

Влияние поверхностной вакуум-плазменной обработки на сопротивление статическому и циклическому нагружению титанового сплава

А. П. Гопкало^а, А. В. Рутковский^а, В. И. Мирненко^б

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

^б Национальная академия обороны Украины, Киев, Украина

Представлены результаты экспериментальных исследований статической и циклической прочности титанового сплава VT20 с вакуум-плазменным покрытием TiN. Установлено, что такое покрытие повышает характеристики статической прочности и снижает характеристики пластичности. В условиях малоциклового нагружения нанесение покрытия приводит к росту характеристик циклической прочности при квазистатическом разрушении и к их снижению при усталостном разрушении.

Ключевые слова: напряжения, деформация, разрушение, циклическое нагружение, малоцикловая усталость, циклическая долговечность.

Введение. Весьма часто разрушение деталей начинается с поверхности. Поверхностный слой материалов играет исключительно важную роль в процессе их деформирования и разрушения, поскольку находится в особых энергетических условиях. Атомы и молекулы на поверхности имеют связи лишь со стороны основной части материала, поэтому их состояние неуравновешенное, они более активны и обладают избыточной энергией. В связи с этим создаются условия для взаимодействия поверхностного слоя с внешней средой. В поверхностном слое особенно сильно проявляются последствия механической, термической, химической и других видов обработки деталей в процессе их производства. Все эти факторы взаимосвязаны, и разделить их влияние на сопротивление материалов деформированию и разрушению чрезвычайно сложно, если возможно вообще.

Поверхностный слой материала формируется при изготовлении детали, в первую очередь при ее механической обработке (резание), а затем изменяется вследствие воздействий, которым она подвергается при последующей обработке и эксплуатации. Инициаторами разрушений являются макро- и микродефекты, остаточные напряжения на поверхности, особенности механических и физических свойств поверхностного слоя, коррозия, фреттинг-коррозия, высокотемпературная газовая коррозия, эрозия, износ и т.п. Работоспособность деталей в условиях эксплуатации обеспечивается благодаря выбору соответствующих конкретных условий эксплуатации материалов и технологии обработки поверхностного слоя (механическая, термическая, химико-термическая и т.п.), а также применению специальных технологий нанесения различных покрытий с использованием диффузионной, электронно-лучевой, плазменной, электроискровой, детонационной и др.

Процесс разрушения деталей начинается с локальных разрушений поверхностных слоев материала. Специфическое влияние поверхности на раз-

рушение детали заключается не только в наличии шероховатости и концентрации напряжений, но и в пластическом ее деформировании, которое в условиях однородного напряженного состояния начинается раньше, чем в сердцевине детали, вследствие особенностей механических и физических свойств поверхностных слоев. Проведенные экспериментальные исследования [1] показали, например, что в условиях однородного напряженного состояния предел текучести поверхностного слоя низкоуглеродистой стали на 25% ниже, чем основного металла, а согласно другим данным условный предел текучести самых тонких образцов составляет всего 20% этой величины толстых образцов. При этом на поверхности происходит пластическое течение, в то время как сердцевина находится в упругом состоянии.

В связи с этим для повышения прочностных свойств поверхности изделий на практике широко используются закалка токами высокой частоты, поверхностное пластическое деформирование, азотирование, цементация, различные покрытия металлическими и неметаллическими материалами, с помощью которых в поверхностном слое создают остаточные напряжения сжатия глубиной 30–200 мкм [2].

Известно, что различные покрытия на кристаллических поверхностях, например оксидные или металлические пленки, легированные слои или слои, полученные в результате химической реакции, повышают прочность многих кристаллов (эффект Роско) [3]. Пленки из металлических и неметаллических материалов кроме создания остаточных напряжений сжатия снижают концентрацию напряжений от поверхностных дефектов (залечивают дефекты) и блокируют выход дислокаций на поверхность.

В данной работе рассмотрено влияние вакуум-плазменных покрытий TiN толщиной 5–8 мкм на сопротивление кратковременному статическому и циклическому нагружению титанового сплава BT20. Ранее проведенные исследования показали, например, что вакуум-плазменная обработка образцов из стали X18H10T с покрытием TiN толщиной 10,5 мкм приводит к повышению условного предела текучести на 31% [4].

