Визначення властивостей несферичних порошків сплаву VT20 для моделювання щільності упакування

З. А. Дурягіна, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу,
zduriagina@ukr.net

І. А. Лемішка, кандидат, технічних наук, асистент, mzihor@ukr.net

В. В. Кулик, доктор технічних наук, доцент

Г. А. Гридова, студент, hrydova2808_25@ukr.net

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Проведено дослідження несферичних порошків титанового сплаву марки VT20 та застосовано методики комп'ютерного аналізу для визначення параметрів оптимального їх упакування. Металографічні дослідження виконували на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP, а елементний аналіз виконували з допомогою енергодисперсійного спектрометра OXFORD INCA Energy 350. Визначення гранулометричних характеристик порошків виконували з допомогою програмного забезпечення аналізу зображень ImageJ.

Вивчено морфологію поверхні несферичних частинок порошку сплаву VT20 трьох різних фракцій: 100...160 мкм, 160...200 мкм та 200...250 мкм. Показано, що частинки порошку характеризуються несферичною формою та невеликою розбіжністю за розмірами. Визначено тенденцію відповідно до якої при зменшенні розміру частинок порошку досліджуваного сплаву їх форма наближається до сферичної. За результатами гранулометричного аналізу встановлено, що звичайний ситовий аналіз не дає можливості в повній мірі оцінити розподіл порошку за фракціями. Встановлено, що для фракції 200...250 мкм домінуючими є частинки із середнім діаметром 226 мкм, для фракції 160...200 мкм – 177 мкм а для фракції 100...160 мкм – 114 мкм відповідно. Так для фракції порошку титану марки VT20 200...250 полідисперсність складає 6,4%, для фракції 160...200 – 8,3%, а для фракції 100...160 – 9,1%. Встановлено, що текучість порошків титанового сплаву марки VT20 складає: для фракції 200...250 мкм – 62,35 с, для фракції 160...200 мкм – 65,44 с, а для фракції 100...160 – 68,73 с. Тобто, найвищим значення текучості характеризується порошок з найбільшим розміром частинок. Проведено моделювання заповнення попередньо означеного об'єму з допомогою програми "Spheres test". Встановлено середньостатистичні радіуси частинок порошку титанового сплаву марки VT20 та розраховано імовірність розмірів кожної з фракцій порошку що необхідна під час заповнення заданого об'єму. На основі отриманих результатів розраховано щільність упакування порошків титанового сплаву марки VT20 в залежності від їх фракційного складу. Підтверджено, що зі зменшенням розміру частинок порошку їх щільність упакування зростає.

Ключові слова: адитивне виробництво, титан, мікроструктура, гранулометричний склад, насипна густина, текучість, моделювання щільності упакування.

Адитивні технології відкривають нові можливості виготовлення деталей безвідходним методом для машинобудування, авіабудування та аерокосмічної техніки [1]. Основною причиною, яка перешкоджає впровадженню таких технологій, є висока вартість сировини. Зокрема, у випадку отримання деталей з порошкових титанових сплавів, найбільш широко використовуються порошки сферичної форми, виготовлені за технологією відцентрового плазмового розпилення електроду [2]. Однак складність такої технології та висока вартість обладнання обмежує їх практичне застосування [3]. Тому актуальним завданням є пошук технологічних підходів, що дозволять знизити вартість сировини, зменшити енерговитрати та шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Обробка в середовищі водню за технологією гідрування-дегідрування [4] дозволяє отримати порошки, які за формою наближені до сферичної, а їх вартість на порядок нижча [3]. В обох випадках параметри технологічного процесу отримання порошків із титанового сплаву повинні бути оптимізовані для отримання високоякісного продукту. Отримання максимально можливого ступеня однорідності частинок порошку та усунення дефектів на їх поверхні є дуже важливими питаннями.

Для встановлення впливу фракційного складу та форми поверхні на щільність упакування проведено дослідження несферичних порошків титанового сплаву марки VT20 трьох різних фракцій: 100...160 мкм, 160...200 мкм та 200...250 мкм.

За результатами дослідження, що було виконане на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP, встановлено, що частинки порошку характеризуються несферичною формою та невеликою розбіжністю за розмірами (рис. 1).

Спостерігається тенденція відповідно до якої при зменшенні розміру частинок порошку досліджуваного сплаву їх форма наближається до сферичної.

Оцінка відповідності хімічного складу сплавів для кожної фракції порошку після процесу HDH проведена на основі елементного аналізу з використанням енергодисперсійного рентгенівського спектрометра Inca Energy 350.

В табл. 1 наведено елементний склад основних легувальних елементів.

Проведений елементний аналіз показав повну відповідність хімічного складу порошків отриманих методом гідрування-дегідрування марці VT20.

