

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 669.187.526.001.5

Влияние защитных покрытий на механические свойства жаропрочного сплава ЖС32-ВИ

К. Ю. Яковчук^а, Ю. Э. Рудой^б, Е. В. Оноприенко^а, В. Г. Малышева^в

^а Государственное предприятие “Международный центр электронно-лучевых технологий Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины”, Киев, Украина

^б Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

^в Государственное предприятие “Ивченко-Прогресс”, Запорожье, Украина

Рассмотрено влияние диффузионных жаростойких и конденсационных градиентных термобарьерных покрытий, используемых для защиты рабочих лопаток турбины ГТД, на механические характеристики (длительная и кратковременная прочность, пластичность при температуре испытаний 1000°С) образцов из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ. Исследовано влияние изотермического отжига на воздухе при температуре 1100°С в течение 240 ч на механические характеристики образцов без покрытия и с защитными покрытиями. Отмечена целесообразность применения градиентных термобарьерных покрытий, состоящих из внешнего низкопроводящего керамического слоя и термостабильного жаростойкого металлического слоя, которые обеспечивают снижение температуры металла стенок охлаждаемых лопаток из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ с целью достижения требуемого ресурса.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав ЖС32-ВИ, электронно-лучевое осаждение, жаростойкие покрытия, градиентные термобарьерные покрытия, прочность, пластичность.

Введение. Максимальная температура газа в современных авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) достигает 1350...1650°С [1–5]. Химический состав жаропрочных никелевых сплавов, определяющий необходимую совокупность механических характеристик монокристаллических рабочих лопаток ГТД в условиях эксплуатации, не обеспечивает достаточного сопротивления металла лопаток воздействию агрессивного газового потока. Для достижения требуемого ресурса и высокой надежности рабочих лопаток ГТД при приемлемом расходе охлаждающего воздуха необходимо использование покрытий пера, в том числе термобарьерных, гарантирующих защиту от окисления при температуре до 1200°С [2–6].

Современные термобарьерные покрытия состоят, как правило, из связующего металлического слоя (на основе жаростойких алюминидов или сплавов типа NiCoCrAlY), защищающего поверхность лопатки от окисления и коррозии, и внешнего керамического слоя с низкой теплопроводностью (около 1...1,5 Вт/(м·К)), обеспечивающего в первую очередь тепловую защиту от

агрессивного высокотемпературного потока продуктов сгорания топлива в турбине. Применение термобарьерных покрытий позволяет увеличить эффективность работы ГТД за счет повышения температуры газа на входе в горячий тракт, а также срок службы турбинных лопаток [2–6].

Несмотря на имеющуюся техническую информацию по механическим характеристикам жаропрочных сплавов с покрытиями [5–8], совершенствование жаростойких диффузионных покрытий и применение градиентных конденсационных термобарьерных покрытий для защиты лопаток турбин обуславливают необходимость изучения их влияния на свойства защищаемого сплава.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния покрытий на механические характеристики образцов из жаропрочного литейного сплава ЖС32-ВИ при 1000°С. Этот сплав, выбранный в качестве подложки, относится к классу дисперсионно-твердеющих углеродсодержащих сплавов на основе никеля и широко используется в авиационном двигателестроении для изготовления лопаток ГТД, в том числе монокристаллических [8, 9].

Материалы и методика эксперимента. Для испытаний использовали стандартные цилиндрические образцы с резьбовыми захватами (диаметр рабочей части 5 мм), изготовленные из заготовок, полученных высокоскоростной направленной кристаллизацией сплава ЖС32-ВИ. Макроструктура образцов – монокристаллическая с отклонением от заданной кристаллографической ориентации [001] не более 8 угловых градусов и направленно-кристаллизованная. Кроме образцов, полученных выплавкой исходной 100%-ной свежей шихты, испытывали образцы из металла с использованием 50% первичного и 50% вторичного возврата (переплав отходов жаропрочного сплава ЖС32-ВИ) в связи с дефицитом сырья [10].

Все образцы жаропрочного сплава как без покрытий, так и предназначенные для нанесения покрытий термически обрабатывали по штатному режиму (закалка и старение), используемому для лопаток из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ.

Испытаниям подвергали образцы сплава ЖС32-ВИ без покрытия и с нанесенными защитными покрытиями (здесь и далее по тексту в вес.%): комплексным жаростойким покрытием (Al)+СДП-2+ВСДП-16 (алюминидный слой + (Ni–22Cr–11Al–0,4Y) + (Ni+13...16Al+1,2...1,8Y)) и конденсационными градиентными термобарьерными покрытиями типа Ni–18Co–18Cr–11Al–0,2Y+Ni(Al,Cr)/ZrO₂–8Y₂O₃ (ГТБП-1) и типа Ni–18Co–18Cr–11Al–0,2Y+M_xC_y+NiAl/ZrO₂–8Y₂O₃ (ГТБП-2). Особенность покрытий ГТБП-1 – повышенное содержание хрома (до 35%) на границе контакта между слоем Ni–22Al и внешним керамическим слоем для замедления скорости роста пленки Al₂O₃ на поверхности слоя NiAl в процессе окисления. В покрытии ГТБП-2 переходной слой (между NiCoCrAlY и Ni–24Al) выполнял роль диффузионного барьера, был обогащен углеродом и содержал частицы карбидных фаз M_xC_y (в первую очередь карбидов хрома и легирующих элементов, диффундирующих из жаропрочного сплава).

