

Наука  
в действии!



**09–10/10.2025**

## **LXXII НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СЕССИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ ГАЗОВЫХ ТУРБИН**

Научно-технические проблемы полной локализации,  
проектирования, производства и технического  
обслуживания стационарных газотурбинных  
установок в РФ

совместно с

**II НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИЕЙ**  
Перспективные направления развития  
технологий газотермического напыления  
и лазерной наплавки

# **СБОРНИК ДОКЛАДОВ**

[www.tspsc.ru](http://www.tspsc.ru)

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

КОМИССИЯ РАН ПО ГАЗОВЫМ ТУРБИНАМ

АО «ВСЕРОССИЙСКИЙ ДВАЖДЫ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ»

ООО «ТСЗП»

LXXII НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СЕССИЯ  
ПО ПРОБЛЕМАМ ГАЗОВЫХ ТУРБИН  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ,  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА  
И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ  
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК В РФ»

и

II НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ  
ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ»

09–10 октября 2025 г.

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

г. Москва

LXXII Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин «Научно-технические проблемы полной локализации, проектирования, производства и технического обслуживания стационарных газотурбинных установок в РФ» совместно с II Научно-технической конференцией «Перспективные направления развития технологий газотермического напыления и лазерной наплавки»: сборник докладов, г. Москва, 09–10 октября 2025 г.

В сборнике приведены доклады, представленные на LXXII Научно-технической сессии по проблемам газовых турбин «Научно-технические проблемы полной локализации, проектирования, производства и технического обслуживания стационарных газотурбинных установок в РФ» совместно с II Научно-технической конференцией «Перспективные направления развития технологий газотермического напыления и лазерной наплавки».

Тематика докладов охватывает широкий круг вопросов проектирования, освоения и эксплуатации газотурбинных и парогазовых установок, а также широкий круг научно-технических проблем развития газотурбинных и парогазовых технологий.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОПЛАМЕННОГО МЕТОДА НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

Д.Е. Якимов, Е.Н. Поморцев, З.Р. Габдрахманова, В.С. Сиверин

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа» (Группа ГМС), Казань, Россия

**Аннотация.** В данной работе рассматриваются перспективы применения газопламенного метода напыления для создания высококачественных покрытий деталей компрессорной техники. Актуальность исследования обусловлена высокими требованиями к надежности и долговечности ответственных узлов, таких как подшипники скольжения и деталей уплотнения центробежных компрессоров. Установлено, что технология газопламенного напыления позволяет формировать высококачественные антифрикционные баббитовые покрытия подшипников, обеспечивая однородную структуру и высокую адгезию. Приведены результаты исследований истираемых уплотнительных покрытий на основе алюминия и никеля, рекомендованных в качестве прирабатываемых покрытий для деталей уплотнения центробежного компрессора, эксплуатирующихся в условиях отрицательных температур.

**Ключевые слова:** газопламенный метод напыления, покрытие деталей, компрессорная техника, актуальность исследования, надежность и долговечности узлов, центробежные компрессоры, антифрикционные баббитовые покрытия подшипников, адгезия.

Создание высокоэффективного технологического оборудования, в частности, компрессорных установок, имеет ключевое значение для развития различных отраслей промышленности и машиностроения. Ввиду этого, к ответственным деталям центробежных компрессоров предъявляются высокие требования в части надежности и долговечности их работы.

Так, подшипник скольжения является одной из важнейших деталей центробежного компрессора, обеспечивающего надежную работу оборудования (рис. 1). Подшипник скольжения представляет собой корпус с цилиндрическим отверстием, в котором на внутреннем диаметре размещается вкладыш. Для изготовления вкладышей применяются специальные антифрикционные сплавы. Свойства материала подшипника скольжения напрямую влияют на производительность компрессорной установки. Для длительной и надежной работы антифрикционного слоя подшипников материал должен обладать [1]: удовлетворительным сопротивлением усталости; высокой износостойкостью; низким коэффициентом трения; коррозионной стойкостью в среде смазочного масла; хорошей прирабатываемостью; технологичностью и доступностью. Баббит, используемый в центробежных компрессорах в качестве материала вкладышей, обладает высокими антифрикционными свойствами, имеет хорошую прирабатываемость к детали и низкий коэффициент трения.

