

## **Пути повышения сопротивления усталости лопаток турбины из жаропрочных сплавов**

*Е.Б.Качанов, докт.техн.наук, (ОАО ВИЛС),*

*Ю.А.Тамарин, докт.техн.наук, (СЦ «Материал»)*

### **Введение.**

Одной из причин повреждения рабочих лопаток турбины при работе на двигателе может являться их усталость. Образование усталостных трещин обычно происходит на внешних или внутренних поверхностях лопаток, в зонах действия высоких переменных напряжений. Сопротивление усталости лопаток изменяется при нанесении защитных покрытий с физическими и механическими свойствами, отличными от свойств жаропрочных сплавов.

С момента начала использования покрытий для защиты поверхности лопаток турбин до настоящего времени опубликовано большое количество работ, в которых приведены результаты изучения сопротивления усталости жаропрочных сплавов и лопаток с защитными покрытиями [1-10]. Представляется важным найти общие закономерности влияния различных видов покрытий на сопротивление усталости жаропрочных сплавов.

В статье рассматриваются два класса защитных покрытий: диффузионные алюминидные покрытия и наносимые (overlay) покрытия системы (Ni,Co)-Cr-Al-Y. Диффузионные алюминидные покрытия формируются на поверхности лопаток при их химико-термической обработке в различных средах содержащих алюминий или его соединения. Наносимые (overlay) покрытия формируются за счёт осаждения на поверхность лопаток специальных сплавов (Ni,Co)-Cr-Al-Y, обладающих высоким сопротивлением окислению и горячей коррозии. Агрегатное состояние наносимого сплава может быть различным - пар (электронно-лучевая технология), микрокапли и плазма (электродуговая вакуумная технология), расплавленные частицы порошка (газотермическая плазменная технология).

Термические напряжения, возникающие в диффузионных алюминидных покрытиях, прочность и пластичность этих покрытий существенно отличаются от аналогичных характеристик покрытий системы (Ni,Co)-Cr-Al-Y. Поэтому влияние этих двух групп покрытий на сопротивление усталости жаропрочных сплавов различно.

### **Сопротивление усталости жаропрочных сплавов с диффузионными алюминидными покрытиями**

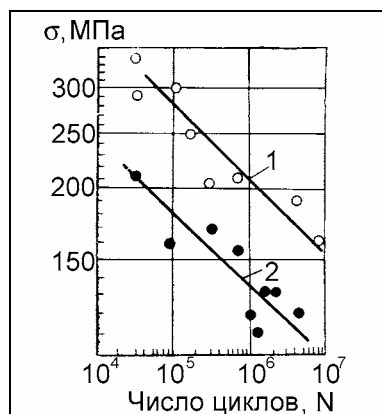
Многочисленные исследования сопротивления усталости образцов и лопаток из жаропрочных сплавов с диффузионными алюминидными покрытиями выявили следующие зависимости результатов испытаний от условий их проведения.

При 20÷250°C сопротивление усталости образцов с диффузионным покрытием выше, чем сопротивление усталости незащищенных образцов. Величина прироста предела выносливости зависит от состава покрытия (содержания в нём алюминия), свойств жаропрочного сплава и толщины испытываемых образцов. Такое влияние диффузионных покрытий объясняется наличием в них, в указанном интервале температур, значительных напряжений сжатия (-150 - -300 МПа), которые компенсируют низкую прочность и пластичность покрытий [3].

Сопrotивление усталости лопаток зависит от их конструкции. Поэтому, в случае проведения усталостных испытаний лопаток с диффузионными покрытиями, уже первые циклы нагружения могут привести к появлению трещин в покрытии, в зонах с высокой концентрацией напряжений (входная и выходная кромки, перфорация). Эти трещины являются очагами развития разрушения. При таких испытаниях долговечность лопаток без покрытий, может превосходить долговечность лопаток с диффузионным покрытием [8].

