

ВЛИЯНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ НА КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ 20Х13

К.В. Вакуленко

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
Харьков, Украина*

E-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua; тел. +38(057)3494780, +38(057)7788986

Исследована сталь 20Х13 с многослойным вакуумно-плазменным покрытием в условиях циклического нагружения и одновременного воздействия коррозионной среды. Проведенные исследования выявили особенности характера разрушения образцов с покрытием и без покрытия и позволили сделать вывод о положительном влиянии покрытия на повышение усталостной прочности стали в коррозионной среде.

ВВЕДЕНИЕ

Коррозионная усталость металлов проявляется в случае одновременного воздействия на изделия из них циклических знакопеременных или знакопостоянных нагрузок и коррозионно-агрессивных сред. Коррозионно-усталостное разрушение представляет собой весьма опасный вид разрушения, встречающийся практически во всех отраслях техники и приводящий к резкому, иногда катастрофическому, снижению несущей способности деталей. Несущая способность деталей в условиях одновременного воздействия циклических нагрузок и агрессивных сред очень низкая, особенно, если они изготовлены из высокопрочных углеродистых и низколегированных сталей и были подвергнуты закалке [1].

Коррозионно-усталостному разрушению при определенных условиях подвержены все конструкционные металлы и сплавы, в частности сплавы на основе Fe, Cr, Ni, Ti, Al, Cu. Легирование сталей Cr, Ni и другими элементами, которое не переводит их в класс нержавеющих, в 100...1000 раз повышает их коррозионную стойкость в ненапряженном состоянии в нейтральных электролитах, но не оказывает существенного влияния на их коррозионную усталость. Коррозионная усталость может проявляться при циклическом деформировании металлов в растворах солей, щелочей, кислот, воде и даже во влажном воздухе.

Для коррозионной усталости характерным признаком является отсутствие истинного предела усталостной прочности, т. е. с увеличением числа циклов нагружения напряжения разрушения закономерно уменьшаются.

Для характеристики коррозионно-усталостной прочности металлов обычно используют такое понятие, как условный предел коррозионно-усталостной прочности, т. е. максимальную величину циклического напряжения, которое не вызывает разрушения детали (или образца) при заданном конечном числе циклов нагружения, а также время до разрушения при заданной величине циклических нагрузок.

Важным признаком коррозионной усталости является практически полное отсутствие корреляции между механическими характери-

стиками при статическом и циклическом нагружении в воздухе и условным пределом коррозионной усталости.

В настоящее время существует ряд гипотез, объясняющих механизм коррозионно-усталостного разрушения металлов. Среди них наибольшую известность и популярность получили электрохимическая и адсорбционно-электрохимическая гипотезы [2, 3, 4].

Существуют различные способы борьбы с коррозионно-усталостным разрушением [1]: подбор режима термообработки (для нержавеющих сталей); применение поверхностной закалки, поверхностного наклепа; ультразвуковая обработка в маслообразивной среде; термомеханическая обработка, а также так называемая обработка на белый слой.

Существенно улучшить коррозионно-усталостную прочность деталей можно также путем нанесения на их поверхность металлических и неметаллических покрытий. Из диффузионных покрытий наиболее эффективными являются покрытия, получаемые при алитировании, хромировании, цинковании и т. п. Нанесение таких покрытий в несколько раз повышает коррозионно-усталостную прочность углеродистых и легированных сталей в растворах солей, а при азотировании и цинковании условный предел коррозионной усталости находится на уровне предела усталости стали на воздухе. Положительное влияние на коррозионно-усталостную прочность могут оказывать борирование и ванадирование.

Однако при использовании защитных покрытий необходимо учитывать, что срок их функционирования ограничен конкретным ресурсом: после разрушения защитных слоев скорость разрушения в результате коррозионной усталости скачкообразно увеличивается.

Поэтому при рассмотрении влияния защитных покрытий на коррозионно-усталостную прочность металлов необходимо учитывать изменение остаточных напряжений, характер их распределения, прочность и циклическую прочность материала защитного слоя, соотношение электрохимических характеристик основного металла и материала покрытия и многие другие факторы.

Покрyтия (даже тонкие) могут быть эффективными в связи с тем, что разрушение основного материала на поверхности и в глубине его (под поверхностью) происходит по существу в разных условиях. Поверхностные атомы твердого тела хуже связаны со своими соседями по сравнению с атомами, расположенными в глубине материала. Поверхностные атомы имеют «свободные» (нереализованные связи), поэтому энергия их связи с твердым телом меньше.

