

УДК 621.762.2

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ МОНОАЛЮМИНИДА НИКЕЛЯ NiAl В ОТЕЧЕСТВЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Сенцова К.А., студентка гр. М6О-215БВ-23, II курс
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)"
г. Москва

Введение. Активное развитие металлургии гранул металлических материалов в настоящее время – это, по сути дела, вынужденная мера. Современные конструкторы требуют от технологов создания и внедрения в эксплуатацию принципиально новых материалов, обладающих уникальными эксплуатационными свойствами. Постоянно возрастающие требования конструкторов к эксплуатационным свойствам материалов, из которых изготавливают детали современных летательных аппаратов и их двигателей, заставляют технологов и металлургов создавать новые материалы или улучшать свойства существующих. В отечественном авиа- и двигателестроении активно внедряются композиционные материалы, созданные как на основе металлической матрицы, так и на основе углепластика, активно внедряются элементы силового каркаса летательных аппаратов из гранулированных материалов. Если в качестве новых материалов с уникальными эксплуатационными характеристиками можно использовать металлические композиционные материалы, стеклопластики, неметаллические материалы, то для изготовления деталей авиационных двигателей, работающих при высоких температурах и высоких динамических нагрузках возможно применение только металлических материалов с высокими механическими характеристиками. Проблема состоит в том, что создание новых материалов легированием практически исчерпало себя. Повышение механических свойств металлических материалов на современном этапе возможно только методами порошковой металлургии или металлургии гранул.

Исследование современного состояния вопроса. Одним из прогрессивных материалов для нужд двигателестроения является моноалюминид никеля NiAl, который характеризуется уникальными прочностными и теплофизическими свойствами при минимальной плотности материала. Алюминид никеля NiAl обладает исключительными для жаропрочных материалов эксплуатационными характеристиками. При его невысокой плотности его прочностные характеристики практически соизмеримы с прочностными характеристиками классических никелевых сплавов. Кроме того, алюминиды никеля характеризуются высокой жаропрочностью и жаростойкостью. Эти уникальные характеристики делают алюминиды никеля крайне перспективными для

их использования в качестве материалов или элементов основ композиционных материалов для изготовления деталей современных авиационных двигателей. Однако алюминиды никеля, и, в частности моноалюминид никеля NiAl имеют существенные недостатки – они практически не обрабатываются резанием. Следовательно, единственной технологией для изготовления деталей из моноалюминида никеля является методы металлургии гранул, когда на последнем этапе из порошков или гранул процессами спекания и пластической деформации формируют практические готовое изделие, не требующее какой либо существенной дополнительно механической обработки [1, 2].

По диаграмме состояния Ni-Al видно, что всего возможно получение пяти видов алюминида никеля (NiAl_3 , Ni_2Al_3 , NiAl (β -фаза), Ni_5Al_3 , Ni_3Al (γ' -фаза)). Однако фазы NiAl_3 , Ni_2Al_3 , Ni_5Al_3 имеют низкую температуру разупорядочивания. Поэтому явный практический интерес в качестве высокотемпературных материалов представляют только фазы NiAl и Ni_3Al [3]. В настоящее время наиболее широко изученным является интерметаллид Ni_3Al , который широко применяется при изготовлении различных деталей современных авиационных двигателей, в том числе с применением технологий гранульной металлургии [2, 3]. Однако моноалюминид никеля NiAl является более перспективным материалом. Его плотность на 30% меньше, чем плотность интерметаллида Ni_3Al (для сравнения плотность интерметаллида NiAl составляет 5,86 г/см³, а плотность интерметаллида Ni_3Al – 7,16 г/см³). Кроме того, согласно диаграмме состояния системы Ni-Al, интерметаллидные соединения моноалюминида никеля NiAl являются самой высокотемпературной фазой в рассматриваемой системе [2, 4]. На основе изучения и анализа состояния отраслей отечественной промышленности можно предложить несколько перспективных направления применения гранулированных материалов моноалюминида никеля. К ним можно отнести авиационную промышленность и создание изделий космической техники, автомобильную промышленность и энергетический сектор экономики (рис. 1). Легкость изделий и конструкций из моноалюминида никеля, прочность данного материала и устойчивость его к крайне высоким температурам позволяют говорить о существенных перспективах применения данного материала в авиастроении вообще и в авиационном двигателестроении в частности [5, 6]. Сочетание таких уникальных свойств, в перспективе, позволит снизить вес многих деталей самолетов, их двигательных установок и, в результате, повысить эффективную грузоподъемность летательных аппаратов. Потенциал предлагаемого материала, такой как повышенная износостойкость, стойкость к окислению, термическая стабильность делает моноалюминид никеля NiAl крайне эффективным в областях производства автомобильных двигателей и изделий, используемых в энергетической промышленности. В частности, применение данного материала позволит улучшить характеристики компонентов, используемых в энергетическом оборудовании, применяемого как в области генерации и аккумулирования электрической энергии, так и в области ее передачи конечным потребителям.