При 800-950°С на образцах и моделях лопаток из жаропрочных сплавов ЖС6К, ЖС6У с диффузионными покрытиями не отмечено понижения предела выносливости по сравнению с незащищенными образцами. Окисление образцов перед проведением испытаний в воздушной атмосфере при 950°С в течение 1000 часов выявляет положительный эффект от применения покрытий. В зависимости от длительности испытаний предварительное окисление образцов без покрытий приводит к снижению предела выносливости образцов на 10-17%. Выносливость образцов с диффузионными покрытиями также понижается, но величина снижения, в зависимости от длительности испытаний, составляет 5-12%. Снижение предела выносливости образцов после длительных выдержек при высоких температурах в окислительной атмосфере вызывается двумя процессами: окислением поверхности образцов и структурными изменениями в жаропрочном сплаве. Большее снижение предела выносливости образцов без покрытий является следствием окисления их поверхности.

Такое же влияние диффузионных покрытий выявлено при испытаниях в агрессивной среде продуктов сгорания топлива. На рис. 1 приведены результаты испытаний проведенных на моделях лопаток турбины с радиусом кромок 0,5 мм. Испытания проводились при ассиметричном консольном изгибе ( $\sigma_m=200$  МПа) в продуктах сгорания авиационного топлива Т-1. Температура испытаний - 900°С, частота циклов - 50Гц, продолжительность испытаний  $N=10^6-10^7$  циклов. Толщина диффузионного покрытия на образцах 50 мкм, концентрация алюминия во внешней зоне покрытия 32-34%.



**Рис.1. Результаты испытаний усталости моделей лопаток из сплава ЖС6К в продуктах сгорания топлива Т-1 при 900°С. 1 – с диффузионным покрытием, 2 – без покрытия. [5]**

Наличие диффузионного покрытия на моделях лопаток позволяет получить в среде продуктов сгорания топлива предел выносливости на 25-30% выше, чем у образцов без покрытия. Поэтому положительный эффект от применения диффузионных покрытий всегда отмечается и при усталостных испытаниях лопаток, снятых с авиационных двигателей после длительных испытаний или эксплуатации [4].

## Сопротивления усталости жаропрочных сплавов с покрытиями системы (Ni,Co)-Cr-Al-Y.

Испытания усталости жаропрочных сплавов с различными вариантами покрытий (Ni,Co)-Cr-Al-Y в интервале температур от 20 до 1100°C позволили выявить следующие закономерности.

Все покрытия системы (Ni,Co)-Cr-Al-Y после их формирования на поверхности лопаток проходят отжиг в вакууме при температурах 950-1050°C. В отличие от диффузионных покрытий, после такого отжига при температурах ниже 500°C в покрытиях (Ni,Co)-Cr-Al-Y возникают напряжения растяжения [3]. Величина этих напряжений зависит от соотношения коэффициентов термического расширения жаропрочного сплава и покрытия (от состава покрытия).

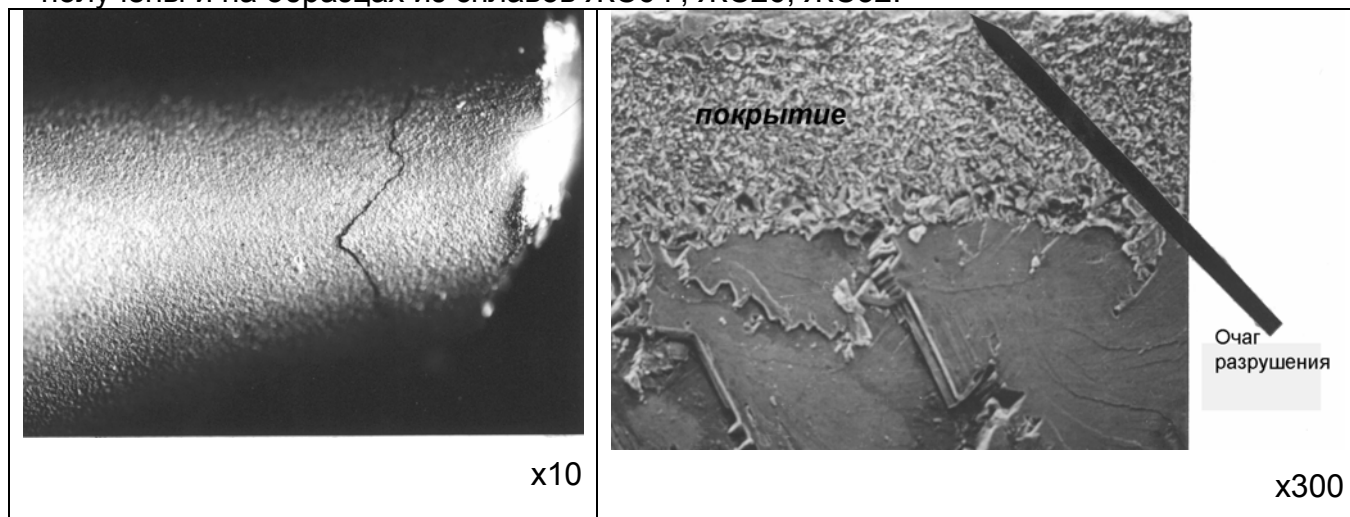
При усталостных испытаниях стандартных образцов диаметром 7 мм с покрытием СДП-2 (Ni<sub>20</sub>Cr<sub>12</sub>AlY) толщиной 60 мкм в условиях чистого изгиба, при температуре 20°C не наблюдается влияния покрытия на предел выносливости (таблица 1).

