

УДК 669.715.018

Д-р техн. наук Н.Е. Калинина, канд. техн. наук А.Е. Юхименко,
канд. техн. наук А.В. Калинин, Д.Р. Павлов

ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОСТОЙКОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Приведены результаты экспериментов по наномодифицированию жаропрочных никелевых сплавов для лопаток газотурбинных двигателей. Проанализирована существующая технология модифицирования. Рассмотрена разработанная эффективная технология наномодифицирования никелевых сплавов тугоплавкими композициями на основе титана.

Наведено результати експериментів з наномодифікування жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів. Проаналізовано існуючу технологію модифікування. Розглянуто розроблену ефективну технологію наномодифікування нікелевих сплавів тугоплавкими композиціями на основі титану.

The results of experiments on nanomodification of heat-resistant nickel alloys for turbine engine blades are presented in the paper. The existing technology of modification is analyzed. The efficient procedure of nanomodification of nickel alloys with titanium-based high-melting compounds was developed.

Актуальность проблемы

Проблема упрочнения многокомпонентных сплавов на основе никеля, алюминия, титана особенно важна для ответственных изделий машиностроения, авиационной и космической техники [1]. В авиации и турбостроении применяют жаропрочные многокомпонентные никелевые сплавы, которые должны иметь структурную термостабильность, высокую жаропрочность, длительную прочность. Эффективным способом измельчения структурных составляющих сплавов на макро- и микроуровнях является обработка многокомпонентных сплавов дисперсными модификаторами. В последнее десятилетие интерес к этой проблеме существенно возрос, так как было установлено, что уменьшение размера кристаллов ниже некоторой пороговой величины может радикально изменять свойства металлов и сплавов. В связи с этим одним из актуальных научно-технических направлений получения высокопрочных сплавов является модифицирование нанодисперсными композициями.

Пределы выносливости лопаток с коррозионными повреждениями могут снижаться в несколько раз, и это снижение усиливает-

ся с увеличением времени испытаний. На предел выносливости лопаток существенно влияет и глубина коррозионного повреждения [2]. Повышение рабочих температур лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) сделало актуальной задачу обеспечения высокого сопротивления газовой коррозии. Высокий уровень жаростойкости является одним из важных требований, предъявляемых к сплавам для лопаток горячего тракта авиационных ГТД [3].

Материалы и методика экспериментального исследования

Материалом исследования служил литейный жаропрочный никелевый сплав типа ЖС, применяемый для изготовления рабочих лопаток газотурбинного двигателя [4]. Изучение структурных изменений в сплавах до и после наномодифицирования проводили методом металлографического анализа.

Результаты исследований и их обсуждение

С целью повышения коррозионной стойкости сплава исходный никелевый сплав ЖСЗДК-ВИ модифицировали нанодис-

персными композициями на основе карбонитрида титана. Механизм действия модификаторов в никелевом расплаве заключается в зарождении многочисленных первичных кристаллов матричной фазы на поверхностях вводимых наночастиц. Наномодификатор на основе Ti (C,N) диспергирует дендриты первичного аустенита.

Исследование макроструктуры лопаток никелевого сплава до модифицирования показало крайнюю неоднородность по сечению. Исходные образцы имели крупнокристаллическую структуру с размером зерен 5...8 мм. Образцы из модифицированных лопаток характеризовались однородной, мелкозернистой структурой с размером зерен до 1 мм. Таким образом, в результате модифицирования средний размер зерна уменьшился в 5...8 раз.

В немодифицированных образцах присутствуют крупные включения, расположенные по границам зерен. В модифицированных образцах включения значительно дисперснее и располагаются как по границам зерен, так и внутризеренно, способствуя упрочнению.

Жаростойкость – сопротивление металла окислению, способность материала противостоять воздействию на его поверхность внешней окислительной среды при высоких температурах. Испытания на жаростойкость являются одним из важных видов исследований при разработке литейных никелевых сплавов для лопаток ГТД. Непрерывное повышение температуры газа перед турбиной выдвигает все более высокие требования к проблеме обеспечения необходимого уровня жаростойкости этого класса материалов. Поверхностное окисление лопаток приводит, с одной стороны, к уменьшению сечений и, следовательно, снижению несущей способности лопаток, с другой – вследствие избирательности процесса окисления (преимущественно по границам зерен) к значительному ухудшению качества поверхности, что вызывает снижение свойств материала. Развитие технологии литья по выплавляемым моделям позволяет получить конструкции лопаток со сложной

геометрией воздухоохлаждаемых каналов, что повысило степень охлаждения, но стимулировало появление повреждений, ранее при эксплуатации не встречающихся. Основными причинами разрушений и досрочного съема лопаток с двигателя стали процессы окисления поверхностей внутренних охлаждаемых каналов лопатки [5].

