

УДК 620.178.311

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ Zr^{+} НА СТРУКТУРУ И УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛИ 30ХГСН2А*

Власов И.В.^{1,2}, *техник лаборатории, инженер кафедры*

Панин С.В.^{1,2}, *д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе, профессор кафедры* (svp@ispms.tsc.ru)

Сергеев В.П.^{1,2}, *д.т.н., профессор, заместитель директора по научно-производственной работе, профессор кафедры*

Сундер Рамасуббу², *к.т.н., доцент кафедры*

Марущак П.О.³, *д.т.н., профессор кафедры*

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

(634021, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет

(634036, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

³ Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя

(46001, Украина, ул. Русская, 56)

Аннотация. Методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгенодифракционного анализа изучена структура поверхностного слоя высокопрочной стали 30ХГСН2А, модифицированной ионно-лучевой обработкой. Выявлено формирование разупрочненного поверхностного слоя глубиной до 100 мкм, образованного в результате нагрева образцов в процессе обработки. Проведены испытания на статическое и циклическое растяжение образцов без обработки и после облучения пучком ионов циркония. Обнаружено, что модифицированный поверхностный слой в процессе циклического нагружения сдерживает зарождение и развитие усталостной трещины, что приводит к более равномерному распределению деформации по рабочей части образца. Проанализированы различия в характере деформационного поведения, а также изменения механических свойств. По полученным в процессе испытания фотографиям образцов построены поля векторов перемещений и распределения деформации, иллюстрирующие закономерности развития усталостной трещины в образцах без обработки и после облучения. На основании полученных данных обсуждаются причины повышения усталостной долговечности обработанных образцов.

Ключевые слова: усталостная долговечность, ионно-лучевая обработка, деформация, разрушение.

Высокопрочные стали являются высокотехнологичными металлургическими изделиями, повышенные физико-механические свойства которых достигаются как за счет значительной степени легирования, так и многоступенчатых термических обработок. По мнению директора ФГУП ВИАМ академика Е.Н. Каблова современные конструкционные стали не имеют проблем обеспечения прочности, однако их ахиллесовой пятой является усталостная долговечность. Данный недостаток обусловлен двумя основными причинами. Во-первых, крайне низкая пластичность и ограниченное количество эффективных механизмов релаксации напряжений приводят к снижению сопротивления роста трещин (и, в первую очередь, усталостных). Во-вторых, любой дефект на поверхности быстро становится опасным концентратором напряжений, релаксация которого завершается формированием микротрещин(ы) и последующим квазихрупким разрушением [1, 2]. Эти

вопросы в свете особой роли поверхностных слоев как самостоятельных подсистем в деформируемом твердом теле подробно рассмотрены в работах академика В.Е. Панина в рамках физической мезомеханики материалов [3, 4].

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 [5, 6].

Ионно-лучевое воздействие долгое время использовалось в качестве финишной обработки поверхности и оно получило широкое распространение в полупроводниковой и оптической промышленности. В последнее время в лаборатории материаловедения покрытий и нанотехнологий ИФПМ СО РАН разработаны режимы, позволяющие в процессе облучения пучком ионов металлов модифицировать структуру поверхностного слоя (в том числе за счет термического воздействия) на глубину до 100 – 150 мкм без потери прочностных

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 13-08-90402 Укр_ф_а, проекта СО РАН III.20.1.3 и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2817.2014.1 Школа академика В.Е. Панина.

Структурные исследования частично проведены на оборудовании ЦКП «Нанотех» в ИФПМ СО РАН.

свойств в сердцевине. Формирование такого модифицированного поверхностного слоя сопровождается определенным снижением его микротвердости, но при этом может существенно повышаться усталостная долговечность образцов.

В работе [7] авторы исследовали влияние ионно-дуговой обработки пучком ионов циркония теплоустойчивой стали 12Х1МФ на изменение ее структуры, механических свойств и усталостной долговечности. В результате обработки ионным пучком зафиксировано повышение усталостной долговечности в два – три раза, а также увеличение предела прочности на 15 %. В этой связи актуальным представляется повышение усталостной долговечности высокопрочных сталей, в частности, конструкционной легированной стали 30ХГСН2А, применяемой для изготовления высоконагруженных ответственных деталей. Однако эта сталь не обладает жаропрочностью, поэтому в результате ионно-лучевой обработки могут существенно снижаться ее механические свойства. Кроме того, внедрение в тонкий приповерхностный слой ионов циркония (как еще одного легирующего элемента) должно привести к усложнению структурно-фазового состава, и вероятно, охрупчиванию. Ввиду этого был предложен специальный режим, включающий вращение образцов в процессе облучения (рис. 1), что позволяет циклически уводить образцы из зоны воздействия пучка ионов, тем самым минимизируя термическое воздействие.

