

УДК 621.762

А.Е. Князев¹, А.В. Востриков¹**РАССЕВ ПОРОШКОВ В АДДИТИВНОМ
И ГРАНУЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВАХ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20

Рассмотрены особенности порошков, полученных различными методами, а также их технологические свойства применительно к аддитивному и гранульному производствам. Представлена последовательность операций при получении металлопорошковых композиций. Описаны факторы, влияющие на процесс вибрационного ссева металлических порошков и гранул. Показаны особенности и преимущества вибрационного ссева на горизонтально расположенных круглых ситах с применением ультразвуковой очистки для получения заданных траекторий движения. Приведены критерии оценки эффективности ссева и даны пояснения по определению гранулометрического состава порошков и гранул.

Ключевые слова: порошок, гранула, вибрационный ссев, металлопорошковая композиция, аддитивное производство, гранульное производство, фракция, ультразвук, технологические свойства, газовая атомизация, PREP-метод, сито.

А.Е. Князев¹, А.В. Востриков¹**SIEVING OF POWDERS ADDITIVE
AND POWDER MANUFACTURINGS (review)**

Considers the features of powders obtained by various methods, their technological properties in relation to additive and granular manufacturing. The sequence of operations upon receipt of metal powder compositions is presented. The factors affecting the process of vibration sieving of metal powders and granules are described. The features and advantages of vibratory sieving on horizontally arranged circular sieves using ultrasonic cleaning to obtain specified trajectories of motion are shown. Criteria for evaluating the sieving efficiency are given and explanations are given for determining the particle size distribution of powders and granules.

Keywords: powder, granule, vibration sieving, metal-powder composition, additive manufacturing, granular manufacturing, fraction, ultrasonic, technological properties, gas atomization, PREP, sieve.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Аддитивные технологии являются предвестником новой промышленной революции и основой шестого технологического уклада, что необходимо для полноценного развития экономики России, устранения зависимости от зарубежных поставщиков [1], создания условий для разворачивания собственного производства металлопорошковых композиций (МПК), расширения ассортимента применяемых материалов [2, 3].

Более 90% всех МПК в мире для аддитивных технологий производится методом газовой атомизации (VIGA, EIGA и др.) [4]. Во ФГУП «ВИАМ» организовано производство высококачественных порошков и МПК методом газового распыления [1, 5, 6].

Производство МПК сплавов на железной, никелевой, титановой, алюминиевой основах, в том числе из их интерметаллидов, осуществляется на современных тигельных и бестигельных атомайзерах:

- лабораторном атомайзере;
- промышленном тигельном атомайзере, распылительный узел которого спроектирован с помощью компьютерного моделирования и изготовлен во ФГУП «ВИАМ»;
- промышленном бестигельном атомайзере для производства МПК тугоплавких и высокорепактивных металлов, в том числе интерметаллидных титановых сплавов.

В установках 3D-печати, работающих по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) и используемых на созданном во ФГУП «ВИАМ» участке аддитивного производства, находят широкое применение МПК с размером частиц от 10 до 63 мкм. Зачастую специалистами в области аддитивного производства предъявляются и более строгие требования к крупности используемого порошка (10–50 и 20–40 мкм) в связи с необходимостью обеспечения требуемых технологических свойств МПК. Это связано с особенностями компактного укладывания в определенный объем и обеспечением текучести и сыпучести порошковой композиции в системах подачи материала 3D-принтеров с минимальным сопротивлением. В частности, для машин производства компании Consept Laser дисперсность порошка находится чаще всего в пределах 25–52 мкм при медианном диаметре частиц $d_{50}=27$ мкм [7].

Металлические порошки, изготовленные методом газовой атомизации (VIGA, EIGA и др.), имеют форму частиц с высоким коэффициентом сферичности (0,92–0,95) и довольно широкий гранулометрический состав (от 0,1 до 250 мкм) с высоким содержанием высокодисперсных (0,1–10 мкм) и мелких (10–20 мкм) фракций в количестве до 20% и более.

Наряду с такими требованиями к МПК для аддитивных технологий, как сферичность, высокая химическая однородность, низкое содержание газовых примесей, одним из важнейших является обеспечение определенного гранулометрического состава с высоким выходом годного.