Образцы и испытательное оборудование. Испытанию подвергали образцы (размер рабочей части $30 \times 15 \times 1$ мм), вырезанные поперек проката из листа титанового сплава BT20, в исходном состоянии и с нанесенным вакуум-плазменным способом покрытием TiN [5].

Кратковременные статические и циклические испытания проводили на стандартной электрогидравлической машине 3201УЭ-20.

Циклические испытания осуществляли при осевом растяжении с контролем уровня максимальных и минимальных напряжений (“мягкий” режим нагружения) при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0$. При мягком режиме циклического нагружения в условиях циклического упругопластического деформирования в материале накапливаются в основном два вида повреждения: квазистатическое, обусловленное процессами ползучести (разрушение происходит в результате исчерпания исходной пластичности материала), и усталостное, связанное с пластическим деформированием в локальных зонах (разрушение происходит вследствие зарождения и развития трещины усталости до критического размера).

Перед испытаниями на рабочую часть образца устанавливали тензометр для измерения продольной деформации. В процессе циклического нагружения двухкоординатным графопостроителем записывались диаграммы циклического деформирования рабочей части образца. Испытания проводили при комнатной температуре с частотой циклического нагружения $f \approx 0,3$ Гц до полного разрушения образца (разделение на две части). По результатам испытаний строили кривые усталости.

Результаты испытаний и их обсуждение. Результаты кратковременных статических испытаний лабораторных образцов в исходном состоянии и с покрытием TiN представлены в таблице.

Механические свойства сплава ВТ20 в исходном состоянии и с покрытием TiN

Материал	σ_y , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %
ВТ20 исходный	1096,3	961,6	11,49	18,63
с покрытием TiN	1172,6 (+6,5)	1163,7 (+17,37)	9,33 (-18,8)	13,9 (-25,39)

Примечание. В скобках в процентах указано влияние покрытия TiN на соответствующие характеристики.

В целом можно отметить, что наличие покрытия TiN повышает характеристики кратковременной статической прочности материала при одновременном снижении характеристик пластичности, т.е. покрытие как бы “охлаждает” материал. Для образцов с покрытием диапазон напряжений на участке деформационного упрочнения составляет всего 8,9 МПа, в то время как для исходного материала – 134,7 МПа.

Результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов из титанового сплава в исходном состоянии и с покрытием TiN представлены на рис. 1. Видно, что кривые усталости в области долговечностей приблизительно до $(5...7) \cdot 10^3$ цикл имеют характерный перелом, который обусловлен переходом от квазистатического разрушения к усталостному. Вследствие упрочнения материала и снижения его исходной пластичности (охлаждение) при нанесении покрытия TiN точка перелома кривых усталости смещается в область меньших долговечностей. В исследованном диапазоне долговечностей значения циклических напряжений для кривой малоциклового усталости титанового сплава в исходном состоянии находятся в пределах участка деформационного упрочнения (рис. 2) в отличие от аналогичной кривой для этого же сплава, но с покрытием при напряжениях ниже условного предела текучести.

Характер кривой предельных значений остаточной деформации сплава ВТ20 как в исходном состоянии, так и при наличии покрытия TiN при усталостном разрушении (рис. 3) свидетельствует о том, что по мере снижения максимальных напряжений цикла величина остаточной деформации асимптотически приближается к нулю. По мере повышения уровня максимальных напряжений остаточная деформация также возрастает и стремится к предельным значениям исходной пластичности δ , определенным при

кратковременных статических испытаниях соответствующих типов образцов (без покрытия и с покрытием). При этом как по уровню приведенных напряжений, так и по величине реализованной исходной пластичности для исходного материала и материала с покрытием можно достаточно четко выделить зоны квазистатического и усталостного разрушения (рис. 4). Квазистатическому разрушению соответствуют значения реализованной пластичности, близкие к единице при значениях приведенных напряжений, соответствующих условному пределу текучести материала или превышающих его.

