

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МНОГОСТАДИЙНОЙ СБОРКИ ВЫСОКОУПОРЯДОЧЕННЫХ ВОЛОКОННЫХ И КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

© 2005 г. В. А. Кутасов, канд. техн. наук; Э. Ю. Бессонова, канд. хим. наук

ООО “Волоконно-оптическая техника”, Санкт-Петербург

Рассмотрено применение фрактальной геометрии для описания многостадийной сборки упорядоченной гексагональной структуры микроканальных и волоконно-оптических пластин. Проведено графическое и физическое моделирование применимости новых сборочных элементов в двухстадийном процессе. Изготовлены образцы высокоупорядоченных структур.

Коды OCIS: 060.2290, 160.2290.

Поступила в редакцию 15.01.2005.

Введение

Одной из основных проблем технологии волоконных и капиллярных изделий, используемых для передачи и трансформации изображения в электронно-оптическом преобразователе, является задача построения упорядоченной гексагональной структуры (УГС). Предлагаемая работа является логическим продолжением и развитием исследований, предпринятых для решения этой задачи [1–5]. Одновременно в этих работах было проведено сопоставление полученных результатов с результатами выполненных в фирме GEOS (США) исследований, имевших ту же цель [6–8]. Основной упор при сравнении был сделан на констатации различий как в исходных теоретических посылах, так и в отношении особенностей практической реализации обоих решений. Однако такой подход, который на тот момент представлялся вполне естественным, обнаружил свою ограниченность при попытке обосновать возможность распространения полученных нами результатов на многостадийный процесс (МП).

Напомним, что в первых публикациях достаточно полно изложено и проиллюстрировано применение предложенных форм сборочных элементов в одностадийном процессе (ОП), когда используют только одну сборку пакета и его перетяжку [2, 5]. Понятно, что область применения одностадийной технологии ограничена изготовлением изделий с невысокой разрешающей способностью. Кроме этого, использование ОП в производстве волоконно-оптических пластин (ВОП) не позволяет реализовать наиболее рациональную схему одновременного повышения их ЧКХ и светопропускания, в которой подавление фонового света происходит за счет поглощения его стержнями из стекла с высокой оптической плотностью, расположенными в междоузлиях структуры. Поэтому уже на первом этапе приведенный в [9] пример сборки УГС из усеченных правильных треугольников был рассмотрен нами как результат последовательной трансформации и

многошаговой трансляции элементарной ячейки гексагональной структуры. Анализ этого частного случая позволил предположить, что найденные формы пригодны для МП, о чем и было упомянуто в первых публикациях [2, 5]. Однако отсутствие достаточного обоснования такой возможности и проверки ее с помощью графического моделирования придавали этому утверждению несколько декларативный характер. Устранению этих пробелов, а также физическому моделированию процесса многостадийной сборки УГС из найденных форм сборочных элементов посвящена данная работа.

Как уже отмечалось выше, в [1, 2] основное внимание уделено поиску различий между двумя решениями задачи формирования УГС. Напротив, в данной работе значительное место отведено анализу сходства между ними, основанного на общей методологической базе, в качестве которой выступает фрактальная геометрия. Некоторые общие положения этой теории, необходимые в ходе дальнейшего рассмотрения, взяты из исторического эссе Б. Мандельброта “Фракталы и возрождение теории итераций”, опубликованного в [10].

Фрактальная геометрия как самостоятельная область прикладной математики сформировалась во второй половине прошлого века и связана с именем Б. Мандельброта, который впервые ввел понятие фрактала в научный обиход в 1975 г. При этом он отметил следующие обстоятельства: 1 – строгое математическое определение термина “фрактал” на тот момент отсутствовало; 2 – введенное понятие относится к геометрическим фигурам с негладкими границами; 3 – фигуры, обозначенные как фракталы, обладают свойством быть “нерегулярными, но самоподобными”; 4 – свойство “подобный” не всегда понимается в строго геометрическом значении как “линейно увеличенный или уменьшенный”, а в более широком смысле, как “похожий”. Спустя два года, стремясь более строго формализовать введенное им понятие фрактала, Б. Мандельброт определил множество, размерность Хаусдорфа которого не выра-

жается целым числом, как фрактальное. Таким образом, понятие “фрактал” относится к самоподобным геометрическим фигурам с негладкими границами, которые характеризуются дробной размерностью Хаусдорфа.

