

- технический документ amixon® -

Порошковая металлургия и экономическая целесообразность аддитивного производства

# Для перспективной 3D-печати: инновационные технологии обработки металлических порошков



# На пути к экономически эффективной 3D-печати

Процессы аддитивного производства находятся на переломном этапе. Все говорят об этой технологии, и она работает. И все же: 3D-печать все еще рассматривается значительной частью индустрии как технология будущего, а не как реалистичная, прибыльная модель производства в настоящем.

Преимущества 3D-печати невозможно отрицать: Большая свобода проектирования, широкие возможности для производства "по требованию" и создания прототипов, адаптация размеров и меньшее количество отходов материалов. Компании производственного сектора согласны с тем, что это хорошие предпосылки для нестабильного рынка. 3D-технологии способны кардинально изменить природу производства.

Однако, несмотря на этот оптимизм, относительно стабильный рост признания и постоянный технологический прогресс, 3D-печать пока не совершила серьезного прорыва. Традиционные производственные процессы, такие как литье под давлением и механическая обработка, по-прежнему доминируют в производстве. Нет никаких признаков того, что 3D-печать может серьезно пошатнуть их позиции.

Причину медленного развития 3D-печати легко найти: Слишком высокие производственные затраты. Десятилетия исследований и ноу-хау позволили оптимизировать процессы литья, формовки и механической обработки в этом отношении. Аддитивное производство, с другой стороны, не имеет концепций и мер для контроля затрат.

Далее в этом документе рассматриваются препятствия, стоящие на пути экономически эффективной 3D-печати. Только адекватные ответы на эти препятствия заложат основу для устойчивого прогресса 3D-печати и, в конечном счете, ее успеха в промышленности будущего.



ОБ АМИКСОНЕ

# Промышленные технологии смешивания, произведенные в Германии

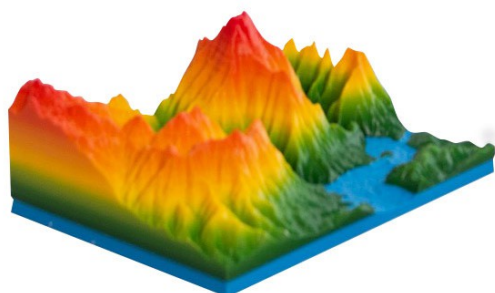
На протяжении почти 40 лет компания <sup>amixon®</sup> является лидером на рынке разработки и производства высокоточных смесительных систем для особо высоких гигиенических требований перерабатывающей промышленности. Промышленные смесители <sup>amixon®</sup> производятся в Германии, изготавливаются из нержавеющей стали, отвечают самым высоким гигиеническим стандартам и оснащены инновационной технологией смешивания. Каждая машина - это индивидуальное решение для ваших индивидуальных потребностей в обработке металлических, керамических и полимерных порошков, используемых в аддитивном производстве.





# Содержание

1. Факторы, определяющие стоимость аддитивного производства	6
1.1. Оборудование	6
1.2. Рабочая сила	7
1.3. Материал	8
2. Проблема экономической эффективности при производстве порошков	9
2.1. Требования к гранулометрическому составу и морфологии частиц	9
2.2. Реологические свойства	10
2.3. Повторное использование избыточного металлического порошка	11
3. Важность технологии смешивания для рентабельного сплавления порошкового слоя	12
3.1. Полное опорожнение снижает потери продукта и увеличивает Прослеживаемость смеси	12
3.2. Однородность и обусловленность	13
3.3. Решения для успешной переработки Повторное использование металлических порошков	15
4. Заключение	16



Коническая сушилка для смешивания amixon® и конический реактор АМТ



# Металлический порошок и экономика 3D-печати

Laser powder bed fusion (L-PBF) - это процесс аддитивного производства, относящийся к группе процессов лучевого плавления. В этом процессе несколько слоев металлического порошка сплавляются с помощью селективного лазерного плавления, образуя точную копию цифровых 3D-моделей. Потенциал L-PBF неоспорим. Как технология "Индустрии 4.0", этот процесс аддитивного производства считается перспективным, поскольку он позволяет производить детали и массовые изделия по индивидуальным заказам. Однако, несмотря на многочисленные преимущества и почти десятилетнюю шумиху, 3D-печать остается нишевой технологией. Причина: процесс слишком медленный, а стоимость материалов слишком высока. Это затрудняет использование 3D-печати в широкой промышленной среде.

