

ПОДХОДЫ К ЛЕГИРОВАНИЮ КОРРОЗИОНОСТОЙКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ МОРСКИХ ГТД, ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В АВИАЦИИ

Данилов Д.В.

ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск, denis.danilov@uec-saturn.ru

Ключевые слова: жаропрочный сплав, коррозионная стойкость, морская авиация, ГТД

Ключевое направление развития жаропрочных сплавов для лопаток авиационных газотурбинных двигателей сводится к повышению характеристик длительной прочности и предельных рабочих температур, что диктуется требованиями снижения массы двигателя и повышению его КПД.

Стоит отметить, что авиационные газотурбинные двигатели в своем большинстве эксплуатируются в достаточно мягких условиях. На рабочих высотах отсутствует пыль, применяется высококачественное топливо, содержащее минимальное количество примесей. Совокупность указанных условий и требований сформировало традиционные подходы к легированию жаропрочных сплавов на никелевой основе, которое базируется на введении в сплав большого количества γ' -образующих легирующих элементов (прежде всего Al и Ta) для достижения максимальной доли упрочняющей γ' -фазы и максимального подавления диффузионных процессов за счет введения большого количества тугоплавких легирующих элементов таких как Mo, W и другие. Обеспечение коррозионной стойкости для авиационных сплавов отходит на второй план и фактически приносится в жертву параметрам прочности. Дело в том, что ключевым элементом, оказывающим максимальное влияние на повышение коррозионной стойкости, является хром. При этом на высоких температурах он практически не оказывает на сплав упрочняющего действия, но при высоких концентрациях имеет тенденцию к формированию совместно с тугоплавкими элементами охрупчивающих тпу-фаз.

Минимизация хрома в жаропрочных сплавах в большинстве случаев не оказывает критического влияния на эксплуатацию авиационные газотурбинных двигателей. Проблемы обеспечения коррозионной стойкости зачастую решаются за счет использования комплекса защитных покрытий, состоящего и керамического термобарьерного слоя и металлического коррозионностойкого слоя. При эксплуатации в покрытиях неизбежно происходит нарушение целостности покрытия (прежде всего трещины) из-за чего металл лопатки оголяется и лопатка может подвергаться локальной газовой коррозии (окисление). Данный процесс происходит достаточно медленно и прогнозируемо.

Двигатели морской авиации, в особенности амфибий, кроме оксидной коррозии также подвергаются значительному влиянию воздействия морской соли, из-за чего скорость коррозии приобретает катастрофический характер.

По этой причине сплавы для морских газотурбинных двигателей имеют высокое содержание хрома, благодаря чему изменение массы образцов при испытаниях на коррозионную стойкость на три порядка ниже чем у авиационных сплавов [1].

Также необходимо отметить дополнительный негативный эффект, возникающий при эксплуатации лопаток турбин с покрытиями. Металлический коррозионностойкий слой покрытия содержит высокое количество хрома и алюминия. Под воздействием рабочих температур благодаря диффузионным процессам материал лопатки в зоне контакта с покрытием насыщается хромом и алюминием, нарушается структурно-фазовая стабильность сплава. В указанной зоне возникают тпу-фазы (рис. 1), снижающие сопротивление лопатки к циклическим нагрузкам и способствующие отслоению защитного покрытия.

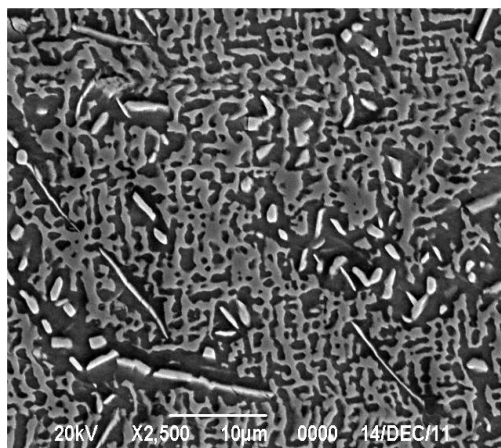


Рис. 1 – Микроструктура сплава ЖС32 под жаростойким покрытием после наработки 1000 ч при температуре 1100 °С

