

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТИТАНОВИХ СПЛАВОВ С PVD-ПОКРЫТИЯМИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Б.А. Ляшенко, А.Г. Трапезон, В.И. Мирненко, А.В. Рутковский

THE CYCLE STRENGTH OF TITANIUM ALLOYS WITH PVD-COATINGS UNDER HIGH-FREQUENCY LOADING AT NORMAL AND HIGH TEMPERATURES

B.A.Lyashenko, A.G. Trapezon, V.I. Mirnenko, A.V. Rutkovsky

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины

Abstract Research influence Ti, (TiAl)N, and (Ti)N PVD-coatings on cycle strength of titanium alloy (VT1-0 and VT-20) underby temperature of 350...640⁰C and frequency loading of 10 kHz are studied.

При эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) одна из основных причин возможного разрушения лопаток компрессора связана с циклической прочностью конструкционного материала, а именно термомеханической усталостью.

Одним из перспективных путей, направленных на повышение сопротивления термомеханической усталости элементов конструкций ГТД, является использование вакуум-плазменного метода нанесения защитных покрытий [1]. Тем не менее, несмотря на одновременное действие циклических напряжений и температуры (390...640⁰C), как разрушительного фактора, влияние вакуум-плазменных покрытий на сопротивление термомеханической высокочастотной усталости титановых сплавов не изучено полностью. На основании анализа исследований и публикаций установлено отсутствие обобщающих выводов и рекомендаций, используемых для их практического применения [2]. Так, некоторые авторы ограничиваются констатацией влияния покрытий на σ_{-1} [3], другие отмечают снижения этой характеристики в одном случае или ее неизменности во втором [4], третьи указывают на повышение сопротивления усталости за счет покрытия или "существенное его улучшение" [5]. Сложившееся положение, с одной стороны, представляется естественным из-за существующих расхождений в целях и концепциях, методиках, условиях и способах интерпретации экспериментальных результатов разными авторами, но и с другой стороны, эти обстоятельства подтверждают актуальность проблемы и необходимость ее дальнейшего изучения [6].

Целью настоящей работы является разработка технологического процесса нанесения вакуум-плазменных покрытий и исследование их влияния на циклическую прочность титановых сплавов в условиях повышенных температур (300...640⁰C). Для достижения этой цели проведено многокритериальную оптимизацию технологического процесса. Критериями оптимизации служили: предел выносливости, микротвердость и шероховатость поверхности.

В качестве технологии покрытий выбран метод PVD (физическое осаждение из парогазовой фазы). Технология нанесения включает три этапа: ионную очистку поверхности в импульсном режиме, плазмохимический синтез испаряемого материала в объеме камеры и на поверхности, а также конденсацию покрытия на детали. Использована и модернизированная установка ННВ-6,6-И1 типа «Булат» с одновременным распылением материалов из двух катодов (мишеней).

На образцы из титанового сплава BT20 для испытания на многоцикловую усталость наносили покрытия TiN, (TiAl)N и (TiC)N (всего 16 модификаций).

Шероховатость и микротвердость поверхности покрытия исследовали с помощью профилографа-профилометра и микротвердомера ПМТ-3. Рентгеноструктурное исследование вакуум-плазменных покрытий TiN, (TiC)N и (TiAl)N проводилось на рентгеновском дифрактометре ДРОН в фильтрованном медном Cu-K α излучении с последующим расчетом и расшифровкой дифрактограм. Остаточные напряжения рассчитывались за кривизной прямоугольного образца. Некоторые свойства покрытий представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Свойства вакуум-плазменных покрытий

Тип покрытия	Свойства PVD – покрытий			
	R _a , мкм	H _ц , МПа	Период решетки	Упрочняющая фаза
BT20	0,68	4650	-	-
TiN	0,3	8030	0,425 ₂	TiN, твердый раствор внедрения N в Ti
(TiAl)N	0,28	19844	0,422 ₆	TiN, твердый раствор замещения Ti Al и твердый раствор внедрения N в Ti
(TiC)N	0,37	13496	0,432 ₂ / 0,424 ₄	TiC, TiCN, TiN и твердый раствор внедрения N в Ti

