

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ ЛЕГИРОВАНИЯ Co–Mo–Cr–Si–W

А.М. Костин, В.А. Мартыненко

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова. 54000, г. Николаев, просп. Центральный, 3.
E-mail: volodymyr.martynenko@nuos.edu.ua

Целью работы являлось исследование структуры и свойств сплава системы легирования Co–Mo–Cr–Si–W применительно к использованию в качестве износостойкого материала для упрочнения контактных поверхностей рабочих лопаток судовых газотурбинных двигателей. В ходе исследований использовались методы высокотемпературного дифференциального термического анализа, электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного анализов, выполнялись замеры твердости, микротвердости фазовых составляющих, исследовалась адгезионная активность опытных сплавов методом лежачей капли. Показано, что экспериментальные составы имеют сбалансированную структуру на основе легированного молибденом и хромом твердого раствора кобальта, с упрочнением комплексными силицидами, боридами и карбидами, обладают приемлемыми механическими свойствами, имеют температуру плавления ниже температуры необратимого разупрочнения жаропрочных никелевых сплавов и характеризуются высокой адгезионной активностью, что создает благоприятные предпосылки к их использованию в судовом газотурбостроении. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, износостойкие материалы, структура, фазовый состав, твердость, температура плавления, адгезионная активность

Важной проблемой судового машиностроения является необходимость повышения эффективности, надежности и ресурса работы газотурбинных двигателей. В первую очередь эти параметры определяются интенсивностью изнашивания контактных поверхностей рабочих лопаток, которые находятся в наиболее тяжелых условиях эксплуатации. В этой связи, материалы и технологии упрочнения контактных поверхностей требуют разработки новых прогрессивных решений.

В настоящее время существует достаточно широкий выбор износостойких материалов, которые можно нанести на контактные поверхности с расплавлением либо без расплавления основного материала [1]. В этом случае, решающими критериями технологичности износостойких материалов являются их температура плавления и возможные способы нанесения. В условиях конкретного производства указанные критерии могут оказывать взаимоисключающее действие, что существенно осложняет выбор оптимальных составов и технологий [2].

В судовом газотурбостроении для изготовления турбинных рабочих лопаток используют жаропрочные никелевые сплавы типа ЧС88У-ВИ, ЧС70У-ВИ и др. Эти сплавы упрочняются дисперсными выделениями γ' -фазы $Ni_3(Al, Ti)$, которая имеет склонность к коагуляции в процессе контактного взаимодействия при высоких температурах, что создает благоприятные условия для увеличения интенсивности изнашивания, в том числе и за счет интенсификации процессов окис-

ления поверхностного слоя, который обедняется легирующими элементами.

Эти сплавы практически не свариваются традиционными способами сварки плавлением, поэтому температура их нагрева при нанесении износостойкого материала не должна превышать 1210...1220 °С. В противном случае наблюдается необратимое снижение прочности основного металла, вызванное деградацией γ' -фазы и образованием трещин в месте наплавки [1]. В этой связи сплав, который упрочняет контактную поверхность, должен при нанесении в жидком состоянии иметь температуру плавления не выше 1210...1220 °С. При более высокой собственной температуре плавления его соединение с основой можно выполнить, например, при помощи высокотемпературной пайки. Однако конструкция лопаток турбин не всегда позволяет использовать этот эффективный метод.

Таким образом, износостойкие материалы для судовых газовых турбин удобно классифицировать на две группы по температуре плавления: ниже и выше 1210...1220 °С.

Крайне сложной проблемой является разработка сплавов, которые относятся к первой группе, имеют необходимый уровень износостойкости при рабочих температурах (до 900 °С) и выдерживают кратковременные термические нагрузки при температурных «импульсах» до 1150 °С, что является близким к условиям растворения γ' -фазы в основном металле.

К известным сплавам первой группы относится, например, композиция КБНХЛ-2, кото-

рая имеет температуру плавления на уровне 1070...1090 °С, что не дает сплаву возможности выдерживать кратковременный нагрев до температур 1150 °С [3].