Пересмотр традиционных подходов к легированию жаропрочных сплавов позволил разработать монокристаллический коррозионностойкий сплав СЛЖС5У [2], предназначенный для рабочих лопаток морских газотурбинных двигателей. Данный сплав одновременно содержит достаточно высокое содержание хрома, тугоплавких и γ' -образующих элементов. В нем минимизировано содержание алюминия, часть которого заменена на более эффективный с точки зрения обеспечения коррозионной стойкости. В нем реализован подход программирования диффузионных процессов. Это позволило не только поднять прочностные характеристики, но и обеспечивает равномерное формирование градиентной структуры под защитной окисной пленой или защитным покрытием без образования негативных фаз.

По уровню жаропрочности СЛЖС5У с оптимизированным режимом термической обработки сопоставим монокристаллическим авиационным сплавом ВЖМ12, а при температурах ниже 1000 °С превосходит его (рис.2). Также СЛЖС5У имеет меньшую плотность, 8,48 г/см³ против 8,64 г/см³ у ВЖМ12, что дополнительно позволяет снизить массу двигателя и уменьшить напряжения в самой лопатке турбины, так как часть нагрузки в ней формируется массой лопатки и центробежной силой.

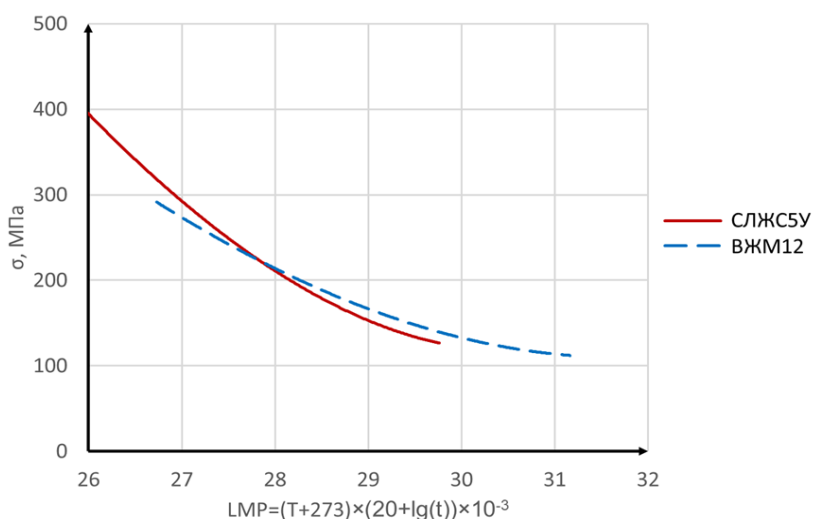


Рис. 2 – Сравнение характеристик длительной прочности морского жаропрочного сплава СЛЖС5У и авиационного жаропрочного сплава ВЖМ12

В настоящий момент сплав СЛЖС5У паспортизован для применения в морских судовых ГТД. Достигнутый уровень прочностных характеристик в сплаве СЛЖС5У

позволяет расширить область применения данного сплава и использовать его в авиационных газотурбинных двигателях с повышенным уровнем требований к коррозионной защите.

Список литературы

1. Гецов, Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. Книга 1. Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии». – 2010. – 611 с.

2. Данилов Д.В., Хрящев И.И., Редькин И.А., развитие комплексной линейки жаропрочных сплавов, предназначенных для морских газотурбинных двигателей. Судостроение. – 2024. – № 3. – С. 19-23.

Сведения об авторах

Данилов Денис Викторович – эксперт отдела главного металлурга опытного завода, область научных интересов: жаропрочные никелевые сплавы.