Этот технический документ компании amixon® посвящен этим проблемам. В нем объясняется история вопроса и обсуждаются возможности устойчивой и экономически эффективной 3D-печати с использованием порошкового наплавления. Самая большая проблема? Высокие инвестиционные затраты на сам 3D-принтер. Однако в центре внимания также находятся затраты на материалы, чтобы иметь возможность провести глубокую оценку экономической эффективности процесса 3D-печати. Затраты на материалы - головная боль и для производителей металлических порошков, необходимых для L-PBF, так как для них экономическая эффективность также играет важную роль. Инновационная технология смешивания от amixon® может оказать здесь поддержку. Она помогает снизить стоимость материалов, делая этот процесс аддитивного производства экономически целесообразным для

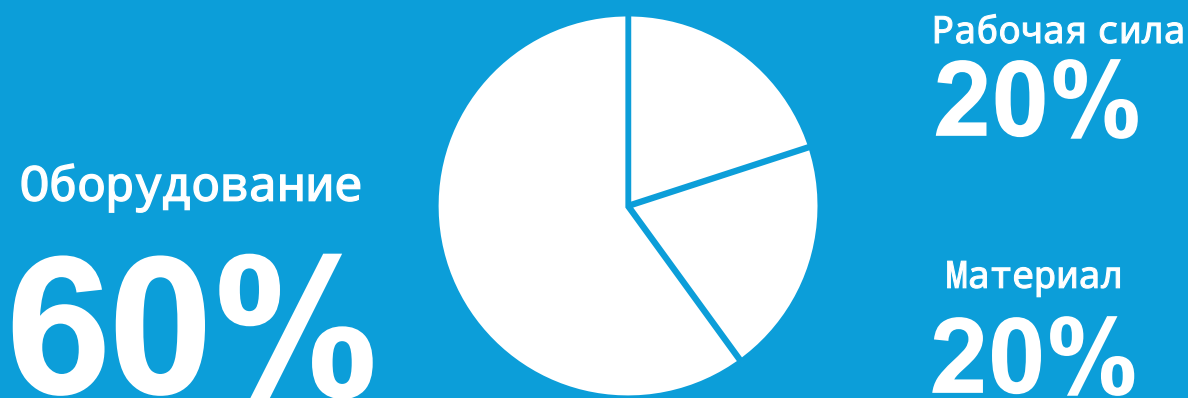


# 1

## Факторы, определяющие стоимость аддитивного производства

Сами 3D-принтеры, обученный персонал и материалы, необходимые для бесперебойной работы, требуют больших затрат.

### Факторы, определяющие затраты в Аддитивное производство с первого взгляда:



Источник: (Вопо n.d.)

#### 1.1 Оборудование

По оценкам, 60% затрат приходится на оборудование.<sup>1</sup> Покупка большого и точного 3D-принтера стоит чуть меньше 1 миллиона евро. Кроме того, 10 % от стоимости покупки ~~входит~~ <sup>входит</sup> на техническое обслуживание и 12 % - на запасные части.<sup>2</sup>

Кроме того, крупномасштабные процессы 3D-печати требуют стабильной инфраструктуры для транспортировки материалов и проектирования. Также могут возникнуть дополнительные расходы на охлаждение, обработку и отделку напечатанных компонентов, а эксплуатация 3D-принтера потребляет значительно больше энергии, чем традиционные методы <sup>производства</sup>.

В долгосрочной перспективе общие затраты должны снизиться по мере развития технологии. Однако финансовые препятствия остаются высокими, особенно для небольших компаний, а 3D-печать - это технология, которая обещает небольшую отдачу от инвестиций.



## 1.2 Рабочая сила

Около 20% затрат приходится на обученный персонал.<sup>4</sup> Эти затраты очень похожи на затраты при традиционных методах производства. Однако 3D-печать работает сравнительно медленно и требует специально обученного персонала, чтобы гарантировать очень качественный дизайн, реализацию, отделку и надежный контроль качества 3D-компонентов.

Например, одних знаний 3D CAD недостаточно для эффективного "проектирования для аддитивного производства" (DAFM). DAFM требует специальных знаний, чтобы понять, как 3D-печатные конструкции могут быть самоподдерживающимися. Сотрудники, обученные DAFM, в конечном итоге могут создавать самонесущие 3D-рендеры. При этом отпадает необходимость в печати дополнительных опорных материалов и связанные с этим дополнительные затраты времени, обработки и материалов.



