

Ш 86722

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и  
ордена Трудового Красного Знамени государственный  
технический университет имени Н. Э. Баумана

---

На правах рукописи

Кляцкин Андрей Станиславович

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЛЕГИ-  
РОВАННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ И РАЗРА-  
БОТКА НА ЭТОЙ ОСНОВЕ ЖАРОПРОЧНОГО СВАРИВАЕМОГО СПЛАВА.

05.16.01. - Металловедение и термическая обработка металлов.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*А. Кляцкин*

Москва, 1991

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени Научно-производственном Объединении "Композит".

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Пастухова Ж. П.

Научный консультант: кандидат технических наук  
Пономарев Ю. И.

Официальные оппоненты: д. т. н., проф. Добаткин В. И.  
к. т. н. Алашкин А. А.

Ведущее предприятие - НПО "Энергомаш" (г. Химки)

Защита состоится "16" XI 1992 г. на заседании специализированного совета К 53.15.13. Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв в 1 экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно

Телефон для справок

Автореферат разослан

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
специализированного совета  
кандидат технических наук

Заказ 520 Объем 1 п. л.  
Типография МГТУ, 10700

И 86722

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Актуальной проблемой современного авиакосмического двигателестроения, связанной с повышением мощности и КПД двигателя, является создание жаропрочных материалов, работоспособных до температур 800-850°C с уровнем кратковременной прочности не менее 800 МПа и часовой длительной прочности не менее 500 МПа.

Для несварных конструкций (диски роторов, валы) такие материалы созданы: ЭП 741 НП, ЭП 962 П, IN 100, Mø1 76 и др.

Для сварных конструкций: корпуса турбонасосных агрегатов (ТНА), газогенераторов (ГГ), сопловые аппараты и т.п., сплавов с указанным уровнем свойств как в СССР, так и за рубежом нет.

Используемые в настоящее время для сварных узлов промышленные жаропрочные сплавы: ЭП 666, ЭП 202, ВЖЛ 14, имеют высокую прочность лишь до температур 650-700°C. При температуре 800°C наблюдается их резкое разупрочнение до 400, 560, 600 МПа, соответственно.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что основной путь повышения жаропрочности сплавов на никелевой основе - достижение более высокого уровня легирования. Однако, с повышением степени легирования сплавов возникают проблемы снижения технологической пластичности и ухудшения свариваемости, которые практически неразрешимы, если сплавы изготавливать с применением традиционных методов.

Достижения последних лет показывают, что проблемы получения деталей из высоколегированных сплавов могут быть решены на основе применения технологий сверхвысоких скоростей охлаждения жидкого металла, одной из разновидностей которых является технология металлургии гранул. В основе этой технологии находится способ получения микрослитков (гранул размерами 100-300 мкм) со скоростью охлаждения 1000 °C/с, из которых в дальнейшем методом горячего изостатического прессования (ГИП) получают заготовки практически со 100% плотностью. Заготовка при этом отличается однородным химическим составом, мелкозернистой структурой и изотропными свойствами. Высокие скорости охлаждения позволяют значительно увеличить пересыщение твердого раствора на основе никеля, повысить дисперсность и равномерность распределения вторичных фаз.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1086722

Кляцкин А.С. Изучение зак

Это открывает широкие возможности управления свойствами жаропрочных сплавов на основе никеля.

Поэтому в данной работе метод металлургии гранул принят основным средством для достижения поставленной цели.

Однако, при использовании данной технологии возникают свои проблемы, главной из которых является проблема устранения в гранулированном сплаве наследственных границ гранул, приводящих к нестабильности свойств, ухудшению свариваемости. Поэтому, прежде, чем приступить к разработке состава сплава, необходимо было установить причины образования наследственных границ гранул и дать рекомендации по выбору состава гранулированного сплава, лишенного этого недостатка.

Таким образом, разработка жаропрочного свариваемого сплава для корпусных деталей жидкостных ракетных двигателей, работоспособных при температуре 800°C и решение, связанных с этим проблем, является весьма актуальной задачей.

Цель работы: изучение закономерностей формирования структуры высоколегированных гранулированных жаропрочных никелевых сплавов и разработка на этой основе жаропрочного гранулированного свариваемого никелевого сплава с  $\sigma_b^{800} > 1300$  МПа;  $\sigma_b^{800} > 800$  МПа;  $\sigma_1^{800} > 500$  МПа.

