

Усталость титанового сплава VT20 с вакуум-плазменными покрытиями при высоких температурах

А. Г. Трапезон, Б. А. Ляшенко, Н. В. Липинская

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Исследовано влияние вакуум-плазменных покрытий TiN, (TiAl)N и (TiC)N на многоцикловую усталость титанового сплава VT20 в температурном интервале 350 ... 640°C при частоте нагружения 10 кГц. Установлено, что пределы выносливости сплава VT20 с указанными покрытиями толщиной около 6 мкм в данном температурном интервале повысились на 15...25% по сравнению с таковыми материала без покрытия. Показана возможность замены стальных лопаток титановыми с вакуум-плазменными покрытиями.

Ключевые слова: вакуум-плазменные покрытия, многоцикловая усталость, высокочастотное нагружение, высокотемпературные испытания.

Опыт эксплуатации газотурбинных установок (ГТУ) свидетельствует, что основными причинами разрушения их рабочих элементов является недостаточное сопротивление усталости, в частности термомеханической усталости, обусловленной процессом постепенного накопления повреждений в материале в условиях одновременного воздействия переменных нагрузок, агрессивной среды и температуры [1].

Широкие перспективы использования в качестве конструкционных материалов для газотурбинных установок имеют титановые сплавы благодаря их высокой удельной прочности в широком интервале рабочих температур. При 500...600°C данная характеристика сплавов выше, чем всех других конструкционных материалов, в том числе и жаропрочных сталей [2]. Однако их практическое применение ограничено ввиду недостаточной эрозионной стойкости и стойкости к высокочастотным виброн нагрузкам в условиях температур, больших 550°C. Поэтому одним из путей решения проблемы повышения работоспособности Ti-сплавов является нанесение покрытий. Кроме защиты от агрессивной окружающей среды они оказывают непосредственное влияние на поверхностное упрочнение деталей, поскольку с помощью традиционных методов упрочнения не всегда можно достичь ожидаемых результатов. Например, наклеп с повышением температуры может снижать усталостную прочность и тем сильнее, чем больше степень наклепа и продолжительность действия циклического нагружения [3]. Отделочно-упрочняющая поверхностная обработка находит все большее распространение [4–7], особенно вакуум-плазменные технологии [8, 9].

Мнения о влиянии покрытий на прочность основного материала противоречивые. Полагают [10], что механические свойства практически всех покрытий ниже, чем защищаемых сплавов, а их прочность при высоких температурах существенно уменьшается. Это отрицательно влияет на прочность основного материала, особенно значительно снижается сопротивление усталости. Для увеличения усталостной прочности применяют различные высокопрочные покрытия, наносимые физическим (PVD) и химическим (CVD) осаж-

дением паров в плазме [11]. Наносимые методом PVD TiSi-покрытия повышают сопротивление Ti-сплава VT8 распространению усталостной трещины и контактно-усталостному разрушению [12]. Для плазменных покрытий WC–CO рост усталостной прочности зависит от толщины покрытия. Предварительная дробеструйная обработка повышает предел выносливости на 20% [13].

Особый интерес представляют исследования механических свойств титановых сплавов в условиях высоких температур и разработка жаростойких покрытий на них, изучение деградации сплавов при окислении и горячей коррозии, а также защитного эффекта покрытий [14–20]. Термомеханическую и изотермическую усталость исследовали в температурном интервале 400...800°C при контроле полной деформации [15]. Изучали влияние дробеструйной обработки и ионной имплантации на сопротивление усталости при комнатной температуре и при 400°C. Отмечено [16], что наиболее существенное увеличение усталостной долговечности при больших числах циклов нагружения в результате упрочнения поверхности образцов достигнуто при повышенной температуре.

