

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ХРОМОАЛИТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ

К.К. Бахронов

В данной статье показан анализ полученных модифицированных покрытий на основе циркуляции в рабочей газовой среде и дан сравнительный анализ с порошковым способом. Приводятся полученные результаты по термостойкости, длительной прочности и механические свойства полученных покрытий.

Ключевые слова: Диффузионное насыщение, жаростойкие покрытия.

Пути повышения физико-механических свойств поверхностей никелевых жаропрочных сплавов за счет нанесения модифицированных диффузионных покрытий является актуальной задачей машиностроения. Созданный проф. Арзамасовым Б.Н. в МГТУ им. Н.Э. Баумана способ циркуляционного насыщения в порошках [1]. Данный способ был в дальнейшем усовершенствован.

В работе полученные модифицированные диффузионные покрытия на внутренних и наружных поверхностях лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) циркуляционным хромоалитированием (ХА) отвечают современным требованиям и могут быть альтернативой диффузионного насыщения в порошках, где остаточная воздушная атмосфера в рабочей камере, включая влагу, кислород, мелкодисперсные порошковые смеси хрома и алюминия, способствует образованию частиц Al_2O_3 в структуре покрытий [2]. Наличие этих частиц также обусловлено обдувкой покрытий электрокорундом между стадиями нанесения, например, после 1-ой стадии никельхромирования в порошках (рис.1). Учитывая, что температура полного удаления остаточной влаги равна $375^{\circ}C$ [3], то выбранный на основе расчетов галоидный источник $NiCl_2$ позволяет полностью удалить остаточную влагу до $500^{\circ}C$ [4].

Методика исследования

По результатам термодинамических расчетов в качестве исходных технологических параметров было принято: температура в диапазоне - $1000-1050^{\circ}C$, давление 0,05-0,1 МПа, галоидный источник $NiCl_2$, сплав системы Cr-Al и продолжительность выдержки 2÷8 ч.[5]. Были разработаны два режима одно - и двухстадийного циркуляционного ХА первоначально на лабораторной установке, затем на промышленной установке.

Объектами исследования являлись образцы из никелевых сплавов ЖС6У, ЖС26У, ЖС32 и лопатки ГТД из указанных сплавов. В качестве исходного материала служил гранулированный сплав Cr - Al с размером гранул 10x20 мм при различном соотношении компонентов Al:Cr. В качестве геттера предлагается гранулированный сплав NiY с размером гранул 10x20 мм для связывания остаточного кислорода в рабочей камере иттрием, образуя оксид иттрия Y_2O_3 .

Результаты исследования

Качество получаемых покрытий подтверждается натурными испытаниями лопаток. Согласно рентгеноструктурному и микрорентгеноспектральному анализам в покрытиях, наблюдается граница раздела между ХА слоем и основой сплава. Наружный слой (рис.2,3) состоит из NiAl+Ni₃Al-фазы, внутренний слой представляет гетерогенную многофазную структуру, состоящую из NiAl+Ni₃Al-фаз и карбидов. Химический анализ показал, что на поверхности концентрация Al – 16-20%, а Cr – 6-8%. Общая толщина покрытия – 35 мкм, а во внутренних полостях толщина - 10-15 мкм того же состава.

Результаты испытания на жаростойкость при температуре $1050^{\circ}C$ в течение 1500 ч выявили, что структура покрытий на всех образцах претерпела структурные изменения [90]. Исходные структуры покрытий на сплавах представлены на рис. 4.

В покрытии на сплаве ЖС6У (рис.4) наблюдается области темной окраски β -фазы, видны зерна γ' - фазы светлого цвета. Аналогичные структуры и на сплаве ЖС26У, ЖС32 после испытания на жаростойкость в течение 1500 ч.

По результатам фазового анализа покрытий проводили сравнение по содержанию основной β -фазы. Наличие β фазы и защитной

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК 1/1-2012

пленки Al_2O_3 свидетельствует о сохранении защитных свойств покрытий, что следует из сравнительного анализа по содержанию β -фазы в покрытиях полученных в порошках.

