

## Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Бутрима Виктора Николаевича на тему «Развитие научных основ технологии производства и модернизации хромоникелевых сплавов для серийных и перспективных изделий космической техники», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

### **Актуальность темы исследования**

В связи с постоянно растущей потребностью в жаропрочных сплавах, способных работать при температурах более  $1250^{\circ}\text{C}$ , в том числе в условиях воздействия агрессивных сред, в последнее время во всем мире расширяется фронт научных исследований в области фундаментальных и прикладных работ по комплексному изучению жаростойких конструкционных сплавов на основе хрома. Это связано с их сравнительно невысокой по сравнению с другими тугоплавкими металлами удельной плотностью (около  $7200 \text{ кг/м}^3$ ) и высокой стойкостью к окислению на воздухе.

Диссертационная работа Виктора Николаевича Бутрима посвящена решению задачи создания модернизированной технологии производства прессованных прутков из хромоникелевого сплава для изготовления ответственных деталей двигателей космических аппаратов, а также разработке и созданию новых сплавов с повышенными характеристиками жаростойкости и длительной прочности при температурах эксплуатации выше  $1200^{\circ}\text{C}$ . Содержание работы связано с научным обоснованием новых и модернизированных технологических режимов вакуумно-индукционной выплавки слитков повышенной чистоты, рафинирующего электрошлакового переплава для уменьшения количества и измельчения неметаллических включений, оптимизации режимов термической обработки, а также обработки давлением и резанием. При этом в задачи завершающего этапа работы входило создание малотоннажного производства прутков и

внедрение хромоникелевого сплава для производства деталей термokatалитических двигателей космических аппаратов.

Следует специально отметить, что для решения указанных выше научно-технических проблем в диссертационной работе использованы наиболее информативные современные экспериментальные методы исследований в сочетании с компьютерным моделированием и привлечением в нужных случаях методов математической статистики при обработке экспериментальных результатов. Все это, безусловно, свидетельствует о высоком научно-техническом уровне диссертационной работы и её несомненной актуальности.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация содержит введение, 7 оригинальных глав, выводы, список используемых источников и приложения. Содержание диссертации изложено на 312 страницах, включая 128 рисунков, 63 таблицы, 255 наименований используемой литературы и 33 страницы приложений. Материалы диссертации опубликованы в 58 статьях, из которых 20 в журналах, рекомендованных ВАК, и 15 статей в рецензируемых англоязычных журналах, часть из которых являются журналами самого высокого уровня для публикации материаловедческих и металлофизических научных исследований. Результаты диссертационной работы доложены на 20 международных и отраслевых научно-технических конференциях и хорошо известны, как и сам автор диссертации, отечественному и международному сообществу материаловедов. Технические решения защищены 10 патентами РФ, что еще раз подтверждает новизну и актуальность диссертационного исследования и его практическую значимость для развития российской науки и техники.

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована цель диссертационной работы, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены имеющиеся литературные данные о влиянии легирующих элементов тугоплавких и переходных металлов на эксплуатационные свойства исследуемых материалов. При этом основное внимание уделено анализу информации о сплавах на основе хрома, оценке их работоспособности при одновременном воздействии температуры и нагрузки в применении к возможному использованию в качестве материалов для изготовления различных деталей и узлов конструкций двигателей космической техники. Подробно рассмотрены основные особенности технологий выплавки и деформационной обработки сплавов на основе хрома, выбраны базовые технологии и составы сплавов, сформулированы задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены результаты исследований влияния режимов вакуумно-индукционной выплавки и электрошлакового переплава слитков из хромоникелевого сплава на содержание газовых примесей и неметаллических включений. Обоснованы оптимальные параметры указанных режимов, позволяющие понизить содержания в получаемом (в том числе с использованием оригинальных технологий плавки и механико-термических обработок) сплаве примесей внедрения до возможного минимума при одновременном уменьшении размера неметаллических включений. Установлены допустимые концентрации никеля в разработанном сплаве, соответствующие минимальной объемной доле формирующейся эвтектической фазы, что позволило существенно увеличить пластичность сплава. На основе установленных закономерностей пластического течения рассматриваемого сплава при горячей деформации осадкой и обработки кривых течения с использованием методов математической статистики получены уравнения регрессии, характеризующие зависимость пиковых и установившихся напряжений от температурно-скоростных режимов деформации. Исследована эволюция структурно-фазового состояния материала в процессе горячей деформации.

Третья глава посвящена изучению структуры и физико-механических свойств разработанного сплава после термической обработки по обоснованным оптимальным режимам. Представлены результаты экспериментальных исследований кинетики окисления при нагреве и выдержке в окислительной атмосфере для оценки жаростойкости сплава. Показано, что повышение данной важной для практического использования функциональной характеристики сплава связано с образованием подслоя никелевой фазы, обедненной хромом, затрудняющей активное окисление исследуемого материала на большую глубину.