Получение МПК требуемого гранулометрического состава, например 10–63 мкм, проводится последовательно в два этапа:

- на первом – отделение фракций размером менее 10–15 мкм из массы порошка, изготовленного на стадии газового распыления;
- на втором – отделение крупных фракций размером >63 мкм с получением на выходе целевой фракции.

В промышленном масштабе для отсева высокодисперсных и мелких фракций применяют установки аэродинамической сепарации, которые с высокой производительностью и достаточно эффективно отделяют частицы размером менее 10–20 мкм. Такие установки широко используют при сепарации порошков с размером частиц вплоть до 40–50 мкм, когда не требуется высокой точности, которая с увеличением крупности разделяемых частиц снижается.

Взаимодействия между частицами и их влияние на характеристики порошков и гранул

Первоочередное отделение высокодисперсных и мелких фракций необходимо в связи со склонностью частиц к агломерации из-за адгезии, что затрудняет последующий рассев, а также из-за их малой массы и высокого аэродинамического сопротивления – высокодисперсные частицы при ситовом расसेве оказываются во взвешенном состоянии в рабочей камере установки, осаждаются на всех внутренних поверхностях, забивают ситовые ячейки. Поэтому при проведении рассева без отделения высокодисперсных

и мелких фракций после рассева они могут содержаться как в плюсовых, так и минусовых фракциях.

Необходимость удаления высокодисперсных и мелких фракций применительно к технологии 3D-синтеза объясняется тем, что их присутствие в массе порошка из-за наличия адгезии приводит к агломерации частиц, что существенно ухудшает технологические свойства МПК [8]: снижается текучесть [9], увеличивается угол естественного откоса [10]. Это означает, что скорость прохождения частиц порошка через тонкие элементы сечения (пересыпание и подача порошка в установках через питатели) снижается вплоть до полного прекращения, ухудшаются также заполнение объемов и распределение порошка при создании рабочего слоя. При идеальных технологических свойствах порошки, как и жидкость, могут принимать форму, повторяющую форму сосуда, в котором они находятся [11].

Адгезия частиц между собой и к твердым поверхностям обусловлена силами, различными по своей природе: молекулярными, капиллярными, электрическими и кулоновскими [8]. Эти силы в большинстве случаев действуют одновременно. Однако в определенных условиях каждая из них может превалировать над другими. Агломерация возникает в результате сильного развития поверхности у высокодисперсных и мелких фракций вследствие сил межмолекулярного взаимодействия (рис. 1, *а*).

Электрические силы адгезии проявляются только при контакте частиц друг с другом и с рабочей поверхностью. В условиях смешения, транспортирования частицы сыпучего материала трутся друг о друга, о рабочие органы и стенки смесителя, бункера, лоток, приобретая электрический заряд. Знак заряда, его величина при прочих равных условиях зависят от материала частиц и предметов, с которыми они контактируют.

Агломерация часто вызвана влажностью порошков [8]. Капиллярные силы адгезии возникают при конденсации паров воды из влажного воздуха, находящегося в порах сыпучего материала, и при наличии пленочной влажности материала. Агломерация, вызванная влагой, представляет собой серьезную проблему для порошков с размером частиц <100 мкм. В этих случаях между частицами возникает мениск (рис. 1, *б*), который силами поверхностного натяжения сцепляет частицы между собой. Если размер частиц порошка <1 мкм, то такие порошки агломерируются даже в сухом состоянии [12].

