

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.

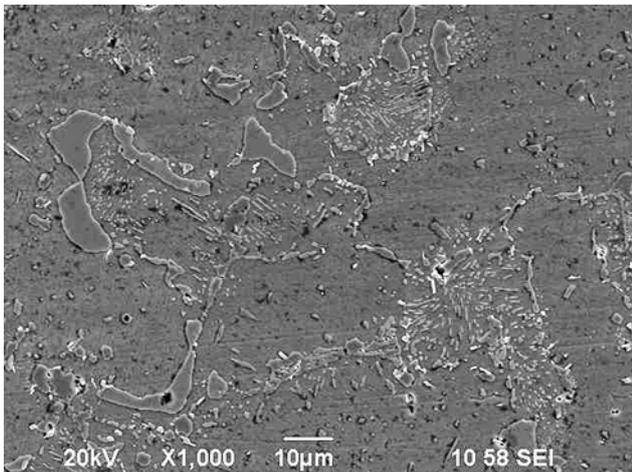
Структуру образцов в исходном и термически обработанном состоянии изучали на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV с проведением микрорентгено-спектрального анализа. При металлографическом анализе структуры материала учитывалось, что полки лопаток подвергаются воздействию относительно низких температур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

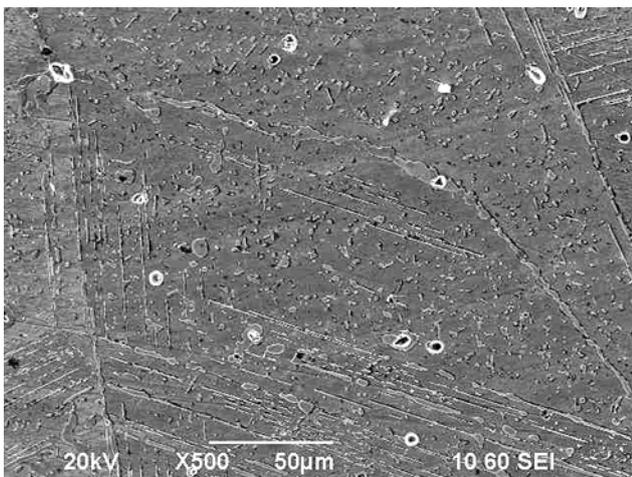
## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

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  $\gamma$ -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

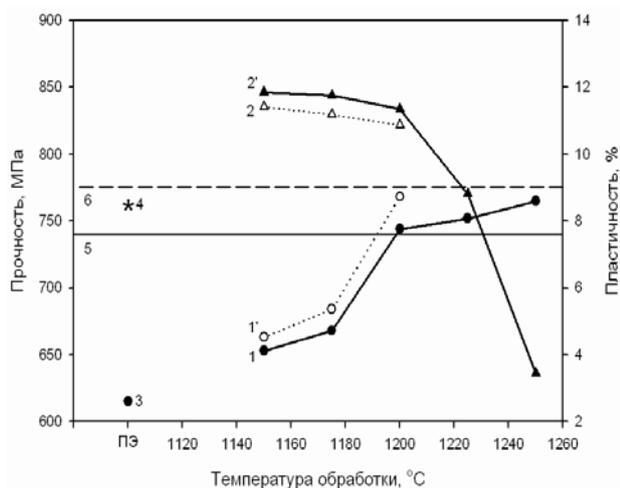
фазами, вдоль границ зерен, между поверхностью и внутренними объемами сплава, что в итоге приводит к изменению структуры материала. Так, по результатам электронно-микроскопического анализа выявлено, что мелкодисперсные карбиды  $Me_{23}C_6$  округлой формы в результате процессов коагуляции приняли вытянутую 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  $\sigma$ -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  $1150^\circ\text{C}$  и старение при  $980^\circ\text{C}$ . 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  $1250^\circ\text{C}$  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.



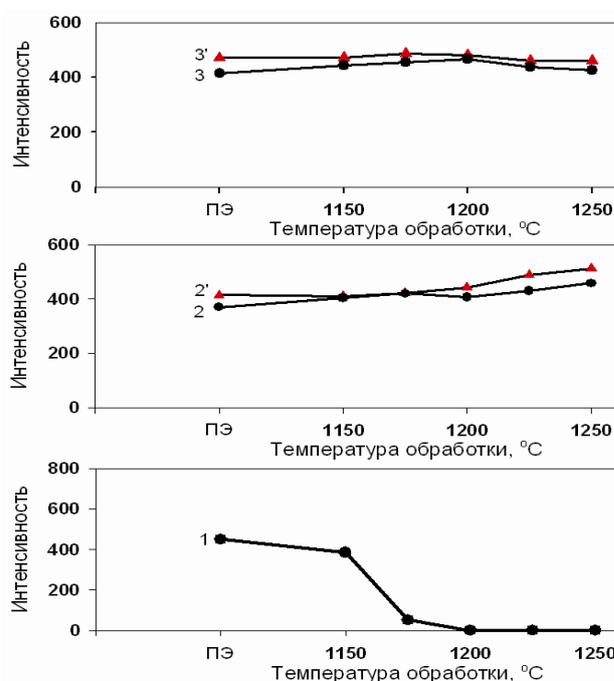
**Рис. 2.** Механические свойства сплава FSX-414 в различном состоянии: 1, 1', 3, 5 – предел прочности; 2, 2', 4, 6 – относительное удлинение; 1, 2' – старение 4 ч; 1', 2 – старение 8 ч; 3, 4 – после эксплуатации до ремонта; 5, 6 – нормативные значения

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<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, 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: γ-Co (111), γ-Co (311), Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (440), Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (531) и σ-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 – σ-CoCr; 2 – Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (440); 2' – Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (531); 3 – γ-Co (311); 3' – γ-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<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, свидетельствует об увеличении доли карбидных выделений в сплаве. Фаза σ-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.