

УДК 548.313.4

## АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ МЕТОДОМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Шаманская Е.Л.<sup>1</sup>, Жирнова С.В.<sup>1</sup>, Бурцев А.А.<sup>1,2</sup>, Бухаров Д.Н.<sup>1</sup>, Прусов Е.С.<sup>1</sup>, Панков М.А.<sup>1,3</sup>,  
Копылов Ю.Л.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых  
Владимир, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «Новые технологии лазерного термоупрочнения»  
Радужный Владимирской области, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФКП «Государственный лазерный полигон «Радуга»  
Радужный Владимирской области, Российская Федерация

<sup>4</sup>Филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Фрязино Московской области, Российская Федерация

**Введение.** При изучении дефектов оптической керамики методом электронной микроскопии было обнаружено, что система пор имеет выраженную фрактальную структуру. Влияние спекающих добавок и их концентрации на прозрачность материала и генерацию дефектов было представлено в обзоре [1]. Большинство примесей или растворяются в основном веществе, или образуют нерастворимые включения. Растворенные примеси меняют концентрацию собственных дефектов в матрице и, соответственно, изменяют, например, коэффициенты диффузии основных компонентов. Объяснение роли добавок иновалентных оксидов на кинетику спекания сводится или к увеличению коэффициента самодиффузии, при введении примеси, или к уменьшению поверхностной энергии зерен – в присутствии посторонней фазы [2]. Введение добавок в виде примеси замещения приводит также к генерации дефектов. При увеличении концентрации спекающих добавок замечено также увеличение образующихся дефектов.

**Методы моделирования.** В предыдущей работе авторами было показана возможность математического описания распределения и роста пористых дефектов в оптической высокопрозрачной керамике [3].

В качестве модели для описания процесса образования центров кристаллизации была выбрана разновидность клеточного автомата в реализации «игра «Жизнь». Игра "Жизнь", созданная математиком Джоном Хортоном Конвеем, – типичный пример клеточного автомата, как математического объекта, представляющего собой дискретную динамическую систему [4]. По существу, клеточные автоматы являются синтетическими мирами, поведение которых большей частью определяется простыми локально действующими правилами. В этих мирах пространство представляет собой равномерную сетку, каждая ячейка которой (клетка) содержит информацию о своем состоянии. Время – дискретно. Законы такого мира представляют собой небольшое количество правил, основные из которых описываются таблицей переходов, по которой клетка вычисляет свое

новое состояние на каждом такте (минимальный отрезок времени) на основе своего состояния и состояний ее соседей. Каждая клетка может находиться в двух состояниях – живом или мертвом, т. е. пустом. На состояние любой клетки оказывают влияние состояние соседних клеток. Во времени эти состояния дискретно в соответствии с некоторыми правилами (генетическими законами), состоящими из 2 пунктов:

1) **ВЫЖИВАНИЕ ИЛИ ГИБЕЛЬ.** Если живая клетка имеет меньше 2 или более 3 соседей в окрестности из 8 клеток, то в следующем поколении она умирает (моделирование реальных условий – недостатка питания или перенаселенности), в противном случае она выживает;

2) **РОЖДЕНИЕ.** В пустой клетке появляется живая клетка, если у исходной клетки ровно 3 соседа.

