

Д.И.Ткач, А.Б.Нифанин

ГЕОМЕТРИЯ ТРЕЩИНОУСТОЙЧИВЫХ И САМОЗАМЫКАЮЩИХСЯ СТРУКТУР ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Постановка проблемы. Одной из важнейших научно-технических задач, имеющих большое народнохозяйственное значение для нашей страны, является решение проблемы высококачественных и долговечных покрытий автомобильных дорог. Их существующие конструкции из песчаной подготовки, подстилающего слоя шлака или щебня и сплошного двухслойного асфальтобетонного покрытия представляют собой термодинамические системы, толщина и ширина которых несоизмеримо малы в сравнении с их длиной. Разрушение этого покрытия происходит от знакопеременных температурных деформаций, вызывающих возникновение трещин. Вода, попадающая в них, при замерзании и оттаивании вызывает их развитие и образование вторичной сети трещин, уходящих в глубину покрытия. Положение усугубляется динамическими нагрузками от движущегося транспорта. В итоге сплошное асфальтобетонное дорожное покрытие оказывается недолговечным, нуждающемся в частых, как правило, косметических ремонтах, которые не решают проблему в принципе.

Решение этой проблемы представляется возможным на основе понимания процесса распространения трещины и создания условий для управления этим процессом. Так как их образование неизбежно, то, развиваясь в плоскости покрытия, они разбивают её на неодинаковые, произвольной формы участки, играя при этом роль швов между ними. Отсюда следует непосредственный вывод о необходимости замены сплошного покрытия дорожного полотна его комбинаторным эквивалентом. Эта мысль не является новой, так как те дороги и площади, которые были вымощены булыжником столетия тому назад и дошли до нашего времени в прекрасном состоянии, являются такими комбинаторными эквивалентами. Сейчас мы являемся свидетелями замены сплошных асфальтовых покрытий пешеходных тротуаров конгруэнтными плитками, разнообразие форм которых определяется возможностями плоскостной комбинаторики.

© Д.И.Ткач, А.Б.Нифанин, 2006

В итоге оказалось, что эти покрытия компенсируют знакопеременные температурные деформации, но не являются трещиностойкими, так как возникнув, трещины беспрепятственно в них распространяются. Относительно стабильная лакунарность [1] тротуарного покрытия, т.е., степень его заполнения элементами, которые разделены швами или лакунами постоянной ширины, обеспечивается наличием жестких бордюров.

Целью настоящей публикации является попытка геометризовать поверхность покрытия автомобильной дороги средствами плоскостной комбинаторики таким образом, чтобы в итоге она обладала высокой степенью трещиностойкости, обеспечивающей её долговечность.

Основной материал исследования. Достижение поставленной цели будет практически приемлемым при удовлетворении следующих наложенных условий:

1. Покрытие должно быть сборным, а его элементы конгруэнтными при минимальном количестве их типоразмеров;
2. Формы элементов покрытия должны быть высоко технологичны как в их изготовлении, так и при их монтаже;
3. Структура швов между элементами покрытия должна играть роль трещин его сплошнотелого предшественника, но препятствовать их распространению.

Очевидно, что первые два условия должны формировать такую структуру швов между элементами покрытия, чтобы она максимально усложняла путь развития трещины. Известно, что если этот путь часто и резко меняет своё направление, то развитие трещины по такому пути постепенно гаснет, а если трещина, развиваясь, возвращается к началу своего развития, то она прекращает развиваться. [2]. Таким образом, успех достижения поставленной цели сводится к поиску наиболее оптимальной геометрической формы элементов сборного покрытия, швы между которыми были бы максимально сложными или обеспечивали бы возврат трещины к своему началу. Условие технологичности изготовления и монтажа элементов покрытия требует их конгруэнтности, а также прямолинейности и прямоугольности их формы. Этим требованиям удовлетворяют форма квадрата (рис.1,а), которая широко применяется в напольных покрытиях, испытывающих только вертикальные нагрузки. Швы между такими элементами прямолинейны и трещины по ним распространяются бес-

препятственно. Если такие элементы смещать относительно друг друга в одном (рис.1,б) или в двух направлениях (рис.1,в), то траектории развития трещин по направлениям их швов от горизонтальных усилий усложняют свой путь, но не изменяет направлений своего развития. При этом в последнем случае возникает второй элемент – квадрат, стороны которого вдвое короче сторон исходного квадрата. Если же возникает эксцентриситет при приложении горизонтальной нагрузки, то возникающему моменту в этих структурах не возникает противодействия.

