

Received: 04.12.2017

Revised: 26.01.2018







Accepted: 23.03.2018

DOI: 10.17804/2410-9908.2018.3.033-042

APPLICATION OF THE PARETO CRITERION TO SELECTING THE OPTIMAL COMPOSITION OF THE CHARGE MATERIAL FOR THE MANUFACTURE OF A COMPOSITE BLANK

A. G. Zalazinskiy^{a)}, D. I. Kryuchkov^{b)}, V. G. Titov^{c)}*

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34, Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation*

^{a)}  <http://orcid.org/0000-0001-8352-5475>,  zalaz@list.ru; ^{b)}  <http://orcid.org/0000-0001-8585-354>,
 kru4koff@bk.ru; ^{c)}  <https://orcid.org/0000-0002-1010-9099>,  tit@imach.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: tit@imach.uran.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

Tel.: +7-343-375-35-79

The possibility of using VT-22 alloy powder produced from extrusion waste is considered. It is shown that it is impossible to obtain high-quality pressing by the conventional method of press-sintering. The results of experimental investigations of the mechanical properties of briquettes-pressed and sintered from compositions consisting of powders produced from the VT-22 high-strength titanium alloy with additives of the PTM-1 titanium powder and the PV-N70Yu30 nickel-aluminum alloy powder are given. A problem is formulated for selecting the optimal composition of the mixture of the composite material providing required mechanical characteristics and cost of the semi-finished products. The Pareto-optimal composition of the composite material charge has been obtained.

Keywords: Pareto-optimal, composite pressing, noncompact titanium-based raw material, density, compressive strength.

References

1. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoistva. Spravochnik* [Titanium Alloys. Composition, Structure, Properties. Reference Book]. Moscow, VILS-MATI Publ., 2009, 520 p. (In Russian).
2. Andreev A.A., Antoshkin N.F., Borzetsovskaya K.M. et al. *Plavka i litye titanovykh splavov* [Melting and Casting of Titanium Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 383 p. (In Russian).
3. Powder Metallurgy of Titanium Alloys, ed. by Froes F.H. and Smugeresky J.E. *Proceedings Publication of the Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, Las Vegas, Nevada, 1980.
4. Ustinov V.S., Olesov U.G., Drozdenko V.A., Antipin L.N. *Poroshkovaya metallurgiya titana* [Powder Metallurgy of Titanium]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 248 p. (In Russian).
5. Kobelev A.G., Lysak V.I., Chernyshev V.N., Kuznetsov E.V. *Materialovedenie i tekhnologii kompozitsionnykh materialov* [Material Science and Technologies of Composite Materials]. Moscow, Internet Engineering Publ., 2006, 365 p. (In Russian).
6. 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/DREAM_Issue_1_2015_Kryuchkov_D._I._et_al.pdf

For citation: Zalazinsky A.G., Kryuchkov D.I., Titov V.G. Application of the Pareto criterion to selecting the optimal composition of the charge material for the manufacture of a composite blank // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2018. – Iss. 3. – P. 33–42. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.3.033-042.

7. Moiseev V.N., Sysoeva N.V., Ermolova M.I. Heat treatment of granulated VT22 alloy. *Metal Science and Heat Treatment*, 1996, vol. 38, nos. 1–2, pp. 42–45. DOI: 10.1007/BF01153872.
8. Podinovsky V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimalnye resheniya mnogokriterialnykh zadach* [Pareto-Optimal Solutions for Multicriteria Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 256 p. (In Russian).
9. Ivasishin O.M., Savvakina D.G., Bondareva K.A. et al. Production of titanic alloys and parts by economical method of powder metallurgy for large-scale industrial use. *Nauka i innovatsii*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 44–57.
10. Kryuchkov D.I., Zalazinsky A.G., Polyakov A.P., Berezin I.M., Shchennikova T.L., Zalazinsky G.G. Selecting an optimum composition of a titanium-based powder composite material for blank pressing. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. Obrabotka Materialov Davleniem*, 2014, no. 6, pp. 34–38. (In Russian).

