

А. А. БЫБИН, А. В. НОВИКОВ, А. В. ДЕМЕНТЬЕВ, Е. М. КАНАШЕНКО

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СЕГМЕНТОВ СОПЛОВОГО АППАРАТА ТВД ГПА ИЗ КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проведено комплексное исследование структуры, фазового состава и физико-механических свойств кобальтового сплава марки FSX-414 после длительной эксплуатации. Установлено, что материал находится в состоянии предразрушения и требует проведения ремонтных мероприятий. Определена стратегия восстановительной термической обработки. Изучены особенности термической обработки при различных температурах аустенизации и старения. Показано влияние термообработки на структуру и свойства кобальтового сплава. Рекомендован оптимальный режим восстановительной термической обработки. *Сегменты соплового аппарата; кобальтовый сплав; деградация структуры; восстановительная термическая обработка; рекомендации для технологии ремонта*

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность, функциональная устойчивость и ресурс стационарных газоперекачивающих агрегатов во многом определяются конструкционной прочностью и надежностью лопаточного аппарата. Сопловой аппарат (СА) турбины I ступени агрегатов типа ГТК-25И и ГТК-10И представляет собой отдельные сегменты, образованные двумя-тремя спаянными или сваренными между собой направляющими лопатками. Указанные блоки работают в наиболее сложных условиях, подвергаясь воздействию высоких и быстро сменяющихся температур, изгибных и растягивающих напряжений, агрессивных сред в виде продуктов горения топливно-воздушной смеси. В результате такой эксплуатации материал лопаток испытывает значительные структурно-фазовые изменения, которые приводят к снижению уровня механических характеристик сплава и ограничивают дальнейшую работоспособность сегмента в целом. В связи с высокой стоимостью запасных частей возникает необходимость в ремонте поврежденных элементов СА.

Отечественный и зарубежный опыт ремонта аналогичных деталей показывает, что в результате воздействия циклически изменяющихся высоких температур кобальтовые сплавы испытывают полиморфные превращения, приводящие в конечном итоге к зарождению и росту топологически плотноупакованных фаз. Наличие таких фаз в материале недопустимо в связи с потерей его прочности и пластичности [1]. В работах [2, 3]

указывается, что путем использования термической обработки удается восстановить требуемую структуру сплава и тем самым обеспечить заданный уровень прочностных и пластических свойств материала.

Цель работы – оценить постэксплуатационное состояние лопаток соплового аппарата турбины высокого давления из кобальтового сплава FSX-414 и разработать режим восстановительной термической обработки.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на образцах, вырезанных из лопаток соплового аппарата турбины высокого давления (ТВД), имеющих наработку ~ 30 тыс. ч. Образцы изучали в состоянии после эксплуатации, а также после проведения восстановительной термической обработки в камерной печи по режимам: температура закалки 1150...1250 °С, выдержка 4 ч + старение при 980 °С в течение 4 и 8 ч. Охлаждение проводили с печью без регламентирования скорости охлаждения, а также со скоростью 20...40 °С/мин.

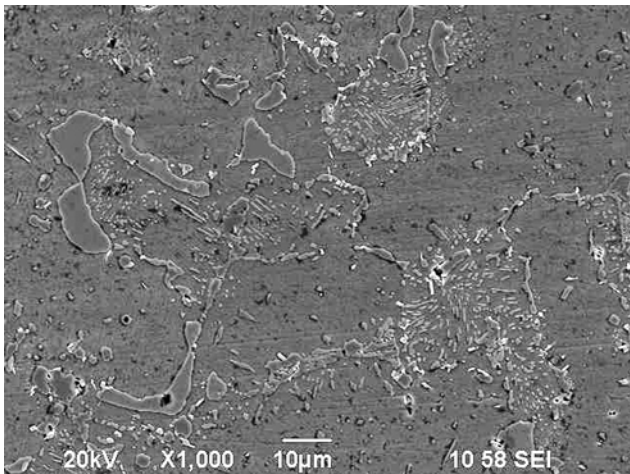
Структуру образцов в исходном и термически обработанном состоянии изучали на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV с проведением микрорентгено-спектрального анализа. При металлографическом анализе структуры материала учитывалось, что полки лопаток подвергаются воздействию относительно низких температур и структура материала в этих зонах близка к исходной, что позволяет проводить сравнительную оценку степени деградации материала в перовой части. Фазовый состав исследовали на дифрактометре Rigaku с компьютерной обработкой полученных

рентгенограмм. Механические испытания проводили на плоских образцах с размером рабочей части $4,5 \times 1,0 \times 1,0$ мм на специальной разрывной машине.

