

УПРОЧНЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т, БОМБАРДИРУЕМОЙ ИОНАМИ ТИТАНА С ЭНЕРГИЕЙ 50 КЭВ

Русакова А. В., Максимкин О. П., Гусев М. Н.

Институт Ядерной Физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан
arussakova@gmail.com

Введение

Традиционные методы модифицирования поверхностных слоев металлических материалов в целом ряде случаев не обеспечивают заданное изменение физико-механических свойств. Имплантация ускоренных ионов различных элементов открывает возможности создания в поверхностных слоях образцов необычных фазовых и структурных состояний [1] и, кроме того, имплантация ведет к образованию значительных концентраций дефектов и атомов примесей вблизи поверхности, в результате чего, вызываемые ими искажения решетки могут распространяться на глубины во много раз превышающие значения проецированного пробега ионов в мишени. С этим эффектом могут быть связаны некоторые особенности упрочнения и разрушения имплантированных материалов.

Методика исследований

Исследовали аустенитную нержавеющую сталь 12Х18Н10Т. Плоские стальные образцы в виде двойной лопатки с размерами рабочей части $10 \times 3.5 \times 0.3$ мм отжигали при 1320К в вакууме 30 мин, а затем облучали ионами титана с двух сторон на установке «Диана» (ФТИ МОН РК, 50кэВ, максимальный флюенс частиц 10^{17} ион/см²).

Необлученные и облученные образцы деформировали со скоростью 0.44 мм/мин при температуре 293К на лабораторной установке, совмещающей прецизионный калориметр Кальве и микроразрывную машину [2]. Фрактографические исследования и определение элементного состава материала поверхности излома проводили с помощью растрового электронного микроскопа “JSM-7500F (JEOL)”, дополнительно укомплектованного анализатором фирмы Oxford Instruments. Микротвердость по Виккерсу определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 100 г.

Результаты и их обсуждение

Механические испытания в калориметре. Измерения микротвердости показали, что на обеих сторонах плоского образца, облученного ионами титана флюенсом $5 \cdot 10^{16}$ ион/см², $H_{\mu} = 160$ кг/мм², что на 10% больше, чем у необлученного образца.

Обработка этих экспериментальных данных показала, что характеристики прочности и пластичности стальных образцов, имплантированных ионами Ti, практически не отличаются от таковых для исходных образцов.

В то же время из калориметрических экспериментов обнаружено, что интенсивность тепловыделения dQ/dt в ходе деформации имплантированных стальных образцов выше, чем для необлученных и она возрастает с ростом флюенса частиц. Это различие начинает проявляться в сильной степени лишь по достижении некоторой критической степени деформации $\delta_{кр}$, причем $\delta_{кр} = 40\%$ для $2,5 \cdot 10^{16}$ ион/см² и $\delta_{кр} = 25\%$ при $\Phi t = 1 \cdot 10^{17}$ ион/см². Вероятнее всего, что этот дополнительный тепловой эффект связан с протекающим в деформируемом стальном образце мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения [3].

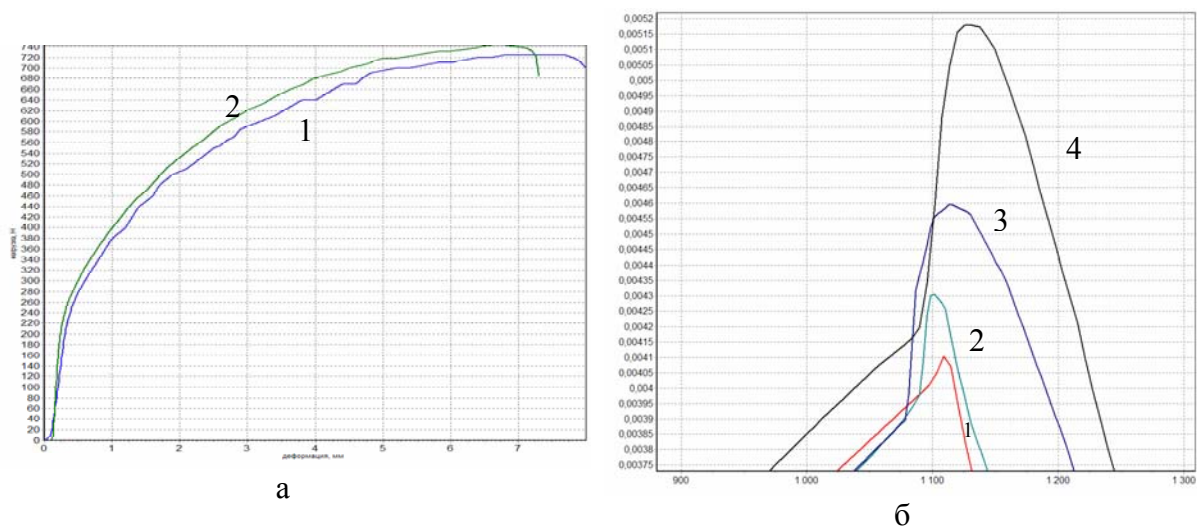
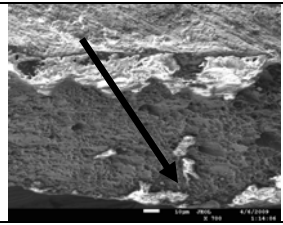
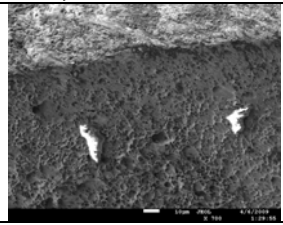
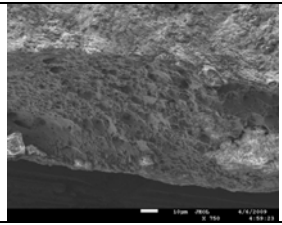