Подана в журнал: 04.12.2017







УДК 621.762-419.8

DOI: 10.17804/2410-9908.2018.3.033-042

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ЗАГОТОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ ПАРЕТО

А. Г. Залазинский^{а)}, Д. И. Крючков^{б)}, В. Г. Титов^{в)*}

Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

^{а)}  <http://orcid.org/0000-0001-8352-5475>,  zalaz@list.ru; ^{б)}  <http://orcid.org/0000-0001-8585-354>,
 kru4koff@bk.ru; ^{в)}  <https://orcid.org/0000-0002-1010-9099>,  tit@imach.uran.ru;

*Ответственный автор. Электронная почта: tit@imach.uran.ru
Тел.: +7-343-375-35-79

Рассмотрена возможность использования порошка сплава ВТ-22, полученного из отходов прессования. Показано, что невозможно из порошка получить качественную прессовку обычным методом прессования-спекания. Приведены результаты экспериментального исследования механических свойств спрессованных и спеченных брикетов состоящих из порошков, полученных из высокопрочного сплава титана ВТ-22 с добавками порошка титана ПТМ-1 и порошка сплава никель-алюминий ПВ-Н70Ю30. Осуществлена постановка задачи для выбора оптимального состава шихты композитного материала, обеспечивающего требуемые механические характеристики и стоимость полуфабрикатов. Получен оптимальный по Парето состав шихты композиционного материала.

Ключевые слова: оптимальный по Парето, прессование композита, некомпактное титаносодержащее сырье, плотность, прочность на сжатие.

1. Введение

Материалы из титана используются в достаточно многих областях производства [1]. Производство таких материалов отличается высокой энергоемкостью и значительным количеством трудно перерабатываемых [2]. Известным методом переработки отходов металлургического производства является порошковая металлургия, позволяющая существенно уменьшить материалоемкость продукции и объем механической обработки [3, 4]. Также порошковая металлургия дает возможность для создания новых композиционных материалов [5].

Титановые порошки получают двумя способами: распылением струи жидкого металла нейтральным газом и распылением под действием центробежной силы. Последний метод заключается в расплавлении вращающегося электрода из титана, от которого под действием центробежной силы отрываются капли жидкого металла, кристаллизующегося на лету в гранулы [9].

Цель работы – исследование физико-технологических свойств порошка ВТ-22 и порошков на основе этого, выбор оптимального по Парето состава шихты для изготовления композитной заготовки.

2. Методы исследования порошка сплава ВТ-22

Объект исследования – порошок сплава ВТ-22, полученный распылением плазмой методом вращающегося электрода.

Гранулометрический состав порошков определяли по размерам и форме на анализаторе частиц CAMSIZER-XT (Retsch Technology, Германия), который позволяет проводить

измерение размера частиц материалов в диапазоне от 3 мкм до 3 мм в режиме on-line, при использовании динамического анализа цифрового изображения, поступающего с двух камер с частотой съемки 275 кадр./с. Минимальная величина навески 5 г. В результате обработки данных получены кривая плотности распределения частиц по размерам, средний размер частиц, коэффициенты формы частиц: сферичность, симметричность, соотношение ширины к длине; количественные показатели частиц с данной формой.

Определение насыпной плотности металлических порошков выполнено по ГОСТ 19440-74. Текучесть количественно оценивали по времени истечения определенной массы порошка (50 г) в секундах через воронку с калиброванным выходным отверстием (2,5 мм) и углом раствора 60° (ГОСТ 20899-75).

Метод для измерения плотности утряски (ГОСТ 25279-80) основан на уплотнении порошка встряхиванием навески определенной массы в мерном цилиндре до установившегося значения объема, занимаемого порошком, с последующим вычитанием его плотности. Морфологию частиц исследовали на сканирующем электронном микроскопе CarlZeiss EVO 40, предназначенном для получения изображений объектов в «прямых» электронах и электронах обратного рассеяния.