Характер изменения механических свойств при использовании предложенного метода облучения иллюстрируется диаграммой нагружения (рис. 2). Можно предположить, что периодическое ионно-лучевое воздействие на образцы может также сопровождаться их сверхбыстрой закалкой, поскольку основное термическое влияние оказывается лишь в момент взаимодействия с пучком ионов циркония. В настоящей работе проведены анализ структуры и оценка изменения механических свойств образцов стали после облучения.

Плоские образцы в форме прямоугольных пластин были вырезаны из прутка стали 30ХГСН2А методом электроискровой резки. Размеры образцов для проведения статических и усталостных испытаний составляли 65×8×1 мм. В качестве концентратора напряжений

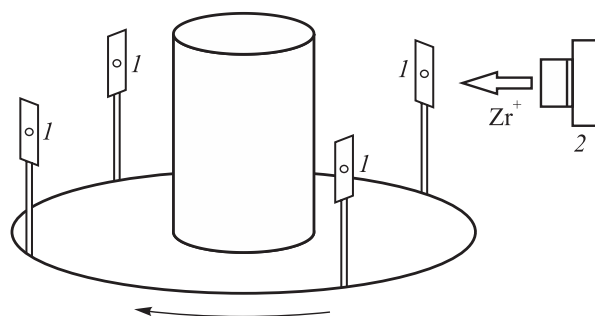


Рис. 1. Схема ионной обработки образцов:
1 – образец; 2 – ионная пушка

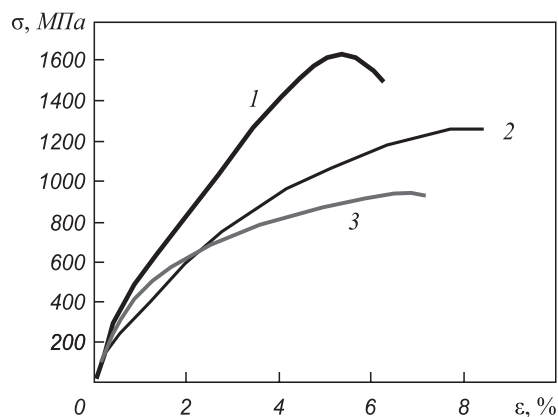


Рис. 2. Диаграммы нагружения образцов с отверстием:
1 – исходное состояние; 2 и 3 – образец после обработки и после нагрева до 700 °С

служило отверстие диам. 2 мм, расположенное на расстоянии 45 мм от одного из краев. Образцы подвергали закалке и последующей нормализации согласно стандартному режиму, описанному в марочнике сталей и сплавов [8]. Готовили три партии образцов для испытаний: 1 – материал в состоянии поставки; 2 – материал после ионно-лучевой модификации; 3 – образцы, выдержанные (высокий отпуск) в атмосфере аргона при 700 °С в течение времени, соответствующего длительности ионно-лучевой обработки (не более 20 мин). Таким образом предпринята попытка разделить вклад в изменение свойств образцов от облучения и термического воздействия. Более подробное описание режима ионно-лучевой обработки образцов можно найти в работах [7, 9, 10].

Образцы испытывали в режиме многоциклового усталости с коэффициентом асимметрии цикла $R_a = 0,1$ при максимальной нагрузке 270 МПа. Испытания проводили на сервогидравлической испытательной машине Biss UTM 150. Фрактографические исследования проводили с помощью растровых электронных микроскопов JSM-7500FA и Quanta 200 3D. Испытания на статическое растяжение выполняли на электромеханической испытательной машине Instron-5582. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7. Измерение микротвердости выполняли на приборе ПМТ-3. Оптическую микроскопию проводили с помощью прибора Carl Zeiss Axiovert 25.