Изотермическое окисление покрытий исследовали при 750°C [17], влияние азотирования на окисление – при 1100...1300°C [14]. Исследовали влияние покрытий на изменение величины газонасыщенного слоя и термическую стабильность титановых сплавов в условиях эксплуатации [19]. Покрытия из Al₂O₃, нанесенные плазменным напылением, испытывали при термоциклировании в интервале температур 20...1000°C [20]. Установлено [18], что высококачественные покрытия необходимы для безопасного использования титановых сплавов в газотурбинных двигателях. Разработкой новых жаростойких покрытий занимаются такие научные центры, как НИИД (Россия), Los Alamos National Laboratory (USA) [19, 20].

Однако даже при обеспечении с помощью покрытий эффективной защиты от окисления остается проблема их растрескивания и отслоения, недостаточной термомеханической долговечности, невысокой стойкости при термоциклировании. Поэтому цель работы заключается в оценке влияния вакуумплазменных покрытий на многоцикловую усталость титанового сплава VT20 в диапазоне температур 350...640°C при частоте нагружения около 10 кГц.

Для исследования усталости использовали призматические консольные образцы толщиной 1 и длиной 35 мм из титанового сплава VT20 с вакуумплазменными покрытиями TiN, (TiAl)N и (TiC)N толщиной 5–7 мкм.

Сравнительные ускоренные термомеханические усталостные испытания титанового сплава VT20 с указанными покрытиями проводили на установке ННВ-6,6-И1 [21], на базе которой создан испытательный комплекс [22], который кроме известных элементов содержит камеру нагрева в виде полого эллиптического цилиндра с зеркальными внутренней поверхностью и торцевыми крышками. В одной из фокальных осей цилиндра параллельно его образующей установлен источник инфракрасного излучения, который нагревает испытуемый образец, расположенный во втором фокусе эллиптического цилиндра. Данный комплекс обеспечен аппаратурой управления, контроля и регистрации результатов испытаний и позволяет исследовать материалы с покрытиями на усталость при температурах до 1000°C и частоте нагружения 9...11 кГц. Фрагмент установки показан на рис. 1.

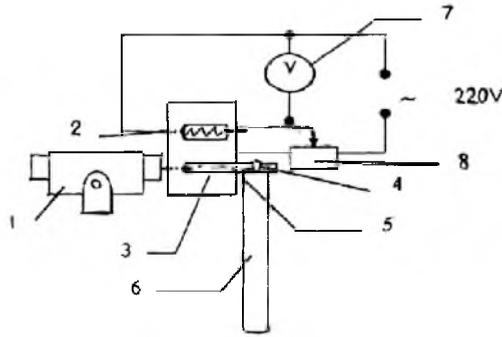


Рис. 1. Схема установки для исследования материалов на усталость в условиях повышенных температур и высокочастотного нагружения: 1 – микроскоп; 2 – трубчатый источник инфракрасного излучения; 3 – эллиптический цилиндр; 4 – винт крепления образца; 5 – образец; 6 – концентратор; 7 – вольтметр; 8 – реостат.

Для повышения эффективности установки была модернизирована также ее активная часть путем применения сменных акустических концентраторов, созданных на основе принципиально новых подходов [23]. Это обусловлено тем, что для усталостного разрушения образцов титанового сплава ВТ20, изначально обладающего повышенными прочностными характеристиками, требуются весьма высокие и труднодостижимые амплитуды колебаний. Данная модернизация позволила преодолеть эти трудности и обеспечить надежное проведение всего комплекса исследований.

Таким образом, с помощью установки для ускоренных высокочастотных и высокотемпературных испытаний на усталость можно исходя из результатов эксперимента прогнозировать работоспособность высокопрочных материалов, а следовательно, и деталей, которые могут эксплуатироваться при температурах до 1000°C и частотах нагружения до 10 кГц.

Установлено влияние вакуум-плазменных покрытий TiN, (TiAl)N, (TiC)N на сопротивление усталости титанового сплава ВТ20 при $T = 350...640^{\circ}\text{C}$ и частоте нагружения 10 кГц (рис. 2–5).

