

8. Мубояджян С.А., Луценко А.Н. Ионное модифицирование поверхности – перспективный процесс для защиты лопаток компрессора ГТД от солевой коррозии и эрозии //Труды международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина. Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение.– М.: ВИАМ, 2006, с. 314–318.
9. Луценко А.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Промышленные технологические процессы ионной обработки поверхности //В сб.: Авиационные материалы и технологии, 2005, № 1, с. 30–40 (ВИАМ).

В.Я. Белоус, А.Д. Журнов, А.Н. Луценко, С.А. Мубояджян

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ

Для защиты лопаток компрессора от коррозионного воздействия окружающей среды одним из перспективных способов является разработка надежных покрытий, обеспечивающих на рабочей поверхности лопаток образование тонких защитных слоев с сопротивлением агрессивному воздействию среды, в несколько раз превышающим сопротивление материала основы.

Анализ повреждений лопаток и других деталей компрессора ГТД после длительной эксплуатации в условиях морской коррозии показывает, что основными причинами возникновения дефектов является солевая коррозия, развивающаяся в процессе воздействия влаги, содержащей хлорид натрия.

В работе проведены комплексные исследования влияния защитного ионно-плазменного покрытия СДП-1+ВСДП-20, разработанного в ВИАМ с целью повышения коррозионной стойкости стальных лопаток компрессора ГТД из стали 15X16K5H2MBФAB (ЭП866-Ш) в области температур 450–650°C, работоспособного во всеклиматических условиях.

Исследование коррозионной стойкости стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20

Исследование коррозионной стойкости стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 проводили в условиях камеры солевого тумана (КСТ-35), камеры тропического климата (КТК), промышленной атмосферы и по методике ускоренных циклических испытаний при температуре 450°C.

Испытаниям на коррозионную стойкость были подвергнуты образцы из стали ЭП866-Ш в следующих состояниях:

- в исходном состоянии после термообработки по стандартному режиму;
- после нагревов по режиму 450°C, 100 ч (оксидные пленки не удалялись);
- с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после диффузионного отжига;
- с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после нагрева по режиму 450°C, 100 ч.

Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 9.012 и СТП 1-595-7-358–2001. Продолжительность испытаний составила 6 мес. Результаты испытаний показаны в табл. 1.

Данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что на образцах стали ЭП866-Ш первые коррозионные повреждения в КСТ-35 появляются через 30 сут испытаний; на образцах, подвергнутых нагреву при 450°C, 100 ч, коррозионные повреждения образуются через 10 сут из-за наличия на поверхности оксидных пленок и обезлегированных слоев. Количество коррозионных повреждений на образцах после нагревов больше, чем на исходных образцах, но глубина их меньше.

На образцах ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после нагревов и без нагревов за период испытаний не обнаружено коррозионных повреждений материала основы.

В процессе испытаний на поверхности образцов с покрытием появляется белый налет продуктов коррозии покрытия, являющийся гидроокисью алюминия. На образцах после длительных нагревов продукты коррозии образуются за меньший промежуток времени, но нагрев образцов с покрытием по режиму 450°С, 100 ч не снижает защитных свойств покрытия СДП-1+ВСДП-20, которые находятся на уровне свойств таких покрытий, как ДифА-СФ и ВПАФЦ.

Приведенные данные ускоренных циклических испытаний на базе 10 циклов при температуре 450°С подтверждают, что покрытие СДП-1+ВСДП-20 без нагревов и после длительных нагревов по режиму 450°С, 100 ч заметно повышает коррозионную стойкость стали ЭП866-Ш.

Таблица 1

Результаты коррозионных испытаний стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 в условиях солевого тумана (КСТ) и циклических испытаний