Научная новизна. Установлено, что:

1. Применение метода металлургии гранул для получения заготовок, легирование Ni-Cr основы 4-5%(мас.) Al, 5,0-7,0%(мас.) Co, 2,0-3,1%(мас.) Nb, 7,5-8,5%(мас.) Mo, 0,3-0,5%(мас.) Hf и использование замедленного охлаждения из однофазной области при термической обработке сплава - **в комплексе** позволяет добиться удовлетворительной свариваемости при содержании в жаропрочных никелевых сплавах 35-40% (об.) упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

2. Легирование жаропрочных гранулированных сплавов системы Ni-Cr-Al-Co-Mo ниобием в количествах, превышающих 3,1% мас. приводит к выделению в их структуре после старения в интервале температур 800-1000°C охрупчивающей орторомбической фазы  $Ni_3Nb$ .

3. Режим термической обработки жаропрочных гранулированных сплавов системы Ni-Cr-Al-Co-Mo-Nb, состоящий в охлаждении с печи со скоростью 1,5-2 °C/мин. и последующем старении способствует равномерному распределению карбидов в структуре, исключает выде-

ление их в виде сплошных цепочек по границам зерен и тем самым повышает пластичность сплавов в интервале температур 650-850°C.

4. Причина образования неустраимых наследственных границ гранул в структуре гранулированных жаропрочных никелевых сплавов системы Ni-Cr-AL-Ti-Fe-Mo при содержании в них одновременно не менее: 18% (мас.) Cr, 8% (мас.) Fe, 1,5% (мас.) Ti, заключается в формировании на поверхности гранул в процессе распыления сплава оксидов типа (Ti,Fe,Cr)хОу.

#### Практическая ценность:

Разработан состав и основные технологические параметры изготовления жаропрочного гранулированного свариваемого сплава на никелевой основе (АЖК).

Применение сплава для изготовления корпусных деталей газотурбинных двигателей позволит:

- повысить рабочие температуры в ТНА с 650°C до 800-850°C;
- повысить ресурс ТНА в 3-4 раза;
- снизить вес жидкостных ракетных двигателей на 10-30 %;

#### Апробация работы:

Материалы диссертации доложены на конференциях молодых ученых и специалистов НПО "Композит" (Москва, 1986, 1988, 1990 гг.); X Молодежной научно-технической конференции (Воронеж, КВ Химавтоматика, 1988 г.); на 2 Всесоюзной конференции по металлургии гранул (Москва, ВИЛЮ, 1987 г.); 1 Всесоюзном симпозиуме "Новые жаропрочные и жаростойкие материалы" (Звенигород, 1989 г.) и др.

#### На защиту выносятся следующие положения:

1. Принципы легирования гранулированных свариваемых жаропрочных сплавов на основе никеля.
2. Методологический подход к разработке жаропрочных сплавов с применением расчетных и экспериментальных методов.
3. Жаропрочный гранулированный свариваемый никелевый сплав АЖК с  $\sigma_{\text{с}} > 1300$  МПа;  $\sigma_{\text{с}}^{\text{800}} > 800$  МПа;  $\sigma_{\text{т}}^{\text{800}} > 500$  МПа.
4. Технологические параметры ГИП и режим термической обработки сплава АЖК.
5. Зависимости структуры и свойств жаропрочных никелевых гранулированных сплавов от состава и режимов термической обработки.

Публикации: По результатам выполненных исследований имеется 11 публикаций, включая четыре авторских свидетельства.

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений, изложена на 140 страницах машинописного текста, включает 38 рисунков, 21 таблицу. Список литературы содержит 116 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, ставится цель работы.

В первой главе приведен литературный обзор, в котором: рассмотрены тенденции разработки жаропрочных сплавов на основе никеля для авиакосмической техники; показаны возможности и преимущества метода металлургии гранул для производства заготовок из жаропрочных никелевых сплавов, особенности гранулированных сплавов на основе никеля, некоторые характеристики отечественных и зарубежных сплавов; изложены данные о принципах легирования жаропрочных никелевых сплавов, влиянии легирующих элементов, микродобавок и примесей на стойкость сварных соединений против образования трещин; представлено современное состояние расчетных методов прогнозирования фазового состава и механических свойств жаропрочных сплавов на основе никеля в зависимости от химического состава.

Проведенный анализ научно-технической литературы позволяет сделать вывод, что задача создания жаропрочного свариваемого сплава с  $\sigma_s > 1300$  МПа;  $\sigma_s^{800} > 800$  МПа;  $\sigma_1^{800} > 500$  МПа может быть решена на основе следующих положений:

1. Определяющие прочность и пластичность жаропрочных никелевых сплавов:

1) для максимального упрочнения  $\gamma$ -твердого раствора необходимо легирование элементами, создающими большие статические искажения решетки;

2) для эффективного упрочнения сплавов в результате дисперсионного твердения сплава необходимо обеспечить значительное пересыщение твердого раствора при минимальном несоответствии параметров решеток  $\gamma$ -твердого раствора и интерметаллидной  $\gamma'$ -фазы, выделяющейся равномерно и упорядоченно в виде квазипериодических микрорешеток.