Комплексное жаростойкое покрытие (Al)+СДП-2+ВСДП-16 получено путем алитирования поверхности образцов из жаропрочного сплава газоциркуляционным методом и последующего нанесения слоев СДП-2 (Ni–22Cr–

11Al–0,4Y) и ВСДП-16 (Ni–13...16Al–1,2...1,8Y) методом вакуумно-плазменной технологии на установке МАП-1 [11]. Микроструктура комплексного жаростойкого покрытия представлена на рис. 1,а, общая толщина комплексного покрытия составляет 65–70 мкм, толщина алитированного слоя – 20–35 мкм, слоев СДП-2 и ВСДП-16 – соответственно 20–30 и 10–15 мкм. Температура образцов в процессе нанесения комплексного покрытия не превышает 1000°С. Общая продолжительность штатных диффузионных отжигов при температуре 1050°С составляет 11,5 ч.

Ранее [12, 13] подробно описаны состав, микроструктура и свойства градиентных термобарьерных покрытий типа ГТБП-1 и ГТБП-2, полученных путем электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме по одностадийной технологии с использованием композиционного керамического слитка. Микроструктура ГТБП-1 (NiCoCrAlY+Ni(Al, Cr)/ZrO₂–8Y₂O₃) и ГТБП-2 (NiCoCrAlY+M_xC_y+NiAl/ZrO₂–8Y₂O₃) приведена на рис. 1,б,в соответственно.

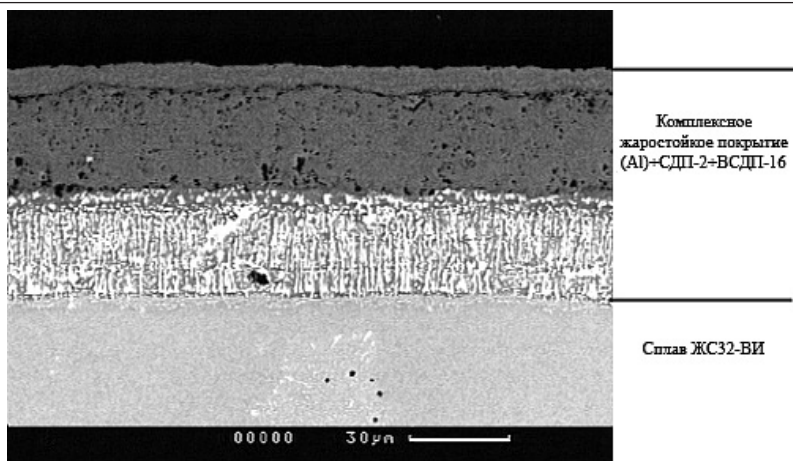
Общая толщина связующего слоя для обоих вариантов градиентных покрытий составляет 40–50 мкм, толщина переходной зоны Ni(Al, Cr) с 22 вес.% Al не превышает 20 мкм для ГТБП-1, толщина переходной зоны NiAl с 24 вес.% Al – 30 мкм для ГТБП-2. Толщина внешнего керамического слоя ZrO₂–8Y₂O₃ равна 140–160 мкм. Температура конденсации градиентного термобарьерного покрытия не превышает 1050°С. Окончательный отжиг в вакууме выполняли при 1100°С в течение 1 ч.

Испытания на кратковременную прочность проводили на универсальной испытательной машине ГМС-20 в соответствии с ГОСТ 9651-84. Скорость перемещения захвата составляет 10 мм/мин. Испытания на длительную прочность выполняли согласно ГОСТ 10145-84 на испытательной машине ZST 3/3 при температуре 1000°С в воздушной среде. Время выдержки образцов в печи по достижении заданной температуры (до приложения нагрузки) составляет 20...30 мин. Образцы доводили до разрушения. Для каждого варианта покрытий испытывали не менее пяти образцов.

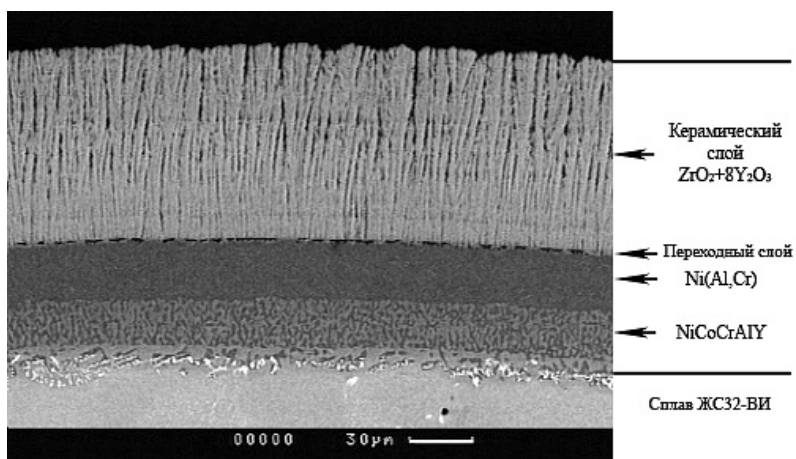
С целью исследования влияния высокой температуры и процессов окисления на механические свойства образцы с покрытиями перед испытаниями подвергали изотермическому отжигу при 1100°С на воздухе в течение 240 ч. По этому же режиму проводили термическую обработку исходных заготовок, из которых затем изготавливали образцы для испытаний на кратковременную и длительную прочность. Это позволяет исключить влияние процессов окисления поверхности образцов без покрытия на механические свойства жаропрочного сплава ЖС32-ВИ и изучить только влияние высокотемпературной выдержки на свойства сплава без покрытия. Температура изотермической выдержки 1100°С соответствует температуре кромок пера рабочих лопаток турбин высокого давления (ТВД) современного ГТД на взлетном режиме, а время выдержки (240 ч) – суммарной продолжительности взлетного режима в течение заданного ресурса.

