

УДК 669.536.422

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЯЭУ

*Васильковский В.С., Сметанников В.П., Евтихин В.А., Люблинский И.Е.,
Вертков В.А., Чуманов А.Н. (ГП «Красная Звезда»)*

Жидкометаллические тепловые трубы, являющиеся автономными саморегулирующимися устройствами, способны без потерь в изотермических условиях передавать тепловые потоки высокой плотности на расстояние в несколько метров. Это позволяет их рассматривать как элемент, обеспечивающий реализацию космической ЯЭУ с вынесенной системой преобразования энергии [1]. Только тепловые трубы с литием в качестве теплоносителя способны обеспечить подвод необходимых тепловых потоков от активной зоны реактора к эмиттеру термоэмиссионного преобразователя в интервале 1273—1873 К [2] (см. таблицу).

Для реализации космических ЯЭУ с вынесенной системой преобразования энергии с помощью таких теплопередающих устройств принципиальным моментом является выбор для их создания материала, технологии изготовления, оптимальных параметров функционирования, что обеспечивало бы гарантированный ресурс энергоустановки 10 лет и более. На основе анализа опыта и собственных экспериментальных и технологических наработок в работе делается оценка реально достижимого ресурса работы тепловых труб.

Особенности коррозионных процессов в литиевых тепловых трубах. Известно, что на растворимость металлов в литии в сильной степени влияют неметаллические примеси, такие, как азот, кислород [1], которые могут содержаться в исходном литии или накапливаться в процессе работы жидкометаллической системы.

Высокотемпературные литиевые трубы из ниобия или тантала выходят из строя в результате образования по границам зерен металла продуктов коррозии с относительно низкой температурой плавления и повышения растворимости этих тугоплавких металлов в литии, вызванного его обогащением кислородом в зоне испарения [1]. Эти процессы ограничивают их максимальную рабочую температуру в пределах 1473—1573 К.

Как следует из термодинамических и экспериментальных данных, примесь кислорода не влияет на стойкость молибдена и вольфрама в литии. Азот является потенциально опасной примесью в литии с точки зрения коррозии в нем молибдена как материала для двухфазной жидкометаллической системы. Отличием в этом случае от ниобиевых тепловых труб является отсутствие возможности накопления азота за счет его поглощения из окружающей вакуумной среды через молибденовую стенку.

Для исследования влияния этой примеси на работоспособность теплопередающих систем была изготовлена серия молибденовых труб, рабочее тело которых (литий) содержало от 0,01 до 0,2% примеси азота. Испытания, проведенные при 1573—1773 К,

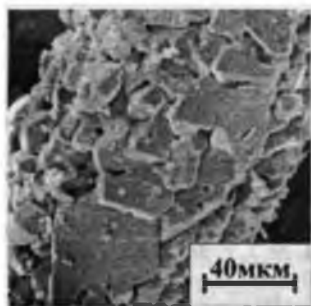


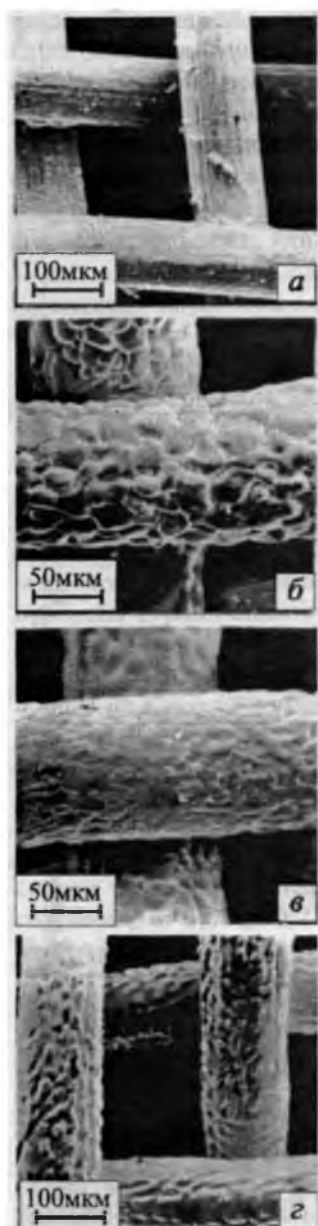
Рис. 1. Капиллярная система молибден-литиевой тепловой трубы в зоне конденсации после одного часа работы при 1770 К

показали, что при превышении пороговой концентрации азота в литии, составляющей ~0,1%, трубы выходили из строя уже через 1—2 ч испытания. При этом наблюдалось коррозионное разрушение стенки трубы в зоне конденсации, что само по себе представляется необычным. В зоне разгерметизации наблюдалось интенсивное растворение и осаждение молибдена (рис. 1). Экспериментальные данные, в том числе снижение на 20—30 К температуры в конце зоны конденсации разрушившихся молибденовых труб, позволили предположить, что азот в условиях испытаний как неконденсирующийся газ оттеснялся в эту зону и, обогащая локально литий, вызывал резкое усиление процессов растворения и кристаллизации молибдена.