Структурные исследования

Металлография. Для необработанного образца характерна мартенситная структура, сформированная в процессе стандартной термической обработки (рис. 3, а). В поверхностном слое образца после обработки ионным пучком выявляется зеренная структура со средним размером структурных элементов порядка 2 – 5 мкм (рис. 3, б, з). После нагрева до 700 °С наблюдается структура сорбита (рис. 3, в), которая обычно

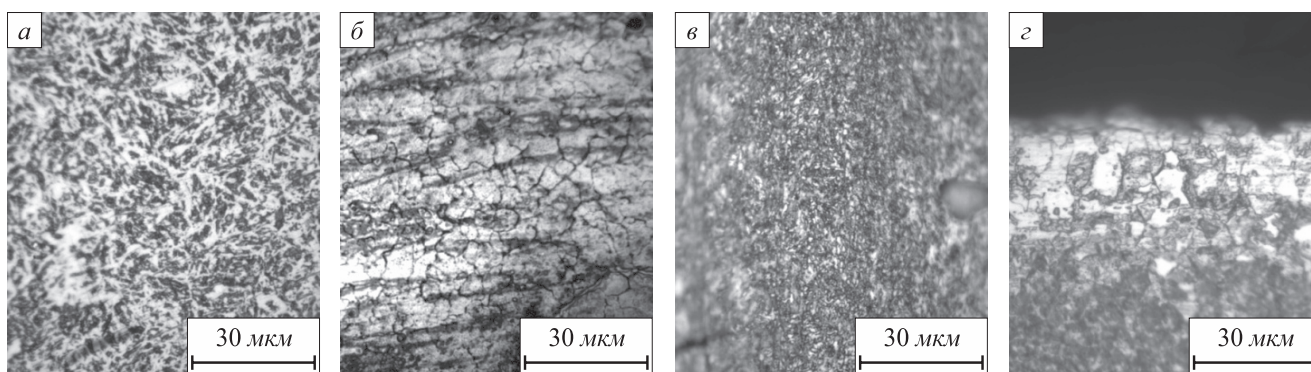


Рис. 3. Оптические фотографии поверхности образца без обработки (а), после модифицирования поверхности ионным пучком (поверхность) (б), после отпуска при 700 °С (в) и после модифицирования поверхности (з) (поперечный шлиф)

формируется при нагреве выше 650 °С с постепенным охлаждением. На поперечном шлифе облученного образца (рис. 3, з) видно, что в поверхностном слое на глубине примерно до 35 мкм формируются ферритные зерна.

Микротвердость образцов всех трех типов измеряли с нагрузкой на пирамидку Виккерса 0,98 Н. Измерения проводили при индентировании со стороны плоской грани. После обработки дополнительно был сделан поперечный шлиф, по которому оценивали изменение микротвердости по мере удаления от облученной поверхности (рис. 4, а). Минимальная твердость наблюдается вблизи поверхности. Далее микротвердость достигает максимума на глубине 150 – 160 мкм, после чего снижается и остается постоянной (примерно 5 ГПа).

Предположительно углерод в процессе ионно-лучевого воздействия на поверхность вследствие циклического кратковременного интенсивного термического

воздействия и образования ферритных зерен мог быть вытеснен на более глубокие слои, что и вызвало локальное упрочнение на глубине до 150 – 160 мкм. Повышение микротвердости в сердцевине образца после обработки может быть также обусловлено распадом остаточного аустенита и образованием бейнитно-мартенситной структуры.

Растровая электронная микроскопия. Выявлено, что в результате ионно-лучевого воздействия на поверхности образцов формируются высокодисперсные частицы размером порядка 100 нм (рис. 4, б). Проведенный рентгеноспектральный микроанализ подтвердил присутствие циркония на глубине не более 6 мкм.

