

СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛИ 30ХГСН2А ПОДВЕРГНУТАЯ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ ИОНАМИ Zr⁺

О. А. Богданов¹, И.В. Власов^{1,2}, В. В. Нейфельд²

Научный руководитель: профессор, д.т.н. С.В. Панин^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/4, 634021

E-mail: magfer@mail.ru

**STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND FATIGUE LIFE STEEL 30KHGSN2A
SUBJECTED TO ION-BEAM TREATMENT Zr⁺ IONS**

O.A. Bogdanov, I.V. Vlasov, V.V. Naidfeld

Scientific Supervisor: S.V. Panin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, 634021, Tomsk, Russia

E-mail: magfer@mail.ru

The structure of modified surface layer of the high-strength 30CrMnSiNi2 steel was investigated by optical, scanning electron and transmission electron microscopy as well as X-ray diffraction methods. The tests on static and cyclic tension were performed for 30CrMnSiNi2 steel specimens in as supplied state and after subsurface layer modification by Zr⁺ ion beam treatment. Differences of the specimen deformation behavior and changes of their mechanical properties are analyzed. The reason for fatigue life increase of the samples after the treatment is discussed.

Введение. Высокопрочные стали являются высокотехнологичными металлургическим изделиями, повышенные физико-механические свойства которых достигаются как за счет высокой степени легирования, так и многоступенчатых термических обработок. Этот тип сталей не имеет проблем обеспечения прочности, однако важной особенностью стали в высокопрочном состоянии является повышенная склонность к хрупкому и квазихрупкому разрушению. Данный недостаток одновременно с низкой пластичностью и ограниченным количеством эффективных механизмов релаксации напряжений, приводит к низкому значению усталостной долговечности [1, 2].

С учетом указанных физических закономерностей перспективным направлением повышения усталостной долговечности высокопрочных сталей является модификация поверхностного слоя, прежде всего, с позиции снижения его твердости (возможно, пластификации), что при сохранении прочностных свойств материала сердцевины должно позволить сохранить прочность и несущую способность конструкционного материала, и, одновременно, существенно снизить пагубное влияние концентраторов напряжений на его поверхности.

Целью представленной работы является изучение влияния ионно-лучевой обработки на структуру, механические свойства и усталостную долговечность 30ХГСН2А.

Материал и методика исследования. Плоские образцы в форме прямоугольных пластин были

вырезаны из прутка стали 30ХГСН2А методом электроискровой резки. Размер образцов для усталостных испытаний составлял $65 \times 8 \times 1$ мм. В качестве концентратора напряжений в образцах изготавливали отверстие диаметром 2 мм. Образцы подвергали закалке и последующему отпуску, согласно стандартному режиму, описанному в [2]. После этого образцы были разделены на 3 партии. Первую группу составляли образцы без обработки, вторую - образцы после ионно-лучевой модификации, в то время как в третью группу входили образцы, нагретые (высокий отпуск) в атмосфере аргона до 700°C на время, соответствующее времени обработки ионным пучком. Режим ионно-лучевой обработки образцов подробно описан в работах [3, 4]. Образцы испытывали в режиме многоциклового усталости с коэффициентом асимметрии цикла $Ra=0.1$, при максимальном уровне нагрузке 270 МПа.

Структурные исследования модифицированного поверхностного слоя. Проведённый рентгеноспектральный микроанализ подтвердил присутствие Zr на глубине не более 6 мкм. Методом скользящего рентгеновского пучка, в облученном образце выявлено наличие фаз интерметаллидных соединений, таких как: Zr_3Fe , $FeZr_2$, а так же ZrC.

С помощью 2 % раствора азотной кислоты был проведен металлографический анализ структуры образцов всех трёх типов. Для необработанного образца характерна мартенситная структура (рис 2,а), сформированная в процессе стандартной для этой стали термической обработки. В приповерхностном слое образца после обработки ионным пучком выявляется зёрнистая структура со средним размером структурных элементов порядка 2-5 мкм. У образца после нагрева до 700°C наблюдается структура сорбита, которая обычно формируется при нагреве выше 650°C с постепенным охлаждением. Также был сделан поперечный шлиф образца после обработки. В поверхностном слое глубиной до 35 ± 4 мкм формируются ферритные зёрна.

