

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Бутрима В.Н. «Развитие научных основ технологии производства и модернизации хромоникелевых сплавов для серийных и перспективных изделий космической техники» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность работы. Традиционно используемые в авиационных и ракетных двигателях жаропрочные стали и сплавы на основе никеля не применимы для работы в термokatалитических двигателях (ТКД) в условиях длительной (от 60 до 130 тысяч часов и нескольких сотен тысяч включений двигателя с высокой точностью длительности импульса) эксплуатации в вакууме, при температурах свыше 1250<sup>0</sup>С и наличии продуктов разложения топлива (азот, кислород). Одним из перспективных подходов решения проблемы является применение сплавов на основе хрома, обладающих в отличие от сплавов других тугоплавких металлов (Nb, Ta, Mo и W) жаростойкостью на воздухе до температур (1200-1300)<sup>0</sup>С и стойкостью в агрессивных средах.

Для решения этой задачи необходимо определение закономерностей влияния легирующих элементов на эксплуатационные характеристики сплава (через управление свойствами  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз), включая оценку возможности упрочнения  $\alpha$ -матрицы хромоникелевых композиций интерметаллидами хрома Cr<sub>2</sub>M (фаза Лавеса), где М - Nb, Ta, Zr, Hf и другие тугоплавкие и переходные металлы, изучение особенностей эволюции структуры и дефектов по всей технологической цепочке (с целью обеспечения металлургического качества изделий).

Это и определило актуальность постановки настоящей работы, выполнявшейся в рамках Федеральной космической программы России на 2006-2015 годы по государственным контрактам с Федеральным космическим агентством от 19.04.2010 №836-Т491/10 «Разработка

технологических процессов получения материалов для элементов конструкций термokatалитических (ТКД) двигателей...»; от 04.04.2011 №836-Т510/11 «Разработка новых специальных конструкционных материалов и технологий получения из них полуфабрикатов, деталей, элементов конструкций для перспективных изделий космической техники...» и от 04.05.2012 №836-0510/12 «Исследования для обеспечения создания опережающего научно-технического задела по разработке материалов и покрытий для перспективных изделий КТ» и ФЦП «Разработка, восстановление и организация производства стратегических дефицитных и импортозамещающих материалов и малотоннажной химии на 2009-2011 годы и на период 2015 года» по Государственному контракту от 26.06.2009г № 836-М102/09 «Разработка технологических процессов изготовления прессованных прутков из сплава ВХ4...» в обеспечение государственной программы развертывания глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и создания перспективных изделий космической техники.

Масштаб и важность решаемых задач определили научную новизну работы.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций.

1. Установлены закономерности формирования структуры и сопутствующего изменения свойств хромоникелевых сплавов в зависимости от легирующих элементов. Показано, что увеличение содержания вольфрама (до 5-10 мас. %) в твердом растворе хрома повышает прочность, малые добавки гафния и циркония – пластичность, а упрочнение сплава дисперсной фазой  $\text{Cr}_2\text{Ta}$  (при замене никеля на тантал) и связанное с этим увеличение температуры плавления, повышает жаропрочность.

2. Выявлены закономерности поведения двухфазного хромоникелевого сплава Х65НВФТ (изменение морфологии

структурных составляющих, механизмов деформации и разрушения) в условиях горячей деформации в интервале температур  $(950-1250)^{\circ}\text{C}$  и скоростях деформации  $(0,001, 0,01, 0,1 \text{ и } 1 \text{ с}^{-1})$ . Получены аналитические выражения для пиковых и установившихся напряжений деформирования.

3. На основе сопоставления различий в эволюции структур исследуемых сплавов от выплавки до термической обработки включительно (в рамках использованных технологических схем их производства) сформулированы условия получения оптимальных (с точки зрения условий эксплуатации изделий) структур и высокого уровня металлургического качества металлопродукции (чистота металла по НВ и примесям, заданная дисперсность структуры на всех переделах).