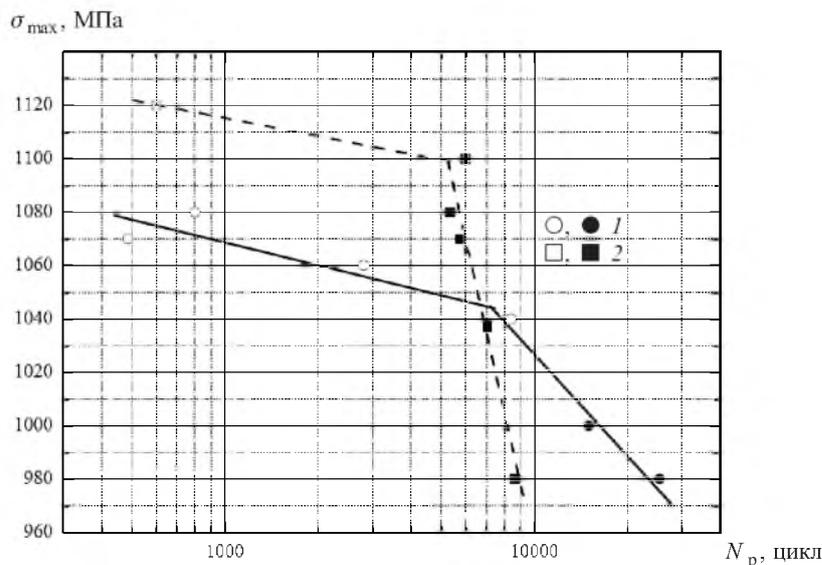


Рис. 1. Кривые малоциклового усталости сплава VT20 в координатах $\sigma_{max} - N_p$. (Здесь и на рис. 2-6: 1 – исходное состояние; 2 – покрытие TiN; светлые точки – квазистатическое разрушение, темные – усталостное.)

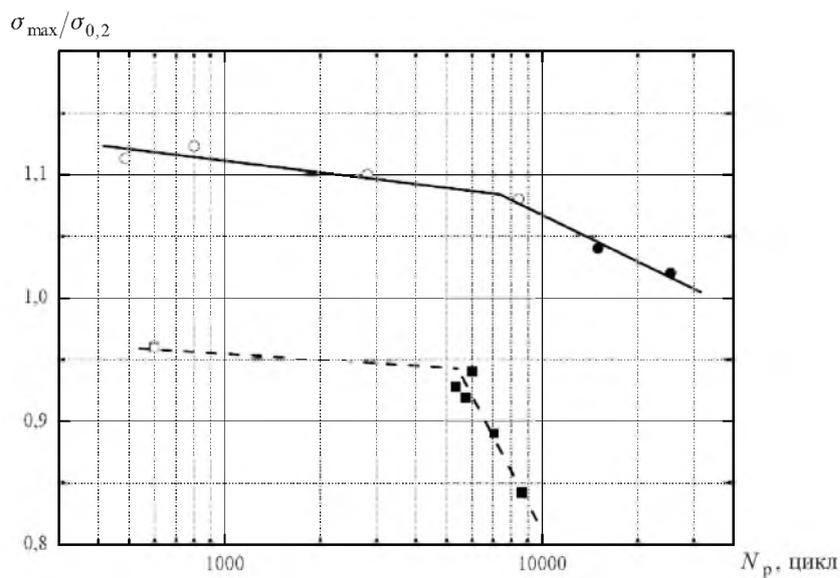


Рис. 2. Кривые малоциклового усталости сплава VT20 в координатах $\sigma_{max}/\sigma_{0.2} - N_p$.

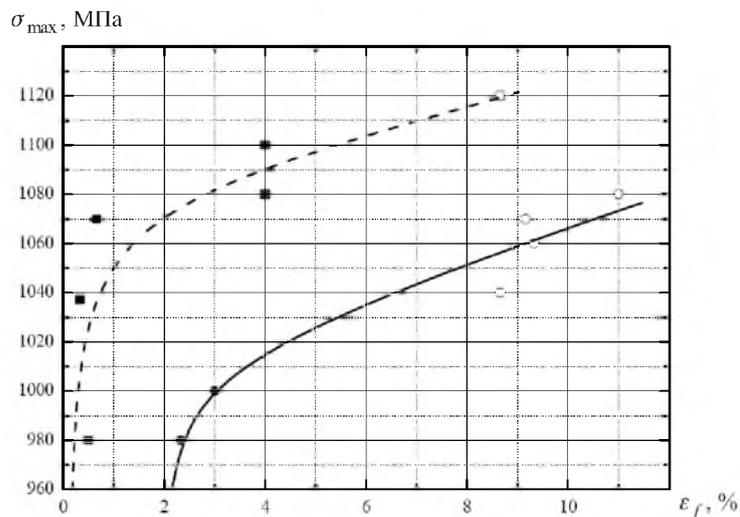


Рис. 3. Зависимость остаточной деформации сплава ВТ20 от уровня максимальных напряжений.

