

ИСТОРИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО ГАЗОТУРБОСТРОЕНИЯ

ПАО "ОДК "Сатурн":

Максим Николаевич Буров, главный конструктор по перспективным разработкам, к.т.н.,
Александр Вячеславович Логунов, главный специалист, д.т.н.,
Денис Викторович Данилов, ведущий инженер-технолог, к.т.н.

Рассмотрены основные, исторически сложившиеся, подходы к созданию морских газотурбинных двигателей и установок. Представлены результаты работ ПАО "ОДК-Сатурн" в области разработки конструкторской и технологической базы морского газотурбостроения в России. Рассмотрены основные проблемы, которые необходимо решать при конвертации авиационных газотурбинных двигателей для их применения в составе морских энергетических установок. Рассмотрены перспективные направления развития морских газотурбинных установок. Определены требования к специальным коррозионностойким жаропрочным сплавам для морских газотурбинных двигателей и установок. Создан жаропрочный никелевый сплав нового поколения, обладающий высокой стойкостью к морской солевой коррозии.

Examined main historical formed approaches of creation sea gas turbine engines and plants. Represented of resultates of PAS "UEK-Saturn" works in region of laborations constructions and technological base sea gas turbine production Russia. Examined main problems wich necessary decide for transform aviation gas turbine engines in employment for sea energetical plants. Examined perspective directions of development sea gas turbine a plants. Fouded requirements for special corrosion stand superalloys, wich necessaryes for sea gas turbine engines and plants. Elaborated nickel superalloy of a new generation, which has high firmness a sea salt corrosion.

Ключевые слова: Газотурбинные установки, энергетические ГТУ, морские энергоустановки, электростанции, топливная эффективность, специальные сплавы.

Keywords: Gas-turbine units, Electric power generation gas turbines, boat gas turbines powerplants, power stations, fuel efficiency,

В СССР разработка корабельных ГТД началась в конце 30-х годов. Работы велись под руководством сотрудника Научно-исследовательского института военного кораблестроения (НИВК, в настоящее время НИИ КиВ ВМФ) Г.И. Зотикова. В 1937 - 1940 гг. на Ленинградском металлическом заводе под его научным руководством строился опытный образец первого в мире корабельного ГТД мощностью 3000 л.с. После начала Великой Отечественной войны работы были практически прекращены [1].

В послевоенное время определились два пути развития морских ГТД. Первый путь - "тяжелых" (промышленного типа) ГТУ сложного цикла с регенерацией тепла уходящих газов и умеренной температурой газа перед турбиной.

Второй путь - "легкие" ГТД авиационной конструкции, с более высокими параметрами простого цикла связан с именем С.Д. Колосова. Первая морская газотурбинная установка М-1 была создана в СССР под руководством С.Д. Колосова на базе авиационного ТВД.

Сложность процессов конвертации и значительные отличия условий работы ГТД на корабле от самолетных, проблемы с освоением серийного производства конвертированного авиационного двигателя привели Колосова к выводу, что ГТД, предназначенные для работы в корабельных условиях, необходимо разрабатывать специально. Сейчас можно считать, что эти трудности были исключительно организационного и субъективного характера, так как зарубежные авиадвигателестроительные фирмы успешно проектируют и производят морские версии своих авиационных ГТД. В итоге была создана советская база корабельного газотурбостроения в г. Николаеве. Серийное производство корабельных ГТУ было основано на Южном турбинном заводе в г. Николаеве. Там же было создано Специальное конструкторское бюро газотурбинных установок (СКБ ГТУ), впоследствии выделенное в отдельное предприятие СПб "Машпроект". ЮТЗ был переименован в ПО "Заря". На протяжении сорока лет было выпущено около трех десятков типов легких корабельных ГТД и ГТУ на их базе для энергетики и газовой отрасли [2].

С распадом Советского Союза возникла необходимость создания в России собственной базы морского газотурбостроения. В 1992 году по решению правительственной комиссии базовым предприятием для разработки корабельных ГТД в РФ было определено ОАО "Рыбинское конструкторское бюро моторостроения" (в настоящее время ОКБ ПАО "ОДК-Сатурн"). Учитывая опыт рыби-

нских конструкторов в создании уникальных двигателей для военной авиации, за основу для создания морских ГТД был взят газогенератор перспективного авиационного двигателя.

В 2000 году в соответствии с концепцией создания и применения газотурбинных двигателей и агрегатов на надводных кораблях Морского флота, был определен типоряд корабельных двигателей мощностью от 7000 до 27000 л.с. который должен был обеспечить потребности флота.