**Таблица 1. Предел выносливости сплава ЖС6У при 20 и 950°C, образцы Ø 7 мм.**

покрытие	$\sigma_{-1}$ , МПа (N=2·10 <sup>7</sup> циклов)	
	20 °С	950 °С
без покрытия	190	280
СДП-2 (Ni <sub>20</sub> Cr <sub>12</sub> AlY)	190 <sup>1</sup>	280 <sup>2</sup>
СДП-1 (Ni <sub>20</sub> Co <sub>20</sub> Cr <sub>12</sub> AlY)	-	300 <sup>3</sup>

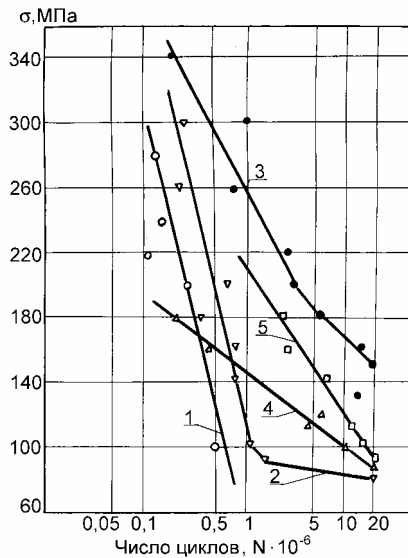
Примечание. Толщина покрытий: 1 - 60 мкм; 2 - 100 мкм; 3 - 120 мкм.

В процессе испытаний на поверхности образцов, как правило, появляется единственная трещина, от которой и развивается процесс разрушения (рис. 2). Очаг разрушения располагается на поверхности покрытия. Подобные результаты получены и на образцах из сплавов ЖС6Ф, ЖС26, ЖС32.



**Рис.2. Вид поверхности (а) и излом (б) образца сплава ЖС6У с покрытием СДП-2. Испытания усталости при 20 °С:  $\sigma = 200$  МПа; N=1.8·10<sup>7</sup> циклов.**

Изменение соотношения между толщиной покрытия и сечением образца изменяет результаты испытаний. На образцах из сплава ВЖЛ12У с диаметром рабочей части 3 мм при толщине слоя покрытия СДП-2 - 100 мкм отмечается небольшое повышение характеристик усталости (рис. 3) при 20 °С. Возможно, это связано с тем, что при проведении испытаний расчет напряжений проводился на сечение образца без покрытия.



**Рис.3. Результаты испытаний усталости образцов ВЖЛ12У (Ø3 мм): 1, 2 – 20 °С; 3 – 700 °С; 4, 5 – 900 °С; 1, 4 – без покрытия; 2, 3, 5 – покрытие СДП-2.**

Испытания усталости лопаток при 20°С являются обязательной контрольной операцией при их изготовлении на заводах. Покрытие и технологические факторы - термическая обработка лопаток, механическая обработка их поверхности оказывают значительное влияние на контрольные значения предела выносливости (таблица 2).

