

## **Научные результаты работ академика Е.Н. Каблова по разработке нового поколения конструкционных и функциональных материалов**

Особенность научно-технической деятельности Е.Н. Каблова – реализация полного инновационного цикла от фундаментальных и прикладных исследований до создания высокотехнологичных наукоемких производств по выпуску материалов, полуфабрикатов и высокотехнологичного оборудования для серийного производства сложных технических систем.

К основным научным разработкам Е.Н. Каблова следует отнести:

1. Комплекс фундаментальных и прикладных исследований по теоретическому обоснованию новых принципов и систем легирования редкоземельными металлами жаропрочных сплавов и сталей, управлению процессами структурообразования при кристаллизации, на базе которых разработаны принципиально новые технологии и специализированное оборудование, включающий:

– исследования по повышению предела выносливости и термоусталости литых охлаждаемых лопаток и разработанный процесс поверхностного модифицирования алюминатом кобальта, применяемый на всех моторостроительных заводах России, что существенно повышает ресурс лопаток авиационных двигателей III и IV поколений (Д-30КУ, Д-30КП, Д-30Ф6, ТВЗ-117, ПС-90А, ПС-90А-76, АЛ-21Ф-3, АЛ-31Ф, Р-29-300, РД-33 и их модификаций);

– развитие теории сбалансированного легирования химического состава жаропрочных сплавов, содержащих более 15 легирующих элементов, включая установление закономерностей термической стабильности фаз, снижение ликвационной неоднородности и уменьшение диффузионной подвижности атомов в  $\gamma/\gamma'$ -матрице, что позволило создать новое поколение высокожаропрочных монокристаллических безуглеродистых рений-рутение

содержащих никелевых сплавов, а также принципиально новый класс жаростойких сплавов на основе интерметаллида никеля;

– разработку метода цифрового конструирования химического состава сплава и установление механизма влияния рения и рутения на фазовую термостабильность и высокотемпературную длительную прочность монокристаллов литейных жаропрочных никелевых сплавов, создание серии монокристаллических и интерметаллидных супержаропрочных сплавов нового поколения, которые в перспективном газотурбинном двигателе ПД-14, а также в модификациях вертолетных двигателях ТВ3-117 и ВК-2500 позволили повысить рабочую температуру лопаток и увеличить ресурсные характеристики газотурбинных двигателей;

– формулирование научных принципов комплексного сбалансированного легирования жаропрочных деформируемых сплавов танталом, ниобием, рением и микролегированием редкоземельными металлами с оптимизацией режимов термической обработки сложнолегированных гетерофазных систем. На основе этих работ создан высокожаропрочный деформируемый дисперсионно-твердеющий сплав нового поколения ВЖ175-ИД для дисков и других высоконагруженных деталей авиационного двигателя ПД-14.

2. Разработку материаловедческих и технологических решений для конструирования и производства турбинных монокристаллических лопаток с высокоэффективной транспирационной системой охлаждения, что впервые в отечественной и зарубежной практике позволило достигнуть высокой степени охлаждения стенок лопаток, характеризуемой коэффициентом охлаждения  $\theta = 0,85$  вместо 0,63. Комплекс этих решений обеспечивает работоспособность монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей при температурах на 450...500°C выше температуры плавления металла лопатки.

3. Серию работ по оценке влияния высокого градиента температур на фронте кристаллизации расплава 220°C/см вместо 40°C/см при литье монокристаллических лопаток из жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов. Принципиально новая высокоградиентная

технология позволяет получать регулярную структуру с минимальными значениями междендритного расстояния между осями первого порядка 100...150 мкм вместо 400...500 мкм, с повышением прочностных и усталостных характеристик сплавов и увеличением ресурса работы лопаток газотурбинных двигателей.