Просвечивающая электронная микроскопия. На рис. 4, в представлена тонкая структура образца по поперечному сечению. Вблизи поверхности в результате нагрева сформировались ферритные зерна. На глубине до 100 мкм образовалась переходная структура сорби-

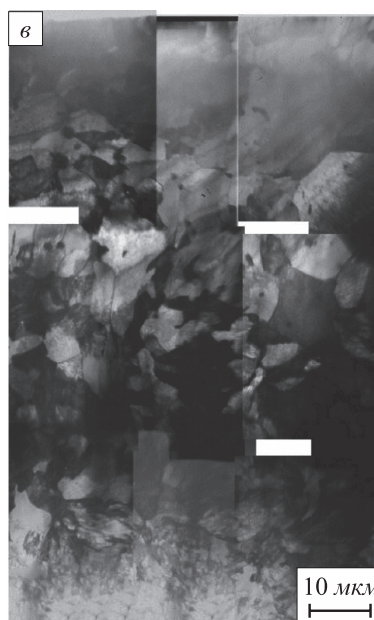
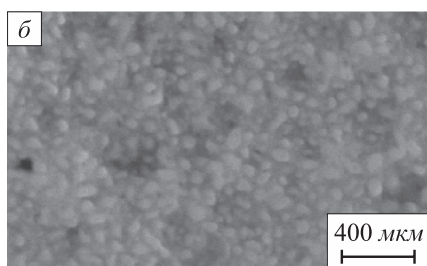
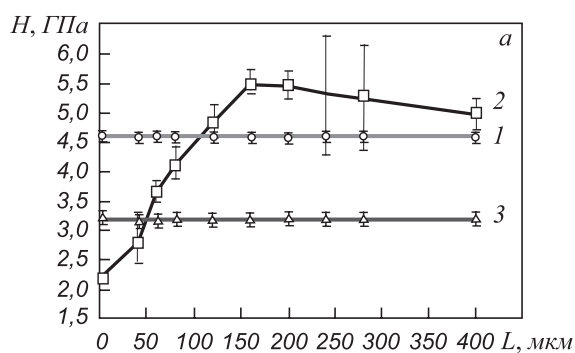


Рис. 4. Зависимость микротвердости (а) от расстояния от края образца в исходном состоянии (1), после ионно-лучевой обработки (2) и после нагрева до 700 °С (3), а также РЭМ-микрофотография поверхности образца после обработки (б) и ПЭМ-фотография поперечного сечения поверхностного слоя (в)

та. В нижележащих слоях образца на фотографии видна (исходная) мартенситная структура.

Механические испытания

Статическое растяжение. Проведены испытания на статическое растяжение образцов с отверстием (рис. 2). Предел прочности (σ_b) образца без обработки составляет 1630 МПа, относительное удлинение (ϵ) 6 %. Предел прочности и относительное удлинение облученного образца составляют 1270 МПа и 8 % соответственно. После отжига при 700 °С $\sigma_b = 935$ МПа и $\epsilon = 7$ %. Таким образом, в результате ионно-лучевой обработки образцов стали 30ХГСН2А предел прочности снизился на 22 %, относительное удлинение повысилось на 25 %; у образцов после отжига при 700 °С предел прочности снизился на 42 %, а относительное удлинение повысилось на 17 %.

Оценка деформации оптическим методом. По фотографиям образцов, сделанным во время испытания, построены поля интенсивности деформации (рис. 5). На начальном этапе нагружения заметных отличий в развитии поверхностного рельефа, а также на картинах распределения интенсивности деформации в образцах всех трех типов не наблюдается. Характерной деформационной картиной перед разрушением (также независимо от вида обработки образцов) является формирование полос локализованного сдвига, ориентированных по направлению максимальных касательных напряжений. Наиболее выражены они для материала в состоянии поставки (рис. 5, а, б); в меньшей степени их формирование проявляется в облученном образце (рис. 5, в, з) и в отожженных образцах (рис. 5, д, е). Заметим, что, несмотря на высокие показатели прочности, эта сталь даже в закаленном состоянии характеризуется высокой вязкостью: образец с концентратором напряжений в форме отверстия имеет удлинение до разрушения порядка 6 % и выраженную стадию предразрушения (чему, собственно, и соответствует формирование пары макрополос локализованной деформации). В облученном и отожженном образцах предел прочности заметно

ниже: по этой причине деформация распределена более однородно, в то время как ее максимальная величина (выявляемая по масштабной шкале) выше, чем в необлученном материале.

Испытания на циклическое растяжение. В ходе испытаний было определено количество циклов до разрушения (N_p) образцов всех типов. Для образцов без обработки $N_p = (110 \pm 31) \cdot 10^3$ циклов, для ионно-лучевой обработки $N_p = (330 \pm 40) \cdot 10^3$ циклов. Образцы после высокотемпературного отпуска разрушались после $N_p = (138 \pm 36) \cdot 10^3$ циклов. Таким образом, поверхностная модификация пучком ионов циркония образцов стали 30ХГСН2А может обеспечить повышение усталостной долговечности до трех раз.

