

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФРАКЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛУЧАЕМЫХ ИНДУКЦИОННОЙ ВАКУУМНОЙ ПЛАВКОЙ И РАСПЫЛЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ С ПОМОЩЬЮ ЦИКЛОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

А. Ф. Ильюшенко¹, А. И. Лецко¹, О. И. Карпович²,
М. А. Забелин², О. О. Кузнечик¹, Т. А. Николайчук¹

¹Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь

В работе приведена основанная на типовой конструкции циклонного фильтра предназначенная для проектирования система фракционного разделения получаемых индукционной вакуумной плавкой и распылением металлических порошков с помощью циклонной фильтрации. В разработанной методике использован принцип каскадной циклонной сепарации на планируемые фракции распыляемых в газовом потоке частиц. В ней представлены функциональные и конструкционные схемы, необходимые для проектирования и изготовления системы такой каскадной циклонной сепарации.

Введение. В современном аддитивном производстве [1, 2] достаточно широко используются аддитивные технологии 3D-печати металлическими порошками на металлургических 3D-принтерах методами послойного селективного лазерного и электронно-лучевого сплавления, к которым также относятся Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electron Beam Melting (EBM), Laser Cusing, а также послойной порошковой лазерной наплавки, которая известна как Laser Engineered Net Shaping (LENS). В настоящее время для такой 3D-печати на металлургических 3D-принтерах стремятся использовать металлические порошки определенных фракций, как правило, имеющие пределы от 15 до 100 мкм, которые должны преимущественно состоять из частиц круглой или близкой к ней округлой формы. Для получения частиц такой формы на промышленном уровне в порошковой металлургии с середины прошлого века используют установки индукционной

вакуумной плавки и распыления. Однако однократное распыление на таких установках не позволяет получать металлические порошки с частицами, имеющими размеры, которые укладываются только в один, вышеуказанный, узкий диапазон границ. Металлические порошки с частицами, размеры которых удовлетворяют этому узкому диапазону, получают с помощью дополнительной технологической операции отсева, выполняемого на отдельном оборудовании с использованием ситовой и циклонной классификации. Выполнение этой технологической операции можно осуществить автоматически вместе с распылением, если включить ее в общий технологический цикл индукционной вакуумной плавки и распыления. Способствовать решению данной актуальной задачи может проектирование системы фракционного разделения получаемых индукционной вакуумной плавкой и распылением металлических порошков с помощью циклонной фильтрации. Разработка методики такого проектирования и является целью данной работы.

Анализ конструкций циклонных пылеуловителей и определение встраиваемой в процесс индукционной плавки и распыления функциональной схемы системы каскадной циклонной сепарации. Как показал анализ работ [3–8], для определения функциональной схемы встраиваемой в процесс индукционной плавки и распыления системы каскадной циклонной сепарации необходимо провести анализ конструкции ее функционального элемента – циклонного пылеуловителя (далее – циклон). Как правило, этот функциональный элемент представляет собой закрытую емкость в виде конуса с вершиной, обращенной вниз (рис. 1).

Из представленной на рис. 1 функциональной схемы циклона следует, что верхняя часть его емкости соединяется с выходом транспортирующего газового канала, нижняя часть может иметь разгрузочный люк или бункер-дозатор. Благодаря возникающему потоку используемого при распылении инертного газа находящийся в нем металлический порошок поступает через газовый канал непосредственно в циклон, в котором из-за резкого расширения объема он начинает терять часть своей энергии. Из-за такой потери внутри циклона часть переносимых в нем частиц

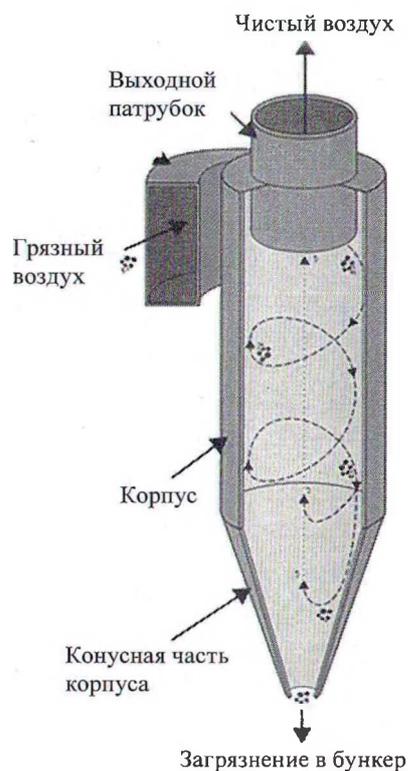


Рис. 1. Функциональная схема работы циклона

металлического порошка определенной фракции под действием силы тяжести будут падать на дно. Чтобы при проектировании определить необходимый объем накопительной емкости циклона, следует оценить исходя из производительности и рабочих параметров установки индукционной вакуумной плавки и распыления ожидаемую скорость и длительность осаждения частиц порошка определенной фракции.