3) при термической обработке сплавов должна быть достигнута высокая степень гомогенизации твердого раствора, обеспечивающая при его распаде равномерное выделение упрочняющих фаз по всему объему зерен. При этом, необходимо исключить возможность образования по границам зерен плёночных выделений MC карбидов и карбидов типа  $M_{23}C_6$  в виде грубых непрерывных цепочек;

II. Для обеспечения хорошей свариваемости жаропрочных никелевых сплавов необходимо:

1) получение равномерной мелкозернистой структуры;

2) чтобы характеристики пластичности сплава значительно не снижались в интервале температур старения, поэтому сплавы должны иметь пониженную скорость выделения упрочняющих фаз на начальном этапе старения, чтобы в процессе сварки в околошовной зоне сохранялась способность к релаксации напряжений.

III. Наконец, использовать в качестве основного технологического процесса при изготовлении заготовок метода металлургии гранул. Для их изготовления следует применять методы центробежного или ультразвукового распыления жидкого металла при получении гранул и использовать горячее изостатическое прессование для компактирования их в газостатах.

Кроме того, для рационального решения задачи, при разработке химического состава сплава целесообразно использование расчетных методов прогнозирования фазового состава и механических свойств с применением ЭВМ.

Однако, только этих положений недостаточно для создания жаропрочного свариваемого никелевого сплава с указанными выше свойствами без исследования особенностей гранулированных сплавов на основе никеля, главной из которых является существование в их структуре областей контакта между поверхностными слоями гранул, без выяснения причин образования наследственных границ гранул и без нахождения путей устранения этих границ, или недопущения их образования.

Анализ состояния вопроса, исходя из цели работы, позволил сформулировать задачи исследования:

1) Изучение факторов, определяющих состояние поверхности гранул, приводящих к межгранульному разрушению.

2) Выбор системы легирования жаропрочного гранулированного

свариваемого никелевого сплава, исключающей возможность межгранульного разрушения. Разработка модельного состава сплава с применением расчетных и экспериментальных методов исследования. Изучение закономерностей выделения в нем избыточных фаз из  $\gamma$ -твердого раствора при охлаждении из однофазной области и изотермических выдержках в интервале температур 600 - 1200 °C.

3) Выбор оптимального состава жаропрочного гранулированного никелевого сплава, разработка режимов ГИП и термической обработки с целью достижения заданного комплекса свойств.

4) Исследование механических свойств и свариваемости заготовок из разработанного сплава.

Во второй главе изложены технологические параметры способа получения материалов исследования и экспериментальные методики изучения структуры и свойств.

Поверхность гранул исследовалась методами рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), вторичной ионной масс-спектрометрии (БИМС), ОЖЕ-спектроскопии.

Микроструктура сплавов исследовалась методом световой микроскопии, тонкая структура - методом просвечивающей электронной микроскопии, поверхность изломов образцов - электронно-фрактографическими методами.

Для определения температур фазовых переходов в сплаве по величине изменения размеров образца использовался dilatометрический метод. Идентификация фаз, выделяющихся при термической обработке, проводилась металлографически или методами просвечивающей электронной микроскопии.

Сравнительная оценка свариваемости сплавов проводилась на жестких кольцевых пробах  $d=100$  мм и толщиной 10 мм. Исследовалась свариваемость аргоно-дуговой и электроно-лучевой сваркой.

Испытания механических свойств сплавов проводили по стандартным методикам.

При разработке композиции жаропрочного свариваемого никелевого сплава использовался программный комплекс (рис. 1.).

В третьей главе приведены результаты исследования причин образования наследственных границ гранул в жаропрочных гранулированных никелевых сплавах, приводящих к нестабильности свойств заготовок и образованию трещин при сварке.

