



OPTIMIZING THE COMPOSITION OF A COMPOSITE TO BE PRESSED FROM A NONCOMPACT TITANIUM-BASED RAW MATERIAL

A. G. Zalazinsky, D. I. Kryuchkov, A. V. Nesterenko, V. G. Titov*

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., Ekaterinburg, Russian Federation

*Corresponding autor. E-mail: tit@imach.uran.ru; address for correspondence: 34, ul. Komsomolskaya, 620049, Ekaterinburg, Russian Federation. Tel.: +7 343 3753579; fax: +7 343 3745330

The paper studies the mechanical properties of pressed and sintered samples made of titanium-based powders. Recommendations on the selection of the optimal composition of the composite material are given on the basis of the analysis of the density and compressive strength of the pressed pieces. The optimal composition of the composite material is obtained by optimizing the density, compressive strength, quality, and cost of the pressed pieces.

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

DOI: 10.17804/2410-9908.2016.5.039-048

References

1. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva. Spravochnik* [Titanium Alloys. Composition, Structure, and Characteristics: reference book]. M., VILS-MATI Publ., 2009, 520 p. (In Russian).
2. *Plavka i litie titanovykh splavov* [Melting and Casting of Titanium Alloys, ed. V.I. Dobatkin]. M., Metallurgiya Publ., 1978, 383 p. (In Russian).
3. *Poroshkovaya metallurgiya titanovykh splavov: sb. nauch. trudov* [Powder Metallurgy of Titanium Alloys, eds. F.H. Frous, J.E. Smugereski, transl. S.G. Glazunov]. M., Metallurgiya Publ., 1985, 263 p. (In Russian).
4. Ustinov V.S., Olesov U.G., Drozdenko V.A., Antipin L.N. *Poroshkovaya metallurgiya titana* [Powder Metallurgy of Titanium]. M., Metallurgiya Publ., 1981, 248 p. (In Russian).
5. Kobelev A.G., Lisak V.I., Chernyshev V.N., Kuznetsov E.V. *Materialovedenie i tekhnologiya kompozitsionnykh materialov* [Materials Science and Technology of Composite Materials]. M., Intermet Inzhiniring Publ., 2006, 365 p. (In Russian).
6. Shteyer R. E. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya* [Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application. New York, John Wiley, 1986, 546 p.]. M., Radio i svyaz Publ., 1992, 504 c. (In Russian).
7. Kryuchkov D.I., Zalazinsky A.G. A hybrid modeling complex designed to optimize extrusion of inhomogeneous materials // *Vestnik kompiuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*. – 2013. – No. 9. – P. 22–28. (In Russian).
8. Kryuchkov D.I., Zalazinskiy A.G., Berezin I.M., Romanova O.V. Modelling of compaction of titanium composite powders. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 1, pp. 48–60. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.048-060. Available at: http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1_4.html.
9. Shchennikova T.L., Zalazinsky G.G., Gelchinsky B.R., Romanova O.V., Rybalko O.F., Kryuchkov D.I., Zalazinsky A.G., Berezin I.M. Investigation of VT22 powders and VT22-based powder materials. *Perspektivnye materialy*, 2015, No. 4, pp. 15–20. (In Russian).
10. Moiseev V.N., Sysoeva N.V., Ermolova M.I. Heat treatment of granulated VT22 alloy. *Metal Science and Heat Treatment*, 1996, vol. 38, iss. 1–2, pp. 42–45. DOI: 10.1007/BF01153872.



Подана в журнал: 12.10.2016
УДК 621.762-419.8
DOI: 10.17804/2410-9908.2016.5.039-048

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПРЕССОВАНИЯ КОМПОЗИТА ИЗ НЕКОМПАКТНОГО ТИТАНСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук, ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Российская Федерация*

*Ответственный автор. Электронная почта: tit@imach.uran.ru; адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация. Телефон: +7 (343) 375-35-79; факс: +7 (343) 374-53-30

Исследованы механические свойства спрессованных и спеченных 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 сырье, плотность, прочность на сжатие.

1. Введение

Титансодержащие 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 энергоемкостью и значительным количеством трудно перерабатываемых отходов металлургического производства титана [2]. Широко распространенным методом переработки отходов металлургического производства является порошковая металлургия, позволяющая существенно уменьшить материалоемкость продукции и объем 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 определенного 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 наименьших квадратов.

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 определен оптимальный состав порошкового композиционного материала.

2. 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 приведены 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.