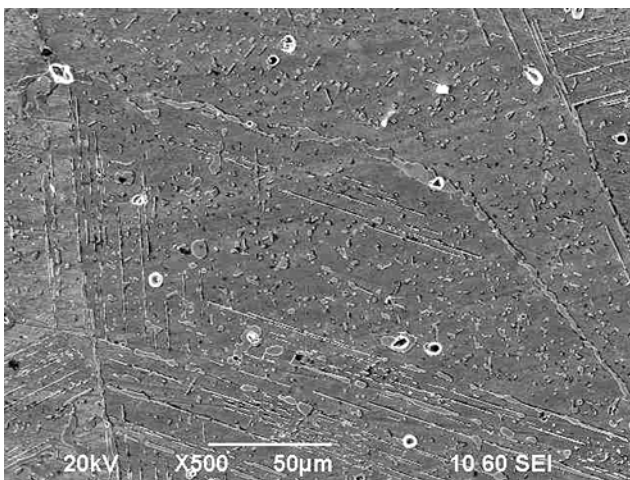
2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 приведена микроструктура сплава на образцах, вырезанных из пера и полки сегмента соплового аппарата ТВД.

Установлено, что микроструктура материала сегментов СА в исходном состоянии представляет собой твердый раствор, упрочненный мелкодисперсными карбидами типа $Me_{23}C_6$ преимущественно округлой формы. Карбиды в эвтектических выделениях представлены тонкими пластинками, чередующимися с прослойками γ -матрицы. По границам зерен наблюдаются карбиды вытянутой формы.



a



б

Рис. 1. Микроструктура сплава FSX-414 после эксплуатации в течение 12 тыс. ч: *a* – полка; *б* – перо

В процессе эксплуатации происходит диффузионный обмен элементами между

фазами, вдоль границ зерен, между поверхностью и внутренними объемами сплава, что в итоге приводит к изменению структуры материала. Так, по результатам электронно-микроскопического анализа выявлено, что мелкодисперсные карбиды $Me_{23}C_6$ округлой формы в результате процессов коагуляции приняли вытянутую иглообразную форму, а в самом сплаве вследствие различных твердофазных реакций, постоянно изменяющих соотношение концентраций элементов в фазах и оказывающих влияние на фазовую стабильность, сформировались топологически плотноупакованные σ -фазы. Наблюдаемые структурно-фазовые изменения в кобальтовом сплаве сказываются и на механических свойствах: происходит падение прочности и пластичности исследуемого материала в 1,2 и 1,3 раза соответственно (рис. 2). На основании полученных данных можно констатировать, что материал лопаток СА ТВД после эксплуатации находится в состоянии предразрушения, что требует проведения восстановительной термической обработки [4].

В соответствии с концепцией восстановительной термической обработки она должна приводить к восстановлению структуры металла путем нагрева до температуры аустенизации и повторного старения. Ряд авторов отмечают, что в результате процессов образования новых фаз или расслоения уже имеющихся проведение термической обработки при температуре аустенизации может оказаться недостаточным, так как при данной температуре не произойдет полное растворение и повторное выделение упрочняющих фаз в сплаве [5]. В связи с этим рекомендуется некоторое увеличение температуры по сравнению с серийной, при которой будет проводиться гомогенизация сплава.

Применительно к кобальтовому сплаву FSX-414 серийная термическая обработка проводится в два этапа: гомогенизация при 1150°C и старение при 980°C . В обоих случаях время выдержки составляет 4 часа [6]. Кобальтовый сплав, находящийся в постэксплуатационном состоянии и затем термически обработанный по серийному режиму, характеризуется тем, что пластичность возрастает в 1,5 раза, а уровень прочности по сравнению с состоянием после эксплуатации остается без изменения (рис. 2).