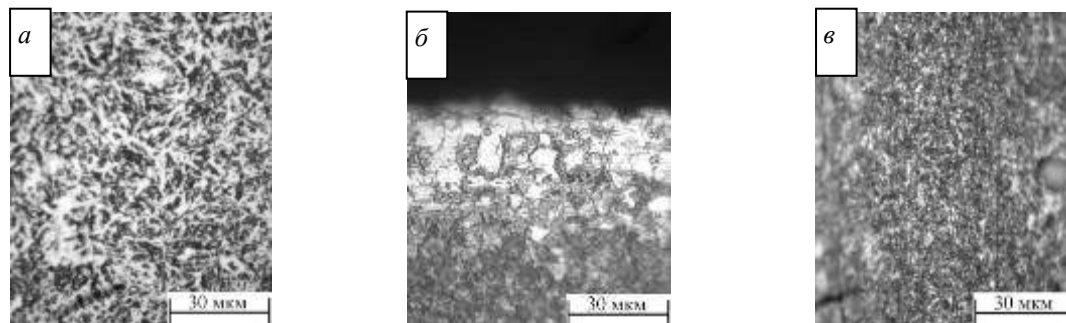


Рис. 2. а) оптические фотографии поверхности образца без обработки; б) после модифицирования поверхности (поперечный шлиф, слева направо от поверхности в глубь образца); в) после отпуска при 700°C ;

Микротвёрдость стали 30ХГСН2А измерена на ПМТ-3 с использованием веса 100 г. Микротвёрдость достигает максимума на глубине 150-180 мкм, после чего снижается и остаётся постоянной (5 ГПа). Предположительно углерод при ионно-лучевом воздействии на поверхность и образовании ферритных зёрен мог быть вытеснен на более глубокие слои, что и вызвало локальное упрочнение на глубине до 150-180 мкм.

Механические испытания. Проведены испытания на статическое растяжение образцов с отверстием, имеющих форму, аналогичную образцам для усталостных испытаний. Выявлено что в результате ионной обработки образцов стали 30ХГСН2А предел прочности снизился на 22 %, относительное удлинение повысилось на 25 %; в то же время у образцов после отпуска при 700°C предел

прочности снизился на 42 %, а относительное удлинение повысилось на 17 %.

В ходе испытаний на циклическое растяжение было определено количество циклов до разрушения всех типов образцов. Для образцов «без обработки» его среднее значение составляет порядка $N_p=110\pm 31\cdot 10^3$ циклов, для ионно-лучевой обработки $N_p=330\pm 40\cdot 10^3$ циклов. Образец после высокотемпературного отпуска разрушился после $N_p=138\pm 36\cdot 10^3$ циклов. Таким образом, поверхностная модификация ионным пучком Zr^+ образцов стали 30ХГСН2А привела к повышению усталостной долговечности в 3 раза.

Заключение. В ходе проведённой обработки стали 30ХГСН2А пучком ионов Zr^+ , по мнению авторов, в приповерхностном слое на глубине до 6 мкм формируются интерметаллидные соединения системы Fe-Zr, а так же карбиды циркония. На глубине до 35 мкм от поверхности, вследствие влияния высоких температур происходит высокотемпературный отпуск, в результате чего формируется феррито-цементитная структура с характерным размером зерна порядка 2-5 мкм. Далее на глубине не более 100 мкм формируется структура сорбита, характерная для высокотемпературного отпуска при температурах выше 650°C. В то же время на поверхности модифицированных образцов температура значительно выше, что должно приводить к образованию зёрненной структуры. Глубже 100 мкм в результате термоциклирования при ионно-лучевой обработке остаточный аустенит переходит в бейнит, в результате чего образуется бейнита-мартенситная структура, наличие которой приводит к незначительному повышению твёрдости по сравнению с аустенитно-мартенситной структурой образца после стандартной термической обработки.

Анализ полученных результатов показывает, что в образцах, подвергнутых ионной обработке, снижение предела прочности произошло вследствие разупрочнения поверхностного слоя, что одновременно, сопровождалось повышением относительного удлинения до разрушения.

В результате усталостных испытаний показано, что образцы после ионно-лучевой обработки имеют в 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. Panin V.E. Topical problems of nonlinear plastic deformation and fracture dynamics // Physical Mesomechanics, Volume 14, Issues 5-6, September—December. – 2011. – P. 205–206.
2. Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformable solid as a nonlinear hierarchically organized system // Physical Mesomechanics, Volume 14, Issues 5-6, September—December. – 2011. – P. 207–223.
3. Панин С.В., Власов И.В., Сергеев В.П. и др. Повышение усталостной долговечности стали 12Х1МФ наноструктурированием поверхности ионным пучком Zr^+ . Часть 1: Структура, свойства и характер разрушения // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 6 – С. 93–106.
4. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. // Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.