

2. Айсфельдер, Франк К. и др. Соединения цирконий – сталь для испарительно-нагревательных ТВЭЛов // Атомная техника за рубежом. – №2. – 1969

3. Фролов Н.Г., Шилков Ю.Б. и др. Сварка совместным прессованием нержавеющей стали с цирконие-

выми сплавами // Сварочное производство. – №5. – 1974.

4. Иванов В.Е., Амоненко В.М., Тронь А.С. Высокотемпературная прокатка в вакууме металлов, сплавов и металлических материалов // УФЖ. – 1978. – №23(11). – 1782.

УДК 669-419.4:539.43

## РОЛЬ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ ДЕМПИРУЮЩИХ И БАРЬЕРНЫХ ПРОСЛОЕК В ПОВЫШЕНИИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ТИТАНА И НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

*А.Т. Лопата, И.М. Неклюдов, С.В. Шевченко, В.И. Сытин, В.И. Соколенко*  
г. Харьков, ИФТТМТ ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Изделия из композиционных материалов обладают уникальными характеристиками, сочетание которых невозможно получить в изделиях из материалов одного сорта. Слоистые композитные материалы (СКМ) являются специфическим типом композитов и играют важную роль в современном техническом процессе. Применение СКМ позволяет по-новому решить ряд сложных технических задач, повысить надежность работы конструкций. Для производства композиционных материалов, содержащих легкоокисляющиеся материалы или сплавы на их основе, в частности: титан, тантал, ниобий, цирконий, ванадий, алюминий, медь, железо, стали, – наиболее целесообразно, а в ряде случаев и единственно возможным в достижении цели является метод совместной деформации (СД). Сущность метода заключается в совместном деформировании и специальным образом подобранной искусственной среде, предварительно скомпонованных заготовок (слоев) из разнородных материалов. При оптимальном выборе соотношений между заготовками несущих, демпфирующих и барьерных слоев, а также при обеспечении оптимальных режимов процесса скоростной деформации (импульс давления, температура, остаточное давление окислительно-восстановительной атмосферы) метод обеспечивает близкую к расчетной прочность и пластичность зон соединения разнородных металлов. Метод, благодаря вакуумной чистоте и импульсному воздействию давления в процессе их соединения, позволяет получать СКМ из любых сочетаний материалов.

Разработанные к настоящему времени СКМ устойчиво работают в квазистационарных температурных и силовых полях. При эксплуатации изделий в переменных температурно-силовых полях характерно снижение прочностных и пластических характеристик, являющееся следствием изменения кристаллической структуры и напряженного состояния вблизи границ сопряжения разнородных материалов [1-2].

Слоистые композиционные материалы на основе титана и стали с барьерными и демпфирующими прослойками из меди и ниобия, созданные в ННЦ ХФТИ [3], применяются в ряде узлов современной космической техники, эксплуатируемых в квазистационарных силовых и температурных режимах.

Повышение термоциклической выносливости СКМ титан-сталь в широком интервале температур является одной из приоритетных задач.

Рис.1 иллюстрирует зависимость предела прочности и предела текучести кольцевых образцов, вырезанных из плит СКМ титан-сталь Х18Н10Т, от толщины прослойки меди и числа циклических нагревов в интервале температур 150↔900 °С. Прослойка изготовлена из меди марки М1. СКМ получали методом совместной прокатки в вакууме. Термическую стойкость СКМ с различными толщинами прослоек при циклировании определяли на образцах из плит СКМ, вырезанных так, что продольная ось образца была перпендикулярна границе сопряжения слоев.

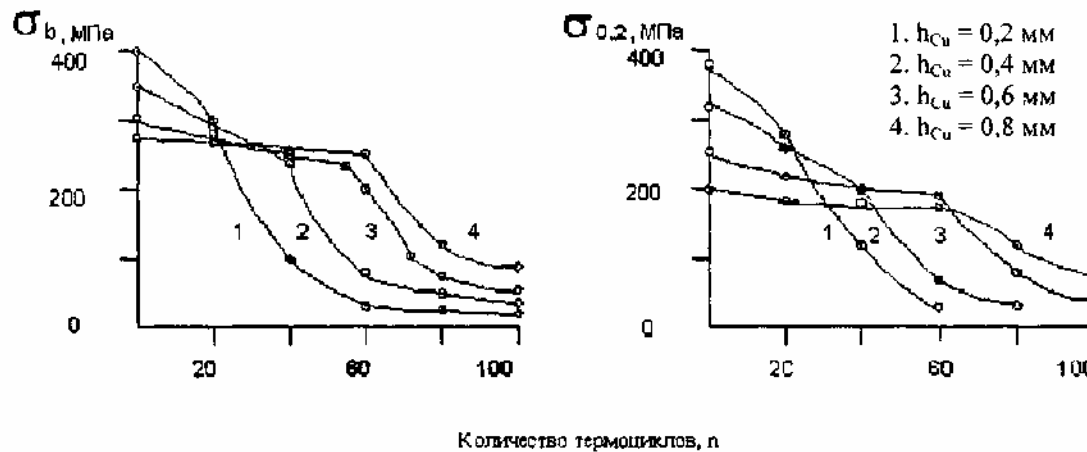


Рис. 1. Зависимость предела прочности и предела текучести кольцевых образцов, вырезанных из плит СКМ титан-сталь X18H10T, от толщины прослойки меди и числа циклических нагревов в интервале температур  $150 \leftrightarrow 900$  °С.

