

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт электросварки им. Е. О. Патона

На правах рукописи

Ж У К
Геннадий Вилиорович

УДК 669.537.533.621.78

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННОГО РАСПЛАВА**

05.16.07 —

металлургия металлов высокой чистоты и специальных сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Киев 1996

Работа выполнена в Институте электросварки

им. Е.О.Патона НАН Украины

Научный руководитель кандидат технических наук
ТРИГУБ Н.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
МАЛАШЕНКО И.С.
кандидат технических наук
КУЛАК Л.Д.

Ведущее предприятие НПП "Машпроект" г. Николаев

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации инженера Жука Геннадия Вилиоровича. Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, которые интересуются темой диссертации, принять участие в заседании специализированного совета или прислать отзыв (1 экз., заверенный печатью) по адресу: 252650, Киев-5, ГСП, ул. Боженко, 11, ученому секретарю специализированного совета.

Защита состоится "2" 10 1996 г. на заседании специализированного совета по защите диссертаций (шифр К 50.02.02) при Институте электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке института.

Автореферат разослан "22" 07 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
докт. техн. наук



А. А. Бондарев

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00752213 (К)

ЛННБ ім. В. Стефаника
НАН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время одной из основных проблем в технологии деформируемых жаропрочных сплавов является получение металла с гомогенной, мелкозернистой структурой, что достигается путем многостадийной термомеханической обработки отливок. Такую структуру в исходной заготовке могут обеспечить также металлургические технологии, в которых достигается высокая скорость охлаждения расплава при кристаллизации. К этим технологиям относятся методы скоростного затвердевания RST (например, расплющивание капель между массивными пластинами, спиннингование расплава, охлаждение в жидкой среде), VADER - процесс. Наибольшее распространение получил Osprey - метод, состоящий в распылении струи расплава инертным газом и осаждении потока капель на подложку, который обеспечивает высокую скорость охлаждения и производительность при формировании заготовки.

Основным недостатком Osprey - процесса является пористость получаемых материалов, вызванная захлопыванием пузырьков газа каплями. Этот недостаток позволяет устранить метод электронно-лучевого диспергирования расплавов (ЭЛДР) в поле центробежных сил. При высокой производительности разработанный в ИЭС им. Е.О.Патона метод позволяет получать 100%-ную плотность материала в условиях вакуума.

Цель работы. Разработка основ электронно-лучевой технологии получения конструкционных материалов из диспергированного расплава. В соответствии с поставленной целью основными задачами работы являлись: создать математические модели стадий процесса ЭЛДР; определить характерные для метода скорости охлаждения расплава; установить влияние технологических параметров на структуру и свойства получаемых конструкционных материалов; соответственно установить оптимальные технологические

параметры процесса; определить область применения метода для различных классов материалов.

Методика исследований. Эксперименты по получению компактных заготовок, покрытий, биметаллических материалов и композиционных материалов типа металл-керамика методом ЭЛДР проводили на электронно-лучевой установке Э121, разработанной в ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины при непосредственном участии автора. Структуру материалов исследовали методами оптической и просвечивающей электронной микроскопии на тонких фольгах. Для идентификации фаз использовались аналитический электронный микроскоп (АЭМ) и Superprob. Микроструктуру образцов исследовали с помощью микроскопа НЕОРНОТ. Химический состав переходной зоны композиции сплав-подложка и особенности распределения элементов в области межфазового взаимодействия изучили с помощью зондового микроскопа САМЕСА. Механические свойства полученных компактных материалов определяли в исходном состоянии и после термомеханической обработки. Численные расчеты в рамках разработанных математических моделей проводились на персональном компьютере 486 DX-4.

Научная новизна. Предложена математическая модель процесса нагрева и плавления вращающейся цилиндрической заготовки концентрированным источником энергии. Установлено, что для получения направленного потока диспергированного расплава удельная мощность электронного луча на поверхности металлической заготовки (сплавы на никелевой основе, алюминий, титан) должна быть не ниже 30000 кВт/м^2 , а ускорение капель при отрыве от заготовки - не менее 200 g.