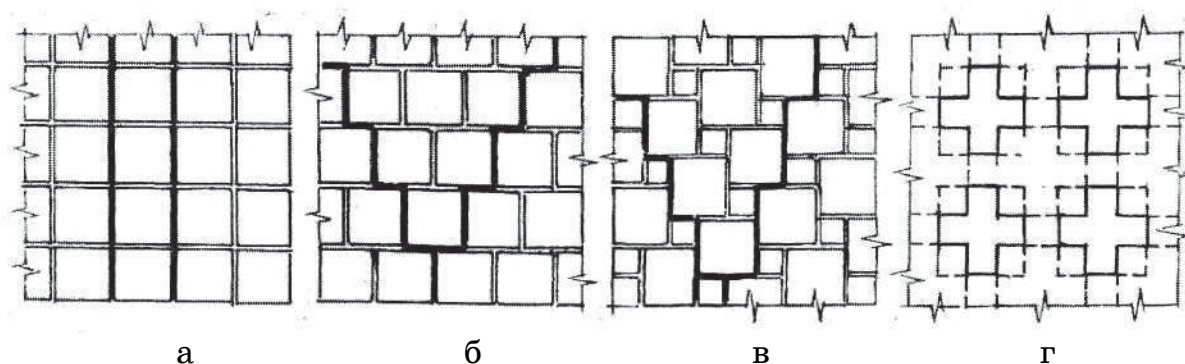


Рисунок 1

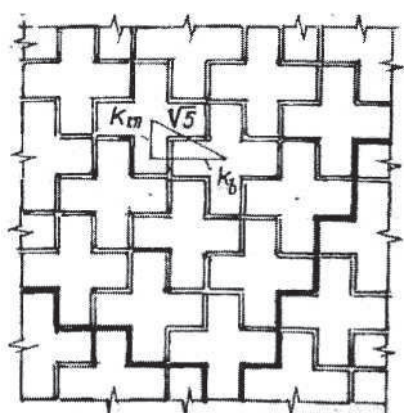


Рисунок 2

Четвёртый комбинаторный вариант предполагает частичное наложение квадратов, смещенных относительно друг друга на одну треть длины их сторон. В итоге в каждом исходном квадрате возникает изопериметрический ему крест и 4 малых квадрата (рис.1,г). Полученная фигура креста оказалась удобной для плотной упаковки плоскости (рис.2). Траектории развития трещин по швам крестового мощения усложнились, раздвоившись по двум взаимно-перпендикулярным и неизменным направлениям. Но, если при этом возникает эксцентриситет приложения горизонтальной нагрузки, то возникающему крутящему моменту противодействие по прежнему отсутствует. Возникновение такого противодействия оказалось возможным при введении в крестовую структуру второго элемента в виде свастики (рис. 3). В такой двухэлементной структуре усилия в любой точке вызывают распространения трещин по наиболее сложным фигурам швов, которые ограничивают по площади от половины до

трёх четвертей элементов покрытия. Если при возрастании нагрузки вплоть до критической станут возникать крутящие моменты, то система взаимосвязанных крестов и свастики заклинивается или самозамыкается, включив в совместную работу весь массив покрытия. При этом критическая нагрузка перераспределяется между всеми его элементами, напряжения в них соответственно уменьшаются и получается, что в целом такая структура покрытия может выдерживать нагрузки в четверо превышающие те, которые выдерживает структура, приведенная на рис. 1,б, включающая в работу одну четверть элементов.

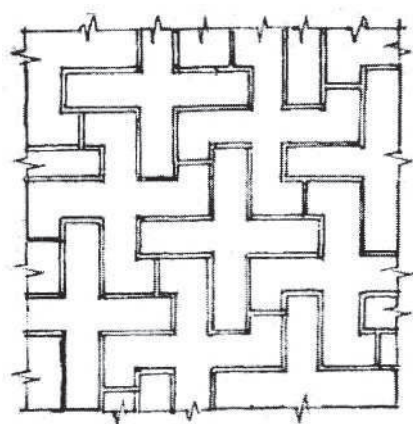


Рисунок 3

Такое увеличение несущей способности конструкции покрытия определено только лишь комбинаторным изменением формы его элементов и характера связей между ними без изменения их материала с его прочностными характеристиками.