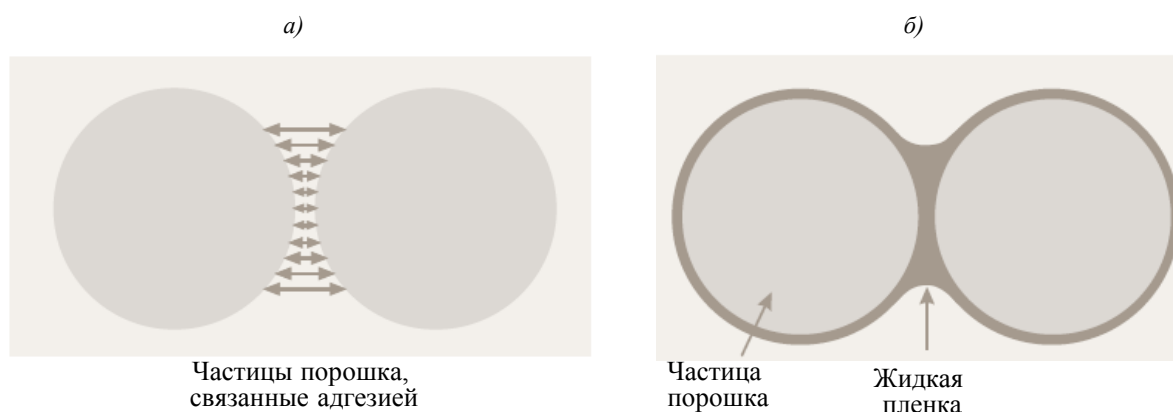


Рис. 1. Взаимодействие частиц:
а – межмолекулярное; *б* – с пленочной влажностью

Для частиц порошка размером более 15–20 мкм силы адгезии малы в сравнении с гравитационными силами, которые отделяют частицы друг от друга. У высокодисперсных и мелких фракций порошков силы адгезии начинают превалировать, поэтому данные фракции обладают низкими текучестью и сыпучестью.

Наличие сил сцепления частиц порошка можно определить по величине угла естественного откоса. Это угол между образующей конуса и горизонталью при свободной засыпке порошка на горизонтальную плоскость, определяющий подвижность получаемой структуры смеси. У мелких частиц неправильной формы углы откоса больше, чем у крупных сферических частиц. Для крупных сферических частиц угол откоса составляет ~30 градусов. Вообще, для свободно текущих порошков угол откоса не превышает 38 градусов. Когда же он достигает 45 градусов, это свидетельствует о наличии когезии в массе порошка [12].

Следует также отметить, что высокодисперсные и мелкие фракции имеют существенно более высокое содержание кислорода: у таких фракций, например размером 10–20 мкм для жаропрочного никелевого сплава, уровень кислорода составляет от 150 до 300 ppm, в то время как у фракций размером 10–63 мкм – от 50 до 100 ppm.

При отлаженном технологическом процессе сложностей с отделением высокодисперсных и мелких фракций с помощью аэродинамических классификаторов не возникает.

Ситовый рассев порошков и гранул

Далее, после аэродинамической классификации для получения целевой фракции переходят к отделению частиц крупных фракций методом ситового отсева. Технологическая операция отсева порошков является важной, как и все задачи, требующие получения тонких фракций на уровне 40–63 мкм, и оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели изготовления порошков и гранул требуемой фракции. Поэтому, даже имея после распыления массу порошка с высоким содержанием целевой фракции, при отсутствии качественного оборудования или технологии отсева можно потерять значительную ее часть в отсевах или получить гранулометрический состав с высоким содержанием частиц с размерами, отличными от целевой фракции, превышающим требования нормативной документации.

Наибольшее применение при отсеве в промышленных объемах тонких фракций порошков крупностью 40–63 мкм в аддитивном, порошковом и гранульном производствах находят вибрационные установки (виброгрохоты) различных конструкций с горизонтальным или наклонным расположением ситовых полотен [12–14].

Принцип работы установок с наклонным расположением сит идентичен процессу отсева на установках с горизонтальным расположением сит. Порошок, подаваемый на поверхность сита, может начать двигаться по ситам под влиянием двух факторов: наклона ситовой поверхности и неравномерности движения этой поверхности. При наклонном расположении сит имеются некоторые существенные преимущества:

- практически отсутствие забивания ячеек за счет наличия угла наклона сита, так как уменьшается необходимое ускорение для вывода частицы из состояния заклинивания в ячейке;
- простота удаления верхней (плюсовой) фракции за счет ее схода под действием силы тяжести;
- возможность в некотором диапазоне регулировать крупность просеваемых частиц углом наклона ситового полотна.

Однако из двух вариантов предпочтительным является использование виброгрохотов с горизонтальным расположением ситовых полотен, несмотря на перечисленные преимущества конструкции с наклонным расположением сит.

Так, если на частицу действует сила тяжести q и сила P , обуславливающая движение частицы в горизонтальном направлении, то частица будет двигаться по направлению

результатирующей силы S (рис. 2, а). Для свободного прохода частицы (рис. 2, б) необходимо, чтобы ее диаметр D не превышал величины

$$D=ac-bc=lsina-hcosa, \quad (1)$$

где l – ширина отверстия ячейки; α – угол наклона ситового полотна; h – толщина полотна; ac – проекция ширины отверстия ячейки ($lsina$); bc – проекция толщины полотна ($hcosa$); ab – максимальный диаметр, при котором частица способна пройти через ситовое полотно при угле наклона α (рис. 2, б).