**Таблица 2. Результаты испытаний лопаток из сплава ЖС6У при 20°С.**

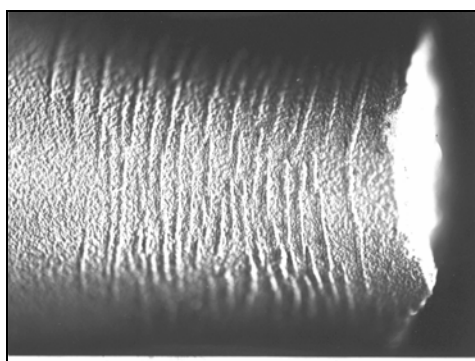
Уровень напряжений на входной кромке	Число циклов испытания до появления трещин	Место появления усталостных трещин	Характеристика покрытия и технологического процесса
180 МПа	$> 2 \cdot 10^7$	Внутренняя полость у входной кромки в месте концентратора от ребра	Диффузионное покрытие ВСДП-11, 40 мкм, отжиг 1000°С - 4 часа
180 МПа	$> 2 \cdot 10^7$	не отмечены	Покрытие СДП-2, 100 мкм, отжиг: 1000°С - 5 часов
180 МПа	$6 \cdot 10^6$	Наружная поверхность входной кромки в месте перехода на полку	Покрытие СДП-2, 100 мкм, отжиг: 1040°С - 5 часов
180 МПа	$(8-15) \cdot 10^6$	Внутренняя полость, у входной кромки в месте концентратора от ребра	Покрытие СДП-2, 100 мкм, отжиг: 1040°С - 5 часов; обработка микрошариками

На лопатках с диффузионным покрытием ВСДП-11 при контрольном уровне напряжений 180 МПа долговечность лопаток составляет более  $2 \cdot 10^7$  циклов. При нанесении покрытия СДП-2 вместо диффузионного покрытия и проведении вакуумного отжига при 1000°С получены такие же результаты. Для повышения адгезионной связи покрытия СДП-2 с поверхностью лопаток, температура отжига была повышена до 1040°С. Долговечность лопаток при таком отжиге понизилась и её не смогла повысить обработка покрытия микрошариками и создание на поверхности высоких сжимающих напряжений. В этом случае очаг разрушения переместился на внутреннюю полость лопатки.

При 20°С возможные дефекты покрытий (Ni,Co)-Cr-Al-Y: межкристаллическая пористость, микрокапли и т.п., приводящие к концентрации напряжений, являются очагами зарождения усталостных трещин. В зонах повышенных переменных напряжений на поверхности лопаток (входная и выходная кромки) такие дефекты не допустимы.

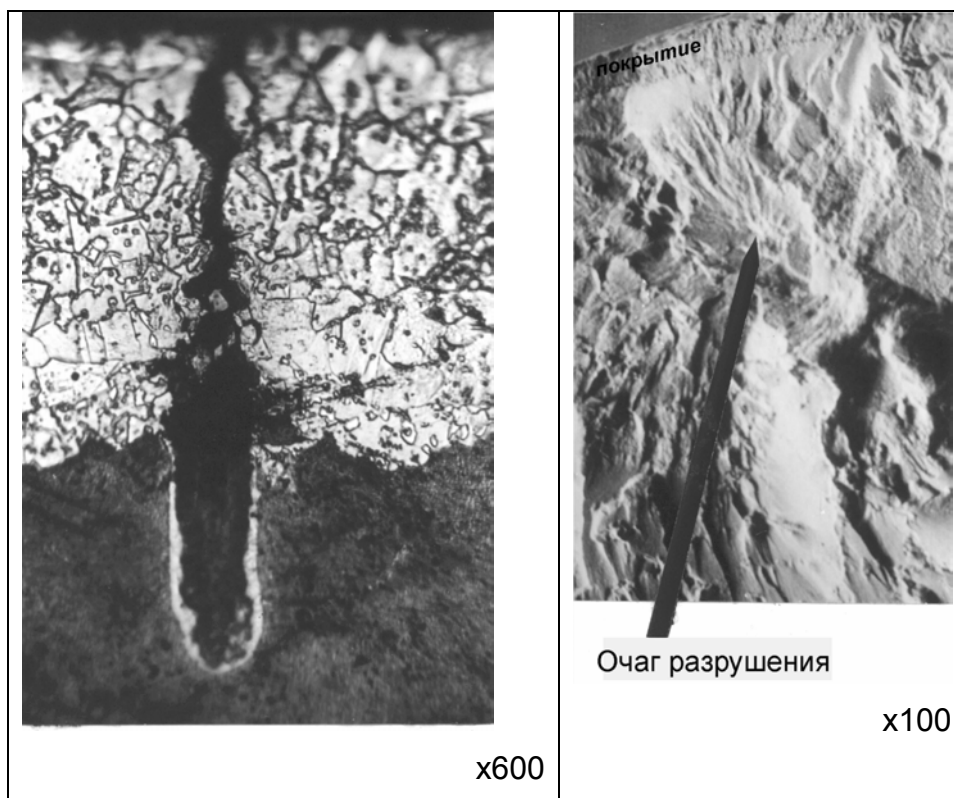
При температурах выше 700°C, термические напряжения в покрытиях (Ni,Co)-Cr-Al-Y отсутствуют или являются небольшими напряжениями сжатия. При испытаниях усталости величина напряжений на поверхности образцов превосходит предел текучести покрытий. В этих условиях пластическая деформация и повреждения в покрытиях накапливаются существенно быстрее, чем в жаропрочном сплаве.