Исследование микроструктуры частиц проводили на металлографических шлифах на оптическом микроскопе Olympus GX-51 (Япония) в центре коллективного пользования «Рациональное природопользование и передовые технологии материалов» «Урал-М».

Фазовый состав определяли в ИМЕТ УрО РАН на дифрактометре D8ADVANCE (Druker AXS, Германия), который позволяет исследовать вещества и материалы в твердом, аморфном и жидком состоянии в температурном интервале от –190 до 2000 °С на воздухе, в вакууме и инертной атмосфере, обеспечивает высокую точность, экспрессную съемку и быструю обработку экспериментальных данных.

3. Результаты исследований порошка сплава ВТ-22

Сплав ВТ-22 создан на основе системы Ti-Al-Mo-V с добавками Fe и Cr (табл. 1). Плотность распределения частиц по размерам после распыления представлена на рис. 1.

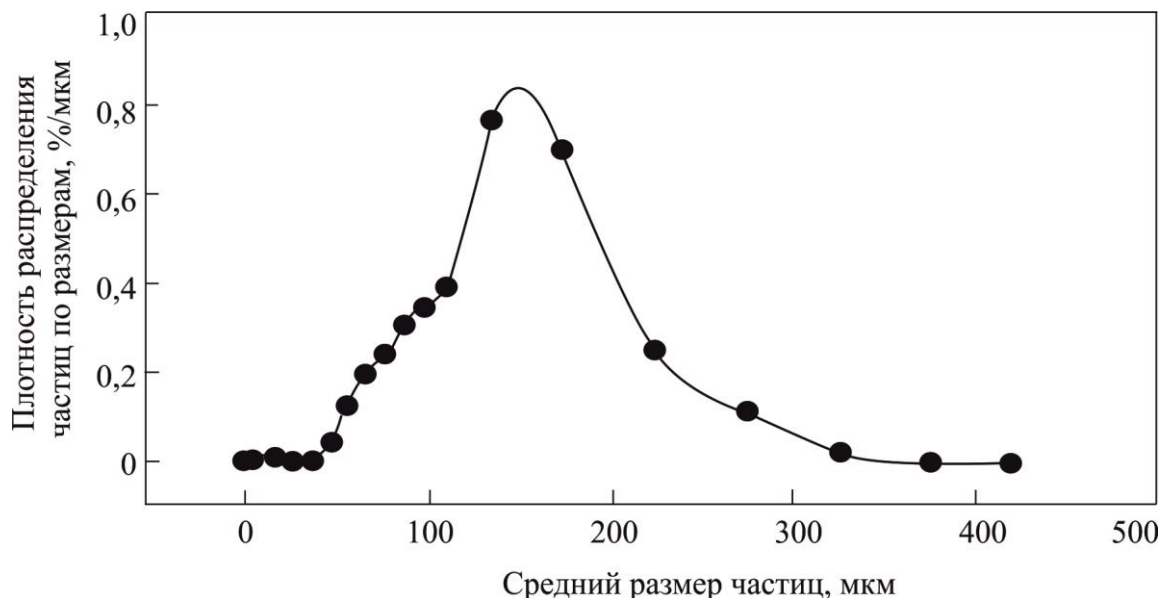


Рис. 1. Плотность распределения частиц по размерам порошка сплава ВТ-22

Порошок, полученный распылением плазмой, представлен фракцией менее 440 мкм, имеет средний размер частиц 156 мкм, выход фракции менее 200 мкм – ~ 80 мас. %. Частицы порошка имеют округлую и сферическую форму: средний коэффициент сферичности – 0,722,