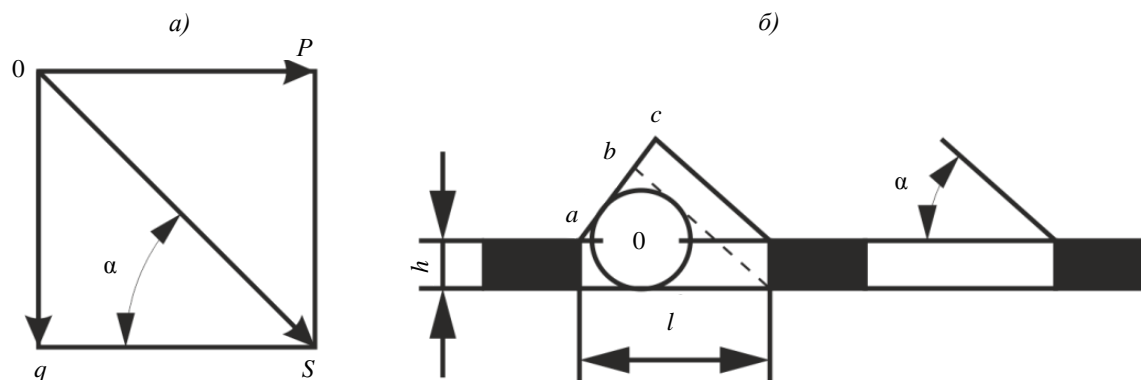


Рис. 2. Движение материала по горизонтально расположенному сити:

a – силы, действующие на частицу при движении по сити; b – проход частиц порошка через отверстия сита

Как следует из формулы (1), для наиболее выгодного просеивания необходимо иметь угол α , равный 90 градусам. Приблизительно такие условия получаются при движении частиц порошка перпендикулярно сити в вибрационных установках с горизонтальным расположением сит. При наклонном расположении ситового полотна угол α будет уменьшаться на угол наклона сита при той же результирующей силе.

Данные, приведенные в работах [13, 15], подтверждают, что несколько повышенный выход годного выявлен на установках с горизонтальным расположением сит, чем на установках с наклонным расположением. Установки с наклонным ситовым полотном удаляют в отходы больший объем годного продукта, в результате чего общий выход годного у таких установок меньше, чем у горизонтальных вибросит, на 1,5–8,0% – в зависимости от среднего размера исходных гранул [13]. Так, частицы, соизмеримые с ячейкой ситового полотна, имеют бóльшую вероятность просеяться как за счет более длительного их нахождения на сите, так и за счет того, что проекцией на горизонтальную плоскость ячейки наклонного сита из-за угла наклона вместо квадрата является прямоугольник.

Совершенной была бы сортировка (рассеивание) при просеве через сито всех частиц меньшего размера по сравнению с отверстиями ситового полотна. Практически же некоторые частицы с размерами нижнего продукта (менее размера ячейки) всегда задерживаются на сите и уходят вместе с верхним продуктом [14].

Процесс отсева (просеивания) частиц порошка носит вероятностный характер и в значительной степени является функцией расстояния, которое частица должна пройти вдоль ситового полотна, и времени нахождения на сите. Вероятность прохождения частиц через сито также связана с различными дополнительными факторами:

- технологическими свойствами порошка (влажность, форма, исходный гранулометрический состав, насыпная плотность, текучесть, сыпучесть);
- отклонениями от номинального размера ячейки ситового полотна (с классом точности);

- параметрами проведения процесса (амплитуда; частота вибрации; скорость подачи, влияющая на толщину слоя);
- эффективной площадью рассева, степенью забитости ячеек полотна частицами, эффективностью системы очистки полотна от крупных частиц.

Огромный опыт эксплуатации вибросит, накопленный при производстве заготовок дисков и валов по технологии металлургии гранул с объемом их изготовления >250 тонн гранул в год, получаемых методом плазменной плавки и центробежного распыления (метод PREP), показал существенное различие в эффективности работы ситовых полотен с ячейками размером 200–140 мкм и 100 мкм и менее – формула (1).