Характерная особенность высокотемпературных испытаний - это многочисленные трещины усталости, образующиеся на поверхности покрытий (рис. 4). Эти трещины являются концентраторами напряжений и приводят к появлению на образце под покрытием многочисленных очагов усталостного разрушения. Поверхностные очаги сливаются и образуют кольцевую трещину, уменьшающую сечение образца. Однако для образцов диаметром 7 мм это уменьшение сечения незначительно и не влияет на предел выносливости. Основной очаг разрушения образцов расположен на расстоянии 0,2-0,8 мм от поверхности (рис.5).



x10

Рис.4. Вид поверхности образца сплава ЖС6У с покрытием СДП-2. Испытания усталости при 950 °С:  $\sigma = 300$  МПа;  $N=2.4 \cdot 10^7$  циклов.



x600

x100

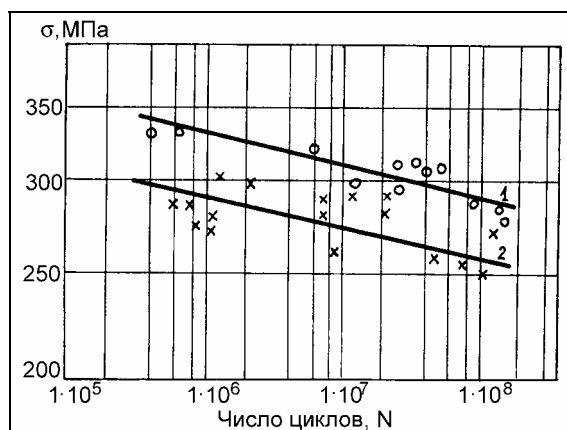
Рис.5. Микроструктура (а) и излом (б) образца сплава ЖС6У с покрытием СДП-2. Испытания усталости при 950 °С:  $\sigma = 300$  МПа;  $N=2.4 \cdot 10^7$  циклов.

При 950°C предел выносливости образцов сплава ЖС6У с покрытиями СДП-1 и СДП-2 на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов близок к пределу выносливости незащищенного сплава (таблица 1). Отсутствие положительного влияния покрытий связано с тем, что короткое время испытаний (~120 часов) не позволяет проявиться процессам окисления, понижающим сопротивление усталости образцов без покрытия. Подобные результаты получены и на других жаропрочных сплавах.

Изменение масштабного фактора – переход на испытания образцов диаметром 3 мм приводит к небольшому увеличению долговечности при 700 и 900°C по сравнению с образцами без покрытий (рис.3). Такое же влияние отмечено и при испытании моделей лопаток с покрытием СДП-2 [8].

Исследования усталости жаропрочных сплавов с керамическим теплозащитным покрытием (конструкция покрытия: внутренний слой/ промежуточный слой/ внешний слой соответственно: СДП-4(Ni20Cr6AlY)/ СДП-2/  $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ ), соотношение толщин слоев 35/45/60 мкм) проводились на двух типах образцов. Круглые монокристаллы диаметром 7 мм из сплава ЖС32 испытывались в условиях чистого изгиба при 1100°C. Плоские образцы с переменной по высоте толщиной от 2 до 5 мм из сплава ЖС6У испытывались на изгиб при 975°C. Изгибные колебания возбуждались на магнитоотрикторе с частотой 3200 Гц.

