

Клевцов Г.В., Клевцова Н.А., Ильичев Л.Л., Фесенюк М.В., Фролова О.А.,
Гражданкин Р.А., Терентьев А.А.
Оренбургский государственный университет

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ, НАНЕСЕННОГО ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ, НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 20

В настоящей работе изучали влияние ионно-плазменного покрытия (TiN) на усталостную прочность образцов из стали 20. Ионно-плазменное покрытие наносили как при температуре фазового превращения, так и при температурах, отличных от температуры фазового превращения. Показано, что максимальная усталостная прочность образцов из стали 20 имеет место в случае нанесения ионно-плазменного покрытия при температуре фазового превращения (727 °С).

Введение

В настоящее время ионно-плазменные покрытия широко используются не только для повышения износостойкости и коррозионной стойкости металлорежущего и деформирующего инструмента, но и для повышения усталостной прочности деталей в машиностроении и других областях техники [1]. Эффект от нанесения покрытия зависит не только от свойств самого покрытия, но и от прочности связи покрытия с поверхностью образца, т. е. адгезионной прочности покрытия.

В настоящей работе изучали влияние ионно-плазменного покрытия (TiN) на усталостную прочность образцов из стали 20. Принимая во внимание ранее описанный эффект залечивания дефектов, наблюдаемый на поверхности образцов при температуре фазового перехода [2], ионно-плазменное покрытие наносили как при температуре фазового превращения, так и при температурах, отличных от температуры фазового превращения.

Методики исследования

На призматические образцы из стали 20 размерами 2x5x150 мм для усталостных испытаний наносили ионно-плазменное покрытие нитрида титана (TiN) при температуре 727 °С (температура эвтектоидного превращения в стали), а также при температурах, отличных на 10 °С выше и ниже температуры фазового превращения, т. е. при 717 и 737 °С.

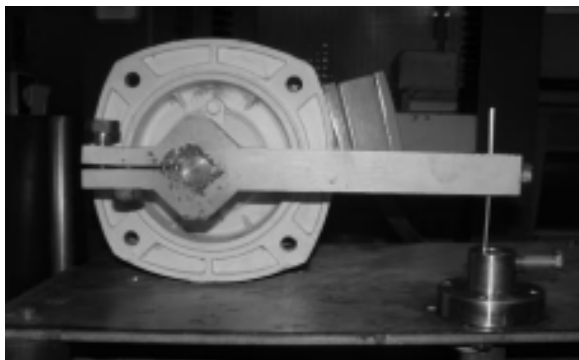
Исследования покрытий проводили в растровом электронном микроскопе

JSM-T20. Для оценки адгезионной прочности покрытий проводили вдавливание в поверхность образцов с покрытием алмазного индентора микротвердомера ПМТ-3. В случае высокой хрупкости покрытия и недостаточно высокой адгезионной прочности должно наблюдаться активное трещинообразование и отслоение покрытий от подложки. При достаточной пластичности и высокой адгезионной прочности покрытия трещинообразование должно отсутствовать [1].

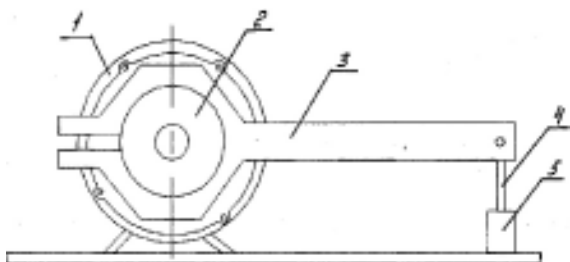
Усталостные испытания образцов как с покрытием, так и без покрытия проводили на специально разработанной установке (рис. 1). Испытания проводили при комнатной температуре с частотой нагружения 23 Гц при симметричном цикле нагружения и жесткой схеме испытания [3]. В процессе испытания определяли общее количество циклов нагружения до разрушения образцов. Кроме того, с помощью измерителя акустического сигнала (ИАС-3) фиксировали количество циклов нагружения до появления макротрещины в образцах. При каждой температуре испытывали 3-5 образцов.

Макрофрактографическое строение усталостных изломов изучали визуально или при небольшом увеличении. Длину зоны усталостного развития трещины l_f на поверхности изломов [4] в направлении распространения трещины измеряли штангенциркулем с абсолютной погрешностью 10^{-4} м. Микрофрактографические исследования усталостных изломов проводили в растровом электронном микроскопе JSM-T20 при различном увеличении.