Отримання якісного виробу чи деталі необхідно передбачає оптимізацію параметрів технологічного процесу отримання порошків титанових сплавів. Він передбачає досягнення максимально можливого ступеню однорідності частинок порошку.

Для цього проведено гранулометричний аналіз порошків титанового сплаву марки VT20 з допомогою програмного забезпечення аналізу зображень ImageJ [5]. Отримані результати представлені на рис. 2.

Відповідно до гістограм розподілу частинок порошку сплаву VT20, встановлено, що для фракції 200...250 мкм домінуючими є частинки із

Технічна інформація

Рис. 1. Морфологія несферичних частинок порошку сплаву марки VT20 різних фракцій: а – 200...250 мкм; б – 160...200 мкм; в – 100...160 мкм.

Таблиця 1

Елементний аналіз несферичних порошків титанового сплаву марки VT20

Фракція, мкм	Розподіл елементів, %				
	Ti	Al	V	Mo	Zr
200...250	91,8	4,3	2,1	0,7	1,1
160...200	89,6	5,6	2,6	0,4	1,8
100...160	89,2	6,1	1,3	2,1	1,3

середнім діаметром 226 мкм, для фракції 160...200 мкм – 177 мкм а для фракції 100...160 мкм – 114 мкм відповідно.

Аналіз кривих розподілу Гауса дозволяє зробити висновок, що із зменшенням середнього розміру частинок порошку в межах певної фракції, розкид розмірів відносно цього значення інших частинок збільшується.

Значення насипної густини та текучості порошків було встановлено згідно ДСТУ ISO 3923-2:2016 та ДСТУ ISO 4490:2016 відповідно [6, 7]. Проби для досліджень відбирали та готували згідно ДСТУ 3794-98) [8].

У табл. 2 подано результати визначення насипної густини порошків титанового сплаву марки VT20 фракцій: 200...250 мкм, 160...200 мкм та 100...160 мкм. Перед початком випробувань зважували порожню мірну ємність, а потім ємність наповнену порошком. Для кожної проби для досліджень випробування проводилися окремо.

Технічна інформація

Рис. 2. Крива Гауса побудована на основі гістограми розподілу частинок порошку сплаву BT20 різних фракцій після гідрування-дегідрування: а – 200...250 мкм; б – 160...200 мкм; в – 100...160 мкм.

Встановлено, що насипна густина порошків титанового сплаву марки BT20 складає: для фракції 200...250 мкм – 2,26 г/см³, для фракції 160...200 мкм – 2,56 г/см³, а для фракції 100...160 – 3,09 г/см³. Тобто, найвищою густиною компонування характеризується порошок з найменшим розміром частинок.

Для визначення текучості порошку сплаву марки BT20 необхідно було встановити поправочний коефіцієнт лійки через яку буде просипатися порошок. Результати калібрування подано у табл. 2.

Таблиця 2

Результати визначення насипної густини та текучості несферичних частинок порошку титанового сплаву BT20

Розмір фракції, мкм	Насипна густина, г/см ³	Поправочний коефіцієнт лійки	Текучість порошку, с
200...250	2,26	0,99	62,35
160...200	2,56		65,44
100...160	3,09		68,73

Згідно з отриманими результатами текучість порошків титанового сплаву марки BT20 складає: для фракції 200...250 мкм – 62,35 с, для

Технічна інформація

фракції 160...200 мкм – 65,44 с, а для фракції 100...160 – 68,73 с. Тобто, найвищим значення текучості характеризується порошок з найбільшим розміром частинок.

Як вже було сказано вище, одним із основних аспектів при виготовленні деталей методом адитивного виробництва є максимально можлива щільність упакування частинок в кожному нанесеному шарі. Тому, важливим є встановлення точного співвідношення між об'ємом частинок різних фракцій порошку.

Для цього використано метод гранулометричного аналізу. На його основі було отримано діапазони площ, середніх діаметрів та встановлено середньостатистичне співвідношення між розмірами частинок в певній фракції. Результати представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Розподіл за розмірами частинок порошку сплаву ВТ 20 після процесу гідрування-дегідрування