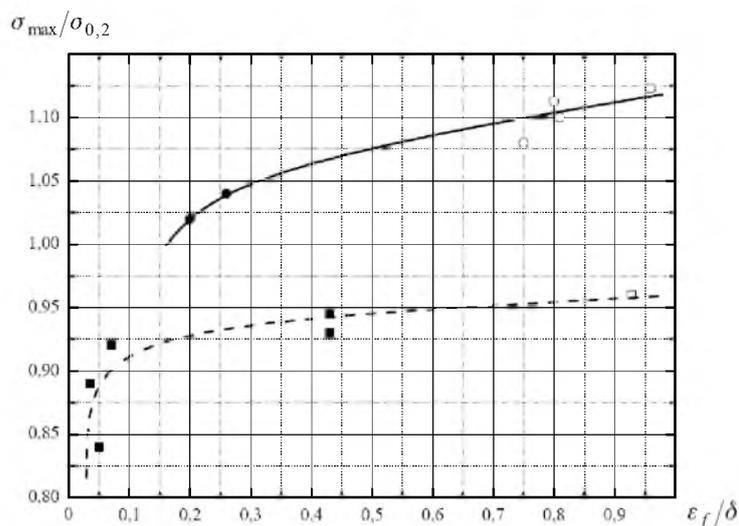


Рис. 4. Зависимость приведенной остаточной деформации от величины приведенных напряжений.

Результаты испытаний, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что в условиях малоциклового нагружения по мягкому режиму в материале одновременно протекают процессы накопления как статических, так и усталостных повреждений. Накопление статических повреждений связано с процессами ползучести материала, в этом случае окончательное разрушение происходит при реализации пластичности материала, близкой к исходной δ . Усталостное повреждение накапливается в локальных зонах на фоне пластического деформирования всего объема материала, и разрушение происходит по достижении усталостной трещиной критического размера, но при этом накопленная пластическая деформация не достигает критического значения δ (рис. 6).

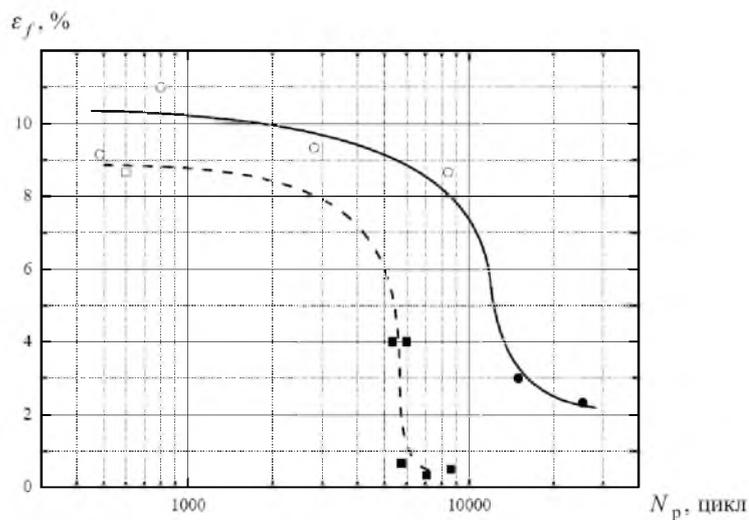
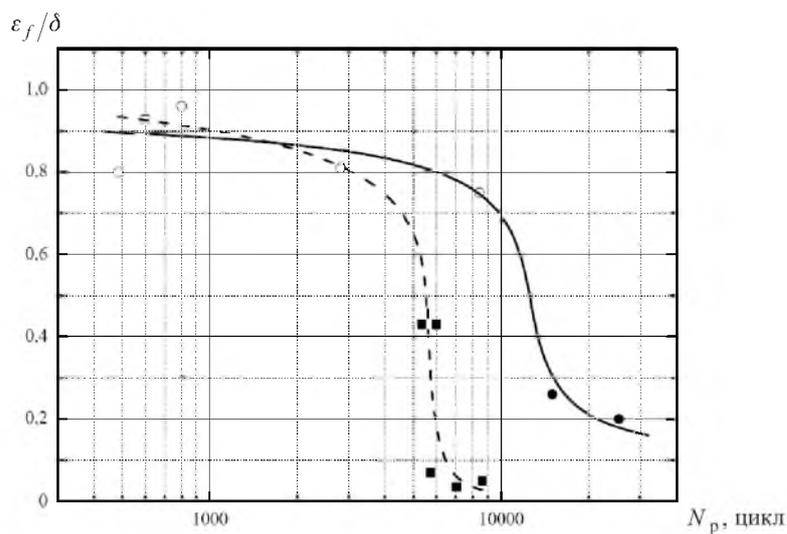


