

1733

На правах рукописи



КУЛАКОВ Андрей Борисович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ЖАРОПРОЧНЫХ
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.04 - "Литейное производство"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1997

Диссертационная работа выполнена на кафедре общей химии Челябинского государственного технического университета.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
З.Я.Иткис.
Научный консультант — кандидат технических наук, доцент
В.А.Смолко.
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Р.К.Мысик,
кандидат технических наук, доцент
Л.С. Волковичер.

Ведущее предприятие — АО " Челябинский тракторный завод ".

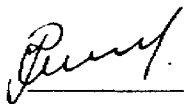
Защита состоится " 12 " марта 1997 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета К.053.13.06 при Челябинском государственном техническом университете.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направить по адресу: 454080, Челябинск, пр.им.В.И.Ленина, 76, ЧГТУ, ученому секретарю совета университета, тел.39-91-23

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Автореферат разослан " 6 " февраля 1997 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К.053.13.06
кандидат технических наук, доцент



Б.Э.Клецкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных условий научно-технического развития машиностроения является создание и быстрое освоение новых технологических процессов литья. К ним относится литье по выплавляемым моделям, которое широко используется в производстве сложных тонкостенных отливок из жаропрочных никелевых сплавов (ЖС) для газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ). Данные отливки все в большем количестве получают методом направленной кристаллизации (НК), что значительно повышает их эксплуатационные характеристики.

Однако получение высококачественных отливок осложняется из-за высоких температур прогрева литейных форм, стержней и их длительного контакта с залитым металлом, приводящих к интенсивному взаимодействию в системе металл-форма-газовая фаза даже в условиях вакуумных плавильно-заливочных установок (ПЗУ). Это влечет за собой образование на поверхности отливок различных дефектов и видоизмененного слоя, обедненного легирующими элементами, что приводит к уменьшению выхода годных отливок и к снижению их служебных свойств.

Основные работы в данной области главным образом были направлены на повышение прочности и термостойкости литейных форм. Исследования по изучению устойчивости различных материалов форм, стержней, плавильных тиглей в вакууме к взаимодействию с химически активными компонентами сплава, а также самих компонентов с атмосферой ПЗУ, начали проводиться недавно и касались в большей мере литья титана и радиоактивных металлов. Поэтому возникает необходимость дальнейшего совершенствования технологии литья жаропрочных никелевых сплавов, обеспечивающей повышение качества литых изделий для современных конструкций и механизмов.

Основные разделы работы выполнены в соответствии с грантами 1994-96гг. координационного плана НИР РАН по решению актуальных задач в области процессов литья.

Цель работы. Изучить процессы физико-химического взаимодействия, протекающие в системе металл-форма-атмосфера печи, и с учетом установленных закономерностей разработать комплекс технологических мероприятий, направленных на повышение качества литых изделий.

Поставленная цель реализовывалась путем проведения комплексных исследований по ряду направлений, в ходе которых необходимо было решить следующие задачи:

- изучить кинетику процессов испарения огнеупорных и примесных оксидов керамических тиглей, стержней и форм, а также компонентов сплава в условиях вакуумных плавильно-заливочных установок;
- исследовать процессы физико-химического взаимодействия в системах металл-форма, металл-стержень, металл-атмосфера печи, подобрать состав защитной атмосферы, повышающей химическую стойкость форм и стержней;
- создать методику прогнозирования служебных свойств керамических стержней, разработать и освоить в производстве технологию их изготовления с возможностью удаления из отливок со сложными внутренними полостями;
- разработать процесс внутриформенного рафинирования жаропрочных сплавов, создать и применить в производстве технологию изготовления пенокерамических фильтров для повышения качества отливок из ЖС.

Научная новизна. Изучен вопрос кинетики испарения различных оксидов формы, тигля, а также компонентов сплавов в условиях динамического вакуума, показано влияние этих процессов на образование поверхностных дефектов на отливках, насыщение их поверхности кремнием из газовой фазы. Установлено положительное влияние защитной атмосферы из инертных газов в плавильно-заливочных установках на снижение активности физико-химического взаимодействия в системе металл-форма-газовая фаза. Получены данные по структурным превращениям и результаты dilatометрических исследований керамических кварце-корундовых стержней в процессе твердофазного спекания, показано отсутствие насыщения со стороны таких стержней внутренней поверхности отливок кремнием. Проведены расчеты геометрических параметров пенокерамических фильтров и режимов внутриформенной фильтрации при заливке жаропрочных сплавов. Исследованы рентгенофазовым и дериватографическими методами процессы спекания фильтров.

Практическая значимость работы и реализация ее в промышленности. В процессе исследований были разработаны технологии изготовления керамических стержней, удаляемых из отливок ответственного назначения в водных растворах щелочей, а также пенокерамических фильтров для внутриформенного рафинирования, что позволило улучшить качество и повысить выход годных отливок. Разработанные технологии прошли опытно-промышленные испытания

на Казанском моторостроительном производственном объединении (КМПО) и Челябинском агрегатном заводе (ЧАЗ).