В качестве критерия прочностных характеристик для никелевого жаропрочного сплава ЖС32-ВИ приняли следующие значения:

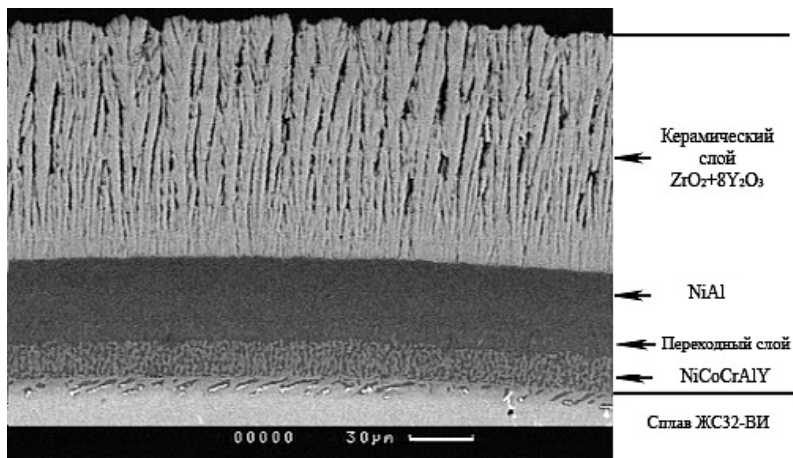
предел прочности σ_B при одноосном растяжении при 1000°С – не менее 630 МПа;



a



б



в

Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения комплексного жаростойкого покрытия (Al)+СДП-2+ВСДП-16 – *a* и конденсационных градиентных термобарьерных покрытий типа ГТБП-1 – *б* и ГТБП-2 – *в*.

относительное удлинение δ при одноосном растяжении при 1000°C – не менее 13%, но не более 22%;

длительная прочность τ до полного разрушения образца при напряжении 270 МПа и температуре 1000°C – не менее 50 ч [14, 15].

Экспериментальные результаты. На гистограммах рис. 2 и 3 приведены результаты испытаний на активное растяжение при 1000°C образцов из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в исходном состоянии без покрытия и с различными типами покрытий. Как видно, нанесение исследуемых защитных покрытий не приводит к изменению кратковременной прочности жаропрочного сплава. Полученные прочностные характеристики для всех испытанных образцов превышают установленные ранее [14, 15] критерии и гарантированные значения свойства жаропрочного сплава ЖС32-ВИ.

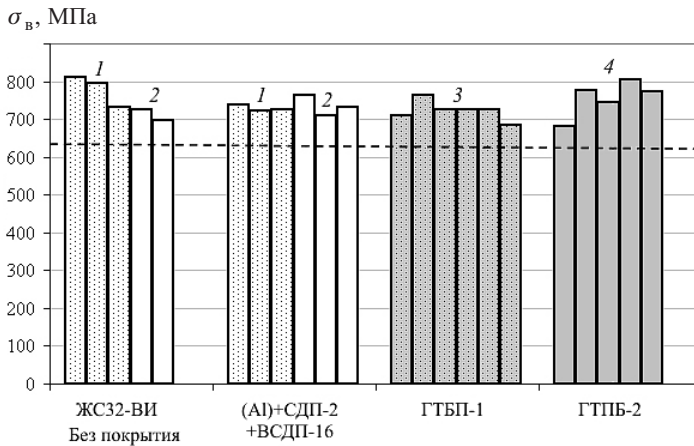


Рис. 2. Прочность на растяжение образцов из сплава ЖС32-ВИ без покрытия и с различными типами покрытий в исходном состоянии: штриховая линия – минимальное допустимое значение предела прочности 630 МПа). (Здесь и на рис. 3, 4, 6–8: 1 – направленная кристаллизация, 100% свежей шихты; 2 – монокристаллическая отливка, 100% свежей шихты; 3 – направленная кристаллизация, 50% первичного возврата + 50% вторичного; 4 – монокристаллическая отливка, 50% первичного возврата + 50% вторичного.)

Значения относительного удлинения образцов с комплексным жаростойким покрытием (Al)+СДП-2+ВСДП-16 и градиентным термобарьерным покрытием первого типа (NiCoCrAlY+Ni(Al,Cr)/ZrO₂-8Y₂O₃) достаточно близки (15...18%). Большой разброс значений (12...20%) получен при испытании образцов без покрытия и с ГТБП-2. Однако средняя величина удлинения для каждой из групп образцов находится выше минимального допустимого значения для сплава ЖС32-ВИ (13%).

Существенного различия в значениях предела прочности и относительного удлинения образцов с разной макроструктурой (монокристаллической или направленно-закристаллизованной) не наблюдалось, так же как не обнаружено влияния использования металла первичного и вторичного возврата.