На наш взгляд, покрытие может быть эффективным в том случае, если оно имеет хорошую адгезионную (или диффузионную) связь с поверхностью изделия. В случае хорошей адгезии покрытие может существенно повлиять и на процесс деформации и разрушения подповерхностных слоев, изменяя условия движения и размножения дислокаций по причине изменения поверхностной энергии, а также условия зарождения и развития трещин.

Следует отметить, что для обеспечения трещиностойкости покрытий, в общем случае, может оказаться весьма важным фактор их многослойности, поскольку известно, что высокоэнергетичные межфазные границы могут быть эффективными барьерами для распространяющихся трещин, особенно если за твердым и малопластичным слоем находится слой со значительной пластичностью. При этом важно обеспечить такую толщину слоев, чтобы каждый из них выполнял свою функцию наилучшим образом. В частности, малая толщина твердого слоя (порядка 1000 Å) за счет его высокого вклада поверхностной энергии в термодинамику покрытия обеспечивает твердому слою при прочих равных условиях меньшую склонность к хрупкому разрушению.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Долговременная работа при значительных тепловых и механических нагрузках и одновременном воздействии коррозионной среды характерна для большинства конструктивных элементов энергетического оборудования.

Поэтому материалы наиболее ответственных узлов энергетического оборудования должны иметь высокий уровень прочности в коррозионной среде, что могло бы обеспечить длительную и надежную работу оборудования в этих условиях эксплуатации.

Особую остроту вопросы надежности имеют для энергетического оборудования атомных электростанций в связи с очень высокими требованиями к безопасности ядерных установок.

Основными элементами ядерных установок, как известно, являются: реактор, парогенератор, турбина и турбогенератор.

Из основных проблем, касающихся деградации материалов и повреждаемости деталей системы турбина-турбогенератор, можно выделить следующие [5]:

- коррозионное растрескивание и коррозионную усталость роторов паровых турбин;

- эрозионно-коррозионное повреждение лопаток турбин и их растрескивание, а также эрозию других элементов турбин;

- разрушение от коррозионной усталости лопаток вентиляторов турбогенераторов;

- коррозию и процессы изнашивания трубок конденсаторов турбин и др.

Нами были исследованы характеристики многослойных вакуумно-плазменных покрытий трех различных составов и конструкций и установлены особенности их влияния на эрозионную стойкость в условиях кавитации образцов из стали 20X13, применяемой обычно при изготовлении лопаток паровых турбин АЭС [6]. По результатам этих исследований наилучшие свойства показало многослойное покрытие на основе хрома и сложного нитрида (TiCr)N, которое позволяет снизить скорость эрозии образцов при кавитационном воздействии почти в 2 раза.

Помимо требований по сопротивлению эрозии в условиях кавитации материал лопаток турбин должен противостоять воздействию коррозионной среды в условиях циклического нагружения. Поэтому цель настоящей работы состояла в исследовании влияния многослойного вакуумно-плазменного покрытия на основе хрома и сложного нитрида на коррозионно-усталостную прочность образцов из стали 20X13.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Образцы для усталостных испытаний были изготовлены из одной партии стали 20X13 (химический состав приведен в таблице), которая поступила в виде круга диаметром 24 мм в нормализованном состоянии (*HV* 175). Эскиз образца представлен на рис. 1.

Химический состав стали 20X13

Элемент	C	Mn	Si	Cr	Ni
Содержание, %	0,19	0,2...0,3	0,2...0,3	12...13	0,10

Термообработка осуществлялась по режиму, принятому для лопаток турбин, изготовленных из стали 20X13: нагрев до 1050 °С, выдержка 40 мин, закалка в масле с последующим отпуском на протяжении двух часов при 700 °С и последующим охлаждением в воде.

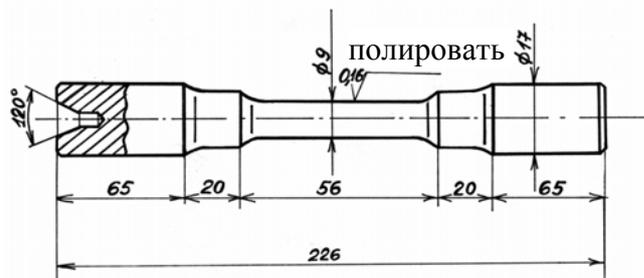


Рис. 1. Эскиз образца для усталостных испытаний

После термообработки рабочие поверхности образцов шлифовали и полировали. На подготовленную таким образом поверхность

образцов методом конденсации с ионной бомбардировкой, используя планетарный механизм вращения образцов, наносили многослойное вакуумно-плазменное покрытие. Покрытие представляло собой чередующиеся слои Cr малой толщины (0,1 мкм) и слои (TiCr)N толщиной 0,5 мкм (рис. 2). Общее количество слоев в покрытии – 20, общая толщина – 5 мкм, микротвердость – 5020...12870 МПа.

