

УДК 621.78:621.438

Особливості застосування різних сплавів і матеріалів для основних вузлів й деталей стаціонарних ГТД для корабельних двигунів. Наведено результати порівняльного аналізу конструкцій компресорів низького та високого тисків ГТД ДН80, дані, які характеризують міцнісні властивості серійних матеріалів. Показано досягнення створення жароміцних сплавів авіаційних ГТД

Ключові слова: двигун, сплав, ресурс, міцність, компресор, турбіна

Особенности применения различных сплавов для основных узлов и деталей стационарных ГТД для корабельных двигателей. Приведены результаты сравнительного анализа конструкций компресоров низкого и высокого давления ГТД ДН80, данные, характеризующие прочностные свойства серийных материалов. Последние достижения создания жаропрочных сплавов авиационных ГТД

Ключевые слова: двигатель, сплав, ресурс, прочность, компрессор, турбина

Habits of application of various alloys for the basic units and details stationary GTE, formed on the basis of ship are observed. Results of the comparative analysis of designs of compressors of low and tall pressures GTE DN80, and also the data describing of strength properties of serial materials are resulted. Last achievements in the field of creation of high-temperature alloys aviation GTE are shown

Key words: engine, alloy, resource, strength, compressor, turbine, tall

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОНВЕРТАЦИИ КОРАБЕЛЬНЫХ И АВИАЦИОННЫХ ГТД В СТАЦИОНАРНЫЕ ГТУ

В.В. Романов

Кандидат технических наук, доцент, генеральный директор
ОАО «НПО им. М.В. Фрунзе
ул. Горького, 58, г. Сумы, 40004
Контактный тел./факс: (542) 78-68-20; 78-68-21
E-mail romanov_v@frunze.com.ua

В.А. Коваль

Доктор технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН
Украины
ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, 61046
Контактный тел. (0572) 95-95-94
E-mail turbogaskoval1@rambler.ru

Корабельные ГТД. Используемые материалы в конструкциях корабельных ГТД были разработаны при сотрудничестве ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» с такими организациями, как ЦНИИ «Прометей», ВИАМ, ЦКТИ им. Ползунова, ЦНИИЧерМет и Институтом проблем прочности НАН Украины. Всесторонний анализ сталей и сплавов, которые использовались отечественной промышленностью для производства паровых турбин, компрессоров и авиационных двигателей, позволил определить основные классы металлов, применяемых для изготовления дисков и лопаток компрессоров и турбин, а та жаровых труб камер сгорания:

- для дисков компрессоров титановые сплавы ВТЗ-1 и ВТ-9;

- для дисков первых ступеней турбин – сплавы на основе никеля ХН77ТЮР-ВД (ЭИ437Б-ВД), ХН73МБТЮ-ВД (ЭИ698-ВД), а для дисков силовых турбин сталь 08Х15Н25Т2МФР (ЭП674);

- для жаровых труб камеры сгорания ХН60ВТ (ВЖ98, ЭИ868), ХН75МВТЮ (ЭИ602);

- для корпусов турбин сплавы на основе никеля ХН75МБТЮ (ЭИ602), ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП708-ВД) и сталь 15Х16К5Н2МВФАБ-Ш (ЭП866-Ш);

- для лопаток компрессоров в двигателях 3 и 4 поколений – титановый сплав ВТЗ-1 и ВТ8;

- для сопловых и рабочих лопаток турбин деформируемые сплавы на никелевой основе ЭИ617-ВД, ЭИ826, ЭП539-ВД и литые Ni-сплавы ЭК9Л, ЭП539ЛМ, ЧС70Л-ВИ, ЧС88У-ВИ, ЧС104-ВИ.

Перечисленные сплавы отличаются стойкостью как против высокотемпературной газовой коррозии в среде продуктов сгорания жидких топлив с высоким содержанием серы, так и исключительной коррозионной стойкостью против воздействия морской соли.

Надежная работа корабельных ГТД, спроектированных с применением указанных сплавов, подтверждена положительным опытом длительной эксплуатации.

С переходом на условия эксплуатации в составе наземных ГТУ стал вопрос о целесообразности дальнейшего применения дорогих коррозионно-стойких сталей и сплавов. Поиск таких сплавов проводился среди материалов, имеющих достаточную коррозионную стойкость в условиях наземного применения ГТД. Выбранные сплавы должны были иметь относительно высокую жаропрочность при длительности полного

ресурса ГТД 75000...100000 часов и обладать хорошими технологическими свойствами. Перечисленным критериям удовлетворяли хорошо освоенные на предприятии ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» стали ЭП609-Ш и ЭП961-Ш, а также новая сталь мартенситного класса ЭП517-Ш.

