

$7,5 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$ . Твердость отпущенной при этой температуре стали снижается до 220 НВ, что является приемлемой величиной для обеспечения свариваемости стали.

### **Заключение**

Исследование отпуска мартенситной структуры стали при температурах 300–800°C показало следующее:

- В процессе отпуска происходит гомогенное выделение мелкодисперсных (10–20 нм) частиц типа  $\text{Me}(\text{C},\text{N})$  и  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ ;
- Необратимая отпускная хрупкость стали при  $t=525^\circ\text{C}$  обусловлена выделением пленочного карбида  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  по границам зерен;
- Высокотемпературный отпуск приводит к выделению карбидов  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  (50 нм) преимущественно по границам исходных аустенитных зерен и мартенситных реек.
- Сочетание гомогенно распределенных частиц  $\text{Me}(\text{C},\text{N})$  и выделенных по границам  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  после высокотемпературного отпуска позволит обеспечить устойчивость структуры отпущенного мартенсита при старении и ползучести. В качестве температуры отпуска исследуемой стали можно рекомендовать температуру  $770^\circ\text{C}$ .

*Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № П 1095).*

### **Список литературы**

1. Vismanathan R., Henry J.F., Tanzosh J., Stanko G., Shingledecker J., Vitalis B., Purgert R., U.S. Program on Materials Technology for Ultra-Supercritical Coal Power Plants // J. Mater. Eng. Perfor., 2005, V.14, p.281 -292.
2. F. Abe, V. Taneike, K.Sawada. Alloy Design of Creep Resistant 9Cr Steel using a Dispersion of Nano-Sized Carbonitrides. // International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, p. 3-12.
3. Maruyama K., Sawada K., Koike J.-I. Strengthening mechanisms of creep resistant tempered martensitic steel // ISIJ Int. 2001. V. 41. No. 6. p. 641-653.
4. Кайбышев Р.О., Скоробогатых В.Н., Щенкова И.А. Новые стали мартенситного класса для тепловой энергетики. Жаропрочные свойства // ФММ. 2010. Т. 109, № 2. С. 200-215.

## **ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК ПОЛИИМИДА, ОБЛУЧЁННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ**

**Старовойтов Л. Е., Ткачѳв Д. В., Гусев С. С.**

*Учреждение образования «Могилевский государственный университет им. А.А.Кулешова», г. Могилѳв, Беларусь,  
[Lbvff014@yandex.ru](mailto:Lbvff014@yandex.ru)*

В работе рассматриваются результаты применения эллипсометрии для исследования плѳнок радиационно-модифицированного полиимида.

Эллипсометрия — это неразрушающий метод исследования свойств границы раздела сред и происходящих на ней явлений по параметрам эллипса поляризации отраженного света. В процессе измерений анализируются спектральные зависимости основных эллипсометрических параметров  $\text{tg } \psi$  и  $\text{cos } \Delta$ . Первый из них описывает относительное изменение после внешнего отражения амплитуд р- и s- компонентов отраженного света, а второй возникающую разность фаз между этими же компонентами. Значения углов  $\psi$  и  $\Delta$  отраженного света связаны выражением  $\text{tg}\psi e^{i\Delta} = R_p/R_s$  которое является основным уравнением эллипсометрии [1].

В нашем случае анализ эллиптической поляризации проводился с помощью автоматического оригинального эллисометра ES–2, в спектральном диапазоне от 400 до 1100 нм [2].

В работе с помощью метода эллисометрии исследовались поверхности модифицированных плёнок полиимида. Полиимиды – это твердые негорючие вещества преимущественно аморфной структуры, достаточно химически стойкие. Характеризуются высокими температурами плавления, лежащими ниже их температур разложения, и высоким модулем упругости. Полиимиды являются сильными диэлектриками, термостойки [3].

Измерения производились с тремя образцами пленок ароматического полиимида с целью анализа изменения спектральных и оптических свойств полимера вследствие ионной бомбардировки.

Первый образец, исходная плёнка, а два других модификация её.

Модификация осуществлялась облучением ионами гелия, полученными в ускоряющем поле 75кэВ, но с различными поверхностными плотностями частиц, а именно,  $10^{13}$  и  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Облучение плёнок проводилось на полупромышленной установке типа “Везувий” в Каунасском политехническом институте.

Исходная пленка имела толщину 20 мкм, светло коричневого цвета. Пленка, облученная ионами гелия с плотностью частиц  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>, не изменяла размеров по толщине, а также не изменяла своей окраски. Изменение цвета наблюдалось после бомбардировки пленки ионами с плотностью частиц  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Пленка приобретала равномерную темно-бурую окраску с металлическим блеском.

Условия спектральных измерений полностью идентичны для всех образцов.

Эффективные значения оптических параметров исследуемых пленок были определены в ходе проведенных экспериментов другими оптическими методами (инфракрасной спектроскопии и нарушенного полного внутреннего отражения). В частности, в области 2500–4000 нм исходная пленка была прозрачна, имела показатель преломления 1,71, а модифицированная 1,69; потемнение плёнки указывало на неизбежное повышение показателя поглощения в указанном спектральном диапазоне [4].