Поскольку 3D-печать - автоматизированный процесс, со временем произойдет снижение трудозатрат. Это связано с тем, что в отрасли используется все больше цифровых и роботизированных технологий. Технологический прогресс еще больше ускорит этот процесс, а персонал приобретет необходимые навыки, чтобы выполнять 3D-печать с минимальными затратами труда и средств.

### 1.3 Материал

Инвестиции в материалы составляют примерно 20 % от общих затрат.<sup>5</sup> Однако контроль затрат и оптимизация процессов, как правило, сосредоточены на экономии в этом сегменте и в меньшей степени на персонале и оборудовании. Причина: затраты на материалы можно рассчитать заранее. Например, можно легко определить объем необходимого металлического порошка.

С другой стороны, инвестиции, необходимые для эксплуатации оборудования, затраты на техническое обслуживание, потребление энергии и обеспечение качества не могут быть точно оценены с самого начала. Более того, в случае постоянного сотрудничества между конечными клиентами и производителями металлических порошков на последних может оказываться давление в ходе переговоров о стоимости. Стратегия, которую не так просто реализовать при расчете стоимости оборудования и рабочей силы.

Такой акцент на стоимости материалов ставит производителей металлических порошков в затруднительное положение, поскольку им также приходится решать задачи экономически эффективного производства. Это не самые лучшие условия для саморегулирующегося, ориентированного на прогресс рынка 3D-печати. Глава 2 данного документа посвящена проблемам, которые делают производство металлических порошков таким затратным.

**Контроль затрат и оптимизация процессов в большей степени ориентированы на материальные затраты и в меньшей - на экономию в области персонала и оборудование. Это связано с тем, что затраты на материалы можно рассчитать заранее**



# 2

## Проблема эффективности затрат при производстве порошков

От керамики до полимеров: Существует множество материалов, из которых можно получить металлические порошки для порошковой плавки. Существуют также различные технологии распыления сырья для получения металлического порошка. Мы остановимся на методах, использующих газовое распыление. Один из наиболее распространенных методов получения металлического порошка для аддитивного производства.

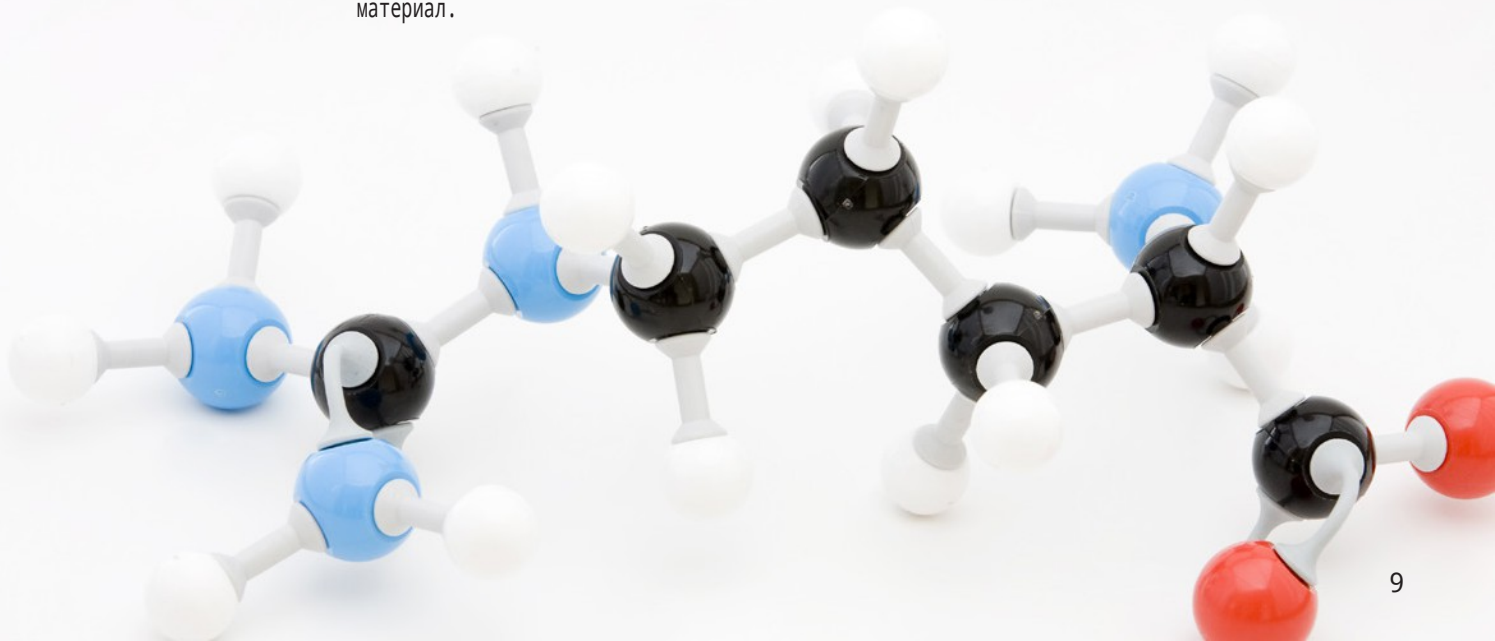
В отличие от 3D-печати, порошковая металлургия основана на многолетнем опыте и оптимизации процессов. Однако вместе с ростом интереса к преимуществам 3D-печати растет и спрос на высококачественные металлические порошки. За последнее десятилетие он увеличивался на 10-40 % в год.<sup>6</sup> Чтобы удовлетворить этот растущий спрос, перед порошковой металлургией стоят серьезные задачи по экономически эффективной эксплуатации производственных мощностей.