Характеристики некоторых литневых тепловых труб

Номер опыта	Материал (марка)	Капиллярная система		Температура, К	Габариты, мм		Максимальная переносимая мощность			Время работы, ч	Причина остановки	Источник
		Материал	Тип		длина	диаметр	аксиальная	удельная аксиальная, кВт/см ²	радиальная, Вт/см ²			
1	Mo	Mo	Экран	1700	—	—	—	—	—	25 400	Разрушение, рост зерна	[3]
2	Mo (МЧ)	Mo	Каналы, сетка	1770	310	22	5	2,1	30	4200	Плановая	[1]
3	Mo (МЧВП)	Mo	То же	1770	410	22	5	2,0	50	8400	То же	Эксперимент
4	Mo—Ti—C (TZM)	—	—	1770	—	—	—	—	—	10 500	Разгерметизация в сварном шве	
5	Mo (МЧВП)	Mo	Сетка	1870	280	14	0,8	0,7	20	1600	Разрушение, рост зерна	[1]
6	Mo	Mo	Спеченный порошок	2170	500	13	6	21,6	150	—	То же	[5]
7	W—26Re	—	—	1870	—	—	—	—	—	10 000	Плановая	[4]
8	W—26Re	—	Каналы	1970	—	—	—	—	—	10 000	То же	[6]
9	W—26Re	—	»	1800	—	—	—	—	—	721	Разрушение	[6]
10	Nb—1Zr	Nb	Сетка	1370	—	—	—	—	—	4300	Плановая	[7]
11	Nb—3Mo—1Zr (BH-2AЭ)	Mo	Каналы, сетка	1470	320	—	1,5	1,4	—	1050	То же	[1]
12	Nb	Mo	»	1740	300	22	—	—	—	22	Разгерметизация в зоне нагрева	[1]
13	Nb—3Mo—1Zr (BH-2AЭ)	Mo	Сетка	1750	305	18	2,0	—	—	186	То же	Эксперимент
14	Nb—3Mo—1Zr (BH-2AЭ) с покрытием Mo	Mo	»	1770	210	18	2,0	—	—	879	То же	
15	Nb—1Zr	Nb	»	1870	—	—	—	—	—	132	То же	[8]
16	Ta—8W—2Hf (T-111)	—	—	1640	—	—	—	—	—	17 400	Плановая	[9]
17	Ta	—	—	1870	—	—	—	—	—	17	Разгерметизация в зоне нагрева	[8]
18	Ta	—	Каналы	1870	200	11	1	2	170	897	То же	[10]

Основные принципы технологии создания ресурсных тепловых труб. Практика показала, что эффективная и длительная работа тепловых труб обусловлена, главным образом, технологическими факторами, поэтому создание надежных труб стало возможным после разработки соответствующей технологической установки. Единый технологический цикл изготовления включает в себя очистку теплоносителя, высокотемпературное обезгаживание, дозировку и заполнение теплоносителем, герметизацию и контроль качества труб. Перед их заправкой предварительно проводится очистка лития, которая включает в себя последовательно отстой, фильтрацию и дистилляцию. В результате этих операций литий, как правило, содержал менее 0,006% азота, содержание примеси кислорода было менее 0,01%. Для герметизации заправочного штенгеля труб служит электронная пушка оригинальной конструкции. Последующая



проверка герметичности заключается в электронно-радиационном нагреве трубы по всей длине до температуры начала ее работы. Испытания показали, что все экспериментальные трубы выходили на рабочий режим без предварительного прогрева по длине от комнатной температуры и, как правило, режим изотермичности наступал при 1073 ± 20 K, причем перепад температуры по длине не превышал 10 K. Из предпускового состояния, т.е. когда теплоноситель на всей длине капиллярной системы находился в жидком состоянии, время выхода на рабочую температуру 1773 K не превышало 100 с, и такая длительность пуска была обусловлена лишь инерционностью нагревателя.

Приведенные результаты и опыт изготовления большого числа тепловых труб различного назначения [1] свидетельствуют о надежности и устойчивости технологии их изготовления из тугоплавких металлов.

Оценка ресурсных характеристик молибден-литиевых тепловых труб. Для количественной оценки массопереноса и выявления причин выхода из строя были проведены испытания серии труб. Некоторые результаты испытаний приведены в таблице (№ 2, 3, 5). Молибденовые трубы, изготовленные по соответствующей технологии, при 1773 K не изменяли своих характеристик в процессе испытаний, остановленных в плановом порядке.