В ходе эксперимента были получены зависимости  $\cos\Delta$  и  $\operatorname{tg}\psi$  от длины волны для двух сторон пленок ароматического полиимида при различных углах падения.

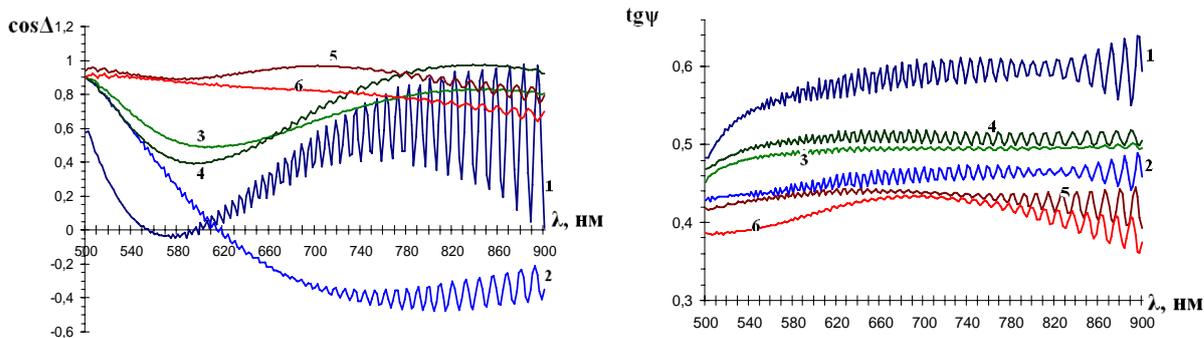
Полученные спектральные зависимости для исходной плёнки с разных поверхностей различны (см. кр. 1, 2 на рис. 1 – 3). Следствием этого заключения совершенно естественно будет утверждение, что и оптические характеристики полиимида в зонах этих поверхностей также различны.

Рассмотрим далее характер изменения функций  $\cos\Delta$  и  $\operatorname{tg}\psi$  по мере модификации полиимида. При облучении плёнки ионами гелия с плотностью  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> наблюдаются следующие:

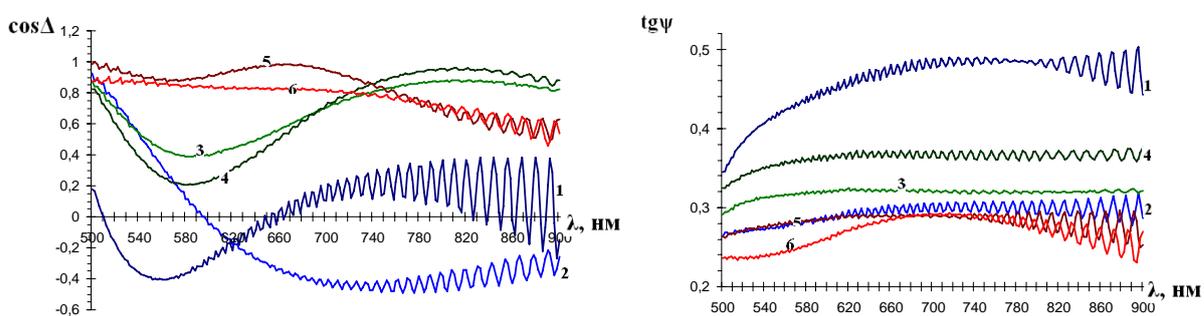
1) Качественно ход зависимости функции  $\cos\Delta$  для обеих поверхностей один и тот же (см. кр. 3, 4 на рис. 1 – 3)

2) Если сравнивать кривые для  $\cos\Delta$  исходной и соответственно с подобными кривыми облученной плёнки, то видно их существенное различие (форма, значение параметров).

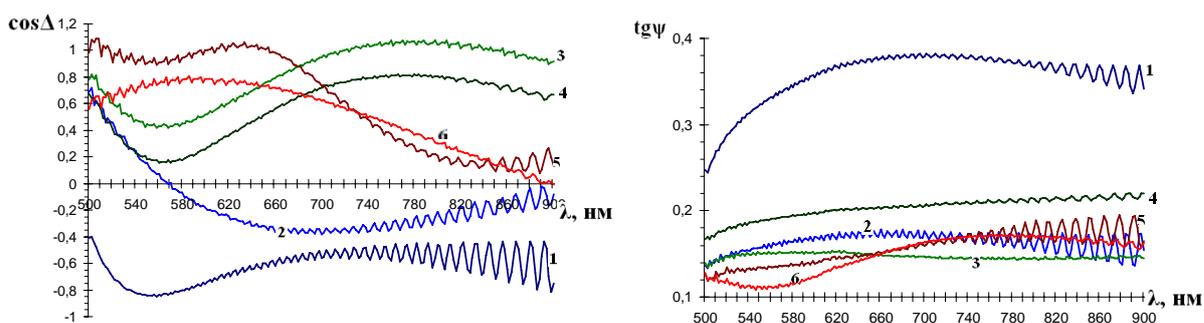
3) Что касается поведения зависимостей для функции  $\operatorname{tg}\psi$  в том же порядке, то о никаких больших различиях речи идти не может.