### 2.1 Требования к гранулометрическому составу и морфологии

В результате процесса газового распыления образуются частицы различной формы и размера - от менее 1 мкм до 500 мкм. Скорость распыления зависит от производителя, но в большинстве случаев при газовом распылении образуется больше крупных и грубых частиц порошка и меньше мелких. Перед обработкой и последующей упаковкой металлический порошок просеивается на партии одинакового размера и формы.

Для того чтобы печатать стабильные компоненты с хорошими несущими свойствами, порошковая обработка требует металлического порошка как можно более сферической формы с равномерным размером частиц. Кроме того, большинство процессов порошкового наплавления требуют очень мелкого металлического порошка для эффективной печати. Частицы размером около 10 мкм являются предпочтительным выбором. Частицы большего размера более или менее непригодны для порошкового наплавления, и их трудно использовать повторно.

Остается много лишнего материала, который не используется. Проблема, которая в конечном итоге также приводит к росту цен на излюбленный, но более редкий мелкодисперсный материал.





## 2.2 Реологические свойства

Металлический порошок, используемый в процессе порошкового наплавления, имеет решающее значение для эффективности обработки и качества 3D-печати. Для особо важных применений металлические порошки должны соответствовать определенным стандартам с точки зрения их физических и химических свойств. Производители должны быть уверены, что порошок надежно отвечает следующим требованиям:

### ✓ Текучность и распределяемость

После того как контуры 3D-компонента полностью сплавлены лазером, лоток опускается, и новый слой порошка наносится тонким и равномерным слоем. Очень хорошая текучность обеспечивает быстрое и точное дозирование. Оптимальная рассеиваемость гарантирует, что для равномерного распределения металлического порошка требуется лишь небольшое усилие. Это предотвращает повреждение ранее расплавленной структуры детали.

### ✓ Не содержит агломератов и когезии

Будь то при хранении, транспортировке или в процессе смешивания: Тонкий металлический порошок всегда подвержен риску комкования. Чтобы предотвратить образование таких агломератов, необходимо правильно подготовить и обработать сыпучий материал. Это позволяет избежать дефектов качества в готовых 3D-компонентах.

### ✓ Химическая стабильность

При плавке в порошковом слое металлический порошок сплавляется под воздействием тепла. Обычно для этого используются лазерные или электронные лучи. Однако перед сплавлением металлический порошок должен быть химически инертным. Влага, окисление, тепло или трение в процессе смешивания могут привести к тому, что инертное состояние будет сведено на нет. Этой ситуации необходимо избегать с помощью инновационных технологий смешивания, чтобы предотвратить преждевременное или недостаточное сплавление в процессе 3D-печати.

### ✓ Равномерное смешивание добавок

Многие металлические порошки после распыления подвергаются дополнительной обработке для улучшения их реологических свойств. Например, путем добавления покрытий или текучих добавок. Идеальное однородное смешивание с такими чувствительными ингредиентами представляет собой серьезную проблему в процессе смешивания.

### 2.3 Повторное использование излишков металлического порошка

Это беспроигрышная ситуация, с одной стороны, для конечного потребителя, который хочет сохранить низкую стоимость материала, а с другой - для производителей металлических порошков, которые всегда страдают от нехватки мелкого материала: Переработка излишков металлического порошка имеет преимущества для обеих сторон. Однако, к сожалению, процесс переработки не так прост. Ведь важно, чтобы металлический порошок был неизменно высокого качества, чтобы он всегда отвечал высоким требованиям к производительности 3D-компонентов.