Внедрение в серийное производство сплава ЭП517-Ш стало возможным после проведения большого комплекса конструкторско-технологических проработок с целью обеспечения длительной и малоцикловой прочности деталей, режимов сварки, механической обработки, производства необходимым сортаментов.

Изначально сталь ЭП517-Ш предполагалось применять как заменитель материала ЭП866-Ш в статорных узлах машины. Однако по мере изучения механических свойств (длительной прочности, структурной стабильности), режимов сварки и механической обработки, сплав ЭП517-Ш нашел применение для изготовления дисков компрессоров ГТД IV поколения, работающих при температурах до 420°C. Сплавы ЭП517-Ш и ЭП866-Ш относятся к жаропрочным сталям мартенситного класса, которые близки по химическому составу стали ЭП866, за исключением повышенного содержания хрома (15...16,5%) и наличия кобальта (4,5...5,50%).

Как известно, в высоколегированных сталях насыщение хромом способствует фазовому упрочнению. Однако это достигается при взаимодействии хрома с другими элементами. Растворение этих элементов в карбидах хрома уменьшает склонность к коагуляции карбидов и затрудняет растворимость их при высоких температурах. Хром резко повышает сопротивляемость окислению, что особенно заметно при его 5% содержании. Такая сталь пригодна для работы при температурах, вплоть до 650°C.

Повышение жаропрочности сплавов достигается заметным снижением содержания в них хрома, что сопровождается уменьшением его растворимостью. При этом хром либо образует самостоятельные фазы, либо способствует их образованию на основе α -Cr, σ -b μ -фаз, карбидов $M_{23}C_6$, M_6C и др., которые приводят к ухудшению свойств материалов вследствие возникновения процессов неблагоприятной морфологии. Поэтому процесс длительной выдержки стали ЭП866-Ш при высоких температурах среды способствуют ее охрупчиванию за счет образования σ -фазы.

Кобальт в небольшой степени повышает жаропрочность материала и в его присутствии заметно увеличиваются пластические свойства соединений. Поэтому в сплаве ЭП866-Ш повышенное содержание хрома компенсировано добавкой кобальта. Легирование кобальтом оправдывает себя только при кратковременных нагрузениях в условиях высоких температур. Подтверждением сказанному служат данные для сталей ЭП866 и ЭП 517-Ш, приведенные в табл. 1.

Как показал опыт эксплуатации, при длительном нагружении (более 3000 часов) и температурах от 400...550°C, сталь ЭП866-Ш сильно охрупчивается за счет выделения σ -фазы. Деградация механических свойств выражается в виде существенного снижения ударной вязкости до уровня $a_n = 0,3$ кгм/см² (при минимально допустимом уровне $[a_n] = 2$ кгм/см²), и возрастанием твердости сплава с 311-341НВ до 440НВ. Материал корпусов становится чрезвычайно хрупкими и

чувствительными к внешним ударным воздействиям. В этой ситуации переход на сталь ЭП517-Ш, которая отличается стабильностью механических свойств в диапазоне рабочих температур и длительности нагружения, обеспечил требуемый ресурс тех узлов, в которых первоначально использовалась сталь ЭП866-Ш.

Таблица 1

Сравнительные данные по длительной прочности сплавов (МПа)

	$\sigma_{10^4}^{200}$	$\sigma_{10^4}^{400}$	$\sigma_{10^4}^{450}$	$\sigma_{10^4}^{550}$	$\sigma_{10^5}^{200}$	$\sigma_{10^5}^{400}$	$\sigma_{10^5}^{450}$	$\sigma_{10^5}^{550}$
ЭП517-Ш диск	937	697	540	255	937	618	442	177
ЭП517-Ш корпус	937	692	510	245	937	608	438	168
ЭП866 корпус	850	700	590	340	850	700	460	260
ЭП609-Ш диск	800	505	363	113	800	417	280	30
ЭИ602 корпус	696	657	560	363	687	657	555	343
ЭИ708 корпус	930	873	755	550	930	873	710	415
ЭП961-Ш диск	863	481	368	160	863	380	250	10
BT3-1 диск	706	603	417	80	664	537	310	10
BT8 диск	632	515	486	10	580	450	420	–
ЭИ479 лопатки	840	738	665	–	840	738	640	–