Материал + покрытие	Состояние	Режим испытаний	Коррозионное повреждение			
			Начало коррозии	Площадь коррозионного поражения металла (покрытия)	Скорость коррозии, мм/год (балл)	Глубина питтингов, мм
ЭП866-Ш (без покрытия)	Исходное	450°С, 10 циклов*	После 3 циклов	70–90%	0,05 (4 балла)	–
	После нагрева при 450°С, 100 ч	450°С, 10 циклов*	После 2 циклов	70–90%	0,47 (5 баллов)	–
ЭП866-Ш + (СДП-1 + ВСДП-20)	После нагрева: при 600°С, 6 ч	450°С, 10 циклов*	После 8 циклов (на покрытии)	Нет (единичные продукты коррозии покрытия)	<0,05	–
	при 450°С, 100 ч	450°С, 10 циклов*	После 8 циклов (на покрытии)	То же	–	–
ЭП866-Ш (без покрытия)	Исходное	КСТ-35 (3 мес)	Через 30 сут	30–50% (единичные язвы, питтинги)	–	0,05–0,2
	После нагрева при 450°С, 100 ч	КСТ-35 (3 мес)	Через 10 сут	30–70% (много язв, питтингов)	–	0,05–0,08
ЭП866-Ш + (СДП-1 + ВСДП-20)	После нагрева: при 600°С, 6 ч	КСТ-35 (3 мес)	Нет	Нет (единичные продукты коррозии покрытия)	–	Нет
	при 450°С, 100 ч	КСТ-35 (3 мес)	Нет	То же	–	Нет
ЭП866-Ш + ДифА-СФ	После нагрева при 450°С, 100 ч	КСТ-35 (3мес)	Нет	–«–	–	Нет

* Здесь и далее: 1 цикл – нагрев до 450°С, 1 ч, подсуживание на воздухе, охлаждение распылением 3%-ного раствора NaCl, выдержка во влажной камере 22 ч.

В табл. 2 представлены результаты коррозионных испытаний стали ЭП866-Ш в исходном состоянии и с ионно-плазменным покрытием в условиях тропической камеры и промышленной атмосферы.

Результаты коррозионных испытаний стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 в тропической камере (КТК) и промышленной атмосфере

Вид образцов	Режим нагрева	Вид образцов после 7 мес испытаний в условиях	
		КТК	промышленной атмосферы (под навесом)
Без покрытия	Без нагрева	Без изменений	Без изменения (легкий матовый оттенок поверхности)
	После нагрева при 450°C, 100 ч	Единичные питтинги у края образцов и отверстия	Продукты коррозии в виде мелких рыжих точек; в местах подвески образцов затеки ржавчины
С покрытием СДП-1+ВСДП-20	После нагрева: при 600°C, 6 ч	Без изменений	Единичные белые точки у отверстия
	при 450°C, 100 ч		
С покрытием ДифА-СФ	После нагрева при 450°C, 100 ч	То же	То же

Данные табл. 2 подтверждают высокие защитные свойства покрытия СДП-1+ВСДП-20 в условиях камеры тропического климата и промышленной атмосферы.

Для определения влияния натуральных климатических условий на коррозионную стойкость стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 были проведены испытания в условиях коррозионной станции г. Геленджика (ГЦКИ) и на Северной коррозионной станции в п. Дальние Зеленцы (СКС). Образцы были размещены в жалюзийной будке и под навесом.

Атмосферную коррозию изучали на образцах стали ЭП866-Ш:

- после нагревов по режиму 450°C, 100 ч;
- с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после нагрева при 450°C, 100 ч.

Образцы из стали ЭП866-Ш были выставлены на экспозицию в условиях ГЦКИ под навесом с ежедневным одноразовым обливом морской водой:

- без покрытий после нагревов при 450°C, 100 ч;
- с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после нагревов при 450°C, 100 ч.

Продолжительность коррозионных испытаний составила 1 год (с августа 2004 по август 2005 гг.). Результаты климатических испытаний представлены на рис. 1 и в табл. 3.