Проблема: В различных металлических порошках были обнаружены признаки деградации. Высокотемпературные порошковые сплавы, такие как Icone1 718, могут деформироваться в зависимости от близости к лазерному расплаву. Некоторые металлические порошки становятся непригодными для повторного использования, поскольку их морфология слишком крупная или слишком грубая.<sup>7</sup> Другие материалы, такие как титановый порошок, подвержены поглощению кислорода и поэтому могут быть повторно использованы лишь несколько раз.<sup>8</sup>

На сегодняшний день не существует квалифицированных методов анализа и переработки таких остаточных материалов для использования в порошковом плавении. Разработка таких процессов была бы благом как для производителей порошков, так и для конечных пользователей. Инновационные подходы, обеспечивающие химическую основу для высокой пригодности нового металлического порошка к повторному использованию, также нуждаются в совершенствовании. Благодаря дальнейшим исследованиям и разработкам в этой области производители порошков могут внести значительный вклад в повышение экономической эффективности 3D-печати.

Теперь перейдем к вопросу о том, как инновационные системы смешивания от amixon® могут помочь в решении некоторых из описанных выше проблем. В центре внимания - гранулометрический состав, реология и повторное использование металлического порошка.

**Не хватает инновационных подходов, обеспечивающих химическую основу для высокой степени многократного использования новых металлических порошков. Благодаря дальнейшим исследованиям и разработкам в этой области производители порошков могут внести**







## Важность технологии смешивания для рентабельного сплавления порошкового слоя

Системы смешивания, вакуумной сушки и реакторы играют важнейшую роль в производстве и переработке металлических порошков. После распыления и просеивания металлического порошка партии одинаковых по размеру частиц обрабатываются в смесительных установках. Там им придаются однородные свойства, химический состав и текучесть, необходимые для создания прочных и высокопроизводительных 3D-компонентов.

Чтобы сократить время обработки и предотвратить разрушение металлического порошка, технология смешивания должна обеспечивать процессы гомогенизации, кондиционирования, сушки и охлаждения в одной машине. Для этого компания amixon® разработала смесители, реакторы и вакуумные сушилки 3 в 1, которые гарантируют непревзойденную производительность и долговечность смеси.

Следующие особенности технологии смешивания amixon® помогают производителям металлических порошков повысить эффективность процесса и выход продукции, а также иметь возможность повторно использовать излишки материала в любое время:

### 3.1 Полное опорожнение снижает потери продукта и повышает его отслеживаемость смесь

Идеальное разграничение партий без перекрестного смешивания имеет большое значение для точного отслеживания партий и обеспечения качества. Перекрестное загрязнение между отдельными партиями оказывает негативное влияние на гранулометрический состав. Это, в свою очередь, приводит к серьезным проблемам с качеством 3D-печати.

Идеальное решение для этой задачи: amixon® AMT, конический смеситель, сушилка и реактор 3 в 1. Коническая смесительная камера и выпуклые спирали позволяют металлическому порошку полностью вытекать без расслоения. Смесительный вал поддерживается только сверху и не соприкасается с продуктом. Таким образом, предотвращается отложение остатков материала.

Компания amixon® разрабатывает смесительные системы с плоским основанием, которые гарантируют до 99,997% остаточного опорожнения. amixon® VMT - это система 3 в 1 для смешивания, сушки и реактора, оснащенная цилиндрическим смесительным сосудом инновационной технологией ComDisc®. Этот гибкий механизм установлен под смесительным валом и при опорожнении опускается на дно емкости. Там он радиально скользит по полу смесительной установки и направляет смесь к выходу.

Полное опорожнение промышленного смесителя необходимо не только для того, чтобы избежать перекрестного загрязнения и проблем с отслеживанием партий. Это также повышает выход партии, поскольку в системе смешивания не остается ценных частиц.



amixon® вакуумный смеситель-сушилка и вакуумный реактор VMT

### 3.2 Однородность и кондиционирование

Идеальная реология металлического порошка имеет решающее значение для эффективного сплавления порошкового слоя. Для производства продукта, отвечающего столь высоким требованиям, необходима сложная технология смешивания.