Все остальные известные сплавы на никелевой и кобальтовой основе можно отнести ко второй группе, например, сплавы ВЖЛ-2, ВКНА-2М [4], ВЗК-р [5], Stellite 12 [6], ХЗОН50Ю5Т2 [7], Х25Н10В8 [4], ХТН-61 [8], ХТН-62 [9], Tribaloy Т-800, Т 400, Т 401 [10] и др. Перечисленные сплавы имеют температуру плавления выше 1220 °С, что крайне усложняет их использование при нанесении на контактные поверхности рабочих лопаток судовых газотурбинных двигателей способом наплавки.

Основным технологическим процессом, который используется для наплавки износостойких материалов на предприятии ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», является метод наплавки ацетилено-кислородным пламенем без расплавления основного металла. Для повышения адгезионной активности процесса используют дополнительное флюсование поверхности флюсом ПВ-200. Процесс наплавки сопровождается незначительным растворением основного металла на глубину до 0,1 мм, что гарантирует формирование общей переходной зоны, которая отвечает за прочность соединения. Таким образом, физико-химические и металлургические процессы, которые сопровождают процесс наплавки имеют много общего с процессом пайки. В этом случае, адгезионная активность наплавочных материалов имеет исключительно важное значение.

В этой связи, целью нашей работы являлась разработка жаропрочного материала с необходимым уровнем износостойкости при рабочих температурах (до 900 °С), с температурой плавления ниже 1210...1220 °С, который имел бы удовлетворительную адгезионную активность по отношению к судовым жаропрочным никелевым сплавам и мог выдерживать температурные и динамические условия их эксплуатации, что является актуальной проблемой.

В Национальном университете кораблестроения, совместно с ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», разработаны перспективные износостойкие жаропрочные материалы КМХ и КМХС, которые удовлетворяют перечисленным требованиям [2].

Сплавы КМХ и КМХС разработаны на основе классической системы Co–Mo–Cr–Si с дополнительным легированием бором и карбидом хрома [2]. Матрица сплавов представляет собой легированный молибденом и хромом твердый раствор кобальта (β -модификация), который хорошо выдерживает контактные и термические нагрузки до температур 1000 °С включительно. Совместное введение кремния и бора позволяет на стадии плавления снизить температуру сплавов до необходимого уровня и одновременно существенно повысить их адгезионную активность. После кристаллизации расплавов бор и кремний активно формирует равномерно распределенную, термодинамически устойчивую, высокодисперсную упрочняющую фазу, которая состоит из комплексных силицидов и боридов (CoB, Mo₂B, MoSi, CoSi), что придает сплавам необходимый уровень износостойкости. Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием дифрактометра ДРОН-3. Дополнительное присутствие карбида хрома (Cr₂C₆) в сплаве КМХС несколько снижает температуру его плавления относительно сплава КМХ и стабилизирует структуру и свойства.

Опытные сплавы выплавлялись индукционной плавкой в вакууме порядка 10⁻² Па с последующим отжигом при температуре 1100 °С в течение 1 ч. Характерная электронная структура сплавов показана на рис. 1. Оба сплава демонстрируют регулярную двухфазную структуру, плотность и однородность которой увеличивается при переходе от сплава КМХ к сплаву КМХС. Твердость сплава КМХ составляет порядка HV10 – 710...715, сплава КМХС — HV10 – 735...740. Средняя микротвердость $H_{\mu 50}$ фазовых составляющих сплава КМХ составляет 4771 МПа (рис. 1, область 1) и 2365 МПа (область 2), а для сплава КМХС, соответственно, 6661 МПа (область 3) и 3213 МПа (область 4).

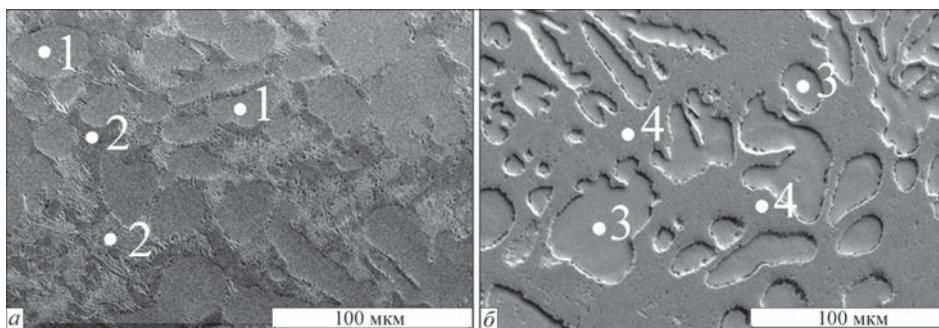


Рис. 1. Электронная структура сплавов КМХ (а) и КМХС (б) (описание 1–4 см. в тексте)