Разработана математическая модель теплофизических процессов кристаллизации капель диспергированного расплава на подложке. Установлено, что в методе ЭЛДР скорости охлаждения расплава для указанных металлов и сплавов составляют порядка 10^4 К/с и линейно зависят от температуры подложки. Показано, что при температуре

подложки на 20...50 К ниже температуры плавления диспергируемых жаропрочных никелевых сплавов ЭП975, ЭП698 реализуется режим с подплавлением предыдущего слоя, что обеспечивает гарантированное соединение капель и эффективное компактирование формируемой заготовки.

Разработана физическая модель взаимодействия диспергированного расплава с несмачиваемой подложкой (система алюминий-оксид алюминия) с образованием механического сцепления. Установлено, что сцепление происходит при наличии на поверхности подложки неровностей с характерным размером 10 мкм.

Исследована структура жаропрочного никелевого сплава ЭП975, полученного методом ЭПДР. Установлено, что структура характеризуется высокой химической однородностью (коэффициент ликваций основных легирующих элементов - не более 1,1), малым размером зерна (30...50 мкм), дисперсностью упрочняющей γ' - фазы (до 5 мкм), что обеспечивает повышение механических свойств исходных заготовок.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Получены заготовки дисков газовых турбин из жаропрочного никелевого сплава ЭП975 с улучшенными на 15...20% механическими свойствами.

Получен биметалл титан ВТ1-0 - Ст.20 с прочностью соединения составляющих не ниже 150 Мпа.

Получен композиционный материал алюминий - прессованный оксид алюминия (керамика) с прочностью соединения составляющих на уровне прочности керамики.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты работы докладывались на Международной конференции "Сварные конструкции" (Киев, 1995 г.), 5-м Международном симпозиуме "Trends and New Applications in Thin Films" (Колмар, 1996 г.). В полном объеме работа обсуждалась на металлургическом семинаре в ИЭС им. Е.О.Патона. По теме диссертации опубликовано в

соавторстве 4 статьи, подано 7 заявок на предполагаемое изобретение и получено 2 положительных решения по заявке на изобретение в России.

На защиту выносятся: закономерности плавления электронным лучом поверхности вращающейся заготовки; расчет параметров потока диспергированного расплава; закономерности теплофизических процессов затвердевания диспергированного расплава; закономерности взаимодействия диспергированного расплава с несмачиваемой подложкой; результаты исследования взаимодействия диспергированного расплава с подложкой с образованием и без образования хим. соединения; особенности формирования структуры жаропрочных никелевых сплавов в условиях высоких скоростей охлаждения и вакуума.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы из 74 наименований и приложения. Работа изложена на 104 страницах машинописного текста, имеет 64 рисунка и 2 таблицы.

Во введении обоснована актуальность работы, изложены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе дан обзор научной литературы, в котором отражено современное состояние технологии получения материалов из диспергированного расплава и методов ее описания. Проанализированы преимущества и недостатки известных процессов, использующих кристаллизацию в микрообъемах. Обоснована перспективность решения проблемы получения материалов с плотной, однородной мелкокристаллической структурой методом ЭЛДР. Изложены цель и задачи работы.

Во второй главе описаны основы метода ЭЛДР и оборудование для его реализации, материалы для исследования, техника эксперимента и методы исследования опытных образцов конструкционных материалов.

В третьей главе изложены теоретические основы формирования потока диспергированного расплава, растекания капель по

смачиваемой и несмачиваемой подложке, описаны тепловые процессы при формировании материала, представлены математические модели процессов и результаты численных расчетов.

В четвертой главе приведены результаты исследования структуры и физико-механических свойств компактных материалов, полученных диспергированием расплавов в поле центробежных сил. Показана адекватность математических моделей экспериментальным данным.

В пятой главе проанализировано влияние основных технологических параметров на стабильность процесса диспергирования, структуру и свойства получаемых материалов, определены оптимальные технологические параметры, исследованы практические возможности метода.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Новым прогрессивным методом прямого компактирования материалов, использующим наряду с быстрым затвердеванием расплавов преимущества вакуума и электронно-лучевого нагрева, является электронно-лучевая технология получения материалов из расплава, диспергированного в поле центробежных сил. Наряду с положительными свойствами, придаваемыми способом прямого компактирования, указанный метод обеспечивает практически 100%-ную плотность материала и его химическую чистоту на уровне не хуже исходного материала, а так же высокую производительность.