Основные положения, представляемые к защите:

- Кинетические закономерности испарения оксидов и компонентов сплава в условиях вакуумных плавильно-заливочных установок;
- данные анализа физико-химического взаимодействия в системе металл-форма-газовая фаза и его влияние на качество отливок;
- состав и технология изготовления методом твердофазного спекания керамических кварце-корундовых стержней, удаляемых из отливок в горячих водных растворах щелочей;
- данные по структурным превращениям и дилатометрическим параметрам керамических стержней в области высоких температур, их физико-механическим и служебным свойствам;
- результаты расчетов геометрических параметров пещокерамических фильтров и режимов фильтрации при внутриформенном рафинировании жаропрочных сплавов в процессе заливки;
- состав, технология и оборудование для изготовления пещокерамических фильтров, их физико-механические свойства;

Апробация работы. Результаты работы экспонировались в 1994 г. на республиканской выставке в Госкомвузе РФ, г.Москва; в 1994-1995г. на региональной выставке, г.Екатеринбург; в 1995 г. на международной Лейпцигской ярмарке, ФРГ; в 1996г. на II Международной специализированной выставке "Металлургия-96", г.Челябинск.

Материалы диссертации были доложены и обсуждены на региональной НТК "Оптимизация технологических процессов и управление качеством при производстве фасонных отливок", г.Рыбинск, 1993; на межвузовской НТК "Фундаментальные проблемы металлургии", г.Екатеринбург, 1995; на международной конференции "Металлургия-96", г.Челябинск, 1996; на конференции литейщиков Уральского региона, г.Екатеринбург, 1996.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ и получено 2 решения о выдаче патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, списка литературы из 136 наименований, приложений; содержит 111 страниц машинописного текста, 26 таблиц, 53 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Наличие активного физико-химического взаимодействия материала литейных форм, тиглей и газовой фазы с расплавом в условиях вакуумных ПЗУ негативно сказывается на качестве литых изделий из ЖС. Улучшить их качество можно за счет использования огнеупорных материалов с оптимальными свойствами, повышения термодинамической стойкости металл-форма(тигель)-газовая фаза путем создания в ПЗУ защитных атмосфер, а также применения керамических стержней, способных удаляться из отливок в растворах щелочей, и внутриформенного рафинирования заливаемого металла с помощью пенокерамических фильтров.

Оценка поведения огнеупорных материалов и сплавов при высоких температурах в условиях вакуума

Качество отливок зависит как от правильного применения материалов для изготовления тиглей, форм и стержней, так и от температурного режима системы металл-форма и создаваемого остаточного давления в ПЗУ, которое колеблется в пределах 1...2 Па. Основной причиной выделения газообразных продуктов, влияющих на качество отливок, является испарение и термическая диссоциация огнеупорных и примесных оксидов плавильного тигля и керамической формы. С целью количественной оценки неконгруэнтного испарения в вакууме различных оксидов была использована методика Герца-Лэнгмюра, которая с учетом уравнения Вант-Гоффа для реакций диссоциации была преобразована в выражение, удобное для определения скоростей испарения оксидов в зависимости от парциального давления кислорода:

$$J = (2\pi M_m RT)^{-1/2} n M_{MO} \exp \left(\frac{-\Delta G_{\text{дисс}}}{RT} \right) P_{O_2}^{-1/2} \quad (1)$$

Здесь J - скорость испарения оксида; R - универсальная газовая постоянная; T - температура; M_m - молярная масса металла в оксиде; M_{MO} - молярная масса оксида; n - отношение количества молей оксида к количеству молей образующегося металла; ΔG - изменение энергии Гиббса реакции; a и b - стехиометрические коэффициенты в реакции диссоциации оксида соответственно перед металлом и кислородом; P_{O_2} - парциальное давление кислорода.

Расчетные скорости испарения оксидов при $P = 1,33$ Па ($P_{O_2} = 0,28$ Па) представлены на рис.1 В группу с наибольшей скоростью испарения входят ок-

сиды FeO, CoO, Na₂O, самыми устойчивыми к возгонке являются Al₂O₃ и ZrO₂, а MgO, SiO₂, CaO и TiO₂ занимают промежуточное положение. Для оценки расчетных данных были проведены экспериментальные работы на высокотемпературной вакуумной установке. Исследуемые материалы в дисперсном виде подвергали изотермической выдержке в вакууме 1,3...1,5 Па при 1873±12 К в течение 3 часов. Скорость испарения оценивали по убыли массы образцов и она составила: для SiO₂-5,1·10⁻⁵, MgO-7,2·10⁻⁵, CaO- 8,6·10⁻⁷ и TiO₂-4,3·10⁻⁷ кг/м²с, у алюмосиликатов (муллит, дистен-силлиманит, шаянит) она была в пределах (0,4...2,9) ·10⁻⁶ кг/м²с. Полученные данные подтверждают активное инконгруэнтное испарение оксидов, способных за счет выделяемого кислорода и элементов окислять компоненты сплава и насыщать его. Термодинамическими расчетами с учетом активных концентраций Al и Si установлена возможность насыщения сплава ЖС6-К в вакууме кремнием из газовой фазы по реакции $3\text{SiO}_g + 2[\text{Al}]_ж \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_{3г} + 3[\text{Si}]_ж$. Равновесная концентрация кремния в сплаве по данной реакции в интервале 1700...2000 К находится в пределах 28,8...5,7%. Такие же закономерности характерны и для других сплавов ЖС6У-ВИ, ЖС30-ВИ. Насыщение сплавов кремнием на глубину до 600 мкм в 5...10 раз превышающее допустимую концентрацию (0,6%) подтверждается микрорентгеноспектральным анализом отливок, получаемых в ПМП-2. При сканировании поверхности отливок наблюдалось также локальное насыщение сплава Fe и Ca. Повышение в сплаве концентраций Si, Fe и Ca приводит к снижению его служебных свойств, в частности, жаропрочности и предела выносливости.

