

## Л и т е р а т у р а

И. Марциковский В.А., Симоновский В.И., Устойчивость элементов гидромашин, взаимодействующих с целевыми уплотнениями. - Вестник машиностроения, 1978, № 1.

2. Соор Дж.С. Неполадки турбомашин: причины и устранение. - Переработка углеводородов. 1977; № 12.

УДК 624.438

В.И.Миронов, И.А.Холмянский

### ИССЛЕДОВАНИЕ УПЛОТНЕНИЙ КОМПРЕССОРОВ И ТУРБИН ТРАНСПОРТНЫХ ГТД

Известно, что уменьшение относительного радиального зазора на 1% приводит к увеличению КПД ступени турбины на 1,5-2,5%. За счет радиальных и осевых зазоров в ГТД имеется реальная возможность повысить КПД на 6-7%, что снизит расход топлива для турбореактивных двигателей на 2-2,5% и для турбовинтовых на 6-7%.

Целью настоящей работы является исследование методов повышения КПД турбины ГТД за счет снижения непроизводительных утечек газа через радиальные зазоры с одновременным снижением веса узлов уплотнения.

Выполненный нами анализ конструктивных особенностей узлов турбины малоразмерных ГТД с точки зрения снижения веса, повышения ремонтпригодности и надежности позволит разработать уплотнения, у которых уплотняющий элемент минимально необходимой толщины закреплен непосредственно на силовых элементах изделия (рис. 1).

В качестве объекта исследования выбран композиционный материал на основе нихромнитрид бора ( $X20H80+BN$ ), обладающий работоспособностью при температуре до 900°C. Образцы представляют собой бруски и цилиндры из спеченных материалов, полученных холодной и горячей прокаткой, плазменным напылением композиционного материала на металлическую подложку из жаростойких сталей и сплавов, а также креплением композиционного материала к подложке методами горячей накатки, пайки и сварки.

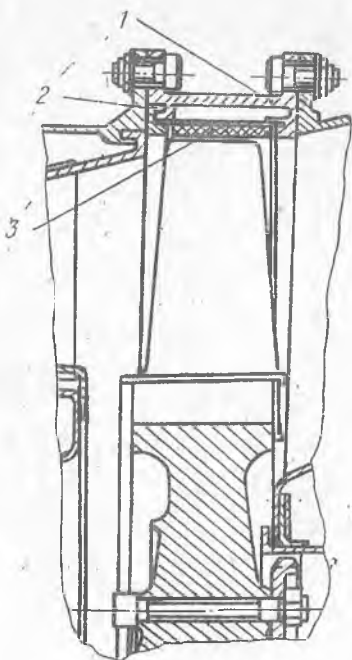
Для проведения экспериментальных исследований уплотнительных материалов разработана комплексная методика, позволяющая получить необходимую информацию о природе и характере изменения физико-механических свойств спеченных материалов как на стадии изготовления элементов уплотнений, так и при эксплуатации. Принятая методика дает возможность производить всестороннюю оценку свойств элементов уплотнений, изготовленных различными методами.

Работоспособность уплотнений оценивается испытаниями на разрыв, на прочность связи композиционного материала с подложкой, на изменение структуры, физико-химических свойств, на срабатываемость, (т.е. глубину износа) при высоких скоростях скольжения, на эрозионную стойкость и т.п.

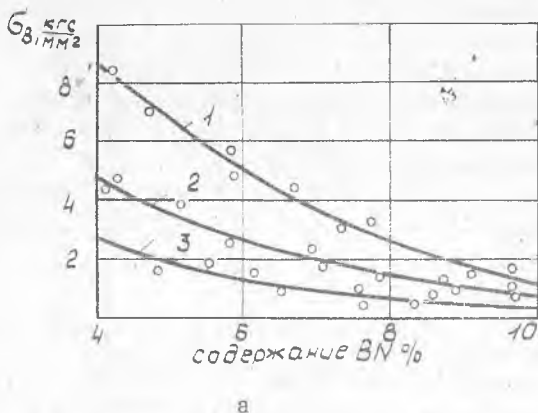
Результаты исследований обработаны методами математической статистики. Использован метод скользящей средней. Относительная величина среднеквадратичной ошибки составляет около 3%.

В статье изложены результаты двух основных методов получения уплотнений для малоразмерных ГТД: из холоднокатанной ленты и из горячекатанной ленты.

При исследовании влияния состава исходной шихты на формирование физико-механических свойств композиционной ленты, изготовленной методом холодной прокатки с последующим спеканием в восстановительной среде, установлено, что увеличение содержания нитрида бора приводит к возрастанию степени уплотнения и снижению прочности ленты (рис. 2а).