Пример практического применения принципов фрактальной геометрии к многостадийной сборке УГС приведен в [6]. Отправной точкой для создания совершенного процесса явилось признание того факта, что истинные границы многожильных стержней (МЖС), а также сверхмногожильных стержней (СМЖС) более высоких порядков являются не гладкими прямыми, а ломаными, имеющими в зависимости от порядка макро- и микрорельефы различной сложности. Для получения упорядоченной структуры на границах всех сборочных элементов рельефы должны быть взаимно сопряжены, а соединение всех единичных жил должно проходить по типу пик–впадина.

Сборка из правильных шестиугольников

В качестве теоретической модели построения УГС в [6] принято рассмотренное Б. Мандельбротом последовательное превращение правильного шестиугольника. Первый шаг преобразования заключается в замене каждой из сторон шестиугольника ломаной, состоящей из трех отрезков равной длины (рис. 1а). Нетрудно заметить, что контур образовавшейся фигуры в точности соответствует очертаниям МЖС наинизшего порядка $m = 1$, собранного из семи единичных стержней правильного шестиугольного сечения (рис. 1б). Последовательное применение указанного преобразования к каждому из вновь полученных контуров приводит к образованию все более сложных фигур, периметры которых достаточно быстро возрастают, а площади остаются равными.

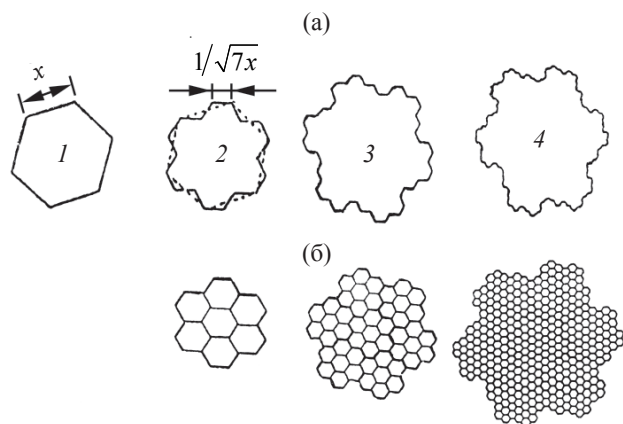


Рис. 1. Схема, поясняющая тождественность регулярных фракталов Мандельброта (а) и многостадийной сборки УГС из правильных шестиугольников (б) [6].

Периметр L многоугольника описывается формулой

$$L = Kr^{1-D_h}, \quad (1)$$

где K – число сторон в исходном многоугольнике, r – длина каждой стороны преобразованного многоугольника, D_h – значение размерности Хаусдорфа. Для определения пределов изменения последнего параметра разрешим относительно него выражение (1), тогда

$$D_h = \log(L/rK)/\log(1/r). \quad (2)$$

Для первого шага величина D_h с учетом условий преобразования легко определяется непосредственно из рисунка и равна $\log 3/\log \sqrt{7} = 1,1291$. Это значение определяет верхнюю границу D_h . Периметры фигур, образующихся при трансформации исходного правильного шестиугольника в равновеликий ему по площади многоугольник с порядком $m > 1$ (число единичных элементов на стороне $n > 2$), могут быть также охарактеризованы величиной D_h . Учитывая, что периметр многоугольника, на стороне которого уложено n элементарных правильных шестиугольников, $L = 6(2n - 1)r$, а длина стороны элементарного шестиугольника r в $\sqrt{N}$ раз меньше стороны исходного шестиугольника ($N = 3n(n - 1) + 1$), выражение (2) можно записать в виде

$$D_h(n) = \log(2n - 1)/\log \sqrt{3n(n - 1) + 1}. \quad (3)$$

Последнее выражение позволяет рассчитать D_h для МЖС любого порядка. Например, подстановка в (3) $n = 2$ непосредственно дает значение $D_h = \log 3/\log \sqrt{7}$, вышеопределенное из геометрических построений (рис. 1а).