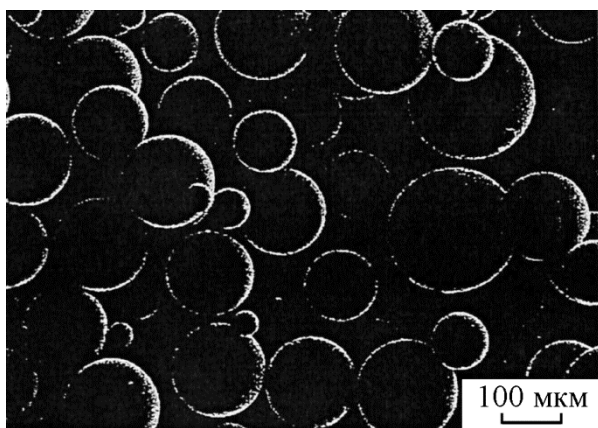
коэффициент симметричности – 0,876. Морфология и топография поверхности порошка представлена на рис. 2. Поверхность частиц гладкая, оболочка плотная (рис. 2 а).

Таблица 1 – Химический состав сплава ВТ-22 и порошка, полученного распылением сплава плазмой, мас. %

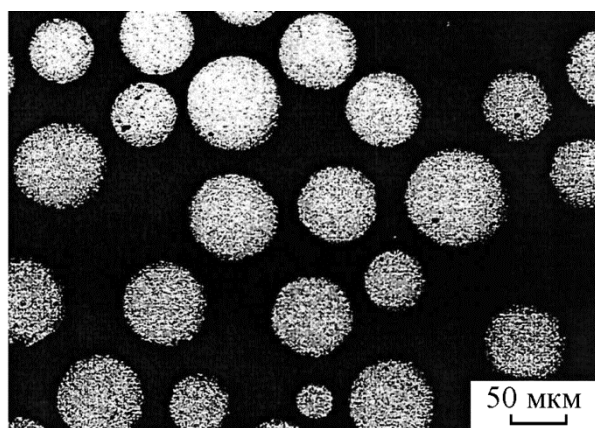
Объект исследования	Содержание элементов, мас. %									
	Ti	Fe	Cr	Al	V	Mo	C	O	N	H
Сплав ВТ-22*	Основа	0,5–1,5	0,5–2	4,4–5,9	4–5,5	4–5,5	≤0,1	≤0,2	≤0,05	≤0,015
Порошок	Основа	0,85	0,93	5,75	4,88	4,56	0,018	0,157		0,0018

* По ГОСТ 19807-91.

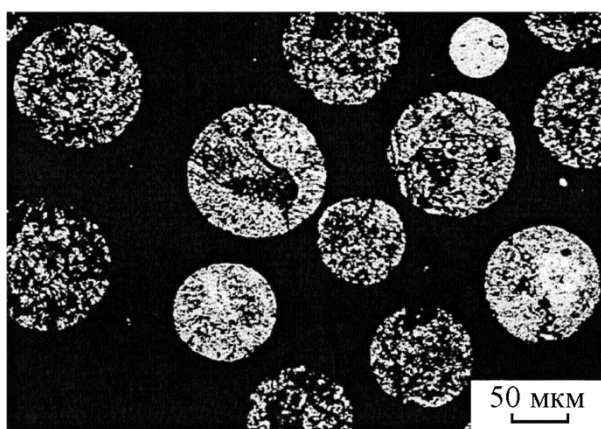
Исследование металлографических шлифов порошка показало наличие мелких внутренних пор в частицах (рис. 2 б). На рис. 2 в показана микроструктура порошка, характерная для литого состояния. Неоднородное по размеру зерно состоит из β-фазы с пластинчатым внутренним строением. На отдельных частицах есть редкие выделения: светлые карбиды, темные сферы со светлой точкой внутри – фаялиты или SiO₂.