Р и с. 1. Облегченная конструкция узла уплотнения с тонкостенной спеченной лентой



Р и с. 2. Зависимость свойств уплотнительной ленты а) от содержания нитрида бора, б) от степени деформации: 1 - температура 200°C; 2 - 700°C; 3 - 900°C; 4 - прочность  $\sigma_3 = 2,186 - 0,188\epsilon + 0,022\epsilon^2 - 0,0004\epsilon^3$  кгс/мм<sup>2</sup>; 5 - твердость  $HB = 0,006(\epsilon - 3,99)^{1,6} + 2,54$  10 кгс/мм<sup>2</sup>; 6 - плотность  $P = 2,0536(4,381\epsilon^{0,125} + 2,854) + 0,335$  10%

С увеличением степени деформации порочка при прокатке твердость и прочность возрастает, а пористость понижается (рис.2б). Повышение механических свойств достигается за счет введения уплотняющей прокатки с последующим отжигом. Введение в шихту глицерина способствует стабилизации свойств по длине проката. Например, для ленты с содержанием 6-8% нитрида бора рекомендуется добавлять в шихту 2-2,5 вес.% глицерина.

Дальнейшее увеличение плотности, твердости, прочности на разрыв с одновременным повышением содержания нитрида бора достигнуто за счет горячей прокатки, совмещающей в себе одновременно воздействие температуры и давления. Поиски улучшения механических свойств привели к разработке

метода горячей прокатки ленты, предварительно сформованной и упакованной в металлическую фольгу, а также метода горячей накатки композиционного спеченного материала на толстув (до 6 мм) жаро-

прочную подложку. При этом относительная плотность увеличивается на 15-17%, твердость - в 2,5-3 раза, прочность на разрыв - в 2,5-5 раз по сравнению с плотностью, твердостью, прочностью ленты, изготовленной методом холодной прокатки с последующим спеканием.

Математическая обработка экспериментальных данных при горячей прокатке позволила выявить следующие зависимости предела твердости, плотности, прочности на разрыв от содержания нитрида бора:

При 6 вес.% BN:

$$\sigma_B = 1,448706 (\varepsilon + 3,024736)^{0,623851} + 0,92703$$

$$HB = 15,44357 (\varepsilon + 9,59122)^{0,534181} - 22,970245$$

$$\Pi = 21,557907 (\varepsilon + 22,000647)^{0,315764} + 24,550813.$$

При 8 вес % BN:

$$\sigma_B = 1,412885 (\varepsilon + 1,39917)^{0,444486} + 1,84637$$

$$HB = 13,378719 (\varepsilon + 3,117608)^{0,460804} + 0,305321;$$

$$\Pi = 18,045639 (\varepsilon + 19,645844)^{0,315973} + 33,69371.$$

При 10 вес. % BN:

$$\sigma_B = 1,97978 (\varepsilon + 0,22965)^{0,315932} + 0,717483;$$

$$HB = 9,65147 (\varepsilon + 1,323405)^{0,465843} + 6,94949;$$

$$\Pi = 21,133926 (\varepsilon + 50,322296)^{0,329907} + 1,597486.$$

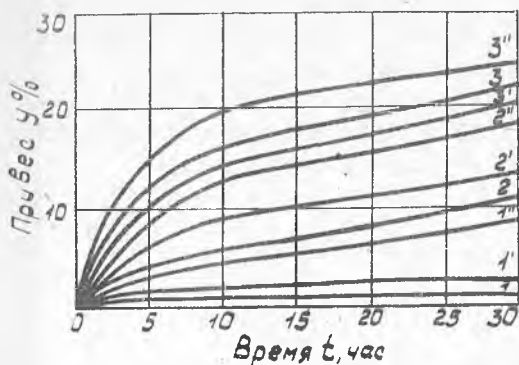
где:  $\sigma_B$  - предел прочности на растяжение кг/мм<sup>2</sup>;

HB - твердость по Бринелю кг/мм<sup>2</sup>;

$\Pi$  - плотность материала в %;

$\varepsilon$  - степень деформации при горячей прокатке в %.

Стабилизирующий отжиг после горячей прокатки позволяет дополнительно увеличить предел прочности на разрыв на 2,5%.



Р и с. 3. Кинетика окисления уплотнительной холоднокатанной ленты. Т - температура испытаний: 1, 2, 3 - 700°C; 1', 2', 3' - 800°C; 1'', 2'', 3'' - 900°C. Содержание нитрида бора: 1, 1' - 4% BN; 2, 2', 2'' - 6% BN; 3, 3', 3'' - 8% BN

Жаростойкость прокатной ленты во всех случаях - при горячей и при холодной прокатке - зависит от количества пор и содержания нитрида бора и с их возрастанием ухудшается по гиперболической зависимости (рис. 3).

Внедрение спеченной ленты в промышленность потребовало исследования способов крепления ее к узлам уплотнения. Из различных методов крепления нами выбраны, как наиболее прием-

лемые для производства, методы пайки жаростойким припоем и контактной сварки. Определены оптимальные режимы пайки ленты к стальной подложке.