4. Выявлены особенности изменения химического, фазового состава и структуры хромоникелевого сплава в условиях, имитирующих работу ТКД в космическом пространстве. Определены критические факторы структуры: прослойка  $\gamma(\text{Ni})$ -фазы толщиной 2-5 мкм, обедненная хромом, и фаза  $\epsilon(\text{Cr})$  с повышенным содержанием хрома (в поверхностном слое толщиной до 30 мкм, обогащенном азотом - до 8% мас.), способствующие замедлению процесса диффузии хрома, его испарения в рабочее пространство ТКД и предотвращающие эрозию металла в потоке продуктов разложения топлива соответственно.

Достоверность полученных результатов. Подтверждается применением стандартизированных методов лабораторных испытаний и исследований сплавов, воспроизводимостью и согласованностью анализируемых данных, использованием современных методов исследования и экспериментального оборудования.

В частности, следует отметить определение химического состава сплавов методами рентгеноспектрального анализа (Cr, Ni, W, V, Ti, Fe, Si, Al, Mn), инфракрасной спектроскопии (C, S), восстановительного

плавления (N, O); средств микроскопии (световой, сканирующей и электронной); рентгеноструктурного, микрорентгеноспектрального, дифференциально - термического анализа, физического моделирования деформационного поведения сплавов на установке «Gleeble 3800», механических испытаний на разрывных машинах «Instron» и «Schenck».

В необходимых случаях, например, для более глубокого понимания механизмов получения конечных структур экспериментально и теоретически были проанализированы различные сценарии протекания технологической наследственности (в рамках различных технологий получения сплавов). Это, в частности, потребовало от автора проявить эвристический подход, основанный на глубоком понимании механизмов эволюции структур (в широких масштабах наблюдения), технологических процессов, имеющемся разностороннем практическом опыте работы в этом направлении.

Полученные экспериментальные данные были сопоставлены с результатами, имеющимися в научно-технической литературе.

В целом, широкий спектр используемых в работе физических, методов исследований, механических и натурных (стендовых) испытаний позволили автору глубоко и всесторонне изучить природу процессов структурообразования в жаропрочных сплавах, закономерности взаимосвязи со свойствами, находя подтверждение теоретическим выводам широкомасштабными, систематическими экспериментальными результатами.

Степень обоснованности научных положений и выводов. Все сформулированные автором научные положения и выводы основываются на необходимом и достаточном объеме теоретических и экспериментальных данных.

В частности, достаточно всесторонне проанализированы закономерности образования структур в жаропрочных сплавах на

хромоникелевой основе. Особое внимание было уделено фактору металлургического качества разрабатываемых сплавов.

Разноплановые исследования, в т.ч. включающие прогноз функционала электронной плотности параметров энергии когезии и когезивной прочности границ зерен в ОЦК-решетке хрома при легировании сплава на основе хрома элементами переходных и тугоплавких металлов 4d и 5d групп таблицы Д.И.Менделеева на основе расчетов из первых принципов позволили дополнительно обосновать составы сплавов.

В целом, проведенный полный комплекс исследований обеспечил возможность объективно обосновать сформулированные научные положения и выводы, качество предложенных рекомендаций.

Практическая значимость результатов работы. 1. Комплексная технология изготовления полуфабрикатов из хромоникелевых сплавов, включающая вакуумно-индукционную выплавку слитка, рафинирующий электрошлаковый переплав, горячее прессование в капсуле, механическую и термическую обработку освоена на модернизированном металлургическом производстве ОАО «Композит». Малотоннажное производство, организованное в рамках настоящей работы, обеспечило выполнение государственного заказа комплектации ТКД космических аппаратов системы «ГЛОНАСС», геостационарных телекоммуникационных спутников «Экспресс», «Луч», «Sesat», спутников гидрометеорологического обеспечения «Электро» и др

2. Разработанные способы и режимы выплавки слитков и прессования прутков обеспечили повышение выхода годной продукции с 30% до 70% на этапе производства полуфабриката и с 70% до практически 100% на этапе изготовления деталей ТКД.