После предварительной проектной оценки основных конструктивных показателей (рис. 2) каждого из предназначенного для осаждения металлических порошков определенной фракции циклонов с целью автоматизации процесса эти циклоны следует

последовательно соединить в каскад согласно функциональной схемы, приведенной на рис. 3. Для обеспечения возможности движущийся в газовом потоке металлический порошок делить на более узкие фракции необходимо в конструкцию каждого циклона устанавливать собственный угол ввода в него газового потока.

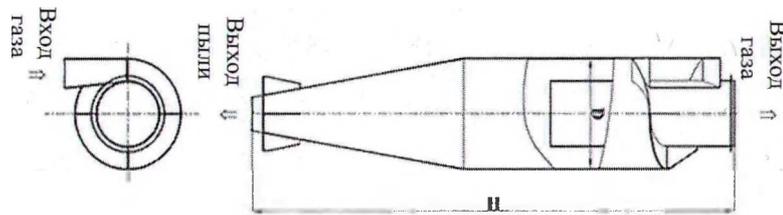


Рис. 2. Типовая конструкция циклонного фильтра с указанными основными конструктивными параметрами

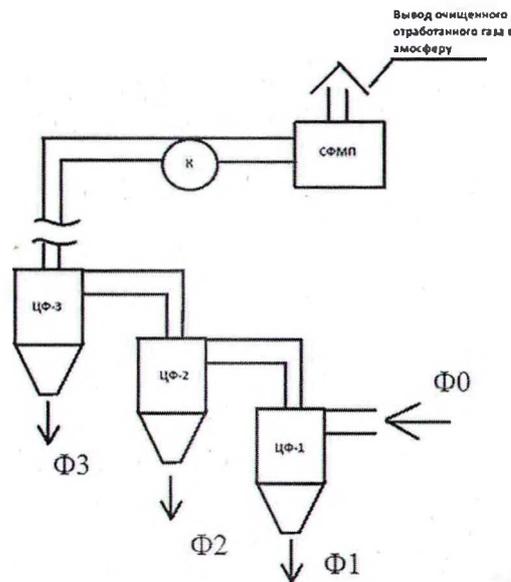


Рис. 3. Функциональная схема каскадной циклонной сепарации: ЦФ-1, ЦФ-2, ЦФ-3 – ряд последовательных циклонных фильтров; К – компрессор; СФМП – система фильтрации мелкой пыли; Φ_0 – начальная фракция порошка; Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 – разделенные фракции порошка

Собранные согласно представленной на рис. 3 схемы в единую систему циклоны обеспечат при распылении металлического порошка разделение его на фракции следующим образом.

Газовый поток, формируемый щелевой форсункой установки индукционной вакуумной плавки и распыления, заполняет сначала камеру распыления, в которой происходит разбрызгивание на мелкие капли струи жидкого металла, где теряет часть своей энергии. Оставшаяся часть этой энергии заставляет двигаться в газовом потоке с разными скоростями частицы получаемого после кристаллизации металлического порошка через каскад циклонов. В каждом отдельном циклоне системы каскадной сепарации накапливаются металлические порошки, фракционный состав которых имеет более узкие границы, чем те, которыми бы характеризовался металлический порошок, полученный в камере распыления. Если в системе каскадной центробежной сепарации скорость потока на выходе будет ниже прогнозируемой из-за повышенного аэродинамического сопротивления, то к выходу следует рассмотреть возможность подключения компрессора и отрегулировать режим его работы.