**Рис. 1.** Спектральные зависимости  $\cos\Delta$  и  $\text{tg}\Psi$  при угле падения  $\varphi = 75^\circ$ . Исходная плёнка: 1 – лицевая поверхность, 2 – тыльная поверхность. Модифицированные плёнки: а) плёнка, облученная ионами гелия с плотностью  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ : 3 – тыльная поверхность, 4 – лицевая поверхность; б) плёнка, облученная ионами гелия с плотностью  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ , 5 – лицевая поверхность, 6 – тыльная поверхность.



**Рис. 2.** Спектральные зависимости  $\cos\Delta$  и  $\text{tg}\Psi$  при угле падения  $\varphi = 70^\circ$ . Исходная плёнка: 1 – лицевая поверхность, 2 – тыльная поверхность. Модифицированные плёнки: а) плёнка, облученная ионами гелия с плотностью  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ : 3 – тыльная поверхность, 4 – лицевая поверхность; б) плёнка, облученная ионами гелия с плотностью  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ , 5 – лицевая поверхность, 6 – тыльная поверхность.



**Рис. 3.** Спектральные зависимости  $\cos\Delta$  и  $\text{tg}\Psi$  при угле падения  $\varphi = 65^\circ$ . Исходная плёнка: 1 – лицевая поверхность, 2 – тыльная поверхность. Модифицированные плёнки: а) плёнка, облученная ионами гелия с плотностью  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ : 3 – тыльная поверхность, 4 – лицевая поверхность; б) плёнка, облученная ионами гелия с плотностью  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ , 5 – лицевая поверхность, 6 – тыльная поверхность.

Суммируя вышесказанное, можно предположить, что при облучении плёнок полиимида идет изменение в оптических характеристиках поверхностей с обеих сторон, причем у тыльной поверхности эти изменения более выражены. Возможно, что большей радиационной модификации подвергается области плёнки близкие к тыльной поверхности, так как при прохождении через плёнку полиимида ионы гелия теряя свою

энергию в верхних слоях в большей степени изменяют структуру нижнего слоя полиимида.

При увеличении плотности облучения ионами гелия до  $10^{16}$  см<sup>-2</sup> наблюдается:

1) Дальнейшее изменение спектральных зависимостей функции  $\cos\Delta$  по сравнению как с исходным образцом так и с облучённым ионами гелия с плотностью  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> (см. кр. 5, 6 на рис. 1–3).

2) Различия для поверхностей остаются, но они относительно меньше, чем для двух предыдущих образцов.

3) Зависимости для функции  $\text{tg}\Psi$  никаких существенных изменений не претерпели ни по значениям функции ни по ходу кривых.

Это всё говорит о том, что при такой плотности излучения структура полиимида с обеих сторон меняется существенно, это может привести к значительному изменению оптических характеристик.

Таким образом, облучение ионами гелия приводит к изменению структуры плёнок полиимида при этом не идет их разрушение, а наоборот лицевая и тыльная стороны по своим оптическим характеристикам выравниваются.

### Список литературы

1. Горшков В.И. Эллипсометрия. – М.: Сов. Радио, 1974. 200с.
2. В. И. Ковалев, А.И. Руковишников, Приборы и Техника эксперимента.-2003.- №2.- Р. 164-167с.
3. Энциклопедия полимеров. Ред. коллегия: В.А. Кабанов (глав. ред.) [и др.] Т. 2– М.: Советская энциклопедия, 1974.
4. Гусев С. С., Старовойтов Л. Е., Рыжков О. В., Альхимович О. Б., Томов А. В., Пахоменко А. Н. Спектры поглощения полиимидов. Оптика неоднородных структур – 2007: материалы международной научно – практической конференции (2 – 3 октября 2007г.) - Могилёв: МГУ им. А. А. Кулешова, 2007. – с. 47 – 50.

## ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ЖЕЛЕЗА: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Нагорных И. Л., Бурнышев И. Н.

*ИПМ УрО РАН, г. Ижевск, РФ,  
[inburn@mail.ru](mailto:inburn@mail.ru)*

К возможным механизмам изменения механических свойств металлических систем в присутствии водорода относят механизм атомной декогезии HEDE (Hydrogen-enhanced decohesion) и механизм усиленной водородом локальной пластичности металла HELP (Hydrogen-enhanced local plasticity). Существует еще третий основной механизм, связанный с образованием хрупких гидридов, однако он признан для железа несостоятельным.

Целью настоящей работы является исследование атомистики поведения систем Fe–H в наномасштабных областях на стадиях упругой, пластической деформаций, а также в процессе разрушения материала.

В работе проведен ряд численных расчетов методом классической молекулярной динамики. Расчеты проведены с использованием потенциалов межатомного взаимодействия в ЕАМ приближении.

Системы для моделирования формировались следующим образом. В идеальном кристалле ОЦК-Fe удаляли несколько полуплоскостей  $\{001\}$ ; получившийся объемный дефект представлял собой трещину. В область сформированного дефекта помещалось