УДК 621.762.34

Сапрыкина Наталья Анатольевна, доцент, к.т.н.
Сапрыкин Александр Александрович, доцент, к.т.н.
Ибрагимов Егор Артурович, доцент, к.т.н.
Гусева Таисия Сергеевна, старший преподаватель
(ЮТИ ТПУ, г. Юрга)
Saprykina Natalya Anatolyevna, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences.
Saprykin Alexander Alexandrovich**,** Associate Professor, Candidate of Technical Sciences.
Ibragimov Egor Arturovich, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences.
Guseva Taisiya Sergeevna, Senior Lecturer
(UTI TPU, Yurga)

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ НА МОРФОЛОГИЮ КОМПОЗИТНОГО ПОРОШКА AL-SI8-MG1-TIC1 ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION MODES IN A BALL MILL ON THE MORPHOLOGY OF Al-Si8-Mg1-TiC1 COMPOSITE POWDER FOR SELECTIVE LASER MELTING

Аннотация. В статье рассмотрено влияние режимов механической активации композитного порошка системы Al-Si8-Mg1-TiC1 в шаровой мельнице на морфологию и фракционный состав, предназначенного для селективного лазерного плавления. С помощью метода дискретных элементов (Rocky 2023) выполнена верификация трёх режимов движения мелющих тел.

Ключевые слова: механическая активация, селективное лазерное плавление, шаровая мельница, метод дискретных элементов, частота вращения барабана.

Abstract. The article examines the influence of mechanical activation modes in a ball mill on the morphology and particle size distribution of Al-Si8-Mg1-TiC1 composite powder intended for selective laser melting. Using the discrete element method (Rocky 2023), three modes of grinding media motion.

Keywords: mechanical activation, selective laser melting, ball mill, discrete element method, drum rotation speed.

В последние годы к исходному сырью в порошковой металлургии и материаловедении предъявляются всё более жёсткие требования. Подго-

товка порошков механическим способом превратилась в неотъемлемую стадию технологического цикла при получении композитов, керамики, твердосплавных материалов и шихты для аддитивного производства. Такая обработка даёт возможность не только уменьшать размер частиц, но и управлять их морфологией, изменять кристаллическую решетку, а в ряде случаев повышать химическую активность материала. Среди используемого для этих целей оборудования выделяется шаровая мельница [1-2]: она сочетает в себе высокую производительность, довольно простую конструкцию и универсальность по отношению к различным типам материалов – от металлов до полимеров и керамики.

Особую актуальность механическая активация приобретает тогда, когда речь идёт о получении порошков для селективного лазерного плавления (СЛП). Материалы, используемые в этом процессе, должны удовлетворять целому ряду условий [3]: частицы должны иметь близкую к сферической форму, фракционный состав должен быть достаточно узким, насыпная плотность – высокой, а содержание кислорода и посторонних включений – минимальным. Кроме того, важны стабильность химического состава и отсутствие дефектов внутри самих частиц. Добиться выполнения всех этих условий с помощью традиционных технологий удаётся далеко не всегда, поэтому всё чаще прибегают к механической активации в шаровых мельницах.

