



УДК 621.762.34

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-2-15-23>Научная статья
Research article

Оптимизация параметров смешивания порошков системы Al–Sn–Pb для использования при селективном лазерном сплавлении

К. О. Акимов¹, А. Л. Скоренцев^{1,2}, Н. М. Русин¹, В. Е. Лихарев^{1,2},
А. Ю. Никонов^{1,3}, А. И. Дмитриев^{1,3} 

¹ Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/4

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет
Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 36

 dmitr@ispms.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования по оптимизации параметров смешивания порошков системы Al–15Sn–5Pb (об. %) для применения их в технологии селективного лазерного сплавления. Основное внимание уделено обеспечению равномерного распределения частиц мягкой фазы (Sn и Pb), необходимого для получения изделий с однородной структурой и улучшенными триботехническими свойствами. В качестве исходных материалов использовались порошки алюминия (АСД-1), олова (ПО-1) и свинца (ПС-1). Перед смешиванием проводился их просев через сита с размерами ячеек от 50 до 25 мкм. Просеянные порошки имели форму, близкую к сферической, и хорошие характеристики текучести (менее 25 с / 50 г). С использованием метода дискретных элементов и модифицированной модели Герца–Миндлина изучено влияние времени смешивания на степень гомогенности порошковой смеси. Исследования полученных смесей проводились с помощью рентгенофазового, микрорентгеноспектрального и графического методов анализа. Последующая экспериментальная валидация подтвердила достоверность результатов численных расчетов и позволила оценить оптимальные параметры смешения. Установлено, что оптимальное время смешивания, позволяющее получить равномерное распределение исходных порошковых частиц, находится в интервале от 60 до 120 мин. Обнаружено, что сложный характер движения смесителя типа «Турбула» снижает влияние гравитационной сегрегации, улучшая равномерность распределения частиц мягкой фазы (Sn + Pb). Предложенный подход может быть использован для разработки новых методик подготовки порошков для аддитивных технологий и создания композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление (СЛС), алюминиевые сплавы, антифрикционные сплавы, метод дискретных элементов, перемешивание

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда [грант № 24-79-10099], <https://ias.rscf.ru/user/doc/a.w.p.2024.98.legacy/182272>.

Для цитирования: Акимов К.О., Скоренцев А.Л., Русин Н.М., Лихарев В.Е., Никонов А.Ю., Дмитриев А.И. Оптимизация параметров смешивания порошков системы Al–Sn–Pb для использования при селективном лазерном сплавлении. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2025;19(2):15–23. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-2-15-23>

Optimization of powder mixing parameters for the Al–Sn–Pb system for use in selective laser melting

K. O. Akimov¹, A. L. Skorentsev^{1,2}, N. M. Rusin¹, V. E. Likharev^{1,2},
A. Yu. Nikonov^{1,3}, A. I. Dmitriev^{1,3} ✉

¹Institute of Strength Physics and Materials Science
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

2/4 Akademicheskoy Prospekt, Tomsk 634055, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University

30 Lenina Prospekt, Tomsk 634050, Russia

³National Research Tomsk State University

36 Lenina Prospekt, Tomsk 634050, Russia

✉ dmitr@ispms.ru

Abstract. This study presents the results of research on optimizing powder mixing parameters for the Al–15Sn–5Pb (vol. %) system for application in selective laser melting technology. The primary focus is on ensuring the uniform distribution of soft-phase particles (Sn and Pb), which is essential for obtaining products with a homogeneous structure and improved tribological properties. The initial materials used in the study were aluminum (ASD-1), tin (PO-1), and lead (PS-1) powders. Before mixing, the powders were sieved using mesh sizes ranging from 50 to 25 μm . The sieved powders had a nearly spherical shape and good flowability characteristics (less than 25 s / 50 g). The effect of mixing time on the homogeneity of the powder mixture was studied using the discrete element method and a modified Hertz–Mindlin model. The obtained mixtures were analyzed using X-ray phase analysis, micro-X-ray spectral analysis, and graphical analysis methods. Subsequent experimental validation confirmed the reliability of numerical calculations and enabled the assessment of optimal mixing parameters. It was established that the optimal mixing time for achieving a uniform distribution of the initial powder particles falls within the range of 60 to 120 min. It was also found that the complex motion pattern of a *Turbula*-type mixer reduces the impact of gravitational segregation, thereby improving the uniform distribution of soft-phase particles (Sn + Pb). The proposed approach can be used for developing new powder preparation methods for additive manufacturing technologies and for creating composite materials with enhanced performance characteristics.

Keywords: selective laser melting (SLM), aluminum alloys, antifriction alloys, discrete elements method, mixing

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation [Grant No. 24-79-10099], <https://ias.rscf.ru/user/doc/a.w.p.2024.98.legacy/182272>.

For citation: Akimov K.O., Skorentsev A.L., Rusin N.M., Likharev V.E., Nikonov A.Yu., Dmitriev A.I. Optimization of powder mixing parameters for the Al–Sn–Pb system for use in selective laser melting. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2025;19(2):15–23. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-2-15-23>

Введение

Растущий спрос на высокоэффективные антифрикционные материалы в передовых инженерных приложениях стимулирует разработку новых металлических порошковых композиций, предназначенных для получения изделий с улучшенными триботехническими свойствами [1–3]. Эта тенденция в сочетании с активным внедрением технологий аддитивного производства формирует более жесткие требования в вопросах подготовки многокомпонентных порошковых смесей. Экстремальные неравновесные условия технологии селективного лазерного сплавления (СЛС), характеризующиеся интенсивными скоростями нагрева ($>10^6$ К/с) и охлаждения ($10^3\div 10^8$ К/с), требуют высокой однородности исходной порошковой смеси, так как любые неоднородности могут привести к дефектам структуры

и анизотропии с последующим ухудшением свойств готовых изделий [4; 5].