Расчет векторов смещения. По полученным во время испытания на циклическое растяжение фотографиям (рис. 6) построены поля векторов смещений. В необлученном образце деформация локализована в области вершин усталостных трещин, распространяющихся от концентратора напряжений (рис. 6, а, б). Рост трещин сопровождается определенной пластической деформацией, что проявляется также поперечной утяжкой образца (рис. 6, в).

В целом же можно говорить о том, что деформационное поведение образца с парой усталостных трещин определяется их постепенным раскрытием и вязкоупругой реакцией окружающего материала на уменьшение площади поперечного сечения образца в этой области. Несколько отличная картина наблюдается в облученном образце, в котором поверхностный слой разупрочнен на толщину не менее 100 мкм (рис. 4, а). Подобно необлученному образцу усталостная трещина развивается от концентратора напряжений (рис. 6, з), однако ее рост сопровождается интенсивными деформациями в протяженной области вокруг отверстия, что может являться причиной диспергирования мощного концентратора напряжений за счет вовлечения значительного количества мезоконцентраторов меньшей мощности (рис. 6, д). В результате вместо раскрытия трещин по механизму нормального отрыва (как в случае необлученного образца) наблюдается квазиодно-

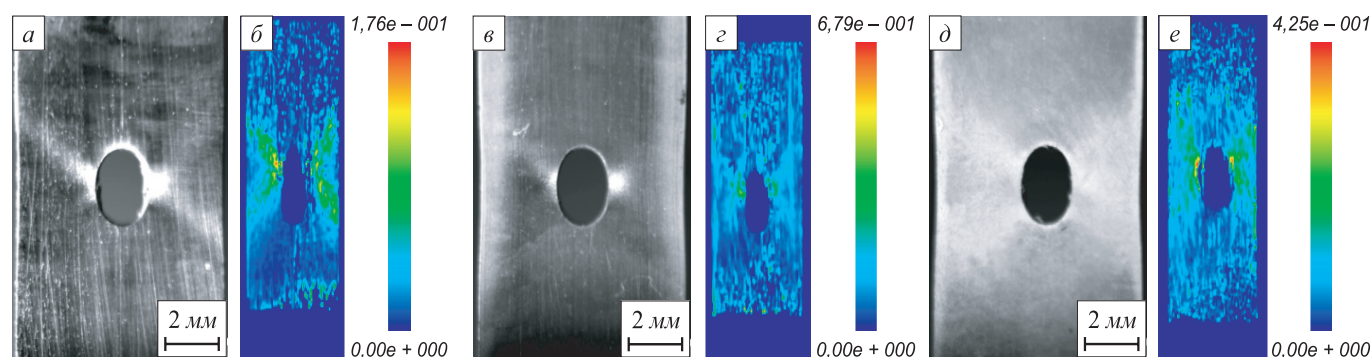


Рис. 5. Фотографии образцов (а, в, д) и поля векторов смещения (б, з, е) незадолго до разрушения: а, б – образец без обработки; в, з – образец после облучения пучком ионов циркония; д, е – образец, нагретый до 700 °С (степень деформации 97 %)