а



б



в

Рис. 2. Микроструктура порошка, полученного из сплава ВТ-22 распылением плазмой

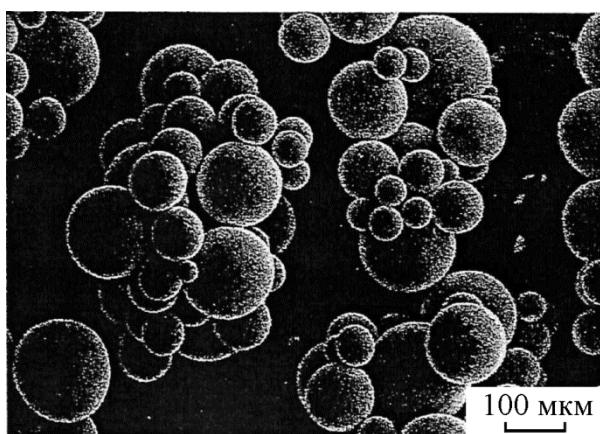
Экспериментально определены насыпная плотность порошка (C_n), плотность после утряски (C_y), степень утряски (ξ) и текучесть (T).

По программе, разработанной в ИМЕТ УрО РАН, рассчитаны насыпная плотность и плотность после утряски. Результаты приведены в табл. 2. Экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются – расхождение составляет 1–3,2 %.

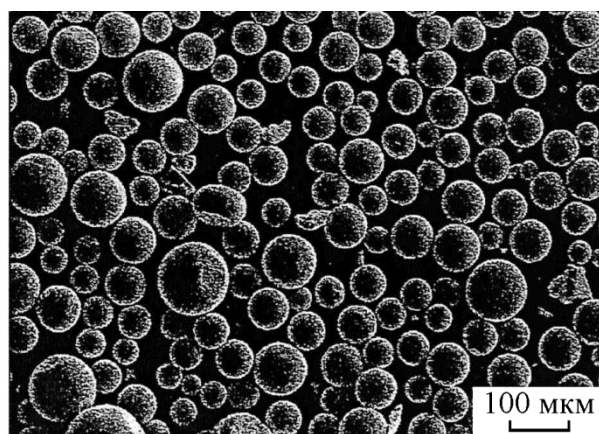
Программа также позволяет рассчитать удельную поверхность порошка. По ней можно рассчитать насыпную плотность, плотность после утряски и удельную поверхность для смеси разных порошков заданного состава по известной плотности и среднему размеру частиц.

Таблица 2 – Физико-технологические свойства порошка сплава ВТ-22

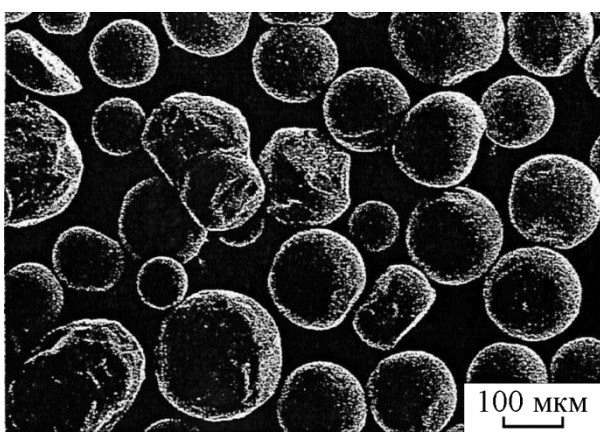
Результат	Насыпная плотность порошка, C_n , г/см ³	Плотность после утряски, C_y , г/см ³	Степень утряски, ξ , %	Текучесть, T , с (50 г)
Эксперимент	2,53	2,91	15,02	26,1
Расчет	2,45	2,88	17,55	–



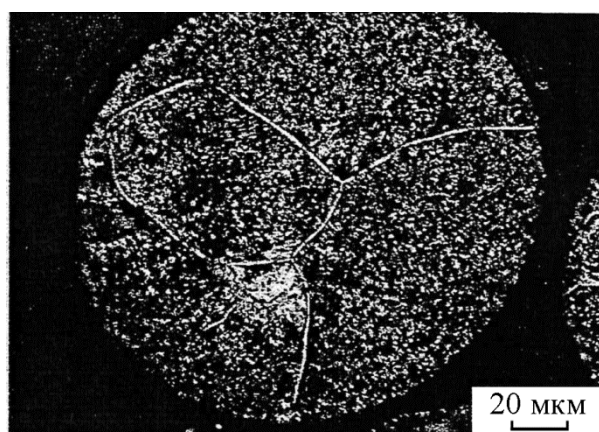
a



б



в



г

Рис. 3. Морфология порошка: *a* – после отжига; *б* – после измельчения отожженного порошка; фракция менее 50 мкм, *в* – фракция более 50 мкм; *г* – после отжига