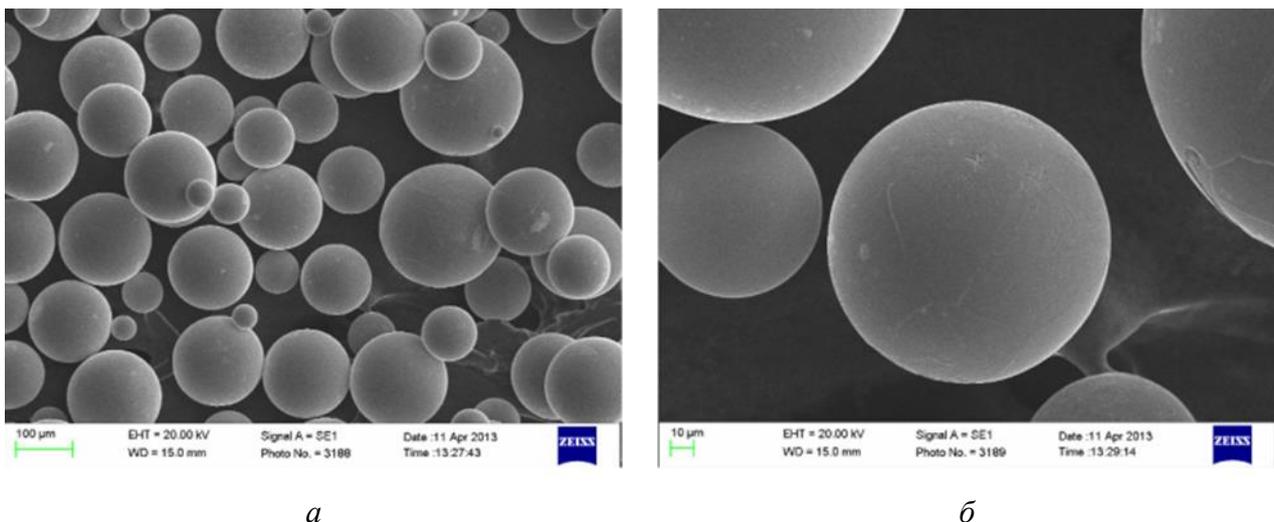


Рис. 1. Морфология порошка, полученного из сплава ВТ-22 распылением плазмой (а); топография поверхности частиц порошка (б)

Процентное содержание пластифицирующих добавок варьировалось с учетом 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 неотожженного 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.

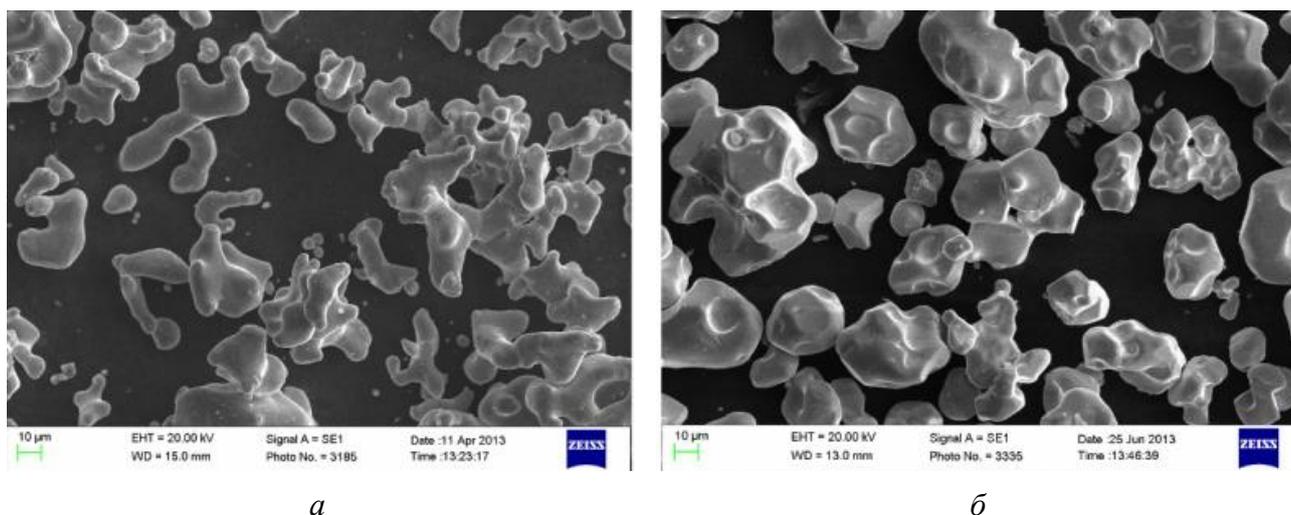


Рис. 2. Морфология частиц порошков: ПТМ-1 (а); сплава никель–алюминий, полученного восстановлением, марки ПВ-Н70Ю30 (б)

Образцы прессовали при давлениях 1000 МПа. Прессование брикетов проводили на гидравлическом прессе МС–500 в закрытой разборной пресс-форме, при этом использовалось одностороннее прессование. Выбор односторонней схемы прессования обусловлен доступным оборудованием. После прессования получены брикеты с плотностью $\rho_{отн} = 0,71..0,85$ от теоретической, цилиндрической формы с диаметром 10,9...11,36 мм и высотой 5...5,3 мм. Плотность брикетов определяли по формуле $\rho = m/V$, где m – масса брикета, V – объем, рассчитанный по размерам брикета. Измерения проводились до и после спекания. Для проверки часть брикетов измеряли методом гидростатического взвешивания. Качество брикетов удовлетворительное на основании визуального осмотра. В ряде случаев для неспекенных 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 нагревали до температуры спекания 1 час. Режим спекания выбран в соответствии с рекомендациями [10]. Использовалась вакуумная электропечь сопротивления камерного типа СНВЭ-9/18.