Сущность метода заключается



в создании направленного потока капель расплава центробежным диспергированием жидкого металла с поверхности вращающейся со скоростью более 1500 об/мин расходуемой заготовки в условиях ее плавления электронным лучом и осаждении капель расплава на подложке (рис.1). Метод реализован с использованием электронно-лучевой установки Э121, имеющей следующие технические характеристики: мощность технологическая 420 кВт; ускоряющее напряжение 25/32 кВ; количество электронных пушек 3; номинальное давление в камере 0.07 Па; частота вращения заготовки 0...3000 об/мин; максимальные размеры изделий 500x500x200 мм.

Для моделирования процесса нагрева и плавления расходуемой заготовки создана математическая модель оплавления поверхности вращающегося цилиндра концентрированным источником энергии (рис.2). Во всем объеме расходуемой заготовки

решается уравнение теплопроводности

$$c_p \frac{dT}{dt} = \text{div}(\lambda \text{ grad } T) + f$$

Высокая скорость вращения позволяет считать энергию луча равномерно распределенной по кольцу и свести уравнение к двумерному. Начальное условие:

$$T|_{t=0} = T_0$$

Граничные условия:

на оси заготовки



Рис.2 Схема модели нагрева расходуемой заготовки

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

на поверхности заготовки

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \epsilon n(z,t) - \epsilon \sigma (T^4 - T_{\text{ср}}^4),$$

где $\epsilon n(z,t)$ - локальный нагрев концентрированным источником на торцах заготовки

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = -\epsilon \sigma (T^4 - T_{\text{ср}}^4); \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha (T - T_{\alpha})$$

Расчеты в рамках модели показали, что ширина жидкой ванны в пределах 10% соответствует эффективному диаметру луча. Рассчитана зависимость размеров и конфигурации жидкой ванны, скорости

плавления заготовки от мощности и диаметра фокального пятна. В результате численных расчетов и анализа полученных экспериментальных данных установлено, что для стабильности процесса оплавления заготовки удельная мощность электронного луча на поверхности заготовки должна быть не ниже

30000 кВт/м². При этом линейная скорость перемещения электронного

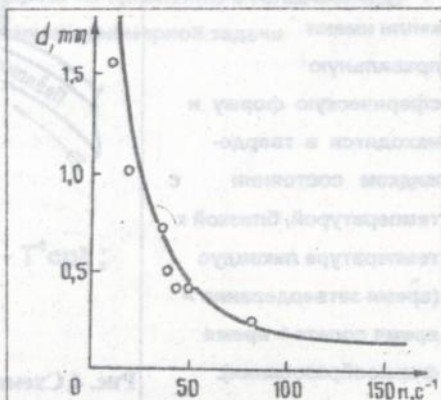


Рис.3 Зависимость диаметра образующихся капель от частоты вращения заготовки: о - экспериментальные данные; кривая - расчетные данные.

луча вдоль образующей цилиндра должна быть не менее 1,5 м/с. Под действием центробежных сил расплав удаляется с поверхности заготовки в виде направленного потока капель с диаметром порядка 1 мм и скоростью 15 м/с (угол раскрытия потока в диаметральной плоскости 20° , в осевой - 2°).

Исследованы параметры потока диспергированного расплава. Установлена зависимость диаметра капель от частоты вращения заготовки (рис.3)

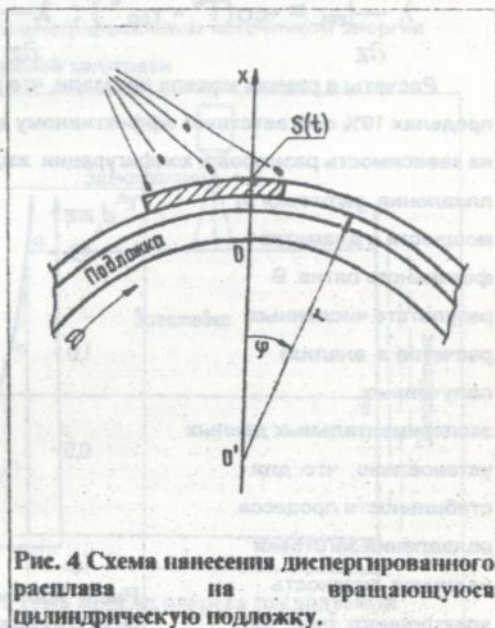
Расчетным путем установлено и экспериментально подтверждено, что размер капель в потоке диспергированного расплава колеблется в пределах 0.1...3 мм. При этом распределение капель по размерам имеет бимодальный характер

(основные капли и капли-сателлиты).

