

ВАКУУМНО-ДУГОВОЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ОБЛУЧЕНИЕ КАК СПОСОБ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ 12Х1МФ И 30ХГСН2АИ.В. Власов^{1,2}, С.В. Панин^{1,2}, В.П. Сергеев^{1,2}, О.А. Богданов²

Научный руководитель: профессор, д.т.н., Панин С. В.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4 ²Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: good0@yandex.ru

APPLICATION OF VACUUM-ARC ION-BEAM IRRADIATION FOR MODIFICATION OF STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 12CR1MOV AND 30CRMNSIN12 STEELSI. Vlasov^{1,2}, S. Panin^{1,2}, V. Sergeev², O. Bogdanov²

Supervisor: professor Panin S.V.

¹Department of Material Science in Mechanical Engineering, Institute of High Technology Physics Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Russia

²Laboratory of Polymer Composite Materials, Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 634021, Tomsk, Russia

E-mail: good0@yandex.ru

A cyclic tension and alternating bending tests of 12Cr1MoV and 30CrMnSiNi2 steels specimens in as-supplied state and after surface nanostructuring by Zr⁺ ion beam have been carried out. Distinctions in formation of strain induced relief, as well as the cracking pattern of modified surface layer are illustrated by methods of optical microscopy and interferential profilometry. Changes to occur in subsurface layer are characterized by means of nanoindentation and fractography (scanning electron microscopy) of fracture surfaces. The description of differences of deformation behavior is carried out with use of the multiple cracking concepts.

Введение Проблема изучения и прогнозирования усталостного разрушения сохраняет актуальность и содержит ряд нерешенных научных и практических задач. Эффективным путём повышения прочности и износостойкости деталей машин является модификация поверхностного слоя [1]. В последнее время с использованием ионных источников реализованы режимы ионного облучения поверхности стальных образцов, позволяющие проводить модификацию поверхностного слоя [2]. Исследования влияния таких слоев на усталостную прочность образцов конструкционных и жаропрочных сталей представляет особый интерес, в том числе, по причине важной роли поверхности в зарождении и развитие усталостных трещин [3]. Целью работы являлось исследование влияния ионно-лучевого облучения поверхностного слоя сталей 12Х1МФ и 30ХГСН2А на повышение ее усталостной долговечности.

Материал и методика эксперимента В качестве материала исследования была выбрана жаропрочная сталь, предназначенная для работы при высоких температурах и испытывающая во время эксплуатации влияние циклических нагрузок. Выбор материала обусловлен тем, что данная сталь не испытывает структурных изменений при температуре, при которой происходит процесс наноструктурирования поверхностного слоя ионным пучком. Кроме того, сталь 12Х1МФ является достаточно вязкой, поэтому исследование процессов локализованной деформации и разрушения в условиях приложения циклической

нагрузки должно обеспечить большую наглядность при меньшей скорости протекания деформационных процессов. Другим объектом исследований стала высокопрочная сталь 30ХГСН2А.

Обработка поверхности образцов проводилась ионно-дуговой имплантацией цирконием на установке УВН-0,2 «Квант». Плоские образцы в форме прямоугольных пластин были вырезаны из прутка стали методом электроискровой резки. В качестве концентратора напряжений в образцах изготавливали отверстие диаметром 2 мм. После этого образцы были разделены на 2 партии: образцы без обработки; образцы после ионно-лучевой модификации.

Образцы испытывали в режиме циклического растяжения. Для стали 12Х1МФ испытания проводились в двух режимах: «многоцикловый» (max 2,5 кН, min 0,9 кН) и «малоцикловый» (max 2,7 кН, min 0,9 кН). Для стали 30ХГСН2А коэффициент асимметрии цикла составлял $R_a=0.1$, максимальный уровень нагрузки был 270 МПа. Испытания проводили на сервогидравлической испытательной машине Biss UTM 150. Фрактографические исследования проводили с помощью растровых электронных микроскопов JSM-7500FA. Испытания на статическое растяжение выполняли на электромеханической испытательной машине Instron 5582. Рентгеноструктурный анализ проводили с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-6000. Микротвёрдость всех типов образцов измеряли на приборе ПМТ-3.