Алюминиевые сплавы являются одними из наиболее широко используемых материалов во многих отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию прочности и веса, что делает возможным производство одновременно легких и прочных компонентов для различных изделий и узлов машин. Особенно привлекательным становится использование алюминиевых сплавов в технологиях 3D-печати, когда помимо указанных выше свойств добавляются возможности дизайна формы и структуры изделия [6]. Сплав системы Al–15Sn–5Pb (об. %) представляет собой пример специализированного материала, предназначенного для использования в антифрикционных компонентах, например в подшипниках скольжения, где олово и свинец выполняют роль твердой смазки, обеспечивая меньший износ деталей при

трении [7–9]. Однако склонность этих включений к сегрегации как в процессе смешивания порошков, так и при затвердевании в ходе процесса 3D-печати требует тщательного контроля состава порошковой смеси для обеспечения их равномерного распределения в готовом изделии [10]. Более того, относительно низкая температура испарения свинца (1749 °C) по сравнению с типичными температурами процесса СЛС алюминиевых сплавов (более 2000 °C) требует тщательного контроля энергозатрат для предотвращения избирательного испарения [11].

Смешивание порошков материалов, имеющих существенные различия в плотности, представляет собой одну из фундаментальных проблем [12]. В случае сплава системы Al–15Sn–5Pb, где отношение плотностей свинца и алюминия составляет примерно 4,2:1,0, эта проблема становится особенно актуальной. Традиционные барабанные смесители, работающие в основном за счет гравитационных сил, чаще приводят к сегрегации, чем к смешиванию таких систем, так как более плотные частицы свинца и олова естественным образом мигрируют вниз. Это приводит к локализованным областям неоднородности порошковой смеси, что критически влияет на последующее их использование в СЛС [13]. Одним из возможных решений указанной проблемы является использование смесителя типа «Турбула» производства завода «Вибротехник» (Россия), который объединяет вращение и поступательное движение в ритмичном 3-мерном узоре. Это сложное движение обеспечивает интенсивное смешивание, условия которого компенсируют гравитационные эффекты, снижая доминирование сегрегации на основе плотности. Порошковый слой периодически испытывает состояния, близкие к невесомости, за которыми следуют резкие изменения направления движения, предотвращающие формирование агломератов.

Цель работы заключалась в проверке эффективности использования модифицированной модели Герца–Миндлина для прогнозирования качества формирующейся порошковой смеси из компонентов со значительной разницей в значениях плотности, а также выявлении оптимальных параметров смешивания порошковой системы Al–15Sn–5Pb в смесителе типа «Турбула». Исследование было сосредоточено на определении минимального времени смешивания, необходимого для достижения композиционной однородности, достаточной для дальнейшего успешного применения в технологии СЛС порошковых смесей с большой разницей в плотностях исходных элементов.

Материалы и методика

В экспериментах использовали порошки алюминия (АСД-1), олова (ПО-1) и свинца (ПС-1). Их рас-

сев проводили через сита с верхней границей размеров ячейки 50 мкм и нижней – 25 мкм.

Анализ ряда снимков, полученных методом рентгеноэлектронной микроскопии (РЭМ), показал, что средний размер частиц всех исследуемых порошков составляет 30 мкм (рис. 1) и их распределение по размеру близко к нормальному. Частицы порошка алюминия имели сферическую форму, а олова – как сферическую, так и гантелевидную формы.

Дополнительно проводился анализ текучести порошков через воронки с выходными диаметрами 2,5 мм (олово, свинец) и 5 мм (алюминий) по ГОСТ 20899–98 (ISO 4490–78). Измерение естественного угла откоса показало, что его значение для всех трех порошков приблизительно одинаково