Рисунок 1 – Перспективы применения гранулированных материалов моноалюминида никеля NiAl в отечественной промышленности

Однако, наряду с перспективами использования моноалюминида никеля в промышленности существуют и определенные проблемы, ограничивающие его применение (рис. 2). В первую очередь это высокая стоимость изготовления гранул из моноалюминида никеля. Существует ряд технологий получения гранул или, более технически верно, сферических частиц порошка диаметром до 500 мкм [7, 8]. Данная технология включает в себя высокотемпературный самораспространяющийся синтез материала, последующий многократный переплав с целью выравнивания структуры материала, последующий расплав моноалюминида никеля и его диспергирование газовой атомизацией или диспергирование методом вращающегося оплавляемого электрода [9].

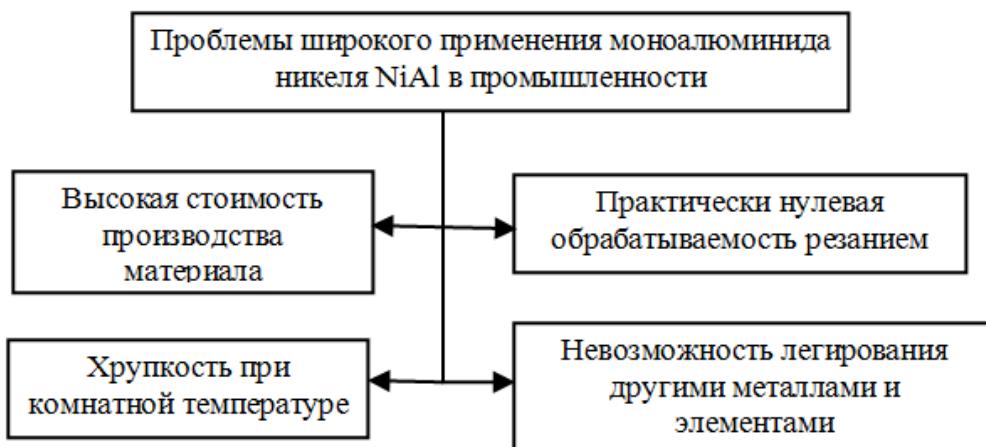


Рисунок 2 – Проблемы применения моноалюминида никеля NiAl в промышленности

Данная технология довольно сложная и дорогостоящая. Затраты на производство изделий из гранул моноалюминида никеля не окупаются даль-

нейшими преимуществами его использования, особенно в отраслях с низким уровнем рентабельности [10, 11].

Необходимо отметить тот факт, что гранулы алюминида никеля сами по себе никому не нужны. Они, по сути дела, являются промежуточным полуфабрикатом, сырьем для производства деталей с заданной формой и размерами. В настоящее время хорошо изучена только одна технология, которая позволяет консолидировать гранулы моноалюминида никеля в готовое изделие с компактной структурой. Это технология лазерного спекания, которая по сути дела является модификацией производств на основе аддитивных технологий [12, 13]. Другие технологии консолидации гранул, такие как брикетирование и последующее горячее экструдирование, технология спекания, технология горячего изостатического прессования (ГИП) для консолидации порошков моноалюминида никеля пока не изучены. Этому препятствует и хрупкость материала при комнатной температуре. Известно, что NiAl проявляет хрупкость при атмосферных условиях, что создает трудности в процессах механической обработки или формовки [14, 15].