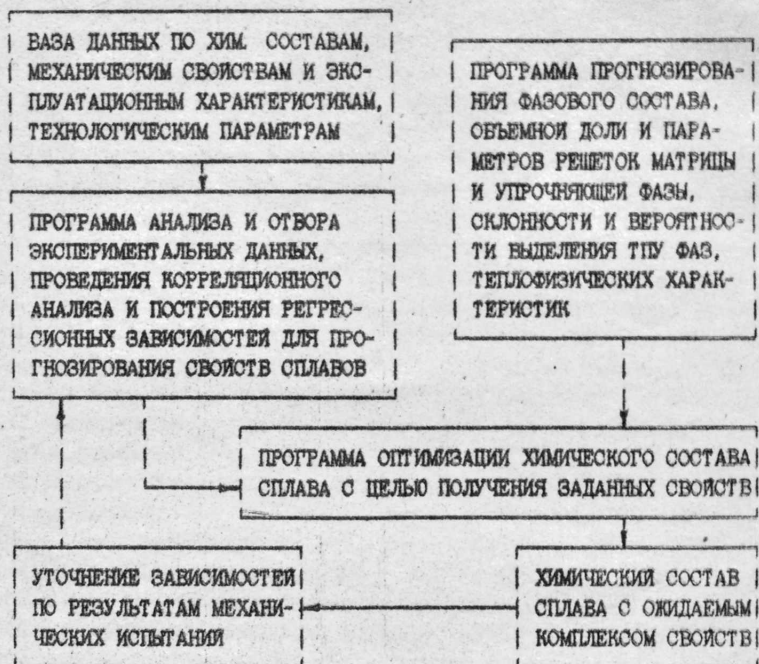


Рис. 1. Программный комплекс по разработке жаропрочных сплавов с заданным уровнем свойств

Анализ отечественного и зарубежного опыта создания жаропрочных никелевых гранулированных сплавов показывает, что можно выделить две причины существования наследственных границ гранул:

- выделение на поверхности гранул пленочных карбидных фаз за счет поверхностной сегрегации углерода из внутреннего объема гранул;
- образование оксидных фаз на поверхности гранул в процессе их производства.

Если факторы, приводящие к образованию карбидных фаз на поверхности гранул изучены, способы их устранения известны и успешно применяются, то причины образования на поверхности гранул ок-

сидных фаз, их природа, изучены недостаточно и до сих пор непонятно, почему у одних сплавов эти границы наблюдаются, а у других нет при одинаковых условиях производства.

Исследованию подвергались гранулы и компактные заготовки из сплавов: ЭП 741 НП системы Ni-Cr-Co-Mo-W-Nb-Al-Ti-Nf, в структуре которых наследственных границ гранул не наблюдается и ВЖЛ-14МП системы Ni-Cr-Fe-Mo-Al-Ti-V, в которых эти границы присутствуют всегда.

Сравнительный анализ распределения кислорода по глубине гранул сплавов ЭП 741 НП и ВЖЛ-14 МП, проведенный методом ВИС, показал, что у гранул сплава ВЖЛ-14 МП концентрация кислорода на некотором протяжении по глубине остается постоянной, в то время как, для гранул сплава ЭП 741 НП постоянно меняется. Анализ масс-спектров с поверхности гранул сплава ВЖЛ-14 МП обнаружил присутствие, вместе с ионами легирующих элементов, сложных ионов:  $TiO^+$ ,  $TiO_2^+$ ,  $CrO^+$ ,  $CrO_2^+$ ,  $CrO_3^+$ ,  $FeO^+$ ,  $FeO_2^+$ , что позволяет высказать предположение о наличии на поверхности гранул ВЖЛ-14 МП оксидной фазы сложного состава -  $(Ti, Cr, Fe)xOy$ .

Анализ Оже-спектров с поверхности гранул и межгранульного излома образцов из сплава ВЖЛ-14 МП показал идентичность их химических составов, что указывает на сохранение оксидной фазы в компактной гранулированной заготовке, а расшифровка пиков с энергией 390 эВ, соответствующих титану, - что Ti находится в нестехиометрической связи с кислородом, что подтверждает наличие на поверхности гранул сложного оксида.

Таким образом, причиной сохранения в компактных заготовках сплава ВЖЛ-14МП наследственных границ гранул является образование при распылении на поверхности гранул оксидов  $(Ti, Cr, Fe)xOy$ .

Анализ химических составов отечественных и зарубежных промышленных гранулированных жаропрочных сплавов показал, что они не содержат одновременно титана, хрома и железа, с чем, вероятно, и связано отсутствие в литературе данных о неустраняемых наследственных границах гранул, вызванных оксидными фазами. В то же время, отсутствие границ гранул наблюдалось в заготовках, полученных методом металлургии гранул из сплава ЭП 666, который не содержит в своем составе титана, но содержит такие-же количества хрома и железа, что и сплав ВЖЛ-14 МП.

Следовательно, можно заключить, что необходимым условием возникновения наследственных границ гранул в заготовках из гранулированных жаропрочных никелевых сплавов является **совместное** содержание в их составе Ti, Cr и Fe свыше некоторого предела.

Это было учтено при разработке композиции жаропрочного никелевого сплава с заданными свойствами.

В четвертой главе изложены положения математической модели оптимизации состава сплава по заданному уровню свойств, с помощью которой установлена система легирования жаропрочного свариваемого гранулированного никелевого сплава и выбран его модельный состав.

