

– титановые  $\alpha$ -сплавы в качестве конструкционного материала могут быть использованы для изготовления корпусов реакторов, ВКУ, парогенераторов, теплообменников и другого оборудования АЭС, работающих при температуре до 400°C;

– по уровню наведенной радиоактивности и скорости ее спада сплавы на основе титана (с учетом основных легирующих и примесных элементов) являются конструкционными материалами, обеспечивающими высокую экологическую безопасность при длительной эксплуатации АЭС и решающими проблему обращения с радиоактивными отходами.

В настоящее время имеется достаточно оснований для начала работ по аттестации и расширению внедрения малоактивируемых титановых  $\alpha$ -сплавов в атомное реакторостроение. При этом срок службы различных конструкций водо-водяных АЭС может быть увеличен в 1,5–2 раза, а спад наведенной радиоактивности до безопасного уровня составит 3–5 лет.

*В.С. Петров\*, А.И. Козлов\*, А.А. Живушкин\*, А.В. Васильев\**

### **ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЛАВА ВТ25У ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРОВ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

В настоящее время в авиационной промышленности широкое распространение получила металлургия гранул. Данная работа посвящена развитию этой технологии на ФГУП «Завод им. В.Я. Климова», применению ее для изготовления закрытых центробежных колес из сплава ВТ25У в опытных и серийных газотурбинных двигателях. Приводятся данные, полученные в результате эксплуатации серийных изделий и длительных испытаний опытных изделий.

ФГУП «Завод им. В.Я. Климова» имеет очень большой опыт применения титановых сплавов в конструкциях своих двигателей. Уже с 60-х гг. XX века на двигателях ГТД350 и ТВ2-117 (далее на ТВ3-117 и РД33) более половины всех роторных и статорных деталей компрессоров (диски роторов, рабочие и направляющие лопатки, корпуса и т. д.) изготавливаются из титана известных марок, таких как ОТ4-1, ВТ3-1, ВТ5, ВТ8, ВТ8М, ВТ9, ВТ20, ВТ25 и др. [1, 2].

В процессе форсирования характеристик двигателей, модернизации их отдельных элементов и появления новых поколений двигателей повышаются и требования к характеристикам материалов деталей. Возрастает теплонапряженное состояние роторных деталей, повышаются нагрузки на отдельные ступени компрессоров.

Например, при создании в 80-х гг. XX века двигателя ТВ7-117С (для самолета Ил-114) в конструкции компрессора применены 4 сверхзвуковые осевые ступени и 1 центробежная. В связи с повышенным теплонапряженным состоянием полуоткрытого центробежного колеса для его изготовления был применен новый на то время деформированный материал ВТ25У, который хорошо зарекомендовал себя при работе на этом двигателе.

Предприятиями ФГУП «Завод им. В.Я. Климова», ОАО «ММП им. В.В. Чернышева» и ОМП им. П.И. Баранова было изготовлено более 100 двигателей ТВ7-117С. Суммарная наработка полуоткрытых центробежных колес из деформированного материала ВТ25У (на 01.05.04) – более 63411 ч, в том числе в эксплуатации 9307 ч. Максимальная наработка центробежного колеса составила 1782 ч (на двигателе производства ФГУП «Завод им. В.Я. Климова» на самолете Ил-1124).

\* ФГУП «Завод им. В.Я. Климова».

Последующая модернизация и форсирование характеристик двигателя ТВ7-117С предусматривает применение закрытого центробежного колеса (ЗЦК), что позволяет существенно улучшить параметры двигателя в целом. Увеличение КПД на 3...4% (за счет использования покрывного диска ЗЦК) и одновременное увеличение расхода воздуха на такую же величину повышает мощность двигателя на 300 л.с. (~220,6 кВт – при сохранении числа оборотов и рабочих температур). При этом уменьшается осевая нагрузка на подшипник первой опоры с 12 до 3 Н (в результате чего увеличивается ресурс подшипника на 6000 ч).