Термоциклирование цилиндрических образцов с внешним диаметром 14 мм и внутренним – 10,2 мм проводили в вакууме в печи сопротивления. Нагрев и охлаждение образцов происходили за счёт теплового излучения. Продолжительность одного полного цикла составляла 35 мин. О разупрочнении образцов после термоциклических нагревов судили по результатам одноосного нагружения на разрывной машине “Instron” образцов, прошедших определённое число теплосмен. Структуру СКМ, перераспределение сопутствующих примесей и микродобавок в прослойке, а также динамику образования микропор и микротрещин определяли на металлографических шлифах, как внешней поверхности, так и сечений образцов.

Как видно из рис. 1, прочность биметалла зависит от толщины прослойки меди. Следует отметить, что биметаллические образцы СКМ титан - сталь без прослойки меди разрушаются после 3–5 циклических нагревов по режиму  $150-900$  °С. Наличие прослойки меди, выполняющей роль “демпфера”, существенно повышает термоциклическую прочность биметалла [4]. При толщине медной прослойки 2,0–1,5 мм прочность соединения на отрыв составляет 22–24 кг/мм<sup>2</sup>, что соответствует пределу прочности при одноосном нагружении образцов из меди. С уменьшением толщины прослойки прочность на отрыв возрастает. Так, при толщине прослойки меди 0,5–0,6 мм прочность на отрыв возрастает до

32–34 кг/мм<sup>2</sup>, при толщине 0,1–0,15 мм – до 40 кг/мм<sup>2</sup>. Такая зависимость свойств биметалла от толщины демпфирующей прослойки связывается с особенностями возникающего напряжённого состояния [5]. Подобная зависимость прочности от толщины медной демпфирующей прослойки сохраняется и после воздействия теплосмен, однако абсолютные значения прочности снижаются: после 20 теплосмен – на 10–14 %, после 40 теплосмен – на 20–30 % по сравнению с таковой исходных образцов.

С увеличением числа теплосмен происходит дальнейшее снижение предела прочности. После 70–80 теплосмен на образцах с прослойками меди 0,1–0,3 мм отмечается резкое падение прочности до 4–8 кг/мм<sup>2</sup>, на образцах с толщиной прослойки меди 0,7–2,0 мм прочность составляет 50–60% прочности.

У образцов, прошедших определённое число термоциклов, проявляется отклонение величины геометрических параметров от их исходных значений. Наибольшее формоизменение претерпевает демпфирующая прослойка: наружный и внутренний диаметр кольца из меди у границы медь-титан увеличены, а у границы медь-сталь – уменьшены по сравнению с исходными значениями. Формоизменение основных составляющих (титана и стали) незначительно. Независимо от толщины демпфирующей прослойки из меди формоизменение увеличивается с ростом числа теплосмен после

равного числа термоциклов: формоизменение тем больше, чем меньше толщина медного слоя.

Микроструктурные исследования проявляют связь между структурными изменениями композита и его разупрочнением в процессе воздействия на него переменных тепловых полей и позволяют экспериментальные данные рассматривать с позиций влияния градиентов внутренних напряжений в композите на атомарные процессы, определяющие кинетику развития термоусталости. С уменьшением толщины демпфирующего слоя градиент напряжений возрастает, что ведёт к интенсификации процессов образования его структурных повреждений и необратимых пластических деформаций, перераспределению "вредных" сопутствующих примесей и накоплению избыточных вакансий.

Рассмотренные зависимости развития термоусталости СКМ от различных факторов дают возможность управлять его термоциклической прочностью через повышение структурной стабильности демпфирующей прослойки, через снижение в ней содержания "вредных" сопутствующих примесей и концентрации избыточных вакансий.

В новых отраслях техники для снижения содержания "вредных" примесей всё более широкое применение находят полуфабрикаты из чистых сортов меди. Наряду с известными положительными свойствами, высокочистая медь имеет ряд недостатков.

Снижение общего количества примесей высокочистой меди вызывает естественное снижение температуры её рекристаллизации. Она проявляет пониженные прочностные свойства, обладает неравномерной крупнозернистой структурой. Высокотемпературная обработка деталей или многократное циклическое температурное воздействие, в сочетании с возникающими напряжениями при эксплуатации изделий, приводят к неконтролируемому росту зёрен, что в свою очередь, особенно при вибрациях, ведёт к потере формы и нарушению герметичности материала по границам зёрен.

Разработанные в НИЦ ХФТИ микролегированные медные сплавы, благодаря использованию при их производстве микродобавок химически активных элементов, кроме высокой проводимости и высоких вакуумных свойств обладают повышенными механическими свойствами, повышенной термочувствительностью, однородной квазиизотропной структурой, повышенной коррозионной стойкостью [6-7]. Использование микролегированной меди в качестве демпфирующей прослойки в СКМ титан-сталь даёт возможность в 1,7-3,5 раза повысить его термоциклическую выносливость [8]. Табл. 1 иллюстрирует термоциклическую выносливость СКМ титан-сталь с различными барьерными и демпфирующими прослойками из микролегированной меди и ниобия.