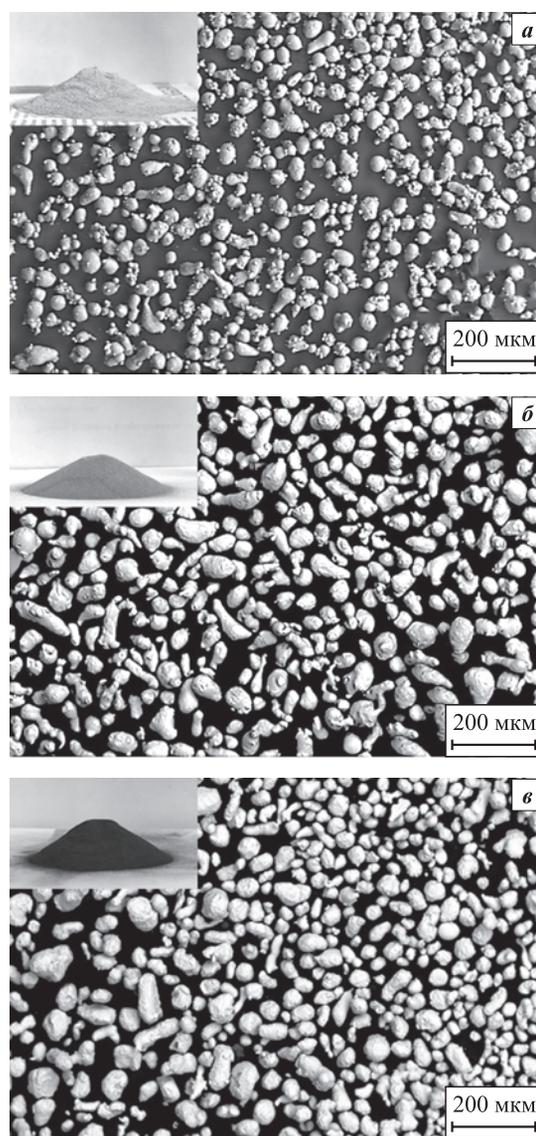


Рис. 1. РЭМ-изображения порошков Al (а), Sn (б) и Pb (в) перед смешиванием в смесителе типа «Турбула»

Fig. 1. SEM images of Al (a), Sn (б), and Pb (в) powders before mixing in a *Turbula* mixer

и равно 30°. Для порошков олова и свинца текучесть не превышала 20 с / 50 г, а алюминия – 26 с / 50 г, что указывают на их применимость для технологии СЛС.

Моделирование перемешивания проводилось методом дискретных элементов (МДЭ) с использованием программного пакета Altair EDEM (Altair Engineering, США). Взаимодействие между частицами и частицей/стенкой описывалось моделью Герца–Миндлина, модифицированной с учетом теории Джонсона–Кендалла–Робертса (JKR) [14; 15]. Данная модель контактного взаимодействия наиболее часто используется при моделировании перемешивания порошковых материалов с учетом сил адгезии [16–21]. Для ускорения времени вычислений в работе применялось масштабирование модели, поэтому размеры контейнера и масса порошка были уменьшены в 3 раза.

Физические параметры порошков, заложенные в модель, представлены в табл. 1 и 2. Значения коэффициентов трения и релаксации были усредненными по данным из различных источников [22–26]. Также для пар трения с Sn и Pb коэффициенты трения были взяты у близких по свойствам подшипниковых сталей.

Для изучения изменения содержания порошков олова и свинца во время перемешивания объем контейнера был условно разделен на 28 ячеек, в которых оценивалась доля частиц каждого металла по формуле N_{ij}/V_{ij} , где N_{ij} – число частиц Sn и Pb, V_{ij} – объем ячейки, а i и j – индексы ячейки по осям X и Y соответственно (рис. 2).

В смесителе типа «Турбула» перемешивание порошковой смеси проводили при скорости вращения контейнера 30 об./мин. Продолжительность воздействия варьировалась в пределах $\tau = 10 \div 240$ мин. Из полученных смесей с помощью прессования изго-

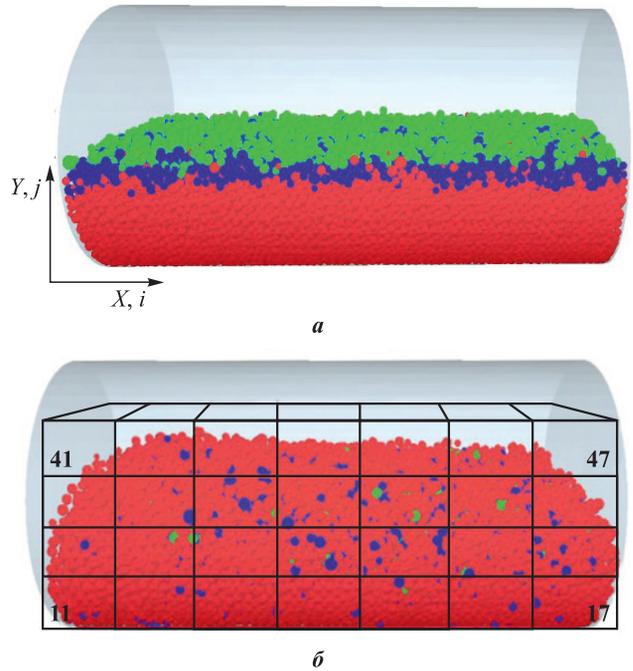


Рис. 2. Модель контейнера с порошками в начале (а) и после 3 ч перемешивания (б)

Первая цифра на рисунке б соответствует индексу i , вторая – j

Al выделен красным цветом, Sn – синим, Pb – зеленым

Fig. 2. Container model with powders at the beginning (a) and after 3 h of mixing (b)

The first digit in Figure б corresponds to the i index, and the second to j index

Al is highlighted in red, Sn in blue, and Pb in green

тавливали по 10 компактов, порошок для которых брали из разных частей контейнера.