Расчеты показали, что при подлете к подложке капли имеют правильную сферическую форму и находятся в твердо-жидком состоянии с температурой, близкой к температуре ликвидус (время затвердевания > время полета > время формообразования).

После попадания на подложку капли

растекаются и затвердевают в условиях высоких значений напорного давления и скорости охлаждения. Разработана модель затвердевания диспергированного расплава на вращающейся цилиндрической подложке. (рис.4). Основу модели составляет решение уравнения



теплопроводности в цилиндрических координатах в системе материал-подложка. Предварительно было оценено число Рейнольдса в растекающейся капле, которое составило величину порядка 1, что указывает на ламинарность потоков. В совокупности с параллельностью потоков подложке это дает право исключить конвективные члены из уравнения теплопроводности в жидкой фазе и вид уравнения при переходе из твердой в жидкую область останется неизменным. Выделение скрытой теплоты плавления учитывается введением в эффективную теплоемкость непрерывной функции $c(T) = c_0(T) + L\varphi(T)$.

Затвердевание капли начинается при малых толщинах растекшегося слоя, что позволяет моделировать затвердевание капли после полного ее растекания. Предположение о нормальном распределении температуры по оси цилиндра позволило свести уравнение к двумерному. Более того, при рассмотрении единичного акта затвердевания капли, учитывая малость ее толщины по сравнению с толщиной подложки, можно ограничиться решением одномерной задачи

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

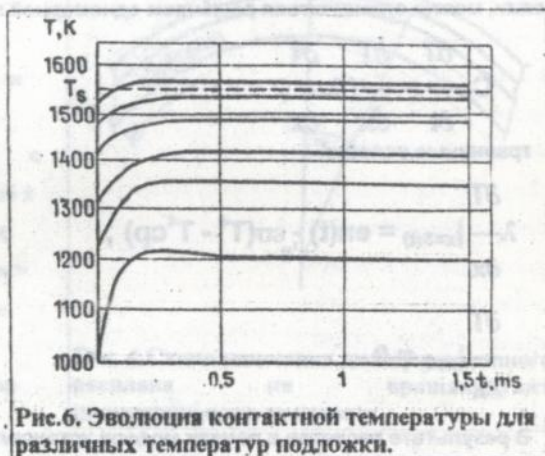
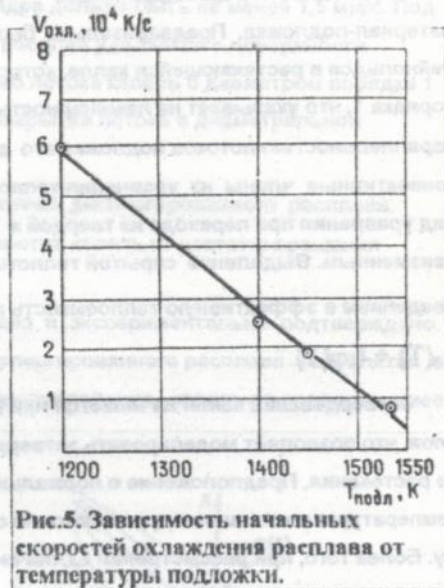
граничные условия

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=s(t)} = \epsilon n(t) - \epsilon \sigma (T^4 - T_c^4 c_p);$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$

В результате расчетов в рамках модели установлены характерные для метода скорости кристаллизации порядка 10^4 К/с.