Длительная прочность образцов из сплава ЖС32-ВИ со всеми типами покрытий выше допустимых минимальных значений (50 ч) при напряжении 270 МПа и температуре 1000°C (рис. 4). Однако среднее значение длительной прочности группы образцов с комплексным жаростойким покрытием состав-

ляет 58 ч 41 мин, что значительно ниже значения, полученного при испытаниях образцов исходного сплава (67 ч 19 мин). В то же время для образцов с градиентными термобарьерными покрытиями достигнуты стабильно большие значения длительной прочности: для ГТБП-1 – не менее 80 ч, для ГТБП-2 – не менее 75 ч. Различие в значениях долговечности образцов с комплексным жаростойким покрытием и с покрытиями ГТБП обусловлено рядом причин. Во-первых, установлено, что в металле образцов с комплексным жаростойким покрытием (Al)+СДП-2+ВСДП-16 размер частиц упрочняющей γ' -фазы (рис. 5,а) больший, чем в металле образцов с ГТБП (рис. 5,б), на момент начала испытаний, что связано с разным температурно-временным режимом окончательной термической обработки. Во-вторых, отрицательное влияние на прочностные характеристики комплексного жаростойкого покрытия может оказывать развитая внутренняя диффузионная зона покрытия, которая, как известно, обладает низкой прочностью и пластичностью [16].

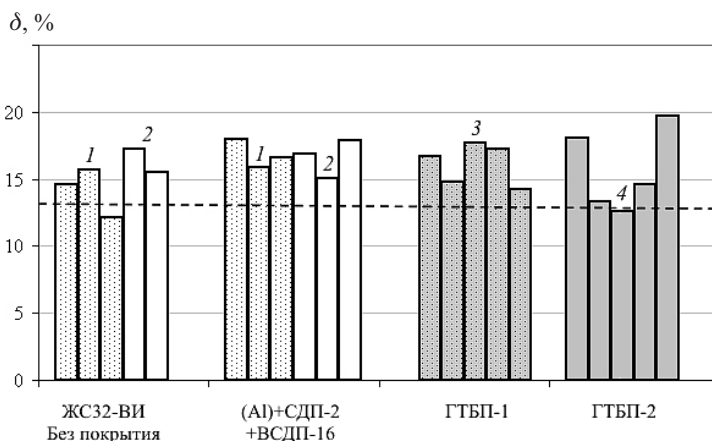


Рис. 3. Относительное удлинение образцов из сплава ЖС32-ВИ без покрытия и с различными типами покрытий в исходном состоянии. (Штриховая линия – минимальное допустимое удлинение 13%).

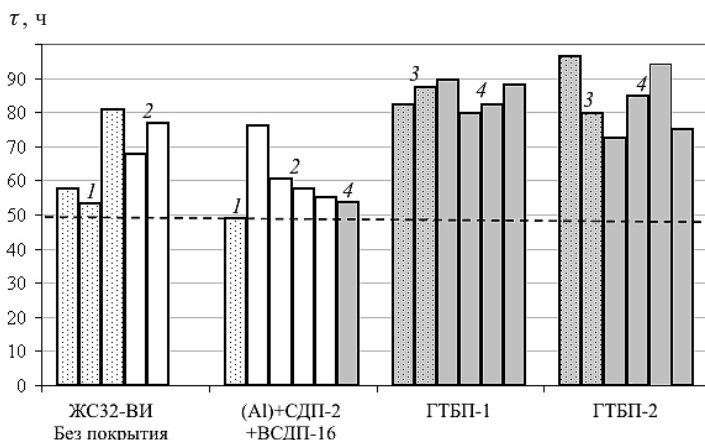


Рис. 4. Длительная прочность образцов из сплава ЖС32-ВИ без покрытия и с различными типами покрытий в исходном состоянии. (Штриховая линия – минимальная временная база 50 ч.)

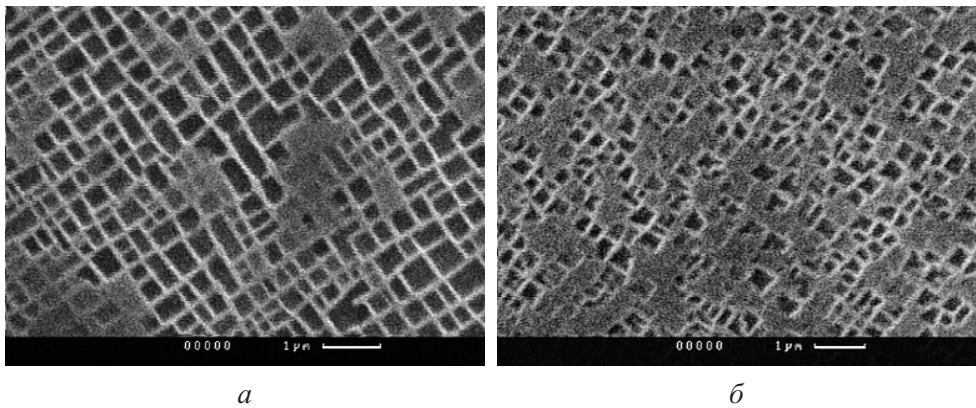


Рис. 5. Различие в $(\gamma - \gamma')$ -микроструктуре сплава ЖС32-ВИ после полного цикла нанесения, включая термическую обработку, комплексного жаростойкого покрытия (Al)+СДП-2+ВСДП-16 (а) и ГТП1 (б) ($\times 10000$).