Первичный анализ содержания исходных компонентов порошковой смеси проводили методом рентгенофазового анализа с использованием диффрак-

Таблица 1. Физические параметры порошков, заложенные в моделирование

Table 1. Physical parameters of powders used in the simulation

Порошок	Диаметр частиц, м	Плотность частиц, кг/м ³	Коэффициент Пуассона	Модуль сдвига, Па · 10 ⁹	Масса частиц, кг	Количество частиц, шт.
Al	0,001 ± 0,0003	2700	0,33	26,30	0,283	22 391
Sn	0,001 ± 0,0003	7300	0,44	12,15	0,074	4203
Pb	0,001 ± 0,0003	11 300	0,43	4,90	0,143	1418

Таблица 2. Коэффициенты трения и релаксации моделируемых порошков

Table 2. Friction and restitution coefficients of the simulated powders

Показатель	Пара трения								
	Al–Al	Sn–Sn	Pb–Pb	Al–Sn	Al–Pb	Sn–Pb	Al–сталь	Sn–сталь	Pb–сталь
Коэффициент трения покоя	1,1	0,74	0,9	0,5	0,5	1,4	0,50	0,40	0,30
Коэффициент трения качения	0,3	0,20	0,2	0,2	0,2	0,5	0,05	0,05	0,05
Коэффициент релаксации	0,6	0,50	0,4	0,5	0,5	0,5	0,60	0,60	0,60

тометра ДРОН-8 (НПП «Буревестник», Россия) в CuK_α -излучении ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) в диапазоне углов $2\theta = 10 \div 110^\circ$.

Для металлографических исследований использовали поперечные срезы компактов по диаметру образцов. Исследование структуры полученных компактов, а также анализ содержания исходных элементов проводили с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (Carl Zeiss, Германия), оснащенного приставкой для проведения микроанализа рентгеновского спектра (EDS). Графический анализ РЭМ-изображений поперечных срезов компактов осуществляли с использованием программы ImageJ (National Institutes of Health, США).

Результаты и их обсуждение

Моделирование

Результаты моделирования количества частиц олова и свинца в различных областях контейнера в течение 3 ч перемешивания, аппроксимированные логарифмическими зависимостями, представлены на рис. 3. Установлено, что при длительности перемешивания (τ) до 30 мин основная доля частиц как свинца, так и олова находится преимущественно в верхних слоях порошковой смеси, несмотря на сложную схему движения контейнера в ходе процесса. Это может быть связано с образованием временных агломератов Sn- и Pb-частиц, поскольку данные порошки обладают повышенной склонностью к адгезии из-за более низкой твердости и высокой пластичности по сравнению с алюминием и формируют более устойчивые контакты. С увеличением τ до 60 мин зависимости содержания Sn- и Pb-частиц

в различных ячейках сближаются в интервале значений 4–6 % и практически сходятся при $t = 180$ мин.

На основе этих результатов можно предположить, что для получения близкой к гомогенной смеси состава Al–15Sn–5Pb минимальным временем перемешивания в смесителе «Турбула» является 60 мин при скорости вращения контейнера с порошком 30 об./мин.

Эксперимент

Типичная дифрактограмма компакта смеси состава Al–15Sn–5Pb и зависимость содержания элементов мягкой фазы (Sn + Pb) от времени перемешивания, рассчитанная методом корундовых чисел, представлены на рис. 4. Видно, что при малом времени перемешивания имеет место меньшее содержание мягкой фазы (15 об. %), при этом наблюдается большое отклонение в его значениях (6 %) (рис. 4, б). Эти данные частично подтверждают результаты, полученные в ходе моделирования, о наличии агломератов частиц мягкой фазы. Выход зависимости на планируемые значения содержания олова со свинцом в смеси наблюдается после 60 мин перемешивания, что указывает на достоверность используемой численной модели. В интервале времени 120–180 мин зависимость приобретает линейный характер, и значения содержания элементов мягкой фазы изменяются не более 2 %.

Результаты РЭМ-исследований, представленные на рис. 5, показали, что при малом времени перемешивания ($\tau = 10 \div 60$ мин) наблюдается неравномерное распределение частиц мягкой фазы с крупными агломератами различной формы, имеющими линейные размеры до 300 мкм. Применение таких порошковых смесей в СЛС приведет к негативному результату

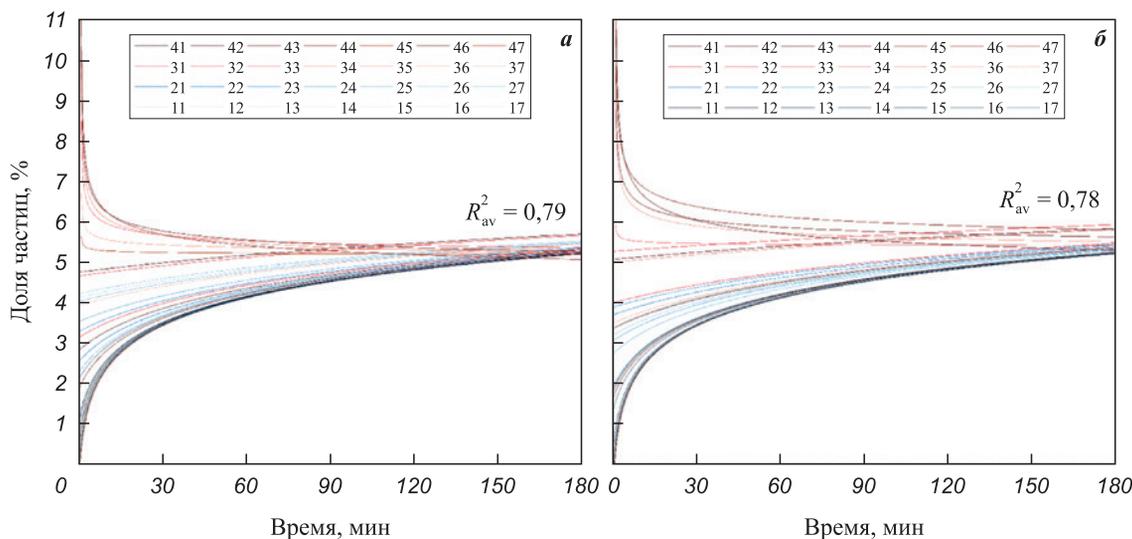


Рис. 3. Зависимости содержания частиц Sn (а) и Pb (б) в ячейках (11–47) контейнера от времени перемешивания