Номер фракції згідно *ГА	Інтервал площ, мкм²	Середня площа частинок фракції, мкм²	Середній діаметр частинок фракції, мкм	Кількість частинок	
				шт.	%
Фракція порошку згідно ситового аналізу – 200...250 мкм					
1	931,796-1839,716	1385,756	96,6	1	2,3
2	1839,716-5471,398	3655,557	156,9	2	4,7
3	5471,398-6379,318	5925,358	199,7	12	27,9
4	6379,318-7287,239	6833,279	214,5	17	39,5
5	7287,239-8195,159	7741,199	228,3	5	11,6
6	8195,159-9103,08	8649,12	241,3	6	14,0
Фракція порошку згідно ситового аналізу – 160...200 мкм					
1	24251,2-25973,99	25112,59	178,8	14	19,2
2	25973,99-26872,38	26423,18	183,4	7	9,6
3	26872,38-28420,77	27646,58	187,6	18	24,7
4	28420,77-30450,08	29435,42	193,6	14	19,2
5	30450,08-32421,24	31435,66	200,1	20	27,4
Фракція порошку згідно ситового аналізу – 100...160 мкм					
1	3445,05-5610,215	4527,633	75,9	5	6,6
2	5610,215-7775,38	6692,798	92,3	3	3,9
3	7775,38-9940,545	8857,963	106,2	7	9,2
4	9940,545-12105,71	11023,13	118,4	6	7,9
5	12105,71-14270,88	13188,29	129,5	5	6,6
6	14270,88-16436,04	15353,46	139,8	2	2,6
7	16436,04-18601,21	17518,62	149,3	7	9,2
8	18601,21-20766,37	19683,79	158,3	20	26,3
9	22931,53-22931,53	21848,95	166,8	21	27,6
Примітка: *ГА – гранулометричний аналіз					

Технічна інформація

На основі отриманих даних було проведено розрахунок щільності упакування частинок порошку залежно від їх гранулометричних характеристик. Результати представлені в табл. 4.

Таблиця 4

Щільність упакування частинок порошку сплаву VT20 різних фракцій

Фракція порошку титану марки VT20, мкм	200...250	160...200	100...160
Щільність упакування, %	55,3	58,1	60,7

Порівнюючи отримані результати моделювання та дані гранулометричного аналізу встановлено, що похибка в обчисленні щільності упакування порошкової фракції та подальшого моделювання заповнення попередньо визначеного обсягу цими порошками не перевищує 2%. Запропонований підхід може бути використаний для оцінки щільності упакування (або пористості) порошків різного фракційного складу.

За результатами мікроструктурного аналізу встановлено, що досліджувані частинки порошку сплаву марки VT20 характеризуються несферичною формою та невеликою розбіжністю за розмірами. Показано, що при зменшенні розміру частинок в межах фракції їх форма наближається до сферичної.

Згідно з даними гранулометричного аналізу встановлено, що для фракції 200...250 мкм домінуючими є частинки із середнім діаметром 226 мкм, для фракції 160...200 мкм – 177 мкм а для фракції 100...160 мкм – 114 мкм відповідно. Так для фракції порошку титану марки VT20 200...250 полідисперсність складає 6,4%, для фракції 160...200 – 8,3%, а для фракції 100...160 – 9,1%.

Отримані результати насипної густини та текучості титанового сплаву марки VT20 показали обернено пропорційну залежність. А саме, для фракції 200...250 мкм насипна густина складає 2,26 г/см³, а текучість – 62,35 с, при цьому для фракції 100...160 мкм насипна густина складає 3,09 г/см³, а текучість – 68,73 с.

Проведене моделювання за допомогою програми "Spheres test" дозволило отримати середньостатистичні радіуси частинок порошку титанового сплаву марки VT20, а також розрахувати імовірність розмірів кожної з фракцій порошку що необхідна під час заповнення заданого об'єму. На основі отриманих результатів визначено щільність упакування порошків титанового сплаву марки VT20 в залежності від їх фракційного складу. Підтверджено, що зі зменшенням розміру частинок, в межах досліджуваних фракцій порошку, щільність їх упакування зростає.

Таким чином, отримані результати показали, що підходи комп'ютерного моделювання дозволяють з високою точністю (погіршність не перевищує 2%) розраховувати щільність упакування порошків та їх оптимальний фракційний склад. Тобто, високий рівень відтворюваності експериментальних даних дозволяє повністю або частково замінити ряд експериментальних досліджень віртуальним моделюванням помітно

зменшуючи при цьому вартість одержання порошкових матеріалів з наперед означеними властивостями при збереженні показників якості.

Література

1. Зленко М., Попович А., Мутылина И. Аддитивные технологии в машиностроении. – Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2013. – 221 с.
2. Ma Qian, Francis H. Froes. Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications. – Butterworth-Heinemann, USA, 2015. – 628 p.
3. Хазнаферов М. Овчинников А., Янко Т. Технология получения «low-cost» порошков легированного титана для аддитивных процессов // Межгосударственная Ассоциация Титан, 2015. – С. 31-36.
4. Жеманюк П.Д., Басов Ю.Ф., Овчинников А.В., Джуган А.А., Михайлютенко А.В. Применение титановых порошков нового поколения (HDH2) в аддитивных технологиях // Авиационно-космическая техника и технология, 2016. – С. 139-144.
5. Конюхов А.Л. Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: Учебное методическое пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУРю, 2012. – 105 с.
6. Порошки металеві. Визначення насипної щільності. Частина 2. Метод волюмометра Скотта : ДСТУ ISO 3923-2:2016. – [Чинний від 2016-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2016. – 13 с. – (Національні стандарти України).
7. ДСТУ ISO 4490:2016 Національний стандарт України. Порошки металеві. Визначення плинності за допомогою каліброваної лійки (приладу Холла), [Чинний від 2016-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2016. – 15 с.
8. ДСТУ 3794-98. Національний стандарт України. Порошки, які використовуються в порошковій металургії. Відбір проб. – К. : Держстандарт України, 2000. – 11 с.