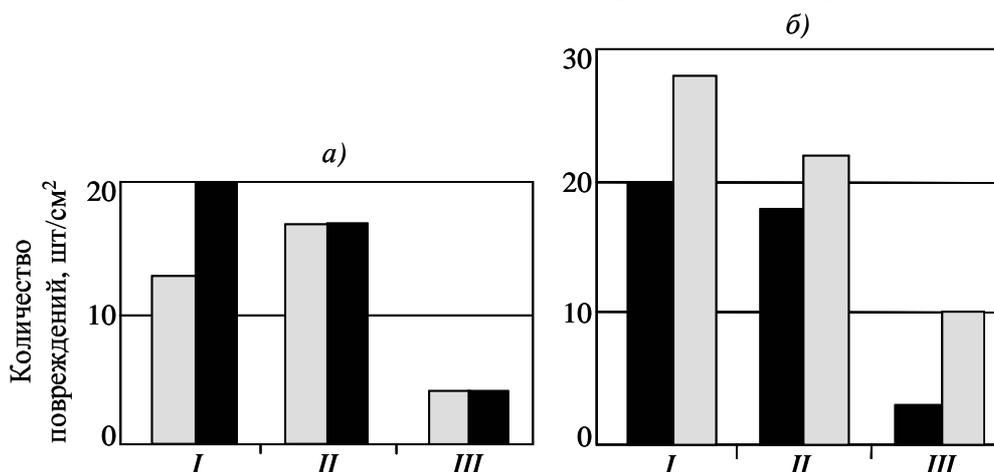


Рис. 1. Количество коррозионных повреждений на 1 см² после натуральных испытаний стали ЭП866-Ш в ГЦКИ (а) и в СКС (б) при экспозиции в жалюзийной будке (□) и под навесом (■) (в ГЦКИ – с ежедневным обрызгиванием):

I – образцы в исходном состоянии; II – после нагрева при 450°C; III – образцы с покрытием после нагрева при 450°C (поражений подложки не обнаружено)

На образцах из стали ЭП866-Ш количество коррозионных повреждений поверхности после испытаний в ГЦКИ под навесом больше, чем после испытаний в жалюзийной будке (см. рис. 1). На образцах с покрытием СДП-1+ВСДП-20 в условиях как жалюзийной будки, так и под навесом коррозионных повреждений основы не обнаружено, наблюдается локальная деструкция поверхностного слоя покрытия.

Образцы, экспонировавшиеся на северной коррозионной станции, имеют больше коррозионных повреждений вследствие более жестких условий испытания, а именно более высокого содержания хлор-ионов в атмосфере.

Испытания в натуральных климатических условиях коррозионных станций г. Геленджика и Дальних Зеленцов подтвердили высокие защитные свойства ионно-плазменного покрытия СДП-1+ВСДП-20 в жестких морских условиях.

Таблица 3

Результаты коррозионных испытаний стали ЭП866-Ш в исходном состоянии и с покрытием в условиях климатических станций ГЦКИ и СКС

Состояние образца	Климатическая станция	Условия испытаний	Вид коррозионных повреждений	Количество коррозионных повреждений на 1 см ²	Размер питтингов, мм	
					диаметр	глубина
Исходное	ГЦКИ	В жалюзийной будке	Мелкие питтинги	13–17	0,1–0,45	0,05
		Под навесом с ежедневным обрызгиванием	То же	20–23	0,1–0,45	0,05
	СКС	В жалюзийной будке	—«—	15–17	0,15–0,55	0,05
		Под навесом	—«—	28–31	0,1–0,65	0,05–0,1
После нагрева при 450°С, 100 ч	ГЦКИ	В жалюзийной будке	Мелкие питтинги	17–20	0,1–0,45	0,05
		Под навесом с ежедневным обрызгиванием	То же	17–20	0,1–0,7	0,05
	СКС	В жалюзийной будке	—«—	18–21	0,15–0,5	0,05–0,1
		Под навесом	—«—	22–25	0,15–0,85	0,05–0,1
С покрытием + + нагрев при 450°С, 100 ч	ГЦКИ	В жалюзийной будке	Наблюдается локальная деструкция поверхности покрытия; коррозионных поражений подложки не обнаружено	(4–5)*	(0,4–3,5)*	–
		Под навесом с ежедневным обрызгиванием		(4–5)*	(0,4–5,65)*	–
	СКС	В жалюзийной будке		(3–4)*	(0,35–1)*	–
		Под навесом		(10–13)*	(0,2–2,7)*	–

* В зонах частично поврежденного покрытия.

Определение эрозионной стойкости покрытия СДП-1+ВСДП-20

Исследована эрозионная стойкость защитного покрытия при различных углах набегания пылевоздушного потока, имитирующего касательное (под углом 20 град) и лобовое воздействие (70 град). Установлено, что покрытие СДП-1+ВСДП-20 практически не повышает эрозионной стойкости. Проведенные дополнительно коррозионные испытания образцов с частично выработанным покрытием в условиях КСТ-35 позволили установить, что выработка 25–30% толщины покрытия СДП-1+ВСДП-20 не приводит к снижению защитного эффекта.

