

**Отзыв на автореферат Елютина Евгения Сергеевича «Разработка жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений с повышенной длительной прочностью для монокристаллических лопаток перспективных авиационных ГТД», выполненной на соискание учёной степени кандидата технических наук (специальность 2.6.1–
Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов)**

Развитие жаропрочных никелевых сплавов с 2000 года были связаны с созданием монокристаллических высокорениевых жаропрочных сплавов третьего поколения ВЖМ1 (9,3% Re), ВЖМ2 (12% Re), ВЖМ5 (4% Re). Чуть позже, для стабилизации фазового состава и снижения вероятности выделения вредных топологически плотноупакованных фаз при длительной эксплуатации в высокорениевые жаропрочные сплавы стали вводить рутений. За последние 10 лет были выполнены важные теоретические работы и проведены специальные исследования, которые привели к созданию новых более жаропрочных монокристаллических рений-рутение содержащих сплавов четвертого и пятого поколений ВЖМ4 и ВЖМ6, соответственно.

Ранее уже отмечали, что основной недостаток такого подхода – дороговизна получаемых сплавов, поскольку помимо высокого содержания редкоземельного элемента рения, сплав легируется элементом платиновой группы – драгоценным металлом рутением. Стоимость Re и Ru составляет более 60% от общей стоимости шихтовых материалов современных никелевых монокристаллических сплавов.

Однако в автореферате соискателя Елютина Е.С. показана разработка нового поколения литейных жаропрочных никелевых рений-рутение содержащих сплавов (V и VI поколений) марок ВЖМ8 и ВЖМ10, обладающие повышенными характеристиками длительной прочности и рабочей температуры. Поиск самого состава разработанных сплавов выполнен с помощью метода компьютерного конструирования и анализа результатов исследования структурно-фазовых характеристик, физико-химических свойств и механических испытаний. В этой связи разработку более жаропрочных материалов для турбинных рабочих лопаток ГТД считаем решением актуальной задачи.

В научной новизне диссертационной работы имеют отражение результаты исследования. Во-первых, отмечена относительная разность периодов кристаллических решеток матричной γ -фазы и упрочняющей γ^1 -фазы, причем период решетки γ^1 -фазы больше, чем γ -твердого раствора. Значения длительной прочности обнаруживают монокристаллы сплава с положительным значением γ/γ^1 мисфита, который является одним из критериев жаропрочности сплавов этого типа. После специальной термической обработки монокристаллических отливок из новых жаропрочных никелевых сплавов методом горячего

изостатического прессования были достигнуты требуемые характеристики длительной прочности путем увеличения объемной доли упрочняющей γ^1 -фазы кубовидной формы и заданного размера. Это было зафиксировано в результате внедрения компьютерных методов разделения γ/γ^1 -рефлекса на фазовые γ и γ^1 синглеты, что радикально повысило экспериментальные возможности рентгеновских исследований в этой области.

Во-вторых, были разработаны и апробированы регрессионные модели, позволяющие прогнозировать температуры γ^1 -сольвус, солидус и ликвидус монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от концентраций алюминия, тантала, рения и рутения. Установлены закономерности влияния знака γ/γ^1 -мисфида на микроструктуру и длительную прочность жаропрочных никелевых сплавов. Созданы определенные условия, при которых не образуются топологически плотноупакованные фазы, которые обуславливали пониженную длительную прочность жаропрочных никелевых сплавов предыдущих поколений.

Практическая ценность исследований заключается в разработке специальных режимов термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием монокристаллических отливок рабочих лопаток из новых жаропрочных никелевых сплавов ВЖМ8 и ВЖМ10. Они обеспечили снижение ликвационной химической неоднородности, формирование кубоидных частиц γ^1 -фазы размера около 0,3 мкм и низкую объемную микропористость.

Представлен анализ современных монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов для турбинных лопаток ГТД, включая их химический состав, структурно-фазовые характеристики и механические свойства. Определены температурно-ориентационные зависимости модуля упругости, предела прочности, предела текучести, пластичности, длительной прочности, малоциклового и многоциклового усталости монокристаллов с кристаллографическими ориентациями $\langle 001 \rangle$, $\langle 011 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ из перспективных жаропрочных никелевых сплавов: рений-рутений-содержащего сплава пятого и шестого поколения ВЖМ8 и ВЖМ10.

Дисперсионное упрочнение частицами γ^1 -фазы обеспечивает длительное сохранение высокой температурной работоспособности сплавов данного класса в широком интервале температур (вплоть до 1170°C ВЖМ8 и до 1200°C ВЖМ10) и достигается путем торможения скользящих дислокаций в γ -матрице дисперсными частицами γ^1 -фазы. Следовательно, важнейшая роль в сопротивлении высокотемпературной ползучести монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов принадлежит, наряду с объемной долей и размерами частиц γ^1 -фазы, физико-химическим и механическим свойствам γ и γ^1 -фаз, таким структурно-фазовым параметрам, как температура полного растворения γ^1 -фазы в γ -твердом растворе

(солвус γ^1), величины периодов кристаллических решеток γ -твердого раствора, γ^1 -фазы и их размерного несоответствия (γ/γ^1 -мисфит).

Однако, сохранится ли тенденция повышения эффективности будущих поколений ГТД, которая будет связана с повышением максимальной температуры газа перед турбиной и применением новых экономнолегированных высокожаропрочных и жаростойких материалов на никелевой основе с одной стороны, либо уже выявляется нецелесообразность внедрения новых материалов без кардинального изменения конструкции двигателя с другой стороны. Это скорее вопрос, чем замечание. Вполне естественно, что в различных жаропрочных никелевых сплавах, условно относящихся к одному из последующих поколений, основные легирующие элементы могут присутствовать в различных комбинациях. В материале автореферата не проведен анализ тенденции повышения эффективности будущих поколений ГТД за счет комбинирования основных легирующих элементов в жаропрочных никелевых сплавах

Несмотря на указанное замечание, диссертационная работа Елютина Евгения Сергеевича «Разработка жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений с повышенной длительной прочностью для монокристаллических лопаток перспективных авиационных ГТД», может быть представлена к защите на специализированном диссертационном Совете по специальности 2.6.1–Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Академик РАН, доктор технических наук,
заведующий кафедрой обработки металлов
давлением федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С. П. Королева», профессор


20.11.2023 Ф.В. Гречников

Доктор технических наук,
профессор кафедры обработки металлов
давлением федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С. П. Королева»


В.А. Михеев

Служебный телефон: 8(846)2674601

E-mail: vamicheev@rambler.ru Служебный адрес: 443086, г. Самара,

Московское шоссе, 34, пятый корпус, кафедра обработки металлов давлением



| | | |
|---|------------------------------------|---------------|
| Подпись | <u>Гречников Ф.В., Михеев В.А.</u> | удостоверяю. |
| Начальник отдела сопровождения деятельности | | |
| ученых советов Самарского университета | | |
| | <u>Бояркина</u> | Бояркина У.В. |
| « 20 » | 11 | 2023 г. |