

НОВЫЙ СПОСОБ ИСПЫТАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ© 2012 Е. А. Тихомирова¹, Е. Ф. Сидохин²¹Открытое акционерное общество «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург²Научно-технический центр «Экспертцентр», г. Москва

Рассмотрены новый способ испытания покрытий на жаропрочных сплавах и устройство для его осуществления.

Покрытие, термическая усталость, термоциклические испытания, термическое расширение, стеснение, жёсткость.

Чрезвычайно эффективным способом повышения ресурса при эксплуатации турбинных лопаток является нанесение защитных покрытий. Практическое применение получили разнообразные методы нанесения покрытий: осаждение из газовой фазы, диффузионное насыщение, электронно-лучевая обработка, различные способы наплавки. Работоспособность лопаток с оптимальными покрытиями в значительной степени зависит от режима их термической обработки и процессов, происходящих во время длительной эксплуатации. В связи с этим весьма актуален вопрос разработки оптимальных покрытий, учитывающий химический состав материала основы и покрытия, а также влияние термического воздействия при нанесении покрытий на структуру и свойства металла основы. Современные жаростойкие покрытия, создаваемые с помощью ионно-плазменной и электронно-лучевой технологии, представляют собой разнообразные многослойные композиции системы NiCrAl(Ta)Y+ NiAlCrY, дополненные барьерными слоями, а также композиции, представляющие собой комбинацию из внешнего керамического слоя и внутренних металлических слоёв. Их физико-механические свойства должны обеспечивать сохранность и устойчивость покрытия в процессе эксплуатации лопаток, которая сопряжена с упругопластической деформацией материала под действием постоянно действующих напряжений при очень высоких температурах и в ходе периодически повторяющегося изменения температуры.

В связи с ограничением термической деформации материала подложки из-за

стеснения и различий в способности к термической деформации у подложки и материала покрытия в них развиваются значительные и крайне неоднородные напряжения, способные вызвать зарождение трещин как в подложке, так и в покрытии. Термическое расширение материалов, применяемых для изготовления покрытий, и средний коэффициент линейного расширения жаропрочных сплавов в диапазоне до 1000°C имеют достаточно близкие значения. Взаимодействие между собой в ходе термического воздействия материалов является серьёзной проблемой и требует всестороннего изучения адгезионно-когезионных свойств жаростойких покрытий и их поведения при циклическом изменении температур. В ходе исследований определяют изменение многих свойств: теплопроводности, плотности, пористости, коэффициентов температурного расширения, адгезионной прочности. Испытания выполняют в условиях, близких к эксплуатационным, имитируя работу покрытия на лопатке в широком диапазоне температурно-силового воздействия. Такие условия могут быть реализованы при термоциклических (ТЦ) испытаниях с варьируемой жёсткостью нагружения как на образцах, так и непосредственно на лопатках. При испытаниях, включающих только теплосмену образцов с покрытиями, неизменно повторяется схема, в которой материал покрытия испытывает растяжение в ходе нагрева и сжатие при охлаждении. В то же время в реальных условиях работы лопатки спектр ситуаций гораздо шире даже на протяжении одного цикла в разных частях лопатки.

В целях решения этой проблемы и возможности обеспечить достаточно высокую массовость контроля разработаны способ и устройство для термоциклических испытаний образцов с покрытиями.

Устройство представляет собой рамку, жёсткость которой значительно выше жёсткости исследуемого образца. На двух её противоположных стенках выполнены средства закрепления головок образца. Габаритные размеры самой рамки мало отличаются от размеров образца, подвергаемого термоциклическим испытаниям. Профиль стенок рамки для улучшения нагрева и охлаждения желательно выполнять ребристым. В целях задания величины упругопластической деформации при ТЦ испытаниях рамка должна быть выполнена из материала, отличающегося от материала испытуемого образца коэффициентом линейного расширения $\alpha_{\text{ср}}$. Для получения максимальной величины упругопластической деформации $\Delta\varepsilon$, т.е. для полного перехода термической деформации $\varepsilon^{\text{терм}}$ в $\Delta\varepsilon$, рамка должна быть из материала с близким к нулю $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}}$, например, из кварца, кремния или инвара. Рамка из материала, у которого $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}} > 0$, но меньше, чем у образца $\alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}}$, позволяет получить меньшую, чем в первом случае, упругопластическую деформацию $\Delta\varepsilon$, величина которой зависит от соотношения $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}}$ и $\alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}}$. При этом в ходе изменения температуры нагрев будет также сопровождаться деформацией сжатия, а охлаждение – деформацией растяжения. Если рамка изготовлена из материала, у которого $\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}} > \alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}}$, то в ходе испытаний будет происходить, наоборот, растяжение при нагреве и сжатие при охлаждении. Эта схема невыполнима на стационарных установках, но практически может реализоваться в ходе развития термической усталости изделий [1] и поэтому представляет особый интерес для исследований поведения покрытий. При выполнении рамки и образца из материалов с разными $\alpha_{\text{ср}}$ задаваемая величина упругопластической деформации будет составлять $\Delta\varepsilon \approx (\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}} - \alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}})\Delta T$, где

$\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ - размах изменения температуры в цикле.