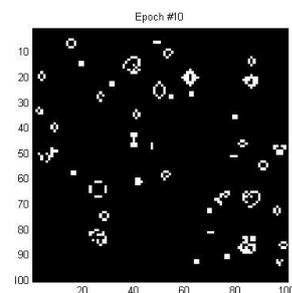


Рисунок 1 – Результаты моделирования для параметров percentage = 10; epochs = 10

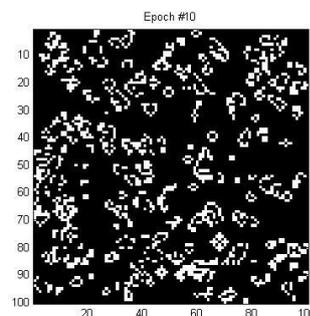


Рисунок 2 – Результаты моделирования для параметров percentage = 20; epochs = 10

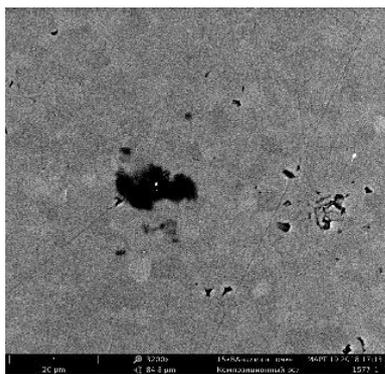


Рисунок 3 – Внешний вид дефектов (пор) в оптической керамике

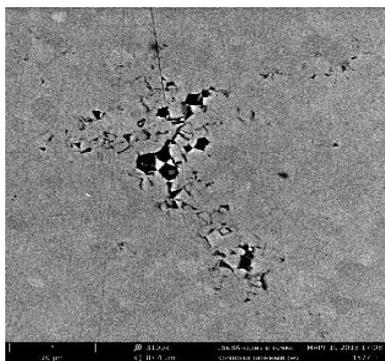


Рисунок 4 – Внешний вид дефектов (пор) в оптической керамике

Гибель и рождение всех организмов происходит одновременно. Иногда колония клеток постепенно вымирает, однако произойти это может не сразу, а лишь после того, как сменится очень много поколений. Чаще всего исходные конфигурации переходят в устойчивые и перестают изменяться, либо навсегда переходят в колебательный режим. При этом, конфигурации, не обладавшие в начале игры симметрией, обнаруживают тенденцию к переходу в симметричные формы [5]. Обретенные свойства симметрии в процессе эволюции не утрачиваются, а симметрия конфигурации может лишь обогащаться. Рассматриваемая задача была реализована в среде MATLAB.

**Применение моделей для анализа.** По представленному выше алгоритму игры «Жизнь» были произведены расчеты конфигураций кластеров. Расчетная область выбиралась размером  $100 \times 100$  отн.ед, а заселенные клетки заполнялись случайным образом. Различные конфигурации системы кластеров возможно получить, варьируя

параметры заселенности (percentage), которая играет роль примесей, находящихся в анализируемой зоне спекания, и представлена в процентном соотношении от расчетной области, и числа эпох (epoch), которые можно сопоставить времени спекания и остывания. Ниже приведены результаты для одинакового количества эпох, но разного значения населенности. Результаты моделирования показали, что с увеличением заселенности увеличивается и количество образовавшихся простых кластеров. Кроме того, при увеличении количества эпох имеет место картина образования устойчивых замкнутых структур, состоящих из большего числа частиц. Для анализа необходимо сравнение распределения кластеров в модели с экспериментальными наблюдениями пористости образцов высоко прозрачной керамики.

Изображения пор в керамике, полученные методом электронной микроскопии, приведены на «рис. 3» и «рис. 4».

**Выводы.** В работе представлены исследования пористости прозрачной керамики. При анализе результатов математического моделирования обнаружено качественное совпадение результатов моделей с экспериментальными данными. В частности, показано, что для распределения центров роста пор можно использовать классический клеточный автомат Дж. Конвея «Жизнь».

#### Литература

1. Гаранин С.Г., Дмитрюк А.В., Жилин А.А., Михайлов М.Д., Рукавишников Н.Н. Лазерная керамика. Методы получения // Оптический журнал. – 2010. – V. 77. – № 9. – С. 52–68.
2. Ikesue A., Aung Y.L., Lupei V. Ceramic Lasers. Cambridge University Press. – 2013. – 446p.
3. Канаев А.Ю., Бурцев А.А., Лопухин К.В., Лысенко С.Л., Копылов Ю.Л. Изучение дефектов лазерной керамики с применением метода клеточных автоматов // Труды XIII Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, издательство «Техно–Декор». – 2018. – С. 92–94.
4. Gardner M. The Fantastical Combinations of John Conway's New Solitaire Game "Life" // Scientific American 223 9(4) – 1970. – P. 120–123.
5. Бурцев А.А., Бутковский О.Я. Описание роста фрактальных кристаллов на поверхности нержавеющей стали методом клеточных автоматов. // Межвузовский сборник «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов». – Тверь: Изд-во Тверского гос. ун-та. – 2018. – С. 187–195.