Следующие особенности смесителей, сушилок и реакторов AMT и VMT способствуют экономически эффективному производству высококачественных металлических порошков для аддитивного производства:



## Мягкая, но тщательная гомогенизация

Порошковые смесители amixon® оснащены вертикальным спиральным смесительным инструментом в центре камеры. Во время вращения создается трехмерный поток. Металлические порошки закручиваются вверх по периферии смесительной камеры. Достигнув верха, они под действием силы тяжести устремляются вниз в центр смесительной камеры. Этот поток проходит через всю смесительную камеру и обеспечивает работу без мертвого пространства. При таких условиях требуется лишь низкая частота вращения, чтобы избежать образования агломератов и добиться идеального однородного смешивания с превосходными свойствами потока. Таким образом, частицы металлического порошка подвергаются лишь незначительным сдвиговым усилиям и надежно защищены. Благодаря вакууму и герметичности содержание кислорода и азота в смеси также значительно снижено.



## Равномерная интеграция добавок в поток

Мягкий, но тщательный процесс гомогенизации идеально подходит для сложных работ по смешиванию. К ним относится, например, равномерная интеграция очень легких текучих добавок, таких как фумированный диоксид кремния. Несмотря на высокую чувствительность этих добавок к сдвигу и их склонность всплывать на верхнюю часть смеси, они эффективно интегрируются в поток смешивания и однородно соединяются с сыпучим материалом. Инновационные механизмы разгрузки также гарантируют, что добавки не будут отделяться от сыпучего материала после смешивания.



## Многоступенчатая обработка для нанесения покрытия на частицы

Распространенной технологией обработки гигроскопичных металлических порошков является покрытие частиц наномелкими добавками для предотвращения образования агломератов. Оснащенные разнообразными функциями обработки, системы смешивания, сушки и реакторы <sup>amixon®</sup> идеально подходят для таких точных многоступенчатых процессов. При равномерном распределении красящих веществ в сыпучем материале сначала создается равномерный уровень влажности внутри порошка. Для этого каждая отдельная частица смачивается добавкой, а затем высушивается в вакууме. Это гарантирует равномерное покрытие на поверхности каждой частицы. При этом сокращается как время обработки, так и затраты тепла, необходимые для достижения желаемого результата.

Принципиальная схема VMT

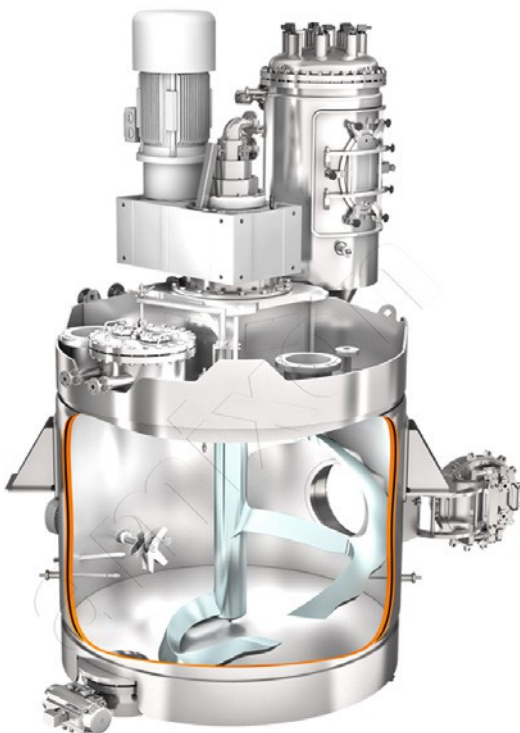
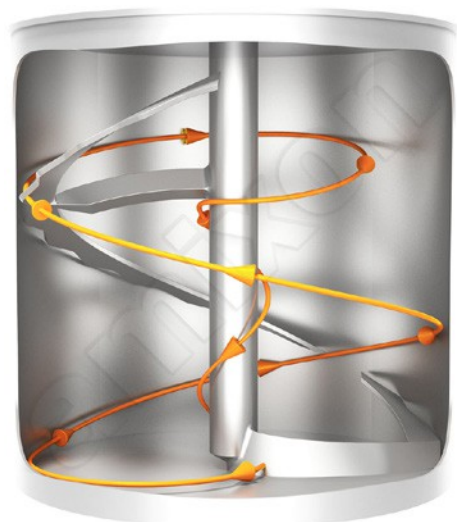