Проектно-конструкторская оценка встраиваемой в процесс индукционной плавки и распыления функциональной схемы системы каскадной циклонной сепарации. При проектировании системы каскадной циклонной сепарации, функциональная схема которой представлена на рис. 3, необходимо учитывать, что распыление представляет собой двухфазный аэрозольный поток, в котором газ является дисперсионной, а частицы порошка – твердотельной дисперсной фазой. Это необходимо учитывать при составлении параметрической системы, где каждый составной элемент – в виде отдельно взятого типового циклона, конструкция которого приведена на рис. 2. Габаритные параметры включаемых в систему циклонов рассчитываются с учетом предполагаемого объемного расхода (Q_p , м³/с) очищаемого от частиц металлического порошка определенной фракции (при распылении газа), плотности газа (ρ_g , кг/м³) при планируемых температурах очистки, а также его динамической вязкости (μ , Па·с). Одновременно с этим необходимо учитывать планиру-

емый дисперсный состав частиц распыляемого металлического порошка, который определяется не только их диаметром (D_p , мкм) и плотностью (ρ_p , кг/м³) распыляемого металлического сплава. Здесь также необходимо учитывать как планируемую плотность нормального логарифмического распределения ($\lg \sigma_p$), так и планируемую объемную концентрацию ($c_{вх}$, г/м³) таких частиц при распылении, включая ожидаемую величину их осаждения (η) из этого газового потока. Отметим, что эти параметры имеют полное соответствие параметрам очистки газовых потоков от пыли в типовых циклонах [5–8]. Поэтому использование их типовой конструкции (см. рис. 2) при проектировании в дальнейшем может позволить сократить время и сопутствующие издержки, связанные с изготовлением проектируемых, согласно предлагаемой методике, систем каскадной циклонной сепарации.

Вышеизложенные рекомендации позволяют разработать конструктивную схему системы многокаскадной циклонной фильтрации, приведенную на рис. 4. Ее основными элементами являются: патрубок, идущий от камеры распыления, посредством прямогоугольного фланца 2 присоединяется к цилиндрической части циклонного фильтра 3. Цилиндрическая часть циклона 3 и коническая 6 присоединяются друг к другу посредством круглого фланца 4, в то время как бункер для порошка 7 присоединяется к конической части циклона аналогичным образом. Каждый циклон стоит на стойках 5, кроме второго, который привинчивается непосредственно к платформе. Каждый отдельный циклон системы присоединяется к следующему посредством круглого фланца выхлопного патрубка циклона. После системы из трех последовательных фильтров с помощью круглого фланца 9 сеточный фильтр мелкой очистки 10 и бункер для мелкой пыли 11 присоединяются к выхлопному патрубку 3 циклона 8.

При проектировании системы, приведенной на рис. 4, необходимо учитывать синхронизацию газовых потоков, формируемых режимами работы установленного на ее выходе компрессора с газовыми потоками на выходе каждого из каскадов этой системы. Такая синхронизация необходима не только для того, чтобы уменьшить давление как отдельно в рамках одного каскада,