а)



б)



1 – электродвигатель, 2 – вал с эксцентриситетом, 3 – шатун, 4 – образец, 5 – устройство для крепления образцов

Рисунок 1. Общий вид (а) и схема (б) установки для усталостных испытаний образцов

Результаты исследования и их обсуждение

Электронномикроскопические исследования показали, что нанесение на поверхность стальных образцов ионно-плазменного покрытия (TiN) как при температуре фазового превращения, так и при температурах, отличных от температуры фазового превращения, практически не изменило микрорельеф и величину шероховатости поверхности из-за небольшой толщины покрытия (3-5 мкм). Последнее важно в дальнейшем при оценке усталостной прочности образцов с покрытием.

Анализ полученных отпечатков алмазного индентора микротвердомера показал, что после воздействия индентора на покрытиях не обнаружено микротрещин (рис. 2). Следовательно, покрытия отличаются высокой пластичностью и высокой адгезионной

прочностью независимо от температуры их нанесения.

Таким образом, можно заключить, что напыление ионно-плазменного покрытия из TiN не повлияло на микрорельеф поверхности образцов из стали 20. При этом качество покрытий, нанесенных как при температуре фазового перехода (727 °С), так и при температурах, отличных от температуры фазового перехода, хорошее, а само покрытие отличается высокой пластичностью и высокой адгезионной прочностью.

Известно, что при усталостных испытаниях общая долговечность образцов (количество циклов нагружения до разрушения образцов) включает в себя: количество циклов нагружения до зарождения усталостной трещины и количество циклов нагружения, затраченное на распространение трещины [3].

Рассмотрим влияние температуры нанесения покрытия на кинетику развития усталостной трещины и фрактографические особенности строения изломов образцов из стали 20 (табл. 1).

Из приведенной таблицы видно, что максимальная долговечность образцов имеет место в случае нанесения покрытия при температуре фазового перехода, т. е. при тем-



Рисунок 2. Отпечаток укола микротвердомера ПМТ-3 на поверхности образца после нанесения покрытия при температуре 727 °С (увеличение: x 3500)

Таблица 1. Общее количество циклов нагружения до разрушения образцов (N), длина зоны усталостного развития трещины на поверхности излома (l_f) и количество циклов нагружения до зарождения трещины (N_z) в зависимости от температуры напыления покрытия

	Без покрытия	Температура нанесения покрытия		
		727 °С	717 °С	737 °С
N , цикл	$5,83 \cdot 10^3$	$7,63 \cdot 10^3$	$5,55 \cdot 10^3$	$4,27 \cdot 10^3$
N_z , цикл	$1,01 \cdot 10^3$	$1,95 \cdot 10^3$	-	-
l_f , 10^{-3} м	0,80	0,75	0,75	0,75

пературе 727 °С. В случае нанесения покрытия при температурах, отличных от температуры фазового перехода, общая долговечность образцов становится даже ниже, чем в образцах без покрытия (см. табл. 1). Сравнивая количество циклов нагружения до появления макротрещины, видим, что в случае нанесения покрытия при температуре фазового перехода количество циклов до зарождения трещины примерно в 1,8 раза выше по сравнению с образцами без напыления покрытия.

О положительном влиянии покрытия на стадию зарождения усталостной трещины свидетельствуют и данные фрактографического анализа. На рисунке 3 представлены схемы усталостных изломов. В случае испытания образцов без покрытия средняя длина зоны усталостного развития трещины составляет $0,80 \cdot 10^{-3}$ м (табл. 1). При разрушении образцов с покрытием, независимо от температуры его нанесения, средняя длина зоны l_f составляет $0,75 \cdot 10^{-3}$ м. Причем форма зоны усталостной трещины во всех случаях была практически одинаковая (рис. 3 а, б).

Поскольку длина зоны усталостной трещины l_f на поверхности изломов практически одинаковая (см. табл. 1), то можно предположить, что количество циклов нагружения, затраченное на распространение усталостной трещины, тоже во всех случаях будет примерно одинаковое. Следовательно, основной вклад в общую долговечность образцов приходится на стадию зарождения трещины.

Рассмотрим микрофрактографические особенности разрушения образцов из стали 20 как без ионно-плазменного покрытия, так и с покрытием, нанесенным при разных температурах.

Из рисунка 4 видно, что в случае отсутствия покрытия в очаге усталостного разрушения образуется характерная зона сдвига θ под углом 45° к поверхности излома, отличающаяся сравнительно плоским микрорельефом. Затем усталостная трещина развивается перпендикулярно оси образца. На этой стадии можно наблюдать ямочный микрорельеф (см. рис. 4).

