

Влияние защитных покрытий на длительную прочность жаропрочных сплавов.

Е.Б.Качанов, Ю.А.Тамарин

Введение.

В технической литературе накоплен большой экспериментальный материал по жаропрочности, усталостной прочности, термической усталости жаропрочных сплавов с покрытиями [1-6]. В то же время, механизм влияния покрытий, его связь с физическими и механическими свойствами покрытий изучены не достаточно. Это объясняется сложностью проведения таких исследований для тонких слоев покрытий, трудностью воспроизведения их составов и изучения их свойств отдельно от жаропрочного сплава.

Влияние покрытий на длительную прочность жаропрочного сплава может складываться из нескольких факторов.

- На механические свойства жаропрочного сплава может оказать влияние термический цикл нанесения покрытия.
- Нанесение покрытий изменяет напряженное состояние поверхности жаропрочного сплава.
- Покрытие изменяет фазовый состав и микроструктуру находящихся под ним слоев жаропрочного сплава, и это влияние возрастает при увеличении времени и температуры взаимодействия.
- Трещины, образующиеся в покрытии под действием статических или переменных напряжений, могут ускорять процессы разрушения жаропрочного сплава.

Эффективность выявления влияния покрытий на свойства жаропрочных сплавов зависит от используемой методики испытаний. Влияние покрытий возрастает в тонкостенных конструкциях при увеличении соотношения между толщиной покрытия и сечением образца (толщиной стенки лопатки).

Механические свойства сплавов для покрытий и конденсатов из них.

Для оценки свойств материалов покрытий были исследованы их прочность и пластичность. Испытания проводились по стандартным методикам в литом и конденсированном состояниях. Литые образцы имели диаметр 5 мм, плоские образцы, изготовленные из конденсатов, полученных электроннолучевой

технологией (ЭЛТ), имели толщину 0.5-1.0 мм. Все образцы перед испытаниями отжигались при 1050°C в течение 4 часов.

Результаты испытаний сплавов систем Ni-Cr-Al-Y и Ni-Co-Cr-Al-Y приведены на рис.1. Сплав Ni-20%Cr-11%Al-0,3%Y (СДП-2) наиболее широко применяется для получения покрытий на лопатках работающих при высоких температурах и термических напряжениях. Его свойства типичны для всех материалов системы Ni-Cr-Al-Y в области составов используемых для получения покрытий. При температурах ниже 800°C сплав обладает высокой прочностью, которая резко понижается при повышении температуры до 1100°C. При 500°C удлинение сплава СДП-2 не превышает 3%, при более высоких температурах удлинение возрастает, вплоть до 69% при 1100°C. Такое изменение свойств этого сплава связано с развитием в нём фазовых превращений. Разупрочнение сплава СДП-2 начинается при температуре выше 700°C, когда в нем происходят процессы растворения γ' - фазы.

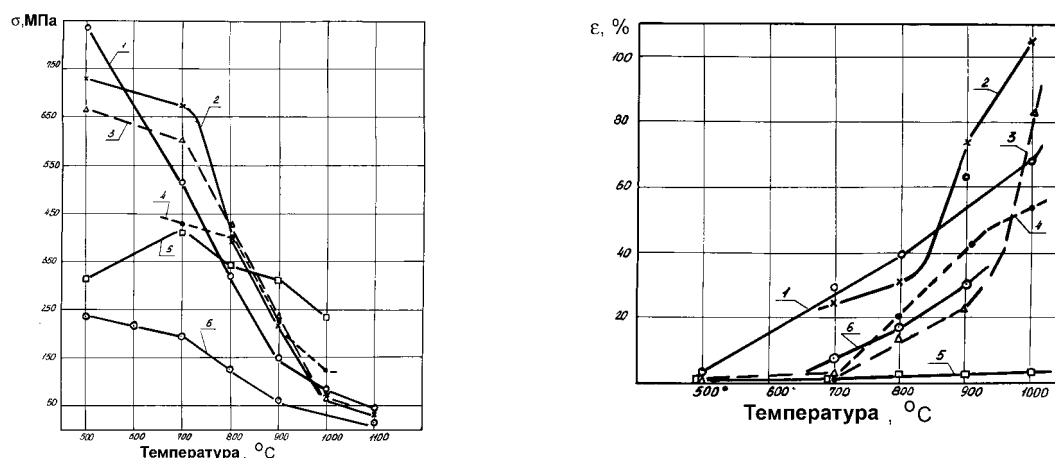


Рис.1. Предел прочности (а) и удлинение (б) сплавов. 1 - Ni20Co20Cr11AlY (СДП-1); 2 - Ni20Cr11AlY (СДП-2); 3 - Ni10Co20Cr11AlY (СДП-4); 4 - Co20Cr11AlY (СДП-3); 5 - Ni20Cr7AlY; 6 - NiAl (33 %Al).