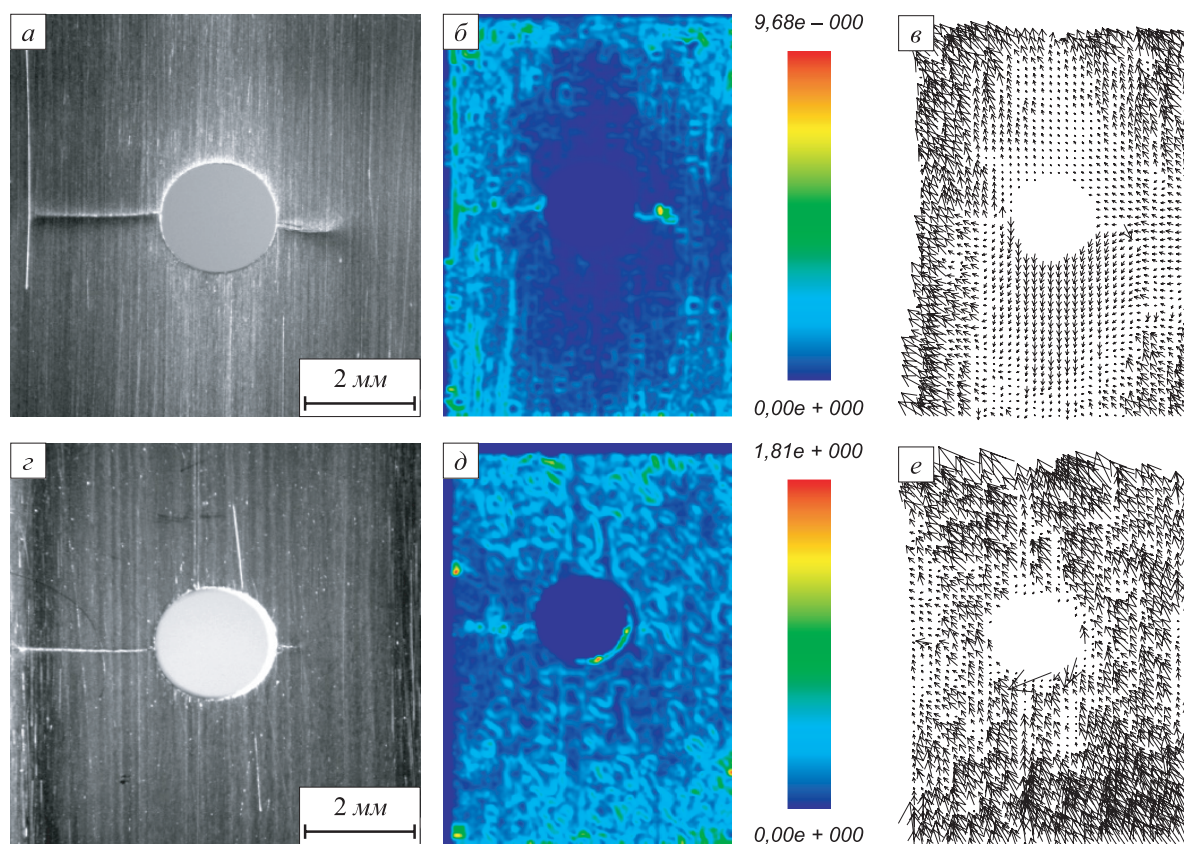


Рис. 6. Фотографии поверхности (а, z), поля векторов смещения (б, d) и вектора смещения образцов (в, e) в исходном состоянии ($100 \cdot 10^3$ циклов) (а – в) и после облучения ионами циркония ($384 \cdot 10^3$ циклов) (z – e)

родное распределение мезоскопической деформации (рис. 6, e). Это может являться причиной сдерживания роста усталостной трещины и возрастания усталостной долговечности.

В работе предлагается следующая интерпретация полученных результатов. Обработка образцов стали 30ХГСН2А пучком ионов циркония приводит к формированию в приповерхностном слое на глубине до 6 мкм интерметаллидных соединений системы Fe–Zr, а также карбидов циркония. Предположительно именно они наблюдаются на поверхности образца (рис. 3, б). На глубине до 35 мкм от поверхности вследствие циклического влияния высоких температур происходит высокотемпературный отпуск, в результате чего формируются ферритные зерна с характерным размером порядка 2 – 5 мкм. Далее на глубине не более 100 мкм формируется структура сорбита, характерная для высокотемпературного отпуска при температуре выше 650 °С. Подобная структура наблюдается у образцов, нагретых до 700 °С; это косвенно указывает на то, что при облучении материал на глубине 35 – 100 мкм испытывает подобное термическое воздействие. В то же время на поверхности модифицированных образцов температура значительно выше, что должно приводить к образованию зеренной структуры. Глубже 100 мкм в результате термоциклирования при ионно-лучевой обработке остаточный аусте-

нит переходит в бейнит, в результате чего образуется бейнитно-мартенситная структура, наличие которой приводит к незначительному повышению твердости по сравнению с аустенитно-мартенситной структурой образца после стандартной термической обработки. По мнению авторов, наблюдаемые эффекты становятся возможными именно благодаря циклическому кратковременному термическому воздействию, происходящему в момент взаимодействия ионного пучка с поверхностью образцов.