Современные требования к надежности и долговечности подшипников скольжения в ответственных узлах компрессорных установок показывают на необходимость совершенствования технологий нанесения антифрикционных покрытий. Традиционно применяемая центробежная заливка антифрикционных покрытий, а именно, баббита Б83, несмотря на кажущуюся простоту и отработанность технологического процесса, демонстрирует ряд недостатков. Одним наиболее часто отмечаемым недостатком является неоднородность структуры и образование крупных интерметаллидных фаз в структуре баббита Б83, которая значительно снижает сопротивление механическим нагрузкам в условиях эксплуатации подшипника, а также обуславливает невысокую износостойкость [2].

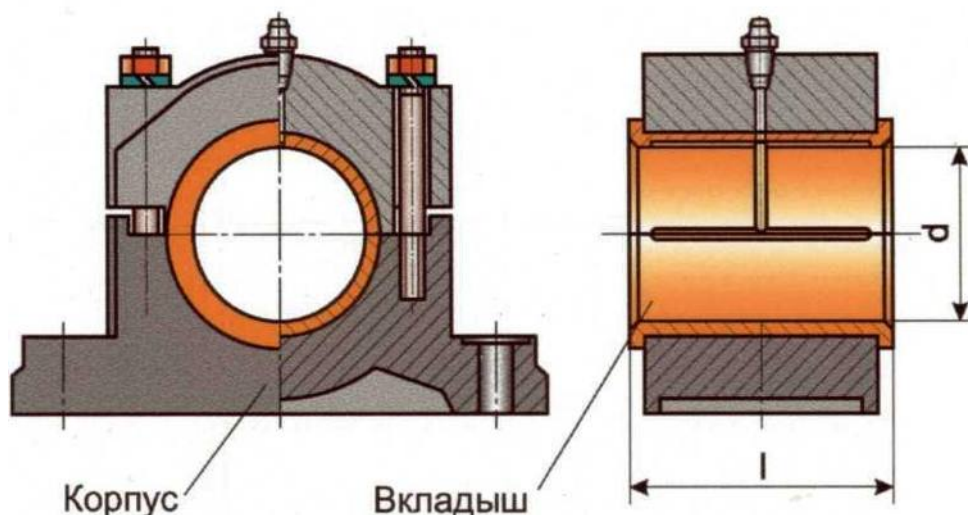


Рис. 1. Конструкция подшипника скольжения

Ключевыми факторами, определяющими долговечность и надежность эксплуатации подшипников, является качество адгезионного соединения антифрикционного слоя со стальной основой и формирование мелкодисперсной однородной структуры покрытия. Именно эти параметры обеспечивают равномерное распределение нагрузок, устойчивость к усталостным разрушениям и стабильность эксплуатационных свойств.

В связи с этим особую актуальность приобретает исследование альтернативных методов нанесения антифрикционных покрытий, а именно, технология газопламенного напыления. Данная технология нанесения потенциально позволяет решить указанные недостатки за счет иного механизма формирования покрытия. Изучение возможностей и особенностей применения газопламенного напыления для нанесения антифрикционного слоя представляет собой важную задачу, а также оптимизация процесса с учетом физико-химических взаимодействий в системе «основа-подслой-баббит», которая является ключом к повышению надежности оборудования.

В данной работе в качестве метода нанесения антифрикционного покрытия баббита предложен метод газопламенного напыления.

Нанесение покрытия баббита марки Б83 осуществлялось на колодки из углеродистой стали с помощью установки газопламенного напыления ТОП-ЖЕТ/2. Баббит Б83 с элементным составом по ГОСТ 1320-74 дополнительно легирован элементами для повышения износостойкости.

Перед нанесением покрытия проводилась предварительная подготовка поверхности стальной колодки, заключающаяся в дробеструйной обработке до однородной шероховатости абразивным материалом. Затем наносился подслоя на основе никель-хром. Затем на его поверхность наносилось покрытие на основе баббита. После нанесения покрытия стальная колодка проходила механическую доводку для сглаживания шероховатости поверхности. Толщина рабочего покрытия баббита составляла 2 мм.

Внешний вид колодки с нанесенным покрытием баббита и микроструктура напыленного слоя представлены на рис. 2–3.

Микроструктурный и рентгеноструктурный анализ покрытия показал наличие двух слоев (см. рис. 3). Анализ микроструктуры образца показал, что покрытие баббита имеет низкую пористость. Наличие открытой и поверхностной пористости в покрытии не выявлено.