Если прочность конструкции является мерой энергии его сопротивления нагрузкам, то получается, что форма слагающих её структурных элементов и характер связей между ними является инструментом управления этой прочностью.

Энергетизм формы ярко демонстрируется разной прочностью алмаза и графита, состоящих из углерода, атомы которого располагаются в узлах их кристаллических решеток принципиально разной формы. Если посередине одного из крестообразных элементов свастики провести прямую линию и принять ее за ось симметрии, то в результате преобразования симметрии фигура свастики превратится в Т-образный крест. Приняв его за комбинаторный элемент, получаем новую структуру трещиноустойчивого покрытия, вторым элементом которого является квадрат с выбранными серединами сторон, названный «жабкой» (рис. 4). Эта «жабка» образует с Т-образными крестами замковые соединения, препятствующие распространению трещин, так как, возникнув в любой точке её замкнутого контура, она возвращается к своему началу. Однако соблюдение принципа техноло-

гичности, который требует применения элементов одного типоразмера, привело к форме квадрата с 4-мя крестами (рис. 5). Комбинаторика из таких элементов плотно упаковывает плоскость и максимально усложняет развитие трещин по швам между ними (рис. 6).

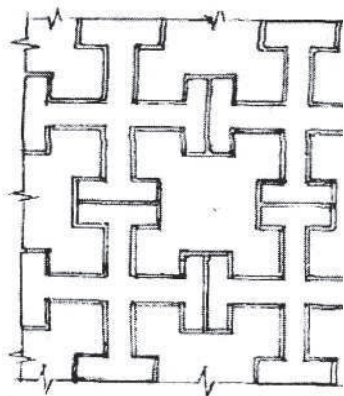


Рисунок 4

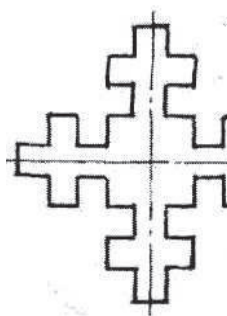


Рисунок 5

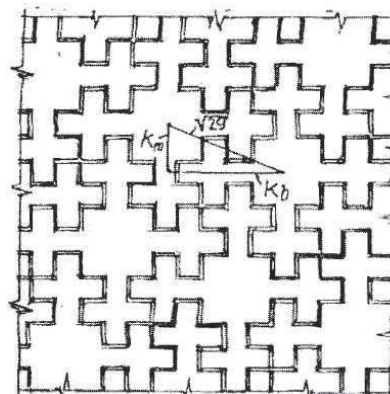


Рисунок 6

На первый взгляд крестовые ветви у их оснований представляются хрупкими. Но, входя в замковые соединения, они образуют самозамыкающиеся системы поддерживающих друг друга крестовых фигур. И действительно, если произойдет разрушение одной крестовой ветви элемента покрытия, то за оставшиеся три его будут удерживать 4 его окружающие крестовые элемента. Эта поддержка будет продолжаться постоянно, ибо каждый элемент покрытия, окруженный 4-мя ему подобными и взаимосвязанными с ним элементами имеет как бы 4 степени надёжности в их совместной работе. Это обстоятельство обеспечивает замыкание разрушения в месте его образования. Поэтому по характеру работы структуры подобного рода являются самозамыкающимися, а по принципу организации этой работы – самоорганизующимися, т.е., синергетическими [3, 4]. Интересна диалектика развития формы элементов покрытия с замковыми соединениями. Если исходным элементом покрытия является одна квадратная клетка (см. рис. 1,а), то путём присоединения к её сторонам ещё по одной квадратной клетке получается простой 5-клеточный крестообразный элемент (см. рис.2) . Если соединить центры этих элементов, то полученная наклонная линия явится гипотенузой прямоугольного треугольника Дюрера с отношением катетов 1:2, т.е., диагональю двойного квадрата, длина которой равна $\sqrt{5}$. Таким образом, 5-клеточный крест является результатом топологического преобразования исход-