Сплавы, содержащие кобальт – Ni-20%Co-20%Cr-11%Al-0.3%Y (СДП-2) и Ni-10%Co-20%Cr-11%Al-0,3%Y (СДП-4) при температуре ниже 500°C обладают высоким пределом прочности и невысокой пластичностью ($\delta < 5\%$). При повышении температуры прочность сплавов монотонно понижается и при 1100°C составляет 30-40МПа. Пластичность рассматриваемых сплавов монотонно нарастает и при температуре выше 1000°C сплав СДП-4 находится в сверхпластичном состоянии, его удлинение превышает 100%. Сплав СДП-1, легированный 20% кобальта, в области температур выше 600°C не содержит

упрочняющей γ' -фазы, имеет фазовый состав ($\beta+\gamma$), что и определяет быстрое падение предела прочности при нарастании температуры и увеличение его пластичности.

Сплав на основе кобальта Co-20%Cr-11%Al-0,3%Y (СДП-3) имеет также монотонное понижение прочности и рост пластичности при повышении температуры от 500 до 1100°C (рис.1а, б).

Кроме перечисленных сплавов на рис. 1(а, б) приведены свойства алюминида NiAl (33%Al) и сплава Ni20Cr7AlY (СДП-5а). Образцы алюминида имеют свойства ниже, чем у многофазных сплавов для покрытий. Пластичность NiAl проявляется при температуре выше 600 °С и быстро увеличивается с ростом температуры. Сплав СДП-5а, несмотря на невысокое, применительно к покрытиям, содержание алюминия, не обладает высокой пластичностью во всем исследованном интервале температур, что связано со значительным количеством в нём γ' – фазы.

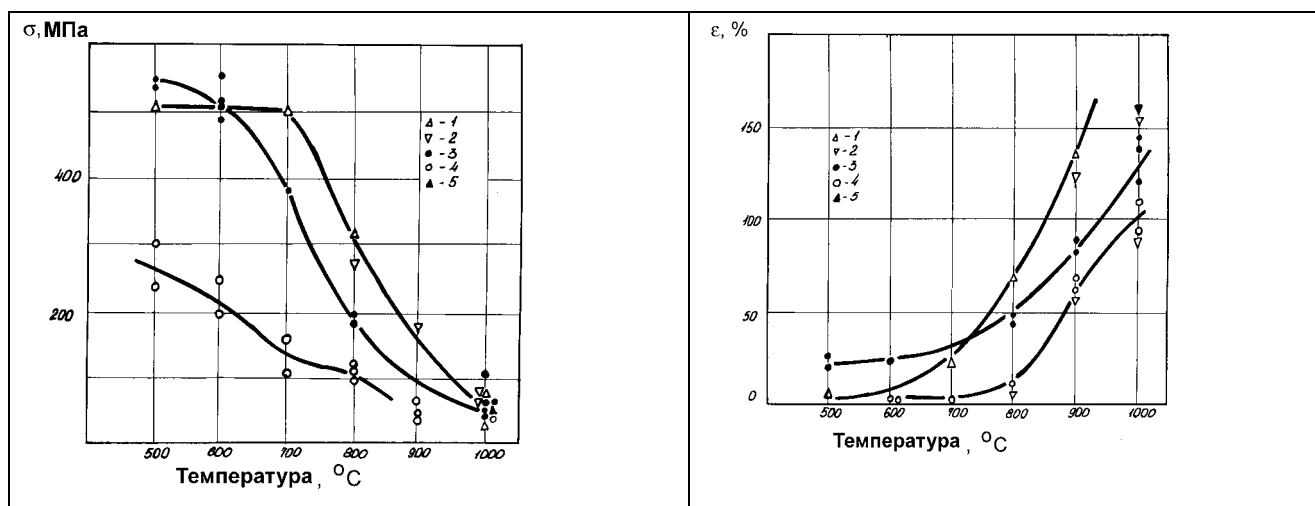


Рис.2. Предел прочности (а) и удлинение (б) конденсатов из сплавов. 1 - Ni20Co20Cr11AlY (СДП-1); 2 - Ni10Co20Cr11AlY (СДП-4); 3 - Ni20Cr7AlY; 4 - Ni5Cr8AlY; 5 - Ni20Cr11AlY (СДП-2).