Характеристики прочности и пластичности образцов из сплава ЖС32-ВИ без покрытия и с различными типами покрытий после изотермической выдержки на воздухе при 1100°C в течение 240 ч представлены на гистограммах рис. 6 и 7 соответственно, длительной прочности – на рис. 8.

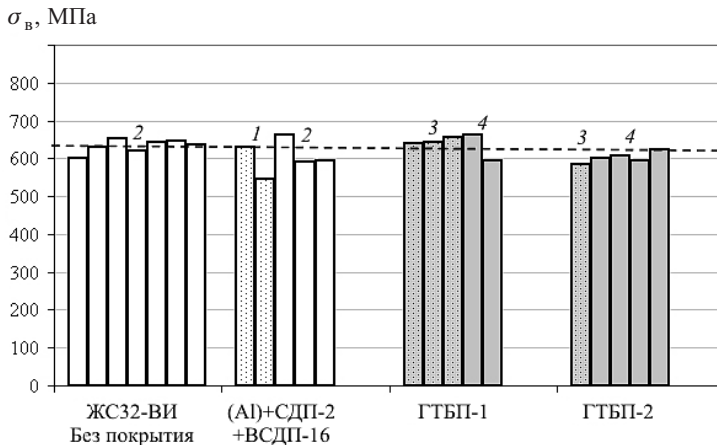


Рис. 6. Прочность при растяжении образцов из сплава ЖС32-ВИ без покрытия и с различными типами покрытий после изотермической выдержки на воздухе при 1100°C в течение 240 ч. (Температура испытаний – 1000°C , штриховая линия – минимальное допустимое значение предела прочности 630 МПа.)

Уровень физико-механических свойств сплава без покрытия и с защитными покрытиями снизился. Предел прочности составляет 90...95% минимально допустимых значений (600...620 МПа) – рис. 6. В то же время относительное удлинение возросло. Для всех групп образцов этот показатель превысил предельное значение для сплава ЖС32-ВИ – 22% (рис. 7). Показатели долговечности также уменьшились до значений в среднем ниже 20 ч. При этом существенной разницы в уровне прочностных характеристик основного металла и образцов с покрытиями не обнаружено. Металлографическое исследование образцов сплава ЖС32-ВИ без и с защитными покрытиями

после изотермической выдержки на воздухе при 1100°С в течение 240 ч показывает существенное изменение микроструктуры, выразившееся в изменении размеров и морфологии частиц упрочняющей γ' -фазы, типа и характера карбидных выделений (рис. 9).

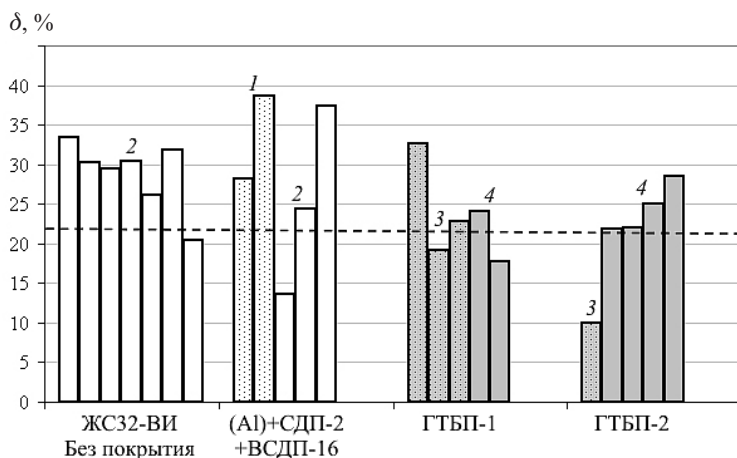


Рис. 7. Относительное удлинение образцов из сплава ЖС32-ВИ без покрытия и с различными типами покрытий после изотермической выдержки на воздухе при 1100°С в течение 240 ч. (Температура испытаний – 1000°С, штриховая линия – максимальное допустимое значение удлинения 22%.)

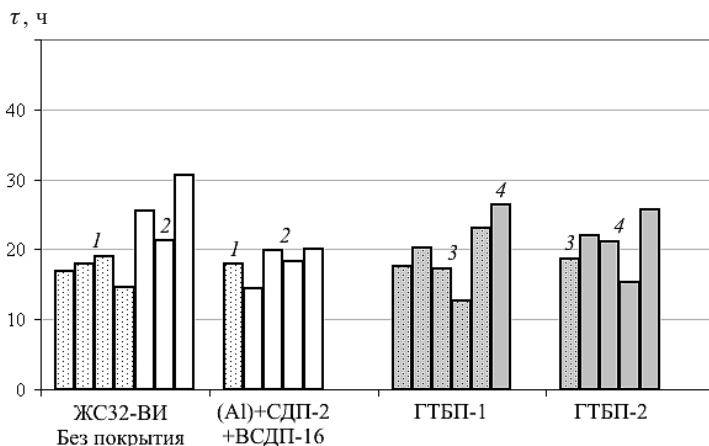


Рис. 8. Длительная прочность образцов из сплава ЖС32-ВИ без покрытия и с различными типами покрытий после изотермической выдержки на воздухе при 1100°С в течение 240 ч. (Температура испытаний – 1000°С, напряжение – 270 МПа.)