С конца 90-х гг. начат и проводится комплекс работ по созданию серийной технологии изготовления методом металлургии гранул заготовок ЗЦК из высокожаропрочного титанового сплава ВТ25УП для изделия ТВ7-117 и его модификаций. Эта технология является практически единственным способом получения таких колес с требуемым комплексом свойств. Изготовить такую деталь с высокой точностью геометрических параметров и расположения входных и выходных каналов (окон), а также отсутствием искажений скрытого проточного тракта явилось весьма сложной задачей.

В предложенной конструкции ЗЦК сплав ВТ25У представлен в двух вариантах – в деформированном и гранульном. Ступица ЗЦК изготовлена из деформированного сплава, лопатки и покрывной диск – из гранульного сплава ВТ25УП. Качество соединения штамповки и гранул достаточно высокое, т. е. процессы диффузионного взаимодействия прошли полностью, и получен монолитный, надежный материал.

Относительно механических свойств можно отметить, что для всех изготовленных колес получены результаты с высокой сопоставимостью, что свидетельствует о стабильности разработанной технологии (рис. 1).

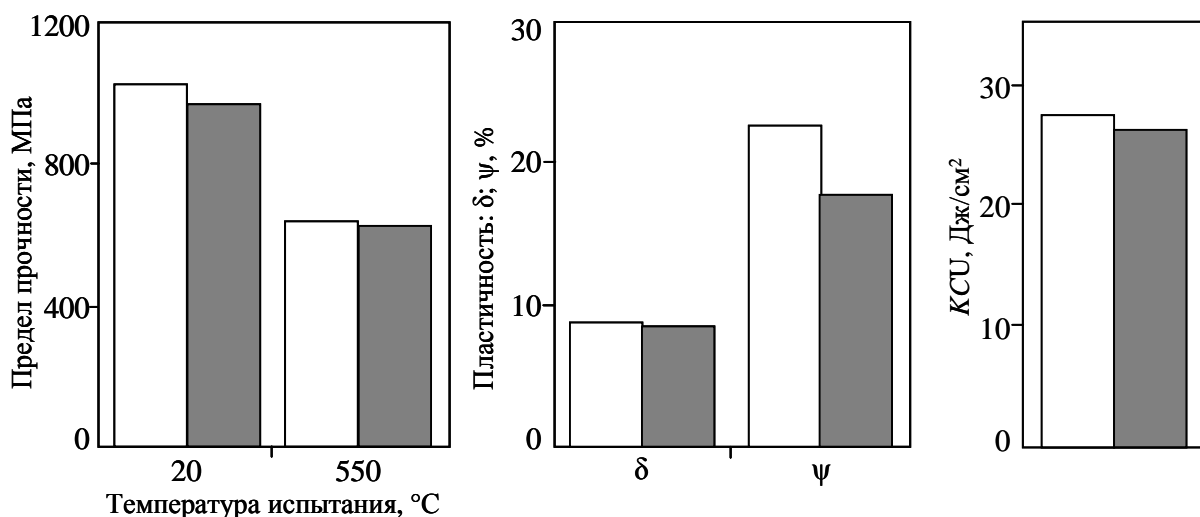


Рис. 1. Механические свойства образцов сплавов ВТ25У (■) и ВТ25УП (□), изготовленных из технологических припусков заготовок ЗЦК

Исследование макро- и микроструктуры позволяет заключить, что в результате получен плотный бездефектный материал со структурой, характерной для сплава ВТ25У.

В ВИЛС были проведены исследования формирования компактного материала из гранул в процессе ГИП, в результате которых разработан принцип конструирования капсул для изготовления закрытых крыльчаток [3].

Совместными усилиями ФГУП «Завод им. В.Я. Климова», ВИАМ, ВИЛС и ЦИАМ проведены работы по паспортизации гранульного сплава ВТ25УП, скорректирован режим термической обработки гранульного сплава ВТ25УП, определен уровень механических свойств, в том числе сравнительные характеристики гранульного и деформируемого материала.

На рис. 2 и 3 приведены виды заготовки закрытого центробежного колеса и готовой детали.

