

Создание ресурсосберегающих технологий в области авиа- и двигателестроения является стратегической задачей первостепенной важности. За последние несколько лет актуальность представленной работы возросла до критического уровня. К основным элементам стоимости жизненного цикла газотурбинного двигателя относятся эксплуатационные и ремонтные расходы.

Применение ресурсосберегающей технологии лазерной порошковой наплавки для ремонта монокристаллических охлаждаемых лопаток из жаропрочного сплава для газотурбинных двигателей позволяет обеспечивать высокое качество восстановления деталей, сократить стоимость ремонта и продлить ресурс восстановленных деталей.

Общий ресурс работы газотурбинного двигателя (ГТД) составляет 100 000 часов и включает в себя 3 капитальных ремонта с межремонтным ресурсом 25 000 часов (рисунок 1).

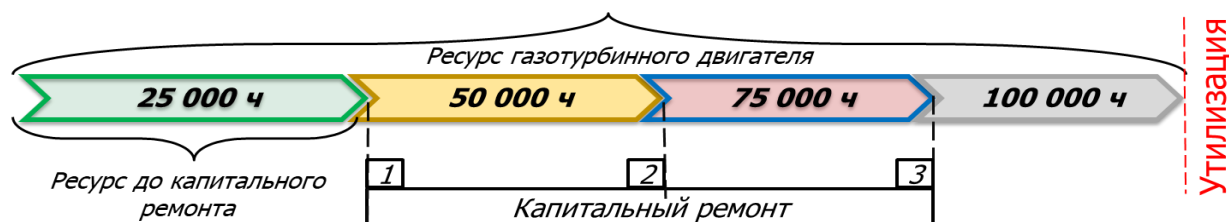


Рисунок 1 - Ресурс ГТД наземного применения

При продлении ресурса газотурбинных установок разработка технологии восстановительного ремонта торцов рабочих лопаток (РЛ) первой ступени турбины высокого давления (ТВД) с продлением ресурса до 100 000 часов ввиду значительной их стоимости является актуальной.

Перед коллективом авторов ставилась цель в увеличении жизненного цикла РЛ первой ступени ТВД из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ после капитального ремонта газотурбинного двигателя до 100 тыс. часов путем восстановления торца пера рабочей лопатки аддитивной технологией лазерной порошковой наплавки отечественными материалами.

Ранее существующая технология восстановления торца пера - высокотемпературная пайка пластин на изношенные торцевые поверхности (рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 2 - Фото рабочей лопатки 1 ступени ТВД

а) до пайки пластины, б) с припаянной пластиной

Однако, этот способ характеризуется высокой трудоёмкостью и большой отбраковкой, а также рядом недостатков:

- выход годного достигает 50%;
- цикл ремонта 21 день;
- ремонт лопаток однократный по причине утонения доньшка колодца торца до минимально допустимых размеров при механической подготовке под высокотемпературную пайку.

Соответственно, при данном методе ремонта максимальный жизненный цикл рабочей лопатки составляет 50 тыс. часов и требует разработки альтернативной ресурсоемкой технологии по опыту зарубежных двигателестроительных компаний.

Разработанная аддитивная технология - лазерная порошковая наплавка изношенного торца пера рабочей лопатки (рисунок 3).

Технология ремонта торца пера РЛ первой ступени ТВД включает в себя:

- предварительное удаление с поверхности пера лопатки теплозащитного керамического покрытия и зачистку наружной и внутренней поверхности стенок колодца, в том числе от следов приработки;
- подачу соосно лазерному лучу потока металлического порошка сплава ЖС32-ВИ, химический состав которого совпадает с материалом лопатки, и наплавку торца пера в среде защитного газа;
- термическую обработку в вакууме и приемочный контроль.



Рисунок 3 – Внешний вид восстановленной РЛ 1 ступени ТВД

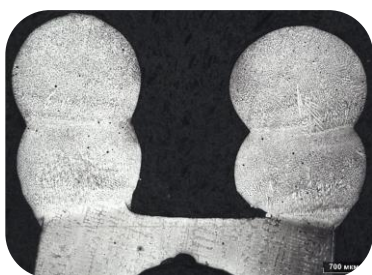
Научная новизна работы состоит в установление значений критических параметров режимов наплавки в импульсном режиме с амплитудной модуляцией импульса плотностью мощности, в которой каждый модулированный импульс лазерного луча состоит из переднего фронта импульса для осуществления наплавки и заднего фронта импульса для сопутствующего подогрева зоны наплавки при температуре равной $0,7...0,8$ $T_{пл}$ материала основы лопатки с обеспечением соотношения диаметра пятна луча лазера к ширине наплавляемой поверхности $0,5...0,7$, в том числе таких внешних факторов, как мощность лазера, количество подаваемого металлического порошка в зону наплавки и скорость перемещения сопла в направлении траектории наплавки. Это обеспечило снижение остаточных напряжений, отсутствие трещин, несплавлений в материале наплавки и в

материале основы лопатки, что в итоге обеспечивает продление ресурса работы рабочих лопаток в составе серийных промышленных двигателей.