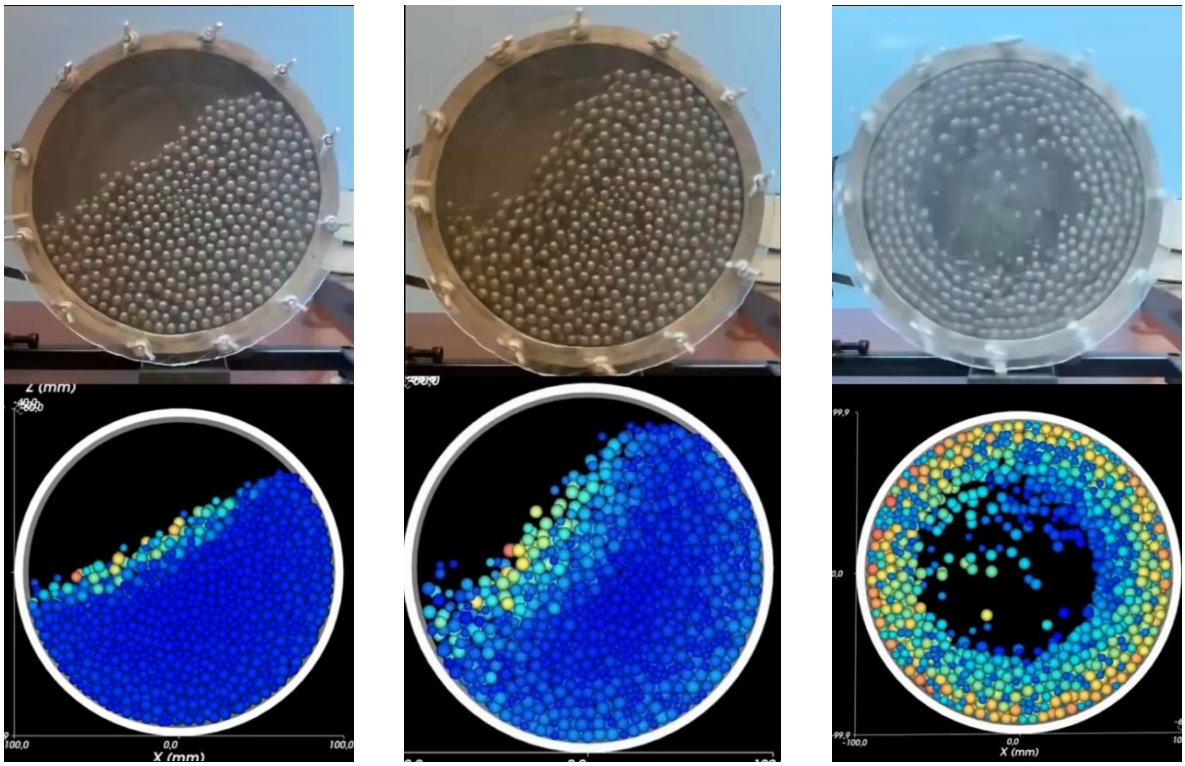
Результат обработки в такой мельнице во многом зависит от того, насколько правильно подобраны её рабочие параметры [4]: скорость вращения барабана, отношение массы мелющих тел к массе порошка, продолжительность процесса, размер и материал шаров, а также среда, в которой происходит измельчение. Если режим выбран неудачно, это приводит к перегреву материала, налипанию порошка на мелющие тела или к укрупнению частиц. И только при грамотной настройке оборудования удаётся целенаправленно влиять на структуру и характеристики готового продукта.

Проверка всех возможных режимов на лабораторной установке связана с большими временными и материальными затратами. По этой причине в работе применяется численное моделирование методом дискретных элементов (DEM) с использованием программного пакета Rocky 2023.

Ранее в исследовании [5] уже был выполнен перенос физического эксперимента в виртуальную среду Rocky 2023 с сохранением всех исходных параметров. В модель были заложены геометрия барабана, частота его вращения, характеристики мелющих шаров и свойства порошковой смеси. Затем было проведено сопоставление того, как движется шаровая загрузка в программе, с тем, что наблюдается на реальной лабораторной установке. Результаты сравнения продемонстрировали, что все три режима воспроизводятся с высокой точностью: каскадный (шары перекатываются, не отрываясь от стенки) (рис.1, а), водопадный (шары отрываются, летят по пара-

болической траектории и наносят удары) (рис.1, б) и режим самофутерования (шары прижимаются к стенке и вращаются вместе с барабаном) (рис.1, в).

После сравнительного опыта и подтверждения совпадения траекторий движения мелющих тел в барабане, было принято решение использовать верифицированные режимы для проведения механической активации порошковой смеси. В качестве исходной шихты использовались композиция состава Al-Si8-Mg1-TiC1 (мас.%). Перед загрузкой в мельницу композитный порошок подвергался фракционированию методом просеивания в течении 30 минут, для дальнейшей обработки отбиралась фракция с размером частиц до 60 мкм. Рабочий объем мельницы вакуумировался и заполнялся газом аргоном. Механическая активация порошка проводилась при частоте вращения барабана 13,7 об/мин, 61,65 об/мин и 137 об/мин в течении 60 минут, что соответствовало каскадному, водопадному и центробежному (самофутированию) режимам движения загрузки.