Исследование усталостной прочности стали ЭП866-Ш в исходном состоянии и с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после нагревов и коррозионных испытаний

Изучено сопротивление многоциклового усталости (МнЦУ) стали ЭП866-Ш в исходном состоянии и с покрытием после нагревов при 450°C, 100 ч, а также после последующих коррозионных испытаний.

Испытания проводили на цилиндрических образцах $\varnothing 7$ мм и длиной 140 мм в условиях чистого изгиба с вращением. При данном виде нагружения хорошо выявляется влияние состояния поверхностного слоя металла на его усталостную прочность, так как максимальное напряжение при испытании действует на поверхности нагруженного образца. Частота испытаний составляла 50 Гц, температура 450°C.

Полученные экспериментальные данные были обработаны с применением методов математической статистики – регрессионного анализа с одной переменной и метода наименьших квадратов. Внешний вид образцов для усталостных испытаний после коррозионных испытаний показан на рис. 2 и 3. Результаты испытаний на усталость стали ЭП866-Ш в исходном состоянии и с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после нагревов и коррозионных испытаний представлены в табл. 4.

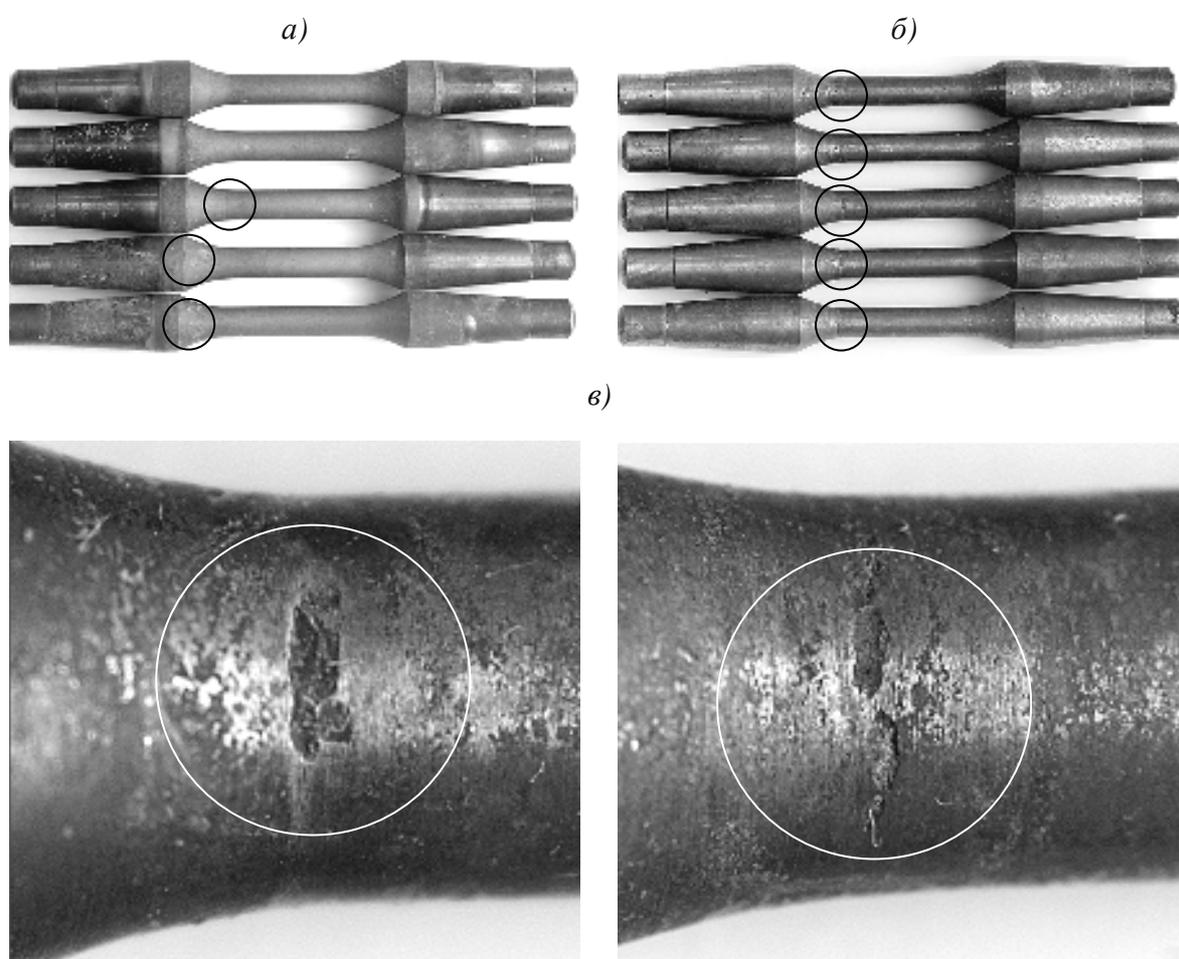


Рис. 2. Внешний вид образцов для усталостных испытаний после экспозиции в течение 1 года на ГЦКИ (под навесом с ежедневным обрызгиванием):

а, б – образцы стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 (*а*) и без покрытия (*б*); *в* – вид коррозионных повреждений на образцах без покрытий ($\times 56$)

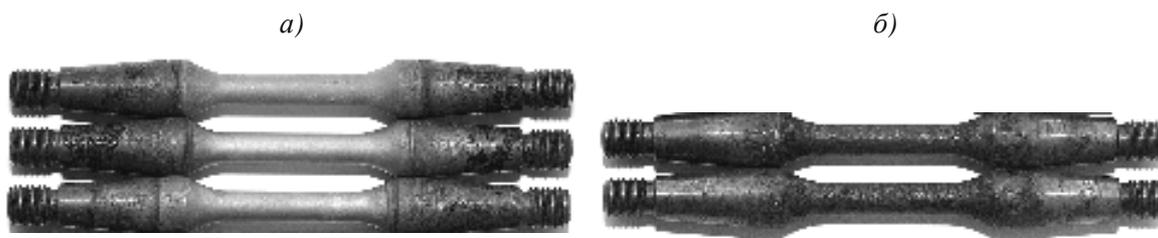


Рис. 3. Внешний вид образцов с покрытием СДП-1+ВСДП-20 (а) и без покрытия (б) после ускоренных циклических испытаний при температуре 450°С, 10 циклов

Таблица 4