В качестве критериев оптимизации использовались:

1) механические свойства сплава :

- предел прочности при  $20^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_b$ ) и при  $800^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_b^{800}$ );
- предел текучести при  $20^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_{0.2}$ ) и при  $800^{\circ}\text{C}$  ( $\sigma_{0.2}^{800}$ );
- ударная вязкость при  $20^{\circ}\text{C}$  (KCU);
- относительное сужение при  $20^{\circ}\text{C}$  ( $\Psi$ );

2) критерии свариваемости: максимальная протяженность и максимальное количество трещин (Lтр. max и Nтр. max соответственно);

3) параметр, определяющий склонность сплава к выделению топологически плотно упакованных (ТИУ) фаз (Nv);

4) объемная доля упрочняющей  $\gamma'$ -фазы (f).

В качестве независимых переменных принимали содержание легирующих элементов в сплаве.

При проведении множественного регрессионного анализа было рассмотрено около 150 сплавов на никелевой основе, составы которых находились в следующих пределах (мас. %):

|                |          |           |
|----------------|----------|-----------|
| C < 0,7        | Si < 1,0 | Mn < 1,5  |
| Cr = 7,56-25,0 | W < 14,0 | Mo < 17,0 |
| V < 1,0        | Ti < 4,0 | Al < 5,8  |
| Co < 29,0      | Nb < 9,0 | Fe < 18,5 |
| Ni < 1,25      | B < 0,02 | Ce < 0,45 |

В результате проведенных расчетов определялись связи между характеристиками механических свойств, свариваемости сплава и его химическим составом. Наличие или отсутствие корреляционной связи определяли по значениям коэффициентов парной корреляции. В результате проведенного анализа были получены регрессионные уравнения (приведены в диссертации), позволяющие получить численные

значения характеристик свариваемости и механических свойств в зависимости от химического состава сплава. Расчеты проводились на ЭВМ АТ/РС. Состав одного из рассчитанных модельных сплавов, названного ЖС1, который был выбран для дальнейших исследований, представлен в табл. 1.

Таблица 1.

| Условное название сплава | Химический элемент, мас. % |       |       |       |       |       |      |
|--------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|                          | Ni                         | C     | Cr    | Mo    | Co    | Nb    | Al   |
| ЖС-1,<br>расчет          | основа                     | 0,01  | 15,0  | 17,5  | 15,0  | 13,5  | 14,0 |
|                          |                            | 0,04  | 16,0  | 18,5  | 17,0  | 14,5  | 15,0 |
| фактически               | основа                     | 0,025 | 15,47 | 18,41 | 15,76 | 13,66 | 14,9 |

Значения критериев оптимизации задавались в следующих пределах:

$\sigma_B = 1200-1400$  МПа,  $\sigma_{4.2} = 800-1000$  МПа,  $\sigma_s^{800} = 800-1000$  МПа,  $\sigma_{a,2}^{800} = 600-800$  МПа,  $KCU = 0,4-0,6$  МДж/м<sup>2</sup>,  $Ltr. max = 0$ ,  $Ntr. max = 0$ ,  $\psi = 15-30\%$ ,  $\varphi > 30\%$  (об.);  $Nv < 2,31$ .

Исследования стойкости к образованию горячих трещин, проведенные при сварке электронным лучем жесткой кольцевой пробы из сплава ЖС 1 показали, что по выбранным критериям свариваемости модельный сплав находится на уровне широко известного сплава Inconel 718. Фактически полученные значения механических свойств заготовок из сплава ЖС1 представлены в таблице 2.

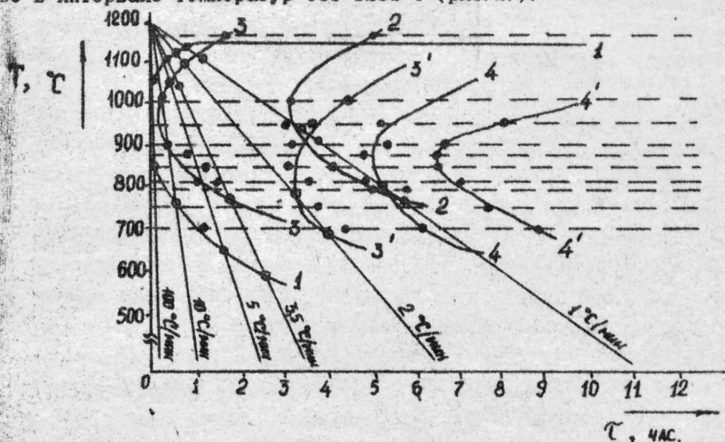
После термической обработки, принятой для жаропрочных никелевых сплавов: нагрев в однофазную область  $\gamma$ -твердого раствора, охлаждение на воздухе и старение все механические свойства сплава соответствуют расчетному интервалу. В микроструктуре сплава наследственных границ гранул нет, так как на поверхности гранул не было оксидов. Излом образцов вязкий, но с элементами квазискола. Обращает на себя внимание снижение пластичности сплава при температуре испытания 800°C. При этом, при высокотемпературных испытаниях признаков хрупкого разрушения noticeably больше, чем при температуре испытания 20°C.

