

УДК 621.791.9:621.438  
А 64

## АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК ЛОПАТОК ТУРБИН (Обзор)

А. Ю. Бутенко, асп.<sup>1</sup>;  
А. М. Костин, канд. техн. наук, доц.<sup>1</sup>;  
А. Б. Малый, инж.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения, г. Николаев  
<sup>2</sup>ГП НПКГ «Зоря–Машпроект», г. Николаев

**Аннотация.** Выполнен анализ состава и свойств существующих высокотемпературных жаро- и износостойких материалов, которые применяются для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** рабочая лопатка, бандажная полка, упрочнение, ацетиленокислородная наплавка, горячая твердость, износостойкость.

**Анотація.** Виконано аналіз складу і властивостей існуючих високотемпературних жаро- та зносостійких матеріалів, які використовуються для зміцнення бандажних полиць робочих лопаток газотурбінних двигунів.

**Ключові слова:** робоча лопатка, бандажна полиця, зміцнення, ацетилено-кисневе наплавлення, гаряча твердість, зносостійкість.

**Abstract.** The analysis of the composition and properties of the existing high-temperature heat-resistant and wear-resistant materials has been carried out. These materials are binding for the binding shelves strengthening of turbine blades of the gas turbine engines.

**Keywords:** blade, binding shelf, strengthening, acetylene-oxygen overlaying, wear-resistance.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одной из проблем энергомашиностроения и судового машиностроения является повышение эффективности, надежности и ресурса газотурбинных двигателей. Данные параметры определяются, в первую очередь, износом контактных поверхностей рабочих лопаток, которые находятся в наиболее тяжелых условиях эксплуатации.

В настоящее время существует достаточно широкий выбор износостойких составов, которые можно нанести на контактные поверхности с расплавлением или без расплавления основного материала. Основными критериями при оценке технологичности и выборе износостойких материалов являются температура их плавления и возможные способы нанесения на изделие.

Проблема состоит в том, что указанные факторы на практике могут оказывать взаимоисключающее действие, что существенно затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным выбор оптимального состава и способа нанесения, которые удовлетворяли бы конкретным особенностям производства.

В частности, в настоящее время на предприятиях газотурбостроения остро стоит проблема выбора материала и технологии его нанесения на бандажные полки рабочих лопаток турбин наплавкой без расплавления основного металла. В этой связи необходимо выполнить комплексный анализ имеющейся информации.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

На предприятиях, изготавливающих газотурбинные двигатели, для придания контактным поверхностям рабочих лопаток необходимых свойств, а именно горячей твердости и износостойкости, применяют различные составы и способы упрочнения. Например, известен метод ручной аргонодуговой наплавки литыми прутками стеллита на основе кобальта марки ВЗК-Р диаметром 2–3 мм. Данный стеллит характеризуется высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью [13, 25].

Для упрочнения тел вращения широко применяют плазменно-порошковую наплавку, которую осуществляют высокотемпературной сжатой дугой, получаемой в плазмотроне с неплавящимся электродом. Диапазон регулирования силы тока основной дуги 25...150 А. Присадочный материал — порошок стеллита марки Stellite 12 [25].

Завод «Заря», в частности, начиная с 1991 г. для аргонодуговой наплавки применял пластифицированную смесь жаропрочного материала КБНХЛ-2 (разработчик — Институт материаловедения НАН Украины), состоящего из порошков никеля, хрома, кобальта, легированный карбидом и боридом хрома. Эту смесь использовали для упрочнения торцов и бандажных полок рабочих лопаток методом припекания в вакуумной печи. Однако опытные работы

показали, что припекание материала КБНХЛ-2 на необходимые поверхности нецелесообразно вследствие низкой воспроизводимости процесса: неспекания материала КБНХЛ-2 с торцами рабочих лопаток до 30% в одной партии по периметру и толщине торца; различной степени формообразования материала КБНХЛ-2 на торце рабочей лопатки (до 25% в одной партии); сложности механической обработки, а также сколов материала КБНХЛ-2 до 20% в партии; затекания материала КБНХЛ-2 по периметру на пере лопатки на расстоянии 1...5 мм от торца [1]. В связи с этим в последние годы использовали ацетиленокислородную наплавку.