В качестве примера рассмотрим подбор материала рамки для ТЦ испытаний покрытий на жаропрочном никелевом сплаве (ЖНС) турбинных лопаток с $\alpha_{\text{ср}}^{\text{обр}} \approx 15 \times 10^{-6}$ град $^{-1}$. Если испытания проводить в диапазоне температур $\sim 100 - 1000^\circ\text{C}$, то рамка, выполненная из кварца или инвара, позволила бы получить предельную величину $\Delta\varepsilon \approx 1.3\%$. Но это нереализуемый случай, поскольку коэффициент линейного расширения кварца и инвара сильно изменяется в указанном интервале температур. При выполнении рамки из кремния ($\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}} \approx 2.3 \times 10^{-6}$ град $^{-1}$) $\Delta\varepsilon$ получится меньше, но всё же достаточно большим $\Delta\varepsilon \approx 1.1\%$. Для рамки из Мо или W ($\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}} \approx 4.5 \times 10^{-6}$ град $^{-1}$) - $\Delta\varepsilon \approx 0.9\%$; из Ti ($\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}} \approx 7.2 \times 10^{-6}$ град $^{-1}$) - $\Delta\varepsilon \approx 0.7\%$; из стали ($\alpha_{\text{ср}}^{\text{рамка}} \approx 11 \times 10^{-6}$ град $^{-1}$) - $\Delta\varepsilon \approx 0.3\%$. Из рассмотренных примеров следует, что предлагаемый способ позволяет в достаточно широком диапазоне варьировать деформацию и напряжения в образце с покрытием в ходе испытаний.

Примеры возможных вариантов исполнения рамки показаны на рис. 1. Подобные рамки весьма не трудоёмки в исполнении. Рамка состоит из одной (рис. 1,б) или двух (рис. 1,в) пластин с отверстиями и двух стоек, на которых подвешивается и закрепляется образец либо устанавливаются захваты той или иной конструкции. Толщина пластин должна быть достаточной, чтобы обеспечивалась высокая жёсткость рамки по сравнению с образцом. Пластины располагаются параллельно оси образца и должны быть изготовлены из подобранного материала с коэффициентом линейного расширения, обеспечивающим требуемую величину $\Delta\varepsilon$. Стойки, перпендикулярные пластине, могут быть выполнены из любого подходящего материала, например, из нержавеющей стали. Их коэффициент линейного расширения не регламентируется.

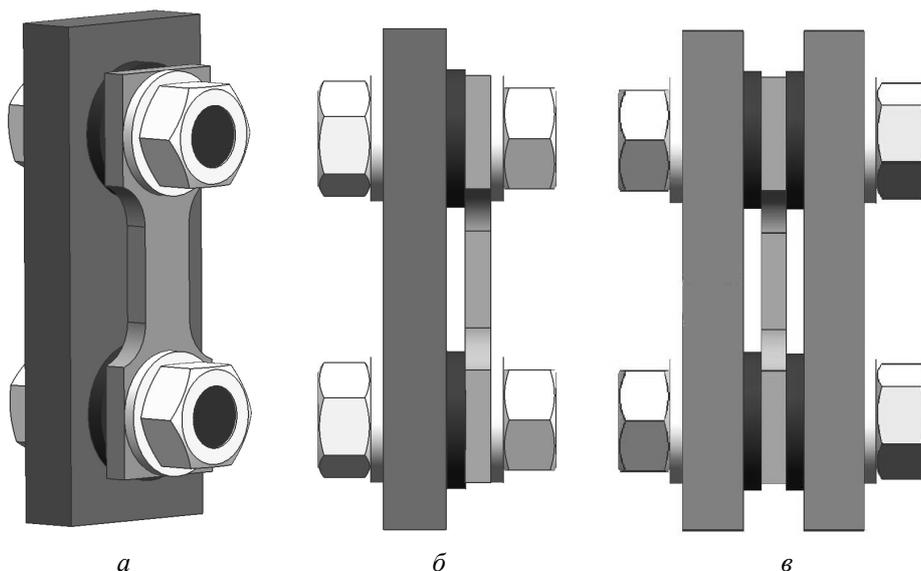


Рис.1. Примеры возможных вариантов исполнения рамки

Последовательность действий при проведении испытаний сводится к тому, что рамку с закреплённым в ней образцом или несколько рамок, собранных в виде кассеты, последовательно вводят в рабочее пространство печи, выдерживают там до установления верхней температуры цикла, а затем перемещают в охладитель, где выдерживают до установления нижней температуры. В этих условиях решается такая важная проблема испытаний, с которой сталкиваются в