Отжиг порошка проводили в вакууме ступенчато: при 750 °С в течение 1 ч, охлаждение с печью до 200 °С, затем нагрев до 650 °С, 3 ч, охлаждение с печью. Частицы спеклись, но спек легко разрушается при истирании в ступке. Гранулометрический состав порошка после отжига изменился незначительно. Фракцию более 200 мкм, полученную после спекания измельчили в виброистирателе ИВ-микро в течении 1 ч. На рис. 3 показана морфология частиц крупнее 200 мкм (рис. 3 а), фракции менее 50 мкм (рис. 3 б) и более 50 мкм (рис. 3 в), полученные после измельчения. Исходная фракция (рис. 3 а) представлена спеками частиц, после измельчения спеки разрушены – частицы фракции менее 50 мкм представлены в основном сферическими частицами, встречаются осколки более крупных частиц (рис. 3 б), порошок фракции более 50 мкм имеет частицы неправильной формы, образовавшиеся в результате измельчения (рис. 3 в). Частицы состоят из ($\alpha + \beta$)-фаз с близким количеством α - и β -фаз (рис. 3 з).

Прессовки из порошка сплава ВТ-22 как из исходного, так и из порошка после отжига рассыпаются, частицы деформируются, но не сцепляются между собой. Поверхность частиц гладкая, плотная, основа частиц представлена структурой пластинчатого типа. Порошок в исходном состоянии может быть переработан только горячим прессованием, поэтому дальнейшие исследования по получению порошковых материалов на его основе проведено с добавлением порошков с развитой поверхностью [10] в исходный порошок.

4. Методы исследования порошкового композита

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 [6]. В работе 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. Порошок сплава ВТ-22 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 неспеченных образцов с содержанием ВТ-22 60 % и выше наблюдалось осыпание нижней кромки. Спрессованные образцы спекались в вакууме 10^{-3} МПа в течение 2 ч при температуре 1200 °С, далее нагревались до температуры спекания 1 ч. Режим спекания выбран в соответствии с рекомендациями [7]. Использовалась вакуумная электропечь сопротивления камерного типа СНВЭ-9/18.

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.

Таблица 3 – Результаты прессования композитного материала из титансодержащего материала

№	Варьируемые факторы			Критерии оптимизации		
	X1	X2	X3	Y1, МПа	Y2	Y3, у.е./кг
1	50	50	0	1356	0,806	3000
2	60	30	10	1103	0,812	2300
3	60	20	20	834	0,783	2100
4	60	10	30	535	0,776	1900
5	65	25	10	1056	0,789	2050
6	65	15	20	768	0,756	1850
7	65	5	30	410	0,754	1650
8	70	30	0	594	0,771	2000
9	70	25	5	967	0,785	1900

Результаты экспериментального исследования показаны в табл. 3. Здесь X1; X2; X3 – варьируемые факторы, представляющие процентное содержание по массе компонент шихты: ВТ-22 (X1); ПТМ-1 (X2); ПВ-Н70Ю30 (X3). Параметры, выбранные в качестве критериев оптимизации, обозначены так: Y1 (предел прочности), Y2 (относительная плотность), Y3 (стоимость).

5. Результаты исследования порошкового композита

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.