Fig. 3. Dependences of the content of Sn (a) and Pb (b) particles in the cells (11–47) of the container on the mixing time

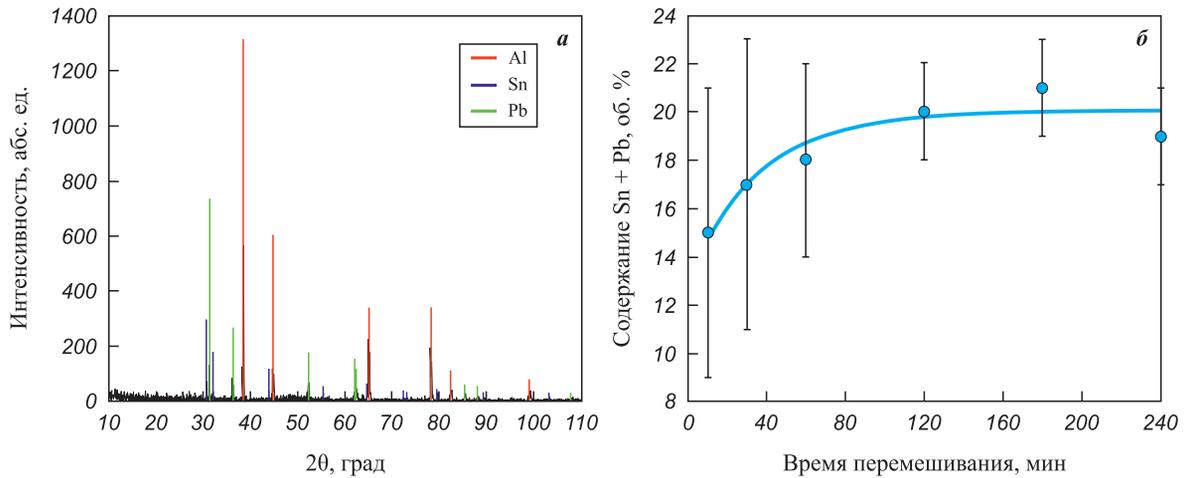


Рис. 4. Типичная дифрактограмма смеси состава Al–15Sn–5Pb (а) и зависимость содержания мягкой фазы Sn + Pb от времени перемешивания (б)

Fig. 4. Typical diffractogram of the Al–15Sn–5Pb mixture (a) and dependence of the soft-phase (Sn + Pb) content on the mixing time (b)

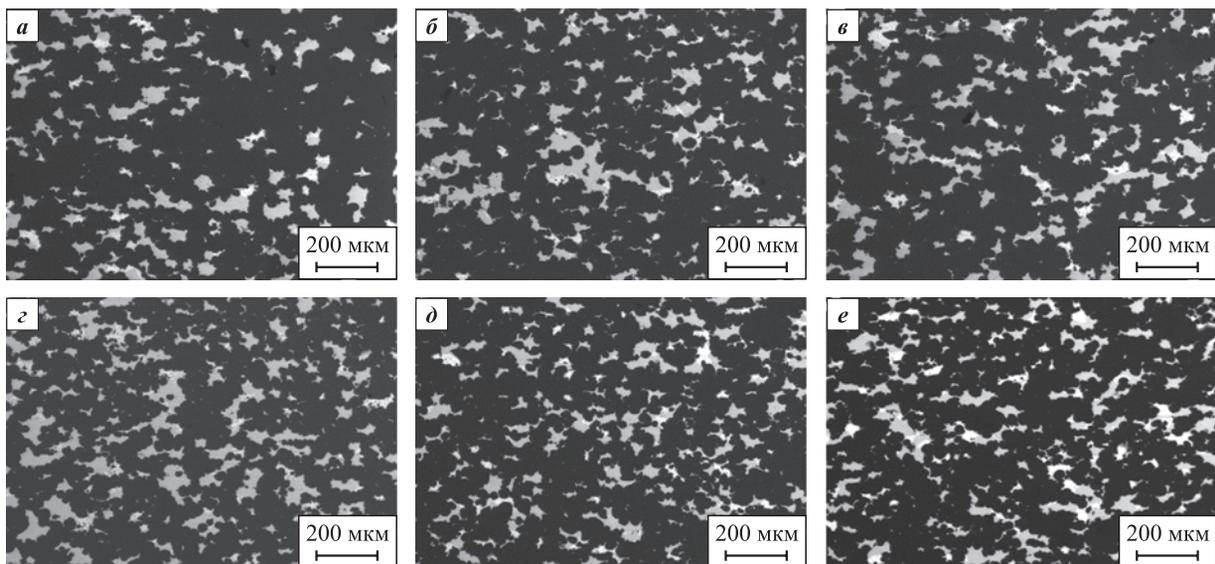


Рис. 5. Типичные РЭМ-снимки поперечных сечений исследуемых компактов из порошковых смесей, полученных после перемешивания в течение 10 (а), 30 (б), 60 (в), 120 (г), 180 (д) и 240 мин (е)

