

## ЛЕГКОСРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ КОМПРЕССОРА ГТД

Костышев В.А., Симма Л.И., Зайчиков А.А., Косырев С.А., Анипченко Л.А.  
СНТК им. Н.Д. Кузнецова,  
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

С целью повышения КПД авиационных ГТД за счет уменьшения перетекания газа зазоры между ротором и статором компрессора и турбины необходимо сводить к минимуму. Однако наличие малых зазоров может привести к касанию ротора (лопаток, гребешков лабиринтных уплотнений) о детали статора, их износу, поломкам и возгоранию лопаток из титановых сплавов. Для предотвращения этого в компрессоре ГТД на статорные детали (рабочие кольца) методом напыления наносятся легкосрабатываемые материалы.

До 1975г. в качестве основного материала для радиального уплотнения компрессора применялся алюмографит АГ-10 («шоопированный слой»), наносимый методом электродуговой металлизации из проволоки с подачи порошка графита в струю металла.

На рабочие температуры выше  $400^{\circ}\text{C}$  использовался материал 20Б на основе монель-металла, разработанный ВИАМ ( $\text{Cu} + 30\%\text{Ni}$ ).

Достоинство первого – в высокой срабатываемости без существенного износа рабочих деталей. Недостаток – ограниченный температурный интервал работоспособности (не выше  $400^{\circ}\text{C}$ ) вследствие выгорания графита, низкая коррозионная стойкость и загрязнение окружающей среды графитом. Материал 20Б, несмотря на достаточно высокую температуру работоспособности ( $600\text{--}650^{\circ}\text{C}$ ) и коррозионную стойкость, не отвечает предъявляемым требованиям по срабатываемости, что приводило к износу и поломке рабочих лопаток на изделиях СНТК.

На предприятии разработана группа легкосрабатываемых материалов для радиального уплотнения компрессора на основе алюминия и, впервые, плазменная технология их нанесения из шихты на жидком стекле. Это материалы «АНБ» (алюминий-нитрид бора), «АНБ-ПС» (с промежуточным слоем для обеспечения постепенности перехода от подслоя к рабочему слою и повышения прочностных свойств), «АНБ-У» (алюминий-нитрид бора графит), с улучшенной срабатываемостью и экономией дорогостоящего нитрида бора, и «АНБ-У-ПС» (материал «АНБ», улучшенный с промежуточным слоем).

Материал «АНБ-У-ПС» представляет собой 2х-слоиное покрытие, состоящее из:

- 1) рабочего слоя, представляющего собой смесь порошков алюминия нитрида бора, графита и силиката натрия (применяемого в качестве связки при изготовлении шихты);
- 2) промежуточного слоя, наносимого из шихты рабочего слоя с 30...40% терморегулирующего никель-алюминиевого порошка «НА-67» или «НПА-80»;
- 3) Подслоя из терморегулирующего порошка «НА-67» или «НПА-80».

Толщины подслоя, промежуточного слоя и рабочих слоев рассчитываются индивидуально для каждой детали и зависят как от условий работы детали, так и от толщины уплотнительного слоя.

На СНТК была проведена работа по улучшению срабатываемости материала «АНБ», уменьшению склонности его к наволакиванию и снижению абразивного воздействия спецслоя на рабочие лопатки компрессора.

В качестве добавки, выбранной в результате проведенных исследований, лучшие результаты были получены при использовании порошка малозольного графита марки «ГАК-2» с размером частиц 60...250 мкм. Применение графита крупной фракции в меньшей степени разделяет металлические контакты в материале, что позволяет обеспечить необходимый уровень прочностных свойств. В то же время, графит, в отличие от нитрида бора, способен расщепляться по плоскостям спайности кристалла на отдельные тонкие фрагменты («чешуйки»). Эффект снижения склонности материала к налипанию на рабочие детали по сравнению с материалом «АНБ» объясняется способностью графита образовывать пленки на металлах, препятствующие налипанию алюминия.

Исследовались составы с различным содержанием твердой смазки в шихте рабочего слоя (от 26% до 35%).

Данные исследований материала «АНБ-У-ПС» в сравнении с материалом «АНБ» представлены в таблице.

Как следует из данных таблицы, введение графита в шихту приводит к улучшению срабатываемости материала независимо от твердости напыленного слоя. Время срабатывания определяли на лабораторной установке диском с рабочими лопатками. Сравнительные испытания показали, что материал «АНБ» с добавкой графита на глубину 1мм в исходном состоянии срабатывается значительно лучше – за 1...2 сек, чем материал «АНБ» - 4...10 сек. Не наблюдается также и разогрева образца и лопаток, след от касания лопаток гладкий (на материале «АНБ» риски от налипших частиц на лопатки).

Проводились также испытания и после выдержки образцов при температуре 350° и 500°С в течении 100 часов. Наблюдалось частичное выгорание графита, вместе с тем заметного увеличения времени срабаты-

вания материала «АНБ-У-ПС» не было. При выгорании графита происходит увеличение пористости уплотнительного материала. Причем, ни наволакивания материала, ни разогрева при испытании образцов не отмечено.