Структурные исследование модифицированного приповерхностного слоя Сталь 12Х1МФ. Состав стали после обработки потоком ионов Zr представлен фазами Fe-Zr и зёрнами феррита. Средний размер зёрен в поверхностном слое составляет 100-150 нм. Рентгенографические исследования образцов без и после обработки выявили формирование интерметаллидных фаз в системе Fe-Zr: $FeZr_2$ и $FeZr_3$, а так же карбидов ZrC в приповерхностном слое. Измерение микротвёрдости проводили на плоской поверхности образцов. Для образцов после ионно-лучевой обработки дополнительно был сделан поперечный шлиф, где оценивали изменение данного параметра по толщине (поперечному сечению). У образца после обработки наблюдалось разупрочнение приповерхностного слоя до глубины порядка 100 мкм, в то время как на большей глубине наоборот микротвёрдость повысилась на 22%.

Сталь 30ХГСН2А. В результате ионно-лучевой обработки на поверхности образцов наблюдали формирование высокодисперсных частиц размером порядка 100 нм. При рассмотрении структуры образца по поперечному сечению полученной с помощью просвечивающей электронной микроскопии, видно, что вблизи поверхности в результате нагрева сформировались крупные ферритные зёрна. Далее сформировалась структура характерная для сорбита (на глубину не более 100 мкм). В нижележащих слоях образца на фотографии видна исходная структура мартенсита. В облученном образце выявлено наличие фазы α -Fe, кроме этого наблюдаются фазы интерметаллидных соединений, а так же ZrC. Для образца после обработки дополнительно был сделан поперечный шлиф, по которому оценивали изменение микротвёрдости по мере удаления от облученной поверхности. Минимальная твёрдость наблюдается вблизи поверхности. Далее микротвёрдость достигает максимума на глубине 150-180 мкм, после чего снижается и остаётся примерно на одном уровне (5 ГПа). Повышение микротвёрдости в сердцевине образца после обработки может быть обусловлено распадом остаточного аустенита и образованием бейнитно-мартенситной структуры.

Механические испытания Сталь 12Х1МФ. Испытание на статическое растяжения показали, что после использованной обработки предел прочности повысился на 76 МПа (15%), а значения относительного удлинение снизилось на $\varepsilon=4\%$ (19%). Результаты испытаний на циклическое растяжение

образцов без обработки и после наноструктурирования поверхностного слоя показал, что количество циклов до разрушения образцов с модифицированным поверхностным слоем повысилось в 2-3 раза. Одновременно увеличилось время до появления трещины в ~2-3 раза.

Сталь 30ХГСН2А. В результате ионной обработки образцов стали 30ХГСН2А предел прочности снизился на 22 %, относительное удлинение повысилось на 25 %. В ходе испытаний на циклическое растяжение были определены средние значения количества циклов до разрушения. Для образцов «без обработки» среднее значение количества циклов до разрушения составляет порядка $110\,000 \pm 31\,000$ циклов, для ионно-обработанных $330\,000 \pm 40\,000$. Таким образом, поверхностная модификация ионным пучком Zr^+ образцов стали 30ХГСН2А привела к повышению усталостной долговечности в 3 раза.

Выводы Проведена аттестация структуры приповерхностного слоя образцов сталей 12Х1МФ и 30ХГСН после ионно-лучевой обработки. Показано, что в результате обработки на поверхности образуется модифицированный разупрочнённый поверхностный слой глубиной порядка 100 мкм. Структура сердцевины образцов так же подвергается изменению выражающемуся в повышении твёрдости на 22% у стали 12Х1МФ и на 8% у стали 30ХГСН2А.

В результате усталостных испытаний показано, что образцы после ионно-лучевой обработки имеют в 2-3 раза большее количество циклов до разрушения, чем образцы без неё. Основной причиной выявленных изменений является пластификация приповерхностного слоя, в то время как закаленные образцы являются крайне чувствительными к зарождению микротрещин, что завершается быстрым возникновением и ростом магистральной усталостной трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоёв конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 286 с.
2. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Эффект каналирования пластических сдвигов и нелинейные волны локализованной пластической деформации и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. – № 5. – С. 7–26.
3. Панин С.В., Юсиф С.К., Сергеев В.П., Власов И.В., Панин А.В., Любутин П.С., Полтаранин М.А. и Панин В.Е. Множественное растрескивание как способ повышения стойкости к разрушению поверхностно упрочнённых материалов // Перспективные материалы. – 2011. – Т. 1. – № 13. – Спец. выпуск. – С. 177–186.