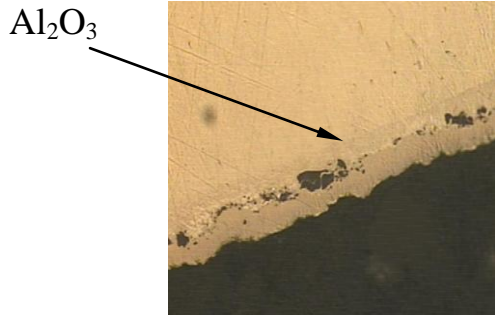


Рисунок 1 – Дефектная структура покрытия, полученная порошковым методом: темные включения Al_2O_3

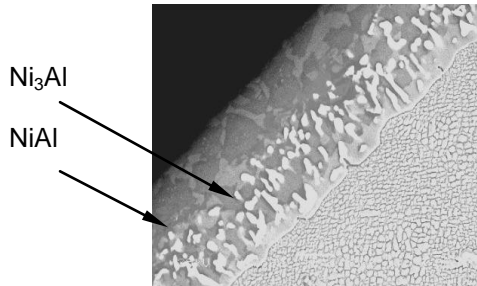


Рисунок 2 – Структура покрытия на лопатке ГТД из сплава ЖС6У после циркуляционного ХА и термовакуумной обработки, $\times 1500$

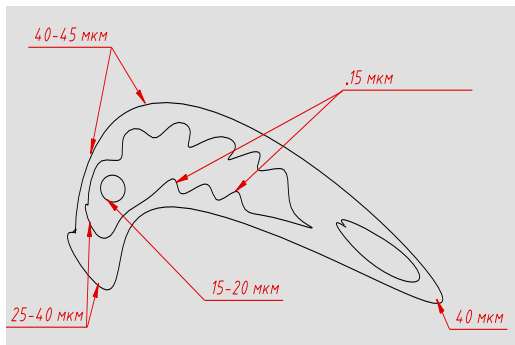


Рисунок 3 – Места анализа толщины покрытия на лопатке (в разрезе) из сплава ЖС6У после циркуляционного хромоалитирования

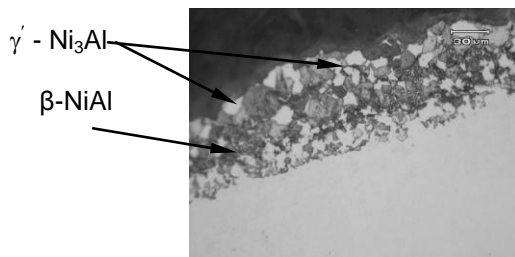


Рисунок 4 – Микроструктура покрытия на сплаве ЖС6У

Проводили сравнительные испытания свойств на термостойкость, длительную прочность и механические свойства лопаток турбины после двухстадийного ХА. Испытания на термостойкость осуществляли на стенде 8УТС путем циклического нагрева лопаток в газовом потоке продуктов сгорания топлива до температуры $1000^{\circ}C$ с последующим охлаждением сжатым воздухом до температуры $200^{\circ}C$. Продолжительность цикла составляла 240 с: 120 с – нагрев, 120 с – охлаждение.

Уровень длительной прочности соответствует требованиям ТУ на лопатки ($T_{исп} = 975^{\circ}C$ при напряжении $\sigma = 230$ МПа и времени до разрушения $\tau \geq 40$ ч). Механические свойства при комнатной температуре $20^{\circ}C$ материала лопаток показали удовлетворительные результаты по кратковременной прочности – 1015 МПа, $\delta = 5,6\%$, что соответствует требованиям ТУ.