При плавке и заливке металла в вакууме наряду с испарением оксидов наблюдается и высокая летучесть компонентов сплавов. Например, уже при 1600 К давление паров Ni, Al, Co над сплавом ЖС6-К с учетом их молярных концентраций превышают 1,33 Па, а при 1800 К этого предела достигает и давление пара хрома. Расчетные скорости испарения компонентов сплава ЖС6-К приведены на рис.2. Наиболее высокие скорости характерны для Co, Al, Ni и Cr. Сравнение коэффициентов диффузии элементов в сплаве и констант их испарения позволили сделать вывод, что испарение Al и Cr при 1700...1900 К протекает в диффузионной области, а Ti - в переходной. Летучесть компонентов сплава в вакууме подтверждается и опытным путем. Химический состав сплава до и после выдержки в вакууме 1,33 Па при 1843±10 К в течении 2 часов определяли на спектральном анализаторе ДФС-52. За это время содержание в

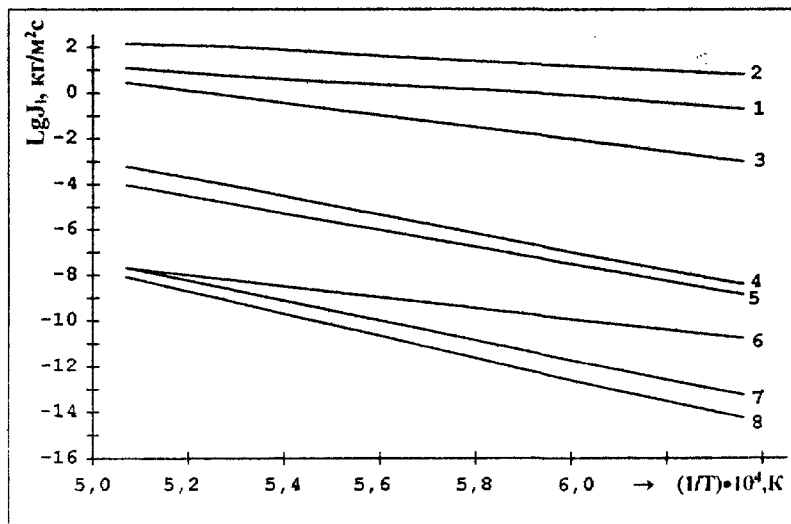


Рис.1 Скорости испарения оксидов: 1- CoO; 2- FeO; 3- Na₂O;
4- SiO₂; 5- MgO; 6- CaO; 7- Al₂O₃; 8- TiO₂

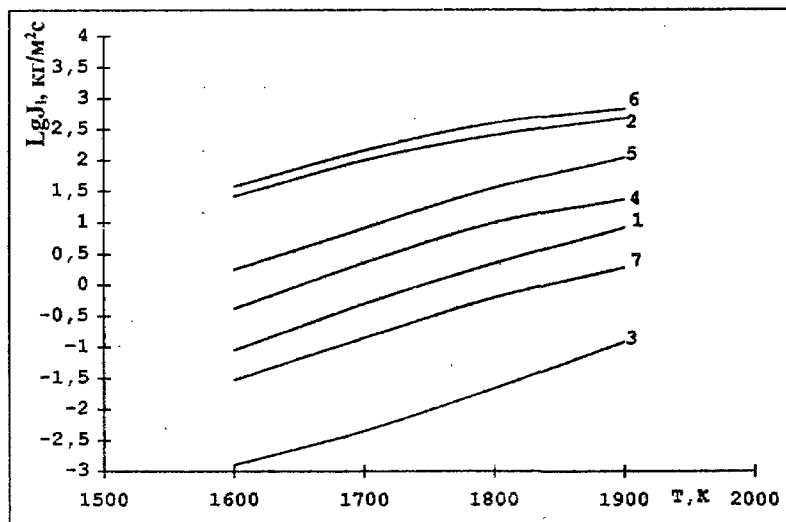


Рис.2 Скорости испарения компонентов сплава ЖС6-К: 1- Si;
2- Al; 3- Ti; 4- Ni; 5- Cr; 6- Co; 7- Fe

сплаве легирующих компонентов Cr, Co, Al, Ti снизилось соответственно на 0,28, 0,21, 0,08 и 0,02% мас. Наряду с возгоном компонентов происходит и их окисление кислородом атмосферы ПЗУ, а также кислородом-продуктом испарения оксидов. Об этом свидетельствует образование на стенках корундового тигля, а также на поверхности корундовой формы в ПМП-2 хромистого корунда, что подтверждается рентгенофазовым и рентгеноспектральным анализами.