Результаты испытаний прочности и пластичности конденсированных материалов приведены на рис. 2а,б. Закономерности изменения свойств конденсированных материалов в зависимости от температуры такие же, как у литых сплавов. В то же время, прочность конденсата сплава СДП-1 немного ниже, чем у литого образца (при 1000°C соответственно 50 и 84 МПа), а его пластичность выше. Такое же соотношение свойств имеют конденсированные и литые образцы других сплавов. Различие свойств объясняется структурными отличиями: большей дисперсностью фаз в конденсатах; некоторым отличием

химического состава конденсатов от испаряемых сплавов, формой и размерами образцов.

Результаты проведенных испытаний показывают, что прочность литых сплавов для покрытий, конденсатов из них и соответственно покрытий при температурах 500-1100°C значительно ниже, чем у современных жаропрочных сплавов. Поэтому защитные покрытия не могут нести статических и переменных нагрузок, возникающих в лопатках турбин. Покрытия увеличивают массу лопаток, что приводит к увеличению величины, действующей на них центробежной нагрузки. Это должно учитываться при расчетах напряжений и деформаций в лопатках с покрытиями.

Термические напряжения в защитных покрытиях

Анализ напряженного состояния покрытий является одним из основополагающих моментов при оценке механических свойств системы «жаропрочный сплав – покрытие». Появление термических напряжений при нагреве и охлаждении детали с покрытием происходит из-за различия в термических коэффициентах линейного расширения покрытия и жаропрочного сплава. Это явление свойственно всем типам защитных покрытий.

Как отмечено во многих работах [7], в диффузионных покрытиях при комнатных температурах имеются напряжения сжатия. Их появление связано с образованием при формировании покрытий на сплаве одного или нескольких алюминидов - $NiAl_3$, Ni_2Al_3 , $NiAl$, Ni_3Al , удельный объем которых (соответственно 0.25; 0.21; 0.17 и 0.14 см³/г) больше удельного объема жаропрочных сплавов (0.11-0.12 см³/г). Термический коэффициент расширения этих алюминидов меньше чем у жаропрочных сплавов.

Величина напряжений сжатия в диффузионных покрытиях зависит от технологии их получения. В покрытии толщиной 40-50 мкм, сформированном на жаропрочном сплаве типа ЖС, после нанесения слоя алюминия и отжига в течение 4 часов при температурах 700, 950 и 1200 °С, определены остаточные напряжения сжатия составляющие соответственно -200, -160 и -140 МПа.

В диффузионных покрытиях величина термических напряжений с повышением температуры снижается. На рис.3 приведены результаты определения рентгеновским методом термических напряжений в

Е.Б.Качанов, Ю.А.Тамарин, Влияние защитных покрытий на длительную прочность жаропрочных сплавов. 4

диффузионном покрытии. Покрытие получено при алитировании сплава ЖС6У в смеси: 98% сплава Al-Fe (50%Al), 2%NH₄Cl при 950 °С-4 часа. Наличие экстремумов на кривой "напряжения - температура" связано с различием термических коэффициентов расширения алюминидов образующего основу покрытия и жаропрочного сплава. При высоких температурах величина напряжений в диффузионных покрытиях зависит от температуры и длительности испытаний. При охлаждении с температуры испытаний до комнатной температуры в диффузионных покрытиях всегда вновь возникают напряжения сжатия.