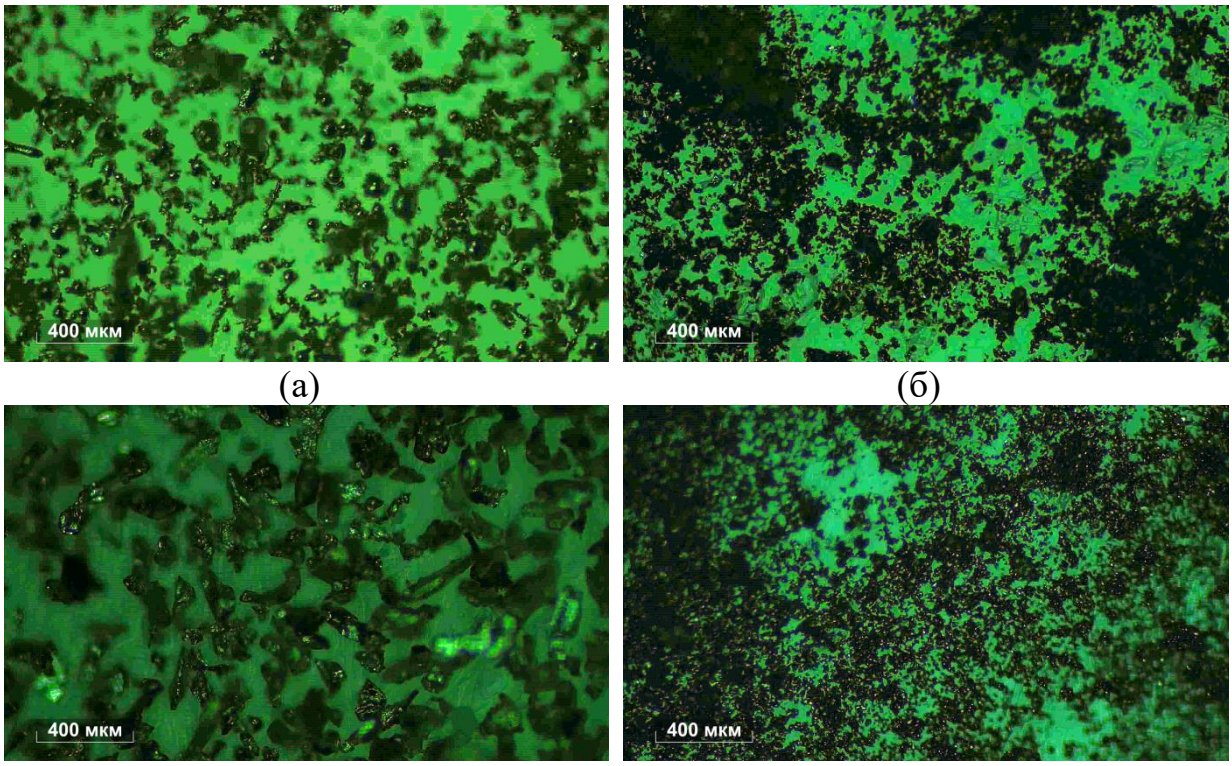


а) 13,7 об/мин б) 61,65 об/мин в) 137 об/мин

Рис. 1 – Режимы работы шаровой мельницы: лабораторный эксперимент и результаты моделирования в Rocky 2023

В результате просеивания, частицы порошка алюминия (рис.2, а) характеризуются преимущественно равноосной формой, приближенной к сферической, в свою очередь частицы магния (рис.2, б) имеют стружкооб-

разную морфологию. Частицы порошка карбида титана (рис.2, г) и кремния (рис.2, в) характеризуются неправильной осколочной формой.