Повышение температуры гомогенизации от 1150 до 1250°C приводит к росту уровня прочности в 1,3 раза и падению пластичности в

4 раза (рис. 2). Установленные закономерности изменения прочностных и пластических свойств кобальтового сплава, по-видимому, связаны с тем, что при повышении температуры гомогенизации увеличивается количество дефектов упаковки, представляющих собой атомные слои, уложенные в плотноупакованный ряд в пределах аустенитной ГЦК матрицы [1]. В процессе взаимодействия дислокаций с дефектами упаковки происходит достаточно сильное упрочнение сплава и снижение его пластичности.

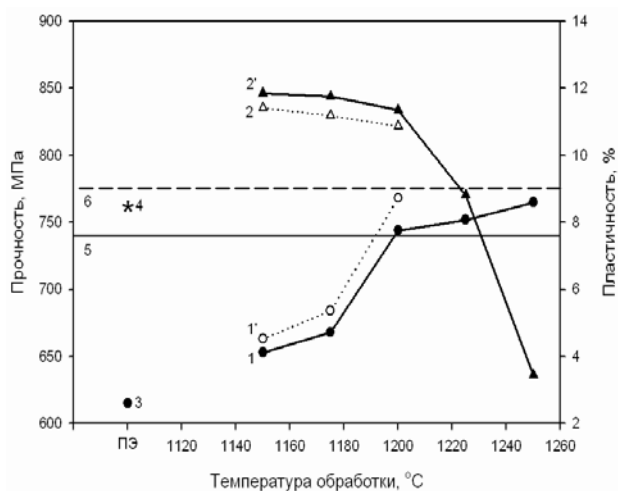


Рис. 2. Механические свойства сплава FSX-414 в различном состоянии: 1, 1', 3, 5 – предел прочности; 2, 2', 4, 6 – относительное удлинение; 1, 2' – старение 4 ч; 1', 2 – старение 8 ч; 3, 4 – после эксплуатации до ремонта; 5, 6 – нормативные значения

При увеличении времени старения с 4 до 8 часов происходит незначительный рост прочности сплава и падение его пластичности. Возрастание температуры гомогенизации с 1150 до 1200 °C при 8-часовом старении вызывает увеличение прочности и уменьшение пластичности сплава в 1,3 и 1,2 раза соответственно. Наблюдаемые закономерности связаны с тем, что к упрочению сплава за счет увеличения количества дефектов упаковки добавляется эффект упрочнения сплава за счет выделения мелкодисперсных вторичных выделений карбида $Cr_{23}C_6$, активное образование которого происходит при температуре старения [1].

Применение регламентированной скорости охлаждения с температуры гомогенизации не дало положительного эффекта: при температуре гомогенизации 1200 °C охлаждение сплава со скоростью 20...40 °C/мин привело к падению прочности и пластичности в 1,2 и 1,9 раза

соответственно. Высокая скорость охлаждения приводит к формированию тонких выделений карбида хрома, которые не обеспечивают достаточной прочности сплава и в значительной мере способствуют падению его пластичности [1].

Установленные закономерности хорошо коррелируют с данными рентгенофазового анализа, проведенного на образцах в исходном и термически обработанном состоянии. При расшифровке дифрактограмм в соответствии с данными работы [7] были идентифицированы следующие фазы: $\gamma-Co$ (111), $\gamma-Co$ (311), $Cr_{23}C_6$ (440), $Cr_{23}C_6$ (531) и $\sigma-CoCr$. Изменение интенсивности линий, характерных для указанных фазовых составляющих, в зависимости от температуры гомогенизации представлено на рис. 3.