На рис. 1б приведен вид поперечного сечения МЖС различных порядков, каждый из которых получен перетяжкой пакета, собранного из МЖС предшествующих порядков таким образом, что для всех единичных жил условие пик–впадина на границах сборок выполняется. Сравнение внешних контуров фигур обоих рядов показывает, что отмеченное выше соответствие между МЖС низшего порядка и фигурой, образованной на первом этапе, справедливо и для фигур более высоких порядков. Анализ фигур нижнего ряда позволяет сделать вывод, что все они тривиально самоподобны, так как представляют собой семиэлементные ячейки различных порядков, организованные одинаковым образом. В [9] отмечается, что ячейка низшего порядка может содержать не только семь единичных жил, но любое число из ряда, определяемого приведенным выше соотношением для $N(n)$. Однако и в этом случае построение структур сборочных элементов бо-

лее высоких порядков осуществляется так же, как и для $n = 2$.

С целью определения возможности практической реализации предложенных фрактальных форм сборочных элементов и оценки эффективности их применения в GEOC по двум различным вариантам технологического процесса были изготовлены образцы ВОП с геометрическим пределом разрешения ~ 100 штр/мм. В первом варианте был использован двухстадийный процесс, на начальной стадии которого изготавливали семиэлементные МЖС, которые затем собирали в пакет, содержащий 1657 МЖС, и перетягивали в СМЖС. Во втором варианте был принят трехстадийный процесс, первая стадия которого полностью совпадала с первой стадией первого варианта. На второй стадии семь МЖС собирали в пакет и перетягивали в 49-элементные СМЖС, которые на последней стадии были собраны в пакет из 547 СМЖС и перетянуты в сверх-СМЖС. На последнем этапе процесса изготовления пластин СМЖС первого варианта и сверх-СМЖС второго варианта были собраны в блоки и спечены под давлением. Приведенные в [7] микрофотографии наиболее критичных участков структуры ВОП, каковыми, как правило, являются окрестности стыков трех собираемых в заготовку блока элементов, подтвердили возможность существенного увеличения ее упорядоченности. Об этом свидетельствует почти полное отсутствие различимых границ между сборочными элементами предшествующих финишной сборке стадий (между МЖС в первом варианте и СМЖС во втором варианте).

Помимо чисто качественных оценок упорядоченности структуры ВОП в исследованиях GEOC оценивалась степень влияния на нее конфигурации сборочных элементов, использованных в различных вариантах технологического процесса. С этой целью для каждой сборки, пользуясь соотношением (3), вычисляли размерность Хаусдорфа, а результирующие величины $\overline{D}_h$ определялись как среднеарифметические из значений каждой стадии. Так, в первом варианте на первой стадии $D_h = 1,1291$, на второй – $1,0388$ (в пакете МЖС $n = 24$), а $\overline{D}_h = 1,0840$. Во втором варианте на каждой из первых двух стадий $D_h = 1,1291$, а на третьей – $1,0456$ (в пакете МЖС $n = 14$), что определяет $\overline{D}_h = 1,1012$. Наряду с оценками D_h для различных вариантов фрактальных сборок аналогичный расчет был проведен и для стандартного процесса изготовления серийных ВОП. На первой стадии этого процесса изготавливают МЖС правильного шестиугольного сечения с числом элементов на стороне $n = 5$ ($N = 61$, $D_h = 1,069$),

а на второй – пакет, содержащий 547 МЖС, перетягивают в СМЖС ($n = 14$, $D_h = 1,0456$), отсюда $\overline{D}_h = 1,0573$. Микрофотография аналогичного участка структуры серийного ВОП приведена в [7]. На ней видно, что границы МЖС четко выделены. Это наглядно подтверждает невозможность получения УГС в стандартном процессе, в котором поперечные сечения пакетов единичных стержней (ЕС) и МЖС имеют форму правильного шестиугольника, а сборки МЖС и СМЖС проводят, базирываясь на горизонтальной плоскости.