В том случае, когда усталостному разрушению подвергались образцы с покрытиями, зарождение трещины не сопровождалось образованием зоны сдвига θ (рис. 5 и 6). Характерный ямочный микрорельеф наблюдается прямо от покрытия. В случае разрушения образцов с покрытием, нанесенным при температуре, отличной от температуры фазового перехода, вблизи покрытия можно наблюдать пористую область (см. рис. 6), что указывает на непрочную связь покрытия с подложкой. Об этом же свидетельствуют и разрушенные участ-

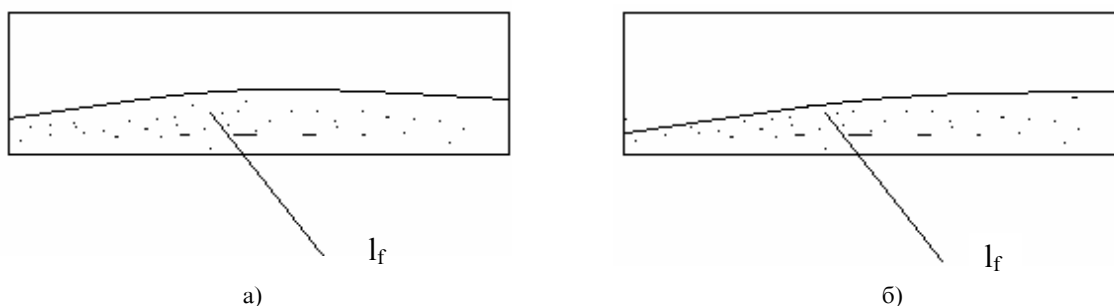
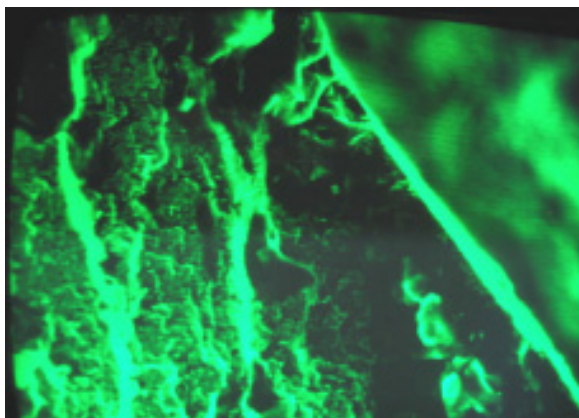


Рисунок 3. Схема усталостных изломов, полученных после разрушения образцов без покрытия (а) и с покрытием (б)

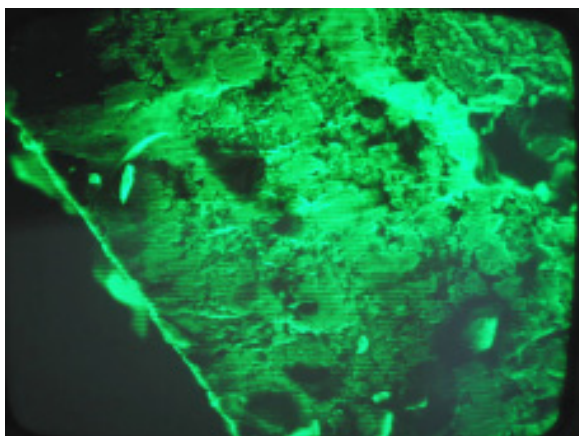


а)

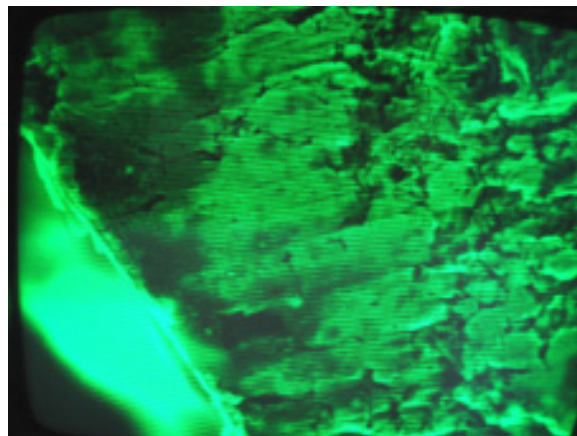


б)

Рисунок 4. Микрофрактография очага усталостного разрушения образцов из стали 20 без покрытия. (Увеличение: а – $\times 500$, б – $\times 1500$)