Таким образом, сопротивление ГТД коррозионному воздействию характеризует совершенство машины по всем ее показателям. Однако наиболее актуальной проблемой коррозии следует считать ее влияние на конструкционную прочность и надежность деталей. Коррозию можно рассматривать как составной элемент многокомпонентного нагружения.

Жаропрочные сплавы на никелевой основе в окислительной среде обладают высокой стойкостью к высокоскоростной газовой коррозии. Однако попадание в тракт двигателя пыли, содержащей различные соли, приводит к значительному росту скорости окисления. Эти явления получили названия сульфидной и высокоскоростной солевой коррозии. Поскольку в ГТД применяют коррозионно-стойкие материалы, для деталей двигателей более актуальна проблема высокотемпературной газовой коррозии [6].

Жаростойкость, или сопротивление газовой коррозии, определяется скоростью окисления, т.е. привесом на единицу поверхности за определенный промежуток времени при температуре испытания. При температурах около 1000°C образуются продукты сгорания топлива – оксиды. Если оксиды летучи, то жаростойкость определяется потерей массы, в остальных случаях – массой материала образцов со снятой окалиной.

Определение жаростойкости проведено в промышленных условиях при температуре 1000±5 °C в течение от 2,5 до 15 ч. Образцы помещали в печь в керамическом тигле. Первый нагрев осуществляли в тигле с крышкой, заполненном порошком технической серы, последующие нагревы – в воздушной атмосфере. Время каждой тер-

моэкспозиции составляло 2,5 ч. Испытания проводили гравиметрическим методом по изменению массы образцов и металлографическим методом замера глубины коррозии. С целью повышения склонности к окислению и коррозии перед нагревом образцы подвергали электролитическому травлению. После первых 2,5 ч испытаний на жаростойкость образцы приобрели темно-серый цвет с соломенным оттенком и потерей металлического блеска. После 5 ч – масса образцов уменьшилась в среднем на 3 %. Обнаружены признаки коррозионного повреждения исходного сплава без глубинного окисления (а). В модифицированном образце коррозионное повреждение наблюдалось в виде слабо различимых разветвлений по доньшку лунок, что характерно для начальной стадии окисления (б).

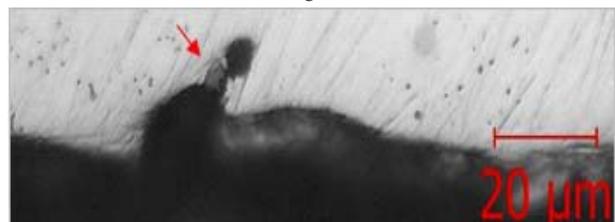
Пределы выносливости лопаток с коррозионными повреждениями могут снижаться в несколько раз, и это снижение усиливается с увеличением времени испытаний. На предел выносливости лопаток существенно влияет и глубина коррозионного повреждения, что указано в работе [7].



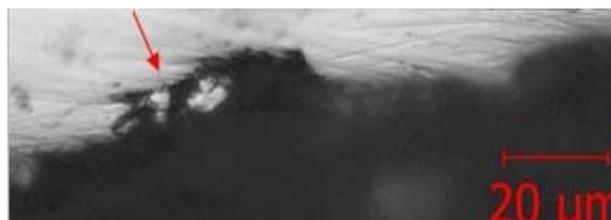
а



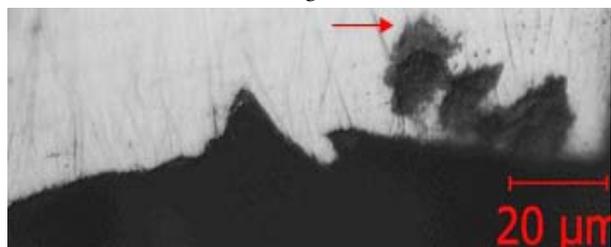
б



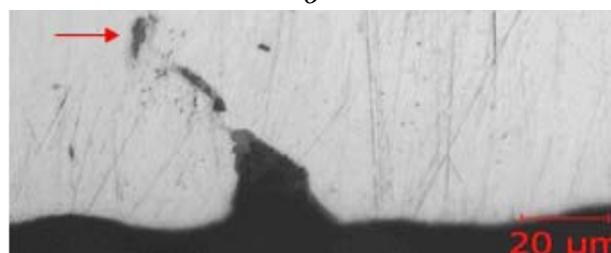
в



г



д



е

Поверхностный слой образцов сплава ЖСЗДК-ВИ после испытаний на жаростойкость, $T=1000^{\circ}\text{C}$, $\times 500$:

а, б – выдержка 5 ч; в, г – выдержка 10 ч;
д, е – выдержка 15 ч

При последующих нагревах и выдержке в печи при 1000°C образцы приобрели темно-серый оттенок поверхности. После 10 ч испытаний уменьшение массы образцов по сравнению с 5 ч менее существенно и составило в среднем 1,5 %.