Таким образом, следует отметить, что теоретические и экспериментальные результаты работ GEOC подтверждают эффективность применения фрактальной геометрии для создания многостадийной сборки УГС [8]. Найденные формы сборочных элементов обладают всеми свойствами фракталов: негладкостью границ, самоподобием и дробной размерностью Хаусдорфа. Первое определяется самой природой многожильных элементов и является их имманентным свойством, не зависящим от того, какую форму имеют единичные жилы (правильные шестиугольники и круги являются топологически эквивалентными фигурами [6]). Третье свойство, хотя и дает в отличие от двух других возможность ввести определенную количественную характеристику процесса сборки УГС, обнаруживает, как следует из приведенных оценок GEOC, слабую корреляцию с конечным результатом. Второе свойство – самоподобие – в работах GEOC не упоминается, хотя по существу именно оно образует фундамент фрактальной геометрии. Отсутствие прямого упоминания свойства самоподобия связано с тем, что оно заложено в самом принципе преобразования правильного шестиугольника по Б. Мандельброту (рис. 1а), а проявление его в МЖС различных порядков очевидно (рис. 1б).

Завершив краткий экскурс во фрактальную геометрию и рассмотрев пример приложения ее основных положений к технологии УГС, сформулируем краткий вывод. Наибольшее значение из всех свойств фрактала для технологии волоконных и капиллярных изделий с высокоупорядоченной структурой имеет самоподобие. Именно этот принцип и был использован нами при разработке многостадийного процесса сборки УГС из усеченных правильных шестиугольников.

Сборка УГС из неправильных шестиугольников

Практическая реализация сборки УГС из правильных шестиугольников, описанная в работах GEOC, страдает одним существенным недостатком – невозможностью проводить ее на горизон-

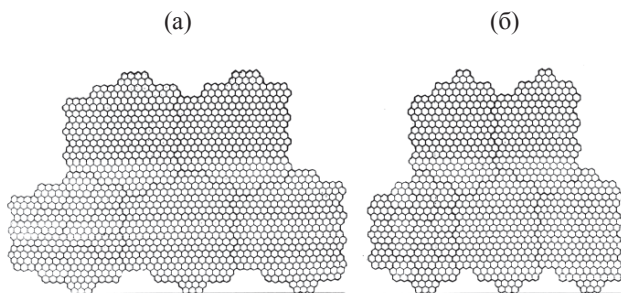


Рис. 2. Сборка УГС из СМЖС ГОИ и МЖС ГОИ при различной степени самоподобия их форм.

тальной плоскости. Как видно на рис. 1б, процесс сборки осуществляется путем послойной концентрической укладки шести сборочных элементов вокруг центрального элемента того же порядка. В [3, 4] описаны такие формы сборочных элементов, которые лишены отмеченного недостатка и позволяют проводить сборку УГС на горизонтальной плоскости. При этом пакеты ЕС имеют форму поперечного сечения, отличающуюся от правильного шестиугольника отсутствием одного или нескольких рядов на одной или нескольких сторонах, а МЖС, вытянутые из таких пакетов, позволяют получать УГС в одностадийном процессе.