Также проблемой для использования моноалюминида никеля является и его ограниченные возможности легирования. В частности, невозможность легирования NiAl другими металлами или элементами может ограничить его свойства и применения по сравнению с традиционными сплавами [14].

Таким образом, установлено, что основной проблемой, ограничивающей использование моноалюминида никеля в отечественной промышленности является не проблема получения гранул или качественных сферических частиц порошка. Основной является проблема разработки технологий для консолидации гранул, проблема формирования изделий и готовых деталей с компактной структурой, с заданными формой и размерами.

Методика проведения исследований. Процесс получения исходного слитка моноалюминида никеля реализовывался по классической технологии высокотемпературного самораспространяющегося синтеза, подробно рассмотренного в [5, 7]. Химический состав исследуемых гранулируемых сплавов системы NiAl-Cr-Co-Hf-B сплавов варьировался в диапазонах содержания химических элементов в следующих границах: Al – 40,0-50,0 ат. %; Ni – 42,0-52,0 ат. %; Co – 4,0-6,0 ат. %; Cr – 4,0-6,0 ат. %. Далее слиток подвергался трехразовому вакуумному индукционному переплаву для выравнивания химического состава материала по объему слитка. Получение собственно гранул моноалюминида никеля проводилось методом разбрызгивания вращающегося оплавляемого электрода (методом PREP). На рис. 3 представлена принципиальная схема получения порошка моноалюминида никеля NiAl методом PREP [7]. Важно отметить, что скорость вращения оплавляемого электрода составляла 14000-15000 об./мин., что было необходимо для получения качественного сферического порошка с минимальным количеством дефектов формы [5, 7]. В качестве охлаждающей жидкости использовалась техническая вода комнатной температуры, однако основная кристаллизация гранул, как было установлено в процессе экспериментов, проходила в воздушной среде

[5]. Для отсеивания особо крупных гранул, кристаллизованных с меньшей степенью скорости теплоотвода проводилась сепарация с помощью системы сит с различной величиной элементарной ячейки.

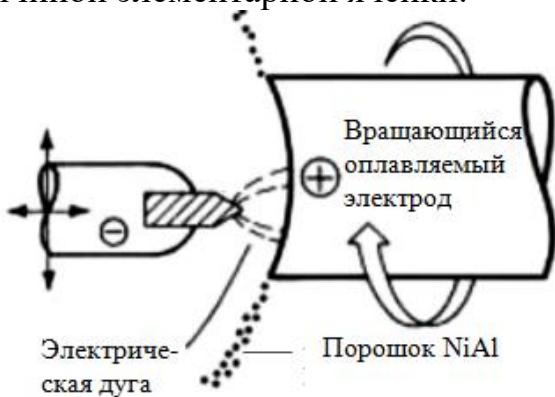


Рисунок 3 – Используемая схема получения гранул моноалюминида никеля методом PREP [7]

Отсев гранул с явными внешними дефектами формы проводился на основе результатов визуального контроля. На рис. 4 представлены гранулы с характерным дефектом в виде поры и налипшими на ее внутреннюю поверхность закристалзованными сателлитами.

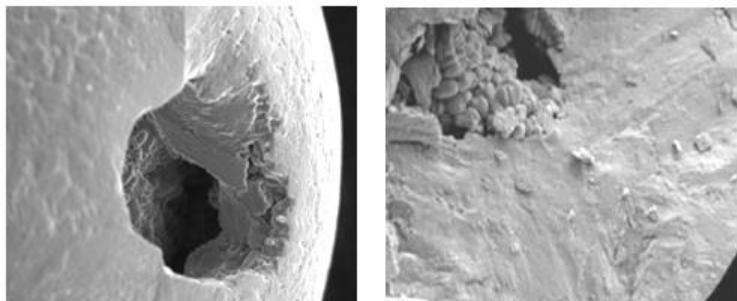


Рисунок 4 – Гранулы с характерным дефектом в виде поры и налипшими на ее внутреннюю поверхность закристалзованными сателлитами

Для консолидации частиц порошка использовалась специальная установка, работающая по принципу селективного электро-лучевого спекания.