Испытаниям на коррозионную усталость при чистом изгибе с вращением образцы подвергались на машине типа МУИ-6000. Машина была переоборудована на частоту 50 Гц. Цикл нагрузки – симметричный. База испытаний составляла $2 \cdot 10^7$ циклов нагружения.

В качестве коррозионной среды применялся 3 % раствор NaCl, нагретый до температуры 80 °С.

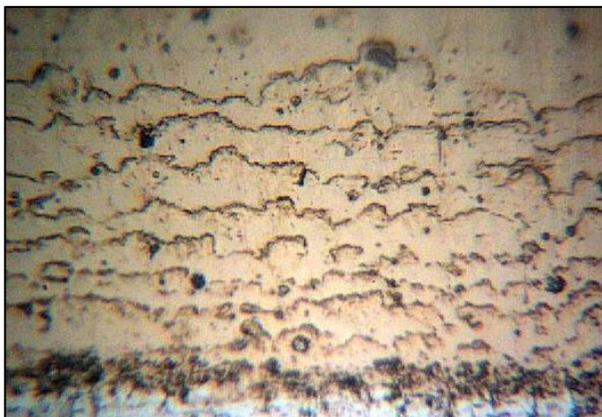


Рис. 2. Микроструктура покрытия Cr+(TiCr)N, (x2000)

При проведении коррозионно-усталостных испытаний использовали разъемное приспособление, которое состояло из ванночки со штуцером для слива жидкости, уплотнительной резиновой прокладки и крышки со встречной резиновой прокладкой.

В центре верхней части крышки закреплялась металлическая трубка с рассеивателем, который позволял распределять струю жидкости по всей рабочей поверхности образца. При этом образец омывался жидкостью постоянно. Ванночка закреплялась на корпусе машины. Жидкость нагревали с помощью термостата, что позволяло автоматически поддерживать заданную температуру жидкой среды и ее циркуляцию.

В процессе испытаний определялись ограниченный предел выносливости и ограниченная долговечность при перегрузках. Критерием окончания испытаний служило полное разрушение образца.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 3 представлены результаты усталостных испытаний образцов из стали 20X13 без покрытия в среде водопроводной воды при температуре 80 °С (кривая 1), а также в среде 3 % раствора NaCl в этой

же воде при такой же температуре (кривая 3). Здесь же приведены результаты испытаний образцов из стали 20X13 с покрытием в 3 % растворе NaCl также при температуре 80 °С (кривая 2).

Для образцов без покрытий влияние коррозионной среды проявилось в снижении предела выносливости с 210 до 90 МПа, причем для испытаний без NaCl характерна «классическая» кривая усталости, имеющая действительный предел усталости, в то время как для испытаний в среде 3 % раствора NaCl характерно монотонное уменьшение разрушающего напряжения с увеличением числа циклов нагружения, поэтому величина 90 МПа является условным пределом усталости (или пределом ограниченной выносливости) стали на базе 10^7 циклов.

Кривая, соответствующая стали с покрытием, лежит несколько выше кривой 3, при этом предел ограниченной выносливости σ_{-1} равен 110 МПа.

Исследование изломов образцов, разрушенных при высоких напряжениях (и соответственно малом количестве циклов нагружения), показало, что образцы как с покрытием, так и без покрытия разрушаются от поверхности. На образцах без покрытия в зоне начала деформации наблюдается небольшое количество крупных рубцов и ступенек, свидетельствующих о высокой степени перегрузки при симметричном изгибе. Зона усталостного разрушения отличается ускоренным развитием, а зона долома невелика. На образцах с покрытием наблюдается большое количество очагов начала деформации, а зона развития усталостного разрушения характеризуется множественными мелкими рубцами. Зона долома также небольшая.

Исследование изломов образцов, разрушенных при малых напряжениях (при большом количестве циклов нагружения), показало, что разрушение образцов как с покрытиями, так и без покрытий начинается с поверхности. Отличия разрушения в том, что образцы с покрытиями не имеют ярко выраженных рубцов и ступенек, а само разрушение происходит достаточно быстро.

На изломах образцов с покрытием наблюдаются зоны замедленного усталостного развития с четко выраженными волнообразно расположенными усталостными линиями.

ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты усталостных испытаний образцов с многослойным покрытием из хрома и сложного нитрида (TiCr)N в 3 % растворе NaCl в сравнении с результатами испытаний в таких же условиях образцов без покрытия свидетельствуют о том, что нанесенное покрытие приводит к повышению усталостной прочности образцов из стали 20X13. При этом несколько изменяется и сам характер разрушения образцов в сторону замедленного развития разрушения.