В качестве первого шага перехода к МП рассмотрим сборку УГС из СМЖС, для получения которых в ОП дополнительно введены операции сборки пакета из МЖС и его перетяжки. Примем, что формы МЖС и СМЖС самоподобны таким же образом, как и в рассмотренной ранее сборке правильных шестиугольников, и отличаются от них отсутствием одного ряда элементов на одной стороне. Графическое изображение сборки СМЖС, у которых, как и у составляющих их МЖС, число элементов на стороне исходного правильного шестиугольника $n = 3$, приведено на рис. 2а. Видно, что полученная структура вполне упорядочена, а сборка СМЖС, как ранее и МЖС, осуществляется на горизонтальной плоскости. Единственное отличие заключается в том, что усечение МЖС и СМЖС и их сборка производятся в двух различных ортогональных направлениях. Нетрудно показать, что аналогичный результат имеет место для любых форм, образованных методом усечения правильного шестиугольника при условии, что полученные фигуры удовлетворяют ряду требований, сформулированных в [4]. Более того, формы МЖС и СМЖС могут быть отличными друг от друга. Для иллюстрации последнего положения на рис. 2б приведен пример сборки УГС из СМЖС, форма которых аналогична показанной на рис. 2а, а форма МЖС образована усечением правильного шестиугольника на трех смежных сторонах (для обеих фигур $n = 3$).

Сборка из многоугольников с числом углов менее шести

Еще в 1970 г. отмечалось, что для изготовления ВОП пригодны МЖС с поперечным сечением в форме не только правильного шестиугольника, но также правильного треугольника и ромба с углами 60° и 120° [11]. Поскольку это утверждение относится к начальному периоду становления волоконной оптики, целесообразно проанализировать его с точки зрения современных представлений о сборке УГС. Ниже рассматривается сборка из МЖС, форма сечения и схема образования которых приведены на рис. 3а, из чего следует, что помимо упомянутых фигур ряд содержит и другие формы: линейку и трапецию.

Сборки МЖС показаны на рис. 3б. Видно, что они обладают рядом общих свойств: при базировании на горизонтальной плоскости они обеспечивают получение УГС, и для всех характерна слабая связанность между рядами [12].

Общим свойством, присущим только треугольникам и трапециям, является то, что внутри ряда любой МЖС зеркально симметричен соседнему. Сборки МЖС, имеющих форму ромба и линейки, внутри каждого ряда осуществляются линейной трансляцией. Ряд, изображенный на рис. 3в, поясняет способ образования из фигур первого порядка (рис. 3а) МЖС более высоких порядков. На рис. 3г показана сборка МЖС тех же форм на плоскости, ортогональной к той, на которой выполнялась предыдущая сборка (рис. 3б). Сравнениеборок, имеющих различные базовые плоскости, позволяет установить степени сходства и различия между ними. Во втором случае построение УГС на горизонтальной плоскости возможно из всех форм МЖС, за исключением одномерной полосы. При этом для всех форм укладка МЖС в любом ряду подобна линейной трансляции, а междурядная связанность укладки существенно больше. Еще одно различие заключается в том, что в первом случае процесс сборки УГС инвариантен относительно величины порядка для всех фигур, а во втором – он реализуется только тогда, когда величина порядка выражается нечетным числом. При сборке фигур четных порядков возникает ситуация, подобная той, которая имеет место при сборке на плоскости МЖС правильной шестиугольной формы, в чем легко убедиться, если выполнить построения для любой из фигур второго порядка, приведенных на рис. 3в. Причиной этого является то, что фигуры нечетных порядков между сторонами, нормальными к плоскости сборки, содержат четное число рядов, что и обеспечивает взаимное сопряжение микрорельефов противоположных сторон фигуры. Сказанное спра-

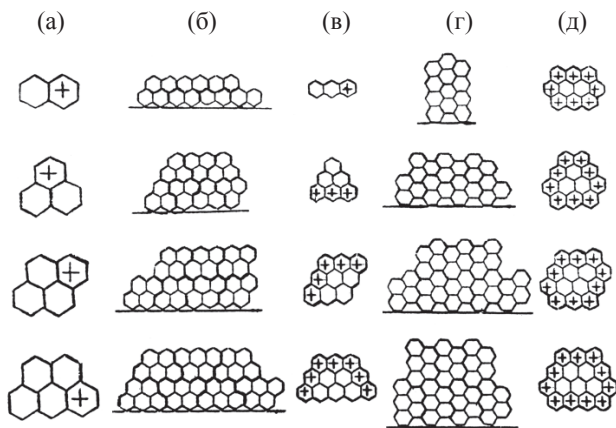


Рис. 3. Сборка УГС из МЖС треугольной и четырехугольных форм (пояснения в тексте).