Микроструктурные исследования PVD-покрытий проводились с помощью метода растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе-микроанализаторе «Camscan-4DV». Определение химического состава и распределения легирующих элементов по поверхности и глубине покрытий проводился на основе методики количественного микрорентгеноспектрального анализа ZAF-4/FLS с помощью дисперсного энергетического спектрометра LZ-5 и обработкой полученных результатов в компьютере системы «Link-860». В результате исследований установлено равномерное распределение по поверхности Ti, N, Al и C, а также упрочняющих фаз на основе соединений тугоплавких материалов Ti, Al, Ti, (TiAl)N и (Ti)N.

Сравнительные ускоренные термомеханические усталостные испытания титанового сплава BT20 с вакуум-плазменными покрытиями TiN, (TiC)N и (TiAl)N проводили на модернизированной магнитострикционной высокочастотной установке У-10. На базе существующей установки создан испытательный комплекс, который кроме известных элементов содержит камеру нагрева в виде полого эллиптического цилиндра, внутренняя поверхность которого зеркальная. В одном из фокусов цилиндра параллельно его образующей установлен источник инфракрасного излучения, который нагревает испытываемый образец, расположенный во втором фокусе эллипса. Данный комплекс обеспечен аппаратурой управления, контроля и регистрации результатов испытаний и позволяет исследовать материалы с покрытиями на усталость при температурах до 1000⁰С и частотой нагружения до 10 кГц.

Результаты экспериментальных исследований титанового сплава как без так с покрытиями TiN, (TiAl)N и (TiC)N термомеханическими высокочастотными испытаниями на усталость представлено на рис. 1, 2, 3 и 4.

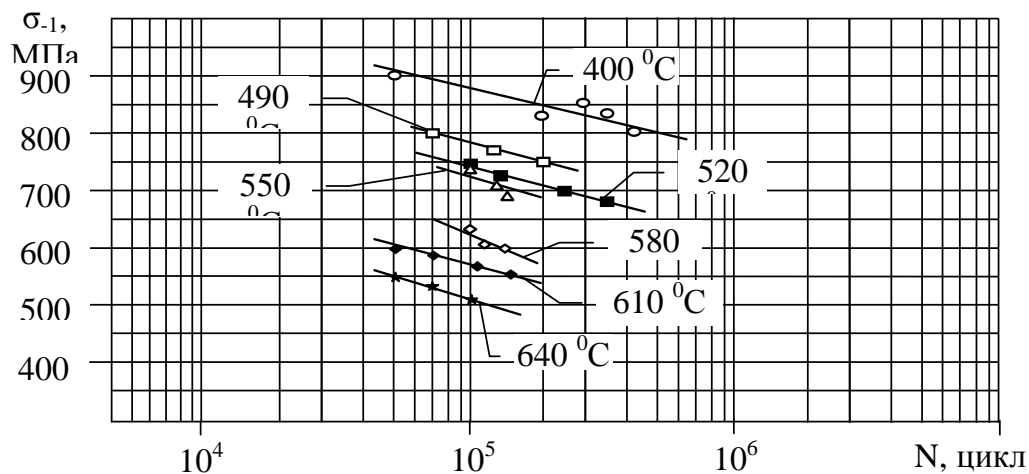


Рис. 1. Кривые усталости титанового сплава ВТ20 без покрытия.