Таким образом, реализованная ионно-лучевая обработка выгодно отличается от простого нагрева до 700 °С прежде всего тем, что ширина зоны термического влияния сводится к минимуму (поверхностный слой глубиной не более 100 мкм). При этом материал сердцевины в целом сохраняет свои прочностные характеристики. С другой стороны, на поверхности обработанного образца формируется модифицированный слой, благоприятно влияющий на сопротивление зарождению и росту усталостных трещин.

В образцах стали 30ХГСН2А, подвергнутых облучению, снижение предела прочности произошло вследствие разупрочнения поверхностного слоя, что одновременно сопровождалось повышением относительного удлинения до разрушения. Наличие модифицированного поверхностного слоя обеспечивает эффективное перераспределение концентраторов напряжений, в ре-

зультате чего магистральная трещина зарождается значительно позднее и распространяется медленнее. Это приводит к увеличению усталостной долговечности облученных образцов.

Выводы. Проведена аттестация структуры поверхностного слоя образцов стали после ионно-лучевой обработки. Показано, что в приповерхностном слое (глубиной до 6 мкм) формируются высокодисперсные частицы размером порядка 100 нм. В поверхностном слое (глубиной от 6 до 100 мкм) в результате высокотемпературного термического воздействия мартенситная структура трансформируется в феррито-перлитную. В сердцевине образца (на глубине более 100 мкм) после обработки также происходят структурные изменения, приводящие к повышению твердости на 8 %. В результате усталостных испытаний показано, что образцы после ионно-лучевой обработки имеют в три раза большее количество циклов до разрушения, чем необлученные образцы. Основной причиной выявленных изменений является снижение твердости поверхностного слоя, в то время как закаленные образцы являются крайне чувствительными к зарождению микротрещин, что завершается быстрым возникновением и ростом магистральной усталостной трещины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Hui W., Dong H., Weng Y., Shi J., Wang M. Long life high strength steels to resist fatigue failure and delayed fracture – in advanced steels: the recent scenario in steel science and technology. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH; 2011.
- Murakami Y., Endo M. // *International Journal of Fatigue*. 1994. Vol. 16. P. 163 – 182.
- Panin V.E., Egorushkin V.E. // *Physical Mesomechanics*. 2013. Vol. 16. № 4. P. 267 – 286.
- Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V. // *Physical Mesomechanics*. 2012. Vol. 15. № 3-4. P. 133 – 146.
- Mallory C. Casperson, Jay D. Carroll, John Lambros etc. // *International Journal of Fatigue* 2014. Vol. 61. P. 10 – 20.
- Babu M.N., Dutt B.S., Venugopal S. etc. // *Mater Sci. Eng. A* 2010. Vol. 527(20). P. 5122 – 9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.075>.
- Panin S.V., Vlasov I.V., Sergeev V.P. etc. // *Physical Mesomechanics*. 2013. Vol. 16. № 2. P. 170 – 182.
- Марочник сталей и сплавов / Под общей ред. А.С. Зубченко – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
- Панин С.В., Юсиф С.К., Сергеев В.П. и др. // *Перспективные материалы*. 2011. Т. 1. № 13. Спец. выпуск. С. 177 – 186.
- Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. – Томск: изд. Томского политехн. ун-та, 2008. – 286 с.

© 2014 г. Власов И.В., Панин С.В., Сергеев В.П.,
Сундер Рамасуббу, Марущак П.О.
Поступила 16 января 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. Vol. 57. No. 12, pp. 60–66.

THE INFLUENCE OF Zr⁺ ION-BEAM PROCESSING ON STRUCTURE AND FATIGUE DURABILITY OF 30CrMnSiNi2 STEEL

Vlasov I.V.^{1,2}, Technician of laboratory of Physical Mesomechanics and non-destructive testing, Engineer

Panin S.V.^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director on research, Professor (svp@ispms.tsc.ru)

Sergeev V.P.^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director on research and development, Professor

*Sunder Ramasubbu*², Cand. Sci., Assist. Professor

*Marushchyyak P.O.*³, Dr. Sci. (Eng.), Professor

¹ Institute of strength physics and materials science SB RAS (2/4, Akademicheskii pr., Tomsk, 634036, Russia)