Частицы порошка диаметром <50 мкм при полете в газовой среде испытывают силу лобового сопротивления, соизмеримую с силой тяжести и силой виброудара ситового полотна [16]. Это обуславливает малую энергию прохождения такой гранулы через ячейку сита, следовательно, увеличивает время просева по сравнению с более крупными фракциями [13, 17] и повышает вероятность ее отвода в плюсовую фракцию (отходы). Чтобы скомпенсировать этот эффект и избежать снижения выхода годного, требуются увеличение времени нахождения порошка на сите и размера ситового полотна, а также снижение скорости рассева. Однако из-за малой энергии гранул (частиц порошка) при использовании схемы с горизонтальным расположением ситового полотна (в силу этого положения) в отверстие сита заклиниваются частицы, размер которых соответствует размеру отверстий сита или в очень небольшой степени отличается от него. Такие частицы забивают ячейки сита, приводя к уменьшению «живого» сечения и делая непригодным сито для дальнейшего просеивания. При этом, как следствие, снижаются и производительность процесса, и выход годного.

Таким образом, просеивание металлических порошков на фракции размером <100 мкм практически не может обходиться без использования средств самоочистки сита [13]. Поэтому и для фракций размером менее 40–63 мкм, применяемых в аддитивном производстве, и для фракций размером менее 71–100 мкм, применяемых при производстве заготовок дисков ГТД, необходимо специальное оборудование, способное обеспечить высокую производительность процесса и технологии для получения целевых фракций гранул с высоким выходом годного.

При решении проблемы забивания ячеек и удаления этих частиц из отверстий сита следует обеспечивать постоянную очистку «забитых» ячеек [18]. Для этого применяют различные системы очистки с использованием вертикально колеблющихся шаров, скользящих дисков (шайб) и щеток, механически удаляющих застрявшие в сетке частицы [19, 20]. Но такие системы очистки могут засорять массу порошка продуктами эрозии и/или деформировать ситовое полотно, снижая тем самым точность рассева.

Другой вариант очистки сит (удаления застрявших частиц) – придание заклиненным частицам ускорения, которое больше максимального ускорения, получаемого ситом от приводного механизма [21]. Эта задача решается с помощью ультразвуковой вибрации, которая препятствует забиванию ячеек ситового полотна и применение которой лишено такого недостатка, как засорение порошка продуктами эрозии систем очистки. Однако стоимость ситовых полотен с ультразвуковым ассистированием более высокая по сравнению со стоимостью стандартных сит.

Один из способов совершенствования процесса рассева на виброгрохотах с горизонтальным расположением полотна – создание сложных траекторий движения ситовых поверхностей за счет передачи виброимпульсов непосредственно ткани сетки [17], что позволяет, существенно не увеличивая габариты установки, обеспечивать необходимое время нахождения частиц на ситовом полотне.



Рис. 3. Траектории движения порошка по ситовому полотну в виде спирали: *а* – схема движения; *б* – движение по ситовому полотну в процессе отсева

Наиболее оптимальными для создания сложных траекторий движения являются установки с горизонтально расположенными круглыми ситами. Так, при создании траектории в виде закрученной спирали (рис. 3) можно существенно увеличить путь, проходимый частицей, а следовательно, повысить вероятность ее прохождения через сито, а также КПД процесса. При создании оптимальных траекторий движения возможно применение просеивающих машин с меньшими по площади ситовыми полотнами и более компактными по исполнению.

Оценка эффективности процесса ситового отсева

Очевидно, что исходные характеристики порошка, в том числе гранулометрический состав, требуют настройки режимов отсева и создания определенной траектории движения порошка по полотну сита для обеспечения эффективности процесса и получения необходимого конечного продукта с максимальным извлечением целевой фракции из исходной массы порошка.

Исходная масса, поступающая на сев, характеризуется начальным гранулометрическим составом, где содержится определенное количество рабочей фракции, которую требуется выделить из общей массы порошка. Нередко при оценке эффективности операции отсева не используют начальный гранулометрический состав, что снижает объективность полученных результатов. Чаще всего применяется выход годного, который оценивается как соотношение массы полученной целевой фракции к исходной массе порошка. Однако данный метод не в полной мере отражает эффективность процесса отсева, так как не учитывает исходного содержания целевой фракции в исходной массе порошка, а также возможную закрупненность в полученной целевой фракции.