Протекающие окислительные процессы компонентов сплава и наличие в тигле, форме примесных оксидов Fe, Na, Ca и др. способствует образованию плен из тройных и двойных легкоплавких эвтектик $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ с $T_{\text{пл}}=1438\text{K}$, $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$ с $T_{\text{пл}}=1373\text{K}$, $\text{FeO-SiO}_2\text{-MnO}$ с $T_{\text{пл}}=1446\text{K}$, $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$ с $T_{\text{пл}}=1262\text{K}$, FeO-SiO_2 с $T_{\text{пл}}=1413\text{K}$, которые поражают поверхность и тело отливки. Для подавления процессов испарения оксидов составляющих сплава и снижения в целом химической активности системы металл-форма -газовая фаза предлагается использование в ПЗУ защитной атмосферы с повышенным давлением из инертного газа или смеси таких газов. Расчеты показывают, что применение чистого аргона марки А при давлении 133 Па позволяет более чем на один-два порядка снизить соответственно в ПЗУ парциальные давления N_2 и O_2 по сравнению с вакуумом 1,33 Па. При таком давлении практически полностью подавляется инконгруэнтное испарение оксидов, а также компонентов сплава, предотвращается их окисление, что препятствует образованию плен, насыщению металла различными элементами, повышает температуру начала взаимодействия в системе оксид-углерод в ПМП-2. Это подтверждается экспериментальными данными.

Технология изготовления керамических стержней для производства лопаток газотурбинных двигателей

По результатам анализа действующих технологических процессов изготовления керамических стержней установлено, что наиболее приемлемым способом получения легкоудаляемых керамических стержней методом твердофазного спекания, применяемых в производстве лопаток, является использование керамических кварце-корундовых смесей. Установлено, что спеченная при температурах 1400...1500°C керамическая смесь белого электрокорунда (ЭБ) с 45...50% пылевидного кварца может быть удалена из отливки в кипящих растворах щелочей. Для улучшения процесса твердофазного

спекания стержневых смесей предложено вводить в них алюминиевый порошок марки АСД 4 и возгон шамотного производства (ШВ), который имеет большую удельную поверхность $10500...11000\text{см}^2/\text{г}$ и на 95...96% состоит из Al_2O_3 , SiO_2 , включает 2,3...2,6% TiO_2 , 1,3...1,5% Fe_2O_3 , остальное - Na_2O и MgO . Проведенный рентгенофазовый анализ исходного и прокаленного при $950...1000^\circ\text{C}$ ШВ показал отсутствие кристаллических фаз, что говорит об аморфности материала в обоих случаях. С повышением температуры прокалики выше 1200°C начинается образование муллита, а при $T=1400^\circ\text{C}$ наблюдается полная муллитизация шамотного возгона, что и обеспечивает прочностные свойства стержня. Дифференциально-термическими исследованиями ШВ установлена потеря его массы при 120°C и 560°C . В первом случае происходит удаление адсорбированной влаги, а во втором - оксидов щелочных металлов. Дифференциально-термический анализ порошка АСД-4 показал, что его окисление происходит поэтапно и полностью заканчивается при 1400°C с образованием $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, который способствует формированию необходимой прочности стержня. На основе этих данных разработан оптимальный состав керамической смеси для изготовления сложнопрофильных тонкостенных стержней используемых при литье лопаток ГТД, в том числе и методом направленной кристаллизации, позволяющий удалять стержень из полости отливки в растворах щелочей. Смесь включает, % мас.: 45...50-ПК; 50...55-ЭБ(М40-50); 0,5...1-АСД4; 2...3-ШВ; 17...19-пластификатора ПП-5; 0,8...1,2-олеиновой кислоты. Девятогографический анализ (рис.3) данной смеси показал в интервалах температур $840...1050^\circ\text{C}$ и $1380...1450^\circ\text{C}$ увеличение массы и скорости ее приращения при наличии экзотермического эффекта. Причиной этого является окисление алюминиевого порошка и частичное восстановление алюминием кремния из SiO_2 при $T>1380^\circ\text{C}$. В спеченной при 1400°C стержневой смеси по данным рентгенофазового анализа (рис.4) присутствуют α -корунд, муллит и α -кristобаллит. С повышением температуры спекания до 1600°C в стержне формируется в основном муллит, образовавшийся из основных наполнителей смеси - ПК и корунда, который препятствует выщелачиванию стержня из отливки. Дилатометрические исследования показали, что ТКЛР полученных стержней составил $7\cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и по своим значениям близок к ТКЛР корундо-силлиманитовой формы $8,3\cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Это способствует снижению термических напряжений в форме. Прочность стержня во многом определяется его температурой спекания. При $1350...1380^\circ\text{C}$