Результаты испытаний на многоцикловую усталость гладких образцов стали ЭП866-Ш в исходном состоянии и с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после длительных нагревов и коррозионных испытаний

Покрытия	Вид обработки поверхности	Режим нагрева	σ_{-1} , МПа (на базе $2 \cdot 10^7$ циклов)
Без покрытия	Шлифование	Без дополнительных нагревов (после термообработки по стандартному режиму)	560 (по паспорту)
		600°С, 6 ч + 450°С, 100 ч	440
	Обдувка корундом Шлифование	600°С, 6 ч + 450°С, 100 ч 450°С, 100 ч + 1 год ГЦКИ (под навесом с обрызгиванием)	480 415
СДП-1+ВСДП-20	Обдувка корундом	600°С, 6 ч 600°С, 6 ч + 450°С, 100 ч 600°С, 6 ч + 450°С, 100 ч + циклические испытания (450°С, 10 циклов)	440 440 490
	Шлифование	600°С, 6 ч + 450°С, 100 ч + 1 год ГЦКИ (под навесом с обрызгиванием)	395

Анализ результатов испытания на многоцикловую усталость стали ЭП866-Ш показывает, что пескоструйная обработка повышает предел многоциклового усталости на ~10%. Очевидно, в процессе пескоструйной обработки на поверхности образцов возникли остаточные напряжения сжатия, что и привело к повышению сопротивления многоциклового усталости исследуемой стали. Нанесение покрытия СДП-1+ВСДП-20 толщиной 12–15 мкм приводит к некоторому снижению предела выносливости стали ЭП866-Ш. После длительных нагревов при температуре 450°С снижение предела выносливости образцов с покрытием не превышает 8–10%.

Циклические коррозионные испытания при температуре 450°С образцов стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 практически не приводят к снижению предела выносливости. Испытания в условиях ГЦКИ под навесом с одноразовым обрызгиванием морской водой приводят к некоторому снижению выносливости. Так, на образцах без покрытия предел выносливости стали ЭП866-Ш снижается на ~5%, а на образцах с покрытием – на 10%.