² National Research Tomsk Polytechnic University (30, Lenina pr., Tomsk, 634036, Russia)

³ I. Pulyi Ternopil State Technical University (56, Russkaya st., Ternopol', 46001, Ukraine)

Abstract. The structure of a surface layer of high-strength 30CrMnSiNi2 steel modified by means of ion beam treatment was investigated by optical, scanning electron and transmission electron microscopy as well as X-ray diffraction analysis. Formation of softened surface layer with depth up to 100 μm was revealed due to the specimens heating in the course of treatment. Cyclic and static tension tests have been carried out for steel specimens in as-supplied state and after surface irradiation by Zr⁺ ion beam. It is revealed that modified surface layer during cyclic loading inhibits initiation and development of a fatigue crack, resulting in a more uniform strain distribution along the working part of the specimen. Differences of the specimen deformation behavior and changes of their mechanical properties are

analyzed. Displacement vectors and strain distribution fields were constructed according to micrographs obtained during tests, which illustrate regularities of fatigue crack growth in specimens without treatment and after irradiation.

Keywords: fatigue life-time, ion-beam treatment, strain, fracture.

REFERENCES

- Hui W., Dong H., Weng Y., Shi J., Wang M. Long life high strength steels to resist fatigue failure and delayed fracture – in advanced steels: the recent scenario in steel science and technology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH. 2011.
- Murakami Y., Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. *International Journal of Fatigue*. 1994, Vol. 16, pp.163–182.
- Panin V.E., Egorushkin V.E. Curvature solitons as generalized structural wave carriers of plastic deformation and fracture. *Physical Mesomechanics*. 2013, Vol. 16, no. 4, pp. 267–286.
- Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V. Nonlinear wave processes in a deformable solid as a hierarchically organized system. *Physical Mesomechanics*. 2012, Vol. 15, no. 3-4, pp. 133–146.
- Mallory C. Casperson, Jay D. Carroll, John Lambros, Huseyin Sehitoglu, Robert H. Dodds Jr. Investigation of thermal effects on fatigue crack closure using multiscale digital image correlation experiments. *International Journal of Fatigue*. 2014, Vol. 61, pp. 10–20.
- Babu M.N., Dutt B.S., Venugopal S., Sasikala G., Bhaduri A.K., Jayakumar T., Raj B. On the anomalous temperature dependency of fatigue crack growth of SS 316(N) weld. *Mater Sci. Eng. A* 2010, Vol. 527(20), pp. 5122–9. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.075>.

7. Panin S.V., Vlasov I.V., Sergeev V.P., Sungatulin A.R., Kalashnikov M.P., Poltaranin M.A., Ovechkin B.B. Increasing the fatigue life of 12Cr1MoV steel by surface nanostructuring with a Zr^{+} ion beam. Structure, properties and fracture pattern. *Physical Mesomechanics*. 2013, Vol. 16, no. 2, pp. 170–182.
8. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.V. etc. *Marochnik stalei i splavov* [Steels and alloys grade guide]. Moscow: Mashinostroenie, 2003. 784 p. (In Russ.).
9. Panin S.V., Yussif S.K., Sergeev V.P. Vlasov I.V., Panin A.V., Lyubutin P.S., Poltaranin M.A. Multiple cracking as a way to increase fracture resistance of the surface hardened materials. *Perspektivnye materialy*. 2011, Vol. 1, no. 13, special issue, pp. 177–186. (In Russ.).
10. Panin V.E., Sergeev V.P., Panin A.V. *Nanostrukturirovanie poverkhnostnykh sloev konstruktivnykh materialov i nanesenie nanostrukturnykh pokrytii* [The nanostructuring of the surface layers of structural materials and application of nanostructured coatings]. Tomsk: izd. Tomskogo politekhn. un-ta, 2008. 286 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The study was carried out with partial financial support of the RFBR project no. 13-08-90402 UkrFA, project of SB RAS no. III.20.1.3 and the grant of the President of the Russian Federation for state support of leading scientific schools of the Russian Federation NSH-2817.2014.1, School of academician Panin V.E. . Structural studies were partly carried out on the equipment of PCU “Nanotech” in ISPMS SB RAS.

Received January 16, 2014