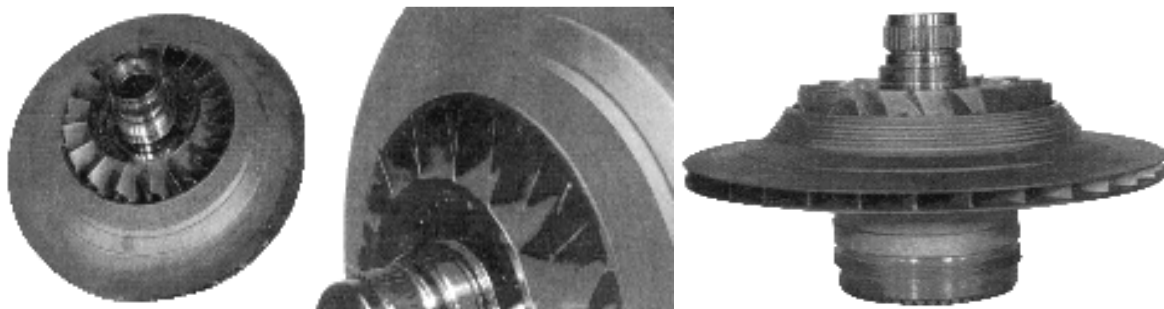


Рис. 2. Виды первого варианта готовой детали закрытого центробежного колеса без охлаждения покрывного диска



Рис. 3. Вид заготовки закрытого центробежного колеса

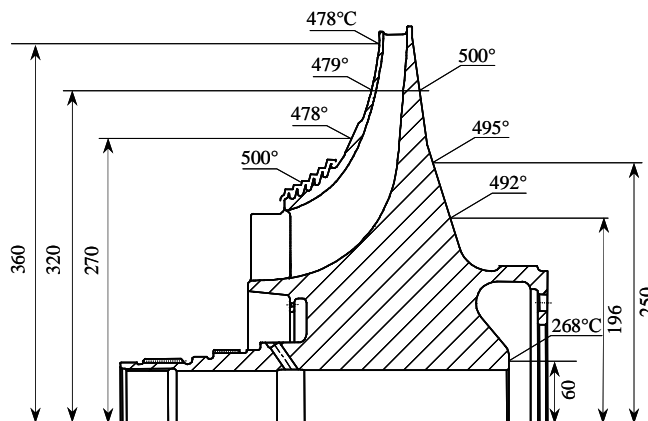


Рис. 4. Схема термометрирования первого варианта закрытого центробежного колеса без охлаждения покрывного диска

Исследования свойств образцов деформированного и гранульного материалов показали, что при температурах больше  $400^{\circ}\text{C}$  механические свойства гранульного материала практически не уступают свойствам деформированного. Проведенное термометрирование первых экземпляров ЗЦК на двигателе показало, что рабочая температура покрывного диска, изготовленного из гранульного материала составляет  $480^{\circ}\text{C}$  (рис. 4). В то же время температура лопаток на входе в районе переднего торца покрывного диска составляет  $300^{\circ}\text{C}$ .

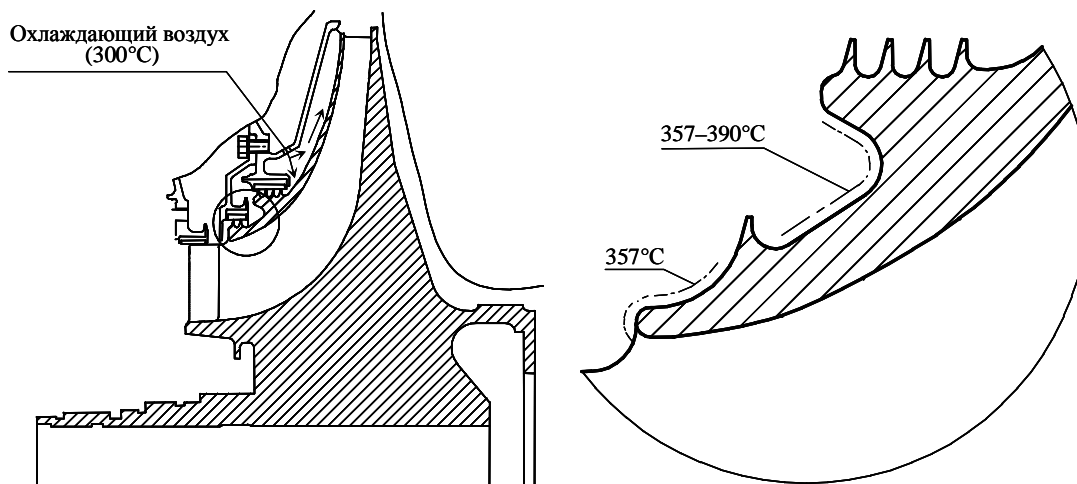


Рис. 5. Схема термометрирования закрытого центробежного колеса с охлаждением покрывного диска