Определение объемных остаточных напряжений в окончательно готовых рабочих лопатках ТВД проводилось методом “полного освобождения” (по методике ВИАМ) в два этапа: вырезкой исследуемых темплетов с наклеенными датчиками (тензорезисторами) по спинке и корыту, а затем разрезкой этих темплетов по внутренним элементам лопатки. Вырезку и разрезку темплетов проводили электроэрозийным способом. При этом глубина хромоалюминидного покрытия лопаток составляла на наружной поверхности 30-35 мкм и во внутренних полостях 10-15 мкм. Наклейку тензорезисторов типа КФ4П1-3-100-В-12 в радиальном и окружном направлении

Таблица 1 - Результаты испытаний материала лопаток турбины на прочность

№ лопатки	Механические свойства $\sigma_v, *$ МПа	ПРЕДЕЛ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ			
		$\delta, \% *$	Напряжение, МПа	Температура испытания, $^{\circ}C$	Кол-во часов до разрушения
№ 1	1015	5,7	230	975	40-снят
№ 2	1033	5,6	230	975	40-снят
По-ТУ	≥ 850	$\geq 4,0$	230	975	≥ 40

Примечание: * при температуре испытания $20^{\circ}C$.

АНАЛИЗ ДИФфуЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОЛУЧЕННЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ ХРОМОАЛИТИРОВАНИЕМ

выполняли согласно принятой в серийном производстве схеме. Всего исследовали по 16 мест на каждой лопатке. Готовые лопатки выдержали испытания по уровню объемных остаточных растяжений, укладываемые в рамки ТУ: по сжатию 100 МПа, по растяжению 50 МПа.

По результатам усталостных испытаний все лопатки прошли заданный режим испытаний без признаков разрушения.

Окончательно изготовленные лопатки в количестве шести штук были испытаны на вибростенде на усталостную прочность при комнатной температуре 20°C на контрольный уровень: при напряжении $\sigma_b = 180$ МПа, характеризуется превышением установленного числа циклов $N = 2 \cdot 10^7$ циклов. Результаты усталостных испытаний – положительные: все характеристики лопаток, снимавшиеся в процессе испытаний, оказались стабильными; данные осмотра методом ЛЮМ-10В, данные металлографических исследований подтвердили отсутствие каких-либо дефектов (трещин, сколов и др.), что соответствует требованиям технических условий.

Из рис.5 видно, что термостойкость лопаток ХА циркуляционным методом, в 1,3-1,5 раза выше термостойкости лопаток, полученных порошковым методом. Судя по протяженности трещин при одинаковой наработке лопаток, интенсивность развития их в лопатках, хромоалитированных порошковым методом, более высокая, чем в случае циркуляционного ХА. Лучшие значения по термостойкости никелевых сплавов, ХА циркуляционным методом, по-сравнению с аналогичными



Рисунок 5 – Сравнение термостойкости хромоалитированных покрытий, полученных порошковым и циркуляционным методами на образцах и лопатках ГТД из сплава ЖС6У

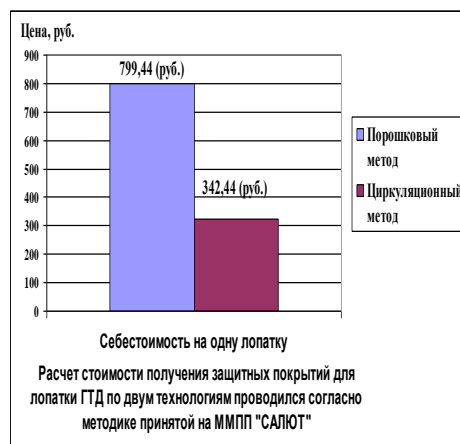


Рисунок 6 – Себестоимость нанесения покрытия для одной лопатки ГТД

характеристиками, полученными при других методах насыщения, объясняются, очевидно, высоким качеством покрытий, в частности, более чистым их составом по примесям, лучшей пластичностью, меньшей пористостью и лучшей стабильностью по толщине.

Применения двухстадийного циркуляционного ХА позволяют получить покрытия, не уступающие по свойствам покрытиям, получаемым в порошках, а применение одностадийного циркуляционного ХА, позволяет исключить между стадиями нанесения (1-ой стадии никельхромирования) переходной зоны, где содержания включений Al_2O_3 вызваны во время обдувки покрытия электрокорундом.