Концентрация легирующих элементов в фазовых составляющих опытных сплавов в соответствии с рис. 1

Номер области	Легирующий элемент				
	Co	Mo	Cr	Si	Ni
1	$\frac{50,78...46,03}{47,62 (48,41)}$	$\frac{33,60...26,37}{31,3 (29,99)}$	$\frac{16,60...12,25}{13,83 (14,43)}$	$\frac{7,75...6,25}{7,24 (7,00)}$	-
2	$\frac{68,25...63,73}{67,0 (65,99)}$	$\frac{8,37...4,55}{5,49 (6,46)}$	$\frac{26,11...24,98}{25,69 (25,55)}$	$\frac{2,11...1,52}{1,81 (1,82)}$	-
3	$\frac{46,06...45,33}{45,78 (45,70)}$	$\frac{32,33...29,79}{30,70 (31,01)}$	$\frac{14,01...12,22}{13,24 (13,12)}$	$\frac{8,78...8,55}{8,70 (8,67)}$	$\frac{1,81...1,45}{1,58 (1,63)}$
4	$\frac{59,06...56,41}{57,7 (57,74)}$	$\frac{9,15...11,96}{10,61 (10,56)}$	$\frac{26,38...25,67}{26,18 (26,03)}$	$\frac{2,98...2,64}{2,81 (2,81)}$	$\frac{3,06...2,35}{2,71 (2,72)}$

Примечание. Числитель — max и min значение, мас. %, знаменатель — среднее значение, мас. % (ат. %).

Распределение концентраций легирующих элементов в фазовых составляющих опытных сплавов определяли с помощью растрового электронного микроскопа-микроанализатора РЭММА 102-02. Результаты приведены в таблице. Анализ полученных результатов распределения концентрации легирующих элементов в фазовых составляющих показал, что основа сплавов на базе кобальта, до 67 мас. % для сплава КМХ и 59 мас. % для сплава КМХС, дополнительно содержит от 4 до 11 % молибдена и от 25 до 26 % хрома, с незначительным легированием кремнием до 2,5 мас. %. Упрочняющая фаза, напротив, одновременно со снижением базового уровня легирования кобальтом, до 50 мас. %, и хромом, до 16 мас. %, содер-

жит повышенную концентрацию молибдена, до 33 мас. %, и кремния, до 9 мас. %, что способствует образованию комплексно легированной упрочняющей фазы (CoB, Mo₂B, MoSi, CoSi). Основа сплавов и упрочняющие фазы содержат в различном соотношении одни и те же, входящие в сплав химические элементы, что обеспечивает их хорошую структурную совместимость и плавность изменения физических свойств при переходе через границу раздела. Концентрацию бора и углерода в работе не определяли в связи с ограниченными возможностями используемого оборудования.

Температуру плавления сплавов определяли методом высокотемпературного дифференциального термического анализа. Характерные