Полученные результаты и их обсуждение. При проведении исследований было установлено, что наиболее оптимальными методами для получений готовой продукции или качественных сложнопрофицированных полуфабрикатов являются так называемые аддитивные технологии порошковой металлургии (рис. 5). Горячее изостатическое прессование, по сути дела, представляет собой процесс спекания гранул или частиц порошка материала под воздействием высокой температуры и внешнего газового изостатического давления в течении длительного временного интервала. Технологии прямого лазерного нанесения материала заключаются в том, что мощный лазерный луч оплавляет участок изделия, образуя локальную микроскопическую ванну

жидкого расплава, в которую струей инертного транспортирующего газа (чаще всего аргона) вдувается порция металлического порошка, т.е. подача материала и его плавление происходит практически одновременно [11]. Селективное электронно-лучевое сплавление представляет собой процесс изготовления деталей путем послойного избирательного сплавления металлического порошка мощным электронным лучом, траектория движения которого соответствует поперечному сечению изделия. Модификацией данного метода является селективное лазерное сплавление, представляющее собой технологический процесс производства изделия путем послойного сплавления металлического порошкового материала, гранулы которого связываются между собой путём их проплавления при помощи лазерного луча, движущегося в каждом слое по определённой траектории [11, 15].



Рисунок 5 – Перспективные методы получения сложнопрофилированных полуфабрикатов или готовых изделий из моноалюминида никеля NiAl

При проведении экспериментальных исследований из частиц порошка моноалюминида никеля NiAl диаметром $\sim 150\text{-}250$ мкм были получены опытные сложнопрофилированные образцы изделий, моделирующие рабочие детали внутреннего тракта современного газотурбинного двигателя. Температура нагрева под расплав составляла $\sim 1800\text{-}1900$ °C, температура расплавленной ванны составляла $\sim 1650\text{-}1680$ °C. Время расплава варьировалось в зависимости от энергетической мощности лазерного луча. Известно, что температура спекания порошков алюминида никеля составляет порядка 1000-1200 °C [11, 15]. Однако спекание подразумевает собой твердофазное соединение частиц порошка, без образования жидкой фазы, что может отрицательно сказываться на прочностных свойствах спекаемого материала. Установлено, что полученные изделия по форме и размерам соответствуют исходным моделям. Отклонения от номинальных размеров не превышают предельно допустимые. Из материала изделий изготавливались образцы и проводились их испытания на разрыв, твердость, теплопроводность, а также исследовалась микрострук-

тура материала. Определено высокое качество спекания. Усадочные поры, пустоты практически отсутствовали. Отклонение реальной теплопроводности материала от расчетной составляло ~2-5% что укладывается в рамки обычной статистической погрешности. Прочностные характеристики полученного материала изделий исследовались посредством испытаний на изгиб. Предел прочности материала из моноалюминида никеля составил ~ 1090-1100 МПа. Микротвёрдость материала из консолидированного порошка составляла ~3900-4100 МПа, что, в принципе, выше, чем у материала, полученного спеканием с образованием твердофазного соединения. Таким образом, можно считать технологию получения компактного материала разработанной.

Заключение. На основе полученных результатов всего комплекса проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Из-за своей низкой пластичности и невысокой жаропрочности при температурах эксплуатации порядка 800 °C и выше чистый моноалюминид никеля NiAl не может использоваться в качестве конструкционного материала для производства изделий горячего тракта современных авиационных двигателей или автомобильных двигателей внутреннего сгорания. Свойства поликристаллического моноалюминида никеля NiAl могут быть улучшены путем легирования. В качестве легирующих элементов целесообразно использовать Cr, Co, Hf, B.

2. В настоящее время имеется ряд технологий по получению качественных сферических гранул и порошков моноалюминида никеля NiAl в промышленных масштабах.

3. Для производства окончательных изделий из гранул алюминида никеля целесообразно использовать методы порошковой металлургии, позволяющие получать полуфабрикаты и готовые изделия, сложные по своему профилю.