Таблица 2.

| Услов-<br>ное на-<br>звание<br>спла-<br>ва | Состояние<br>материала<br>3-закалка<br>С-старе-<br>ние | Механические свойства при температуре испытания |                |          |        |                    |            |                |          |        |  |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|----------|--------|--------------------|------------|----------------|----------|--------|--|
|                                            |                                                        | 20 °С                                           |                |          |        |                    | 800 °С     |                |          |        |  |
|                                            |                                                        | $\sigma_B$                                      | $\sigma_{0,2}$ | $\delta$ | $\psi$ | KCU                | $\sigma_B$ | $\sigma_{0,2}$ | $\delta$ | $\psi$ |  |
|                                            |                                                        | МПа                                             | МПа            | %        | %      | МДж/м <sup>2</sup> | МПа        | МПа            | %        | %      |  |
| ЖС 1                                       | ГИП                                                    | 1265                                            | 867            | 16,0     | 15,3   | 0,34               | 881        | 754            | 11,2     | 13,3   |  |
|                                            | ГИП+З                                                  | 1389                                            | 1013           | 22,8     | 27,0   | 0,59               | 931        | 856            | 2,0      | 5,1    |  |
|                                            | ГИП+З+С                                                | 1468                                            | 1100           | 18,8     | 23,7   | 0,45               | 826        | 823            | 2,1      | 2,0    |  |

Пятая глава посвящена описанию результатов изучения причин высокотемпературного охрупчивания сплава ЖС1, проведению его модификации (выбору оптимального состава), разработке режимов ГИП и термической обработки с целью достижения необходимого уровня свойств, а также, опробованию в модельных заготовках.

Для выяснения причин охрупчивания сплава ЖС1 при высокотемпературных испытаниях была изучена кинетика выделения фаз в сплаве в интервале температур 600-1200 °С (рис. 2.).

Рис. 2. Диаграмма превращений  $\gamma$ -твердого раствора сплава ЖС1

На рисунке 2 области: 1-1 - ограничивает выделения  $\gamma'$ -фазы состава  $Ni_3(Al, Nb)$ ; 2-2' - выделения игольчатой интерметаллидной фазы, идентифицированной методом просвечивающей электронной микроскопии как  $Ni_3Nb$ ; 3-3' - выделения вторичных MC карбидов и 4-4' - карбидов  $M_{23}C_6$ . Анализ структурных превращений при распаде в процессе охлаждения  $\gamma$ -твердого раствора сплава ЖС1 из однофазной области и при изотермических выдержках в интервале температур 600 - 1200 °C (рис. 2.) позволил выявить два основных фактора, влияющих на окрупчивание сплава при высоких температурах:

1) Появление фазы  $Ni_3Nb$ , с чем связаны участки квазискола в изломах образцов;

2) Массивные выделения карбидов по границам зерен и связанные с ними участки межзеренного излома.

С целью устранения указанных факторов была проведена модификация сплава ЖС1: снижено на 1% (по массе) количество ниобия в сплаве и введен гафний в количестве 0,3-0,5% (по массе) для образования стойких первичных MC карбидов. Сплав получил название АЖК.

Выбор режима ГИП сплава АЖК осуществлялся путем проведения однофакторного эксперимента по температуре ГИП - как лимитирующего фактора, влияющего на качество компактной заготовки. Исследовался интервал температур 1120-1180 °C с шагом в 20 °C. Установлено, что максимум по кратковременным механическим свойствам сплава при температуре испытания 800 °C приходится на  $T_{ГИП}=1140$  °C. Режим ГИП:  $T=1140$  °C,  $t=3$  ч.,  $P=160$  МПа выбран как оптимальный.

Режим термической обработки сплава АЖК выбирался исходя из диаграммы фазовых превращений (рис. 2.). Исследования механических свойств заготовок проводились после термообработки по режимам: нагрев при  $T=1180$  °C, 4ч., охл. на воздухе или с печью (1,5-2 °C/мин.), старение при 700 °C и (или) 820 °C 16 ч., охл. на воздухе. Показано, что лучшие механические свойства сплава по пластичности при  $T_{исп.}=800$  °C при прочностных свойствах, удовлетворяющих техническому заданию, получены после режима термической обработки: отжиг при  $T=1180$  °C, 4ч., охл. с печью (1,5-2,0 °C/мин.) до 700 °C, выдержка при этой температуре 16 ч., охл. на воздухе и старение при 820 °C, 16ч., охл. на воздухе.