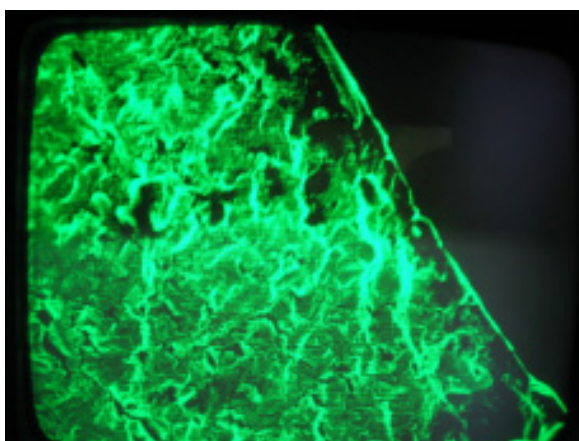


а)

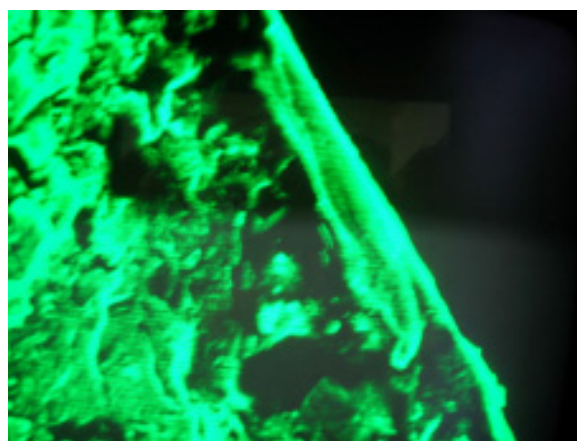


б)

Рисунок 5. Микрофрактография очага усталостного разрушения образцов из стали 20 с покрытием, нанесенным при температуре 727 °С. (Увеличение: а – $\times 500$, б – $\times 2000$)



а)



б)

Рисунок 6. Микрофрактография очага усталостного разрушения образцов из стали 20 с покрытием, нанесенным при температуре 727 + 10 °С. (Увеличение: а – $\times 500$, б – $\times 1500$)

ки покрытия, «свисающие» над поверхностью излома (см. рис. 6 б).

В случае нанесения покрытия при температуре 727 °С таких дефектов практически не наблюдается (см. рис. 5 а, б). Последнее свидетельствует о лучшей адгезионной прочности покрытия, нанесенного при температуре фазового перехода.

Выводы

1. Электронномикроскопические исследования показали, что напыление ионно-плазменного покрытия из TiN не повлияло на микрорельеф поверхности образцов из стали 20. При этом качество покрытий, нанесенных как при температуре фазового перехода (727 °С), так и при температурах, отличных от температуры фазового перехода, хорошее, а само покрытие отличается пластичностью и высокой адгезионной прочностью.

2. Максимальная усталостная прочность образцов из стали 20 имеет место в случае нанесения ионно-плазменного покрытия при температуре фазового перехода (727 °С). В

случае нанесения покрытия при температурах, отличных от температуры фазового перехода, общая долговечность образцов становится даже ниже, чем в образцах без покрытия.

3. Результаты оценки времени зарождения усталостной трещины с помощью акустической эмиссии, а также данные макрофрактографического анализа свидетельствуют о том, что увеличение общей долговечности образцов с ионно-плазменным покрытием, нанесенным при температуре фазового перехода, обусловлено увеличением времени до зарождения усталостной трещины.

4. Микрофрактографический анализ показал, что разрушение образцов с покрытиями не сопровождается образованием в очаге зарождения трещины зоны сдвига θ . Адгезионная прочность покрытия, нанесенного при температуре фазового перехода, выше по сравнению с покрытиями, нанесенными при температурах, отличных от температуры фазового перехода.

Список использованной литературы:

1. Григорьев С.Н., Ильичев Л.Л., Рудаков В.И. Ионно-плазменное упрочнение инструментальных сталей. Учебное пособие. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 415 с.
2. Никитин В.В., Клевцова Н.А., Клевцов Г.В. Кинетика заживления поверхностного дефекта в аустенитной стали в условиях фазового перехода. Тезисы докладов VI Всероссийской конференции «Структура и свойства аустенитных сталей и сплавов» к 100-летию со дня рождения К.А. Малышева. Екатеринбург, 2001. - С. 34.
3. Школьник Л.М. Скорость роста трещин и живучесть металла. - М.: Металлургия, 1973. - 215 с.
4. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. - М.: МИСиС, 2007. - 264 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 06-08-96904р_офи)

Статья поступила в редакцию 24.10.07