Темная фаза – Al, светлые – Sn и Pb

Fig. 5. Typical SEM images of cross-sections of powder compacts obtained from mixtures after 10 (a), 30 (b), 60 (c), 120 (d), 180 (e), and 240 min (f) of mixing

Dark phase – Al, bright phases – Sn and Pb

в виде крупных дефектов, сформированных вследствие локальных неоднородностей распределения исходных порошков. При $\tau = 120\div 240$ мин происходит более равномерное распределение олова и свинца по поверхности шлифа, а также уменьшаются размеры агломератов мягкой фазы. Полностью от последних избавиться невозможно из-за склонности данных порошков к слипанию. Однако такие порошковые смеси можно считать пригодными для технологии СЛС.

Результаты EDS-анализа элементного состава компактов представлены в табл. 3. Согласно их данным даже при малом времени перемешивания смеси имеет место близкое к требуемому содержание олова и свинца, но из-за неравномерности их распределения в объеме порошка наблюдается значительное отклонение от среднего значения их содержания в различных частях исследуемых компактов. После 60 мин перемешивания происходит примерно двукратное его уменьшение, что указывает на начало

Таблица 3. Содержание элементов в компактах из порошковых смесей в зависимости от времени перемешивания

Table 3. Elemental content in powder compacts depending on mixing time

τ, мин	Содержание, об. %		
	Al	Sn	Pb
10	81 ± 8	15 ± 8	4 ± 3
30	80 ± 5	15 ± 6	5 ± 3
60	80 ± 4	15 ± 4	5 ± 2
120	80 ± 2	16 ± 2	4 ± 1
180	80 ± 2	16 ± 2	4 ± 1
240	80 ± 2	16 ± 2	4 ± 1

разрушения крупных агломератов. Перемешивание в течение 120 мин и более приводит к уменьшению значения отклонения от среднего содержания исходных элементов в различных частях компактов по объему до ≈2 %, что может свидетельствовать об их достаточно однородном распределении.

Помимо метода EDS для анализа количества и размеров агломератов элементов мягкой фазы (Sn + Pb) был проведен графический анализ РЭМ-снимков с помощью программного обеспечения ImageJ (рис. 6). Доля свинца и олова оценивалась по занимаемой этими частицами площади. Для анализа было использовано по 10 снимков с каждого компакта, полученных для каждого значения τ.

Установлено, что содержание олова и свинца имеет близкий к линейному характер зависимости. Однако при малом времени перемешивания, как и в случае результатов, полученных методом EDS, наблюдается большое относительное отклонение распределения частиц по объему (± 6 %), уменьшающееся до 1 % с увеличением τ. Несмотря на то, что относительное отклонение снижается уже при τ = 60 мин, необходимо учитывать размер агломератов, образованных порошками олова и свинца. Характер изменения площади анализируемых агломератов имеет вид линейного нисходящего тренда. С увеличением длительности перемешивания площадь агломератов уменьшается примерно на 35 %: с 1400 до 900 мкм² при τ = 10 и 240 мин соответственно. При этом значение отклонения также снижается с 16 до 10 %, но остается относительно высоким. Последнее, вероятно, связано с образованием во внутреннем объеме порошковой смеси агломератов, которые, не контактируя со стенками контейнера, были более устойчивыми к разрушению при перемешивании.

Полученные результаты указывают не только на улучшение качества перемешивания смеси через относительно небольшой промежуток времени (τ = 60÷120 мин), но и на эффективность примене-

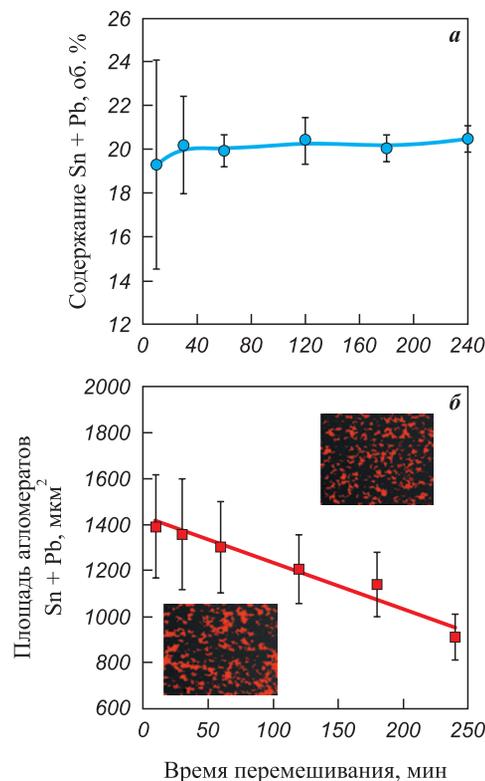


Рис. 6. Зависимости содержания (а) и размеров агломератов (б) мягкой фазы (Sn + Pb) от времени перемешивания в смесителе «Турбула»

Fig. 6. Dependences of the content (a) and agglomerate size (b) of the soft phase (Sn + Pb) on the mixing time in the *Turbula* mixer

ния модифицированной модели Герца–Миндлина для моделирования этого процесса для порошковых смесей, в которых плотности исходных компонентов имеют значительные отличия.

Выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Сложный характер движения смесителя типа «Турбула» обеспечивает эффективное перемешивание порошков системы Al-15Sn-5Pb, снижая влияние гравитационной сегрегации и улучшая равномерность распределения частиц мягкой фазы (Sn + Pb), что позволяет в дальнейшем использовать ее для получения изделий по технологии СЛС.

2. Метод дискретных элементов с модифицированной моделью Герца–Миндлина показал ее высокую достоверность в предсказании эволюции однородности порошковых смесей, что подтвердилось экспериментальными данными.

3. Установлено, что уменьшение размеров агломератов мягкой фазы (Sn + Pb) и снижение отклонений в распределении компонентов происходят при вре-

мени смешивания от 60 до 120 мин, что позволяет рекомендовать данный интервал для практического применения.

4. Полученные результаты могут быть использованы для повышения качества подготовки порошков для аддитивных технологий, а также для разработки новых порошковых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Список литературы / References

- Ralls A., Merbin J., Noud J., Lopez J., LeSourd Kasey, Napier I., Hallas N., Menezes P. Tribological, corrosion, and mechanical properties of selective laser melted steel. *Metals*. 2022;12(10):1732. <https://doi.org/10.3390/met12101732>
- Yang G., Zhang J., Xie H., Li F., Huang Z., Yuan G., Zhang J., Jia Q., Zhang H., Yeprem H.A., Zhang S. Preparation of B₄C_p/Al composites via selective laser melting and their tribological properties. *Materials*. 2022;15:8340. <https://doi.org/10.3390/ma15238340>
- Rusin N.M., Akimov K.O., Skorentsev A.L., Dmitriev A.I. Influence of laser power during laser powder bed fusion on the structure and properties of Al–40Sn alloy prepared from a mixture of elemental powders. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025;1013:178647. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178648>
- Mukherjee T., DebRoy T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Applied Materials Today*. 2019;14:59–65. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.003>
- Han Tianyi, Chen Jiaying, Wei Zongfan, Qu Nan, Liu Y., Yand D., Zhao S., Lai Z., Jiang M., Zhu J. Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of AlCrFe₂Ni₂ medium entropy alloy fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;25:4063–4073. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.241>
- Wang Z., Ummethala R., Singh N., Tang S., Suryanarayana C., Eckert J., Prashanth K.G. Selective laser melting of aluminum and its alloys. *Materials*. 2020;13:4564. <https://doi.org/10.3390/ma13204564>
- Rusin N.M., Skorentsev A.L., Akimov K.O. Mechanical properties of sintered Al–Sn–Fe alloys. *Physical Mesomechanics*. 2024;27(1):69–78. <https://doi.org/10.1134/S1029959924010077>
- Confalonieri C., Gariboldi E. Al–Sn miscibility gap alloy produced by power bed laser melting for application as phase change material. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;881:160569. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160596>
- Rusin N.M., Skorentsev A.L., Akimov K.O. Al–40Sn alloy produced by selective laser melting of elemental powder mixtures. *Physics of Metals and Metallography*. 2023;124(9):908–915. <https://doi.org/10.1134/S0031918X23601476>
- Guo Z., Jie J., Liu S., Yue S., Zhang Y., Li T. Solidification characteristics and segregation behavior of Cu–15Ni–8Sn alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020;51:1229–1241. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05609-y>
- Shi G., Zhang R., Cao Y., Yang G. A review of the vaporization behavior of some metal elements in the LPBF process. *Micromachines*. 2024;15:846. <https://doi.org/10.3390/mi15070846>
- Hogg R. Mixing and segregation in powders: Evaluation, mechanisms and processes. *KONA Powder and Particle Journal*. 2009;27:3–17. <https://doi.org/10.14356/kona.2009005>
- Vock S., Klöden B., Kirchner A., Weißgärber T., Kieback B. Powders for powder bed fusion: A review. *Progress in Additive Manufacturing*. 2019;4:383–397. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>
- Hertz H. On the contact of elastic solids. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*. 1882;92:156–171.
- Johnson K.L., Kendall K., Roberts A. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society A*. 1971;324:301–313.
- Li J., Peng F., Li H., Ru Z., Fu J., Zhu W. Material evaluation and dynamic powder deposition modeling of PEEK/CF composite for laser powder bed fusion process. *Polymers*. 2023;15:2863. <https://doi.org/10.3390/polym15132863>
- Yan W., Qian Y., Ge W., Lin S., Liu W.K., Lin F., Wagner G.J. Meso-scale modeling of multiple-layer fabrication process in selective electron beam melting. *Materials and Design*. 2018;14:210–219. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.12.031>
- Yeom S.B., Ha E.-S., Kim M.-S., Jeong S.H., Hwang S.-J., Choi D.H. Application of the discrete element method for manufacturing process simulation in the pharmaceutical industry. *Pharmaceutics*. 2019;11:414. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11080414>
- Horabik J., Molenda M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosystems Engineering*. 2016;147:206–225. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>
- Pantaleev S., Yordanova S., Janda A., Marigo M., Jin Y.O. An experimentally validated DEM study of powder mixing in a paddle blade mixer. *Powder Technology*. 2017;311:287–302. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.053>
- Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. Developing mechanistic understanding of granular behaviour in complex moving geometry using the discrete element method. Part B. Investigation of flow and mixing in the Turbula® mixer. *Powder Technology*. 2011;212(1):1724. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.04.009>
- Totten G.E. *ASM Handbook*. Vol. 18. Friction, lubrication, and wear technology. Ohio: ASM International, 2017. 1091 p.
- Bajpai A., Saxena P., Kunze K. Tribo-mechanical characterization of carbon fiber-reinforced cyanate ester resins modified with fillers. *Polymers*. 2020;12:1725. <https://doi.org/10.3390/polym12081725>
- Bowden F.P., Tabor D. *The friction and lubrication of solids*. Oxford: University Press, 2001. 424 p.
- Анурьев В.И. *Справочник конструктора-машиностроителя*. Т. 1. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.
- Blanter M.S., Golovin I. S., Neuhäuser H., Sinning H.-R. *Internal friction in metallic materials: A Handbook*. Berlin: Springer, 2007. 520 p.