References

1. Zlenko M., Popovich A., Mutylina I. Additivnyye tekhnologii v mashinostroyenii (Additivnyye tekhnologii v mashinostroyenii), Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 221 p. [in Russian].
2. Ma Qian, Francis H. Froes. Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications, Butterworth-Heinemann, USA, 2015, 628p. [in English].
3. Khaznaferov M. Ovchinnikov A., Yanko T., Mezghosudarstvennaya Assocziacziya Titan, 2015, pp. 31-36. [in Ukraine].
4. Zhemanyuk P.D., Zhemanyuk P.D., Basov Yu.F., Ovchinnikov A.V., Dzhugan A.A., Mikhajlyutenko A.V., Aviaczionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2016, pp. 139-144. [in Ukraine].
5. Konyukhov A.L., Rukovodstvo k ispolzovaniyu programmnoho kompleksa ImageJ dlya obrabotki izobrazhenij: Uchebnoe metodicheskoe posobie (Guide to Using ImageJ Software for Image Processing: A Tutorial), Tomsk: kafedra TU, TUSURYu, 2012, 105 p. [in Russian].
6. DSTU ISO 3923-2:2016 Natsionalni standarty Ukrainy. Poroshky metalevi. Vyznachennia nasypnoi shchilnosti. Chastyna 2. Metod voliumometra Skotta, K. : Derzhstandart Ukrainy, 2016, 13 p. [in Ukraine].
7. DSTU ISO 4490:2016 Natsionalni standarty Ukrainy. Poroshky metalevi. Vyznachennia plynnosti za dopomohoiu kalibrovanoi liiky (pryladu Kholla), Kyiv : Derzhstandart Ukrainy, 2016, 15 p. [in Ukraine].

8. DSTU 3794-98 Natsionalni standarty Ukrainy. Poroshky, yaki vykorystovuiutsia v poroshkovii metalurhii. Vidbir prob, Kyiv : Derzhstandart Ukrainy, 2000, 11 p. [in Ukraine].

Одержано 22.09.20

Z. A. Duriagina, I. A. Lemishka, V. V. Kulyk, H. A. Hrydova

Determination of properties of non-spherical VT20 alloy powders for modelling packing density

Summary

The study of unfavorable titanium alloy powders of VT20 grades was carried out and the methods of computer analysis were applied to determine the parameters of their optimal packaging. Metallographic studies were performed on a scanning electron microscope EVO-40XVP, and elemental analysis was performed using an energy dispersion spectrometer OXFORD INCA Energy 350. Determination of particle size distribution of powders was performed using image analysis software ImageJ.

The surface morphology of non-spherical particles of VT20 alloy powder was studied for three different fractions: 100 ... 160 μm , 160 ... 200 μm and 200 ... 250 μm . It is shown that the powder particles are characterized by a nonspherical shape and a small difference in size. There is a tendency according to which when the particle size of the powder of the investigated alloy decreases, their shape approaches spherical. According to the results of particle size analysis, it was found that the usual sieve analysis does not allow to fully assess the distribution of powder by fractions. It was found that for the fraction 200 ... 250 μm the dominant particles are with an average diameter of 226 μm , for the fraction 160 ... 200 μm - 177 μm and for the fraction 100 ... 160 μm - 114 μm , respectively. Thus, for the fraction of titanium powder of the BT20 brand 200 ... 250 the polydispersity is 6.4%, for the fraction 160 ... 200 - 8.3%, and for the fraction 100 ... 160 - 9.1%. It is established that the fluidity of titanium alloy powders of the BT20 brand is: for the fraction 200 ... 250 μm - 62.35 s, for the fraction 160 ... 200 μm - 65.44 s, and for the fraction 100 ... 160 - 68, 73 s. That is, the highest value of fluidity is characterized by the powder with the largest particle size. Simulation of the pre-defined volume filling was performed using the "Spheres test" program. The average radii of particles of VT20 titanium alloy powder particles and the probability of the sizes of each of fractions of powder which is necessary at filling of the set volume was calculated. Based on the obtained results, the packing density of VT20 titanium alloy powders was calculated depending on their fractional composition. It is confirmed that as the particle size of the powder decreases, their packing density increases.

Keywords: additive production, titanium, microstructure, particle size distribution, bulk density, fluidity, packing density modelling.