Таблица 1

Термоциклическая стойкость СКМ титан-сталь

Прослойки	Толщина прослойки		Число термоциклов		
			до разупрочнения на %		до образования трещины на внешней цилиндрической поверхности образца
	Nb	Cu	20	50	
Медь-НВЧ1	0,3	0,3	17	27	35
Медь+скандий - ниобий+скандий	0,2	0,1	10	17	30
	0,2	0,2	51	73	105
	0,2	0,6	54	73	105
	0,2	1,0	55	73	105
	0,2	1,2	55	73	105
	0,2	1,8	17	28	35
Медь+иттрий - ниобий+диспрозий	0,1	0,6	10	29	41
	0,2	0,6	38	52	75
	1,0	0,6	38	55	77
	1,2	0,6	36	51	71
	1,4	0,6	18	29	39

Табл. 1 позволяет заключить, что введение в состав СКМ демпфирующей прослойки из микролегированной меди, содержащей в своём составе в качестве микродобавки один или несколько элементов из группы: скандий, иттрий, редкоземельные металлы, цирконий, алюминий, бор, хром, олово или фосфор – и прослойки из микролегированного ниобия, содержащего в качестве микродобавки один или несколько элементов из группы: скандий, гольмий, диспрозий, неодим, празеодим, гадолиний, цирконий, бор – и фиксация толщин прослоек в интервале толщин от 0,2 до 1,2 мм приводит к повышению термоциклической выносливости в 1,7 – 3,5 раза.

В НИЦ ХФТИ освоено изготовление СКМ типа титан-сталь на вакуумном прокатном стане ДУО-170. Изготовлены опытно-промышленные партии композиционного материала с использованием в качестве барьерных и демпфирующих прослоек микролегированной меди и ниобия, исследованы физико-механические свойства и работоспособность композитов в опытных конструкциях.

*Работа выполнена при поддержке Научно-технологического центра Украины, проект № 1760.*

#### Библиографический список

1. Лопата А.Т., Неклюдов И.М., Шевченко С.В. Термоциклическая биметалла цирконий – сталь для переходниковых элементов // Вопросы атомной науки и техники. Труды конференции: Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике. – Харьков, 1999.
2. Тронь А.С., Забашта Л.А., Лопата А.Т. Влияние циклических нагревов на свойства соединений разнородных металлов // Проблемы прочности.– 1975.– №12.– С. 57.
3. Амоненко В.М., Эпов Г.А., Тронь А.С. Освоение технологии получения высокопрочных биметаллических плит титан-сталь прокаткой в вакууме // Электронная техника. – Сер. 6. – Материалы. – 1973.– Вып. 5. – С. 39.
4. Иванов В.Е., Амоненко В.М., Тронь А.С. Свойства соединений титановых сплавов со сталью, полученных через тонкие металлические прослойки // ФиХОМ.– 1971.– №2.
5. Минаков В.П., Поляков Л.М., Тронь А.С., Механические свойства тонких медных прослоек в композициях // Проблемы прочности.–1975.–№10. – С. 71-74.
6. Амоненко В.М., Тронь А.С., Шевченко С.В. Сплав на основе меди.– А.с. №1203919 от 8.09.1985.
7. Шевченко С.В., Неклюдов И.М., Лопата А.Т. Сплав на основе меди // Патент НИЦ ХФТИ.- 10.03.95.– Бюл. № 7.
8. Патент № 27789 Украина, МКИ В32 В15/01. Слоистый композиционный материал / Неклюдов И.М., Лопата А.Т., Шевченко С.В. (Украина). – 5 с. Опубл. 16.10.00. – Бюл. № 5.

УДК: 621.774.08:531.717.11/.12.[669.296

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРООТКЛОНЕНИЙ НАРУЖНОЙ И ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛ ИЗ СПЛАВА ЦИРКОНИЯ

*В.С. Вахрушева, Д.Е. Кузнецов*

г. Днепропетровск, Государственный трубный институт

*Долговечность работы оболочек тепловыделяющих элементов является одной из наиболее актуальных проблем, определяющих эффективность работы атомных энергетических установок. Повышение цен на углеводородные материалы, возрастающие проблемы в угледобывающей промышленности, сложность практической реализации проектов, связанных с альтернативными источниками энергии, и ряд других причин заставляют искать технические решения, способные повысить работоспособность оболочек ТВЭЛ. В докладе излагаются некоторые результаты исследований, проводимых в Государственном трубном институте Украины по изучению закономерностей формирования поверхностей оболочечных труб из материалов различного типа, в том числе на основе сплавов циркония. Цель этих исследований состоит в создании технологий производства оболочечного материала, пригодного для работы при повышенных степенях выгорания ядерного топлива.*

**Постановка задачи исследований.** Как известно, назначение оболочки ТВЭЛ со-

стоит в предотвращении контакта между ядерным топливом и продуктами его распа-