На предприятии «Мотор-Сич» проблема жаростойкости и износостойкости бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей была решена путем разработки нового износостойкого сплава, легированного тугоплавкими элементами, на кобальтовой основе — ХТН-61, эксплуатация которого возможна при температуре до 1100 °С. Температура плавления сплава составляет 1360 °С. Методом нанесения является пайка припоем ВПр-36 при температуре 1270 °С [3, 6, 10, 12, 14, 15, 19–21].

Кроме того, известно использование в качестве упрочняющих никелевых сплавов ХН50ЮТ и Х30Н50Ю5Т2, которые широкого применения не получили [11, 22].

Анализ существующих упрочняющих материалов показывает, что наибольшее промышленное применение получили стеллит Пр-ВЗК-р, композиция КБНХЛ-2, сплавы ХТН-37 и ХТН-61.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** — анализ составов и свойств высокотемпературных жаро- и износостойких материалов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин с целью их последующей оптимизации.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Анализ особенностей производства лопаток газотурбинных двигателей из сплавов ЧС88У-ВИ, ЧС104-ВИ, ЧС70-ВИ и им подобных показывает, что наиболее приемлемым способом нанесения упрочняющих композиций на бандажные полки является наплавка. При этом должен обеспечиваться нагрев основного металла до температуры не более  $(1220 \pm 10)^\circ\text{C}$  [8]. В противном случае не удастся избежать разупрочнения основного металла и образования трещин в переходной зоне.

Благоприятный результат обеспечивает пайка высокотемпературными припоями, однако специфика конструкции лопаток турбин не всегда позволяет использовать этот эффективный метод [18].

При использовании наплавки основным технологическим критерием выбора упрочняющего материала является температура его плавления, которая также не должна превышать  $(1220 \pm 10)^\circ\text{C}$ .

Кроме технологичности, основными критериями выбора материалов для деталей горячего тракта ГТД являются [5, 7, 11]:

- высокая жаропрочность;
- способность сопротивляться действию малоцикловых усталостных деформаций;
- стойкость к окислению со способностью образовывать тонкие, плотно сцепленные с основой пленки;
- структурная стабильность во всем интервале рабочих температур;
- совместимость наносимого износостойкого материала с жаропрочной основой;
- равноизносность в рабочем интервале температур.

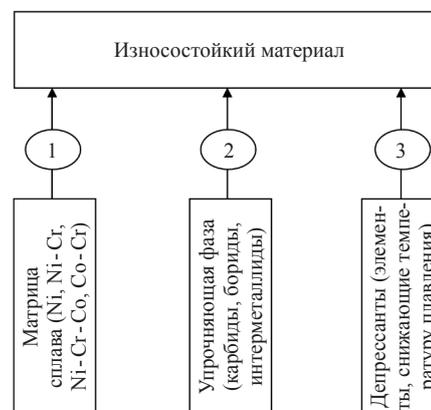
Данным критериям наиболее полно отвечают сплавы с металлической матрицей, содержащей кристаллы упрочнителя, которые обеспечивают микроармирующий эффект. В этом случае реализуется известный принцип гетерогенных антифрикционных материалов, который заключается в создании структуры с относительно мягкой матрицей с включениями кристаллов твердой фазы [5, 11, 28].

Применительно к жаропрочным дисперсионно-твердеющим никелевым сплавам идеология конструирования износостойких материалов иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 1.

Как правило, износостойкий материал включает в себя две группы легирующих элементов, образующих матрицу сплава и упрочняющую фазу. Для снижения температуры плавления сплава, придания ему некоторых самофлюсующих свойств и улучшения технологичности в отдельных случаях добавляют третью группу элементов-депрессантов.

Анализ известных составов показывает, что в качестве базовой матрицы используются легированные системы Co-Cr, Ni-Cr-Co, Ni и Ni-Cr. [3, 5, 11, 28, 29]. В целом отдается предпочтение кобальту, который в качестве основы обеспечивает более высокие рабочие характеристики по сравнению с никелем.

Механизм упрочнения реализуется формированием упрочняющих интерметаллидных, боридных и карбидных фаз, равномерность выделения которых



**Рис. 1.** Схема конструирования износостойких материалов применительно к жаропрочным дисперсионно-твердеющим никелевым сплавам

зависит от многих факторов, в том числе и от технологии нанесения износостойкого материала.

В качестве элементов-депрессантов используют в основном бор и кремний, которые существенно повышают технологичность износостойких материалов и одновременно, в силу своей неметаллической природы, значительно ограничивают их эффективную рабочую температуру эксплуатации [3, 11, 29]. Характерные особенности распространенных износостойких материалов приведены в таблице.