Испытания адгезионной прочности покрытия методом отрыва показали высокую прочность сцепления в интервале 30–35 МПа на границе раздела «подслой-подложка», также не было обнаружено растрескивания, сколов и отслоений.

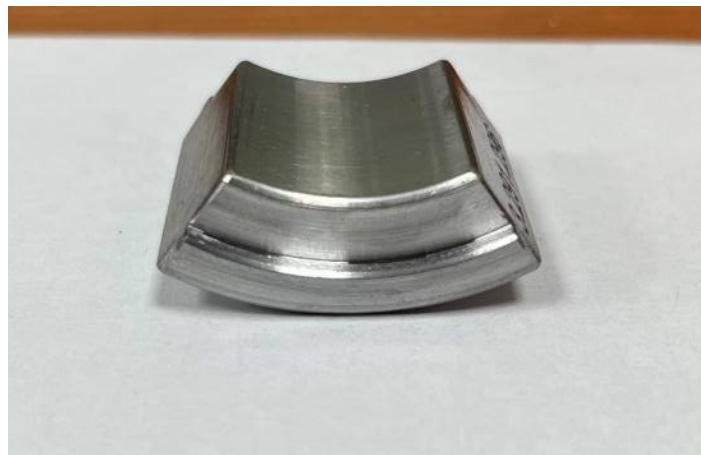


Рис. 2. Внешний вид колодки с покрытием баббита

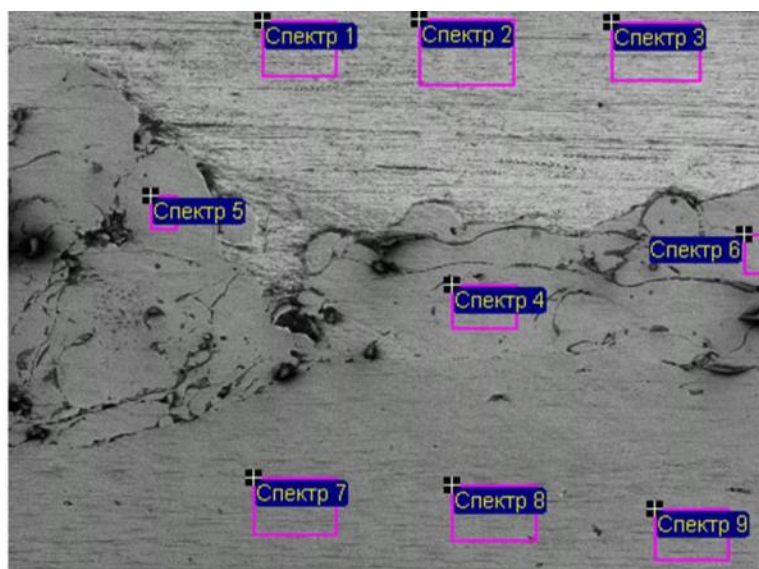


Рис. 3. Микроструктура напыленного покрытия

Также перспективным является применение метода газотермического напыления для нанесения истираемых уплотнительных материалов, так как этот метод позволяет создавать покрытия, которые применяются в центробежных компрессорах для обеспечения минимального износа деталей ротора компрессора и продления срока службы оборудования. В России и за рубежом чаще всего для уплотнения радиальных зазоров компрессора применяют материалы на основе алюминия или никеля, содержащие в своем составе равномерно распределенные частицы нитрида бора, выполняющие роль «твердой смазки». Такие материалы наносят на статорные детали с помощью методов пламенного или плазменного напыления [3].

Особый интерес представляет работоспособность газотермических покрытий, предполагаемых к использованию в качестве прирабатываемых покрытий при отрицательных температурах.

В рамках данных работ осуществлялось нанесение покрытий на пластины стали 12X18H10T. Для повышения адгезии покрытия поверхность образцов предварительно подвергали дробеструйной обработке. В качестве напыляемых материалов использовались порошки УВС-2 и АНБ. Химический состав напыляемых покрытий, определенных методом рентгенофлуоресцентного анализа, соответствует химическому составу согласно сертификата



качества на материалы (табл. 1). В качестве подложки под напыление использовался порошок ПГ-Ю10Н. Напыление производилось согласно технологических режимов плазменным методом на предприятии ООО «Технологические системы защитных покрытий». Толщина напыленных покрытий после механической обработки составляла 3 мм. Микроструктура напыленного покрытия на основе алюминия представлена на рис. 4.