Зависимость скорости охлаждения расплава от температуры подложки близка к линейной (рис.5). При предварительном подогреве подложки до уровня $T_{\text{solid}}=30...50$ К происходит подплавление подложки (рис.6), что обеспечивает полное взаимодействие капли с подложкой и соседними каплями. Это подтверждают проведенные эксперименты по диспергированию жаропрочного никелевого сплава ЭП698 на никелевую подложку в виде отдельных капель и слоев толщиной до 20 мм при различной температуре подложки. При низкой температуре подложки капли растекаются с



образованием на периферии четкого валика. При этом структура материала характеризуется неоднородностью, слоистостью и микропористостью, обусловленными неудовлетворительным

взаимодействием между соседними каплями. При увеличении температуры валик сплаивается, из-за уменьшения скорости охлаждения незначительно (до десятков микрон) возрастет размер зерна. По диффузионному проникновению компонентов сплава в никель и независимым измерениям микротвердости установлено (рис.7), что толщина образующегося диффузионного слоя составляет 30...70 мкм,

что меньше толщины отдельной растекшейся капли. Таким образом, при диспергировании расплава обеспечивается надежное диффузионное взаимодействие без образования развитой жидкой ванны. Отсутствие развитой жидкой ванны позволяет значительно, по сравнению с традиционными методами, уменьшить толщину хрупкой прослойки при соединении

интерметаллидообразующих пар металлов. Исследовано взаимодействие диспергированного расплава титана BT1-0 со сталью 20. Установлено, что при получении данного биметалла образуется прослойка интерметаллидов Ti-Fe и карбидов Ti-C толщиной в сотые доли мм. Такая толщина прослойки позволяет получать прочность соединения титана со сталью на уровне 150 МПа,

что является достаточно высокой величиной для этой пары металлов. Установлена зависимость предела прочности соединения от температуры (рис.8).



Рис.7. Зависимость ширины диффузионной зоны от температуры подложки:

- 1- теоретическая,
2- экспериментальная.

Установлена зависимость предела прочности соединения от температуры (рис.8).

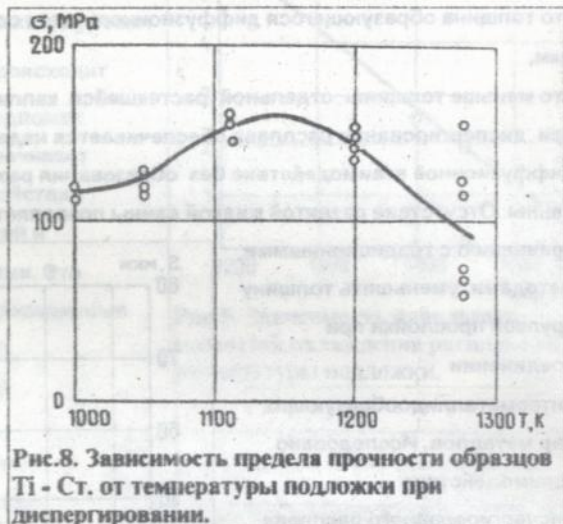
Кроме того, наличие высоких скорости охлаждения и напорного давления позволяет соединять металлические материалы с несмачиваемой подложкой. Для описания процесса соединения разработана модель взаимодействия диспергированного расплава с несмачиваемой подложкой за счет проникновения расплава под действием

напорного давления в капле в микронеровности поверхности (капилляры). При этом критический размер микронеровностей определяется из условия равенства напорного и капиллярного давлений

$$r = \frac{2\xi\delta}{\rho V^2}$$

где V - скорость капли, ρ - плотность расплава, δ - коэффициент поверхностного натяжения, $\xi=1...2$ - коэффициент, определяемый конфигурацией неровностей. Для метода ЭЛДР данный размер составляет 10 мкм. Модель проверена на композиционном материале Al-Al₂O₃ (керамика), для которого достигнута прочность соединения составляющих на уровне прочности керамики.

Высокие скорости охлаждения расплава и гарантированное взаимодействие между каплями обеспечивают плотную, однородную структуру с дисперсным распределением структурных и



фазовых составляющих в сложнелегированных, в частности в жаропрочных сплавах.

Методом ЭЛДР были получены образцы жаропрочного никелевого сплава ЭП975 при различных температурах подложки. Важной особенностью микроструктуры образцов является отсутствие карбидных выделений значительной протяженности по границам зерен, что свойственно современным суперсплавам, получаемым механическим легированием. Характерные для литья карбидные выделения шрифтовой конфигурации заменяются выделениями кубической и глыбообразной формы. Величина карбидных выделений находится на уровне нескольких микрон, а величина упрочняющей γ' -фазы не превышает 0.3 мкм, при этом она имеет степень размерного несоответствия решеток с матрицей на уровне 0.2...1%, что обеспечивает существенный рост жаропрочности.