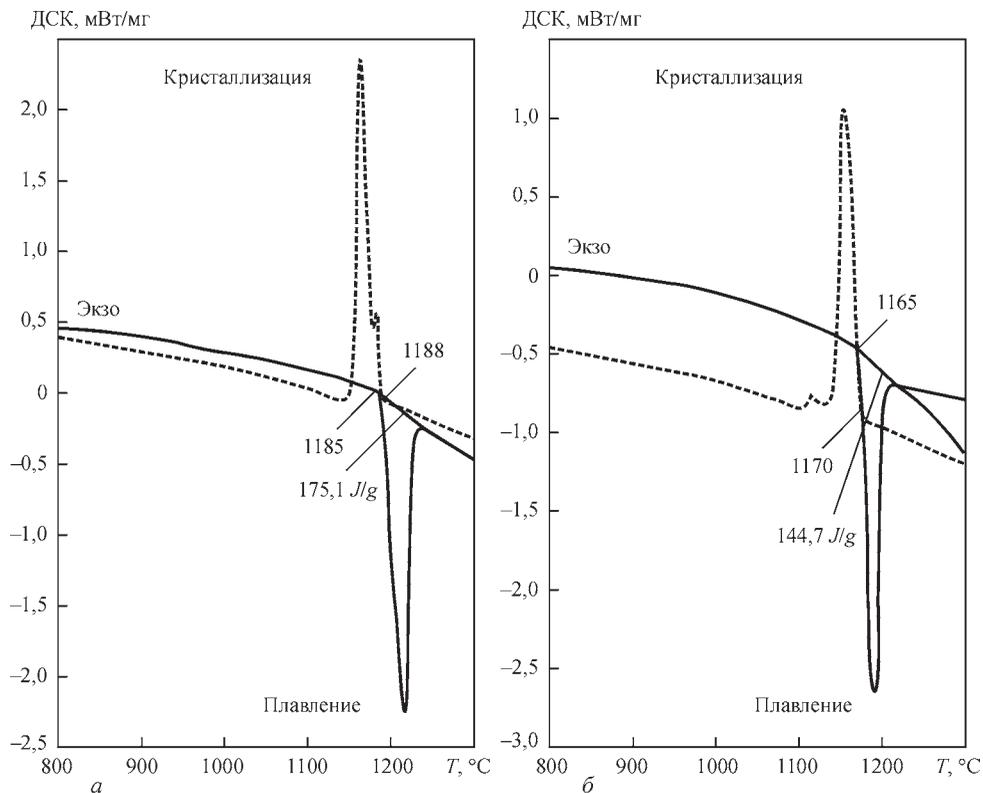


Рис. 2. Дифференциальная сканирующая калориметрия образцов сплавов КМХ (а) и КМХС (б)

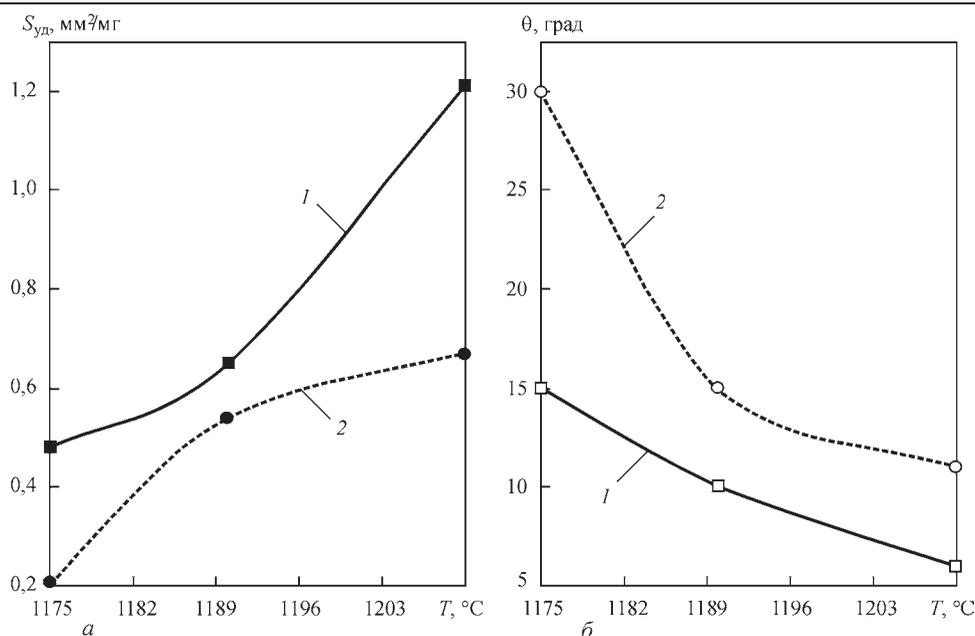


Рис. 3. Зависимость удельной площади растекания $S_{уд}$ (а) и краевых углов смачивания θ (б) сплавов КМХС (1) и КМХ (2) от температуры

термограммы плавления и кристаллизации сплавов КМХ и КМХС приведены на рис. 2. Данные термического анализа (ДСК) свидетельствуют о том, что при соблюдении оптимального соотношения в сплавах кремния и бора, сплавы КМХ и КМХС имеют только один термический эффект на кривых нагрева и охлаждения. Указанный эффект определяет температуру солидус для сплава КМХ на уровне 1185...1190 и 1165...1170 °С для сплава КМХС. При отклонении от рекомендованного соотношения стабильность фазового состава нарушается, возникает возможность протекания фазовой реакции с образованием неравновесных фаз, в результате чего на термических кривых появляются дополнительные эффекты, что приводит к повышению либо понижению температуры плавления сплавов и образованию расширенного интервала кристаллизации, что является нежелательным.