Высокие показатели кратковременной прочности сплава ЭП517-Ш при температурах до 200°C ($\sigma_{10^5}^{200} = 937$ МПа) позволили применить его в высоконагруженных первых ступенях роторов КНД вместо титанового сплава BT3-1 ($\sigma_{10^5}^{200} = 664$ МПа). При длительной прочности ЭП517-Ш в интервале температур 200...350°C стало возможным изготовление дисков первых ступеней КВД вместо титанового сплава BT9, имеющего длительную прочность в этих же условиях $\sigma_{10^5}^{200...350} = 780...885$ МПа. В качестве примера на рис. 1 приведен сравнительный анализ конструкций дисков 1 – 6 ступеней КВД ДН80Л, спроектированных из сплава ЭП517-Ш и дисков, выполненных из титанового сплава BT9 изделия GT25000. Видно, что переход на стальные диски приводит к двукратному увеличению их веса по сравнению с титановыми конструкциями. Вместе с тем, данные изменения не превышают пятикратной разницы в цене между сплавами ЭП517-Ш и BT9.

Благодаря высокой (по сравнению с другими сплавами такого же класса) жаропрочности и свариваемости в условиях ЭЛС и АДС, сталь ЭП517-Ш также широко применяется для корпусов силовых турбин вместо сплава ЭП866-Ш, а также диафрагм сопловых аппаратов турбин вместо Ni-сплавов ЭИ602-ВД и ЭИ708-ВД.

Так для энергетического двигателя ДГ80Л были спроектированы диафрагмы сопловых аппаратов 2, 4, 5 и 6 ступеней турбины из ЭП517-Ш вместо Ni-сплава ЭП708-ВД (2-я ступень) и Ni-сплава ЭИ602-ВД (4, 5 и 6 ступени).

Как следует из данных табл. 1, относительная длительная прочность ЭП517-Ш в сравнении с ЭИ602-ВД и ЭП708-ВД при характерной для диафрагм температуре 450°C и длительности 10⁵ часов составляет соответственно $\bar{\sigma}_t^t = 0,79$ и 0,62. Несущие конические оболочки стальных диафрагм были утолщены в 1.3 раза от исходной толщины, что эквивалентно относительному повышению жаропрочности в $\bar{\sigma}_{np} = 1.69$ раз между никелевым сплавом и сталью в одинаковых условиях. Таким образом, относительное изменение запасов по несущей способности в диафрагмах составило

$$\bar{k}_b = (0,62...0,79) \cdot 1,69 = 1,05...1,3$$

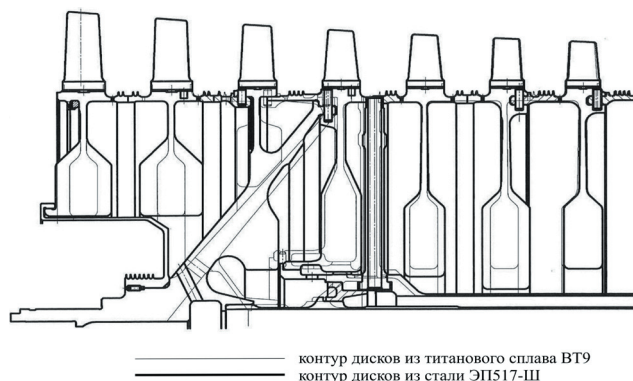


Рис. 1. Сравнение конструкции дисков 1-6 ст. КВД ДН80 из сплавов ЭП517-Ш и VT9

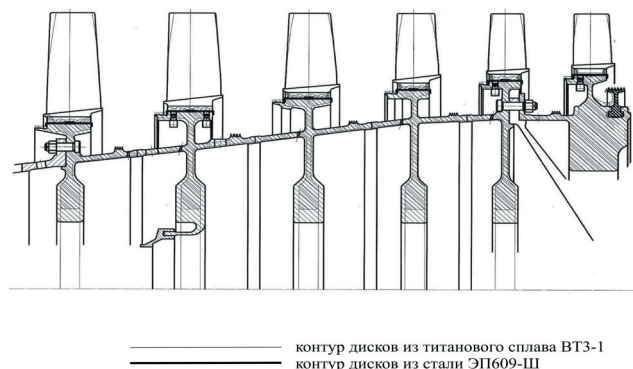


Рис. 2. Сравнение конструкции дисков 3-7 ст. КНД ДН80 из сплавов ЭП609-Ш и VT3-1

На рис. 3 показаны результаты расчетов напряженного состояния одной из стальных диафрагм, выполненных методом конечных элементов в программе ANSYS в виде полей эквивалентных напряжений по Мизесу. Максимальные местные напряжения в диафрагмах не превышают 20 кг/мм², что обеспечивает требуемые запасы прочности в пределах полного ресурса.