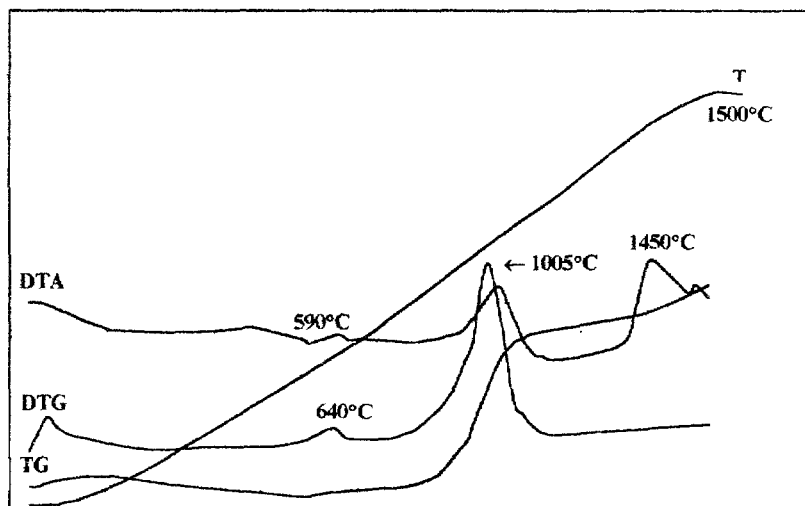


Рис.3 Дериwатографические кривые нагрева стержневой керамической смеси

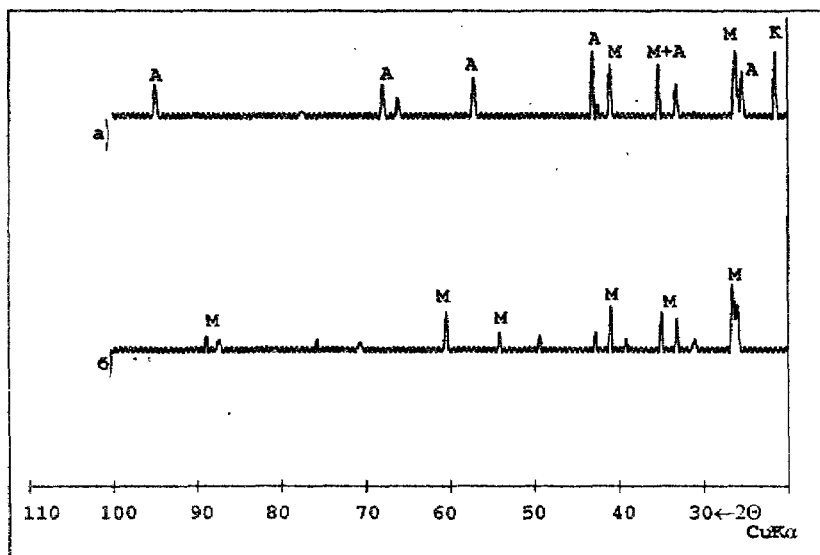


Рис.4 Дифрактограммы прокаленной керамической смеси:
 а — 1400°C, б — 1600°C,
 А - корунд; М - муллит; К - кремнезем (α - кристобаллит)

их прочность составила 7,8...9,6 МПа при 1450...1490°C была 14,6...18,2 МПа и при 1590...1640°C достигла 55,0...60,0 Мпа. Наиболее оптимальной температурой спекания стержней следует считать 1450...1480°C, когда достигается оптимальная прочность и предотвращается их полная муллитизация. Для повышения термостойкости и химической инертности стержней металла определены оптимальные параметры нанесения на их поверхность защитного покрытия из стабилизированного ZrO_2 или Al_2O_3 методом плазменного напыления. Расчеты равновесного содержания кремния в сплаве ЖС30У-ВИ показали, что при $T=1600...2100K$ насыщение отливки кремнием со стороны стержня маловероятно, т.к. равновесные концентрации кремния в сплаве при данных условиях не превышают 10-8%. Для оценки работоспособности керамических стержней разработан расчетный метод и на его основе программа для определения на ЭВМ вероятных значений соответствующего коэффициента. По исходным физико-механическим свойствам стержней, их геометрическим размерам и температурным режимам оценивалась реальная возможность применения данного стержня для получения качественной отливки.

Фильтрационное рафинирование расплавов

В процессе анализа действующего технологического процесса литья лопаток с равноосной структурой были выявлены основные причины брака отливок по засорам. Из них главным являются включения, образующиеся при плавке и заливке в виде оксидных плен Al , Ti , Si , частиц плавильного тигля и сора из используемого в шихте литейного возврата. Наиболее эффективно уменьшить данный вид брака можно за счет внутриформенного фильтрационного рафинирования заливаемого расплава через пенокерамические фильтры. В качестве моделей для изготовления фильтров был применен открытопористый пенополиуретан марки ППУ-Э0-100 ТУ 6-05-5127-82, имеющий плотность $(0,04...0,05) \cdot 10^3$ кг/м³ и размеры пор $(0,5...5) \cdot 10^{-3}$ м. По данным дифференциально термического анализа пенополиуретан при $T > 280^\circ C$ начинает плавиться, подвергается термодеструкции и возгонке, которые полностью заканчиваются при $T = 580...600^\circ C$. Разработаны оптимальный состав керамической суспензии на этилсиликатном связующем с корундовым наполнителем и технология изготовления из нее фильтров. Для улучшения твердофазного спекания, повышения прочности фильтров в суспензию вводятся дисперсные порошки TiO_2 и АСД-4