Основной сложностью, с которой пришлось столкнуться при конвертации авиационного газогенератора в морской, - это требование по обеспечению работоспособности в морской среде. Дело в том, что существующие коррозионностойкие жаропрочные материалы существенно уступают по своим прочностным характеристикам авиационным.

Так, например, при значении параметра Ларсона-Миллера 26·10³, длительная прочность коррозионностойкого жаропрочного сплава ЧС88У-ВИ более, чем на 60 % ниже, чем у авиационного сплава ЖС32.

Это привело к необходимости разработки новой турбины высокого давления с более эффективной системой охлаждения и существенному снижению температуры газа перед турбиной. Кроме того для улучшения топливной эффективности была выполнена оптимизация профилей и проточной части ряда ступеней компрессора.

Первый российский морской двигатель М75РУ прошел ГСИ в 2006 году. Он предназначен для применения в составе энергетических установок патрульных и ракетных катеров, десантных кораблей.

Следующим двигателем семейства, созданным в ПАО "ОДК - Сатурн", стал газотурбинный двигатель М70ФРУ. Для расширения мощностного ряда к компрессору была добавлена "нулевая" ступень, что позволило увеличить расход воздуха и степень повышения полного давления в компрессоре [3,4].

В настоящее время на базе модификации двигателя М70ФРУ (М70ФРУ-2) созданы газотурбинные агрегаты для кораблей на воздушной подушке с динамическим поддержанием, где немаловажную роль играет относительно малый вес, присущий морским двигателям авиационного типа. Также разработана модификация с реверсивной силовой турбиной (М70ФРУ-Р) для водоизмещающих кораблей.

К 2018 г. была успешно реализована программа освоения серийного производства на ПАО "ОДК-Сатурн" двигателя мощ-

ностью 20 МВт.

Полученные результаты свидетельствуют, что за прошедшие 26 лет в России была создана собственная база для разработки и серийного производства морских ГТД и агрегатов на их основе.

Таким образом, можно утверждать, что на сегодняшний день в России создана собственная база морского газотурбостроения.

Решив задачу обеспечения флота российской корабельной энергетикой в ближнесрочной перспективе, ПАО "ОДК-Сатурн" рассмотрены направления перспективного развития морских ГТД и ГТА.

Повышение топливной эффективности ГТД может достигаться за счет: повышения КПД лопаточных машин, увеличения КПД термодинамического цикла, а также за счет применения сложного цикла (рекуперация, промежуточное охлаждение, пароутилизационный контур и т.д.).

Однако, аналогично авиационным двигателям, кривая эффективности морских ГТД при переходе от поколения к поколению постепенно выхолаживается. Это значит, что каждый дальнейший шаг по повышению экономичности ГТД при существенных материальных и временных затратах дает все меньший результат.

Дело в том, что уровень аэродинамического совершенства лопаточных машин сегодня вплотную приближается к своему теоретическому максимуму и в будущем уже не будет являться существенным фактором повышения КПД двигателя и агрегата.

Аналогично можно сказать и про параметры цикла. Так предельный достигнутый на сегодняшний день уровень температур газа перед рабочим колесом турбины морских в ГТД при развитии охлаждения рабочих лопаток и ограниченной наработке на максимальном режиме немногим более 1500К.

Дальнейшее повышение температуры газа при использовании существующих материалов горячей части потребует увеличения охлаждения турбины, что в свою очередь негативно скажется на мощностных, экономических и ресурсных характеристиках ГТД, тем самым практически полностью обесценив ожидаемый эффект.

Что касается применения сложного цикла, то, несмотря на существенный прирост топливной эффективности за счет утилизации тепла уходящих газов, применение таких установок не всегда целесообразно на боевых кораблях по компоновочным и эксплуатационным соображениям. Кроме того, применение ГТД сложного цикла ни в коей мере не снимает актуальность проблемы повышения жаропрочности материалов горячей части.

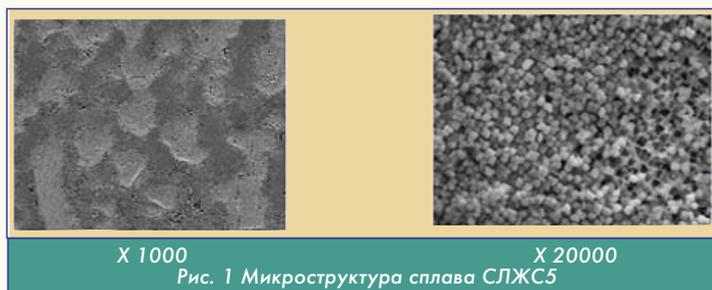
Ранее говорилось, что обеспечение высокой стойкости к сульфидной коррозии для никелевых жаропрочных сплавов требует усиленного легирования хромом в количестве не менее 12 % по массе. Однако повышение содержания этого элемента способствует снижению длительной прочности. Для улучшения показателей жаропрочности нужно применять сложное легирование тугоплавкими элементами, что вызывает другие проблемы: высокая дендритная ликвация указанных элементов, испаряемость хрома в вакууме, высокая вероятность образования топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз, охрупчивающих материал. В результате область составов легирования, обеспечивающего высокие показатели жаропрочности и стойкости к коррозии, очень узка, и искать ее следует с использованием современных оптимизационных технологий. При поиске необходимо оценивать и анализировать большое количество термодинамических, структурных, прочностных, концентрационных и других параметров материала.