Установлено, что при охлаждении с печью из однофазной области и последующем старении карбиды по границам зерен в структуре

сплава АЖК распределены более дискретно, чем после охлаждения на воздухе и старения.

Партия заготовок из сплава АЖК, изготовленная по разработанной технологии, прошла механические испытания в НПО "Композит" и КБ "Энергомаш", свариваемость сплава исследовалась на жестких кольцевых пробах аргоно-дуговой сваркой (АДС) в НПО "Композит" и на модельных заготовках электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) в НИИ Двигателестроения. Механические характеристики сплава АЖК представлены в табл. 3.

Таблица 3  
Механические свойства заготовок из сплава АЖК

| N<br>заг. | T исп.,<br>°C | $\sigma_b$<br>МПа | $\sigma_{0,2}$<br>МПа | $\delta$<br>% | $\psi$<br>% | $\sigma_1$<br>МПа | $\sigma_{2,5}$<br>МПа |
|-----------|---------------|-------------------|-----------------------|---------------|-------------|-------------------|-----------------------|
| A12       |               | 1336,0            | 900,0                 | 14,5          | 11,4        | -                 | -                     |
| A13       |               | 1328,0            | 910,0                 | 14,6          | 12,0        | -                 | -                     |
| A17       |               | 1366,0            | 900,0                 | 16,6          | 12,4        | -                 | -                     |
| A20       | 20            | 1320,0            | 898,0                 | 13,5          | 11,1        | -                 | -                     |
| A21       |               | 1338,0            | 904,0                 | 13,7          | 11,1        | -                 | -                     |
| A14       |               | 1334,0            | 882,0                 | 15,6          | 12,4        | -                 | -                     |
| A14       | 750           | 963,3             | 764,0                 | 17,7          | 17,48       | 725               | 655                   |
| A14       | 800           | 850,5             | 736,4                 | 14,3          | 15,8        | 550               | 470                   |
| A14       | 850           | 700,0             | 559,0                 | 13,8          | 13,3        | 350               | 305                   |
| A14       | 900           | 514,0             | 394,0                 | 8,8           | 5,8         | 225               | 175                   |
| T. 3.     | 20            | >1300             |                       |               |             |                   |                       |
|           | 800           | > 800             |                       |               |             | > 500             |                       |

После АДС трещин обнаружено не было. Прочность сварных соединений после ЭЛС не отличается от прочности основного металла при комнатной температуре, и составляет 86% от прочности основного металла при температуре испытания 800°C.

## ВЫВОДЫ

1) Разработан гранулированный жаропрочный свариваемый никелевый сплав АЖК состава ( в мас. %): С=0,01-0,04; Cr=15,0-16,0; Мо=7,5-8,5; Со=5,0-7,0; Nb=2,0-3,1; Al=4,0-5,0; Hf=0,3-0,5; Ni-основа и оптимальный режим его горячего изостатического пресования:  $T=1140^{\circ}\text{C}$ ,  $P=160\text{ МПа}$ ,  $t=3\text{ часа}$ .

2) Разработан режим термической обработки сплава АЖК: загрузка в печь при  $T=800^{\circ}\text{C}$ , подъем температуры до  $1180^{\circ}\text{C}$ , выдержка 4 часа, охлаждение с печью ( $1,5-2,0^{\circ}\text{C/мин.}$ ) до  $700^{\circ}\text{C}$ , выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе; загрузка в печь при температуре  $820^{\circ}\text{C}$ , выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе.

3) Сплав АЖК, изготовленный по разработанной технологии превосходит по комплексу свойств отечественные сплавы и не имеет аналогов за рубежом:

$$\sigma_s > 1300\text{ МПа}; \sigma_s^{800} > 800\text{ МПа}; KCU > 0,4\text{ МДж/м}^2$$

$$\sigma_1^{800} = 550\text{ МПа}; \sigma_{2,5}^{800} = 470\text{ МПа}; \sigma_1^{850} = 350\text{ МПа}$$

$$\sigma_{2,5}^{850} = 300\text{ МПа}; \delta^{800} > 10\%; \psi^{800} > 10\%$$

Сплав удовлетворительно сваривается аргоно-дуговой и электронно-лучевой сваркой, при этом прочность сварных соединений сплава после электронно-лучевой сварки не отличается от прочности основного металла при комнатной температуре и составляет более 86 % от прочности основного металла при температуре испытания  $800^{\circ}\text{C}$ .