В работах [13, 22–25] представлены методы оценки эффективности операции отсева, но они довольно сложны для применения в условиях производства. Наиболее простой и в то же время эффективной представляется оценка процента извлечения целевой фракции из массы исходного порошка:

$$ПР_{изв.ц.фр} = M_{ц.фр} \cdot (1 - D_{закр}) / (M_{исх.пор} \cdot D_{ц.фр}), \quad (2)$$

где $ПР_{изв.ц.фр}$ – процент извлечения целевой фракции из массы исходного порошка; $M_{ц.фр}$ – масса целевой фракции, полученная после отсева; $D_{закр}$ – доля закрупненных частиц в целевой фракции после отсева; $M_{исх.пор}$ – масса исходного порошка; $D_{ц.фр}$ – доля целевой фракции в исходном порошке.

Для определения гранулометрического состава используют либо метод определения размера частиц сухим просеиванием по ГОСТ 18318–94, либо метод лазерной дифракции по ГОСТ 8.777–2011.

Наибольшее применение при определении гранулометрического состава находит метод определения размера частиц сухим просеиванием из-за простоты и доступности. Однако следует учитывать, что ГОСТ 18318–94 ограничивает проведение измерений частиц размером до 45 мкм. Точные результаты при сухом просеивании можно получить при использовании контрольных сеток по ГОСТ 6613–86, однако в России сита данного класса не производят. Использование сит нормального класса точности или деформированных (растянутых) может приводить к погрешности измерения гранулометрического состава до 10% и более. На результатах также может сказаться наличие в массе порошка высокодисперсных (0,1–10 мкм) фракций, которые из-за сопротивления газовой среды и адгезии плохо подходят для ситового отсева.

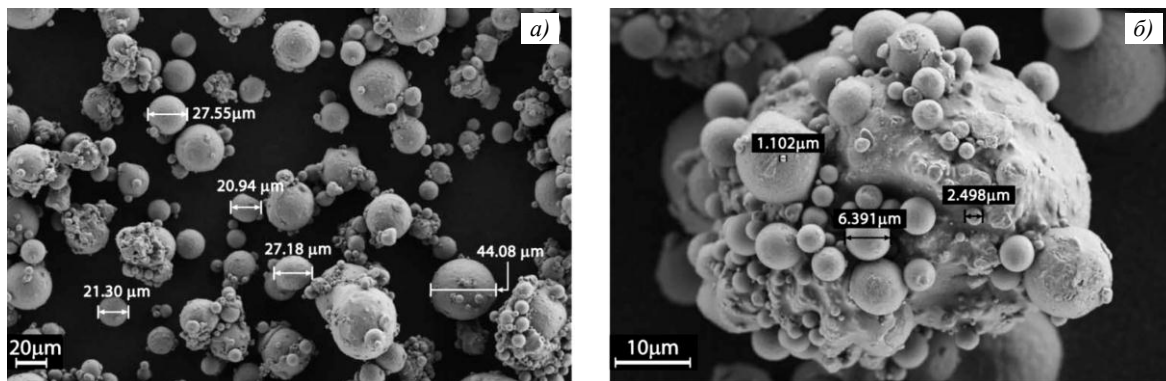


Рис. 4. Микроструктура (сканирующий электронный микроскоп FE-SEM) порошка алюминиевого сплава, полученного методом газовой атомизации [8]:

а – частицы порошка, полученные газовым распылением крупностью от 1 до 44 мкм;
б – агломерат частиц размером 65 мкм – крупная частица с налипшими более мелкими частицами

Применение метода лазерной дифракции является предпочтительным при оценке гранулометрического состава для фракций размером менее 40–63 мкм. Однако наличие в массе порошка высокодисперсных фракций, которые способны при анализе объединяться в агломераты, создавая кластеры размером от 60 до 80 мкм, и подсчитываться как единые крупные частицы (рис. 4), вносит погрешности и искажения в конечный результат [8]. В результате осуществлять гранулометрический анализ рекомендуется после отделения данных фракций с помощью аэродинамического сепаратора.

Заключения

1. Предварительной операцией после газовой атомизации перед ситовым отсевом является операция аэродинамической сепарации, с помощью которой осуществляется удаление высокодисперсных и мелких фракций, что позволяет улучшить технологические свойства и облегчить последующий ситовый рассев.

