

ОТЗЫВ

официального оппонента Прохорова Дмитрия Владимировича на диссертационную работу Санина Виталия Владимировича «Технологические принципы получения гетерофазных металлических сплавов, включающие самораспространяющийся высокотемпературный синтез и вакуумно-индукционный переплав», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 — Материаловедение (металлургия)

Актуальность работы. Развитие энергетической и машиностроительной отрасли требует создания новых конструкционных материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Композиционные материалы привлекают к себе большое внимание поскольку обладают уникальными физико-механическими свойствами. Основной отличительной особенностью таких материалов является технологичность, высокая прочность, коррозионная стойкость, электро- и теплопроводность, жаропрочность, износостойкость, низкая плотность, повышенная твердость и т.д.

Работа Санина В.В. посвящена разработке технологических принципов получения гетерофазных металлических сплавов различного состава путем совмещения СВС-Ц и технологий ВИП. Исследованию особенности структурообразования и его наследования в процессе ВИП. Немало важной частью работы является возможность практического применения полученных материалов и изготовления конечных изделий из сплавов полученных комбинацией технологий СВС-Ц+ВИП.

Анализ возможностей получения материалов методами вакуумной электрометаллургии и СВС-металлургии показывает перспективность разработки интегральных технологических схем, суммирующих все преимущества каждого из направлений. Совмещение СВС и технологий одностадийного вакуумно-индукционного переплава даст возможность

получать новые литые металлические материалы с пониженной себестоимостью, что открывает новые возможности для получения металлических материалов с новыми более функциональными свойствами.

Поэтому тема диссертационной работы Санина В.В. является актуальной и имеет важное значение для развития теории и практики конструкционных материалов полученных на основе технологических принципов получения гетерофазных металлических сплавов различного состава путем совмещения СВС и технологий ВИП. Исследования особенности структурообразования, изучения возможности практического применения полученных материалов и изготовления конечных изделий.

Для достижения поставленной цели были сформированы задачи разработать принципы и технологические режимы получения длинномерных литых прутковых заготовок (ЛПЗ) на модельной двухкомпонентной системе $\text{Cu}_{70}\text{Fe}_{30}$ с ограниченной растворимостью, включающие стадию синтеза сплава (СВС) и ВИП. Важной задачей являлась разработка и технологической последовательности операций и режимов получения ЛПЗ и длинномерных прутков малого диаметра (3 мм) из сплава ХТН-61 (СВС-Ц), включая синтез сплава методами центробежной СВС-металлургии и ВИП. Исследование влияние температурно-временных параметров на формирование структуры СВС-сплава при последующем переплаве и сравнительные испытания механических свойств материалов. Не менее важной задачей диссертационной работы являлась разработка технологических режимов интегральной технологической цепочки получения сферических микрогранул композиционного состава $\text{NiAl} - \text{Fe}$, включающие 3 основные стадии: (i) — синтез нового интерметаллидного сплава CompoNiAl (на основе NiAl) методом центробежной СВС-металлургии, (ii) — ВИП СВС-сплава с последующей разливкой в металлический кристаллизатор и получение слоевого электрода — стальная оболочка/ CompoNiAl (расходуемый электрод), (iii) — плазменное центробежное распыление (ПЦР) слоевого электрода и получение

микрогранул композиционного состава. Выявление оптимальных параметров синтеза и обработки исследуемых материалов на каждом этапе металлургического передела. Для сравнительных исследований структуры, свойств полученных материалов и обобщения полученных данных ставилась задача наработки опытной партии ЛПЗ и микрогранул композиционного состава по ранее отработанным параметрам.

Научная новизна работы определяется несколькими факторами. Прежде всего, это получение новых экспериментальных данных изученных закономерностей структурообразования и формования материалов и изделий на основе литых сплавов (Co, NiAl и Fe-Cu) в условиях последовательной обработки материалов СВС-Ц+ВИП и дальнейший передел.

Впервые экспериментально установлено, что при получении методом центробежной СВС-металлургии литого двухкомпонентного сплава Cu-Fe с ограниченной растворимостью формируется уникальная иерархическая микроструктура сплава с равномерным распределением структурных составляющих, которая сохраняется в результате оптимального подбора температурно-временных параметров ВИП. Показана, возможность организации явно выраженного структурного упорядочения дисперсных выделений Fe вдоль оси волочения образца.

Впервые проведены исследования влияния температурно-временных режимов одностадийного ВИП и анализ двухфазной области сплава ХТН-61-Ц (СВС-Ц), полученного методом СВС-металлургии. Показано, что сплав отличается стабильностью структуры и фазового состава вплоть до температуры плавления. Экспериментально выявлены режимы ВИП позволяющие снизить концентрацию содержания газовых примесей (кислорода и азота) более чем в три раза.

Экспериментально показано, что интегральная технологическая цепочка получения композиционных сферических микрогранул позволяет получить сырье для АТ, имеющих сферическую форму частиц с коэффициентом неравномерности 0,99%.

Это открывает перспективы создания нового класса функциональных конструкционных материалов, которые будут служить основой для изготовления промышленных функциональных изделий из металлических и интерметаллидных композитов с повышенными эксплуатационными характеристиками, и технологий их производства.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в демонстрации перспектив и апробации использования комбинированной технологии всех основных этапов технологической цепочки, включающей СВС-металлургию, ВИП и конечный передел продуктов для получения изделий, которые могут существенно расширить возможности применения СВС-продуктов и при этом существенно сократить количество времени обработки, циклов и, таким образом, снизить стоимость конечной продукции.