Анализ разрушений круглых образцов сплава ЖС32 подтвердил закономерности, отмеченные выше. Наличие теплозащитного покрытия приводит, так же как и в случае покрытия СДП-2, к возникновению многочисленных очагов на поверхности образцов, развивающихся вглубь покрытия, а затем в сплав. Однако основной очаг, приводящий к разрушению образцов располагается под поверхностью на глубине ~1,5 мм и не связан с влиянием покрытия. При 1100°C предел выносливости (на базе  $N=2 \cdot 10^7$  циклов) составил  $\sigma_{-1}=150$  МПа. Наличие керамического слоя не изменило ни характер разрушения образцов, ни значений предела выносливости.



**Рис.6. Результаты испытаний усталости образцов ЖС6У без покрытия (1) и с теплозащитным покрытием (2).**

Положение изменяется при испытаниях плоских образцов (рис.6). В этом случае очаг разрушения, образуется в теплозащитном покрытии в зоне максимальных напряжений в углу плоского образца, который является концентратором напряжений. От этого угла развивается усталостная трещина, приводящая к разрушению. По сравнению с образцами без покрытия предел выносливости на базе  $N=1 \cdot 10^8$  циклов снижается на ~30 МПа. Влияние теплозащитного покрытия в этом случае такое же, как и покрытия СДП-2 без керамического слоя.

## Малоцикловая усталость жаропрочных сплавов с покрытиями

Испытания малоцикловой усталости являются эффективным методом оценки влияния покрытий на сопротивление образованию трещин при высоких значениях деформаций свойственных термическим нагрузкам. Испытания малоцикловой усталости сплава ВЖЛ12У с различными вариантами защитных покрытий проводились путем изгиба плоских образцов толщиной 1 мм при температурах 20 и 800°C. При 20°C все испытанные варианты покрытий имеют пластичность менее 1% и максимальный уровень термических напряжений, у диффузионных покрытий - сжимающих, у покрытий (Ni,Co)-Cr-Al-Y - растягивающих. При 800°C все покрытия пластичны и термические напряжения в них невелики.

Испытания проведены на образцах с диффузионным покрытием ВСДП-11 (толщина 40 мкм, содержание алюминия 26-28%) и с покрытием СДП-2 толщиной 100 мкм, нанесенным электронно-лучевой технологией. Результаты испытаний приведены на рис.7. При 20°C оба варианта защитных покрытий понижают долговечность сплава ВЖЛ12У. Наиболее сильно это проявляется на образцах с покрытием СДП-2 и связано, как с наличием в нём растягивающих напряжений, так и со структурными дефектами (микрокаплями), которые являются концентраторами напряжений. В диффузионном покрытии, в отличие от покрытия СДП-2, при 20°C имеются напряжения сжатия. Однако ввиду низкой пластичности покрытия оно также снижает долговечность образцов из сплава ВЖЛ12У в 5-7 раз.

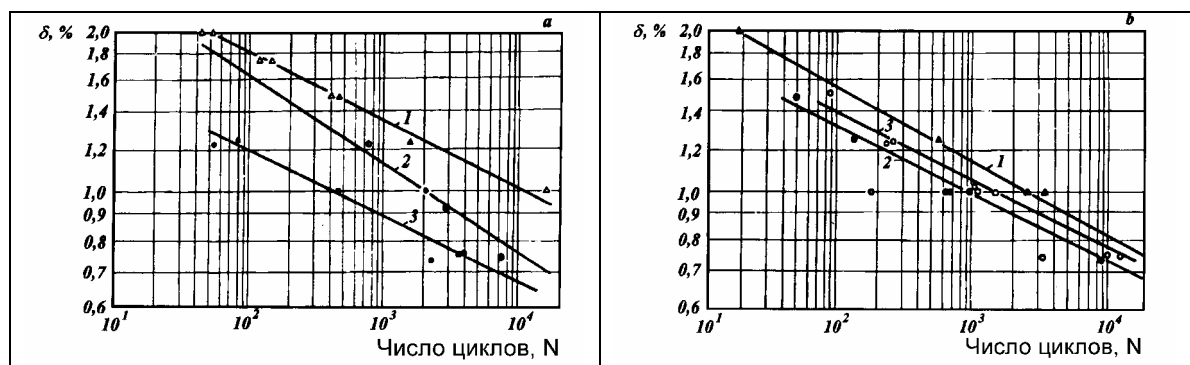


Рис. 7. Малоцикловая усталость сплава ВЖЛ12У при 20 °С (а) и 800 °С (б):  
1 – без покрытия; 2 - диффузионное покрытие ВСДП-11; 3 – покрытие СДП-2.