ной квадратной клетки. Сравнение структур 5-клеточного креста и крестового элемента на рис.5 показывает, что последний также является результатом топологического преобразования первого. Здесь исходная квадратная клетка первого элемента расширилась до 9-клеточного квадрата, а каждый из его одноклеточных концов расширился до 5-клеточного креста. В итоге исходный 5-клеточный элемент преобразовался в 29-клеточный, самоподобный исходному. Такое преобразование полностью удовлетворяет понятию фрактального [1,5], но названо фрактальным расширением, обладающим свойством конформности [6], сохраняющим прямые углы, а также конгруэнтности 5-клеточных крестов в 29-клеточных элементах. Этим фигуры фрактального расширения резко отличаются от фрактальных фигур типа снежинки Коха, пыли Кантора или коврика Серпинского, элементы которых самоподобно уменьшаются, стремясь к дробномерному бесконечно удалённому пределу.

При фрактальном расширении происходит обратный процесс. За исходный элемент принимается простая квадратная клетка, которая фрактально расширяясь, преобразовывается по определённому закону во всё более сложные по форме комбинаторные фигуры, лакунарно плотно упаковывающие плоскость (рис. 7).

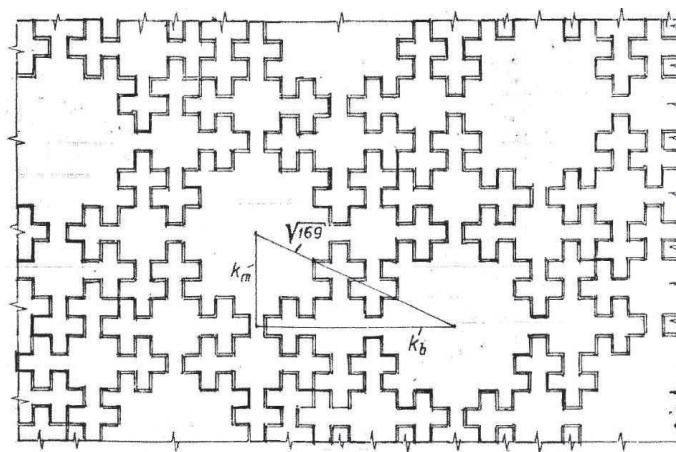


Рисунок 7

На рис. 7 приведен результат фрактального расширения 29-клеточных элементов в 169-клеточные с замковыми соединениями. Наклонная прямая, соединяющая центры этих элементов, является гипотенузой прямоугольного треугольника с отношением катетов 5:12, длина которой равна значению корня квадратного из числа клеток, составляющих эти элементы. Экстраполируя полученные значения катетов рассмотренных треугольников как относительных коор-

динат взаимного расположения центров фигур фрактального расширения, можно определить его общую закономерность.

Номер фрактального преобразования (n)	I	II	III	IV	V	VI	VII
k_b - катет большой	1	2	5	12	29	70	169
k_m - катет малый	0	1	2	5	12	29	70

Наблюдается закономерность вида: $k_{b(n)} = 2k_{b(n-1)} + k_{m(n-1)}$. Поскольку $k_{m(n)} = k_{b(n-1)}$, то $k_{b(n)} = 2k_{b(n-1)} + k_{b(n-1)}$. Таким образом, получен новый числовой ряд, который можно представить в виде $a_n = 2k_{n-1} + a_{n-2}$. Это выражение является общим алгоритмом построения крестообразных трещиностойчивых покрытий.

Выводы: 1. Принятая в работе концепция управления процессом образования трещин в дорожном покрытии привела к последовательным комбинаторным поискам такой формы его элементов, швы между которыми способствуют их угасанию и, тем самым, обеспечивают долговечность покрытия; 2. Свойство самозамыкания и синергетизм структур предложенных конструкций плоского покрытия могут быть использованы при проектировании пространственных сборных систем типа оболочек; 3. Описанный в работе процесс фрактального расширения исходной фигуры является эффективным аппаратом комбинаторного конструирования самозамыкающихся трещиностойчивых лакунарных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991.
2. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Том. 2: Более сложные вопросы теории и задачи. - М.-Л.: ОГИЗ, 1946.
3. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1986.
4. Даниленко В.Я. Синергетичні та системні риси геометричних досліджень. // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – Харків: ХДТУХТ, 2005. – Вип. 11. – С. 42-46.
5. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Пер. с англ. – М.: Постмаркет, 2000. – 364 с.
6. Клейн Ф. Высшая геометрия. – М.-Л.: ГОНТИ, 1939.

Получено 18.03.2006 г.