3. Оптимизированные режимы резания, новый материал режущего инструмента для механической обработки (патент РФ №2521747) и

режим термической обработки (патент РФ № 2514899) обеспечивают высокое качество поверхности ( $Ra < 3,2$ ) после механической обработки и снижение трудоемкости изготовления деталей ТКД на 20%.

4. Развитые в работе технологические принципы и подходы реализованы при разработке технологии и организации малотоннажного производства трубных заготовок для изготовления бесшовных капиллярных трубок малого диаметра ( $\varnothing_{вн} = 0,18 - 0,975 \text{ мм}$ ) из высокохромистого никелевого сплава ХН50ВМТЮБ для трубопроводов подачи топлива ТКД, труб  $\varnothing 16 \times 2 \text{ мм}$ ,  $\varnothing 38 \times 3 \text{ мм}$  из сплава ХН43БМТЮ и  $\varnothing 80 \times 5 \text{ мм}$  из жаропрочного сплава ХН77ТЮР для трубопроводов горячего тракта ракетных двигателей РД171 и РД191.

Замечания:

- безусловно, интересен опыт применения расчетов из первых принципов, использованный в рамках диссертационной работы. Однако было бы целесообразно оценить риски прогноза жаропрочности, связанные с его применением, в сочетании с действием других факторов, определяющих уровень жаропрочности;

- большое внимание при разработке сквозной технологии получения новых сплавов уделено изучению явления технологической наследственности (эволюции структур и дефектов от выплавки до термической обработки), однако в научной новизне эти результаты получили лишь фрагментарное отражение;

- автор справедливо отмечает в работе роль неоднородности структур в достижении конечного результата. Однако не всегда это подтверждается количественными оценками морфологии структур, что, в частности, необходимо, при формулировании требований к допустимой неоднородности структур, гарантирующей достижение заданного уровня свойств;

- важно, что автор при изучении влияния роли легирования на морфологию структур исследуемых композиций хромоникелевых сплавов, последовательно проследил влияние структур в целом, и отдельных её составляющих не только на процессы деформации, но и разрушения (по строению изломов). Это позволило выделить критические элементы структуры, лимитирующие сопротивляемость сплавов разрушению. Однако с учетом известной неоднородности разрушения, оценки строения изломов целесообразно проводить в больших масштабах наблюдения, например, в масштабах образца;

- не всегда понятен масштаб статистики проведенных испытаний, например, при серийных ударных испытаниях (раздел 2.2.3, стр. 133 диссерт.). Это затрудняет оценку значимости полученных результатов. Также неясно, что явилось критерием вязко-хрупкого перехода;

- есть отдельные неудачные формулировки в тексте диссертации, в частности, подписи под графическими зависимостями вида «2.33 - График зависимости...» (например, рис. 2.33, стр.125 диссертации).

В целом указанные недостатки не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе В.Н. Бутрима.

#### Заключение.

Диссертационная работа В.Н. Бутрима является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие космической отрасли.

Результаты работы целесообразно использовать для углубления представлений о путях разработки новых составов жаропрочных сплавов, совершенствовании технологии их производства, в т.ч. изделий. Структура диссертации логична, работа написана доступным языком и аккуратно оформлена.

Автореферат диссертации и публикации автора в т.ч. 21 статья в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ (8 из которых в изданиях, индексируемых в базах данных WoS и SCOPUS), соответствуют содержанию диссертации и достаточно полно ее отражают.

В целом, диссертационная работа Бутрима Виктора Николаевича по своему теоретическому, методическому и экспериментальному уровню, объему работы, актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям "Положением о порядке присуждения ученых степеней" (в ред. Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент,  
профессор кафедры металловедения  
и физики прочности  
НИТУ "МИСиС", д.т.н.



А.В. Кудря

<http://misis.ru/spglnk/91b12131>  
Москва, Ленинский пр-т, 4,  
8-(495)-638-4686  
AVKudrya@misis.ru

ПОДПИСЬ А.В. Кудря ЗАВЕРЯЮ  
Проректор по безопасности  
и общим вопросам  
НИТУ "МИСиС" И.М. Исаев