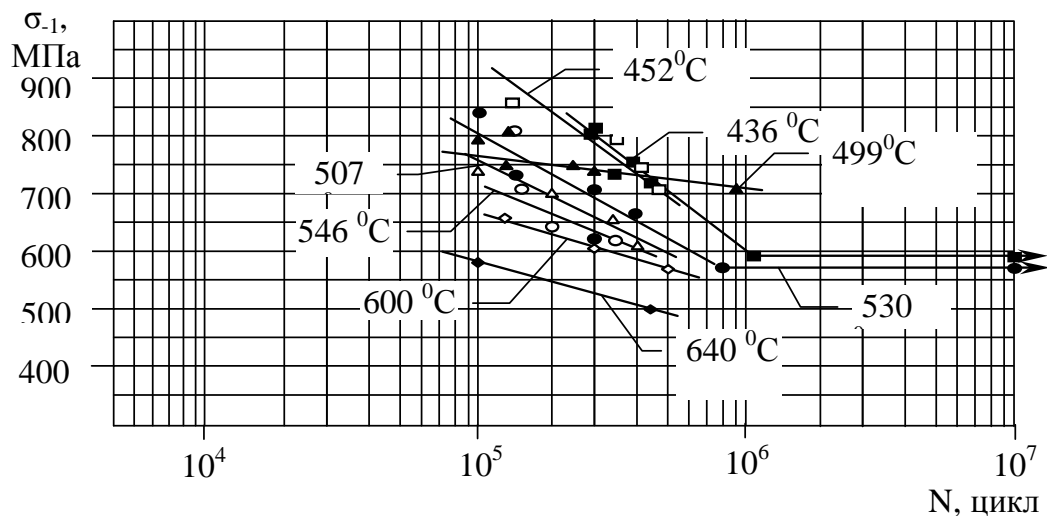


Рис. 2. Кривые усталости титанового сплава ВТ20 с покрытием TiN

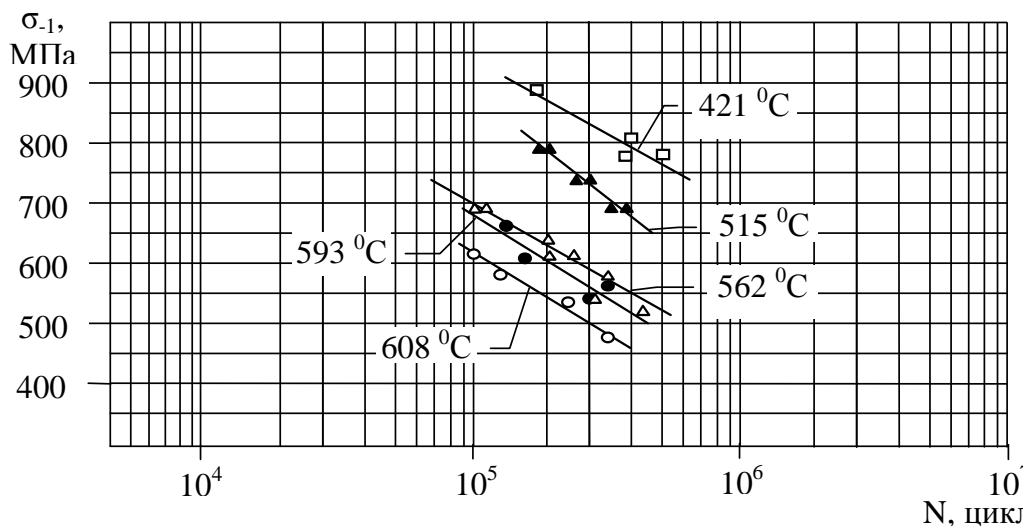


Рис. 3. Кривые усталости титанового сплава ВТ20 с покрытием (TiAl)N.