ведливо не только для рассмотренных фигур, но и для параллелограммов и трапеций, образованных путем усечения одной из вершин правильного шестиугольника. Используя принцип самоподобия, из рассматриваемых фигур путем последовательности сборок и перетяжек теоретически с неограниченным числом стадий можно образовать элементы, пригодные для формирования УГС. Сказанное наглядно иллюстрирует рис.4, на котором приведена сборка МЖС четвертого порядка, образованных из элементарной трапеции по второму типу укладки (рис. 3г).

Проведенный анализ сборки УГС из треугольных и четырехугольных МЖС показал, что основным свойством рассмотренных форм является их универсальность. Во-первых, они обеспечивают построение УГС при различных способах базирования и приемах сборки на горизонтальной плоскости. Во-вторых, эти формы могут быть использованы на любой стадии процесса сборки вне зависимости от того, по какой одной из двух основных схем изготавливались сборочные элементы на предшествующих стадиях: из правильных или усеченных шестиугольников. В-третьих, каждая из рассматриваемых форм может порождать иную, чем приведенная на рис. 3в, последовательность геометрически подобных фигур, если переход от порядка m к порядку $(m + 1)$ осуществляется так же, как это происходит в случае пра-

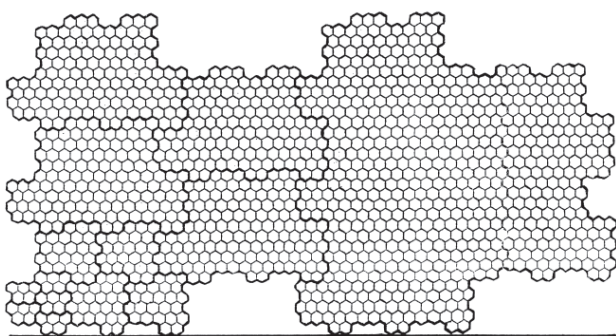


Рис. 4. Сборка двух МЖС четвертого порядка.

вильных шестиугольников, т. е. путем окружения фигуры низшего порядка монослоем сборочных элементов. Как видно из рис. 3д, уже первый шаг переводит четырех- и треугольники в шестиугольники, которые есть не что иное, как множество поразному усеченных правильных шестиугольников второго порядка, сборка УГС из которых описана в [2–4]. Такой результат не представляется неожиданным, если учесть, что каждая из рассматриваемых форм может быть представлена как результат усечения семижильного правильного шестиугольника, выполненного по правилам, изложенным там же. Хотя геометрическое подобие между рассматриваемыми формами и фигурами более высоких порядков в каждой последовательности и отсутствует, правила построения из них УГС остаются одинаковыми (ср. рис. 3г и рис. 2).

Эксперимент и обсуждение результатов

Для проверки возможности практической реализации полученных результатов проведено натурное моделирование процессов изготовления предложенных форм сборочных элементов и приемов их укладки на различных этапах МП. При этом задача получения конкретных параметров изделий не ставилась, а единственная цель эксперимента заключалась в достижении собственно упорядоченности гексагональной структуры, понимаемой в том смысле, который вложен в этот термин в [5, 6].

В качестве базовой технологии в эксперименте использован разработанный в ГОИ им. С.И. Вавилова технологический процесс изготовления микроканальных пластин, в который были внесены следующие изменения и дополнения. Основное дополнение состояло во введении операций сборки пакета МЖС и его перетяжки. Основные изменения касались формы пакета ЕС и, соответственно, МЖС, геометрических размеров ЕС, пакетов ЕС и МЖС, а также формы спеченного блока. Размеры комплекта исходных заготовок и параметры конечной микроструктуры соответствовали принятым в базовом процессе. Еще одно отличие заключалось в том, что вместо серийной комбинации стекол жилы С78-5 и оболочки С87-2 при изготовлении модельных образцов использованы стекла МКС-16183 и МКО-108 соответственно. Выбор этих стекол обусловлен тем, что они обладают большей положительной разностью величин вязкости во всем интервале температур технологических переделов.

