материалов института металлургии УрО РАН [9].

На первом этапе исследований провели прессование порошка сплава ВТ–22 в исходном состоянии и после отжига. В результате получено, что для достижения относительной плотности $\rho_{отн}$ = 0.75…0.8 порошка ВТ–22 требуется давление прессования p более 1000 МПа. Даже при давлении порядка 1200…1300 МПа прессовки из ВТ–22 рассыпаются как из отожженного, так и неотожжённого порошка. Частицы деформируются, но не сцепляются между собой, то есть консолидация частиц для формирования компактного материала не происходит. Поэтому далее исследовали смесь порошка сплава ВТ-22 с добавками более пластичных порошков с частицами с развитой поверхностью: гидридно-кальциевого порошка титана ПТМ-1 со средним размером частиц 46,3 мкм после отжига и порошка сплава никель-алюминий, восстановленного ПВ-Н70Ю30, со средним размером частиц 43 мкм. Морфология порошков ПТМ-1 и ПВ-Н70Ю30 представлена на рис. 2.

Таблица 1

Условия эксперимента и свойства титансодержащего композитного материала

№ п/п	Состав шихты по массе%			Величины, характеризующие качество прессовок после спекания			
	ВТ-22	ПТМ-1	ПВ-Н70Ю30	σ_P, МПа;	$\tilde{\sigma}_p$	$\rho_{отн}$	$\tilde{\rho}_{отн}$
1	50	50	0	1350	0.99	0.804	0.828
2	50	50	0	1356	0.996	0.806	0.859
3	50	50	0	1360	1	0.809	0.906
4	60	30	10	1101	0.729	0.81	0.922
5	60	30	10	1103	0.731	0.812	0.953
6	60	30	10	1106	0.734	0.815	1
7	60	20	20	830	0.444	0.779	0.438
8	60	20	20	834	0.449	0.783	0.5
9	60	20	20	840	0.455	0.785	0.531
10	60	10	30	530	0.13	0.771	0.313
11	60	10	30	535	0.135	0.776	0.391
12	60	10	30	539	0.139	0.78	0.453
13	65	25	10	1052	0.677	0.787	0.563
14	65	25	10	1056	0.681	0.789	0.594
15	65	25	10	1059	0.684	0.791	0.625
16	65	15	20	765	0.376	0.752	0.016
17	65	15	20	768	0.379	0.756	0.078
18	65	15	20	772	0.383	0.758	0.109
19	65	5	30	406	0	0.751	0
20	65	5	30	410	0.004	0.754	0.047
21	65	5	30	412	0.006	0.758	0.109
22	70	30	0	592	0.195	0.768	0.266
23	70	30	0	594	0.197	0.771	0.313
24	70	30	0	598	0.201	0.774	0.359
25	70	25	5	963	0.584	0.781	0.469
26	70	25	5	967	0.588	0.785	0.531
27	70	25	5	972	0.593	0.787	0.563

Образцы прессовали при давлениях 1000 МПа. Прессование брикетов проводили на гидравлическом прессе МС–500 в закрытой разборной пресс–форме. После прессования получены брикеты плотностью $\rho_{отн}$ = 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 спекались 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 [10]. 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 исследования прессовок на основе порошка сплава ВТ22 показали следующее:

1. Лучше всего прессуются порошки с равным содержанием ВТ22 и ПТМ-1 и добавкой стеарата цинка в количестве 0,1 мас. %. В целом результаты согласуются с известными положениями о влиянии стеарата цинка на плотность и прочность прессовок. Добавка стеарата цинка повышает плотность при одновременном снижении прочностных свойств прессовок [1]. Таким образом, внедрение стеарата цинка в композицию оказалось неоправданным.

2. Увеличение содержания сплава ВТ22 до 70 % приводит к существенному ухудшению прочностных свойств.

3. Добавление малого количества (5 %) медного порошка ПМС-1 в шихту позволяет повысить прочностные свойства композита, а также снижает процентное содержание дорогостоящего порошка ПТМ-1; недостатком является снижение плотности прессовок. Повышение плотности прессовок можно достигнуть увеличением давления прессования до 1000 МПа.

Результаты экспериментального исследования, после отсеивания опытов с шихтами, показаны в табл. 1. 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, предела прочности на сжатие σ_P в МПа и относительной плотности $\rho_{отн}$.

В табл. 1 наряду с величинами σ_P и $\rho_{отн}$ приведены их нормированные значения, которые вычислены следующим образом:

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

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

Данные табл. 1 использовали для оптимизации свойств композитного материала в зависимости от состава шихты для прессования заготовок.

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, табл. 1 расширили с целью учёта стоимости (С) исходного сырья. В результате получена табл. 2, в которой 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 $\tilde{\sigma}_p$, $Y_\rho - \tilde{\rho}_{отн}$, $Y_C - \tilde{C}$. Значения Y_C получены следующим образом: по составу образцов вычислили их стоимость, эти значения были нормированы, т.к. стоимость конкурирует с σ_P и $\rho_{отн}$, то значения Y_C были получены вычитанием из 1 нормированных значений стоимости.