Анализ упрочняющих фаз износостойких материалов показал, что наиболее высокие рабочие характеристики обеспечивают карбиды ниобия и титана, которые относятся к группе сильных карбидообразующих элементов. По степени убывания далее располагаются карбиды и бориды хрома, карбиды вольфрама и интерметаллиды алюминия и титана.

Таким образом, подтверждается теория строения литейных жаропрочных никелевых сплавов, которая к наиболее термостабильным фазам относит карбиды ниобия и тантала, сохраняющие свою термостабильность вплоть до температуры 1300 °С [9].

К данной группе относятся также карбиды титана, гафния и циркония, которые до настоящего времени широкого применения в качестве упрочняющей фазы износостойких материалов не получили. Следует отметить, что в ранних работах [8, 18] была показана перспективность применения гафния и циркония в качестве депрессантов и карбидообразующих элементов износостойких композиций на основе никеля, однако данное перспективное направление до настоящего времени остается не изученным.

Менее сильными карбидообразующими элементами являются хром и вольфрам. Хром образует карбиды и бориды, которые устойчивы до температуры порядка 1050 °С, что и предопределяет более низкую эффективную рабочую температуру композиций, в которых они являются основной упрочняющей фазой [2, 4, 23, 24, 26, 27].

Вольфрам обеспечивает работоспособность износостойких материалов на том же качественном уровне.

Интерметаллидные  $\gamma'$ -фазы типа  $Ni_3(Al, Ti)$  совместно с карбидообразующими упрочнителями обеспечивают эффективную рабочую температуру экс-

плуатации упрочняющих композиций до 900 °С. При более высоких температурах проявляются их нестабильность и активность по отношению к никелевой матрице сплавов [9].

Следует отметить, что при высоких (~1000 °С) температурах работоспособность упрочняющих композиций зависит в основном от стабильности фазового и структурного состава матрицы. Кроме того, важную роль играют дисперсность и равномерность распределения упрочняющей фазы по объему основы. Такие структуры можно получить при кристаллизации эвтектик. Наиболее удачно, на наш взгляд, данный принцип реализован при разработке многокомпонентного эвтектического сплава ХТН-61 с содержанием монокарбида ниобия до 20% (мас.). Его температура плавления составляет  $(1360 \pm 10)$  °С, и он остается термостабильным вплоть до 1300 °С, что предопределяет его высокие эксплуатационные характеристики на рабочих температурах до 1100 °С [3, 6, 10, 12, 14–17, 19–21].

В сплаве ХТН-61 высокодисперсная упрочняющая карбидная фаза кристаллизуется непосредственно из эвтектического расплава, что предопределяет ее благоприятную морфологию [2, 23, 24, 26]. На практике в некоторых случаях упрочняющую фазу вводят в состав в готовом виде и закрепляют композицию спеканием. Таким образом, например, вводят карбиды и бориды хрома в состав КБНХЛ-2. Данная технология достаточно трудоемка, однако обеспечивает вполне удовлетворительный результат.

Существующие упрочняющие композиции можно условно разбить на две группы. Первая группа — это материалы с более высокой, чем у основного металла, температурой плавления: ХТН-61, ХТН-37, Пр-ВЗК-р. Ко второй группе, с более низкой, чем у основного металла, температурой плавления относится КБНХЛ-2.

Материалы первой группы невозможно качественно нанести на бандажные полки лопаток турбин наплавкой, поскольку они имеют более высокую температуру плавления, чем основной металл [13, 17].

КБНХЛ-2, который имеет более низкую температуру плавления, чем сплавы ЧС88У-ВИ, ЧС104-ВИ, ЧС70У-ВИ, является технологичным в плане

**Таблица 1.** Характерные особенности распространенных износостойких материалов

Марка сплава	Матрица сплава	Элементы, снижающие температуру плавления (депрессанты)	Механизм упрочнения	Температура плавления, °С	Эффективная рабочая температура, °С	Способ нанесения
Пр-ВЗК-р	Кобальт–хром	Кремний	Карбиды вольфрама и хрома	1270...1275	До 850	Наплавка
КБНХЛ-2	Никель–хром–кобальт	Бор	Карбиды и бориды хрома	1050	До 900	Наплавка
ХТН-37	Кобальт–хром	–	Карбиды титана и ниобия	Свыше 1300	До 1000	Пайка
ХТН-61	Кобальт–хром	–	Монокарбид ниобия	1360 °С	До 1100	Пайка

нанесения, однако не удовлетворяет требованиям необходимой твердости и износостойкости при реальной температуре эксплуатации из-за относительно низкой температуры плавления.