Представлены возможности изготовления слоевых расходных электродов по интегральной технологии для ПЦР и получения композитных микрогранул для АТ, состоящих из интерметаллидного сплава и материала кристаллизатора-оболочки, что может позволить получить металлические композиционные гранульные материалы для отечественных АТ.

Испытания, проведенные АО «Композит» композиционных микрогранул показали практическую ценность непосредственно полученного материала. Полученные в результате проведенной работы микрогранулы полностью удовлетворяют современным требованиям АТ производства и могут быть использованы для изготовления изделий сложной формы методами селективного электронно-лучевого сплавления и прямого лазерного нанесения материалов.

Практическая значимость диссертационной работы также подтверждается тем, что по ее результатам получен один патента на «Способ получения электродов из сплавов на основе алюминиды никеля» (патент РФ 2 644702 от 25.04.2017), две заявки на патент «Способ получения борсодержащих лигатур» (положительное решение №2017119227 (033350) от

02.06.2017) и «Способ получения заготовок из сплава на медной основе» (заявка №2017113513 (023632) от 19.04.2017) и Ноу-Хау «Технологический цикл изготовления литых шихтовых заготовок (ЛШЗ) из высоколегированных сплавов, включающий синтез литых полуфабрикатов методом СВС-металлургии и последующий переплав методами ВИП» (23.11.2015, №46-367-2015 ОИ).

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается применением современных физико-химических методов исследования, многообразием и количеством экспериментальных данных. Отдельно следует отметить подробный литературный обзор публикаций, касающийся базовых технологий производства высоколегированных сплавов, композиционных металлических материалов и обзор перспектив и современного состояния аддитивных технологий в России.

Общая характеристика работы

Диссертация содержит 222 страницы, 90 рисунков и 12 таблиц, 191 источников и состоит из введения, 5 глав и выводов.

Во введении приведена общая характеристика работы, дано обоснование актуальности выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, сформулирована научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В **первой главе** представлен аналитический обзор литературы, который состоит из 7 основных параграфов, в которых описаны базовые технологии производства высоколегированных сплавов и композиционных металлических материалов (ВИП, ИПХТ, ВДП, ЭЛТ, ЭШП и некоторые их комбинации), СВС-металлургия, технологии исследования металлических расплавов, освещено современное состояние в области жаропрочных сплавов, представлен обзор по композиционным сплавам на основе Cu и аддитивным технологиям как альтернативе металлургическим методам получения металлических изделий.

В заключении главы, на основании анализа литературных данных, обоснована постановка задачи исследования и обозначены методики, а именно экспериментально апробировать новые интегральные технологические схемы получения композиционных сплавов различного состава путем комбинации СВС-Ц и ВИП.

Во второй главе дано полное описание исходных материалов, методик получения, исследования и используемого оборудования.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты апробации новой технологической схемы получения литых материалов включающей стадии синтеза сплава методами СВС-металлургии и ВИП модельного сплава $\text{Cu} - 70 / \text{Fe} - 30$ (% масс.). Представлены исследования структуры приготовленных сплавов и влияния температурно-временных режимов ВИП. Обоснованно применение технологической комбинации СВС-Ц+ВИП.

В четвертой главе описана отработка технологической схемы получения высоколегированного жаропрочного сплава на Со-основе включая стадию центробежного СВС и последующего ВИП. Представлено исследование на высокотемпературном комплексе ВИК-ВМР и оптимизация температурно-временных режимов ВИП и их влияния на структуру сплава.

Пятая глава посвящена отработке интегральной технологической схемы получения композиционных сферических микрогранул (на примере сплав $\text{CoCrNiAl} / \text{Сталь}$) для аддитивных технологий включающая: (i) – синтез литого интерметаллидного сплава (СВС-Ц) (ii) – одностадийный рафинирующий вакуумноиндукционный переплав (ВИП) и последующая разливка высокотемпературного расплава в цилиндрическую стальную оболочку, (iii) – плазменно-центробежное распыление (ПЦР) отлитого электрода.

В выводах обобщены научные и практические результаты работы, даны рекомендации и описаны перспективные технологии получения материалов, включающих стадию синтеза сплава методами центробежной

СВС-металлургии и последующей ВИП, разработанные в рамках диссертации.

По диссертационной работе и автореферату Санина В.В. необходимо сделать следующие замечания:

1. На взгляд оппонента, неожиданно заканчивается третья глава, которая требует логического продолжения в виде аттестации, полученного в ходе выполненных экспериментов, материала, которая включала бы некоторые данные по измерению физических свойств, таких как электропроводность, плотность, удельное сопротивление и некоторые магнитные свойства материала (коэрцитивная сила, магнитная проницаемость и т.д.).
2. Судя по введению и методикам, волочение модельного $\text{Cu}_{70}/\text{Fe}_{30}$ сплава поводилось от 8 мм до 0,7 мм, тогда как, в исследовательской части главы упоминается лишь одиночные протягивания с обжатиями исходного слитка 69% и 92%. Не совсем ясно, это предельно возможная толщина протяжки получаемого материала?
3. Во введении и автореферате недостаточная обоснованность использования комбинации СВС-Ц+ВИП, до момента ознакомления с исследовательской частью диссертации.
4. Ознакомление с диссертацией выявило наличие несквозной нумерации ссылок. Также в тексте встречаются грамматические ошибки и опечатки.

Однако, указанные недостатки *не снижают общего очень хорошего* впечатления от работы. Получен большой объем новых знаний о перспективных функциональных конструкционных материалах, весьма привлекательных для различных отраслей промышленности. Апробировано приготовление нескольких сплавов по единой схеме получения (СВС-Ц+ВИП) и исследования металлических материалов.

По теме работы имеются 33 публикации, включая 8 статей в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК базы данных