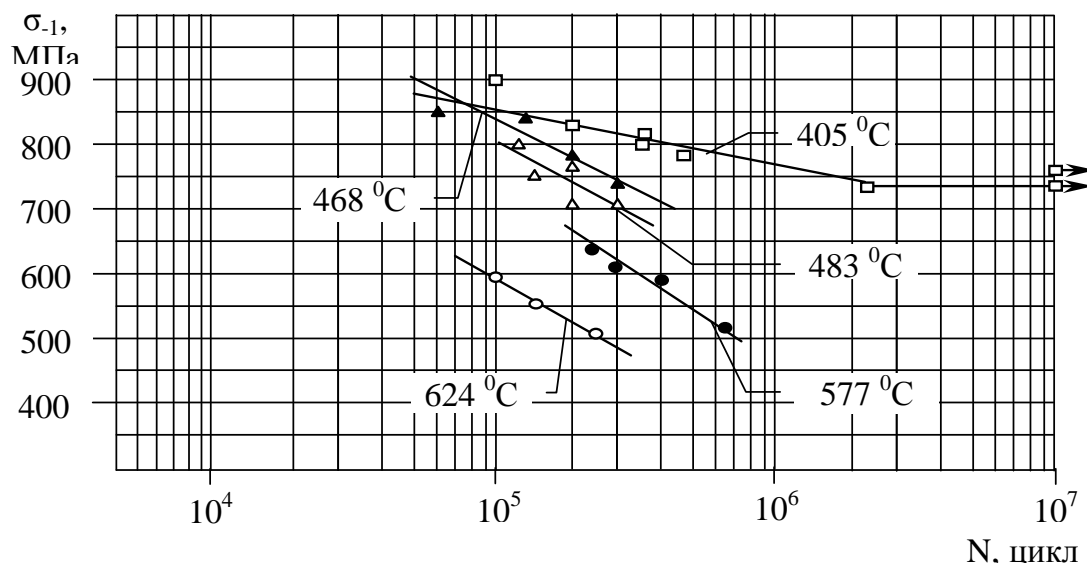


Рис. 4. Кривые усталости титанового сплава VT20 с покрытием (TiC)N.

Из графиков видно, что на количественные характеристики и вид кривой усталости титанового сплава VT20 сильно влияет температура окружающей среды. С повышением температуры испытания, начиная с 400°C, предел выносливости существенным образом уменьшается, причем горизонтальный участок на кривых усталости исчезает. Это обусловлено не только снижением характеристик статической прочности, но также и снижением прочности кристаллической решетки титанового сплава, переходом структуры в менее стабильное состояние и усиления отрицательного влияния окружающей среды. Активизируются диффузные процессы на поверхности титанового сплава под одновременным воздействием температуры и внешней среды, приводящая к появлению микроскопических поверхностных трещин, которые являются началом разрушения от усталости. На сопротивление усталости оказывает влияние, как количество циклов нагружения, так и время нахождения образца при высоких температурах в условиях циклического нагружения. Наличие вакуум-плазменных покрытий ограничивает скорость прохождения диффузных процессов и значительно влияет на повышение предела выносливости титанового сплава.

Кроме того, под влиянием температуры увеличивается угол наклона кривой. Дальнейшее повышение температуры приводит к еще большему наклону. Это вызвано усилением влияния ползучести титановых сплавов при высоких температурах. Пластические деформации, вызванные ползучестью, ускоряют процесс развития трещины от усталости и уменьшают число циклов, приводящих к разрушению. Так на рис. 1 наблюдаем, что кривые усталости титанового сплава без покрытия находятся в пределах $N=5 \cdot 10^4 \dots 4 \cdot 10^5$ циклов, а кривые усталости титанового сплава с покрытиями – $10^5 \dots 10^6$ циклов. При этом на рис. 2 и рис. 4 – до 10^7 циклов. Смещение кривых усталости титанового сплава с покрытиями можно объяснить увеличением сопротивления изотермической и термоциклической ползучести.

Известно, что остаточные напряжения сжатия осуществляют положительное влияние на повышение предела выносливости конструктивных материалов. Для подтверждения и определения такого влияния были проведены дополнительные экспериментальные исследования образцов из титанового сплава VT1-0 с покрытиями TiN, (TiAl)N и (TiC)N при комнатной температуре. Так, например, на рис. 5 представлены результаты испытаний в виде кривых усталости титанового сплава VT1-0 с покрытием (TiAl)N.