Таким образом, анализ составов и свойств, эффективных рабочих температур эксплуатации износостойких материалов показывает, что ни один из существующих промышленных износостойких материалов не удовлетворяет в полной мере требованиям производства лопаток турбин из сплавов ЧС88У-ВИ, ЧС104-ВИ, ЧС70-ВИ и им подобных.

В связи с этим необходима разработка нового жаропрочного износостойкого материала для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин, который обеспечивал бы повышение температуры эксплуатации на 50...100 °С по сравнению с КБНХЛ-2 при сохранении необходимого уровня износостойкости.

### ВЫВОДЫ

1. В качестве базовой матрицы износостойких материалов используют легированные системы Co-Cr, Ni-Cr-Co, Ni и Ni-Cr. При этом системе Co-Cr отдается предпочтение.

2. Как показал анализ упрочняющих фаз износостойких материалов, наиболее высокие рабочие характеристики обеспечивают карбиды ниобия и титана. По степени убывания далее располагаются карбиды и бориды хрома, карбиды вольфрама и интерметаллиды алюминия и титана.

3. Жаропрочные никелевые сплавы ЧС88У-ВИ, ЧС104-ВИ, ЧС70У-ВИ относятся к плохосвариваемым. Следовательно, любой способ упрочнения с расплавлением основного металла неприемлем, поскольку вызывает образование трещин. Состав износостойкого материала при его нанесении на бандажные полки лопаток турбин наплавкой должен обеспечивать нагрев основного металла до температуры не более  $(1220 \pm 10)^\circ\text{C}$ .

4. Ни один из существующих промышленных износостойких материалов не удовлетворяет в полной мере требованиям современного производства. Необходимо разработка нового жаропрочного износостойкого материала для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин, который обеспечивал бы повышение температуры эксплуатации на 50...100 °С по сравнению с КБНХЛ-2 при сохранении необходимого уровня износостойкости.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Алтухов, А. А. Применение жаростойкого материала КБНХЛ-2 для наплавки деталей газовых турбин [Текст] / А. А. Алтухов, О. В. Гаврилов // Информационно-технический журнал «Сварщик». — 2004. — № 2. — С. 22–23.
- [2] Бокштейн, С. З. Свойства интерметаллидных фаз в никель-алюминиевых сплавах [Текст] / С. З. Бокштейн, М. Б. Бронфин, И. А. Другова // Современные способы упрочнения деталей машин термообработкой. — Ташкент : Наука, 1973. — С. 56–61.
- [3] Восстановление работоспособности ГТД с применением новых технологий и материалов [Текст] / В. А. Лентьев, С. Д. Зиличихис, Э. В. Кондратюк, В. Е. Замковой // Вестник двигателестроения. — 2006. — № 4. — С. 99–103.
- [4] Григорович, В. К. Дисперсное упрочнение тугоплавких металлов [Текст] / В. К. Григорович, Е. Н. Шефтель. — М. : Наука, 1980. — 303 с.
- [5] Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления [Текст] / под ред. Б. Е. Патона. — К. : Наукова думка, 1997. — 336 с.
- [6] Износостойкие сплавы для контактных поверхностей деталей ГТД [Текст] / Г. И. Пейчев, А. К. Шурин, Л. И. Ищенко [и др.] // Вестник двигателестроения. — 2006. — № 2. — С. 188–192.
- [7] Изготовление износо- и жаростойкого материала КБНХЛ-2 [Текст] : инструкция И.-ЖАКИ.-105.036-90 / «Заря». — Николаев, 1990.
- [8] Исследование и разработка технологии формирования упрочняющих и износостойких покрытий на детали ГТД [Текст] : отчет по договору с предприятием «Заря» № 1604-220/1170 / науч. рук. А. М. Костин. — Николаев, 1997. — 48 с.
- [9] Квасницкий, В. Ф. Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении [Текст] / В. Ф. Квасницкий. — Л. : Судостроение, 1986. — 222 с.
- [10] Кобальтовый сплав для зміцнення бандажних полицок лопаток газотурбінних двигунів [Текст] / Т. С. Черпова, Г. П. Дмитрієва, Н. В. Андрійченко, Ю. С. Семенова // Зб. матер. XII Міжнар. наук.-техн. конференції «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів». — 2010. — С. 27–29.
- [11] Озеров, А. М. Исследования наплавочных сплавов на основе тугоплавких соединений [Текст] / А. М. Озеров. — Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 1970. — 64 с.