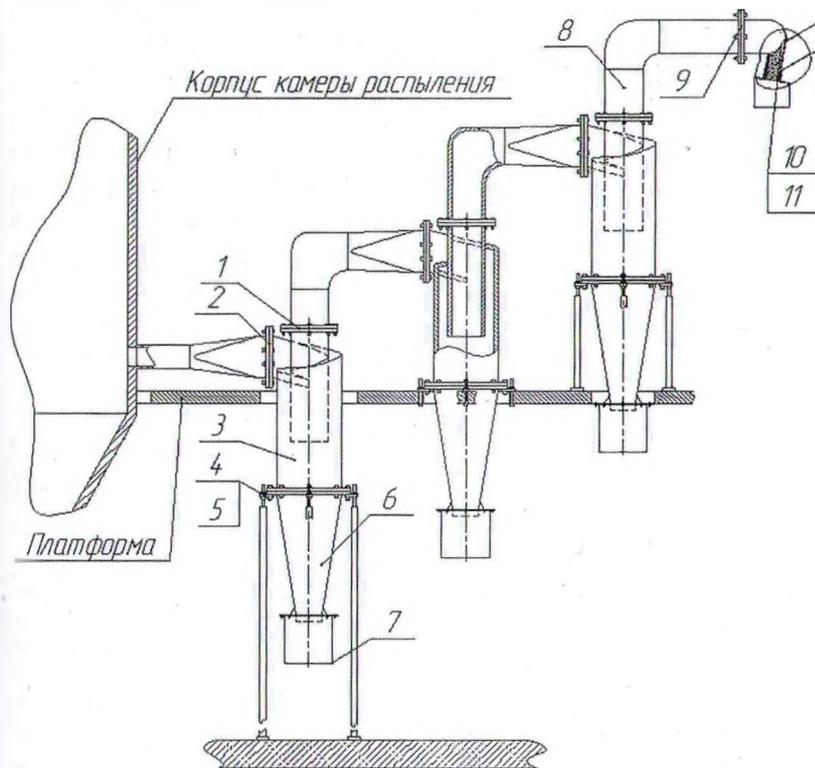


Рис. 4. Конструктивная схема системы многокаскадной циклонной фильтрации: 1 – круглый фланец выхлопного патрубка циклона; 2 – прямоугольный фланец входного патрубка циклона; 3 – цилиндрическая часть циклона; 4 – круглый фланец циклонного фильтра; 5 – стойки; 6 – коническая часть циклона; 7 – бункер для порошка; 8 – выхлопной патрубок циклона; 9 – круглый фланец; 10 – сеточный фильтр мелкой очистки; 11 – бункер для мелкой пыли

так и в складывающейся системе общего аэродинамического сопротивления, но и для недопущения разрыва сплошности этих потоков при распылении металлических порошков, получаемых из расплава при индукционной вакуумной плавке. Если не учитывать эти факторы, то могут возникать аэродинамические разрывы, формирующие источники ударных волн, которые способны разрушить саму систему. Чтобы снизить вероятность

возникновения таких негативных явлений, при проектировании необходимо предусмотреть включение газового ресивера с клапаном автоматического открывания для нагнетания необходимого давления в систему при распылении. При проектировании также необходимо учитывать существующее ограничение на количество используемых каскадов циклонной фильтрации / сепарации. Эти ограничения будут зависеть не только от показателей аэродинамического сопротивления, которое при увеличении количества каскадов будет только возрастать, но и от их массогабаритных показателей, типа используемого при распылении газа, а также технических возможностей компрессора и ресивера.

Выводы

1. Разработана методика проектирования, на основе которой может быть сконструирована и изготовлена система каскадной циклонной сепарации металлических порошков на планируемые фракции для установок индукционной вакуумной плавки и распыления.

2. Основу разработанной методики составляют необходимые для проектирования и конструирования функциональные и конструкционные схемы проектирования и изготовления как самой системы каскадной циклонной сепарации металлических порошков на планируемые фракции, так и ее функциональных элементов.

3. При проектировании в качестве функционального элемента такой системы предложено использовать типовые циклоны, в которых наиболее вероятная фракция частиц металлических порошков определяется углом ввода двухфазного аэрозольного потока, где частицы этого порошка представлены дисперсной фазой, а используемый при распылении газ – дисперсионной.

4. Габаритные параметры включаемых в систему циклонов рассчитываются с учетом предполагаемого объемного расхода очищаемого от частиц металлического порошка определенной фракции, применяемого при распылении газа, плотности газа при планируемых температурах очистки, а также его динами-

ческой вязкости. Одновременно с этим учитывается дисперсный состав частиц распыляемого металлического порошка, который определяется не только их диаметром и плотностью (распыляемого металлического сплава). Здесь также необходимо учитывать планируемую плотность нормального логарифмического распределения таких частиц при распылении, включая планируемую объемную их концентрацию в переносимом газовом потоке, а также ожидаемую величину их осаждения из этого газового потока.

Список использованных источников

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. – 220 с.
2. Ильюшенко, А. Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия / А. Ф. Ильюшенко; Нац. акад. наук Беларуси; Ин-т порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа. – Минск: Медисонт, 2019. – 260 с.
3. Немков, В. С. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов / В. С. Немков, Н. А. Павлов; под ред. А. Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
4. Бабат, Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г. И. Бабат. – Изд. 2-е., перераб. и доп. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 552 с.
5. Ничипоренко, О. С. Распыленные металлические порошки / О. С. Ничипоренко, Ю. И. Найда, А. Б. Медведовский. – Киев: Наук. думка, 1980. – 240 с.
6. Шульга, А. В. Вакуумная индукционная плавка: учеб. пособие / А. В. Шульга. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 64 с.
7. Промышленные циклонные пылеуловители: принцип работы, устройство, подбор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fakel-f.ru/blog/17-11-19>. – Дата доступа: 08.03.2021.
8. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер [и др.]; под общ. ред. А. А. Русанова. – Изд. 2-е., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983.