4. Установлено, что перспективным методом для получения изделий из порошков моноалюминида никеля NiAl являются технологии их электроннолучевого спекания. Экспериментально определены особенности и оптимальные основные параметры технологии спекания гранул моноалюминида никеля NiAl с получением готовой продукции.

Список литературы:

1. Поварова К.Б., Дроздов А.А., Скачков О.А., Морозов А.Е. Физико-химические подходы к разработке сплавов на основе NiAl для высокотемпературной службы // Металлы. – 2011. – № 2. – с.48-62.
2. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Базылева О.А. Конструкционные жаропрочные материалы на основе соединения Ni₃Al для деталей горячего тракта ГТД // Технология легких сплавов. – 2007. – № 2. – с. 75-80.
3. Бунтушкин В.П., Базылева О.А., Буркина В.И. Высокотемпературные жаропрочные сплавы на основе интерметаллида Ni₃Al для деталей горячего тракта ГТД // Авиационная промышленность. – 2007. – с. 41-43.

4. Шевцова Л.И. Структура и механические свойства материалов на основе алюминида никеля, полученных по технологии искрового плазменного спекания порошковых смесей. Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГТУ, – 2015. – 198 с.
5. Жаров М. В. Анализ особенностей образования дефектов формы и структуры сферических порошков моноалюминида никеля NiAl при реализации технологий их промышленного производства // Технология металлов. – 2024. – № 5. – С. 21-32. doi: 10.31044/1684-2499-2024-0-5-21-32.
6. Bochenek K., Basista M. Advances in processing of NiAl intermetallic alloys and composites for high temperature aerospace applications // Progress in Aerospace Sciences. – 2015. – Vol. 79. – pp. 136-146.
7. Жаров М.В. Исследование особенностей технологий получения качественного гранулированного сырья алюминида никеля NiAl // Цветные металлы. – 2022. – № 11. – с. 50-56. doi: 10.17580/tsm.2022.11.05.
8. Поварова К.Б., Скачков О.А., Казанская Н.К., Дроздов А.А., Морозов А.Е., Макаревич О.Н. Порошковые сплавы NiAl. Получение порошков NiAl // Металлы. – 2011. – № 5. – с. 68-78.
9. Жаров М. В. Исследование закономерностей процесса охлаждения и кристаллизации капель расплава алюминиевых сплавов в водной среде // Прикладная механика и техническая физика. – 2023. – Т. 64. № 6 (382). – с. 4-16. doi: 10.15372/PMTF202315248.
10. Жаров М. В. Анализ особенностей процессов теплообмена при кристаллизации гранул алюминиевых сплавов в водной и водно-паровой среде // Материаловедение. 2023. № 8. С. 3-13. doi: 10.31044/1684-579X-2023-0-8-3-13.
11. Сентюрина Ж.А. Получение сферических порошков из сплавов на основе алюминида никеля NiAl для аддитивных технологий. Дис. ... канд. техн. наук. М. : МИСиС. – 2016. – 168 с.
12. Жаров М.В. Исследование свойств гранулированных материалов системы Al-Cu-Mg, прессуемых из гранул, полученных с применением технологии центрифугования при сверхвысоких скоростях охлаждения // Технология машиностроения. – 2021. – № 4 (№ 226). – с. 5-9. doi: 10.34641/TM.2021.226.4.011.
13. Xu G.H., Zhang K.F., Huang Z.Q. The synthesis and characterization of ultrafine grain NiAl intermetallic // Advanced Powder Technologies – 2012. – Vol. 23. – pp. 366–371
14. Жаров М.В. Построение математической модели процесса охлаждения и кристаллизации металлических капель при гранулировании центрифугированием расплава // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 2 (114). – с. 98-112. doi: 10.22349/1994-6716-2023-114-2-98-112.
15. Капланский Ю. Ю. Получение узкофракционных сферических порошков жаропрочных сплавов на основе алюминида никеля и их применение в технологии селективного лазерного сплавления. Дис. ... канд. техн. наук. М. : – МИСиС. – 2020. – 252 с.