Таблица

Сравнительные характеристики материалов покрытий АНБ и АНБ-У

Покрытие	Состав шихты, %	Состав напыленного слоя, %	Твердость НВ	Предел прочности на отрыв, кгс/см <sup>2</sup>	Предел прочности на разрыв, кгс/см <sup>2</sup>	Срабатываемость материала при врезании лопаток на глубину 1 мм
АНБ	Al –осн.	Al – осн.	6,0...15,0	70,0...130,0	280,0 ... 350,0	5...15 сек, незначительный разогрев лопаток, точечное налипание материала на торцы лопаток
	BN–18...25	BN–13...18				
	SiO <sub>2</sub> ≤ 8	SiO <sub>2</sub> ≤ 8				
АНБ-У	Al –осн.	Al – осн.	7,0...10,0	32,2...47,7	237,0 ... 276,0	1 сек, без разогрева, без износа лопаток, без налипания материала на торцы
	BN – 20	BN–11...20				
	C – 15	C – 6...13				
	SiO <sub>2</sub> ≤ 8	SiO <sub>2</sub> ≤ 8	12,0...15,0	85,8...86,5		1...2,5 сек, без разогрева, без износа лопаток, без налипания материала на торцы
	Al –осн.	Al – осн.				
	BN – 15	BN–9...14				
	C – 11	C–5,5...9,5				
SiO <sub>2</sub> ≤ 8	SiO <sub>2</sub> ≤ 8					

Проведенные испытания на термостойкость по режиму: выдержка образцов при температуре 550°C и обдувка сжатым воздухом до полного охлаждения образцов и выдержка при 550°C и охлаждение образцов в холодной воде показали, что материал «АНБ -У- ПС» по сравнению с материалом «АНБ», обладает более высокой термостойкостью.

Так в результате испытаний установлено, что материал «АНБ» через 12 циклов проведения испытаний отмечена сетка трещин на поверхности спецслоя, доходящая до подслоя, и явное отслоение от подслоя тогда как на материале «АНБ-У-ПС» начало отслоения и незначительное растрескивание рабочего слоя отмечено через 18 циклов, при дальнейшем проведении испытаний заметного развития трещин не наблюдается.

Испытания на вибростойкость проводились при циклическом на-

гружении ( $\sigma_m = 20 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\sigma_{-1} = 20 \text{ кгс/мм}^2$ ) до изменения в состоянии материала. В результате испытаний установлено, что на материале «АНБ» идет образование трещин от подложки при проведении 0,7...0,8 млн. циклов, тогда как образец с материалом «АНБ-У-ПС» снят после 2 млн. циклов без дефектов.

Уменьшение количества твердой смазки в шихте рабочего слоя до 26% (BN-15% ,C-11%) приводит к резкому возрастанию прочностных свойств материала, но в тоже время не отмечено заметного ухудшения срабатываемости материала. Срабатывание материала также происходит за 1...2,5 сек без разогрева и без износа лопаток, а также без налипания материала на торцы лопаток.

Таким образом, проведенные исследования показали, что замена части нитрида бора на графит марки «ГАС-2» в материале «АНБ» уменьшает склонность спецслоя к налипанию на рабочие лопатки, улучшает срабатываемость уплотнительного покрытия без снижения его надежности.

Материалы «АНБ» и «АНБ-У-ПС» успешно применяется в авиационных газотурбинных двигателях. Они внедрены на большинстве изделий других предприятий : Пермском и Запорожском моторных заводах, АО «Сатурн», ММЗ «Салют», Омском заводе им.Баранова, Казанском и Самарском и др.

Применение материалов группы «АНБ» позволяет увеличить КПД двигателя на 1-2%, снизить расход горючего на 1-2%, повысить безопасность и надежность работы авиационных ГТД. Однако требования к срабатываемым покрытиям постоянно возрастают и поэтому даже такие материалы как «АНБ» и «АНБ-У-ПС» не полностью отвечают новым требованиям.

При врезании тонких рабочих лопаток с закругленными торцами происходит не срезание материала, а его уплотнение, что приводит к повышению твердости, износу торцев и налипание на них алюминия.

Для устранения данного явления необходимо увеличивать содержание твердой смазки до 25...35% без снижения механических свойств и эрозионной стойкости. На возможность решения этой проблемы указывают зарубежные исследования, в которых исследовался напыленный слой с 30...40%<sub>ным</sub> содержанием графита. Таким образом необходимы новые решения в технологии нанесения материала с целью увеличения прочности металлических контактов для компенсации разупрочняющего действия нитрида бора или графита.

#### Список литературы

1. Зайчиков А.А, Симма Л.И. - Уплотнительные покрытия для компрессора ГТД, «Авиационная промышленность», 1980, №12, с. 18-19.