Для оценки параметров массопереноса с помощью растровой электронной микроскопии была исследована поверхность внутренней стороны корпусов труб № 2, 4, 5 в месте разгерметизации и образцов сетки капиллярной системы, взятых из зон конденсации, испарения и адиабатной. На рис. 2 приведены образцы сетки. По сравнению с исходным состоянием (см. рис. 2, а) на образцах после испытания наблюдается ее растворение (зернограничное) в зоне конденсации паров лития (см. рис. 2, б). В адиабатной зоне воздействие лития на материал сетки минимально (см. рис. 2, в), в зоне испарения наблюдается отложение перенесенной массы (см. рис. 2, г). Такой же характер массопереноса наблюдался и для трубы № 5, работавшей при 1873 K. Экспериментальные наблюдения соответствуют закономерностям массопереноса двухфазным потоком лития в изотермической системе. Из представленных результатов видно, что процесс массопереноса в молибден-литиевых трубах является монотонным и протекающим с малой интенсивностью по сравнению с процессами в ниобий-литиевых трубах.

Р и с. 2. Капиллярная система молибден-литиевой тепловой трубы в зоне конденсации после 4200 ч работы при 1770 K

Коррозионное воздействие лития на молибден, как и перенос массы, не являются непосредственными причинами выхода трубы из строя. Такой причиной может являться деградация механических свойств конструкционного материала — молибдена, вызванная его рекристаллизацией и термоциклированием при испытаниях. Разгерметизация в зоне сварных швов обусловлена, как правило, низким качеством сварки и недостаточным операционным технологическим контролем.

Анализ физических ограничений передаваемой тепловой трубой мощности в предположении, что свойства рабочего тела не меняются по ее длине, капиллярная система является однородной и перепадом давления в паровом потоке можно пренебречь, приводит к выводу, что ресурсоспособность с точки зрения сохранения параметров теплопередачи зависит от стабильности параметров капиллярно-пористой структуры. Основной вклад в изменение предельных параметров теплопередачи труб в условиях невесомости вносит капиллярный предел передаваемой мощности.

В качестве критерия, определяющего временной предел работоспособности, целесообразно выбрать степень уменьшения просвета проходного сечения капиллярно-пористой системы, обусловленного отложением перенесенной в зону испарения массы конструкционного материала трубы и капиллярной структуры. Предлагается рассматривать как критерий снижение просвета пор капиллярной системы до определенного предела, например, в 2 раза.

Определив количественные параметры массопереноса в молибден-литиевой трубе, используя предложенный критерий, можно оценить ресурс. Для определения времени, за которое произойдет снижение просвета пор капиллярной системы трубы, необходимо определить скорость переноса растворенной массы. В зоне теплоотвода происходит конденсация чистого лития. Перемещаясь по каналам капиллярно-пористой системы, вне зависимости от ее конструкции, жидкий литий, проходя по зоне конденсации и адиабатной зоне, постепенно насыщается растворяющимся в нем молибденом. В зоне теплоподвода он испаряется, а растворенный в нем молибден в силу пренебрежимо низкой по сравнению с литием летучести оседает на элементах капиллярно-пористой системы, с которых происходит испарение. Далее этот цикл повторяется, и общее количество перенесенной массы определяется степенью насыщения текущего лития молибденом и скоростью циркуляции лития, зависимой от переносимой трубой мощности.

Благодаря исчезающе малому давлению паров молибдена при температуре работы трубы весь растворенный в зоне конденсации и адиабатной зоне металл будет оставаться в зоне испарения. Поэтому количество перенесенной массы определится временем работы, концентрацией насыщения молибдена в литии при заданной температуре, мощностью, передаваемой трубой в аксиальном направлении. Несмотря на то, что количество перенесенной массы известно, для корректного прогнозирования ресурсоспособности необходимо учитывать возможную неоднородность ее отложения в зоне теплоотвода, для чего можно использовать результаты экспериментальных исследований массопереноса в натриевых трубах из нержавеющей стали, работавших при 950 К в двух режимах в течение 3350 и 18 600 ч [12]. Благодаря неоднородности процесса осаждения время локального уменьшения просвета пор в капиллярной системе может быть до 2 раз меньше, чем усредненное на всю поверхность зоны испарения, и, следовательно, прогнозируемый срок службы необходимо сократить вдвое по сравнению с усредненной оценкой.