Схема потока VMT

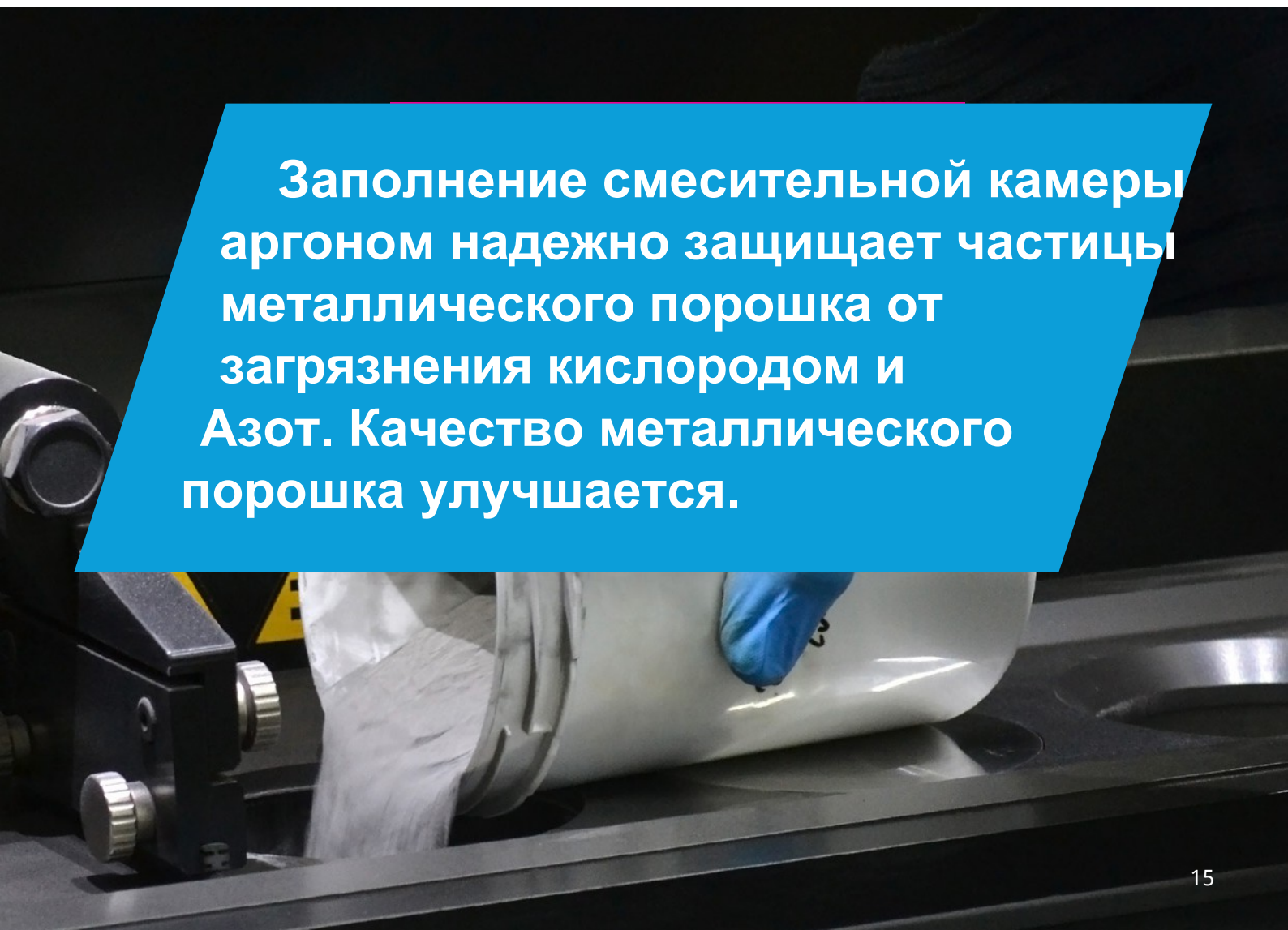


### 3.3 Решения для переработки и успешного повторного использования металлических порошков

Смешивание первичного материала с избыточным остатком - один из наиболее широко используемых методов переработки металлических порошков. Хотя этот процесс позволяет навсегда снизить содержание кислорода в большинстве металлических сплавов, он подходит не для всех областей применения. В частности, в медицинской и аэрокосмической отраслях применяются специальные стандарты качества, которым переработанные металлические порошки могут не соответствовать.<sup>9</sup> Это происходит потому, что, хотя общее содержание кислорода в смеси первичного материала и перерабатываемого металлического порошка соответствует спецификациям, отдельные частицы могут иметь слишком высокое содержание кислорода. Это негативно сказывается на качестве конечного продукта.