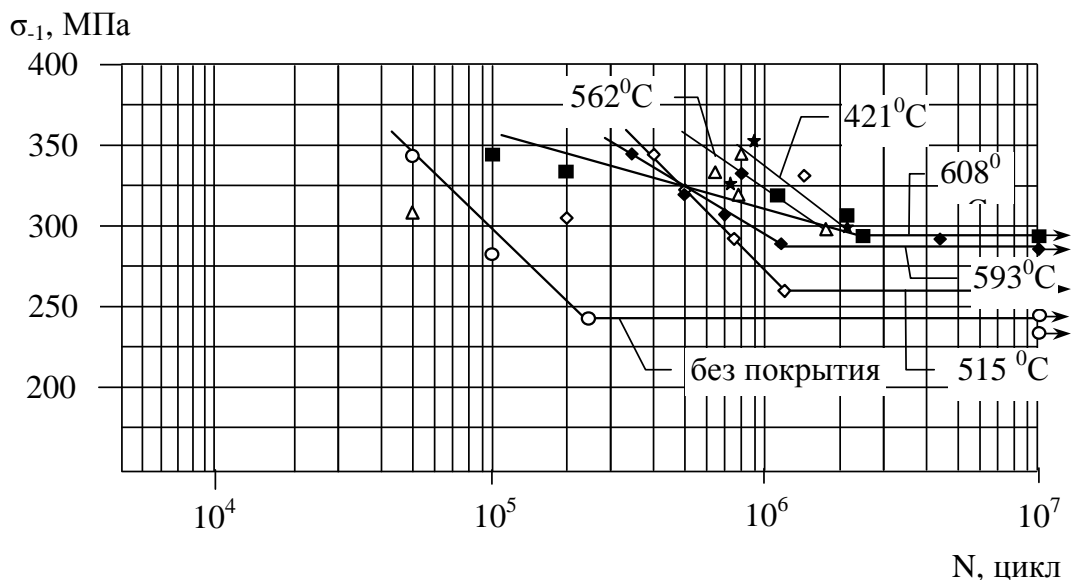


Рис. 5. Кривые усталости титанового сплава ВТ1-0 с покрытием (TiAl)N.

Сравнивая результаты определения остаточных напряжений и пределов выносливости установлено, что покрытие с большими сжимающими $\sigma_{ост}$ имеет $\sigma_{-1} = 300$ МПа, а покрытие с меньшими в 2 раза $\sigma_{ост} - \sigma_{-1} = 270$ МПа. Общее повышение σ_{-1} титанового сплава ВТ1-0 с покрытием (TiAl)N, в сравнении с Ti-сплавом ВТ1-0 без покрытия составляет 25%.

Анализируя усталостный излом титанового сплава ВТ20 как с покрытием, так и без покрытия, наблюдается три характерные зоны: гладкая притертая зона распространения трещины; зона кристаллического излома, возникающая при хрупком доламывании детали; промежуточный поясok "пористого строения", разделяющий две предшествующие зоны. Наличие на поверхности образца покрытия уменьшает зону кристаллического излома и увеличивает толщину гладкой притертой зоны при увеличении температуры.

Анализ характера развития усталостной трещины показывает, что усталостная трещина на титановом сплаве без покрытия начинается с поверхностного слоя и распространяется в глубину материала. При разрушении образцов из титанового сплава с покрытиями усталостная трещина возникает в приповерхностном слое и для своего развития ей необходимо разорвать межатомные связи в покрытии. Кроме этого, покрытия препятствуют прямолинейному развитию усталостной трещины.

Таким образом, благодаря технологическому процессу нанесения вакуум-плазменных покрытий удалось повысить предел выносливости при повышенных температурах – титана ВТ1-0 до 25%, а сплава ВТ20 на 15...20%.

Литература

1. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки // Сучасне машинобудування - 1999. - № 1. - С. 126-135.
2. Третьяченко Г.Н., Кравчук Л.В., Курият Р.И. Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния. - К.: Наукова думка, 1985. - 266 с.
3. Серенсен С.В., Гарф М.Э., Кузьменко В.А. Динамика машин для испытаний на усталость. - М.: Машиностроение, 1967. - 457 с.
4. Григорьев Ю.П. Сопrotивление материалов и строительная механика авиационных конструкций. - М.: Воен. издат., 1977. - 508 с.
5. Школьник Л.М. Скорость роста трещин и живучесть металла. - М.: «Металлургия», 1973. - 211 с.
6. Трошенко В.Т. Прочность материалов при переменных нагрузках. - К.: Наукова думка, 1978. - 176 с.