Выдержка образцов при 1100°С приводит к коагуляции частиц упрочняющей γ' -фазы, размеры которой изменяются от 0,4...0,5 мкм до 1,5...3 мкм (рис. 9,а,б соответственно) с одновременным превращением правильной кубической формы в овальную или сферическую.

Вследствие протекания высокотемпературной карбидной реакции $MC + \gamma \rightarrow M_6C + \gamma'$ изменяются морфология и объемная доля карбидной фазы. Наряду с карбидами (Ta,Nb)C с ограниченной и шрифтовой морфологией типа

“иероглифов” (рис. 9,б,д) появляются карбиды Me_6C , обогащенные вольфрамом, которые окружены по периметру прослойкой γ' -фазы (рис. 9,з,е). В структуре сплава обнаружено также значительное количество пластинчатых выделений топологически плотноупакованных фаз (ТПУ-фаз) – рис. 9,е.

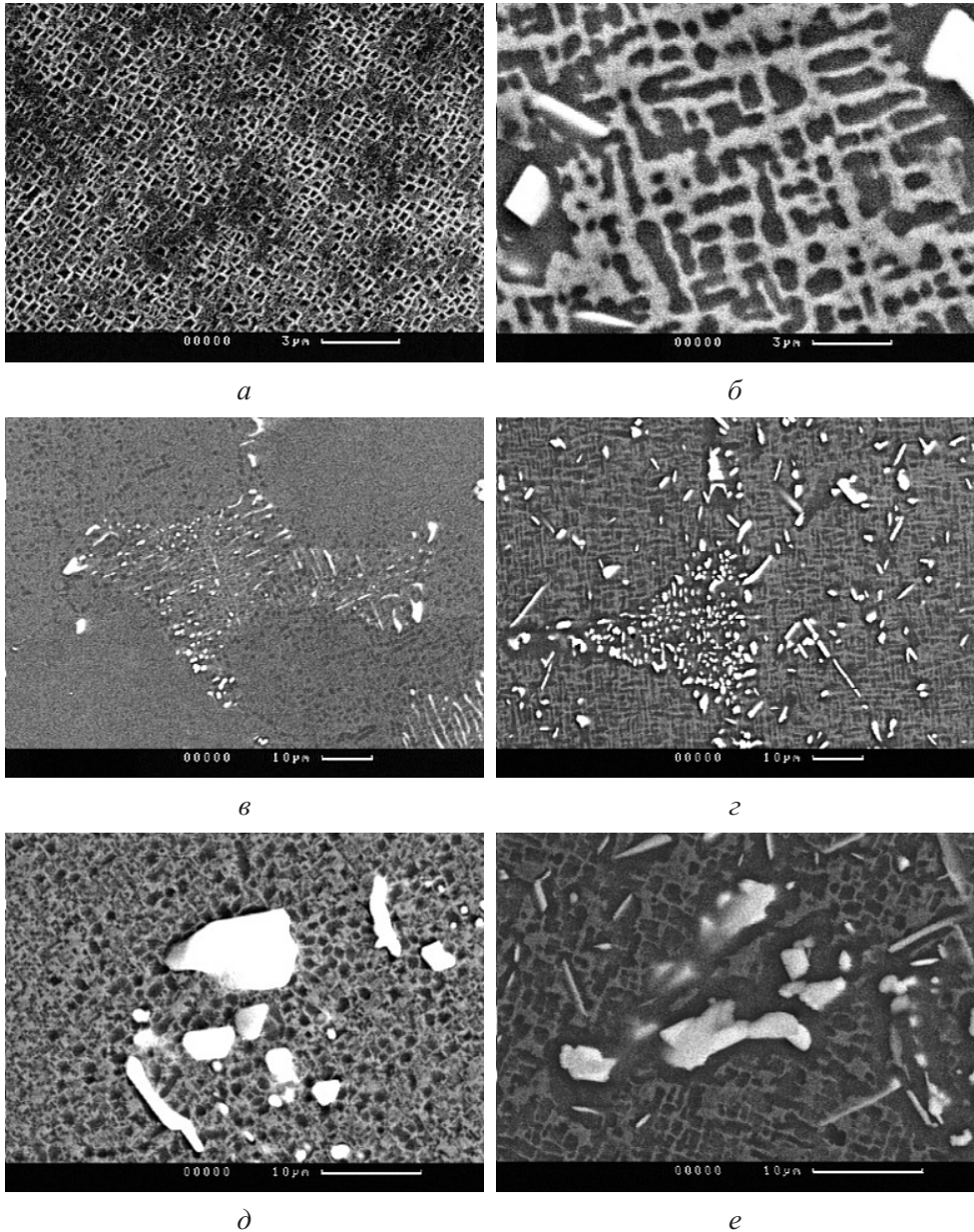


Рис. 9. Укрупнение частиц γ' -фазы (а, б) и изменение морфологии карбидной фазы (в–е) в литом сплаве ЖС32-ВИ (а, в, д) и после отжига при 1100°C в течение 240 ч (б, з, е): а, б – $\times 5000$; в, з – $\times 1000$; д, е – $\times 2500$.