В четвертой главе представлены результаты изучения механизмов износа инструмента при механической обработке хромоникелевого сплава резанием. Может показаться, что содержание этой главы не совсем соответствует основной теме диссертации, однако без разработки способов и оптимальных режимов резания сплавов на основе хрома было бы невозможно обеспечить реальное освоение новых сплавов в качестве конструкционных материалов для конкретных деталей конструкций космической техники. При этом, на основе исследований интенсивности изнашивания известных инструментальных материалов на базе сплава WC-Co-Re, разработан новый твердый сплав ВР7К6, обеспечивающий повышение стойкости при скорости резания на 10-30% и снижение шероховатости поверхности до  $Ra < 3,2$  при возможном увеличении скорости резания до 30-40 м/мин.

В пятой главе представлены результаты исследования изменения структуры и химического состава хромоникелевого сплавов после испытаний, имитирующих условия эксплуатации в составе термokatалитического двигателя. Обнаружено, что в указанных условиях, образуется поверхностный слой никелевой  $\gamma$ -фазы, упрочненной кристаллами хромовой  $\epsilon$ -фазы, с повышенным содержанием азота за счет взаимодействия с содержащими азот продуктами разложения топлива. Это предотвращает испарение хрома в вакууме и эрозию металла в критическом

сечении сопла при воздействии скоростного потока продуктов горения. Данное достижение позволило обеспечить эффективную эксплуатацию сплава в течение более 10 лет (!) работы в космическом пространстве.

Шестая глава посвящена решению практических задач модернизации оборудования и реализации разработанных технологических решений при организации малотоннажного производства металлопродукции ответственного назначения. Показана эффективность использования разработанного подхода для решения задач повышения качества капиллярных труб из хромоникелевого сплава ХН50ВМТЮБ и труб горячего тракта ракетного двигателя из труднодеформируемых жаропрочных никелевых сплавов ХН43БМТЮ и ХН77ТЮР.

Особый интерес представляют результаты, представленные в главе 7, посвященной развитию научных подходов к модернизации хромоникелевых сплавов и разработке новых сплавов на основе хрома с использованием современного метода теоретического материаловедения, основанного на расчетах из первых принципов возможного влияния легирующих элементов тугоплавких и переходных металлов на когезивную прочность границ зерен и матрицы сплава. С учетом известных трудностей в применении указанного метода для расчета многокомпонентных сплавов, можно надеяться, что действительно наибольший эффект твердорастворного упрочнения в сплавах на основе хрома оказывает легирование вольфрамом до концентраций не более 10%. Результаты данного расчета не противоречат эксперименту. При этом увеличение сопротивления высокотемпературной деформации по границам зерен (зернограничному проскальзыванию) может быть достигнуто за счет легирования малыми добавками тантала, ниобия, циркония и гафния. Для повышения жаропрочности и обеспечения работоспособности в условиях воздействия температуры свыше 1300<sup>0</sup>С впервые предложено в качестве основы нового сплава использовать систему хром-тантал-вольфрам.

В заключении диссертации приведены основные выводы, достаточно полно отражающие результаты выполненной работы.

### **Научная новизна исследования и полученных результатов**

Результаты, полученные соискателем и представленные в диссертации, соответствуют цели и задачам исследований, являются новыми и имеют высокую научную значимость. Они открывают новые подходы к созданию жаропрочных и жаростойких сплавов для изделий космической техники.

Среди полученных автором новых научных результатов следует выделить следующие:

- впервые исследованы структурные изменения хромоникелевого сплава при взаимодействии с примесью внедрения азотом, приводящим к существенному охрупчиванию хрома. Установлен механизм образования барьерного слоя, обеспечивающего повышенную жаростойкость и эрозионную стойкость металла;

- теоретическое и экспериментальное обоснование экономного легирования хромоникелевого сплава комплексом тугоплавких и переходных металлов для дополнительного увеличения межатомных связей на границах зерен  $\alpha$ -фазы и, как следствие, повышение сопротивления ползучести сплава.

### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

На основании полученных экспериментальных результатов разработаны технологические процессы и технические условия на поставку металлопродукции. Получены патенты на способы выплавки и изготовления прутков и холоднодеформированных бесшовных труб, термической обработки хромоникелевых сплавов. Технология изготовления прессованных прутков внедрена на металлургическом производстве АО «Композит». Продукция востребована для изготовления ответственных деталей жидкостных и термokatалитических ракетных двигателей.