Постановка и формализация задачи оптимизации

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 решения задачи ввели обобщённый критерий для выбора оптимального состава шихты:

$$Y = \alpha_\sigma Y_\sigma + \alpha_\rho Y_\rho + \alpha_C Y_C. \quad (3)$$

Приняли в первом приближении, что $\alpha_\sigma = \alpha_\rho = \alpha_C = 1$.

Из физических соображений наложили следующие ограничения:

$$0 \le X_1 \le 100,\ 0 \le X_2 \le 100,\ 0 \le X_3 \le 100; \quad (4)$$

$$X_1 + X_2 + X_3 = 100. \quad (5)$$

Таблица 2

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

Зависимость обобщённого критерия оптимальности технологического процесса от варьируемых факторов представили линейной моделью:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 . \qquad (6)$$

Таким образом, поставленная задача свелась к решению задачи линейного программирования: требуется найти состав шихты для прессования композитного материала, при котором целевая функция (6) достигает максимума с учётом ограничений (4,5).

Решение задачи оптимизации процесса прессования композитного материала

По формуле (3) получили значения целевой функции Y (см. табл. 2).

Модель для Y искали в виде (6) методом наименьших квадратов, решив задачу определения неизвестных коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3. Была составлена совместная система уравнений для Y путём формирования матрицы из значений X_1, X_2, X_3. Был получен следующий результат:

$$Y = 0.01X_1 + 0.032X_2 + 0.015X_3 .$$

Невязка между экспериментальными и модельными значениями Y составила 0.09. Для её уменьшения зависимость обобщённого критерия оптимальности технологического процесса от варьируемых факторов представили квадратичной моделью:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 +$$

$$+b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3 +$$

$$+b_7X_1^2 + b_8X_2^2 + b_9X_3^2 . \qquad (7)$$

Для этой модели был получен следующий результат:

$$Y = 0.0015X_1X_2 + 0.0017X_1X_3 -$$

$$-0.0005X_2X_3 - 0.0003b_7X_1^2 -$$

$$-0.0005X_2^2 - 0.0017X_3^2 . \qquad (8)$$

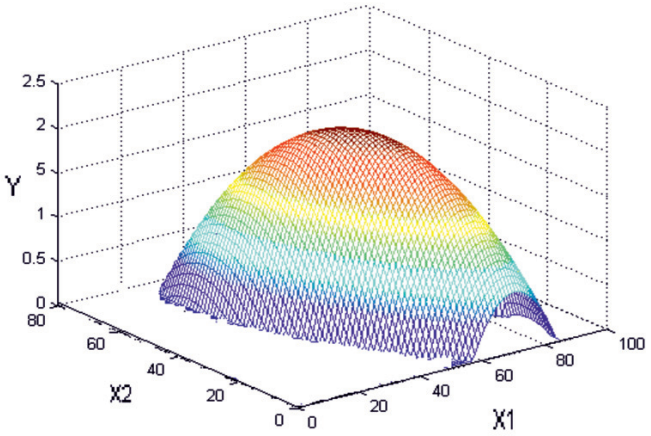


Рис. 3. Функция $Y(X_1, X_2)$

Невязка между экспериментальными и модельными значениями Y составила 0.05. На основании равенства (5) выразим X_3 через X_1, X_2, и изобразим функцию (8) (рис. 3).

Оптимальный состав шихты был получен поиском минимума нелинейной функции (8), умноженной на – 1, с равенством $X_1 + X_2 + X_3 = 100$ и в следующих границах $0 \le X_1 \le 100$, $0 \le X_2 \le 100$, $0 \le X_3 \le 100$ посредством поиска минимума скалярной функции нескольких переменных с ограничениями начиная с начального приближения симплекс методом (функция fmincon системы Matlab). Получены следующие оптимальные значения: $X_1 = 55$, $X_2 = 36$, $X_3 = 9$.

Заключение

На основе анализа данных экспериментов даны рекомендации по выбору оптимального состава композиционного материала. Использована методика оптимизации получения композита из некомпактного титансодержащего сырья, включающая в себя нормирование, метод наименьших квадратов, поиск минимума обобщённого критерия. По этой методике было определено, что для получения композита из титансодержащего сырья с максимальными плотностью и пределом прочности, и минимальной стоимостью должен быть следующий состав шихты: 55% порошка из сплава ВТ-22, 36% порошка титана ПТМ-1, 9% порошка сплава никель-алюминий, восстановленного ПВ-Н70Ю30.

Список литературы

1. Ильин А.А., Колачёв Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – Москва: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.

2. Андреев А.А., Аношкин Н.Ф., Борзецовская 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. Материаловедение и технология композиционных материалов / А.Г. Кобелев, В.И. Лысак, В.Н. Чернышев, Е.В. Кузнецов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 365 с.

6. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 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. – No. 1. – P. 48–60.

9. Щенникова Т.Л., Залазинский Г.Г., Гельчинский Б.Р., Романова О.В., Рыбалко О.Ф.и др. Исследование свойств порошков ВТ22 и порошковых материалов на его основе // Перспективные материалы. – 2015. – № 4. – С. 15-20.

10. Моисеев В.Н., Сысоева Н.В., Ермолова М.И. Термическая обработка гранулированного сплава ВТ22. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 1. – С. 7–10.