Сталь ЭП609-Ш нашла широкое применение в роторах КНД двигателей ДН80Л и ДГ90 вместо титанового сплава VT3-1 благодаря хорошей обрабатываемости и свариваемости ЭЛС и АДС. В качестве примера на рис. 1 показаны отличия в меридиональных сечениях дисков КНД двигателя ДН80Л в варианте из титанового сплава VT3-1 и стали ЭП609-Ш. Относительное увеличение площади меридионального сечения стальных дисков составило 40...50 %.

При изготовлении диска последней ступени КНД ДН80Л применена сталь ЭП961-Ш вместо сплава VT3-1.

Здесь важно отметить, что положительному решению проблемы обеспечения нормативных запасов прочности при замене материалов также способствовало и то, что, практически все корабельные ГТД имели на 10...15% большую мощность, чем аналогичный двигатель в наземных условиях. Это означает, что температуры деталей наземных ГТД оказывались ниже на 20...40°C.

Применение для лопаток компрессоров корабельных ГТД титановых сплавов VT3-1 и VT8, обладающих высокой коррозионной стойкостью и повышенной механической прочностью, позволяет заметно снизить массу компрессора, так как удельная прочность их значительно выше, чем у сталей.

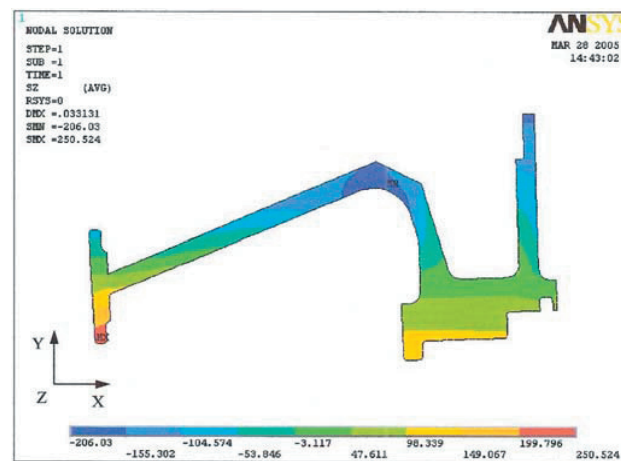


Рис. 3. Эквивалентные напряжения по Мизесу (кг/см²) в диафрагме СА 4 ст. турбины ДН80

Однако при повышенных температурах свойства титановых сплавов резко ухудшаются и к тому же они более чувствительны к концентрации напряжений. Поэтому применение титановых сплавов для рабочих и направляющих лопаток возможно при обеспечении высокого сопротивления усталости, не ниже $\sigma_{-1} = 400$ МПа.

Высокий уровень сопротивления усталости достигается путем оптимизации макро- и микроструктуры, правильного подбора режимов финишной механической обработки и поверхностного пластического упрочнения, а также снижения конструктивной концентрации напряжений. Вместе с тем лопатки, изготовленные из титанового сплава, весьма чувствительны к случайным царапинам и рискам, которые могут появиться в процессе сборки и эксплуатации ГТД. К этому необходимо добавить также и высокую стоимость титановых сплавов по сравнению со сталями.

Вследствие этого на предприятии была исследована возможность замены для рабочих лопаток компрессоров низкого давления титановых сплавов на стальные. Проведенные расчетные работы показали принципиальную возможность создания роторов серийных компрессоров низкого давления ДГ90 и ДН80 со стальными дисками и лопатками из условия обеспечения статической прочности лопаток, замковых соединений и дисков, а также необходимых запасов по критическим частотам вращения роторов и долговечности подшипников качения.