- [12] Пат. №8240А України, МПК С22С19/07 (200.01). Сплав на основі кобальта [Текст] / Шурін А. К., Черепова Т. С., Дмитрієва Г. П. [та ін.] ; Ін-т металофізики НАН України. — №93006979 ; опубл. 29.03.96, Бюл. № 1.
- [13] Пейчев, Г. И. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Андрейченко // Вестник двигателестроения. — 2009. — №2. — С. 123–125.
- [14] Пейчев, Г. И. Разработка аналога износостойкого сплава ХТН-61 повышенной жаростойкости для газотурбинных двигателей [Текст] / Г. И. Пейчев, В. Е. Замковой, Н. В. Андрейченко // Авиационно-космическая техника и технология. — 2007. — №8. — С. 11–13.
- [15] Петрик, І. А. Процеси відновлення зварюванням та паянням лопаток газотурбінних двигунів з важкозварюваних сплавів на нікелевій та титановій основі [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / І. А. Петрик. — К., 2007. — 21 с.
- [16] Перемиловский, И. А. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей [Текст] / И. А. Перемиловский, В. С. Гейченко, И. И. Фрумин // Автоматическая сварка. — 1976. — №5. — С. 54–56.
- [17] Прутки литые из сплавов ХТН-37 и ХТН-61 : технические условия ТУУ 88.061.007-98. — 1998. — 11 с.
- [18] Разработка припоев и технологии исправления дефектов литья в отливках из жаро- и коррозионно-стойких сплавов, исследование свариваемости этих сплавов [Текст] : отчет по договору №818/6.1.P.866 / науч. рук. А. М. Костин. — Николаев, 1995. — 47 с.
- [19] Разработка высокотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД [Текст] / А. К. Шурин, Г. П. Дмитриева, Н. В. Андрейченко [и др.] // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий. — Запорожье, 1992. — С. 41–42.
- [20] Разработка и внедрение высокотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД [Текст] / Г. И. Пейчев, А. К. Шурин, В. Е. Замковой [и др.] // Вестник двигателестроения. — 2009. — №2.
- [21] Резник, И. Д. Кобальт [Текст] / И. Д. Резник, С. Н. Соболев, В. М. Худяков. — М. : Машиностроение. — Т. 1. — 1995; Т. 2. — 1996.
- [22] Русиян, А. В. Влияние устойчивости сплава ХН35ВТЮ против образования горячих трещин в околосшовной зоне [Текст] / А. В. Русиян // Специальные стали и сплавы. — М. : Metallurgizdat. — 1963.
- [23] Самсонов, Г. В. Физическое металловедение карбидов / Г. В. Самсонов, Г. Ш. Упадхая, В. С. Нешпор. — К. : Наукова думка, 1974. — С. 377–379.
- [24] Симс, Ч. Жаропрочные сплавы [Текст] / Ч. Симс, В. Хагель. — М. : Металлургия. — 1976. — 568 с.
- [25] Сом, А. И. Плазменно-порошковая наплавка стеллитом фиксаторов труб [Текст] / А. И. Сом, В. Ю. Ищенко, А. Б. Малый // Информационно-технический журнал «Сварщик». — 2004. — №2. — С. 18–19.
- [26] Физико-химический фазовый анализ сталей и сплавов [Текст] / Н. Ф. Лашко, Л. В. Заславская, М. Н. Козлова [и др.]. — М. : Металлургия, 1978. — 336 с.
- [27] Химушин, Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы [Текст] / Ф. Ф. Химушин. — М. : Металлургия, 1964. — 749 с.
- [28] Чатынян, Л. А. Новые износостойкие жаропрочные сплавы для узлов трения [Текст] / Л. А. Чатынян // Теория трения, износа и проблем стандартизации. — Брянск, 1978. — С. 37–41.
- [29] Черепова, Т. С. Фазовые равновесия в сплавах кобальта с карбидами и разработка износостойкого при высоких температурах материала [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 1994. — 16 с.

© А. Ю. Бутенко, А. М. Костін, А. Б. Малий

Надійшла до редколегії 21.11.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. О. М. Дубовий

Статтю розміщено у Віснику НУК №5, 2012