По значениям критериев оптимизации Y1, Y2, Y3 (табл. 3) выбраны 6 оптимальных вариантов (1, 2, 5, 6, 7, 9), по Парето [8]. Алгоритм выбора представлен на рис. 4. Построение множества оптимальных по Парето решений является одним из первых этапов большого числа методов многокритериальной оптимизации. Один из методов решения – окончательный выбор оптимального варианта производится эвристически (на основании опыта, интуиции, неформализуемых соображений) лицом, принимающим решение. Другой подход – составить по возможности наиболее полный перечень критериев и потом исключить из рассмотрения несущественные критерии.

В данном случае значения критериев оптимизации Y1, Y2, Y3 6 оптимальных вариантов (по Парето) были нормированы таким образом, чтобы привести их к одной шкале измерения:

$$Y1N = (Y1 - \min(Y1)) / (\max(Y1) - \min(Y1)); \quad (1)$$

$$Y2N = (Y2 - \min(Y2)) / (\max(Y2) - \min(Y2)); \quad (2)$$

$$Y3N = (Y3 - \min(Y3)) / (\max(Y3) - \min(Y3)). \quad (3)$$

Так как значения критериев оптимизации Y1, Y2 нужно максимизировать, а Y3 – минимизировать, то значения Y3N были обращены таким образом, чтобы значения критерия оптимизации нужно было максимизировать:

$$Y3NO = 1 - Y3N. \quad (4)$$

В системе координат Y1N, Y2N, Y3NO определили длины векторов 6 оптимальных по Парето вариантов от начала координат. Эти длины следующие: 1,3431; 1,3437; 1,1514; 0,9328; 1; 1,1385. Начало этой системы координат является худшей по оптимальности точкой. Тогда выберем точку максимально удаленную от худшей по оптимальности точки, т.е. максимальную длину вектора. Максимальную длину вектора имеет 2 вариант. На основании этого 2 вариант был выбран оптимальным. Получены следующие оптимальные по Парето значения: X1 = 60; X2 = 30; X3 = 10.