Адгезионную активность сплавов КМХ и КМХС исследовали методом лежащей капли при расплавлении в вакууме порядка 10^{-2} Па на подложке из стандартного жаропрочного никелевого

сплава ВЖ 98. Время выдержки при температурах от 1175 до 1210 °С составляло 3 мин. Замеры удельной площади растекания и краевых углов смачивания для указанных условий эксперимента показаны на рис. 3. Характерная макроструктура зоны взаимодействия сплавов КМХ и КМХС с жаропрочным сплавом ВЖ-98 показана на рис. 4.

Анализ полученных результатов показал, что при температурах нагрева 1175...1185 °С оба сплава имеют характеристики смачивания и растекания недостаточно стабильные, разброс измеряемых значений составляет более 15 %. Краевые углы смачивания превышают 12° для сплава КМХС и 20° для сплава КМХ, что является недостаточным с точки зрения технологичности.

Начиная с температуры 1190 °С, оба сплава демонстрируют высокую адгезионную активность в заданном рабочем температурном интервале наплавки (1190...1210 °С). Наиболее стабильные, установившиеся характеристики смачивания и растекания для обоих опытных сплавов фиксируются в температурном интервале 1190...1195 °С. Краевые углы смачивания находятся в пределах

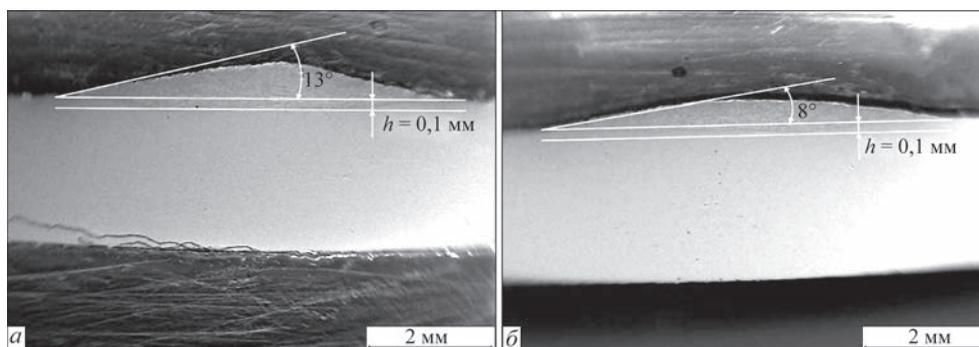


Рис. 4. Характерная макроструктура зоны взаимодействия сплавов КМХ (а) и КМХС (б) со сплавом ВЖ 98 ($T = 1210$ °С)

13...15° для сплава КМХ и 8...10° для сплава КМХС. Удельные площади растекания превышают 0,5 мм²/мг для обоих сплавов, что является более чем достаточным с точки зрения технологичности и создает благоприятные предпосылки к их промышленному использованию. Во всем температурном интервале наблюдается хорошая адгезия с материалом подложки без образования хрупких интерметаллидных составляющих. При этом глубина растворения остается минимальной вплоть до температуры 1210 °С и не превышает 0,1 мм (см. рис. 4), что гарантирует сохранение свойств наплавляемого материала и минимизирует его влияние на основной металл. Кроме того, температура плавления обоих сплавов превышает критическую температуру нагрева лопаток турбин во время возможных кратковременных рабочих забросов до 1150 °С, и не превышает предельно допустимую кратковременную температуру нагрева жаропрочных никелевых сплавов типа ЧС88У-ВИ (1210...1220°С), что является обязательным требованием к свойствам новых адгезионно-активных наплавочных материалов.