На первом этапе исходные заготовки перетягивали в ЕС с наружным диаметром $\sim 1,7$ мм. На обеих стадиях сборки пакетов использована наименее отличающаяся от правильного шестиугольника форма с усечением одного ряда на одной стороне, при

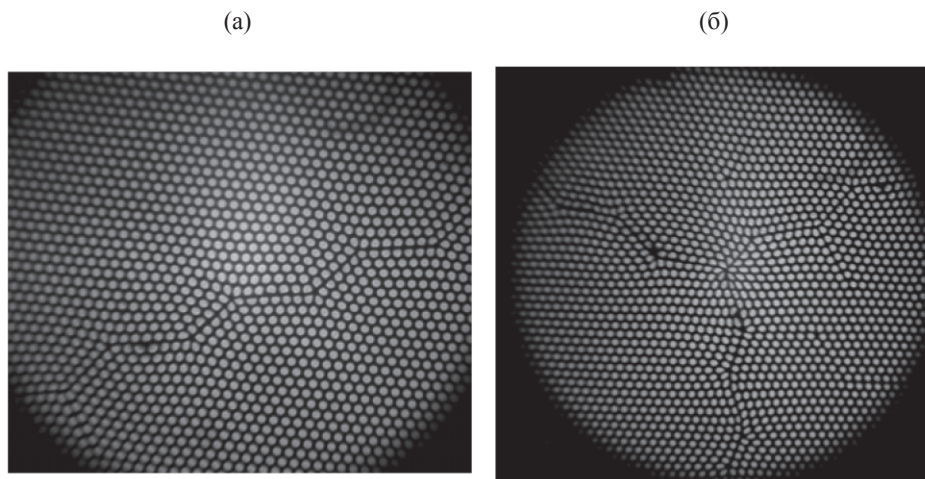


Рис. 5. Микрофотографии характеристических участков структуры модельных образцов: а – граница двух СМЖС (120 $\times$), б – окрестность междоузлия трех СМЖС (100 $\times$).

этом в двух других направлениях каждого пакета укладывали по 13 рядов. Для укладки МЖС в пакет использована ориентированная сборка. Из пакета МЖС были изготовлены СМЖС с размером сечения 1,4–1,5 мм, которые содержали 14400 жил диаметром ~ 10 мкм.

Упорядоченность структуры СМЖС контролировали визуально с помощью микроскопа при увеличении 100 $\times$ –200 $\times$. Критерием упорядоченности служила различимость границ между соседними МЖС. *Априори* предполагалось, что существуют две основные причины, способные ухудшить упорядоченность структуры внутри СМЖС: во-первых, ошибки в ориентации отдельных МЖС, допущенные в ходе сборки и не выявленные при заключительном контроле собранного пакета МЖС, во-вторых, случайные смещения отдельных МЖС во время перетяжки пакета. В течение всего процесса перетяжки через равные временные интервалы проводился отбор образцов СМЖС для контроля структуры.

Анализ структуры СМЖС показал, что отдельные сдвиги МЖС (частичные или полные, когда гексагональная структура переходит в квадратную) в них имеются, однако их количество мало: 9 штук, притом что количество общих границ МЖС в пакете равно 334. Характер расположения этих сдвигов и постоянство локализации в течение всего времени перетяжки пакета указывают на то, что они были вызваны не действием одной из вышеперечисленных причин, а случайным смещением при фиксации пакета, когда несколько МЖС, расположенных по одной из диагоналей пакета, были сдвинуты. Хотя внутри СМЖС была достигнута практически полностью упорядоченная структура, они имели один существенный недостаток. Из-за действия поверхностного натяжения треугольники, образующие

наружный контур СМЖС, были несколько смяты: величина отклонения их вершин от геометрически правильного положения составляла около половины периода структуры.