Таблица 1

Химический состав напыляемых покрытий

| Марка материала                 | Химический состав, % |        |           |                  |       |      |       |
|---------------------------------|----------------------|--------|-----------|------------------|-------|------|-------|
|                                 | Al                   | Ni     | BN        | SiO <sub>2</sub> | C     | CuO  | CdO   |
| УВС-2 ТУ 1970-001-18076914-2021 | –                    | основа | 10,5–12,5 | ≤ 9              | ≤ 2,8 | ≤ 10 | ≤ 2,5 |
| АНБ ТУ 1970-002-18076914-2019   | основа               | –      | 18,0–23,0 | 4,0–8,0          | –     | –    | –     |

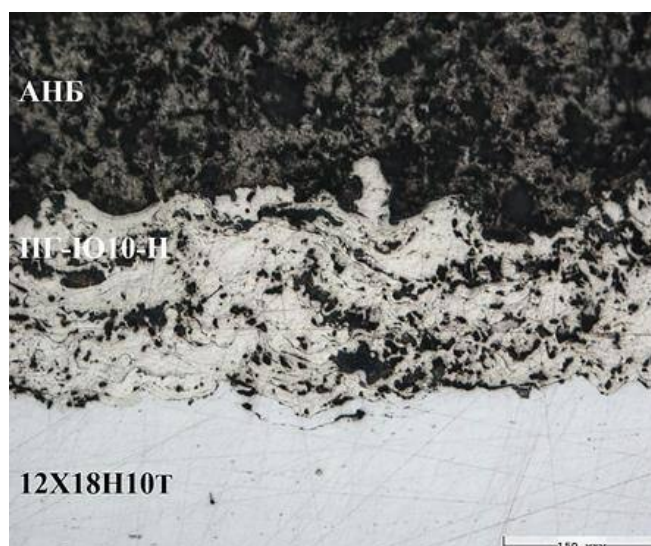


Рис. 4. Микроструктура напыленного покрытия на основе АНБ

Затем напыленные образцы погружали в криогенную камеру при температуре  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Извлеченные образцы подвергались механическому воздействию на возможное скалывание, отслоение, охрупчивание. После испытания визуально оценивался внешний вид напыленного покрытия. Покрытия остались сплошными, светло-серого цвета, без вздутий, трещин и сколов.

После криогенных испытаний напыленные образцы механически обрабатывались. Также не наблюдалось сколов, отслоений и трещин покрытий после механической обработки. Качественную оценку прочности сцепления покрытия с основным металлом определяли методом нанесения сетки царапин. На контролируемой поверхности не наблюдалось отслаивания покрытия (рис. 5).



Рис. 5. Поверхность напыленных образцов после нанесения царапин

Таким образом, технология газопламенного напыления является перспективной и эффективной для получения износостойких покрытий для деталей центробежного компрессора. Метод позволяет получать более качественные покрытия, является экономически выгодным и менее трудоемким по сравнению с известными методами напыления.

Напыление покрытия газопламенным методом полностью исключает вероятность возникновения каверн или твердых включений, равномерно распределяя баббит по поверхности подшипника — это позволяет повысить качество баббитового слоя. Высокая адгезионная прочность, достаточно низкая пористость, облегчение сдвига поверхностного слоя баббитового покрытия при соприкосновении с шейкой вала в процессе работы позволяет повысить надежность работы подшипника и снизить риск аварийного отказа.

Истираемые уплотнительные покрытия на основе алюминия и никеля, полученные методом плазменного напыления, могут быть рекомендованы в качестве прирабатываемых покрытий для деталей уплотнения центробежного компрессора, эксплуатирующихся в условиях отрицательных температур.

#### Список литературы

1. *Бурковская, Н. П.* Совершенствование материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания (обзор) / Н. П. Бурковская, Н. В. Севостьянов, Т. А. Болсуновская, И. Ю. Ефимочкин // Труды ВИАМ. — 2020. — № 1(85). — С. 78–91.
2. *Чичинадзе, А. В.* Трение, износ и смазка: (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе [и др.]. — Москва: Машиностроение, 2003. — 575 с.
3. *Мигунов, В. П.* Истираемый уплотнительный материал на основе волокон из медных сплавов / В. П. Мигунов, Д. П. Фарафонов, М. Л. Деговец // Труды ВИАМ. — 2014. — № 9. — С. 1–15.