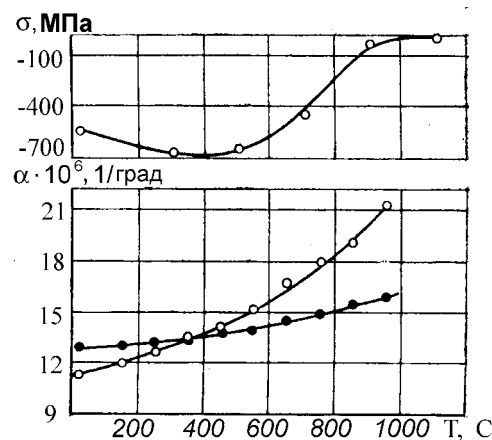


Рис. 3. Термические напряжения в диффузионном покрытии (1) на сплаве ЖС6У в зависимости от температуры; 2, 3 – коэффициент термического расширения NiAl (2) и жаропрочного сплава (3) (данные А.И.Самойлова и И.А.Игнатовой)

Особенностью покрытий наносимых из жаростойких сплавов системы (Ni, Co)-Cr-Al является тот факт, что их коэффициенты термического расширения в температурном интервале технологических обработок и эксплуатации выше, чем у большинства жаропрочных сплавов (таблица 1). Это приводит, к тому, что в области низких температур в таких покрытиях всегда присутствуют остаточные напряжения растяжения. При анализе напряженного состояния, возникающего в покрытиях, необходимо так же учитывать исходные условия нанесения. В момент формирования покрытия из пара или плазмы, напряжения между покрытием и подложкой из жаропрочного сплава не возникают. Напряжения появляются при охлаждении образцов с покрытиями от температуры нанесения до комнатной температуры.

При технологических отжигах (1000-1050°С) покрытия системы (Ni, Co)-Cr-Al находятся в пластичном состоянии ($\delta > 60\%$). Кроме того, при температуре

~1000°C в этих покрытиях проходит рекристаллизация. При последующем охлаждении с температуры отжига, различие в термических коэффициентах расширения покрытия и защищаемого сплава приводит к появлению и росту термических напряжений растяжения, достигающих при комнатной температуре максимума.

Таблица 1. Коэффициенты термического расширения сплавов для покрытий и конденсатов из них.

Сплав	$\alpha \cdot 10^6, 1/\text{град}$										
	100-200°	200-300°	300-400°	400-500°	500-600°	600-700°	700-800°	800-900°	900-1000°	1000-1100°	1100-1200°
Ni22Cr11AlY	12.6	13.2	14.6	14.8	15.5	17.2	16.9	18.7	31.0	28.0	22.6
Ni22Cr11AlY ¹	12.7	13.4	14.4	14.7	15.4	17.1	15.1	9.0	25.2	-	-
Ni20Co22Cr11AlY	13.5	14.0	15.1	15.7	16.9	20.0	22.8	22.9	22.8	25.7	23.8
Ni20Co22Cr11AlY ¹	13.0	15.3	15.3	15.3	16.7	16.7	16.7	20.0	20.0	-	-
Ni6Co20Cr12AlY	13.2	13.6	15.2	15.8	16.0	18.0	20.5	25.3	31.1	-	-
Co22Cr9AlY	13.3	13.7	14.1	14.5	14.8	14.8	14.7	15.2	16.1	-	-
NiAl (31%Al)	13.9	14.3	13.0	13.3	13.9	14.4	14.5	14.6	14.8	-	-
сплав типа ЖС32	12.7	13.3	13.9	14.4	15.0	16.4	17.4	19.1	21.5	25.6	31.4

Примечание. 1 – конденсат получен ЭЛТ из сплава указанного состава.

В таблице 2 приведены результаты определений рентгеновским методом напряжений в покрытиях на различных этапах технологического процесса нанесения покрытий и их термической и механической обработки [7]. Покрытия толщиной 80-100 мкм нанесены электроннолучевой технологией из сплавов СДП-1 и СДП-2. Все измерения проведены при комнатных температурах, в качестве материала подложки использован сплав ЖС6У.

Таблица 2. Термические напряжения в покрытиях СДП-1 и СДП-2 при 20 °С, после различных технологических операций.