Анализ характера разрушения образцов основного металла без покрытия и с защитными покрытиями показывает, что очагами зарождения микротрещин являются карбидные частицы (MeC и Me_6C) и хрупкие интерметаллидные

ТПУ-фазы. На рис. 10 приведены микроструктура ТПУ- и карбидных фаз, в которых возникают микротрещины, распространяющиеся в жаропрочный сплав.

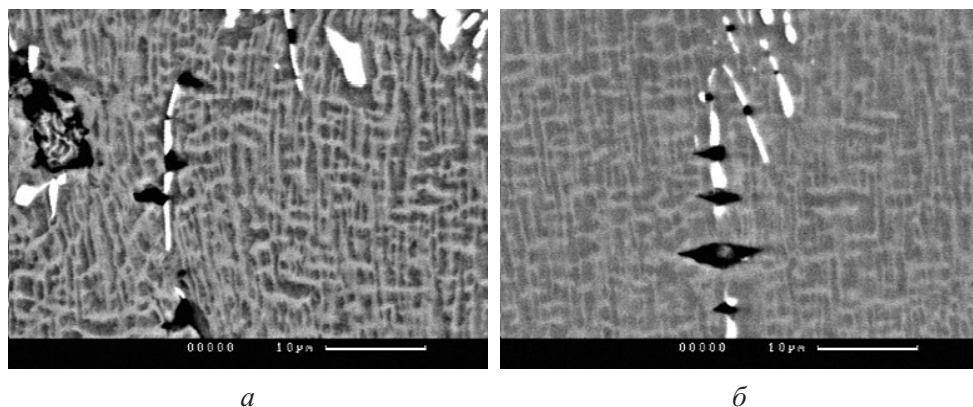


Рис. 10. Зарождение трещин при испытаниях на длительную прочность сплава ЖС32-ВИ без покрытия после изотермической выдержки при 1100°С в течение 240 ч в ТПУ- (а) и карбидной фазе (б) ($\times 2500$).

Механизм разрушения покрытий при испытаниях на растяжение образцов (после изотермической выдержки и без таковой) был как межкристаллитным, так и транскристаллитным. Ввиду того что температура испытаний превышает температуру хрупковязкого перехода исследуемых покрытий (при 1000°С покрытия обладают повышенной пластичностью), их разрушение является конечной стадией разрушения образцов, так как зарождение и распространение магистральной трещины происходит во внутренних объемах образца на хрупких частичках карбидных фаз.

В результате процессов окисления поверхности покрытий на воздухе при 1100°С их микроструктура изменяется, что проявляется в росте пленки окислы Al_2O_3 на поверхности жаростойкого металлического слоя и в диффузионном перераспределении химических элементов между покрытием и жаропрочным сплавом. Детально эти результаты будут рассмотрены отдельно. Можно отметить, что градиентные термобарьерные покрытия обладают более высокой жаростойкостью по сравнению с комплексным диффузионным покрытием благодаря предотвращению периодического скалывания пленки Al_2O_3 (внешний керамический слой удерживает пленку окислы на поверхности металлического жаростойкого подслоя), что замедляет истощение запасов алюминия в покрытии (рис. 11). Об этом свидетельствует, например, одинаковое содержание алюминия (около 19%) в диффузионном комплексном покрытии и в покрытии ГТБП-1 после 240 ч испытаний, в то время как в исходном состоянии содержание алюминия в них составляет 24 и 22% соответственно.

Очевидно, что одним из факторов снижения механических характеристик композиции жаропрочный сплав ЖС32-ВИ – покрытие в процессе изотермической выдержки на воздухе при 1100°С является не отрицательное влияние защитных покрытий, а разупрочнение несущей основы. Поэтому использование жаропрочного сплава ЖС32-ВИ на длительный ресурс при

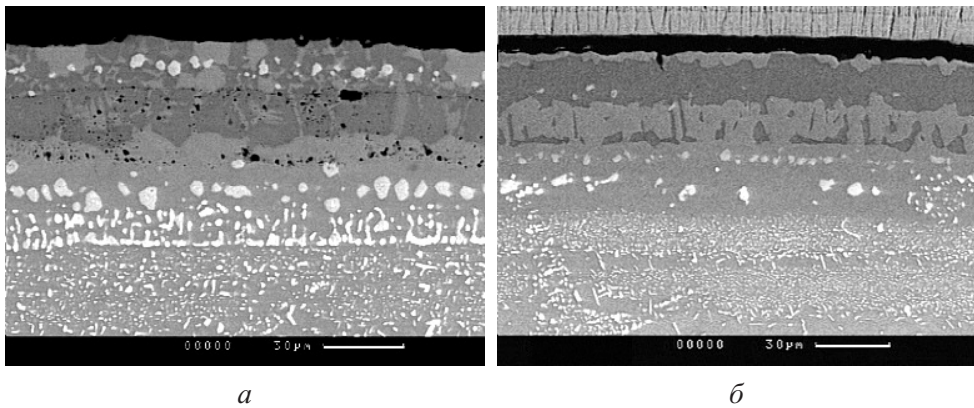


Рис. 11. Микроструктура поперечного сечения комплексного жаростойкого покрытия (Al)+СДП-2+ВСДП-16 и конденсационного ГТБП-1 после изотермической выдержки при 1100°С в течение 240 ч (×500).