При 800°C за время испытаний (<100 часов) не происходит повреждения поверхности незащищенных образцов за счет окисления. В этих условиях покрытия не проявляют своих защитных свойств, а накопление в них деформации из-за низкого предела текучести при этой температуре способствует возникновению трещин и разрушению образцов. Покрытие СДП-2, обладающее при 800°C большим пределом прочности и запасом пластичности, в меньшей степени снижает долговечность образцов, чем диффузионное покрытие ВСДП-11 (рис. 7б). Закономерности, отмеченные при испытаниях малоцикловой выносливости на образцах из сплава ВЖЛ12У распространяются и на другие жаропрочные сплавы.

### Выводы

1. Влияние покрытий на усталость жаропрочных сплавов различно в низкотемпературной (до 250°C) и высокотемпературной (800-1000°C) областях.
2. На сопротивление усталости образцов и лопаток с защитными покрытиями оказывают влияние следующие факторы: размеры, форма испытываемых образцов и конструкция лопаток; химический и фазовый составы покрытия; механические и физические свойства материала покрытия; структура покрытия; термические напряжения в покрытии.

3. При температурах 800-1000°C и базах усталостных испытаний -  $2 \cdot 10^7$  циклов (~120 часов) отрицательное влияние окисления поверхности сплавов ЖС6У, ЖС6К, ВЖЛ12У, ЖС32 не проявляется. Этим объясняется отсутствие положительного влияния покрытий в большинстве проведенных испытаний усталости. В реальных условиях работы, повреждаемость поверхности лопаток значительно выше, чем при лабораторных испытаниях и лопатки с покрытием, отработавшие на двигателе, имеют значения предела выносливости выше, чем у таких же лопаток без покрытия.
4. Покрытия понижают малоцикловую выносливость жаропрочных сплавов. Это связано со свойствами покрытий: их низкой пластичностью при низких температурах (250°C) и быстрым накоплением ими пластических деформаций при температурах выше 800°C.

### **Список литературы.**

1. J.F.Paskiet, D.H.Boon, C.P.Sullivan, Effect of Aluminide Coating on High-Cycle Fatigue Behavior of Nickel-Base High-Temperature Alloy, *Journal of the Institute of Metals*, 1971, v.100, No 2, p.58-62
2. И.И. Ищенко, В.И.Омельченко, Б.Н.Синайский, Изучение влияния жаростойких покрытий на усталость жаропрочных сплавов, *Проблемы прочности*, 1971, No 10, с.76-79
3. А.И.Самойлов, И.А.Игнатова, Ю.А.Тамарин, Термические напряжения в алуминидных покрытиях, сб. "Вопросы авиационной науки и техники", ОНТИ ВИАМ, 1988, с.75-79
4. П.Т.Коломыцев, Жаростойкие диффузионные покрытия, М., *Металлургия*, 1979, 272 с.
5. Л.М.Акимов, Усталостная прочность жаропрочных сплавов, М., *Металлургия*, 1977, 220 с.
6. T.N.Rhys-Jones, T.P.Cunningham, The influence of Surface Coatings on the Fatigue Behaviour of Aero Engine Materials *Surface and Coatings Technology*, 42, 1990, p.13-19
7. Л.Б.Гецов, А.И.Рыбников, И.С.Малашенко, Сопротивление усталости жаропрочных сплавов с покрытиями, *Проблемы прочности*, 1990, № 5, с. 51-56
8. А.Н.Петухов, Сопротивление усталости деталей ГТД, М., *Машиностроение*, 1993, 240 с.
9. Н.В.Абраимов, Ю.В.Елисеев, Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов, М., *Интермет Инжиниринг*, 2001, 622 с.
10. Y.A.Tamarin, *Protective Coatings for Turbine Blades*, ASM International, 2002, 365 p.