Технологическая операция	Напряжения при 20 °С, МПа	
	СДП-1	СДП-2
После нанесения покрытия (1)	90	70
(1)+ отжиг 1030 °С – 2 часа (2)	130	110
(1)+(2)+ обработка микрошариками (3)	-770	-1100
(1)+(2)+(3)+отжиг 700 °С – 2 часа	40	20
(1)+(2)+(3)+отжиг 800 °С – 2 часа	80	10
(1)+(2)+(3)+отжиг 900 °С – 2 часа	170	40
(1)+(2)+(3)+отжиг 1000 °С – 2 часа	180	100
(1)+(2)+(3)+отжиг 1030 °С – 2 часа	240	100

Непосредственно после нанесения покрытий электроннолучевой технологией на подложку с температурой 850-950°C уровень растягивающих напряжений в них составляет +(70-90) МПа. После отжига при 1030 °С в течение 2-х часов растягивающие напряжения в покрытиях возрастают. Уплотняющая обработка микрошариками создает в покрытиях высокие

напряжения сжатия, причем их абсолютная величина больше у покрытия СДП-2. Это связано с более высоким пределом текучести этого покрытия при комнатной температуре. При отжиге обработанного микрошариками покрытия происходит полная релаксация напряжений и повторное образование растягивающих напряжений при охлаждении. Нарастание термических напряжений в покрытии СДП-1 связано с большим различием его ТКЛР от сплава ЖС6У, чем у покрытия СДП-2.

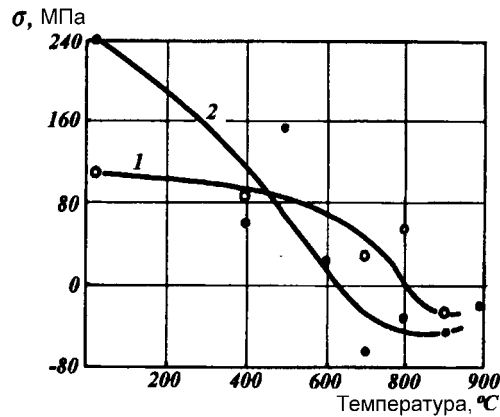


Рис.4. Термические напряжения в покрытиях СДП-2 (1) и СДП-1 (2) на сплаве ЖС6У.

Напряжения в покрытиях СДП-1 и СДП-2 в интервале температур от комнатной до 900°C определены рентгеновским методом [7]. Образцы для исследования прошли полный цикл технологических обработок, включающий: отжиг при 1030°C в течение 2-х часов, обработку микрошариками и завершающий отжиг при 1030°C в течение 2-х часов. Результаты исследования приведены на рис.4. В обоих покрытиях, по мере повышения температур, напряжения постепенно убывают. Появление при температурах выше 900°C сжимающих напряжений в покрытиях СДП-1 и СДП-2 объясняется одной и той же причиной - различием термических коэффициентов линейного расширения покрытия и сплава.

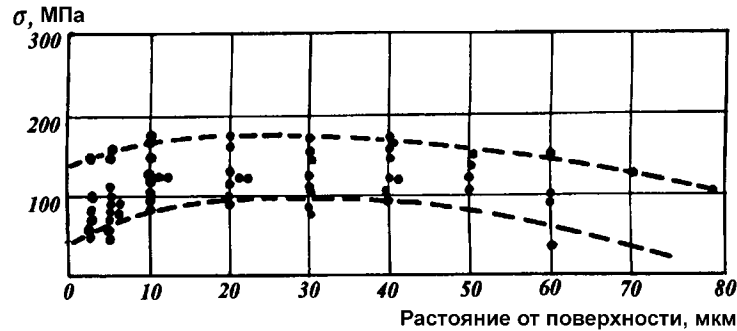


Рис. 5. Распределение термических напряжений при 20 °С в покрытии СДП-2 на лопатках из сплава ЖС6У.

На рис.5 приведены результаты исследований термических напряжений методом измерения деформаций при химическом травлении покрытий. Напряжения определялись на образцах, вырезанных из лопаток из сплава ЖС6У, прошедших отжиг при 1030°С в течение 2-х часов, уплотняющую обработку микрошариками и последующий отжиг при 1030°С в течение 2-х часов. Величина растягивающих напряжений на расстоянии 20 мкм от поверхности в покрытии СДП-2 составляет от 100 до 180 МПа, что, с учетом возможных погрешностей обоих методов, хорошо согласуется с результатами рентгеновских исследований. По мере увеличения расстояния от поверхности величина напряжений постепенно понижается и на расстоянии, равном толщине покрытия, напряжения приближаются к нулю. Анализ напряженного состояния покрытий на лопатках, прошедших испытания на двигателе в течение ~100 часов, показывает, что знак и уровень напряжений практически не изменяется.