Полученная структура диспергированного сплава ЭП975 определила его высокие механические свойства (табл.).

Технология	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
ЭЛДР	1225	924	12.0	14.6	65
	—	—	—	—	—
	1158	924	13.0	14.0	65
ЭЛПРЕ	965	830	16.0	18.0	43

Примечание: над чертой приведены свойства в плоскости растекания капель, под чертой - поперек плоскости, ЭЛПРЕ - электронно-лучевой переплав с промежуточной емкостью.

Табл. Механические свойства сплава ЭП975 при комнатной температуре.

По ходу выполнения работы проведены эксперименты по выявлению рациональных областей применения метода ЭЛДР с точки зрения получения материалов различного функционального назначения. В этом плане разработанная технология ЭЛДР может быть использована

при производстве покрытий, монолитных материалов, биметаллических, композиционных материалов, при сварке.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны физико-металлургические основы электронно-лучевой технологии получения заготовок из жаропрочных никелевых сплавов ЭП975 и ЭП698, биметалла титан-сталь, композиционного материала алюминий-оксид алюминия из диспергированного расплава.

2. Разработана расчетная схема для моделирования тепловых процессов при электронно-лучевой технологии получения материалов из диспергированного расплава на основе уравнения теплопроводности Фурье.

3. Разработана математическая модель нагрева и плавления вращающейся расходуемой заготовки концентрированным источником нагрева. В рамках модели рассчитаны оптимальные значения технологических параметров: удельной мощности луча - 10^6 Вт/м², общей мощности луча - 40 кВт, температуры предварительного нагрева заготовки $0.5...0.6 T_S$.

4. Расчетным путем установлено и экспериментально подтверждено для исследованных материалов, что размер капель в потоке диспергированного расплава колеблется в пределах 0.1...3 мм. При этом капли имеют правильную сферическую форму и находятся в твердом состоянии с температурой, близкой к температуре ликвидус.

5. Разработана физическая модель сцепления диспергированного металла с несмачиваемой подложкой (система алюминий-оксид алюминия) в условиях высоких напорного давления (1 МПа) и скорости охлаждения (3×10^3 К/с).

6. Разработана математическая модель теплофизических процессов формирования материала на подложке. Расчеты в рамках модели показали, что скорость охлаждения в методе ЭЛДР составляет до 10^4 К/с. Рассчитан режим, при котором происходит подплавление капель ранее нанесенного слоя. Результаты расчетов подтверждены экспе-

риментами по получению из диспергированного расплава заготовок из жаропрочных никелевых сплавов ЭП975 и ЭП698.

7. Создана электронно-лучевая установка для реализации разработанного метода.

8. Разработан способ соединения титана со сталью методом диспергирования титана на стальную подложку. Получена прочность соединения титана со сталью на уровне 150 МПа.

9. Разработан способ получения из диспергированного расплава монолитных заготовок жаропрочных никелевых сплавов ЭП975 и ЭП698. Исследована структура жаропрочного никелевого сплава ЭП975, полученного методом ЭЛДР. Установлено, что структура характеризуется высокой химической однородностью (коэффициент ликвации основных легирующих элементов - не более 1,1), малым размером зерна (30...50 мкм), дисперсностью упрочняющей γ' -фазы (до 5 мкм). Установлено, что прочностные характеристики сплава ЭП975, полученного методом ЭЛДР выше аналогичных для сплава, полученного ЭЛПРЕ на 15...20%.

10. Установлено влияние температуры предварительного нагрева подложки на качество получаемых материалов для ряда металлов и сплавов. Определены оптимальные значения температур подложки для следующих материалов: жаропрочные никелевые сплавы ЭП975 и ЭП698 - 1500...1530 К, оксид алюминия - алюминий - 720...860 К, титан - сталь - 1160 К.