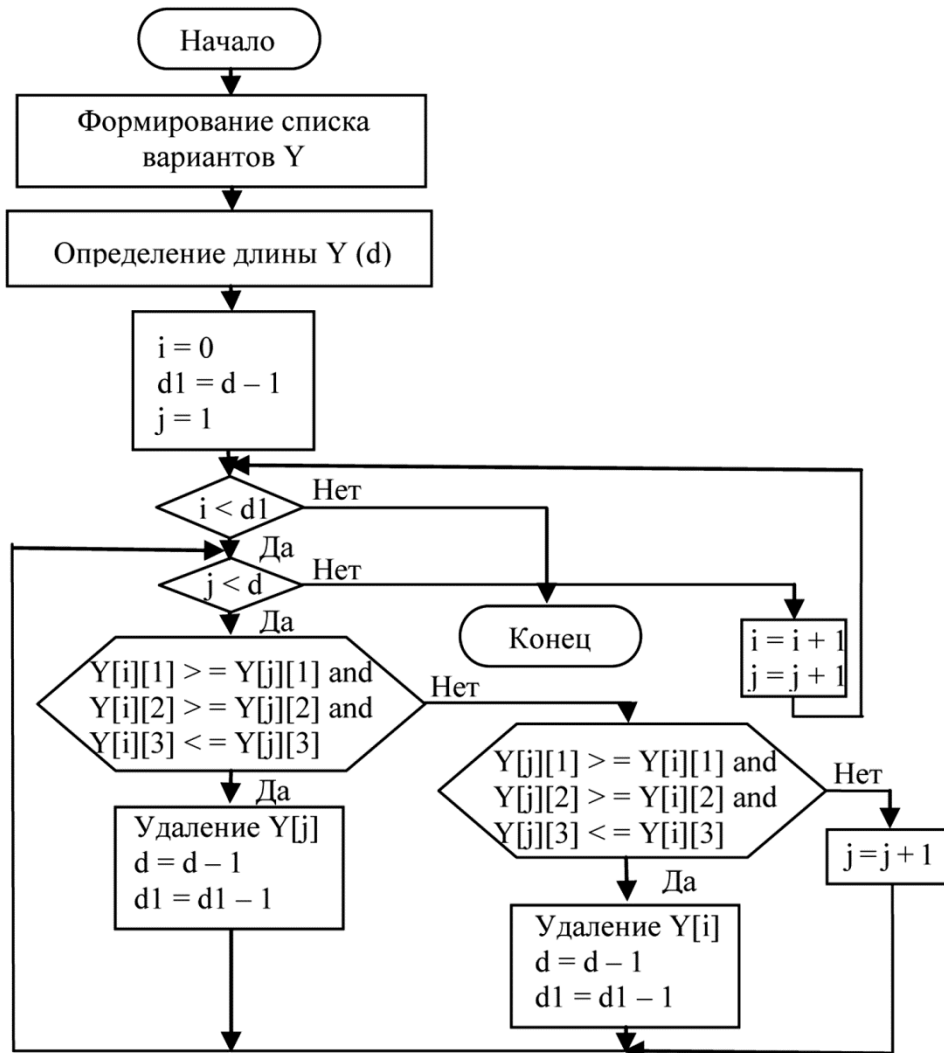


Рис. 4. Алгоритм выбора оптимальных (по Парето) вариантов

6. Заключение

Порошок сплава ВТ-22, полученный распылением плазмой методом вращающегося электрода, обладает следующими физико-технологическими свойствами при размере частиц менее 440 мкм – средний размер 156 мкм при выходе фракции менее 200 мкм – 80 мас. %: насыпная плотность порошка ~ 2,5 г/см³; плотность утряски ~ 2,9 г/см³; текучесть ~ 26 с (50 г).

На основе анализа данных экспериментов даны рекомендации по выбору оптимального состава композиционного материала. Для этого разработана программа и использована методика оптимизации получения композита из некомпактного титансодержащего сырья, включающая в себя поиск оптимального состава шихты по Парето. По этой методике был определен следующий оптимальный состав шихты по Парето, 60 %

порошка из сплава ВТ-22; 30 % порошка титана ПТМ-1; 10 % порошка сплава никель–алюминий ПВ-Н70Ю30.

Литература

1. Ильин А. А., Колачёв Б. А., Польшкин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справочник. – М. : ВИЛС–МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Плавка и литье титановых сплавов / А. А. Андреев, З. Ц. Аношкин, К. М. Борзцовская и др. – М. : Metallurgiya, 1978. – 383 с.
3. Фроус Ф. Х., Смугерески Дж. Е. Порошковая металлургия титановых сплавов : сб. науч. трудов / пер. с англ. – М. : Metallurgiya, 1985. – 263 с.
4. Порошковая металлургия титана / В. С. Устинов, Ю. Г. Олесов, В. А. Дрозденко, Л. Н. Антипин. – 2-е изд. – М. : Metallurgiya, 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. Modelling of compaction of titanium composite powders / D. I. Kryuchkov, A. G. Zalazinskiy, 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/DREAM_Issue_1_2015_Kryuchkov_D._I._et_al..pdf
7. Moiseev V. N., Sysoeva N. V., Ermolova M. I. Heat treatment of granulated VT22 alloy // *Metal Science and Heat Treatment*. – 1996. – Vol. 38, nos. 1–2. – P. 42–45. – DOI: 10.1007/BF01153872.
8. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М. : Наука, 1982. – 256 с.
9. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомасштабного промышленного применения / О. М. Ивасишин, Д. Г. Саввакин, К. А. Бондарева и др. // *Наука и инновации*. – 2005. – Т. 1, № 2. – С. 44–57.
10. Выбор оптимального состава порошкового композиционного материала на основе титана для прессования заготовок / Д. И. Крючков, А. Г. Залазинский, А. П. Поляков, И. М. Бerezin, Т. Л. Щенникова, Г. Г. Залазинский // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2014. – № 6. – P. 34–38.