Рис. 1. а – Инженерные диаграммы растяжения стальных образцов: 1 – необлученная; 2 – флюенс $1 \cdot 10^{17}$ ион/см²; б – Экспериментальные кривые тепловыделения (в координатах «скорость тепловыделения [кал/сек]– время [сек]») в процессе деформации необлученных (1) и облученных ионами титана (2 – $2,5 \cdot 10^{16}$; 3 – $5 \cdot 10^{16}$; 4 – $1 \cdot 10^{17}$ ион/см²) образцов стали 12Х18Н10Т.

Тепловые эффекты при разрушении. Для ионно-имплантированной стали удельный тепловой эффект, сопровождающий разрушение, значительно выше, чем для необлученного материала. Это различие также можно объяснить тем, что в деформируемом образце протекало $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, причем тем большее по величине, чем дольше облучался образец. По достижению истинных напряжений равных 2100 МПа для необлученного и 1800 МПа для облученного флюенсом $1 \cdot 10^{17}$ ион/см² стальных образцов они разрушались.

Фрактография. При фрактографических исследованиях поверхности разрушенных необлученных и облученных образцов стали 12Х18Н10Т установлено (см. фото в табл. 3), что излом во всех случаях носит вязкий характер. Исследование излома необлученных образцов на сканирующем электронном микроскопе обнаружило достаточно однородную структуру и микрорельеф. Наблюдаются довольно крупные чашечки (средний размер 5–7 мкм) с хорошо выраженными гребнями отрыва. Мелкие чашечки (1,5–3 мкм) являются «окантовкой» крупных и часто образуют группы, диаметром 15–25 мкм. По результатам 25 измерений установлено, что средняя плотность чашечек составляет $2,72 \cdot 10^3$ ед/м².

Таблица 3. Результаты фрактографических исследований

	Необл.	$2,5 \cdot 10^{16}$ ион/см ²	$5 \cdot 10^{16}$ ион/см ²
Вид излома			
Плотность чашечек, ед/м ²	$2,72 \cdot 10^3$	$1,45 \cdot 10^3$	$7,74 \cdot 10^2$

При исследовании поверхности излома образца, облученного флюенсом $2,5 \cdot 10^6$ ион/см², оказалось, что при неизменном вязком характере разрушения, по сравнению с необлученным образцом, плотность чашечек в изломе снизилась до $1,45 \cdot 10^3$ ед/м². В то же время при повышении дозы облучения до $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² плотность чашечек увеличилась до $7,74 \cdot 10^2$ ед/м². Несомненно, что большую роль в формировании такого характера разрыва сыграло мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение.

Наряду со структурными исследованиями проводили также элементный анализ материала на поверхности разрыва. Анализ спектров, снятых с поверхности и объема излома образца показал, что особой разницы между ними нет.

Заключение

С применением методов микрокалориметрии, микротвердости и фрактографии изучены особенности процессов упрочнения и разрушения образцов нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т, облученной ускоренными ионами Ti с энергией 50 кэВ до максимального флюенса $1 \cdot 10^{17}$ ион/см². Показано, что облучение стали не привело к существенным изменениям характеристик прочности и пластичности, а также не изменило типа разрушения – вязкий. Основное различие заключалось в сравнительно высоком значении теплового эффекта при разрушении образцов стали, имплантированных ионами титана, что обусловлено, по-видимому, аномально высокой пластической деформацией приповерхностного облученного слоя образца, а также зарождением большого числа микротрещин в шейке образца, что ведет к увеличению теплового выброса при разрыве.

Таким образом, показано, что методика микрокалориметрии пластического течения не только обнаруживает высокую чувствительность к модификации поверхности, но и выявляет сложную картину поведения имплантированного материала при деформации и разрушении.

В дальнейшем, при исследовании ионно-имплантированных материалов, вместо механических испытаний на растяжение целесообразно исследовать усталостные малоцикловые испытания, в которых свойства приповерхностного слоя играют решающую роль в формировании соответствующих характеристик.

Список литературы

1. Быковский Д.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М., Энергоатомиздат. – 1991. – 240 С.
2. Гусев М.Н., Максимкин О.П. «Методика и установка для изучения тепловыделения и накопления энергии в процессе деформации облученных металлических материалов». Вестник НЯЦ РК. Курчатова, 2001, стр. 69-75.
3. Максимкин О.П., Гусев М.Н., Токтогулова Д.А. Диссипативные процессы на различных стадиях пластического течения армо-железа и нержавеющей стали 12Х18Н10Т, облученных нейтронами. //Вестник НЯЦ РК, 2007, № 3, стр. 12-17.
4. Максимкин О.П., Гусев М.Н. Изменения напряжений течения и латентной энергии при деформации нержавеющей стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами. //Письма в ЖТФ, 2003, т.29, № 3, стр.1-7.