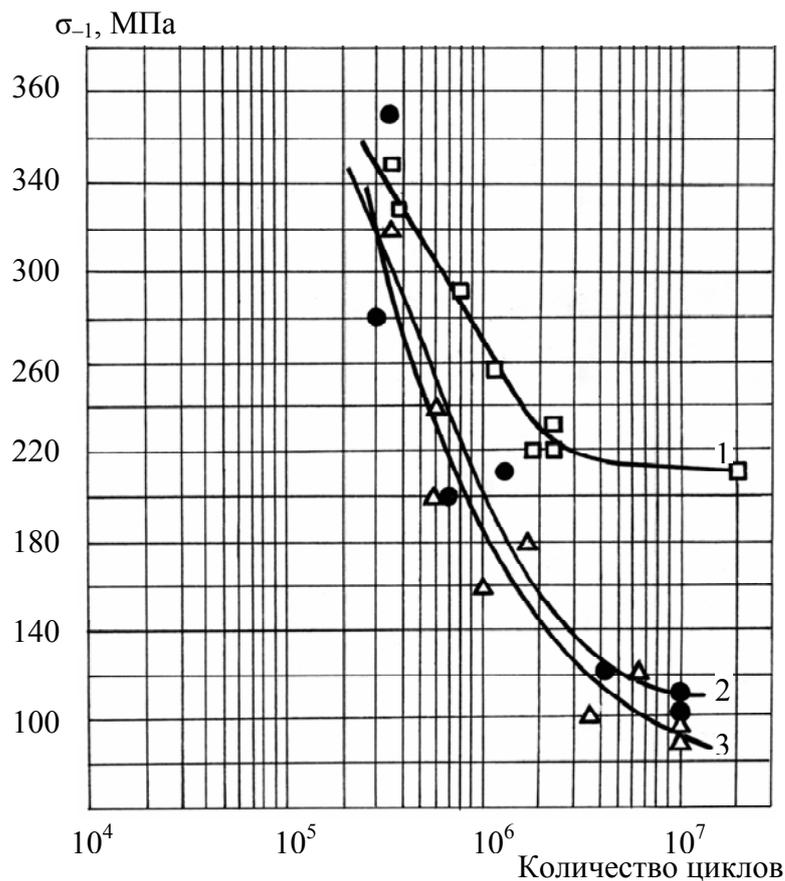


Рис. 3. Результаты коррозионно-усталостных испытаний:
 1 – образцы без покрытия в среде воды; 2 – образцы с покрытием в среде раствора NaCl;
 3 – образцы без покрытия в среде раствора NaCl

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.И. Похмурский. *Коррозионно-усталостная прочность сталей и методы её повышения*. Киев: «Наукова думка», 1974, 186 с.
2. Г.В. Карпенко. *Коррозия металлов и методы борьбы с ней*. М.: «Оборонгиз», 1955, 117 с.
3. В.И. Лихтман, П.А. Ребиндер. *Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов*. М.: Изд-во АН СССР, 1954, 167 с.

4. Г.В. Карпенко. *Прочность стали в коррозионной среде*. М.-К.: «Машгиз», 1963, 128 с.
5. Р.К. Мелехов, В.И. Похмурский. *Конструкційні матеріали енергетичного обладнання*. Київ: «Наукова думка», 2003, 384 с.
6. В.М. Мацевитый, И.Б. Казак, К.В. Вакуленко. Особенности эрозии образцов с многослойными покрытиями в условиях кавитации // *Проблемы машиностроения*. 2007, №5, с. 72-78.

Статья поступила в редакцию 06.03.2012 г.

ВПЛИВ БАГАТОШАРОВОГО ПОКРИТТЯ НА КОРОЗІЙНО-ВТОМНУ МІЦНІСТЬ СТАЛІ 20X13

К.В. Вакуленко

Досліджена сталь 20X13 з багат шаровим вакуумно-плазмовим покриттям за умов циклічного навантаження і одночасної дії корозійного середовища. Проведені дослідження виявили особливості характеру руйнування зразків з покриттям і без покриття і дозволили зробити висновок про позитивний вплив покриття на підвищення втомної міцності сталі в корозійному середовищі.

EFFECT OF MULTILAYER COATINGS ON CORROSION-FATIGUE STRENGTH OF STEEL 20CH13

K.V. Vakulenko

20Ch13 steel was investigated with multiplayer vacuum-plasma coating under cyclic loading and the simultaneous action of corrosive media. Our studies have revealed the particular nature of the destruction of the samples coated and uncoated, and led to the conclusion about the positive effect of coating on the increase in fatigue strength of steel in corrosive environments.