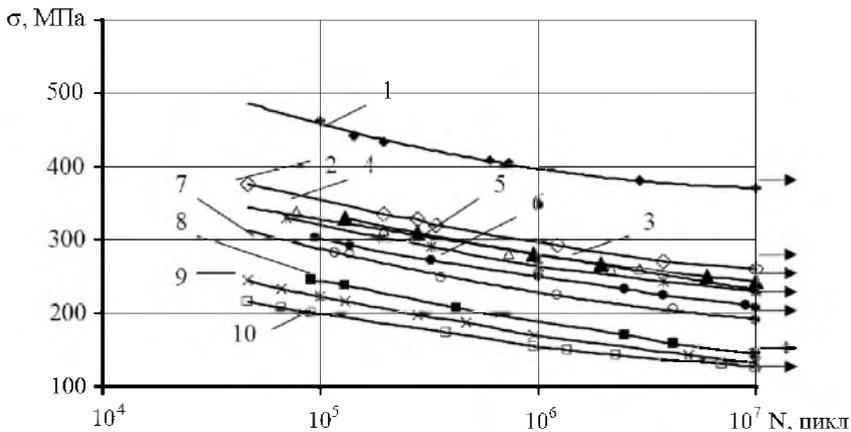


Рис. 2. Кривые усталости титанового сплава ВТ20 без покрытия: 1, \blacklozenge – $T = 20^{\circ}\text{C}$; 2, \diamond – $T = 400^{\circ}\text{C}$; 3, \blacktriangle – $T = 430^{\circ}\text{C}$; 4, \triangle – $T = 460^{\circ}\text{C}$; 5, $*$ – $T = 490^{\circ}\text{C}$; 6, \bullet – $T = 520^{\circ}\text{C}$; 7, \circ – $T = 550^{\circ}\text{C}$; 8, \blacksquare – $T = 580^{\circ}\text{C}$; 9, \times – $T = 610^{\circ}\text{C}$; 10, \square – $T = 640^{\circ}\text{C}$.

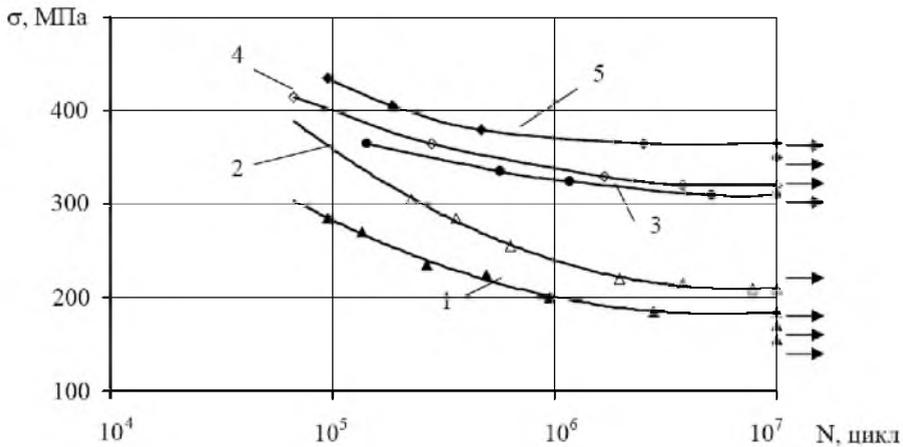


Рис. 3. Кривые усталости титанового сплава ВТ20 с покрытием (TiC)N: 1, ▲ - $T = 640^{\circ}\text{C}$; 2, Δ - $T = 590^{\circ}\text{C}$; 3, ● - $T = 473^{\circ}\text{C}$; 4, \diamond - $T = 456^{\circ}\text{C}$; 5, ◆ - $T = 390^{\circ}\text{C}$.