соответственно в количестве 1...3% и 2...8% от наполнителя. Оптимальное количество наносимых на модель слоев суспензии-2. Избыток суспензии первого слоя удаляется за счет обжигания модели, а второго продувкой сжатым воздухом. Рентгенофазовый анализ прокаленных при 1350...1370°C фильтров показал, что их основным составляющими являются корунд α - Al_2O_3 , мушпит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ и рутил TiO_2 . Это обеспечивает достаточную прочность фильтров порядка 3,5 МПа на сжатие и 2,4 МПа на изгиб. С повышением температуры прокалики до 1550...1600°C фазовый состав фильтра практически не меняется, а его прочность возрастает в 1,6...2,1 раза. Полученные фильтры имеют пористость 60...75%, кажущуюся плотность $(0,85...0,9) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, размер пор $(0,3...4) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, выдерживают 5 циклов нагрева до 1000°C с последующим охлаждением в воде. Одним из достоинств разработанной технологии является использование доступных материалов, широко применяемых при изготовлении керамических форм и стержней.

С целью определения оптимальных параметров процесса фильтрации проведены соответствующие расчеты. Для пенокерамических фильтров скорости фильтрации расплава при его движении сверху вниз на основании закона Дарси можно представить в виде уравнений

$$V_{\text{д}} = \text{Pd}_c^2 g(\text{H}_M + \text{H}_\Phi) / 4 \Delta v \text{H}_\Phi, \quad (2)$$

$$V_{\text{т}} = \sqrt{\text{Pd}_c g(\text{H}_M + \text{H}_\Phi) / 2\text{BH}_\Phi}, \quad (3)$$

где $V_{\text{д}}$ и $V_{\text{т}}$ — скорости фильтрации при ламинарном и турбулентном режимах; П — пористость; g — ускорение свободного падения; d_c — средний диаметр пор; ν — кинематическая вязкость расплава; A и B — коэффициенты, учитывающие извилистость и конфигурацию пор; H_Φ — толщина фильтра; H_M — высота расплава над фильтром.

Установлено, что при $\text{П} = 0,7$ и 1560°C ламинарный режим фильтрации ЖС в порах ($\text{Re} = 10$) диаметром 4 мм ограничен скоростью $2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, а при диаметре 0,5 мм соответственно $16 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. Скорость фильтрации существенно влияет на смыв расплавом частиц с поверхности фильтра. Например, частицы размером 100 мкм смываются при $V_{\text{д}} \geq 3,0 \text{ м/с}$. В целом пористость и диаметр пор фильтра, гидравлический уклон должны обеспечивать фильтрование расплава с максимальной скоростью при соблюдении ламинарного режима фильтрации, а площадь фильтра должна гарантировать заполнение формы ие-

галлюм за требуемое время. При среднем диаметре пор $2 \cdot 10^{-3}$ м, скорости заливки 1 кг/с оптимальная высота фильтра- $2 \cdot 10^{-2}$ м, а его диаметр- $5 \cdot 10^{-2}$ м. К достоинствам таких фильтров следует отнести большую площадь контакта расплава с его поверхностью, совокупность пор различных размеров, их высокую извилистость, что способствует эффективной очистке заливаемого металла. Такие фильтры могут успешно применяться при литье чугунов, сталей, алюминиевых и магниевых сплавов.

Результаты опытно-промышленных испытаний разработанных технологий

Производство опытных керамических кварце-корундовых стержней для литья лопаток из сплава ЖС30-ВИ со сложными тонкими 0,8...5,0 мм профилями охлаждаемых полостей (петлевые, циклонно-вихревые и др.) методом твердофазного спекания осуществляли на КМПО по разработанной технологии на цеховом оборудовании. Плазменное покрытие стержней стабилизированным ZrO_2 производили на плазматроне ИПУ-3Д. Полученные стержни использовали для производства лопаток в печах направленной кристаллизации ПМП-2. Полное удаление стержней из отливок в кипящем 30% водном растворе NaOH (KOH) достигалась за 9...10 ч. Микрорентгеноспектральный анализ металла, контактирующего со стержнем, показал отсутствие насыщения его кремнием. Результаты испытаний подтверждали возможность успешного использования разработанной технологии изготовления стержней для получения лопаток методом направленной кристаллизации.

Испытание технологии изготовления пенокерамических фильтров и процесса внутрiformенного фильтрационного рафинирования заливаемого металла производили на КМПО и ЧАЗ. Сравнительный анализ дефектности опытных и серийных отливок показал улучшение качества литых турбинных и направляющих лопаток из сплава ЖС6У-ВИ, залитых в печах УППФ-3 через пенокерамические фильтры. Наблюдалось снижение общего брака по сору, рентген- и люмконтролю, что позволило увеличить выход годных отливок в среднем на 8...15%. Микроструктура отливок плотная, среднезернистая, без литвенных дефектов, механические свойства и жаропрочность полностью соответствуют ТУ. На ЧАЗе пенокерамические фильтры использовали при заливке отливки "Рабочее колесо" из сплава ВЖЛ12У-ВИ. Выход годных отливок увеличился на 5...12% от залитого, наличие неспаев и недоливов не отмечалось.