Зная геометрические параметры трубы, эффективную пористость капиллярной системы (75 мкм) из молибденовой сетки саржевого переплетения и полагая, что нарушение режима ее работы наступит при уменьшении на 50% площади просвета капиллярно-пористой системы в месте максимальной скорости осаждения перенесенной массы в зону испарения, можно определить ее ресурс. Все параметры, необходимые для расчета (геометрические, переносимая трубой мощность, теплофизические и физические характеристики лития и молибдена), известны. Единственная характеристи-

ка, требующая определения, это скорость переноса молибдена, которую представляется возможным найти, анализируя образцы сетки капиллярной системы (см. рис. 2). Статистический анализ показал, что масса перенесенного за 4200 ч молибдена в трубе № 2 составляет $\leq 0,04$ г. При указанных условиях время работы трубы по расчету составит более $2 \cdot 10^5$ ч или более 20 лет [1].

Заключение. В рассматриваемых вариантах космических ЯЭУ с вынесенной системой преобразования на молибден-литиевых тепловых трубах [1, 13] предусматривается переносить одной тепловой трубой мощность не более 10—15 кВт при радиальных тепловых нагрузках 20—40 Вт/см², что далеко от предельных характеристик и обеспечивает щадящий режим работы труб, в том числе температуру 1623—1723 К. Использование разработанной технологии изготовления труб, оптимально легированных молибденовыми сплавами способно обеспечить ресурс тепловых труб, определяемый скоростью массопереноса в ней, до $2 \cdot 10^5$ ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов В.Н., Евтихин В.А., Люблинский И.Е. и др. Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века. М.: Энергоатомиздат, 1999. 528 с.
2. Быстров П.И., Каган Д.Н., Кречетова Г.А., Шпильрайн Э.Э. Жидкометаллические теплоносители тепловых труб и энергетических установок. М.: Наука, 1988. 263 с.
3. SP-100 Program Review. Los Alamos National Laboratory, Feb. 1983.
4. Merrigan M. Heat Pipe Technology Issues. Space Nuclear Power Systems. Ed. by M. El-Genk and M. Hoover, 1985, p. 419—426.
5. Eastman G. High Performance Heat Pipe. Final Technical Rep. COO-4242-2, June 30, 1979.
6. Busse C. Long time behavior of high temperature tungsten-titanium heat pipes with lithium or silver as working fluid. — In: Proc. Heat Pipes Intern. Conf., Stuttgart, W. Germany, 1973, p. 205—209.
7. Cotter T., Deverall I., Erickson G. Status report on theory and experiments on heat pipe at Los Alamos. — In: Proc. Intern. Conf. on Thermionic Power Generation, LA, 1965, p. 35—41.
8. Busse C., Caron R., Geiger F., Potzsche M. Performance studies on heat pipes. — Ibid., p. 104—111.
9. Tower L., Kaufman W. High temperature heat pipe research at NASA Lewis Center. — In: Proc. III Intern. Heat Pipe Conf., Palo-Alto, 1978, p. 303—311.
10. Quarter D., Busse C. Investigation of the corrosion mechanism in tantalum-lithium high temperature heat pipes by ion analysis. — J. Nucl. Mater., 1973, v. 46, p. 329—436.
11. Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Krasin V.P., Pankratov V.Yu. Numerical and experimental determination of metals and alloys solubility in liquid lithium, lithium containing nonmetallic impurities, lead and lead-lithium eutectic. — J. Nucl. Mater., 1995, v. 222, p. 288—292.
12. Иванов В.А., Левченко В.Е. О расчете массопереноса в натриевых тепловых трубах: Препринт ФЭИ-1767, 1986.
13. Грязнов Г.М., Евтихин В.А., Чуманов А.Н. и др. Параметрический анализ ряда космических ЯЭУ с вынесенной системой преобразования энергии на тепловых трубах. — См. наст. вып., с. 34—39.

Р е ф е р а т ы д о к л а д о в

УДК 629.19:621.039.578

Грязнов Г.М. К 30-летию пуска первого в мире термоэмиссионного ядерного реактора «Топаз». — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 1, с. 6—11.

21 апреля 2000 г. исполнилось 30 лет со дня первого в мире наземного испытания термоэмиссионного реактора-преобразователя ЯЭУ «Топаз», принесшего российской науке и технике заслуженный авторитет и лидерство. Успешные последующие летно-космические испытания двух опытных ЯЭУ «Топаз» в 1987—1988 гг. подтвердили его технические характеристики и безопасность операций, обеспечивающих старт и космическую эксплуатацию ЯЭУ, мак-

симальная длительность которой составила около одного года.

Приводится исторический аспект создания ЯЭУ «Топаз». Рис. 6, список лит. 5 назв.

УДК 629.19:621.039.578

Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А., Коротеев А.С., Акимов В.Н., Архангельский Н.И., Николаев Ю.В., Гонтарь А.С., Марагинский Р.Н., Соколов Е.Н., Климов А.В., Авдошин Е.Д. Солнечная бимодальная термоэмиссионная энергодвигательная установка. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 1, с. 11—14.