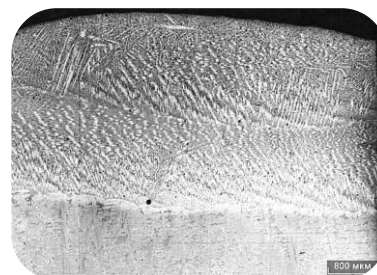
Восстановленные по аддитивной технологии РЛ прошли успешные предъявительские испытания в составе партионного двигателя в течении 2 часов с оформлением технического акта установленной формы (№К2-0720 от 12.02.2018), неразрушающие и разрушающие методы контроля (рисунок 4) на соответствие требованиям технических условий по качеству, усталостные испытания.



а)



поперечный шлиф



продольный шлиф

б)

Рисунок 4 – Лазерная наплавка торца пера (а) и внешний вид структуры материала после наплавки (б)

По итогам выполненных работ выполнено:

- оформлены извещения об изменении №84С.53699 и №94С.53345 на введение разработанного способа ремонта торца пера рабочей лопатки первой ступени ТВД из сплава ЖС32-ВИ в ремонтную конструкторскую документацию АО «ОДК-ПМ»;
- оформлены технические условия ТУ 08.153 (ред. 2) «Лопатки турбин. Наплавка лабиринтов и торцев»;

- оформлен патент №2686499 «Способ ремонта охлаждаемой лопатки из жаропрочного суперсплава турбины газотурбинного двигателя»;
- опубликовано 2 научных труда в отечественных высокорейтинговых журналах и сборниках всероссийских научно-практических конференций.

Эффективность технологии и работоспособность рабочих лопаток из жаропрочных никелевых сплавов после восстановительного ремонта методом лазерной порошковой наплавки подтверждена эксплуатацией в изделиях 83 (ГТУ-16П, ПС-90ГП-2), 84 (ГТУ-12П, ПС-90ГП-1), 86 (ГТУ-10П, ПС-90ГП-3) и 87 (ГТУ-25П, ПС-90ГП-25).

Оценка экономической эффективности от внедрения лазерной наплавки (рис. 5) установила:

- стоимость ремонта РЛ 1 ступени ТВД снизилась до 10% относительно ранее применяемого пайкой и до 80% относительно стоимости новой лопатки;
- сокращение времени ремонта РЛ 1 ступени ТВД до 30% (общего цикла ремонта лопатки до 7 дней);
- снижение брака до 0%;
- возможность многократного ремонта в течение жизненного цикла изделия.

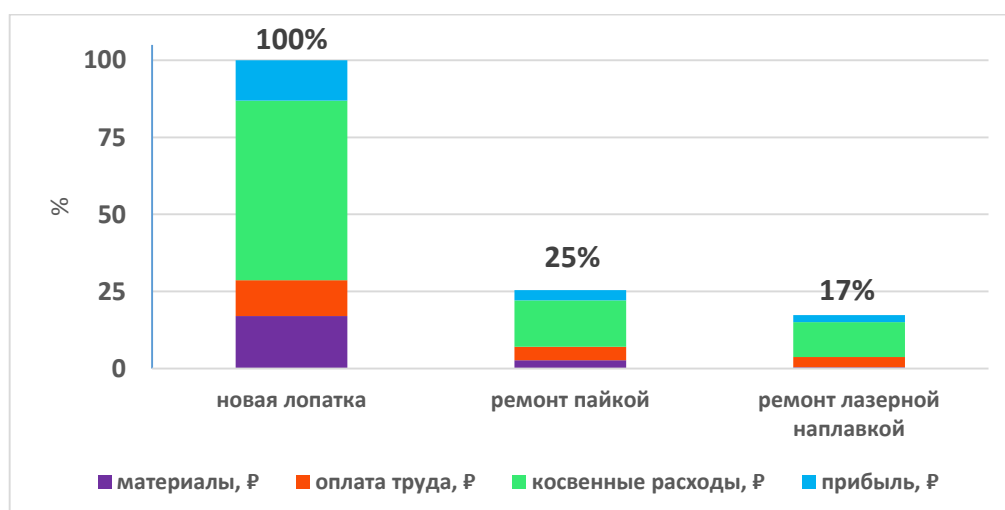


Рисунок 5 – Структура затрат при изготовлении и ремонте РЛ 1 ступени ТВД

Таким образом, в рамках разработки альтернативной технологии, впервые в РФ получен положительный результат наплавки металлопорошковой композиции сплава ЖС32-ВИ на лопатки из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ с содержанием упрочняющей γ' -фазы более 60%, который по классификации никелевых сплавов считается ограничено свариваемым.

Достигнутые научно-технические результаты в сочетании с технологическими возможностями позволяют обеспечить технический задел и трансфер инновационной технологии восстановительного ремонта на широкий спектр жаропрочных никелевых суперсплавов существующего и перспективного продуктового ряда двигателей гражданской и военной авиации.