На базе лабораторных образцов спроектировано промышленное оборудование для изготовления пенокерамических фильтров в производственных условиях. При получении отливки "Рабочее колесо" в печи УППФ-3 была создана защитная атмосфера за счет подачи в нее аргона марки А с объемным расходом 6...8 л/с. Анализ опытных отливок показал снижение на 12...14% количества поверхностных дефектов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. При литье жаропрочных никелевых сплавов в вакууме 0,13...1,33Па создаются благоприятные условия для физико-химического взаимодействия в системе металл-форма за счет высокотемпературного прогрева керамических форм и стержней, а также длительного нахождения в них металла при $T > T_c$.

Выявлено, что в плавно-заливочных установках протекают процессы интенсивного неконгруэнтного испарения огнеупорных и примесных оксидов формы и тигля. Расчетным методом установлено, что наименее устойчивыми являются оксиды марганца, железа, натрия и кремния. Давление их паров при температуре выше 1750°C превышают 0,133Па. Убыль массы оксидов наблюдается как на экспериментальной высокотемпературной вакуумной установке, так и непосредственно в печи ПМП-2.

2. Исследованиями процесса испарения компонентов из расплава ЖСб-К установлено, что давление таких компонентов как Al, Co, Ni и Cr превышает 1,33Па, что обеспечивает их высокую скорость испарения.

Показано, что процессы испарения Al и Cr протекают в кинетической области, а титана - в переходной, когда скорость процесса лимитируется как его диффузией в сплаве, так и самим актом испарения. Экспериментально подтверждено, что наибольшая убыль характерна для Al, Co и Cr из расплава в вакууме при 1843К и составляет 0,08...0,28%.

3. Возгонка компонентов из сплава и окисление их газообразными оксидами кремния и углерода, образующимися в результате испарения и восстановительных реакций, приводит к образованию в плавленном тигле и в форме оксидных плен, которые провоцируют на отливках поверхностные дефекты, поражающие тело отливок включениями, что в большинстве случаев приводит к браку отливок. Кроме того, часть продуктов реакции испарения оксидов формы вызывает насыщение поверхностного слоя отливок различными

элементами. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что поверхностные дефекты включают кремний, железо, титан, а в ряде случаев и кальций.

4. Для подавления процессов испарения компонентов сплава, а также оксидов из формы и тигля предложено использование в плавно-заливочных установках защитной инертной атмосферы с давлением в 133Па. Рассчитаны физические параметры аргона, гелия и их смеси при различных температурах и давлениях. Установлено, что при указанном давлении практически на два порядка снижается скорость испарения составляющих формы и тигля. Определенном кислородных потенциалов оксидов Al, Cr и Ti произведена оценка их устойчивости при разных парциальных давлениях кислорода, которая подтвердила снижение вероятности окисления компонентов сплава при использовании защитной атмосферы.

5. Анализ действующего технологического процесса изготовления керамических стержней показал, что основным принципом получения легкоудаляемых керамических стержней методом твердофазного спекания, применяемых в производстве лопаток, является использование керамических кварце-корундовых смесей.

Исследованы свойства различных керамических масс для изготовления стержней. Установлено, что спеченная при температурах 1450...1500°C керамическая смесь корунда с 45...50% кварца может быть удалена из отливки в кипящих растворах щелочей.

6. Для твердофазного спекания стержневых смесей предложено вводить в них алюминиевый порошок марки АСД-4 и возгон шамотного производства.

Рентгенофазовым анализом исходного и прокаленного при 950...1000°C шамотного возгона (ШВ) показано, что оба материала являются аморфными. С повышением температуры прокалики выше 1200°C начинается образование муллита, а при $T=1400^{\circ}\text{C}$ наблюдается полная муллитизация шамотного возгона, что и обеспечивает прочностные свойства стержня.

Дифференциально-термическими исследованиями ШВ определили потери массы при 120°C и 560°C. В первом случае происходит удаление адсорбированной влаги, а во втором - оксидов щелочных металлов.

7. Дифференциально-термический анализ АСД-4 показал, что окисление порошка происходит поэтапно. Наибольшая скорость окисления наблюдается при 550...650°C в результате перехода аморфной модификации Al_2O_3 защитной

пленки в γ -модификацию, при 660...670°C, когда происходит расплавление алюминия, и при 1000...1200°C в результате разрыва защитной пленки из-за высокого давления паров металла. При 1400°C заканчивается полное окисление порошка с образованием α -фазы и формирование прочностных свойств стержня.

8. Разработан оптимальный состав керамической смеси для изготовления сложнопрофильных тонкостенных стержней литых лопаток ГТД, в том числе получаемых в печах направленной кристаллизации ПМП-2, позволяющий удалить стержень из полости отливки в растворах щелочей.

Для улучшения технологичности производства стержневой смеси произведена оптимизация способа ввода пластификатора в стержневую смесь с большой удельной поверхностью. С целью повышения прочности, термической стойкости стержней заливки определены оптимальные параметры нанесения на их поверхность защитного покрытия из ZrO_2 , Al_2O_3 методом плазменного напыления.

9. Термодинамические расчеты равновесного содержания кремния в сплавах ЖС30У-ВИ показали, что при $T=1600...2100K$ насыщение сплава кремнием со стороны стержня за счет взаимодействия кремнезема с алюминием сплава маловероятно, т.к. равновесные концентрации кремния при данных условиях не превышают 10-8%.