Влияние покрытий на жаропрочность сплавов.

Защитное покрытие не может нести нагрузки, прикладываемой к образцу в процессе испытаний длительной прочности при температурах выше 600°С. Напряжения, возникающие в покрытии в момент нагружения образца, превышают, как правило, предел текучести покрытия, релаксируют и перераспределяются по сечению жаропрочного сплава. Характер влияния защитных покрытий на жаропрочность никелевых сплавов тесно связан с особенностями разрушения сплавов в окислительной среде при высоких температурах.

Исследования жаропрочности сплавов с различными покрытиями проводились при испытаниях на воздухе и в средах вызывающих сульфидную коррозию. На рис. 6 показаны результаты испытаний длительной прочности сплава ЖС6У на воздухе и со слоем золы ГЗТ-1 (66.2%Na₂SO₄; 1.8%V₂O₅; 20.4%Fe₂O₃; 8.3%NiO; 3.3%CaO), имитирующей отложения на лопатках при 800 и 900 °С, проведенные по методике рассмотренной в работе [8]. Поверхность сплава ЖС6У подвергается значительному повреждению при испытаниях с золой ГЗТ-1, что выражается в уменьшении долговечности образцов.

Воздействие среды на сплав, как видно на рис. 5, тем больше, чем больше время испытаний и выше температура. Если долговечность сплава ЖС6У на воздухе равняется 1000 часам, то в золе ГЗТ-1 она снижается: при температуре испытаний 800°С до ~200 часов, а при 900°С - до ~90 часов. Различие в долговечности на воздухе и в коррозионной среде непрерывно возрастает при увеличении длительности испытаний. Кроме уменьшения долговечности образцов в условиях сульфидной коррозии, происходит также сокращение продолжительности первого, второго и третьего периодов ползучести, уменьшение общей пластичности (относительного удлинения) образцов к моменту разрушения и пластичности на первом и втором периодах ползучести. Поведение при испытаниях сплава ЖС6У типично для всех никелевых жаропрочных сплавов.

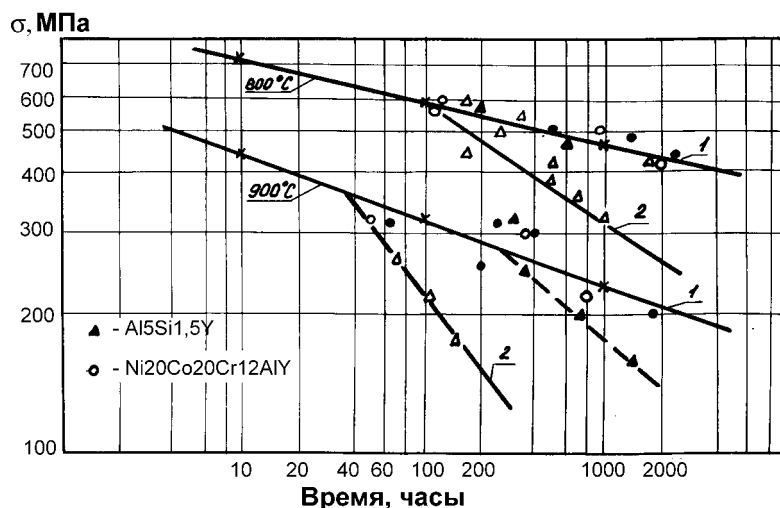


Рис.6. Длительная прочность сплава ЖС6У без покрытия при испытании на воздухе (1) и со слоем золы ГЗТ-1 (2). С покрытием СДП-1 (о) и диффузионным покрытием ВСДП-11 (Δ) при испытании со слоем золы ГЗТ-1.

Для исследования влияния покрытий на длительную прочность сплавов в условиях сульфидной коррозии использовали два типа покрытий: диффузионное покрытие, нанесенное методом ВПТВЭ из сплава Al-5%Si-1,5%Y (ВСДП-11), и покрытие, полученное электроннолучевой технологией из сплава СДП-1. Толщины покрытий составляли соответственно ~50 и ~100 мкм. Испытания образцов с защитными покрытиями проводили только со слоем золы ГЗТ-1. Результаты испытаний представлены на рис. 6. Покрытие СДП-1 обеспечивает их защиту от сульфидной коррозии и сохранение такой же долговечности, которую эти сплавы имеют при испытаниях на воздухе. Напряжения разрушения сплава ЖС6У с защитным покрытием при 800°C на базе 2000 часов составляет 400 МПа, в то время как на образце со слоем золы ГЗТ-1 и без покрытия - 240 МПа. При 900°C покрытие СДП-1 обеспечивает защиту сплава в течение более 1000 часов. На этой базе сплав имеет уровень жаропрочности 220 МПа, в то время как сплав без покрытия - менее 100 МПа.