стационарных установках, как равномерность температуры по длине расчётной части испытуемого образца, поскольку он нагревается целиком, а современные печи имеют достаточно хорошие характеристики по равномерности распределения температуры в рабочем объёме. На рис.2 показан пример закрепления в рамке непосредственно лопатки или макета для проведения натурных испытаний.

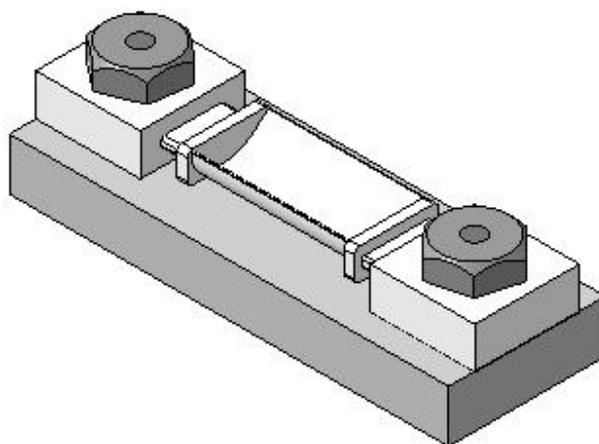


Рис.2. Пример закрепления в рамке непосредственно лопатки или макета для проведения натурных испытаний

Помимо интенсивных окислительных процессов, происходящих на поверхности защитных покрытий, в процессе эксплуатации ГТД в них возникают также термоусталостные трещины, сколы, а также отслоения типа «гармошка», связанные, в первую очередь, с циклическими теплосменами. Пред-

варительную оценку работоспособности предлагаемых для эксплуатации защитных покрытий целесообразно проводить с помощью предложенного устройства в промышленных условиях. Оценка работоспособности покрытий может осуществляться одновременно на нескольких сплавах, после раз-

личных режимов термической обработки и диффузионных отжигов, путём одновременного набора в «кассету» нескольких образцов, испытания которых могут происходить в одинаковых условиях. Отмеченное выше преимущество испытаний при помощи предлагаемого устройства наглядно может продемонстрировать исследователю разницу в работоспособности различных систем «сплав+покрытие», значительно увеличить сбор сравнительного и статистического материала, а также получить предварительные оценки ресурса испытываемых систем.

Заключение

К числу достоинств описанного устройства следует отнести возможность прерывать испытание, по крайней мере при

нижней температуре, не разгружая образец, для проведения структурных исследований неразрушающими методами и вновь вернуть его в процесс испытаний.

Предлагаемое устройство пригодно для проведения испытаний в условиях заводских лабораторий, при контроле качества разрабатываемых покрытий и оценке их ресурса в составе изделия с помощью образцов-свидетелей.

Устройство позволяет производить ТЦ испытания в режиме: растяжение при нагреве и сжатие при охлаждении, в то время как в применяемых в настоящее время установках при испытаниях на термоусталость растяжение осуществляется при охлаждении, а сжатие при нагреве.

THE NEW TESTING METHOD OF COATINGS ON HIGH-TEMPERATURE ALLOYS

© 2012 E. A. Tikhomirova¹, E. F. Sidokhin²

¹JSC “KLIMOV”, Saint-Peterburg

²Sciences and Technical Centre «Expertcentre», Moscow

The method and the instrument are used for thermo-cyclical testing of nickel-base superalloy coatings.

Thermal fatigue (thermo-mechanical fatigue), thermo-cyclical testing, linear thermal expansion coefficients, coating, rigidity.

Информация об авторах

Тихомирова Елена Александровна, инженер, Открытое акционерное общество «КЛИМОВ», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов: металлографические исследования.

Сидохин Евгений Федорович, ведущий специалист Научно-технического центра «Экспертцентр», г. Москва. E-mail: esidohin@yandex.ru. Область научных интересов: металловедение и физика металлов.

Tikhomirova Elena Aleksandrovna, Engineer, JSC “KLIMOV”, Saint-Peterburg. Area of research: metallographical research.

Sidokhin Evgeni Fedorovich, Engineer, Sciences and Technical Centre «Expertcentre», Moscow. E-mail: esidohin@yandex.ru. Area of research: material and physics of metals.