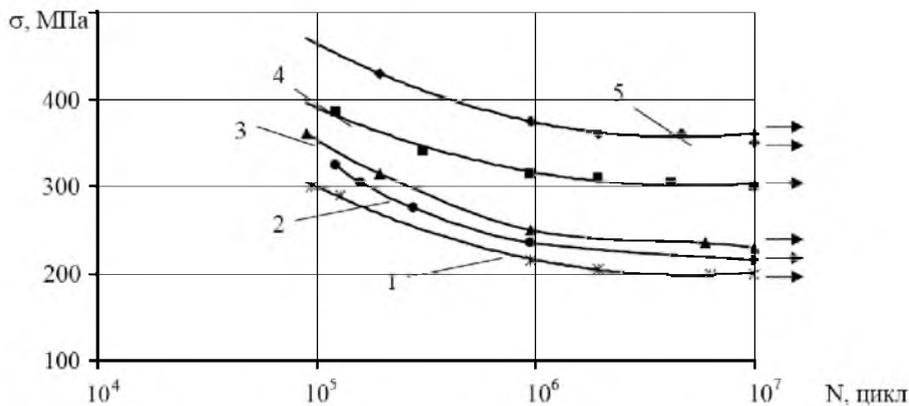


Рис. 4. Кривые усталости титанового сплава ВТ20 с покрытием (TiAl)N: 1, * - $T = 623^{\circ}\text{C}$; 2, ● - $T = 606^{\circ}\text{C}$; 3, ▲ - $T = 573^{\circ}\text{C}$; 4, ■ - $T = 506^{\circ}\text{C}$; 5, ◆ - $T = 406^{\circ}\text{C}$.

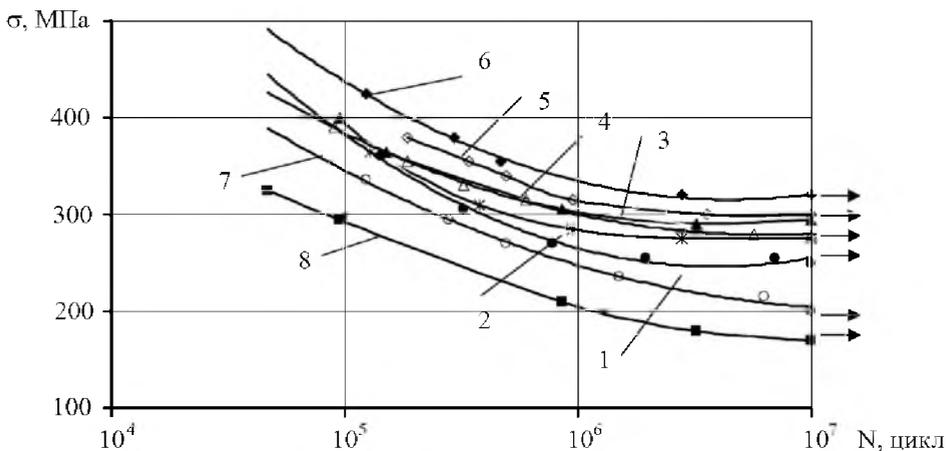


Рис. 5. Кривые усталости титанового сплава ВТ20 с покрытием TiN: 1, ● - $T = 566^{\circ}\text{C}$; 2, * - $T = 540^{\circ}\text{C}$; 3, Δ - $T = 498^{\circ}\text{C}$; 4, ▲ - $T = 490^{\circ}\text{C}$; 5, \diamond - $T = 423^{\circ}\text{C}$; 6, ◆ - $T = 440^{\circ}\text{C}$; 7, ○ - $T = 600^{\circ}\text{C}$; 8, ■ - $T = 640^{\circ}\text{C}$.