Как окисленные, так и неокисленные паянные образцы при всех температурных испытаниях до 900°C разрушаются по спеченной ленте, а не по зоне пайки. До 850°C жаростойкость паяной ленты удовлетворительна и микроструктура зоны пайки и ленты практически не меняется. Интенсивное окисление ленты и понижение предела прочности на разрыв происходит при температуре выше 900°C.

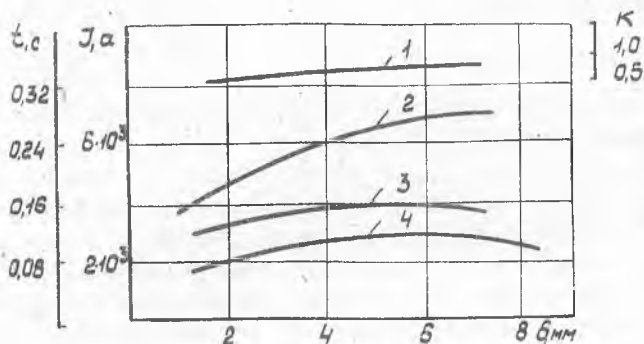
Изучение способа крепления контактной сваркой холодно- и горячекатаных спеченных лент к узлу уплотнения показывает, что нитрид бора значительно снижает прочность в зоне сварки в связи с образованием боридных фаз. Поэтому исследован процесс контактной сварки горячекатанной ленты, плакированной металлической фольгой.

При сварке образуется литое ядро в зоне контакта фольги и свариваемого материала, которое должно быть расположено несимметрично относительно плоскости контакта. Чем больше разница в толщине, тем дальше должно быть смещено литое ядро в материал силового элемента, чтобы оно не вышло за пределы толщины фольги. Сме-

шение ядра зависит от соотношения диаметров электродов. Поэтому диаметр электрода, расположенного со стороны спеченного материала, должен быть больше диаметра второго электрода в 1,5–2 раза.

При неправильном подборе режимов сварки происходит оплавление спеченного материала, сопровождающееся образованием боридных фаз.

На основании металлографических исследований и испытаний на разрыв свариваемых образцов выбраны оптимальные режимы сварки (рис. 4).



Р и с. 4. Режимы контактной сварки: 1 — отношение диаметров электродов; 2 — сила сварочного тока; 3 — время сварки ленты с фольгой из Ni; 4 — время сварки ленты с фольгой из X18H10T

Все вышеприведенные методы получения уплотнений, по которым выполнено комплексное исследование, внедрены в производство.

В процессе внедрения дополнительно выполнены следующие работы: освоен метод пайки уплотнительной ленты с вакуумным поджатием в термических печах, а также с индукционным нагревом;

для контроля качества пайки создан специальный прибор на основе вихревых токов;

разработан новый способ горячей накатки порошковой шихты на толстостенную подложку для уплотнений диаметром более 300 мм.

Стендовые испытания изделия ТВД-10 в течение 1000 часов при температуре газового потока 750–950°C с кратковременными забросами температуры до 1100–1200°C подтверждают эффективность уплотнений. Их поверхность не имела сколов и эрозионных разрушений. Твердость

материала и микротвердость металлической матрицы возрастала аналогично процессам окисления от третьей к первой ступеней турбины. После 2500 запусков уплотнения дефектов не имели.

Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы на двигателях составил 470 тыс. рублей.

УДК 621.438 (088.8)

А.А.Петров, Л.В.Ледакова

### ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОЗДАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИ МАЛОАКТИВНЫХ ТУРБИН

Быстрая техническая эволюция современного турбиностроения привела к появлению новых конструктивных решений, к увеличению параметров рабочего тела и применению новых материалов. Однако рост энерговооруженности судов, их быстроходности в настоящее время в значительной степени сдерживается высокими уровнями шума и вибрации [1].

В ряде случаев выигрыш, например, в весе главного турбозубчатого агрегата (ГТЗА) при чрезмерно высоких уровнях шума и вибрации может быть сведен к нулю или значительно перекрыт весом судовых средств шумоглушения.

В статье ставятся задачи выбора методов расчетной оценки виброакустической активности системы ГТД, присоединенных и корпусных конструкций с учетом влияния дисков, гребного винта и судовых рам и анализа опыта создания виброакустически-малоактивных конструкций, а также рассматриваются пути их создания с использованием упругих элементов и гибких конструкций.

Расчет колебаний ГТД и присоединенных конструкций целесообразно проводить методом разложения вынужденных колебаний по собственным формам. Причем, интенсивность колебания двигателя определяется по колебанию турбокомпрессора, а движительного комплекса — по колебаниям главного упорного подшипника (ГУП). На рис. 1 показана зависимость динамической жесткости  $K$  системы от податливости  $l_{g_1}$  передней опоры ротора и частоты его вращения  $\omega$  для случая абсолютно жесткой задней опоры ( $l_{g_2}=0$ ). Из рисунка видно, что подат-