Выводы

1. Структура сплавов КМХ и КМХС представляет собой легированный молибденом и хромом твердый раствор кобальта (β -модификация) с упрочнением комплексными силицидами и боридами (CoB, Mo₂B, MoSi, CoSi), сплав КМХС дополнительно содержит карбид хрома (Cr₂C₆).

2. Температура плавления, определенная методом дифференциального термического анализа, для сплава КМХ составляет 1185...1190 °С, а для сплава КМХС — 1165...1170 °С.

3. Сплавы КМХ и КМХС характеризуются высокой адгезионной активностью по отношению к жаропрочному сплаву ВЖ 98. Установившиеся характеристики смачивания и растекания фиксируются при температурах выше 1190...1195 °С. Для сплава КМХ краевые углы смачивания составляют 13...15°, КМХС — 8...10°. Удельные площади растекания превышают 0,5 мм²/мг.

Список литературы

1. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Алешина Р.Ш. (2016) Исследование трибологических характеристик материалов, применяемых для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин ГТД. *Авиационные материалы и технологии*, **S1** (43), 24–30.
2. Костин А.М., Мартыненко В.А., Малый А.Б., Квасницкий В.В. (2017) Адгезионно-активные жаропрочные износостойкие наплавочные материалы КМХ и КМХС. *Автоматическая сварка*, **1**, 68–72.

3. Алтухов А.А., Гаврилов О.В. (2004) Применение жаростойкого материала КБНХЛ-2 для наплавки деталей газовых турбин. *Сварщик*, **2**, 22–23.
4. Фарафонов Д.П., Базылева О.А., Рогалев А.М. (2016) Сплавы для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток ГТД. *Труды ВИАМ*, **9** (45), 53–60.
5. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Андрейченко Н.В. (2009) Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей. *Вестник двигателестроения*, **2**, 123–125.
6. Сом А.И., Ищенко В.Ю., Малый А.Б. (2004) Плазменно-порошковая наплавка стеллитом фиксаторов труб. *Сварщик*, **2**, 18–19.
7. Костин А.М., Мартыненко В.А., Бутенко А.Ю. (2014) Сравнительная высокотемпературная износостойкость сплава ЧС88УВИ и стеллита Х30Н50Ю5Т2. *Збірник наук. праць НУК*, **4**(454), сс. 55–59.
8. Дмитриева Г.П. и др. (2015) Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия. *Металлофизика и новейшие технологии*, **37**, **7**, 973–986.
9. Черепова Т.С. и др. (2014) Износостойкий сплав для защиты контактных поверхностей рабочих лопаток авиационных двигателей від окислення при високих температурах. *Наука та інновації*, **10**, **4**, 22–31.
10. Yao M.X., Wu J.B.C., Liu R. (2005) Microstructural characteristics and corrosion resistance in molten Zn–Al bath of Co–Mo–Cr–Si alloys. *Materials Science and Engineering A*, **4**, 299–305.

References

1. Farafonov, D.P., Migunov, V.P., Alyoshina, R.Sh. (2016) Study of tribological characteristics of materials used for strengthening of flange platforms of GTE blades. *Aviats. Mater. and Technol.*, **S1**(43), 24–30 [in Russian].
2. Kostin, A.M., Martynenko, V.A., Maly, A.B. et al. (2017) Adhesion-active high-temperature wear-resistant surfacing consumables КМКХ and КМКХС. *The Paton Welding J.*, **1**, 58–61.
3. Altukhov, A.A., Gavrilo, O.V. (2004) Application of high-temperature material КБНХЛ-2 for surfacing of gas turbine parts. *Svarshchik*, **2**, 22–23 [in Russian].
4. Farafonov, D.P., Bazyleva, O.A., Rogalev, A.M. (2016) Alloys for strengthening of flange platforms of GTE blades. *Trudy VIAM*, **9**(45), 53–60 [in Russian].
5. Pejtchev, G.I., Zamkovej, V.E., Andrejchenko, N.V. (2009) Comparative characteristics of wear-resistant alloys for strengthening of flange platforms of gas turbine engine blades. *Vestnik Dvigatelistroyeniya*, **2**, 123–125 [in Russian].
6. Som, A.I., Ishchenko, V.Yu., Maly, A.B. (2004) Plasma-powder surfacing with stellite of pipe clamps. *Svarshchik*, **2**, 18–19 [in Russian].
7. Kostin, A.M., Martynenko, V.A., Butenko, A.Yu. (2014) Comparative high-temperature wear-resistance of alloy ChS88UVI and stellite Kh30N50Yu5T2. *Zbirnyk Nauk. Prats NUK*, **4**(454), 55–59. Mykolaiv [in Russian].
8. Dmitrieva, G.P. et al. (2015) Structure and properties of wear-resistant alloy based on cobalt with niobium carbide. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*. **37**(7), 973–986 [in Russian].
9. Cherepova, T.S. et al. (2014) Wear-resistant alloy for protection of contact surfaces of aircraft engine blades from oxidation at high temperatures. *Nauka ta Innovatsii*, **10**(4), 22–31 [in Ukrainian].
10. Yao, M.X., Wu, J.B.C., Liu, R. (2005) Microstructural characteristics and corrosion resistance in molten Zn–Al bath of Co–Mo–Cr–Si alloys. *Mater. Sci. & Engin. A*, **4**, 299–305.