В соответствии с целями настоящего исследования была разработана оптимизационная модель.

В результате решения серии задач оптимизации и анализа полученных Парето-оптимальных решений была определена область существования семейства новых сплавов, получившего название СЛЖС-5.

На рис.1 в качестве примера показана микроструктура сплава СЛЖС5-1, содержащего 1,2% рения.

Предварительные исследования коррозионного воздействия в расплавленной смеси солей (10%NaCl+90%Na₂SO₄) при 900 °С указывают на высокую стойкость к коррозии.



Сравнение полученных материалов с существующими (Таблица 1) позволяет сделать вывод о том, что по критериям структурной стабильности и стойкости к коррозии сплавы семейства СЛЖС5 соответствуют материалам, доказавшими на практике свою работоспособность в агрессивных средах, и при этом обеспечивают повышенную жаропрочность.

Таблица 1 Сравнение нового материала с существующими сплавами

Сплав	Vγ',%	Mysfit,%	M(d) _γ	σ _{γ_{max}} ¹⁰⁰⁰	T _{HP}	d, г/см ³
ЖС-32	68	0,36	0,90	240	1281	8,79
SC16	41	-0,11	0,92	135	1177	8,15
IN 738LC	42	0,23	0,94	137	1164	8,15
CMSX-11B	59	0,16	0,95	184	1210	8,39
CMSX-11C	52	0,03	0,95	180	1203	8,45
ЧС-70	42	0,10	0,93	141	1161	8,2
ЦНК-7	48	0,29	0,95	166	1189	8,23
IN 792	54	0,05	0,94	169	1198	8,25
ЖС-6К	56,5	0,35	0,94	139,30	1200	8,03
ЖС-6У	63,8	0,38	0,94	175,0	1231	8,34
IN 792	53,9	0,05	0,94	169	1197	8,25
ЖСКС-1	49,4	0,10	0,92	135,0	1175	8,23
ЖСКС-2	52,6	0,30	0,94	173,0	1185	8,24
СЛЖС-5	54	0,16	0,91	192,7	1207	8,49

Видно, что новый сплав в наименьшей степени склонен к образованию ТПУ-фаз (критерий минимален); он обладает хорошей стойкостью к сульфидной коррозии (критерий Al/Ti-Cr 05 для этого сплава достаточно низок), в то же время его жаропрочность является наиболее высокой по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами [5-7].

Литература

1. Прасников В.Б. Первый газотурбинный корабль отечественного ВМФ (Опытный большой торпедный катер пр.183Т). [Текст] / В. Б. Прасников // Судостроение, 2004.- № 6. - С.27 - 31.
2. Романов, В.И. НПП "Машпроект" 45 лет. [Текст] / В.И. Романов // В кн.: Известия Академии инженерных наук Украины. 1999. - Выпуск 1.- С. 10 - 17.
3. Буров М.Н. Основные направления развития морских газотурбинных двигателей в России. Вестник РГАТУ, Рыбинск, РГАТУ - 2016. - № 4(39) - С. 13 - 16.
4. Буров М.Н., Пономарев В.А. Анализ тенденций развития отечественных морских ГТД Вестник РГАТУ, Рыбинск, РГАТУ - 2017. - № 4(43) - С. 3 - 11.
5. А.В. Логунов, М.Н. Буров, Д.В. Данилов. Развитие энергетического и морского газотурбинного двигателестроения в мире, часть 1, Двигатель, 2016, № 1 (103), с. 10-13.
6. А.В. Логунов, М.Н. Буров, Д.В. Данилов. Развитие энергетического и морского газотурбинного двигателестроения в мире, часть 2, Двигатель, 2016, № 2 (104), с. 2-4.
7. А.В. Логунов, М.Н. Буров, Д.В. Данилов. Перспективы развития ГТУ в России, часть 3, Двигатель, 2016, № 3 (105), с. 2-5.

Связь с авторами:

burov_mm@npo-saturn.ru
logunov06@rambler.ru
denis.danilov.uec-saturn@mail.ru