4. Исследование механизмов химического взаимодействия на границе раздела керамический слой – жаропрочный сплав и решение ключевой проблемы защиты монокристаллических рений-рутений содержащих сплавов от высокотемпературного окисления при температурах до 1200°C, что позволило разработать и реализовать в промышленном производстве АО «ОДК-Авиадвигатель» и ОАО «ПМЗ» технологии нанесения на границу раздела барьерного слоя из наноразмерных карбидов, препятствующих рекристаллизации сплавов в процессе длительной эксплуатации, и обеспечило повышение ресурса работы турбинных лопаток.

5. Разработку нового энергосберегающего метода нанесения многокомпонентных керамических теплозащитных покрытий плазмохимическим магнетронным осаждением на поверхности турбинных лопаток ГТД и ГТУ, значительно уменьшающего энергоемкость процесса по сравнению с традиционным электронно-лучевым и обеспечивающего структурное совершенство столбчатой структуры керамических слоев, уменьшающего толщину покрытия при сохранении температурного перепада на поверхности лопатки и снижении уровня термических напряжений.

6. Реализация на основе экспериментальных исследований и термодинамических расчетов эффективного способа увеличения стабильности свойств жаропрочных сплавов с повышением их чистоты, сужением интервалов легирования элементов химического состава и микролегирования редкоземельными металлами. Разработанные уникальные серийные технологии выплавки 16 марок литейных жаропрочных сплавов, легированных редкоземельными металлами, с использованием до 100% отходов производства моторных заводов и деталей газотурбинных двигателей, выведенных из

эксплуатации, обеспечивают в жаропрочных сплавах снижение содержания вредных примесей  $O_2$ ,  $N_2$ , S и C до 5 ppm.

7. Разработку принципиально новых способов термомеханической обработки труднодеформируемых гетерофазных сплавов с контролируемым процессом динамической рекристаллизации, позволивших впервые в отечественной практике разработать ресурсосберегающую технологию изотермической штамповки дисков газотурбинных двигателей на воздухе при  $1200^{\circ}C$  из сложнолегированных сплавов. Эта технология повышает производительность и коэффициент использования металла.

8. Разработку конструкции и организацию производства в ВИАМ автоматизированных вакуумных плавно-литейных комплексов УВНЭС-5, УВНС-6, УВНК-9А, УВНК-10 и УВНК-15 с многоуровневой аппаратно-программной системой мониторинга и управления технологическим процессом. Применение этих комплексов на моторостроительных заводах России при высокоградиентной технологии литья монокристаллических лопаток с заданной аксиальной и азимутальной кристаллографической ориентацией обеспечивает повышение выхода годного с 60 до 95%.

9. Комплекс работ по разработке полимерных композиций, обладающих высокими деформативностью, прочностью и стойкостью к ударным нагрузкам в диапазоне температур от  $-130$  до  $+400^{\circ}C$ , новых технологий производства прецизионных препрегов полимерных композиционных материалов с высокой точностью содержания компонентов, обеспечивающих снижение разброса свойств материалов с 25 до 5%, и, соответственно, коэффициентов запаса прочности при создании конструкций из них. Разработку на их основе углепластиков ВКУ-17, ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-30, ВКУ-39, стеклопластиков ВПС-48/7781, ВПС-48/120, ВПС-47/7781, ВПС-43к, которые по своим характеристикам не уступают лучшим мировым аналогам, а также организацию производства препрегов этих материалов. Впервые в отечественной практике реализация разработанного научно-технического задела внесла определяющий вклад в создание мотогондолы

двигателя ПД-14 с широким применением ПКМ нового поколения (60–70%) и 17 агрегатов внешнего контура двигателя ПС-90А.

Важным вкладом академика Е.Н. Каблова в развитие материаловедческой науки является формулирование основных принципов создания материалов нового поколения:

- проведение фундаментальных и фундаментально-ориентированных исследований институтами РАН, Государственными научными центрами РФ и национальными центрами совместно;

- применение «зеленых технологий» при разработке материалов и комплексных систем защиты;

- реализация на основе цифровых технологий полного жизненного цикла: создание материала – эксплуатация его в конструкции – диагностика – ремонт – продление ресурса – утилизация;

- разработка материалов и производственных технологий нового поколения на базе неразрывности процесса «материал–технология–конструкция».