Сведения об авторах



Information about the Authors

Кирилл Олегович Акимов – к.т.н., науч. сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

 **ORCID:** 0000-0002-3204-250X

 **E-mail:** akimov_ko@ispms.ru

Александр Леонидович Скоренцев – к.т.н., науч. сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов, ИФПМ СО РАН; инженер отделения экспериментальной физики инженерной школы ядерных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ)

 **ORCID:** 0000-0003-2506-9437

 **E-mail:** skoralexan@ispms.ru

Николай Мартемьянович Русин – к.т.н., ст. науч. сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов, ИФПМ СО РАН

 **ORCID:** 0000-0002-7537-7895

 **E-mail:** rusinnm@ispms.ru

Вадим Евгеньевич Лихарев – инженер лаборатории физики консолидации порошковых материалов, ИФПМ СО РАН; студент инженерной школы новых производственных материалов, ТПУ

 **ORCID:** 0009-0002-4713-3663

 **E-mail:** vel6@tpu.ru

Антон Юрьевич Никонов – к.ф.-м.н., науч. сотрудник лаборатории компьютерного конструирования материалов, ИФПМ СО РАН; доцент кафедры физики металлов физического факультета, Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ)

 **ORCID:** 0000-0002-0980-0317

 **E-mail:** anickonoff@ispms.ru

Андрей Иванович Дмитриев – д.ф.-м.н., гл. науч. сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов, ИФПМ СО РАН; профессор кафедры физики металлов физического факультета, ТГУ

 **ORCID:** 0000-0002-2823-578X

 **E-mail:** dmitr@ispms.ru

Kirill O. Akimov – Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Powder Materials Consolidation Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS)

 **ORCID:** 0000-0002-3204-250X

 **E-mail:** akimov_ko@ispms.ru

Alexander L. Skorentsev – Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Powder Materials Consolidation Physics, ISPMS SB RAS; Engineer of the Department of Experimental Physics, School of Nuclear Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (TPU)

 **ORCID:** 0000-0003-2506-9437

 **E-mail:** skoralexan@ispms.ru

Nikolay M. Rusin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of the Laboratory of Powder Materials Consolidation Physics, ISPMS SB RAS

 **ORCID:** 0000-0002-7537-7895

 **E-mail:** rusinnm@ispms.ru

Vadim E. Likharev – Engineer of the Laboratory of Powder Materials Consolidation Physics, ISPMS SB RAS; Student of the engineering school of new production materials, TPU

 **ORCID:** 0009-0002-4713-3663

 **E-mail:** vel6@tpu.ru

Anton Yu. Nikonov – Cand. Sci. (Phys.Math.), Research Associate of the Laboratory of Computer-Aided Design of Materials, ISPMS SB RAS; Associate Professor of the Department of Physics of Metals, Faculty of Physics, National Research Tomsk State University (TSU)

 **ORCID:** 0000-0002-0980-0317

 **E-mail:** anickonoff@ispms.ru

Andrey I. Dmitriev – Dr. Sci. (Phys.Math.), Principal Researcher of the Laboratory of Powder Materials Consolidation Physics, ISPMS SB RAS; Professor of the Department of Physics of Metals, Faculty of Physics, TSU

 **ORCID:** 0000-0002-2823-578X

 **E-mail:** dmitr@ispms.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

К. О. Акимов – постановка задачи, анализ результатов с использованием РЭМ, моделирование, написание статьи.

А. Л. Скоренцев – подготовка образцов для РЭМ, обсуждение результатов.

Н. М. Русин – рентгенофазовый анализ, обсуждение результатов.

В. Е. Лихарев – подготовка порошковых смесей.

А. Ю. Никонов – постановка задачи моделирования, обсуждение результатов.

А. И. Дмитриев – общее руководство работой, анализ результатов моделирования, обсуждение результатов, редактирование рукописи.

K. O. Akimov – formulation of the research problem, analysis of results using SEM, modeling, manuscript preparation.

A. L. Skorentsev – preparation of samples for SEM, discussion of results.

N. M. Rusin – X-ray phase analysis, discussion of results.

V. E. Likharev – preparation of the powder mixtures.

A. Yu. Nikonov – formulation of the simulation problem, discussion of the results.

A. I. Dmitriev – overall supervision of the study, analysis of simulation results, discussion of results, manuscript editing.

Статья поступила 23.01.2025 г.

Доработана 12.03.2025 г.

Принята к публикации 13.03.2025 г.

Received 23.01.2025

Revised 12.03.2025

Accepted 13.03.2025