У образцов определяли прочность и плотность. Значения прочности необходимы для определения возможности дальнейшей обработки образцов, значения плотности необходимы для определения возможности возникновения дефектов в образцах.

Прочность брикетов оценивали по результатам опытов на осевое сжатие на универсальной испытательной машине ZWICK ВТ1–FR050ТНВ/А1К. В момент начала разрушения заготовки фиксировали усилие и определяли предел прочности на сжатие σ_p при текущей плотности (значения прочности на сжатие получены для каждого конкретного брикета, при этом имеющего свое значение 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.

Результаты экспериментального исследования, после отсеивания опытов с шихтами, показаны в табл. 1. Исследование проводилось с большим количеством компонентов шихты и их процентным соотношением, в результате часть результатов в таблице не была приведена (была отсеяна) в виду низких значений прочности и плотности. В табл. 1 приведены значения параметров спрессованных и спеченных образцов для каждого состава шихты. Для каждого состава шихты было сделано три опыта. В табл. 1 приведены значения процентного содержания по массе порошков ВТ-22, ПТМ-1, ПВ-Н70Ю30, предела прочности на сжатие σ_p в МПа и относительной плотности $\rho_{омн}$.

Наряду с величинами σ_p и $\rho_{омн}$ приведены их нормированные значения, вычисленные следующим образом:

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

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

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



Таблица 1 – Условия эксперимента и свойства титансодержащего композитного материала

| № п/п | Состав шихты по массе % | | | Величины, характеризующие качество прессовок после спекания | | | |
|----------|-------------------------|-------|-----------|--|--------------------|--------------|----------------------|
| | BT-22 | ПТМ-1 | ПВ-Н70Ю30 | σ_p , МПа; | $\tilde{\sigma}_p$ | $\rho_{омн}$ | $\tilde{\rho}_{омн}$ |
| 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 |

Известно, что порошки титана и его сплавов существенно различаются по стоимости. Для учета стоимости (С) исходного сырья табл. 1 расширили. Так как порошки BT-22, ПТМ-1 и ПВ-Н70Ю30 существенно отличаются по стоимости (были использованы следующие значения стоимости: для BT-22 500 у.е./кг, для ПТМ-1 5500 у.е./кг, для ПВ-Н70Ю30 3500 у.е./кг). В результате получена таблица 2, в которой X_1, X_2, X_3 – варьируемые факторы, представляющие процентное содержание по массе компонент шихты: X_1 – процентное содержание BT-22, X_2 – ПТМ-1, X_3 – ПВ-Н70Ю30. Параметры, выбранные в качестве критериев оптимизации, обозначены так: Y_σ обозначает $\tilde{\sigma}_p$, $Y_p - \tilde{\rho}_{омн}$, $Y_C - \tilde{C}$. Значения Y_C получены следующим образом: по составу образцов вычислили их стоимость ($C = X_1C_1 + X_2C_2 + X_3C_3$, где X_1, X_2, X_3 – процентное содержание по массе соответственно BT-22, ПТМ-1, ПВ-Н70Ю30; C_1, C_2, C_3 – стоимость соответственно BT-22, ПТМ-1, ПВ-Н70Ю30), эти значения были нормированы, так как стоимость конкурирует с σ_p и $\rho_{омн}$, то значения Y_C были получены вычитанием из 1 нормированных значений стоимости.



Таблица 2 – Результаты прессования композитного материала из титаносодержащего 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 |

3. Постановка и формализация задачи оптимизации

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

Для решения задачи ввели обобщенный 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 $\alpha_\sigma = \alpha_\rho = \alpha_C = 1$.

Из физических соображений наложили следующие ограничения:

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



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

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

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

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 учетом ограничений (4, 5).