11. Установлено, что метод ЭЛДР применим для получения заготовок дисков газовых турбин из жаропрочных никелевых сплавов ЭП975 и ЭП698, при производстве титановых труб, при восстановлении изношенных деталей двигателя внутреннего сгорания из низкоуглеродистой стали сталью Р6М5 с повышением уровня их прочности, для производства биметалла титан - сталь и композиционного материала алюминий - оксид алюминия.

Основное содержание диссертации напечатано в работах:

1.А.Л.Тихоновский, П.А.Пап, Д.А.Козлитин, Г.В.Жук и др.

Способ электронно-лучевого литья из диспергированного расплава./ Проблемы спец. электрометаллургии.-1993.-N3.-с.35-39.

2.Г.В.Жук, Д.А.Козлитин, П.А.Пап Моделирование тепловых процессов быстрого затвердевания при литье диспергированных расплавов./ Там же.- с.44-49.

3.Г.В.Жук, П.А.Пап Исследование влияния температуры на физические процессы в системе материал-подложка при литье из диспергированного расплава./ Проблемы спец. электрометаллургии.-1995.-N3.-с.32-37.

4.Г.В.Жук, П.А.Пап, Н.П.Тригуб, В.И.Костенко Физические основы соединения металла с керамикой при электронно-лучевом литье из диспергированного расплава./ Проблемы спец. электрометаллургии.-1996.-N1.-с.37-42.

Личный вклад автора. В работах, выполненных в соавторстве, основной вклад в теоретические разработки и анализ результатов экспериментов принадлежит автору. В работе [1] исследованы характеристики диспергированного расплава и свойства полученных материалов. В работах [2,3] разработана математическая модель затвердевания диспергированного расплава, изучены закономерности его взаимодействия с подложкой, определены скорости охлаждения расплава, параметры диффузионного взаимодействия. В работе [4] автор разработал модель взаимодействия диспергированного материала с несмачиваемой подложкой и исследовал условия взаимодействия Al с Al_2O_3 .

Жук Г.В. " Основи електронно-променевої технології виробництва матеріалів з диспергованого розплаву". Рукопис дисертації на здобування наукового ступеню кандидата технічних наук. Спеціальність 05.16.07 - металургія металів високої чистоти та спеціальних сплавів. ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАН України, м.Київ, 1995 р.

Розроблені математичні моделі стадій процесу електронно-променевої технології виробництва матеріалів з диспергованого розплаву. Вивчено вплив високих швидкостей охолодження та напорного тиску на структуру і властивості матеріалів. Визначені оптимальні технологічні параметри процесу ЕПДР.

Розроблені основи електронно-променевої технології жароміцних нікелевих сплавів з диспергованого розплаву. Технологія включає в себе використання високої швидкості твердіння розплаву та вакуумне середовище для одержання в заготовках гомогенної, дрібнозернистої структури. Одержані експериментальні зразки заготовок дисків газових турбін з високими механічними властивостями.


Ключові слова: електронно-променева технологія, диспергований розплав, швидкісне охолодження, математичне моделювання, дрібнозерниста структура, жароміцний сплав, теплофізичні процеси, кристалізація.

Zhuk G.V. "Fundamentals of the electron beam technology of materials from sprayed melt". The manuscript of the thesis for the doctor of science degree obtaining. Speciality 05.16.07 - the high pure metals and special alloys metallurgy. E.O.Paton EWI NAS of Ukraine, Kyiv, 1995.

The mathematical models of the electron beam technology of materials from sprayed melt process stages fundamentals were developed. The high cooling rates and spray pressure influence on the materials structure and properties was investigated. The EBSM process optimum technology parameters were determined.

The fundamentals of the electron beam technology of superalloys from sprayed melt were developed. The technology included using of high melt solidification rate and vacuum environment for the homogenous fine grained structure obtaining in billets. The experimental specimens of gas turbine discs with high mechanical properties were obtained.

Key words: electron beam technology, sprayed melt, rapid quenching, mathematical modelling, fine grained structure, superalloy, heat transfer processes, crystallization.



Подп. в печ. 15.07.96. Формат 60x84/16. Бум. сфс. № 1. Офс. печ.
Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,16. Уч.-изд. л. 0,97. Тираж 100
экз. Зак. 6-251.

ИЭС им. Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.
ВВП ИЭС им. Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.

AB 35.279