4) Установлено, что причиной нестабильности механических свойств заготовок из гранулированных жаропрочных никелевых сплавов, а также, образования горячих трещин в околошовной зоне при сварке, является присутствие в их структуре наследственных границ от гранул, на поверхности которых в условиях производства образуется пленка из оксидных или оксинитридных фаз. Их образованию способствует совместное легирование сплавов титаном, хромом и железом, концентрация которых должна быть нормирована.

5) Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать по среднему составу сплава его характеристики и, наоборот, вести поиск состава по заданным свойствам. Модель имеет хорошую сходимость расчетных и фактических значений исследуемых характеристик. Использование математической модели позволило решить оп-

тимизационную задачу по разработке сплава, удовлетворяющего комплексу заданных требований.

6) Изучены закономерности выделения избыточных фаз из твердого раствора никеля в жаропрочных гранулированных сплавах системы Ni-Cr-Co-Mo-Nb-Al в процессе охлаждения из однофазной области и при изотермических выдержках. На этой основе построена диаграмма фазовых превращений при распаде в процессе охлаждения  $\gamma'$ -твердого раствора сплавов упомянутой системы в интервале температур 600 - 1200 °C.

7) Сплав АЖК прошел опробование на предприятиях МОМ и МАП и может эксплуатироваться при температурах 800-850 °C в сварных узлах турбонасосных агрегатов, газогенераторов и т.п. жидкостных ракетных и авиационных двигателей.

По теме диссертации имеются следующие работы:

1. Механические свойства жаропрочного свариваемого сплава ВЖЛ-14 ПМ, полученного методом металлургии гранул / А. С. Кляцкин, В. Г. Степанов, Н. В. Кистя и др. // Тезисы докладов 2 Всесоюзной конференции по металлургии гранул. - М., 1987. - С. 21. - дсп.
2. Механические свойства жаропрочного свариваемого сплава ВЖЛ 14 ПМ, полученного методом металлургии гранул / А. С. Кляцкин, В. Г. Степанов, Н. В. Кистя и др. // Технология: Сб. научных работ ВИМИ. Оборудование, материалы, процессы. - 1988. - Вып. 4. - 80 с. - дсп.
3. Результаты анализа статистических данных по механическим свойствам заготовок из сплава ЭП 741 П. / А. Ф. Азаров, А. С. Кляцкин. // Ракетно-космическая техника: Сб. научных работ НПО "Композит". Материаловедение. - М., 1988. - Вып. 5. - С. 155-160. - дсп.
4. Микроструктура и свойства новых гранулированных свариваемых сплавов на основе никеля. / А. С. Кляцкин, Д. Г. Селиверстов, Ю. А. Рывкин и др. // Новые жаропрочные и жаростойкие металлические материалы: Тезисы докладов 1 Всесоюзного симпозиума. - г. Звенигород, 11-15 мая, 1989 г. - М., 1989. - Часть 3. - С. 21. - дсп.
5. Влияние режимов ГИП на структуру и свойства сплава ЭПБ66. / А. С. Кляцкин, Н. В. Кистя, В. Г. Степанов. // Ракетно-космическая техника: Сб. научных работ НПО "Композит". Материаловедение. - 1990. - Вып. 3. - С. 49-55.
6. Разработка состава жаропрочного свариваемого сплава на основе никеля с применением ЭВМ. / А. С. Кляцкин, Д. Г. Селиверстов, Ю. А. Рывкин и др. // Технология: Сб. научных работ ВИМИ. Оборудова-

нии: материалы, процессы. - 1991. - Вып. 1. - 105с. - деп.

7. Разработка жаропрочных никелевых сплавов, получаемых графитовой металлургией, для двигательных установок: Отчет о НИР (проектный) / НПО "Композит"; руководитель Н. В. Кистя - N О-510-89-07 90-146; Н Г. Р. X63907. - 1990. - 213 с. - деп.

8. А. С. N 1427855, СССР, МКИ С22С 19/05, сплав на основе никеля / Ю. А. Рывкин, А. Н. Осадчий, В. И. Холодный и др. N 4186612; заявл. 26.01.1987; деп.

9. А. С. N 1542065, СССР, МКИ С22С 19/05, сплав на основе никеля / Ю. А. Рывкин, А. С. Кляцкин, В. Г. Степанов и др. N 4468516; заявл. 29.07.1988.; деп.

10. А. С. N 1603806, СССР, МКИ С22С 19/05, сплав на основе никеля / Ю. А. Рывкин, А. С. Кляцкин, В. Г. Степанов. и др. N 4606995; заявл. 17.11.1988.; деп.

11. А. С. N 1669201, СССР, МКИ С22С 19/05, сплав на основе никеля / Ю. А. Рывкин, А. С. Кляцкин, В. Г. Степанов. и др. N 4697399; заявл. 26.05.1989.; деп.