### **Достоверность и обоснованность результатов исследования**

Достоверность полученных научных результатов, обоснованность выводов и научных положений, выносимых на защиту, обеспечивается

большим объемом выполненных экспериментов с применением комплекса современных методов исследования. Полученные результаты интерпретированы, исходя из известных положений физического металловедения, теории термической обработки и современных представлений и концепций современной физики прочности и пластичности, а также сопоставлены с данными других исследователей и не противоречат им.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Результаты диссертационной работы представляют несомненный интерес для специалистов и могут быть использованы в организациях и учреждениях, ведущих фундаментальные и прикладные исследования в области получения жаропрочных сплавов и изучения их структуры, физических, механических и эксплуатационных свойств, в частности в ФГБУН «Институт металлургии и металловедения РАН им. А.А. Байкова, ФГБУН «Институт физики твердого тела РАН», ФГБУН «Институт проблем химической физики РАН », ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов» АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» и других организациях.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Несмотря на использование автором диссертации, как отмечалось выше, широкого круга современных экспериментальных методов исследований, при обсуждении в седьмой главе научных подходов к модернизации хромоникелевых сплавов и разработке новых сплавов на основе хрома с использованием современного метода теоретического металловедения в совокупности с анализом соответствия теории и эксперимента следует отметить необходимость в этом случае исследований тонкой структуры сплавов, в том числе имеющимися сегодня в арсенале экспериментаторов методами высокоразрешающей аналитической растровой

и просвечивающей микроскопии. Например, приведенные на стр. 241 диссертации карты распределения легирующих элементов в объеме сплава Х65НВФТ, никак не доказывают, что эти элементы находятся в твердом растворе. Они могут входить в состав выделившихся и не видимых при обычно используемых увеличениях в растровом и просвечивающем электронных микроскопах частиц нанометрового диапазона размеров, и в этом случае численные значения концентрации этих элементов в твердом растворе не будут соответствовать элементному химическому составу сплава. При этом, как достаточно часто обнаруживается для сложных сплавов, диаграмма состояния сплава может быть уточнена в связи с обнаружением новых метастабильных фаз.

2. В диссертации значительное внимание уделено использованию результатов расчетов «из первых принципов» для обоснования выбора компонентного состава сплавов на основе хрома. Вместе с тем, реально выбрана система Cr-W-Ta из анализа диаграмм состояния Cr-W и Cr-Ta, а также с учетом способности фазы Лавеса Cr<sub>2</sub>Ta к поглощению азота наряду с упрочняющим эффектом от этой фазы. В данном случае, расчеты «из первых принципов» только показали качественное согласие с известным фактом увеличение энергии связи в металле (в данном случае - хrome) при добавлении металла с большей энергией связи, среди которых вольфрам и тантал являются рекордсменами. При этом на странице 235 утверждается, что гафний и ниобий вводится в сплав «для укрепления поверхности раздела», что находится в противоречии с данными расчетов «из первых принципов» на странице 234 (рисунок 7.6), согласно которым сегрегация гафния и ниобия приводит к ослаблению межатомных взаимодействий на специальной границе зерна в хrome. Поэтому складывается впечатление, что теоретические исследования, выполненные в диссертационном исследовании В.Н. Бутрима аккуратно и на высоком профессиональном уровне, для случая сплавов на основе хрома пока могут только правильно или неправильно указать качественно направления в достижении цели оптимального



легирования. В то же время проведенные автором диссертации экспериментальные исследования позволили достичь поставленных целей.

### **Заключение**

Диссертационная работа Бутрима В.Н. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержатся научно-технологические решения важной научно-технической проблемы – создания новых жаропрочных сплавов для космической техники, обеспечивающих надежное функционирование космических аппаратов на орбите в течение длительных сроков эксплуатации, и дающие существенный вклад в развитие научно-технического потенциала и экономики страны.

Результаты, полученные в работе Бутрима В.Н., соответствуют поставленной цели и задачам исследования. Диссертационная работа базируется на достаточном количестве экспериментальных данных. Работа отличается высоким качеством оформления, изложена четким и лаконичным научным языком, структура работы логически последовательна и разделы работы взаимосвязаны.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 20 научных статьях ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Перечнем ВАК, а также рецензируемых наиболее авторитетных международных научных изданиях по вопросам материаловедения, таких как «Scripta Materiale», «Advanced Material Research» и других, получено 10 патентов РФ. Результаты доложены на многочисленных международных и Всероссийских конференциях. Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертации. Диссертационная работа Бутрима В.Н. соответствует отрасли технических наук, формуле и п.п. 1,2,3,6,7 паспорта специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

В диссертационной работе последовательно изложена детальная информация о доведенных автором диссертации до практического применения научно-обоснованных технологических разработках, имеющих большое значение для развития космической техники при существенной экономии ресурсов. Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и относятся в основном к научной дискуссии по результатам проведенных автором диссертации исследований.

Считаю, что диссертационная работа «Развитие научных основ технологии производства и модернизации хромоникелевых сплавов для серийных и перспективных изделий космической техники» полностью соответствует критериям, установленным п.п. 9-11 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор – Бутрим Виктор Николаевич заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Заведующий кафедрой наноматериалов и нанотехнологий  
Белгородского государственного национального исследовательского  
университета на базе Научного центра РАН в Черногловке,  
доктор физико-математических наук

профессор

Юрий Романович Колобов

308015, г. Белгород, ул. Победы, 85  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение Высшего образования «Белгородский государственный  
национальный исследовательский университет»  
тел:+7-919-729-15-92, e-mail: kolobov@bsu.edu.ru

Подпись удостоверяю