Для снижения напряжений в покрывном диске, вызванных большим градиентом температур, была изменена конструкция ЗЦК и введено охлаждение покрывного диска (рис. 5, 6). Результаты термометрирования ЗЦК с применением вышеперечисленных мероприятий показали, что температура на переднем торце покрывного диска снизилась до 360°С, а остальной части – до 350...400°С (см. рис. 5).

Совместными усилиями ФГУП «Завод им. В.Я. Климова» (изготовление капсул) и ВИЛС (изготовление гранул, ГИП) было получено 15 образцов ЗЦК.

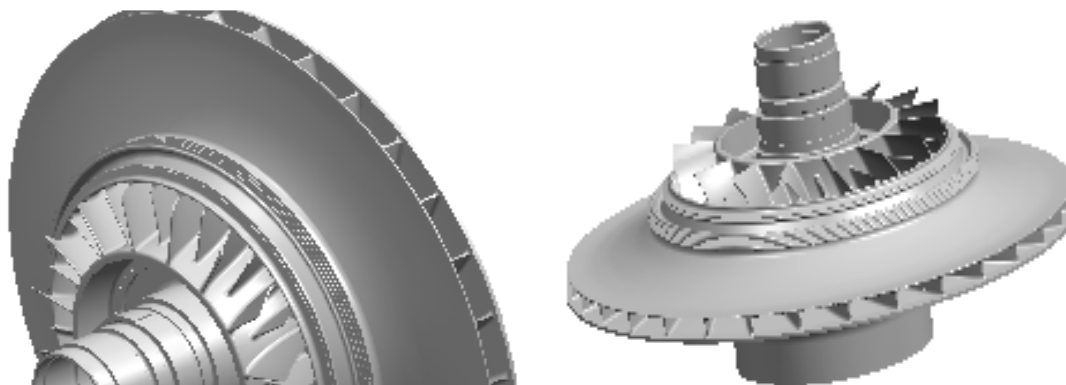


Рис. 6. Виды готовой детали закрытого центробежного колеса с охлаждением покрывного диска

В настоящее время проводится комплекс исследований и испытаний в составе двигателя и на стенде.

Наработка ЗЦК в составе двигателя с применением охлаждения покрывного диска к настоящему времени составила 258 ч.

Статическая прочность ЗЦК была подтверждена испытаниями на разгонном стенде при рабочей температуре, где была достигнута частота вращения ЗЦК 120% от рабочей (более 36000 об/мин) с наработкой 18 мин без обрывов лопаток и покрывного диска.

В настоящее время ФГУП «Завод им. В.Я. Климова» и ВИАМ провели работы по отработке методов автоматизированного и ультразвукового контроля закрытых центробежных колес.

В ближайшие годы планируется увеличение парка самолетов Ил-114 до 200–300 шт. и введение ЗЦК после проведения ГСИ на базовый двигатель ТВ7-117СМ. В связи с этим рассматривается вопрос о серийном изготовлении ЗЦК на ОАО «ВИЛС» из расчета 50–100 шт. в год начиная с 2010 года.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник металлиста: В пяти т. Т. 2 /Под ред. А.Г. Рахштадта и В.А. Бростерма.– М.: Машиностроение, 1976.
2. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Т. 1. Цветные металлы и сплавы /Под ред. Л.П. Лужникова.– М.: Машиностроение, 1967.
3. Металлургия гранул – основной элемент в совершенствовании авиационных двигателей новых поколений /Под. ред. В.С. Петрова, В.В. Старовойтенкова, В.П. Егорова, и др.– СПб.: ФГУП «Завод им. В.Я. Климова», 2003.