На последнем этапе 151 СМЖС были собраны в заготовку блока, имевшую форму 12-угольника порядка [2; 4]. Как и при укладке пакета МЖС, сборка блока СМЖС выполнялась с базированием на горизонтальной плоскости. Из различных частей блока, спеченного в установке изостатического прессования, были вырезаны пластины с толщиной 0,6–1 мм. Анализ образцов, микрофотографии фрагментов структуры которых приведены на рис. 5, показал: упорядоченность структуры внутри СМЖС, а также положение и количество локальных сдвигов в них сохранилось; упорядоченность макро-структуры, т. е. взаимное сопряжение рельефов СМЖС, достигнута полностью; микроструктура на границах СМЖС практически упорядочена, за исключением угловых точек макрорельефа, что явилось следствием упомянутых выше искажений границ СМЖС.

Заключение

Рассмотренные в работе различные варианты сборки УГС с использованием МП свидетельствуют о целесообразности применения для его описания основных представлений фрактальной геометрии. Понятие фрактала выделяет объекты, состоящие из фрагментов различных масштабов как больших, так и малых, отражая таким образом иерархический принцип организации, что практически в точности выражает суть процесса многостадийной сборки. Свойство самоподобия между отдельными разномасштабными фрагментами, образующее фундамент фрактальной геометрии, является ключом для

построения сборочных элементов более высоких порядков из элементов предшествующих порядков. Правильный и любой из усеченных определенным образом шестиугольники служат базовыми формами для построения двух независимых схем сборки УГС с теоретически неограниченным числом стадий. Треугольники и различные четырехугольники образуют множество форм, пригодных как для построения УГС из любой системы шестиугольников, так и из самоподобных форм более высоких порядков. Возможность практической реализации разработанной в ГОИ схемы построения УГС из усеченных правильных шестиугольников подтверждена в двухстадийном процессе при изготовлении модельных образцов с высокоупорядоченной структурой с геометрическим разрешением 45–55 штр/мм. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку технологии изготовления ВОП из СМЖС с пределом разрешения ~100 штр/мм, а также на изучение возможности практической реализации процесса с еще большим числом стадий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Архитектура регулярных полихромных волоконных структур // Сб. тр. V Междунар. конф. "Прикладная оптика-2002" СПб., 2002. Т. 2. С. 95–99.
2. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Пути решения проблемы формирования упорядоченных гексагональных волоконных структур // Сб. тр. V Междунар. конф. "Прикладная оптика-2002" СПб., 2002. Т. 2. С. 89–93.
3. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Способ формирования регулярной гексагональной волоконной структуры // Патент РФ № 2199140. 2002.
4. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Способ формирования регулярной гексагональной волоконной структуры (варианты) // Патент РФ № 2210795. 2003.
5. Кутасов В.А., Бессонова Э.Ю. Формирование упорядоченных гексагональных волоконных структур // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 8. С. 107–113.
6. Cook L., Mancini D., Patterson S. New fiber faceplate architectures // Proc. SPIE. 1990. V. 1243. P. 196–204.
7. Cook L., Burger R. Fabrication and optical performance of fractal fiber opticsTM // Proc. SPIE. 1991. V. 1449. P. 186–192.
8. Cook L., Feller W.B., Chappell J.H. Fractal multifiber microchannel plates // Proc. SPIE. 1992. V. 1655. P. 190–201.
9. Cook L., Mancini D., Patterson S. Fiber assembly // Patent USA № 5049176. 1991.
10. Peitgen H.-O., Richter P.H. The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical System. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1986, 143 p. Перевод: Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. Обзоры комплексных динамических систем. М.: Мир, 1993. 176 с.
11. Самтаров Д.К., Орлов Ю.П., Иванова Л.Н., Иванов В.А. Применение круглых многожильных световодов для изготовления опрессованных волоконно-оптических элементов // ОМП. 1970. № 5. С. 43–46.
12. Рождественский Ю.В., Вейнберг В.Б., Самтаров Д.К. Волоконная оптика в авиационной и ракетной технике. М.: Машиностроение, 1977. 186 с.