2. Наиболее предпочтительным при промышленном отсеве порошков, применяемых в аддитивном производстве и гранульной металлургии, является использование круглых просеивающих машин (виброгрохотов) с горизонтальным расположением сит, обеспечивающих наибольшую эффективность.

3. Создание сложных траекторий при отсеве на горизонтальных круглых ситах дает возможность увеличить процент извлечения целевой фракции, а также применять более компактные установки без потери производительности и эффективности.

4. Для получения целевых фракций гранул с высоким выходом годного, применяемых в аддитивном производстве и при производстве заготовок дисков ГТД методом гранульной металлургии, необходимо использование специального оборудования, способного обеспечить высокую производительность процесса и технологии.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
2. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. 2017. №1. С. 2–6.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Алишин М.И., Князев А.Е. Производство металлопорошковых композиций высокой чистоты титановых сплавов методом индукционной газовой атомизации для аддитивных технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №11 (59). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-5-5.
5. Каблов Е.Н. Порошки избавляют от лишнего // Эксперт. 2014. №49 (926). С. 46–51.
6. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. 2015. №2 (11). С. 52–55.
7. Петров И.М. Основные тенденции российского рынка металлических порошков для аддитивных технологий // Аддитивные технологии. 2019. №1. С. 24–26.
8. Kudrolli A. Size separation in vibrated granular matter // Reports on Progress in Physics. 2004. Vol. 67. P. 209–247. DOI: 10.1088/0034-4885/67/3/R01.
9. Ходкин В.И. Исследование процессов и создание технологии импульсно-механической и вакуумно-термической обработки гранул жаропрочных никелевых сплавов при производстве заготовок для двигателестроения: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИЛС, 1982. 410 с.
10. Князев А.Е., Неруш С.В., Алишин М.И., Куко И.С. Исследования технологических свойств металлопорошковых композиций титановых сплавов ВТ6 и ВТ20, полученных методом индукционной плавки и газовой атомизации // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №11 (59). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6.
11. Гарибов Г.С., Кошелев В.Я. Влияние плотности засыпки гранул жаропрочных никелевых сплавов на формоизменение капсул при горячем изостатическом прессовании // Технология легких сплавов. 2013. №1. С. 27–33.
12. Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 200–214.
13. Романов А.И. Исследование закономерностей процесса классификации по крупности мелкодисперсных гранул жаропрочных никелевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАТИ, 2009. 141 с.
14. Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1978. 376 с.
15. Кошелев В.Я., Кошелев В.И. Исследование процесса получения и физико-механической обработки порошков // Технология легких сплавов. 1995. №6. С. 50–53.
16. Романов А.И., Касаткин В.В. Влияние силы лобового сопротивления на движение мелкодисперсных гранул в газовой среде // Новые материалы и технологии в авиационной и ракетно-космической технике. Королев: Машприбор, 2005. С. 21–25.
17. Кошелев В.Я., Голубева Е.А., Дурманова Г.Я. Рассев гранул жаропрочных никелевых сплавов на виброситах // Металлургия гранул. М.: ВИЛС, 1993. Вып. 6. С. 239–246.
18. Назаров К.С., Фет Ш. Анализ современных конструктивных решений, повышающих эффективность виброклассификации трудногрозотимых материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т. 16. №12. С. 383–393.

19. Kadel R. Wirtschaftliche Klassierung von siebschwierigem Gut mit ClipClean // Aufbereitungstechnik. 2003. No. 7. С. 11–16.
20. Meinel A. Zu den Grundlagen der Klassierung siebschwieriger Materialien // Aufbereitungstechnik. 1999. No. 7. С. 313–325.
21. Meinel A. Zur Fein-, Mittel- und Grobkornklassierung auf Wurfsiebmaschinen // Aufbereitungstechnik. 1998. No. 7. С. 317–326.
22. Ходкин В.И., Касаткин В.В., Петров С.Г. Метод оценки эффективности рассева гранул // *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1989. Вып. 5. С. 208–212.
23. Способ управления просеивающей машиной: пат. 2486968 Рос. Федерация; заявл. 13.02.12; опубл. 10.07.13.
24. Денисов Д.Г. Разделение полидисперсных материалов на грохотах // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2006. №4. С. 24–27.
25. Востриков А.В., Сухов Д.И. Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий – текущий статус и перспективы развития // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2016. №8 (44). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3.