Испытания лопаток по предложенному способу циркуляционного ХА апробированы в заводских условиях на ММПП "САЛЮТ" на основании этого получен "акт апробации".

Экономический эффект от внедрения циркуляционного хромоалитирования взамен порошкового позволит снизить себестоимость нанесения покрытия на одну лопатку в 2 раза. Результаты расчета показаны на рис.6.

Выводы:

1. Разработаны режимы одно- и двухстадийного циркуляционного хромоалитирования при температуре 1000-1030°C и продолжительности выдержки 2÷8 ч. и нанесены покрытия на опытную партию лопаток из сплава ЖС6У.

2. Хромоалитирование при 1000-1030°C в течение 2-8 ч приводит к образованию покрытий толщиной 30-35 мкм с концентрацией 12-20% Al и 6-8% Cr. Во внутренних полостях толщина составляет 10-15 мкм того же состава.

3. В структуре покрытий не обнаруживаются хрупкие неметаллические включения

Al₂O₃, в то время как металлографическим и химическим анализами выявлены темные включения Al₂O₃ в покрытии после порошкового хромоалитирования.

4. Проведены испытания покрытий на никелевых сплавах на жаростойкость при температуре 1050⁰С в течение 1500 ч и пластичность. Установлено, что в покрытии после окисления сохраняются фазы β-NiAl и γ'-Ni₃Al. Наличие жаростойкой β-фазы в покрытии свидетельствует о сохранении защитных свойств покрытия, где содержание β-фазы около 10%, что равно содержанию β-фазы в покрытиях полученных в порошках. Циркуляционный метод нанесения покрытий на сплавах обеспечивает пластичность: динамическую (7,4 Дж/мм), статическую (0,6%), что выше, чем при порошковом методе (3,24 Дж/мм и 0,6%).

5. Усталостная прочность при напряжении $\sigma = 180$ МПа характеризуется превышением установленного числа циклов $N = 2 \cdot 10^7$ циклов, что соответствует требованиям технических условий. Механические свойства материала лопаток (кратковременная прочность равна 1015 МПа, δ -5,6%, предел длительной прочности составляет $\sigma_{40}^{975} = 230$ (при температуре 975⁰С и напряжении равном 230 МПа материал лопатки выдержал 40 ч), что соответствует требованиям ТУ, по термостойкости покрытия в 1,3-1,5 раза превышают порошковые. Объемные остаточные напряжения укладываются в рамки ТУ от -100 до +50 МПа.

6. Разработанный способ апробирован на ММПП "Салют" на опытной партии рабочих лопаток. Испытания дали положительные результаты, не уступающие по показателям лопаткам с серийным порошковым покрытием.

7. Установлено, что циркуляционное хромоалитирование, взамен порошкового, снижает себестоимость нанесения покрытия в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циркуляционный метод получения диффузионных покрытий на деталях газотурбинных двигателей и перспективы его развития / Б.Н. Арзамасов, А.К. Белявский, А.В. Логунов, Г.Б. Строганов // Вестник машиностроения. – 1991. – №11. – С. 43-48.
2. Бахрунов К.К. Разработка процессов диффузионного насыщения поверхностей охлаждаемых лопаток газовых турбин. V Международная научно-техническая конференция: / УГТУ – УПИ им. первого президента Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2009. – Т.1 – С. 43-48.
3. Справочник авиационного техника: Справочник / Под ред. И.С. Мурза – М.: Воениздат, 1963. – 512 с.
4. Фурман А.А. Неорганические хлориды (химия и технология). – М.: Химия, 1980. – 416 с.
5. Бахрунов К.К. Изучение процессов диффузионного насыщения на основе термодинамического моделирования. «Физические основы современного материаловедения». АЛГТУ им. Ползунова. – Барнаул, 2010. Т.1, С. 55-57.

Бахрунов К.К., к.т.н., доцент,
кафедра «Металловедение и технология
обработки материалов»
e-mail: bahrunov@mail.ru
ФГБОУ ВПО "Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления", г. Улан-Удэ