температуре 1100°С возможно только для лопаток с эффективной системой охлаждения внутренней полости деталей. В этой связи необходимо отметить, что градиентные термобарьерные покрытия, имеющие внешний низкотеплопроводный керамический слой и термостабильный жаростойкий подслоя с переходными барьерными зонами, должны обеспечить более благоприятные условия эксплуатации турбинных лопаток в первую очередь за счет снижения среднemasсовой температуры стенки охлаждаемой лопатки.

Выводы

1. Нанесение покрытий типа комплексного жаростойкого (Al)+СДП-2+ВСДП-16 и конденсационных типа ГТБП-1 и ГТБП-2, включая термический цикл их осаждения и последующей термообработки, не оказывает негативного воздействия на механические характеристики (длительная и кратковременная прочность, пластичность) жаропрочного сплава ЖС32-ВИ при температуре испытаний 1000°С.

2. Снижение механических характеристик жаропрочного сплава ЖС32-ВИ (практически одинаковое как для образцов с покрытиями, так и без покрытий) после изотермической выдержки на воздухе при 1100°С в течение 240 ч обусловлено в первую очередь структурными изменениями в сплаве, связанными с укрупнением карбидных и выделением пластинчатых ТПУ-фаз в матрице.

3. Требуемый ресурс охлаждаемых лопаток из жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в современных авиационных двигателях может быть обеспечен только благодаря применению термобарьерных покрытий с внешним керамическим слоем, что позволяет снизить среднюю температуру металла стенки лопатки. Рекомендуется использовать градиентные термобарьерные покрытия типа $\text{NiCoCrAlY} + \text{Ni}(\text{Al}, \text{Cr})/\text{ZrO}_2 - 8\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{NiCoCrAlY} + \text{M}_x\text{C}_y + \text{NiAl}/\text{ZrO}_2 - 8\text{Y}_2\text{O}_3$.

Резюме

Розглянуто вплив дифузійних жаростійких і конденсаційних градієнтних термобар'єрних покриттів, що використовуються для захисту робочих лопа-

ток турбіни ГТД, на механічні властивості (тривала та нетривала міцність, пластичність при температурі випробувань 1000°C) зразків із жароміцного сплаву ЖС32-ВІ. Вивчено вплив ізотермічного відпалу на повітрі при температурі 1100°C протягом 240 годин на механічні характеристики зразків без покриття та із захисними покриттями. Відмічено доцільність використання градієнтних термобар'єрних покриттів, що мають зовнішній низькотеплопровідний керамічний шар та термостабільний жаростійкий металевий шар, які забезпечують зниження температури металу стінок охолоджуваних лопаток із жароміцного сплаву ЖС32-ВІ з метою досягнення потрібного ресурсу.

1. *Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под общ. ред. В. А. Скибина, В. И. Солонина.* – М.: ЦИАМ, 2004. – 424 с.
2. *Каблов Е., Мубояджан С.* Защитные покрытия лопаток турбин перспективных ГТД // Газотурбинные технологии. – 2001. – № 3. – С. 30 – 32.
3. *Лесников В. П., Кузнецов В. П., Иноземцев А. А., Коряковцев А. С.* Материалы и защитные покрытия турбинных лопаток – основа эффективности ГТД // Там же. – 2005. – № 3. – С. 36 – 38.
4. *Фролов В. А., Поклад В. А., Викторенков Д. В.* Технологии нанесения термозащитных покрытий методами газотермического напыления (обзор) // Технология машиностроения. – 2005. – № 2. – С. 47 – 51.
5. *Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / Под ред. Б. Е. Патона.* – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.
6. *Tamarin Y.* Protective Coatings for Turbine Blades. – ASM Int., 2002. – 247 p.
7. *Мовчан Б. А., Малащенко И. С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев: Наук. думка, 1983. – 230 с.
8. *Качанов Е. Б., Тamarin Ю. А.* Влияние защитных покрытий на длительную прочность жаропрочных сплавов // Технология легких сплавов. – 2007. – № 1. – С. 140 – 148.
9. *Кириллов Е. А., Зязев В. Л., Гуляев Р. И. и др.* Жаростойкость, микроструктура и фазовый состав плазменных покрытий системы Cr–Ni–Al на сплаве ЖС-32 // Свар. пр-во. – 2000. – № 2. – С. 18 – 22.
10. *Анікін Ю. П., Максютa І. І., Добкіна Ю. Г. та ін.* Вплив вакуумних переплавів на структурні перетворення та властивості жароміцного сплаву ЧС70-ВІ // Металознавство та обробка металів. – 2001. – № 3. – С. 64 – 68.
11. *Лесников В. П., Кузнецов В. П.* Технология получения газоциркуляционных защитных покрытий // Газотурбинные технологии. – 2000. – № 5-6. – С. 36 – 38.
12. *Movchan B. A. and Yakovchuk K. Yu.* Graded thermal barrier coatings, deposited by EB-PVD // Surf. Coating Techn. – 2004. – **188-189**. – P. 85 – 92.
13. *Яковчук К. Ю., Рудой Ю. Э.* Одностадийная электронно-лучевая технология осаждения термобарьерных покрытий // Сов. электрометаллургия. – 2003. – № 2. – С. 10 – 16.

14. *Каблов Е., Кишкин С.* Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 1-2. – С. 34 – 37.
15. *Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Качанов Е. Б. и др.* Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
16. *Коломыцев П. Т.* Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов. – М.: Металлургия, 1991. – 237 с.

Поступила 09. 12. 2008