Оптический осмотр усталостных изломов разрушенных образцов показал, что характер разрушения образцов стали ЭП866-Ш без покрытия и с покрытием после выдержки в течение 1 года на ГЦКИ различается: на образцах без покрытия наблюдается, как правило, один или два очага усталостного разрушения; на образцах с покрытием – многоочаговое разрушение.

Фрактографический анализ

Анализировались изломы образцов, изготовленных и испытанных следующим образом: нанесение покрытия + термообработка при 600°С, 6 ч + при 450°С, 100 ч + 10 циклов коррозионных испытаний во влажной атмосфере с распылением 3%-ного раствора NaCl. Кроме того, исследовались образцы, прошедшие указанную термообработку с

последующей экспозицией в течение 1 года на климатической станции в Геленджике (под навесом с одноразовым обливом морской водой).

В образцах без покрытия поверхность образца растравлена более значительно после выдержки в Геленджике. Очаги разрушения начинаются от коррозионных язв (рис. 4, *а*).

В образцах с покрытием усталостное разрушение начинается на границе раздела покрытие–основа. Очаги разрушения при малой долговечности могут быть связаны с местами отслоения покрытий, локальными коррозионными повреждениями покрытий, с рисками от механической обработки (рис. 4, *б*).

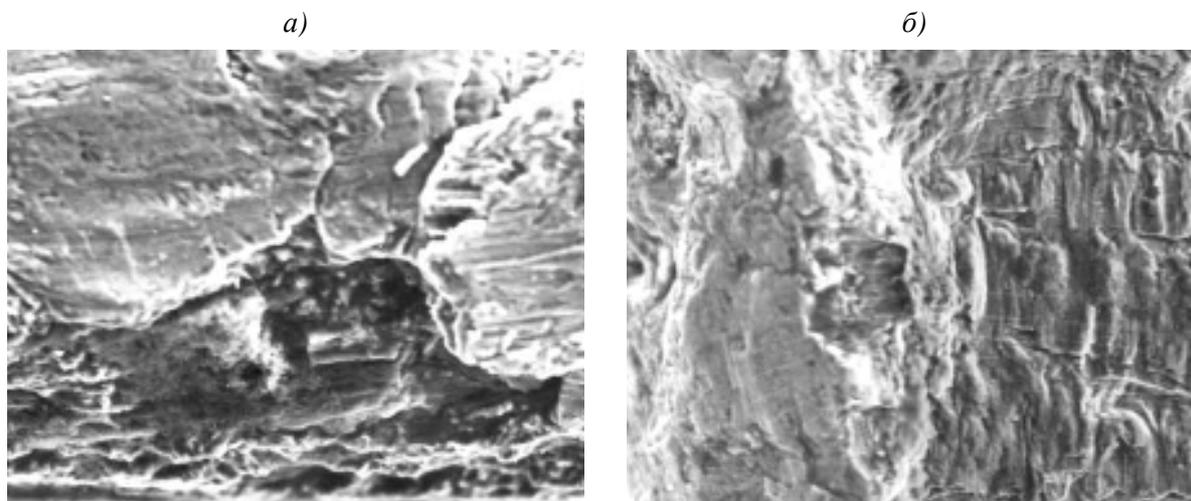


Рис. 4. Строение излома в очаге (*а* – $\times 1000$; *б* – $\times 500$). Образец из стали ЭП866-Ш без покрытия (*а*) и с покрытием СДП-1+ВСДП-20 (*б*) после термообработки (см. текст), экспозиции в течение 1 года в Геленджике и усталостных испытаний ($N=27000$ цикл, $\sigma_{-1}=500$ МПа)

В образце с высокой долговечностью повреждения покрытия менее значительны, в очагах, как правило, наблюдается хрупкое растрескивание покрытия, участки с локальными коррозионными повреждениями металла (рис. 5, *а*).

В образцах с покрытием, после экспозиции в Геленджике, усталостное разрушение начинается от границы раздела покрытие–металл, в местах с поврежденным покрытием, часто от рисок на поверхности образца (рис. 5, *б*).