Покрытие ВСДП-11 надежно защищает сплав от сульфидной коррозии при 800°C не менее 1000 часов. Уровень свойств сплава ЖС6У с покрытием ВСДП-11 на этой базе испытаний такой же, как и в случае испытаний на воздухе. При 900°C диффузионное покрытие ВСДП-11 повреждается после ~200 часов испытаний. После этого отмечается уменьшение долговечности образцов с этим покрытием. Однако, и в этом случае долговечность образцов более высокая по сравнению с незащищенными образцами сплава ЖС6У. Анализ характера повреждений покрытий в процессе испытаний не выявляет каких-либо особенностей и отличий от характера повреждений этих покрытий без приложения нагрузки.

Испытания жаропрочных сплавов с направленной и монокристалльной структурой, проводимые при высоких температурах, подтверждают отмеченные выше закономерности влияния покрытий на жаропрочность. На рис. 7 представлены результаты испытаний длительной прочности сплава ЖС26НК без покрытия и с покрытием СДП-1. При 1100 °C и напряжении 60 МПа, долговечности образцов без покрытия и с покрытием составляют соответственно - 380 и 800 часов. Различие в результатах испытаний сплава ЖС26НК с покрытием и без него, в данном случае значительно меньше, чем можно было бы ожидать, исходя из глубины окисления незащищенного сплава в этих условиях. Это связано с тем, что в условиях больших деформаций, Е.Б.Качанов, Ю.А.Тамарин, Влияние защитных покрытий на длительную прочность жаропрочных сплавов. 10

свойственных образцам с направленной структурой, скорость роста поверхностных трещин существенно превышает скорость развития процессов равномерного окисления их поверхности.

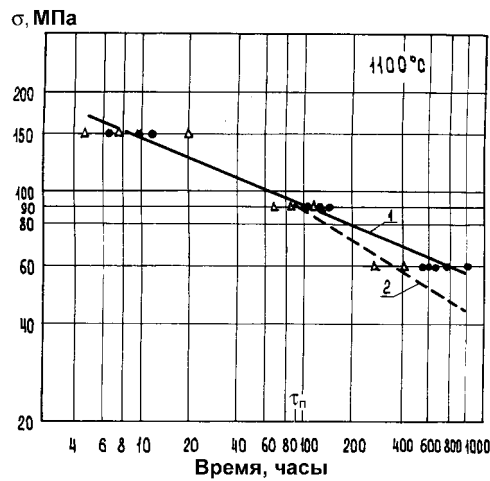


Рис. 7. Длительная прочность сплава ЖС26НК на воздухе при 1100 °С: 1 – с покрытием СДП-1; 2. - без покрытия.

Небольшое влияние на уменьшение долговечности образцов с покрытием оказывает растворение упрочняющей γ' -фазы в зоне взаимодействия под покрытием, что уменьшает рабочее сечение образца. Через 500 часов испытаний при 1100°С уменьшение рабочего сечения образца диаметром 5 мм составляет 5-7%. Для высокотемпературных лопаток с толщиной стенок менее 2 мм, эффект взаимодействия между покрытием и жаропрочным сплавом целесообразно учитывать.

Анализ характера разрушения образцов, испытанных при длительном статическом нагружении, показал, что начальная зона разрушения находится на поверхности образцов, где происходит зарождение и рост трещин, приводящих на конечном этапе испытаний к разрушению. Покрытие не меняет механику разрушения, а только исключает влияние на нее процессов окисления.

Экспериментальные данные по влиянию покрытий на длительную прочность сплавов, позволяют сделать следующее заключение. Покрытия, применяемые для защиты поверхности жаропрочных сплавов от окисления и сульфидной коррозии, оказывают положительное влияние на долговечность сплавов. Это влияние проявляется после определенной продолжительности испытаний (времени - τ_c) (рис. 7). Начиная с этого момента времени,

происходит снижение долговечности образцов без покрытий из-за развития процессов повреждения поверхности от окисления или сульфидной коррозии. После момента времени - τ_c , долговечность образцов с покрытиями будет всегда больше долговечности образцов без покрытий.