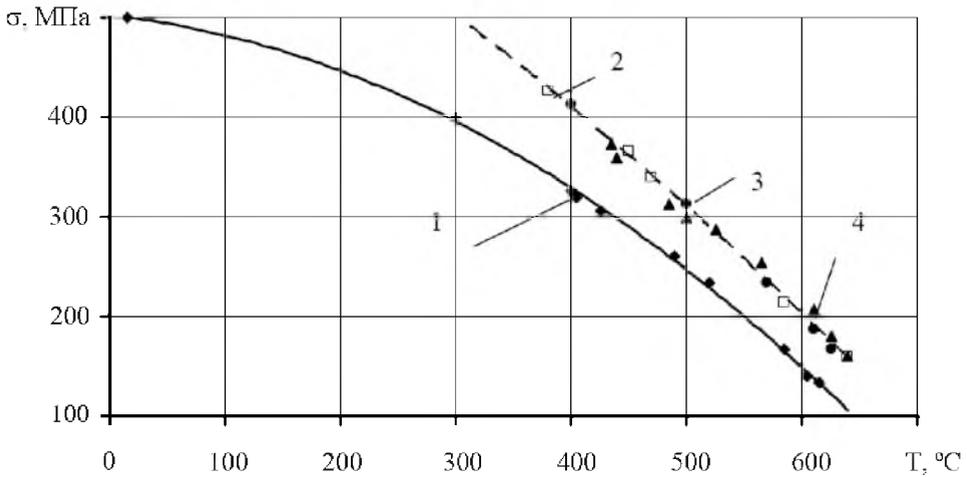


Рис. 6. Зависимость предела выносливости сплава BT20 без покрытия (1, \blacklozenge) и с покрытиями (TiC)N (2, \square), (TiAl)N (3, \bullet), TiN (4, \blacktriangle) от температуры.

Из рис. 6 видно, что в целом пределы выносливости сплава BT20 с покрытиями повысились на 15...25% по сравнению с пределами выносливости материала без покрытия.

Выводы

1. Исследованные вакуум-плазменные покрытия TiN, (TiAl)N, (TiC)N могут быть использованы для поверхностного упрочнения деталей ГТУ из титановых сплавов.

2. Покрытия обладают высокой твердостью, износо- и коррозионной стойкостью. При многократном повышении эрозионной и абразивной стойкости в пылевом газовом потоке [21], а также циклической прочности возможна замена стальных лопаток на последних ступенях компрессора титановыми с покрытием со значительным снижением веса ГТУ

3. Дальнейшее увеличение циклической прочности материалов с исследованными покрытиями возможно при оптимальном выборе компонентов композиционных покрытий и взаимосочетании их характеристик (толщина, пористость, порядок нанесения покрытий и т.п.).

Резюме

Досліджено вплив вакуум-плазмових покриттів TiN, (TiAl)N і (TiC)N на багаточислову втому титанового сплаву BT20 у температурному інтервалі 350...640°C при частоті навантаження 10 кГц. Установлено, що границя витривалості сплаву BT20 із такими покриттями товщиною біля 6 мкм в даному температурному інтервалі підвищилась на 15...25% в порівнянні з границею витривалості матеріалу без покриття. Показано можливість заміни сталених лопаток титановими з вакуум-плазмовими покриттями.