Рис. 5. Зависимость остаточной деформации сплава ВТ20 от числа циклов до разрушения.

Рис. 6. Кривые малоциклового усталости сплава ВТ20 в координатах $\varepsilon_f/\delta - N_p$.

Выводы

1. Нанесение вакуум-плазменным методом покрытия TiN повышает предел прочности и условный предел текучести исходного материала на 6,5 и 17,37% соответственно, снижая тем самым относительное удлинение на 18,8% и относительное сужение на 25,39%. Указанное обстоятельство свидетельствует о том, что вследствие нанесения вакуум-плазменного покрытия исследуемый материал “охрупчивается”, что приводит к уменьшению продолжительности участка деформационного упрочнения.

2. В условиях малоциклового мягкого нагружения покрытие TiN в области квазистатического разрушения повышает ограниченный предел выносливости на 4,7%. При этом чувствительность циклической долговечности к изменению напряжений в исследуемом диапазоне не изменяется.

3. В условиях усталостного разрушения вследствие охрупчивания материала зона перехода от квазистатического разрушения к усталостному смещается в область меньших долговечностей. При этом резко повышается чувствительность циклической долговечности к изменению напряжений (повышается склонность к хрупкому разрушению).

4. Благодаря нанесению вакуум-плазменного покрытия TiN на поверхность исследуемого титанового сплава ВТ20, работающего при малоцикловом нагружении с высоким уровнем упругопластического деформирования (до $(5...7) \cdot 10^3$ цикл), можно существенно повысить его циклическую долговечность. Это позволяет сделать оптимистический прогноз о возможности разработки методов ремонта деталей путем нанесения покрытий с целью повышения их ресурса и “залечивания” дефектов. Однако для исследуемого материала в области усталостного разрушения (в области долговечности выше $(5...7) \cdot 10^3$ цикл) нанесение вакуум-плазменного покрытия оказывает вредное влияние: охрупчивается материал, снижается число циклов до разрушения и повышается чувствительность циклической долговечности к изменению напряжений.

Резюме

Представлено результати експериментальних досліджень статичної та циклічної міцності титанового сплаву ВТ20 із вакуум-плазмовим покриттям TiN. Установлено, що таке покриття покращує характеристики статичної міцності та погіршує характеристики пластичності. В умовах малоциклового навантаження нанесення покриття призводить до підвищення характеристик циклічної міцності при квазістатичному руйнуванні та до їх зниження при руйнуванні від утомленості.

1. *Sato Y., Sasaki H., and Kumana A.* Surface layer yielding of low-carbon steel cylinders // *J. Mater. Sci. Soc. Jap.* – 1980. – **17**, No. 3/4. – P. 185 – 192.
2. *Гликман Л. А., Санфирова Т. П., Степанов В. А.* О возникновении остаточных напряжений первого рода при растяжении // *Журн. теорет. физики.* – 1949. – № 3. – С. 327 – 330.
3. *Харламов Ю. А., Будагьянц Н. А.* Физика, химия и механика поверхности твердого тела. – Луганск: ВУГУ, 2000. – 624 с.
4. *Гопкало А. П., Рутковский А. В., Ляшенко Б. А., Сорока Е. Б.* Об упрочняющей роли вакуум-плазменных покрытий // *Пробл. прочности.* – 1999. – № 6. – С. 123 – 127.
5. *Ляшенко Б. А., Мирненко В. И., Рутковский А. В.* Поверхностное упрочнение изделий из титановых сплавов для перспективных разработок // *Артиллерийское и стрелковое вооружение.* – 2004. – Вып. 2. – С. 50 – 52.

Поступила 20. 05. 2005