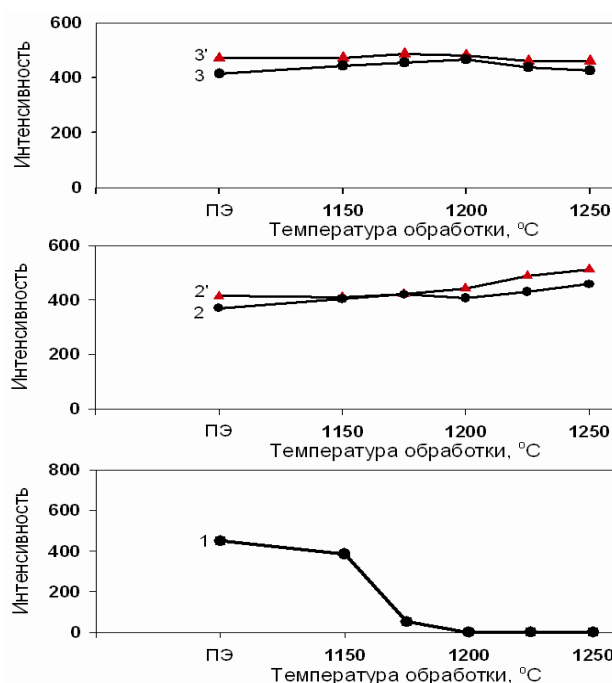


Рис. 3. Изменение интенсивности пиков различных фаз в сплаве FSX-414 в зависимости от температуры гомогенизации: 1 – $\sigma-CoCr$; 2 – $Cr_{23}C_6$ (440); 2' – $Cr_{23}C_6$ (531); 3 – $\gamma-Co$ (311); 3' – $\gamma-Co$ (111); ПЭ – состояние сплава после эксплуатации

Анализ данных показывает, что гомогенизация, проведенная при температурах от 1150 до 1250 °C, обеспечивает сохранение аустенитной матрицы с ГЦК решеткой. Возрастание интенсивности линий, отвечающих карбиду $Cr_{23}C_6$, свидетельствует об увеличении доли карбидных выделений в сплаве. Фаза $\sigma-CoCr$, наблюдаемая в сплаве после эксплуатации и способствующая сильному его охрупчиванию, с повышением температуры полностью исчезает, что обеспечивает возрастание прочности материала.

ВЫВОД

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что материал, из которого изготовлены лопатки СА ТВД, после эксплуатации находится в состоянии предразрушения и требует проведения восстановительной термической обработки. В качестве оптимального по критериям прочности и пластичности может быть рекомендован режим термической обработки, включающий гомогенизацию при 1200 °С и последующее старение при 980 °С в течение 8 часов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / под ред. Симса Ч. Т., Столоффа Н. С., Хагеля У. К.; пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. Шалина Р. Е. М.: Металлургия, 1995. 384 с.
2. **Каблов Е. Н.** Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) М.: МИСИС, 2001. 632 с.
3. **Гецов Л. Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин. В 2 кн. Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010. Кн. 1. 611 с.
4. Научно-технические основы ремонта лопаток соплового аппарата / М. К. Смыслова, В. В. Седов, А. В. Новиков и др. // 6-я науч.-техн. конф. «Сварка. Контроль. Реновация – 2006»: сб. тр. – Уфа: Гилем, 2007. С. 223–231.
5. **Кишкин С. Т.** Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды. (К 100-летию со дня рождения) – М.: Наука, 2006. 407 с.
6. **Строганов Г. Б., Чепкин В. М.** Литейные жаропрочные сплавы для газовых турбин М.: ОНТИ МАТИ, 2000. 128 с.
7. **Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ: уч. пособие для вузов. 3-е изд. доп. и перераб. М.: МИСИС, 1994. 328 с.

ОБ АВТОРАХ

Быбин Андрей Александрович, доц. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж. по автоматиз. технол. процессов и производств (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двиг. и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. технологий восстановительного ремонта деталей газовых турбин.

Новиков Антон Владимирович, ген. директор ООО «Производственное предприятие "Турбинаспецсервис"». Дипл. инж. по технологии и машинам сварочного производства (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. ремонта газотурбинной техники.

Дементьев Алексей Владимирович, инженер-исследователь ООО «Производственное предприятие "Турбинаспецсервис"». Дипл. инж. по спец. инженер-физик (УГАТУ, 2008). Иссл. в области термической обработки материалов для газотурбинной техники.

Канашенко Евгений Михайлович, главный инженер ООО "Газпром центрремонт" ОАО "Газпром". Дипл. инж. по турбиностроению (Брянский институт транспортного машиностроения, 1971). Канд. техн. наук по методам контроля и диагностики в машиностроении (ЦНИИТМАШ, 1977). Иссл. в обл. газотурбостроения.