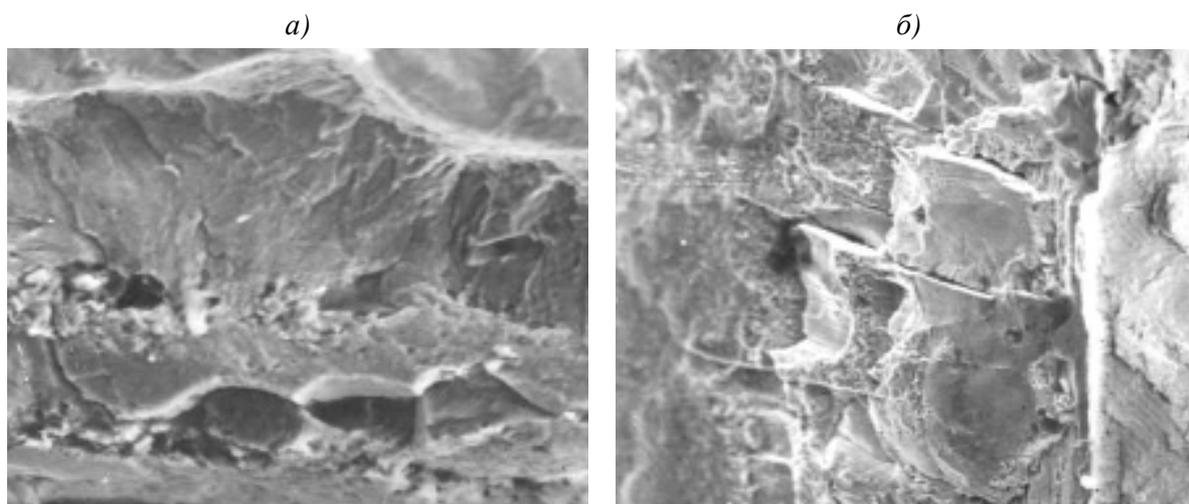


Рис. 5. Строение излома в очаге (*а* – $\times 1000$; *б* – $\times 500$). Образец из стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после термообработки (см. текст), экспозиции в течение 1 года в Геленджике (*б*) и без экспозиции (*а*) и усталостных испытаний ($N=10665000$ цикл, $\sigma_{-1}=520$ МПа)

Таким образом, можно сделать вывод о том, что состояние поверхности образца перед нанесением покрытия оказывает значительное влияние на долговечность.

– Разработано и опробовано ионно-плазменное покрытие СДП-1+ВСДП-20 для защиты стальных лопаток компрессора и других деталей ГТД, работоспособных во всеклиматических условиях при температурах до 450°С.

– Установлено, что применение покрытия повышает коррозионную стойкость стали 15X16K5H2MBФАБ (ЭП866-Ш) при испытаниях ускоренными методами (КТК, КСТ-35, циклические испытания) и в натуральных климатических условиях: промышленная атмосфера, климатическая станция г. Геленджика и Северная коррозионная станция (п. Дальние Зеленцы).

– Показано, что покрытие СДП-1+ВСДП-20 не повышает эрозионной стойкости стали ЭП866-Ш и выработка покрытия на 25–30% толщины не снижает его защитного эффекта.

– Предел выносливости стали ЭП866-Ш с покрытием СДП-1+ВСДП-20 после нагревов при 450°С, 100 ч на ~10% ниже, чем у стали ЭП866-Ш без покрытия, подвергнутой нагревам по тому же режиму.

– Установлено, что циклические коррозионные испытания при температуре 450°С не снижают предела выносливости стали с покрытием.

– Длительные испытания на климатических станциях показали, что экспозиция образцов в течение 1 года на ГЦКИ (под навесом с обрызгиванием образцов морской водой) приводит к снижению предела выносливости образцов стали ЭП866-Ш без покрытия на 5%, образцов с покрытием СДП-1+ВСДП-20 – на 10%.

– Фрактографический анализ показал, что в образцах без покрытия преимущественными местами зарождения разрушения после выдержки в коррозионной среде являются локальные коррозионные повреждения (питтинги), а в образцах с покрытием трещины зарождаются на границе покрытие–металл в местах концентрации напряжений: риски или зоны микроотслоений покрытия или его деструкции.