

во всех системах наблюдается изменение среднего размера зерен, что связано с переходом кристаллической структуры составов от ромбоэдрической фазы к кубической вследствие уменьшения параметров ячейки и ее объема. Составы с  $x = 30\%$  характеризуются резким уменьшением размера зерен до 1 мкм ввиду фазового перехода «ромбоэдр – куб».

### **Благодарность (финансирование)**

Работа поддержана Белорусским Республиканским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № T24BA-002).

### **Список использованной литературы**

1. K.F. Wang, J.M. Liu, Z.F. Ren. Adv. Phys. 58(4) (2009) 321.
2. G. Catalan, J.F. Scott. Adv. Mater. 21(24) (2009) 2463.
3. A.L. Zhaludkevich [et al.] J. of Alloys .Comp. 830 (2020) 154632.
4. M. Habib [et al.] J Materiomics. 7 (1) (2021) 40.

**УДК: 621.315.616**

**Хуан Х.Л., магистр физики, ст. исследователь**

*Чжэнчжоский университет, Чжэнчжоу, Китай*

## **МОДИФИКАЦИЯ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ТРАНСФОРМАТОРНЫМ МАСЛОМ**

Оптимизация теплообмена в энергетическом оборудовании является ключевой задачей повышения энергоэффективности. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является модификация смачиваемости поверхностей трансформаторным маслом, что позволяет существенно улучшить теплопередачу в системах охлаждения силовых трансформаторов [1]. В работе исследуются методы управления смачиваемостью и их влияние на эффективность теплообмена.

Исследования проводились на стальных образцах, используемых в конструкциях теплообменников трансформаторов. Модификация поверхности осуществлялась методами магнетронного осаждения с формированием покрытий толщиной от 250 до 750 нм. Для анализа смачиваемости использовали автоматизированный ком-

плекс для измерения равновесного краевого угла смачивания и математические модели [2]. Измерения проводили при температуре 20°C с трансформаторным маслом спецификации GB2536-90.

Результаты и обсуждение: Топография модифицированных поверхностей, исследованная методом АСМ и СЭМ, демонстрирует значительные изменения в зависимости от толщины и типа покрытия (рис. 1). После нанесения покрытий наблюдалось значительное изменение шероховатости поверхности. На образце без покрытия шероховатость составляла ~120 нм. При толщине покрытия 250 нм шероховатость увеличивалась до ~260 нм, а при 500 нм – до ~420 нм, что способствует улучшению смачиваемости за счет увеличения площади поверхности.

Измерения краевых углов смачивания показали существенную зависимость от параметров покрытия (таблица 1). Наибольшее улучшение смачиваемости наблюдалось для образцов с покрытием толщиной 500 нм.

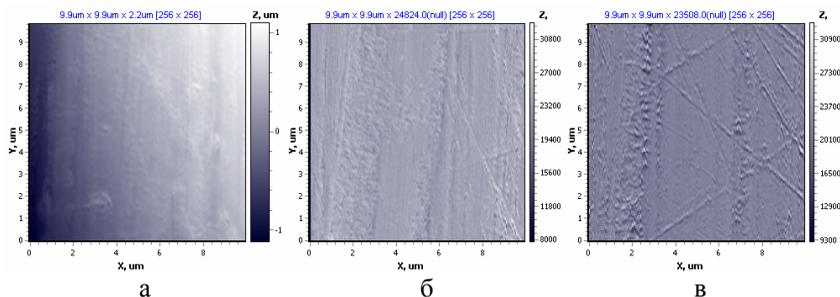


Рис.1. Топография поверхности стальных образцов: а – без покрытия, б – с покрытием толщиной 250 нм, в – с покрытием толщиной 500 нм

Таблица 1 – Параметры смачиваемости образцов трансформаторным маслом

Толщина покрытия, нм	Краевой угол, °	Шероховатость, нм
0	68,7	120
250	93,2	260
500	129,9	420
750	134,6	450

СЭМ-анализ образцов после испытаний в трансформаторном масле выявил формирование устойчивой микрорельефной структуры (рис. 2), которая способствует равномерному распределению масла и улучшению теплообмена. EDX-анализ показал достаточно

равномерное распределение элементов в покрытии, анализ при разных энергиях рассеяния и торцевого среза материала показал отсутствие миграции элементов покрытия в основной материал.

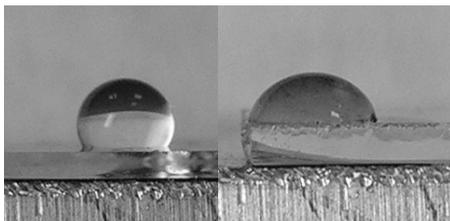


Рис. 2. Изображения капле трансформаторного масла в контрастном свете на поверхности: а – без покрытия, б – с покрытием толщиной 500 нм

Улучшение смачиваемости связывается с увеличением шероховатости поверхности и изменением ее химического состава, что приводит к снижению краевого угла смачивания и улучшению растекания трансформаторного масла [3-4].

### **Заключение**

Проведенные исследования подтвердили, что модификация поверхности методами магнетронного распыления и ионно-ассистированного осаждения позволяет существенно улучшить смачиваемость трансформаторным маслом. Наибольшая эффективность достигнута при толщине покрытия 500 нм, где краевой угол смачивания увеличился с  $68,7^\circ$  до  $129,9^\circ$ , что способствует улучшению теплообмена в системах охлаждения трансформаторов. Полученные результаты важны для повышения энергоэффективности оборудования в агропромышленном комплексе.

### **Список использованных источников**

1. Kwok X.D. Tian Y. Peng X.F. /Selfaggregation of vapor-liquid phase transition // J. Prog. in Nat.Science. – 2003. – 13. – p. 451–456.
2. Автоматизированный комплекс для измерения равновесного краевого угла смачивания на плоских поверхностях /Патент РБ 7074 по заявке 20100661, от 12.10.2010 //Е.П. Макаревич, И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук, М.А. Андреев.
3. Барайшук С.М. и др. Изучение смачиваемости твердых тел методом математического моделирования контактных углов // Вестник науки и образования. – 2016. – С. 45–49.
4. Барайшук С. М., Дзязюля І. У. Экспериментальне вивчення змочвання цвердих паверхняў вадкасямі ў курсе агульнай фізікі. – 2011.