Поскольку лопатки осевых компрессоров корабельных ГТД подвергаются коррозии, то специфические условия эксплуатации обуславливают применение в качестве материалов рабочих и направляющих лопаток коррозионностойких сталей, содержание хрома в которых не ниже 12%. К таким сталям относится сплав 15X16N2AM-Ш (ЭП479-Ш), который обладает высокой демпфирующей способностью, позволяющей уменьшить напряжения в лопатках при колебаниях. Проведенные испытания на вибростенде натуральных лопаток из ЭП479-Ш показали, что предел выносливости их составил не менее $\sigma_{-1} = 400$ МПа и сопоставим с уровнем предела выносливости таких же лопаток из титанового сплава ВТ3-1.

Для определения фактических запасов усталостной прочности было проведено сравнительное тензометрирование титановых и стальных рабочих лопаток 3 и 4 ступеней КНД на серийном роторе ГТД ДН80. Результаты измерений показали, что в стальных лопатках уровень динамических напряжений на 10...15% выше, чем в титановых. Принимая во внимание, что фактические запасы по усталостной прочности титановых лопаток превышают допустимый запас более чем на 25%, при изготовлении лопаток из стали ЭП479-Ш, запас по усталостной прочности также обеспечивается.

Авиационные ГТД. Для лопаток турбин авиационных ГТД характерно применение жаропрочных сталей типа ЖС. Современный углеродистый сплав ЖС30 и безуглеродистый ЖС40 предназначены для литья лопаток турбин с направленной кристаллизацией и монокристаллической структурами, соответственно. При этом сплав ЖС40, легированный танталом, обладает наибольшей структурной стабильностью в области длительного времени нагружения, что обуславливает повышенные значения σ . Сплавы второго поколения ЖС32 (~4%Re) и ЖС36 (~2%Re), обладают достаточно большей жаропрочностью при меньших временных базах ($P < 28000$).

На рис. 4 показаны характеристики жаропрочных никелевых сплавов, применяемых в современном газотурбостроении при повышенных температурах и ресурсах. Для широко применяемых сплавов ЖС30 и ЖС36 гарантированные свойства соответствуют следующим значениям: $\sigma_{26000} = 370$ МПа, $\sigma_{29000} = 130$ МПа и

$\sigma_{33000} = 30$ МПа (ЖС30); $\sigma_{26000} = 450$ МПа, $\sigma_{29000} = 185$ МПа и $\sigma_{33000} = 50$ МПа (ЖС36).

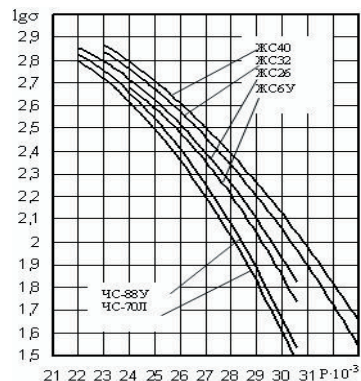


Рис. 4. Пределы длительной прочности жаропрочных сплавов лопаток турбин

Следует отметить, что прямое использование авиационных сплавов для турбинных лопаток конвертированных ГТД не всегда оправданно вследствие их высокой стоимости и низкой сопротивляемости газовой коррозии. В связи с этим во Всероссийском институте авиационных материалов для рабочих лопаток ГТУ созданы жаропрочные сплавы ЖСКС-1 и ЖСКС-2.

Сплав ЖСКС-1 с частично монокристаллической структурой, содержащий в своем составе зернограничные упрочняющие элементы, по характеристикам жаропрочности незначительно уступает сплаву ЖС30 и превосходит существующие ЦНК-7НК и ЧС-70, а также зарубежные аналоги GTD-111 и In738LC, не уступая им по сопротивлению горячей коррозии. При этом для материала ЖСКС-1 $\sigma_{25800} \geq 350$ МПа и $\sigma_{27000} \geq 240$ МПа.

Легированный танталом и рением безуглеродистый сплав ЖСКС-2 с полностью монокристаллической структурой по длительной прочности аналогичен авиационному сплаву ЖС30 и значительно превосходит его по сопротивлению солевой коррозии. Для этого материала характеристики жаропрочности соответствуют $\sigma_{25800} \geq 380$ МПа, $\sigma_{27000} \geq 280$ МПа и $\sigma_{28000} \geq 200$ МПа [1].

Литература

1. Каблов Е.Н. Новые коррозионностойкие жаропрочные сплавы и технология получения крупногабаритных турбинных лопаток стационарных ГТУ/ Е.Н. Каблов, Н.Г. Орехов, И.М. Демонис, В.Н. Толорая и др.// ЛП научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин. 13-14 сентября 2006 г. Тезисы докладов. Москва, 2006. – С.108-109.