1. *Третьяченко Г. Н., Кравчук Л. В., Куриат Р. И.* Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния. – Киев: Наук. думка, 1985. – 226 с.
2. *Глазунов С. Г., Моисеев В. Н.* Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.
3. *Богуслаев В. А., Яценко В. К., Притченко В. Ф.* Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – Киев: Манускрипт, 1993. – 332 с.
4. *Ковалев А. П.* Технологическое управление состоянием поверхностного слоя деталей из титановых сплавов // Ракет.-косм. комплексы. – 2005. – № 2. – С. 19 – 25.
5. *Колеватов В. В.* Повышение несущей способности покрытий на титановых сплавах с помощью предварительного упрочнения ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 2. – С. 27 – 29.
6. *Копылов А. А., Векслер Ю. Г. и др.* Виброгазоабразивная износостойкость компрессорных лопаток турбин // Защита металлов. – 2000. – 36, № 2. – С. 215 – 217.
7. *Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др.* Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. – Запорожье: Изд. ОАО “Мотор Сич”, 2005. – 559 с.
8. *Будилов В. В., Мухин В. С., Минаева О. Б.* Защитные свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий на лопатках компрессоров ГТД // Авиац. пром-сть. – 1995. – № 3-4. – С. 41 – 45.
9. *Мухин В. С., Будилов В. В.* Принципы проектирования технологии вакуумной ионно-плазменной обработки деталей ГТД // Высокие технологии в машино- и приборостроении: Тр. конф. – М., 1993. – С. 42 – 44.
10. *Петухов А. Н.* Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
11. *Langlade C., Vannes A. B., Ledrappier F., et al.* Drawing of superficial fatigue behaviour map of PVD coatings of mechanical purpose // Tribology and Lubrication Engineering (14th Int. Colloq. Tribology, Ostfildern, Jan. 13–15, 2004). – Ostfildern: Techn. Acad. Esslingen, 2004. – 1. – P. 599 – 604.
12. *Бережницкая М. Ф., Ночовная Н. А., Эйзнер Б. А. и др.* Титано-кремниевые покрытия и их влияние на работоспособность деталей машин // Физ.-хим. механика материалов. – 1993. – 29, № 5. – С. 79 – 81.
13. *Hamai Sholrei.* Усталостные характеристики сплава Ti–10V–2Fe–3Al с покрытием из карбида вольфрама // Netsu Shori (J. Jpn. Soc. Heat Treat.). – 1993. – 33, No. 5. – С. 301 – 306.
14. *Thongtem S., Thongtem T., and McNallan M.* High-temperature nitridation and oxidation of Ti-based alloys // Surf. Interface Anal. – 2001. – 32, No. 1. – P. 306 – 309.
15. *Roth M. and Biermann H.* Thermomechanical fatigue behaviour of the γ -TiAl alloy TNB-V5 // Scr. Mater. – 2006. – 54, No. 2. – P. 137 – 141.

16. Yu Z. L., Li S. X., Liu Y. Y., et al. Effect of surface treatments on fatigue life of Ti-6-22-22 alloy at room and high temperatures // Mater. Sci. Eng. A. – 2004. – **383**, No. 2. – P. 283 – 288.
17. Cai Fei, Zhou Chungen, Xu Huibin, et al. Development and oxidation behaviour of Al-Cu-Fe quasicrystalline coating on Ti alloy // J. Mater. Sci. Technol. – 2004. – **20**, No. 6. – P. 713 – 715.
18. Gurappa I. Protection of titanium alloy components against high temperature corrosion // Mater. Sci. Eng. A. – 2003. – **356**, No. 1-2. – P. 372 – 380.
19. Логунов В. А., Алехин Н. Н., Дмитричева Н. А. и др. Разработка защитного покрытия для титановых сплавов, длительно работающих при температурах 300–600°C // Наука, производство и применение титана в условиях конверсии: I Междунар. науч.-техн. конф. по титану стран СНГ (М., 14–16 сент., 1994). – М., 1994. – Ч. 2. – С. 661 – 667.
20. Vaidya R. U., Zurek A. K., Castro R., et al. Alumina coated Ti-25Al-10Nb-3V-Mo for improved oxidation resistance // J. Adv. Mater. – 1994. – **26**, No. 1. – P. 16 – 22.
21. Ляшенко Б. А., Мірненко В. І., Рутковський А. В. та ін. Газообразивна стійкість титанового сплаву VT20 з вакуум-плазмовим покриттям // Пробл. трибології. – 2004. – № 2. – С. 142 – 148.
22. Трапезон О. Г., Мірненко В. І., Бондар А. В. Установка для дослідження матеріалів з покриттями на термомеханічну втому: Зб. наук. праць Нац. науково-дослідного центру оборонних технологій та військової безпеки України. – Київ: ННДЦ ОТ та ВБУ. – 2003. – № 20. – С. 101 – 105.
23. Трапезон К. А. Метод симметрий при расчете и проектировании акустических концентраторов // Акуст. вестник. – 2006. – **9**, № 4. – С. 50 – 55.

Поступила 24. 04. 2008