Время - τ_c характеризует продолжительность испытаний, когда могут испытываться образцы без покрытий. Испытания большей длительности должны проводиться только на защищенных образцах. Положение точки - τ_c зависит от жаростойкости испытываемого сплава, температуры испытаний, агрессивности окружающей среды, диаметра испытываемого образца.

При испытаниях на воздухе при 900-1000°C образцов диаметром 5 мм из сплавов, обладающих высокой жаростойкостью (ЖС6К, ЖС6У, ЖС32 и т.п.), время τ_c составляет более 1000 часов. Это объясняет тот факт, что большинство исследователей не выявляет положительного влияния покрытий на длительную прочность этих сплавов, так как продолжительность проводимых ими испытаний ограничивается 100-500 часами. Повышение агрессивности среды, температуры, уменьшение диаметра образцов и снижение жаростойкости сплавов сдвигает точку τ_c влево. Например, при испытаниях сплава ЖС6У в среде золы ГЗТ-1 время τ_c при температурах 800 и 900°C составляет соответственно ~100 и ~40 часов.

Выводы.

1. В области рабочих температур лопаток турбин, прочность изученных сплавов для покрытий и конденсатов из них, значительно ниже прочности современных жаропрочных сплавов. Поэтому защитные покрытия не могут нести статических и переменных нагрузок, возникающих в лопатках турбин, а увеличение массы лопаток за счёт массы покрытия, должно учитываться при расчётах, действующей на лопатки центробежной нагрузки.
2. Нанесение на поверхность жаропрочного сплава покрытия приводит к появлению в системе «покрытие-жаропрочный сплав» термических напряжений. Величина и знак напряжений зависят от соотношения коэффициентов термического расширения покрытия и сплава и температурных интервалов технологических обработок и работы лопаток.
3. После определенной продолжительности испытаний (τ_c) длительной прочности, долговечность образцов жаропрочного сплава с покрытием

больше долговечности образцов сплава без покрытия. Положение точки (τ_c) зависит от свойств жаропрочного сплава, размеров сечения образца, агрессивности среды испытаний и температуры.

Список литературы.

1. M.I.Wood, The Mechanical Properties of Coatings and Coated Systems, *High Temperature Corrosion Advanced Materials and Coatings* (Editors: R.Streiff, J.Stringer, R.Krutenat, and M.Caillet), Elsevier Science Publishers, 1989, p.633-643
2. П.Т.Коломыцев, Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов, Москва, Металлургия, 1984, 216 с.
3. Л.Б.Гецов, А.И.Рыбников, И.С.Малашенко, Соппротивление усталости жаропрочных сплавов с покрытиями, Проблемы прочности, 1990, № 5, с. 51-56
4. Yu.A.Nozhnitsky, R.A.Doulnev, V.G.Sundyryn, Damage Mechanisms for Thermomechanical Fatigue of Aircraft Engines Materials. 81st Meeting of the AGARD SMP, held in Banff, Canada from 2-4 October 1995, and published in CP-559.
5. Yu.A.Tamarin, V.G Soundyryn, N.G.Bychkov, Thermo-Mechanical Fatigue Tests of Coatings for Turbine Blades, High Temperature Surface Engineering, IOM Communications Ltd, 2000, p. 157-169
6. Y.Tamarin, Protective Coating for Turbine Blades, ASM International, 2002, 247 p.
7. А.И.Самойлов, И.А.Игнатова, А.И.Кривко, Ю.А.Тамарин, Термические напряжения в алюминидных покрытиях, Сборник "Вопросы авиационной науки и техники", ОНТИ. ВИАМ, 1988, с. 45-49
8. Никитин В.И., Коррозия и защита лопаток газовых турбин, Ленинград, Машиностроение, 1987, 272 с.
9. Н.В.Забродина, Ю.А.Тамарин, В.И.Никитин, Высокотемпературная коррозия алюминидных сплавов для конденсированных покрытий, Сборник "Коррозионностойкие покрытия", С.Петербург, Наука, 1992, с.107-110