Решение задачи оптимизации процесса прессования композитного материала

По формуле (3) получили значения целевой функции Y (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 путем 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 ее уменьшения зависимость обобщенного критерия оптимальности технологического процесса от варьируемых факторов представили квадратичной моделью:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3 + b_7X_1^2 + b_8X_2^2 + b_9X_3^2. \quad (7)$$

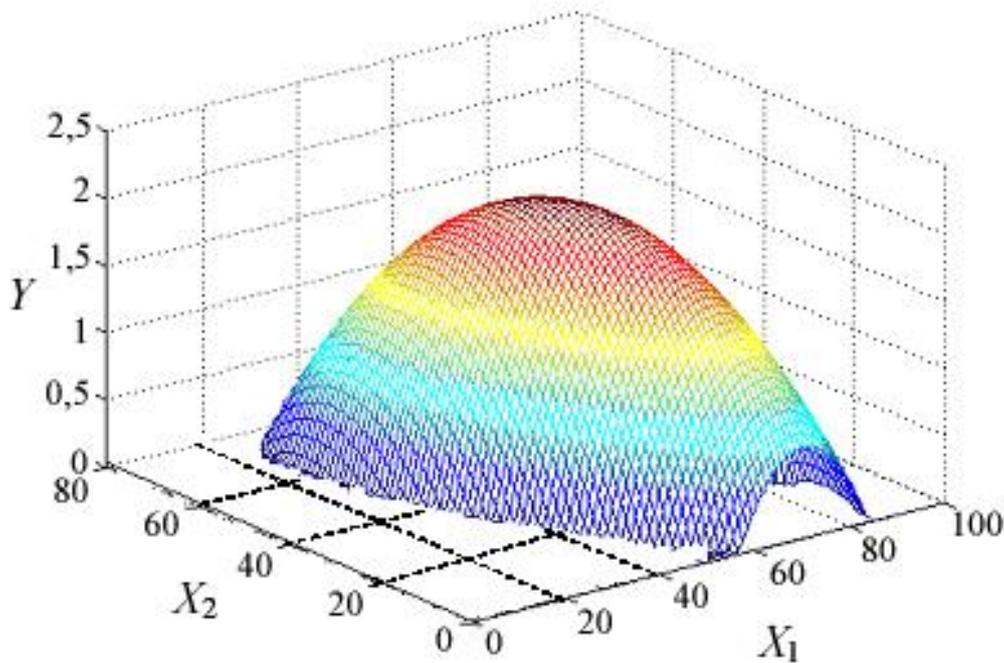
Для этой модели был получен следующий результат:

$$Y = 0,0015X_1X_2 + 0,0017X_1X_3 - 0,0005X_2X_3 - 0,0003b_7X_1^2 - 0,0005X_2^2 - 0,0017X_3^2. \quad (8)$$

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 $0 \leq X_1 \leq 100, 0 \leq X_2 \leq 100, 0 \leq X_3 \leq 100$ посредством поиска минимума скалярной функции нескольких переменных с ограничениями начиная с начального приближения симплекс методом (функция `fmincon` системы Matlab). Получены следующие оптимальные значения: $X_1 = 55, X_2 = 36, X_3 = 9$. В работе использовался пакет Matlab с лицензией Уральского федерального университета.

Также была сделана оптимизация методом линейного программирования с относительной плотностью не менее 0,751, пределом прочности не менее 700 МПа и стоимостью не более 2035 у.е./кг. Получены следующие оптимальные значения: $X_1 = 77, X_2 = 23$.

Рис. 3. Функция $Y(X_1, X_2)$

4. 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 обобщенного 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. Методом линейного программирования было определено, что для получения композита из титансодержащего сырья с максимальными плотностью и пределом прочности, и минимальной стоимостью 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.

Литература

1. Ильин А. А., Колачёв Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Плавка и литье титановых сплавов / отв. ред. В. И. Добаткин. – М. : Metallurgia, 1978. – 383 с. – (Титановые сплавы).
3. Порошковая металлургия титановых сплавов: сб. науч. трудов / под ред. Ф. Х. Фроуса, Дж. Е. Смугерески ; пер. с англ. С. Г. Глазунова. – М. : Metallurgia, 1985. – 263 с.
4. Порошковая металлургия титана / В. С. Устинов, Ю. Г. Олесов, В. А. Дрозденко, Л. Н. Антипин. – 2-е изд. – М.: Metallurgia, 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. Modelling of compaction of titanium composite powders / D. I. Kryuchkov, A. G. Zalazinsky, I. M. Berezin, O. V. Romanova // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 1. – P. 48–60. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.1.048-060. – URL: http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1_4.html.
9. Исследование свойств порошков VT22 и порошковых материалов на его основе / Т. Л. Щенникова, Г. Г. Залазинский, Б. Р. Гельчинский, О. В. Романова, О. Ф. Рыбалко, Д. И. Крючков, А. Г. Залазинский, И. М. Березин // Перспективные материалы. – 2015. – № 4. – С. 15–20.
10. Moiseev V. N., Sysoeva N. V., Ermolova M. I. Heat treatment of granulated VT22 alloy // Metal Science and Heat Treatment. – 1996. – Vol. 38, iss. 1–2. – P. 42–45. – DOI: 10.1007/BF01153872.