Металлографическая оценка интенсивности высокотемпературного окисления и коррозионного поражения металла позволила установить, что немодифицированные образцы были наиболее интенсивно повреждены (до ~ 30 мкм) с образованием множественных разветвлений и оксидов серого цвета (е). В модифицированных образцах обнаружены коррозионные ответвления, однако внутреннего окисления с образованием оксидов не выявлено, глубина повреждения составила до 17 мкм (з).

Визуальный осмотр показал, что после 15 ч испытаний на жаростойкость на поверхности образцов образовался рыхлый налет серо-зеленого оттенка, характерный

для продуктов окисления. На поверхности немодифицированных образцов продукты окисления располагались преимущественно вдоль границ макрозерен, вытянутых в направлении кристаллизации, на модифицированных образцах – в виде равномерно распределенных отдельных точек. Уменьшение массы образцов составило 2 %.

Микроанализом поперечных шлифов установлено, что во всех образцах имело место внутреннее язвенное окисление с образованием оксидов серого цвета предположительного состава $Al_2O_3 + NiAl_2O_4$. На поверхности немодифицированных образцов найдены лунки, полностью заполненные оксидами. На модифицированных образцах обнаружены отдельные участки поверхности, покрытые плотным слоем оксидов серого цвета, толщиной не более 15 мкм. Более интенсивное высокотемпературное окисление наблюдали в немодифицированном образце глубиной ~40 мкм (d).

После испытания продолжительностью 15 ч на поверхности модифицированных образцов обнаружены локальные коррозионные повреждения с образованием оксидов, залегающих на глубину не более 30 мкм (e). Таким образом, в результате модифицирования сплава ЖСЗДК-ВИ нанодисперсными композициями достигнуто повышение жаростойкости сплава.

Выводы

Более высокую коррозионную стойкость имели модифицированные образцы. После испытаний на жаростойкость при температуре 1000°C глубину коррозии в модифицированном сплаве удалось уменьшить в среднем на 10 мкм, т. е. на 20...25 % по сравнению с немодифицированным состоянием. Таким образом, можно сделать вывод, что модифицированный сплав ЖСЗДК-ВИ более стойкий к высокотемпературной межкристаллитной коррозии, что вызвано равномерным распределением включений по объему зерна.

Список использованной литературы

1. Богуслаев В.О. Авіаційно-космічні матеріали та технології / В.О. Богуслаєв, О.Я. Качан, Н.Є. Калініна. – Запоріжжя, 2009. – 383 с.
2. Кузнецов Н.Д. Перспективные газотурбинные двигатели и проблема коррозии / Н.Д. Кузнецов // Проблемы прочности. – 1993. – № 8. – С. 78-86.
3. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. – 631 с.
4. Калинина Н.Е., Калиновская А.Е., Калинин В.Т. Материаловедческие аспекты наномодифицирования многокомпонентных никелевых сплавов // Авиационно-космическая техника и технология. – Вып. 7/104. – Харьков: ХАЦ, 2013. – С. 17-22.
5. Высокотемпературная коррозия и применение покрытий для защиты лопаточного аппарата ГТУ/ В.И. Никитин, И.П. Комиссарова, Б.А. Мовчан и др. // Энергомашиностроение. – 1981. – № 9. – С. 21-26.
6. Беліков С.Б. Питання забезпечення рівня високотемпературної корозійної стійкості жароміцних сплавів на основі нікелю/ С.Б. Беліков, Д.Л. Денісов, С.В. Гайдук // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя, 1999, № 1. – С. 33-36.
7. Научные подходы к созданию высококоррозионно-стойких жаропрочных сплавов для деталей проточной части судовых и стационарных ГТУ/ А.Д. Коваль, С.Б. Беликов, Е.Л. Санчугов, А.Г. Андриенко // Новые конструкционные материалы, эффективные методы их обработки, повышения надежности и долговечности деталей машин и конструкций: сб. науч. тр. – Киев: УМК ВО. – 1991. – С. 4-7.

Статья поступила 18.11.2015