Несмотря на эти ограничения, газонепроницаемые системы смешивания <sup>amixon®</sup> доказали свою эффективность в снижении содержания таких примесей в перерабатываемом металлическом порошке.<sup>10</sup> Это возможно благодаря тому, что в процессе смешивания камера смесителя заполняется аргоном. Таким образом, частицы металлического порошка надежно защищены от загрязнения кислородом или азотом, и качество металлического порошка улучшается.

Смесительные установки, сушилки и реакторы <sup>amixon</sup> поддерживают исследования и разработки таких экономичных и ресурсосберегающих процессов. Кроме того, смесительные установки поддерживают инновационные исследования в области химической основы для более эффективной переработки первичных материалов. Это возможно благодаря широкому спектру точно настраиваемых функций обработки. Инновации в этой области могут повысить экономическую эффективность аддитивного производства как для производителей порошков, так и для конечных пользователей, помогая 3D-печати прочно закрепиться в промышленной среде.

A photograph showing a white bucket being tilted to pour a white powdery substance into a dark-colored industrial machine. The machine has various mechanical parts and a blue component visible. The background is dark, making the white powder and bucket stand out.

**Заполнение смесительной камеры аргоном надежно защищает частицы металлического порошка от загрязнения кислородом и Азот. Качество металлического порошка улучшается.**



# 4

## Заключение

**Для экономически эффективного сплавления порошкового слоя требуется инновационная технология смешивания**

Будь то быстрое изготовление прототипов, производство "по требованию" или массовая кастомизация очень сложных компонентов: Аддитивные производственные процессы рассматриваются как будущее промышленной экономики. Однако 3D-печать пока не в состоянии полностью заменить традиционные методы производства. Вместо этого необходимо разработать инновационные идеи для оптимизации различных компонентов системы на производственной линии.

Это требует постоянных исследований, сотрудничества и технологических инноваций, и все еще молодая технология аддитивного производства со временем установит новые стандарты во всей отрасли. Смесительные системы <sup>am1.xon®</sup> вносят свой вклад: благодаря продуманным решениям они обеспечивают высочайшее качество смешивания и тем самым повышают качество и рентабельность металлического порошка для порошкового наплавления.





## ИСТОЧНИК

- <sup>1</sup> Боно н.д.
- <sup>2</sup> Томас и Гилберт 2014
- <sup>3</sup> Nyameke, et al. 2017
- <sup>4</sup> Вонно n.d.
- <sup>5</sup> *ibid*.
- <sup>6</sup> Данкли 2019
- <sup>7</sup> Самант и Льюис 2017
- <sup>8</sup> *ibid*.
- <sup>9</sup> Самант и Льюис 2017
- <sup>10</sup> Кордова, Кампос и Тинга 2019 г.

## ЦИТИРУЕМЫЕ РАБОТЫ

Боно, Эрик. н.д. "Контроль затрат на металлические порошки в аддитивном производстве". Carpenter Technology. <https://www.carpentertechnology.com/en/alloy-techzone/technical-information/technical-articles/controlling-metal-powder-costs/>.

Кордова, Лаура, Моника Кампос и Тиедо Тинга. 2019. "Выявление эффектов повторного использования порошка для селективного лазерного плавления путем определения характеристик порошка". JOM 1062-1072.

Данкли, Дж. Джон. 2019. "Методы распыления металлических порошков для современного производства: преимущества, ограничения и новые области применения технологий производства порошков с высокой добавленной стоимостью". Johnson Matthey Technol. rev. 226-232.

Ньямеке, Патриция, Хайди Пиили, Майя Лейно и Антти Салминен. 2017. "Предварительное исследование жизненного цикла порошковой наплавки нержавеющей стали". Nordic Laser Materials Processing Conference. Aalborg: Physics Procedia. 108-121.

Самант, Рутуджа и Брендан Льюис. 2017. "Рециклинг и восстановление металлических порошков в аддитивном производстве". EWI. <https://ewi.org/metal-powder-recycling-and-reconditioning-in-additive-manufacturing/>.

Томас, Дуглас С. и Стэнли В. Гилберт. 2014. "Специальная публикация NIST 1176". Декабрь. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/specialpublications/nist.sp.1176.pdf>.





**Амиксон ГмБХ**

Хальберштедтер Штрассе 55

33106 Падерборн Германия

Телефон: +49-5251-688888-0

Факс: +49-5251-688888-999

[www.amixon.com](http://www.amixon.com)