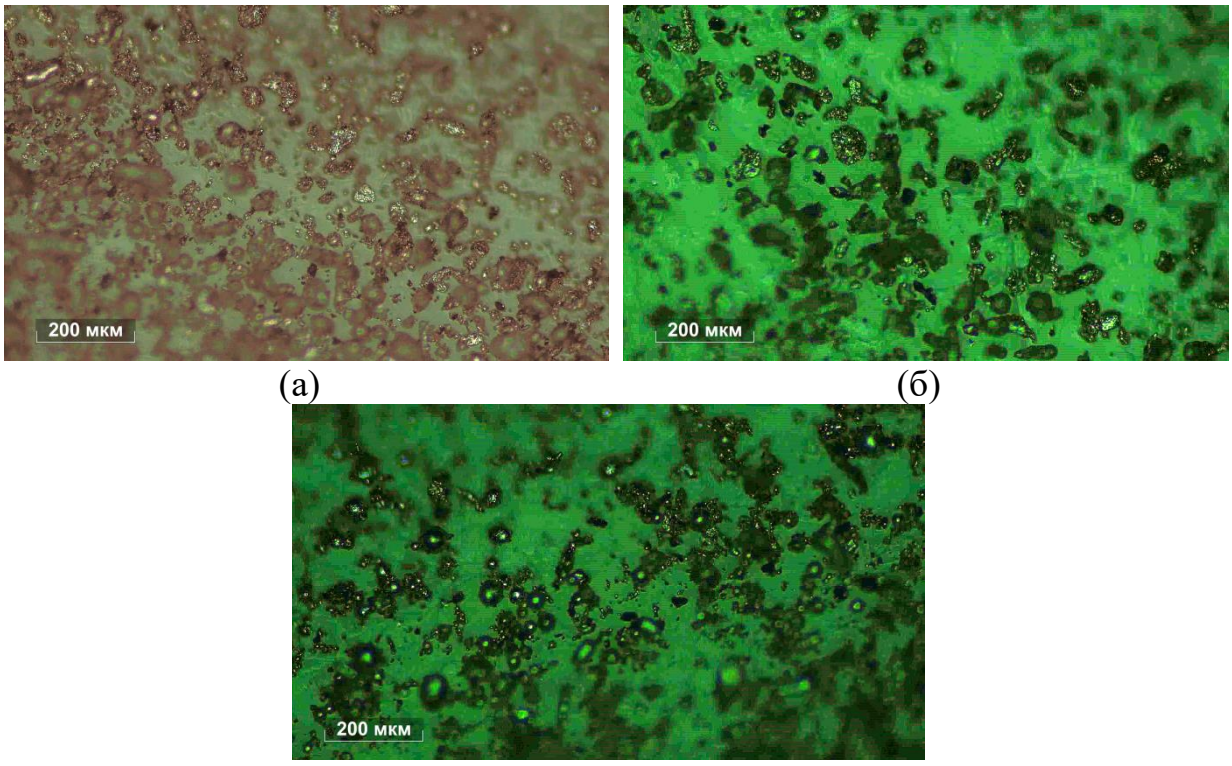


(а) (б)

(в) (г)

Рис. 2 – Частицы порошка до механической активации: алюминий (а), кремний (б), магний (в), карбид титана (г)

После механической активации порошка при частоте вращения барабана 13,7 об/мин (рис.3, а) порошковая смесь характеризуется преимущественно агломерированным состоянием. Наблюдается частичное сглаживание острых кромок, но равноосная форма частиц не достигается. При частоте вращения барабана 61,65 об/мин (рис.3, б) наблюдается значительное сглаживание острых кромок и уменьшение доли крупных агломератов. Морфология частиц приближается к сферической, но полной сфероидизации не достигается. После механической активации при частоте вращения барабана 137 об/мин (рис.3, в) характеризуется значительной степенью агломерации, наблюдаются отдельные округлые частицы с гладкой поверхностью, а также присутствуют неизмененные осколочные фрагменты.



(а) (б)

(в)

Рис. 3 – Частицы порошка после механическо активации: при частоте вращения 13,7 об/мин (а), 61,65 об/мин (б), 137 об/мин (в)

Проведенные исследования показали, что режим механической активации порошка оказывает определяющее влияние на его морфологию и фракционный состав. Наиболее перспективным для получения порошков, пригодных для селективного лазерного плавления, является режим самофутерования (частота вращения барабана 137 об/мин), который обеспечивает сглаживание кромок и уменьшение агломерации. Менее эффективны были замечены каскадный и водопадный режимы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01431, https://rscf.ru/project/25-29-01431.

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук, доценту ОПТ ЮТИ М.А. Кузнецову и младшему сотруднику НЦЦТ КузГТУ А.В. Ялышеву за помощь в проведении исследований.

Список источников

1. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химичсеких процессов. /Е. Г. Аввакумов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 304 с.
2. Фёдоров С. М. Сравнительный анализ механики движения шаров в барабанной и вибрационной мельницах //Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – №. 12. – С. 208-215.

3. Гусева Т. С. и др. Определение оптимального режима работы шаровой мельницы //Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции, г. Юрга, 23-25 мая 2024 г. – Томский политехнический университет, 2024.

4. Михеев Д. Ю., Шестаков Ю. Г., Шапошников Д. А. Шаровые барабанные мельницы //XII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство». – 2020. – С. 1356-1361.

5. Моделирование режимов движения шаровой загрузки методом дискретных элементов в программном комплексе rocky 2023 / Т. С. Гусева, Е. А. Ибрагимов, А. А. Сапрыкин, А. В. Ялышев // Инновационные технологии в машиностроении : Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции, Юрга, 21–22 мая 2026 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2026. – С. 66-68. – EDN RIPZQZ.