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗНОСОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ Co–Mo–Cr–Si–B

О.М. Костін, В.О. Мартиненко

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв, просп. Центральний, 3.
E-mail: volodymyr.martynenko@nuos.edu.ua

Метою роботи було дослідження структури та властивостей сплаву системи легування Co–Mo–Cr–Si–B стосовно до використання в якості зносостійкого матеріалу для зміцнення контактних поверхонь робочих лопаток судових газотурбінних двигунів. В ході досліджень використовувались методи високотемпературного диференціального термічного аналізу, електронної мікроскопії, мікрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного аналізу, виконувались заміри твердості, мікротвердості фазових складових, досліджувалась адгезійна активність дослідних сплавів методом лежачої краплі. Показано, що експериментальні склади мають збалансовану структуру на основі легованого молібденом та хромом твердого розчину кобальту, із зміцненням комплексними силіцидами, боридами та карбідами, мають температуру плавлення нижче температури незворотної деградації жароміцних нікелевих сплавів та мають високу адгезійну активність, що створює сприятливі передумови до їх використання в судовому газотурбобудуванні. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, зносостійкі матеріали, структура, фазовий склад, твердість, температура плавлення, адгезійна активність

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT MATERIALS BASED ON Co-Mo-Cr-Si-B SYSTEM

A.M. Kostin, V.A. Martynenko

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 9 Heroev Ukrainy Ave., 54025, Mykolaiv, Ukraine.
E-mail: welding@nuos.edu.ua

The aim of the work was to study the structure and properties of the alloy of the Co-Mo-Cr-Si-B alloying system as-applied to its use as a wear-resistant material for hardening contact surfaces of working blades of ship gas turbine engines. The studies used the methods of high-temperature differential thermal analysis, electron microscopy, X-ray micro and X-ray structural analyzes, the hardness and microhardness of phase components were measured, the adhesion activity of experimental alloys was investigated using the sessile drop method. It is shown that experimental compositions have a balanced structure based on a solid solution of cobalt alloyed with molybdenum and chromium, with hardening by complex silicides, borides and carbides, possess acceptable mechanical properties, have a melting point below the temperature of irreversible softening of high-temperature nickel alloys and are characterized by high adhesive activity, which creates favorable prerequisites for their use in ship gas turbine construction. 10 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: high-temperature nickel alloys, wear-resistant materials, structure, phase composition, hardness, melting point, adhesive activity

Поступила в редакцію 04.06.2019

Всеукраїнська конференція

ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Присвячується 60-річчю кафедри зварювального виробництва НУК

17–19 вересня 2019 р.

Миколаїв, Коблеве

Тематичні напрямки роботи конференції:

- Технології, матеріали та устаткування зварювання плавленням
- Зварювання у твердому стані
- Паяння та споріднені процеси
- Інженерія поверхні
- Нові конструкційні матеріали та покриття
- Міцність зварних та спаяних з'єднань
- Комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану зварних і спаяних з'єднань

Оргкомітет:

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова
Вчений секретар оргкомітету — Костін Олександр Михайлович
тел. +38(050) 982-97-67; E-mail: koctin.weld@gmail.com