Микрорентгеноспектральный анализ подтвердил отсутствие насыщения стенки отливки кремнием со стороны стержня.

10. Анализ действующего технологического процесса литья лопаток позволил установить основные причины брака отливок по засорам. Одной из главных причин является сор из плавильного тигля в виде оксидных плен алюминия, титана, хрома, частиц самого тигля и включений из используемого возврата.

Для рафинирования расплава в процессе заливки предложено использование пенокерамических фильтров, отличающихся высокой извилистостью пор и большой площадью контакта с жидким металлом.

В качестве моделей для изготовления фильтров был применен открытопористый пенополиуретан марки ППУ-Э0-100 ТУ6-05-5127-82. Дифференциальный термический анализ пенополиуретана показал, что при $T>280^\circ C$ начинается его плавление, термодеструкция и возгонка, которые полностью заканчиваются при $T=580...600^\circ C$.

11. Проведен теоретический анализ процесса рафинирования металлических расплавов через пенокерамические фильтры. Рассчитаны скорости ламинарной и турбулентной фильтрации в порах различного размера, получены значения допустимой скорости ламинарной и турбулентной фильтрации в порах различного размера с учетом предотвращения смывания включений с поверхности фильтра. Показано, что при фильтрации металла следует обеспечивать максимальную скорость фильтрования, соблюдая ламинарный режим. Это условие является определяющим при расчете оптимального размера фильтра.

12. Разработан оптимальный состав керамической суспензии на диалкилдиатомном связующем и технология изготовления из нее пенокерамических фильтров. Для обеспечения твердофазного спекания в суспензию вводятся порошки TiO_2 и АСД-4 соответственно в количестве 1...3% и 2...8% от массы электрокорундового наполнителя. Рентгенофазовый анализ прокаленных при 1550...1600°C фильтров показал, что их основными составляющими являются корунд, муллит и рутил. Это обеспечивает высокую прочность фильтров до 3,5 МПа на сжатие и 2,4 МПа на изгиб.

13. Проведено промышленное опробование и внедрение разработанных технологий изготовления легко удаляемых в растворах щелочей керамических стержней, а также пенокерамических фильтров. В печах ПМП-2 получены годные допатки с опытными стержнями. Заливка лопаток в УППФ-3 из сплавов ЖС6-К, ЖС6У-ВИ позволяет снизить их брак по засорам на 8...15%.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кулаков Б.А., Александров В.М., Дубровин В.К., Кулаков А.Б., Кочетова Г.Х. // Внутриформенное фильтрационное рафинирование жаропрочных никелевых сплавов // Вопросы теории и технологии литейных процессов: Сб. научн. тр. - Челябинск: ЧГТУ, 1993. - С.54-58.

2. Кулаков Б.А., Александров В.М., Дубровин В.К., Кулаков А.Б. // Снижение дефектности отливок по неметаллическим включениям // Цветная металлургия. - №3-4. - 1993. - С.49-55.

3. Дубровин В.К., Александров В.М., Кулаков А.Б. // Опыт применения пенокерамических фильтров при литье жаропрочных сплавов // Оптимизация

технологических процессов и управление качеством при производстве фасонных отливок: Тез. докл.- Ярославль: РАТИ, 1993.-С.64-65

4. Кулаков Б.А., Дубровин В.К., Кулаков А.Б., Знаменский Л.Г. Пути снижения дефектности отливок из никелевых сплавов при литье по выплавляемым моделям// Литейное производство.- 1995 - №10 - С.24-25

5. Кулаков Б.А., Дубровин В.К., Кулаков А.Б. Формирование термохимически устойчивых систем при литье литаковых и жаропрочных никелевых сплавов// Фундаментальные проблемы металлургии. Междунар. науч. техн. конфер. Тез. докл.- Екатеринбург, 1995 - С.61-62

6. Кулаков Б.А., Дубровин В.К., Знаменский Л.Г., Кулаков А.Б. Технология изготовления отливок из жаропрочных никелевых сплавов// II Международная специализированная выставка "Металлургия-96" Тез. докл.- Челябинск, 1996.- С.39.

7. Дубровин В.К., Гойхенберг Ю.Н., Иткин З.Я., Кулаков А.Б. Трещинообразование на литых турбоколесах из никелевых сплавов. Повышение качества отливок: Тез. конфер. литейщиков Уральского региона. Екатеринбург, 1996.- С.72.

8. Дубровин В.К., Кулаков А.Б., Знаменский Л.Г. Перспективы развития прогрессивных технологий литья лопаток газотурбинных двигателей// Вопросы теории и технологии литейных процессов: Сборник научных трудов. Челябинск: ЧГТУ, 1996.- С.14-20.

9. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №95121958/02. Способ приготовления этилсиликатного связующего/ Л.Г.Знаменский, Б.А.Кулаков, В.К.Дубровин, А.Б.Кулаков- 1996.

10. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 96109811/02 (015860). Смесь и способ изготовления литейных керамических стержней/ Б.А.Кулаков, Л.Г.Знаменский, В.К.Дубровин, А.Б.Кулаков - 1996.

ЛР № 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 24.01.92. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 0,93. Ум.-лрд. л.0,93. Тираж 100 экз. Заказ 9/27.

УОП издательства. 454080, г.Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 26.