

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

ISSN 2224-5278

Volume 3, Number 423 (2017), 256 – 275

B. B. Teltayev

Kazakhstan Highway Research Institute, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: bagdatbt@yahoo.com

**FATIGUE FAILURE OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENT.
1. SELF-ORGANIZATION AND MECHANICAL INTERPRETATION**

Abstract. This paper analyzes the fatigue failure of the asphalt concrete pavement of the highway on a macroscopic level. Based on the actual data, obtained on the sections of the real highways, the principle was formulated for the staged fatigue failure of the asphalt concrete pavement. During the analysis of the existing classifications of the fatigue cracks, it was determined that in Kazakhstan the stage behavior of the fatigue cracks was not considered, and in the USA the relation between stages of failure was not established. Similarly to the known phenomena of self-organization in thermodynamics of irreversible processes and dynamics of non-linear systems (synergetics) – the Benard's effects and division of biological cell, it was proposed to consider the parts of the asphalt concrete pavement as the specific dissipative structures, occurring in critical conditions, and a new regularity of fatigue failure was formulated.

The formulated regularity of the staged fatigue failure of the asphalt concrete pavement was explained based on the new proposed scheme of bifurcation with the use of the results of experimental determination of the occasional, cyclic, long-term and residual strength.

Key words: asphalt concrete pavement, staged fatigue failure, consequential change of deformation types, asphalt concrete strength, self-organization, dissipative structures, bifurcation.

УДК 625.7/8:691.16

Б. Б. Телтаев

Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Алматы, Казахстан

**УСТАЛОСТНАЯ ДЕСТРУКЦИЯ
АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ.
1. САМООРГАНИЗАЦИЯ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ТОЛКОВАНИЕ**

Аннотация. В работе на макроскопическом уровне анализируется усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Основываясь на фактических материалах, полученных на участках реальных автомобильных дорог, сформулирован принцип стадийности усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия. Анализируя существующие классификации усталостных трещин, определено, что в Казахстане не учитывается стадийный характер усталостных трещин, а в США не установлена взаимосвязь между стадиями деструкции. По аналогии с известными явлениями самоорганизации в термодинамике необратимых процессов и динамике нелинейных систем (синергетике) – эффектом Бенара и делением биологической клетки, части асфальтобетонного покрытия предложено считать специфическими диссипативными структурами, возникающими в критических условиях и сформулирована новая закономерность усталостной деструкции.

Сформулированная закономерность стадийной усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия объяснена на основе вновь предложенной схемы бифуркации с использованием результатов экспериментального определения одноразовой, циклической, длительной и остаточной прочности асфальтобетона.

Ключевые слова: асфальтобетонное покрытие, стадийная усталостная деструкция, последовательная смена видов деформирования, прочность асфальтобетона, самоорганизация, диссипативные структуры, бифуркация.

1. Введение. Усталость является одним из основных видов деструкций асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Так как оно вместе с другими видами разрушения (колееобразование, низкотемпературное растрескивание) определяет срок службы дорожной одежды, в соответствии с требованиями нормативного документа [1] все конструкции дорожных одежд автомобильных дорог капитального и облегченного типов на стадии проектирования должны рассчитываться на прочность по критерию сопротивления растяжению при изгибе монолитных (асфальтобетонных) слоев.

В качестве наглядного примера на рисунке 1 показан участок (км 860) автомобильной дороги «Екатеринбург-Алматы», который имеет деструкцию асфальтобетонного покрытия в виде сетки усталостных трещин. Этот рисунок был взят из материалов диагностики указанной дороги, выполненной Казахстанским дорожным научно-исследовательским институтом в 2012 году.



Рисунок 1 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия на участке (км 860) автомобильной дороги «Екатеринбург-Алматы»

Считается, что усталостное трещинообразование на асфальтобетонном покрытии автомобильных дорог появляется при многократном повторном действии нагрузок от колес автомобилей [2].

В дальнем зарубежье Hveem F.N. был одним из первых исследователей, кто отмечал явление усталости в асфальтобетонном покрытии автомобильной дороги [3]. Первые исследования свойств усталости асфальтобетонов в лабораторных условиях были выполнены Sall R.N.J., Pell P.S., Taylor I.F. в Англии [4, 5] и Monismith C.L. в Америке [6].

В бывшем Советском Союзе изучение усталости асфальтобетонов было начато работами Салль А.О. (Ленинград), Радовского Б.С. (Киев), Золотарева В.А. (Харьков), Руденского А.В. и Калашниковой Т.Н. (Москва) [7-11].

Оказалось, что явление усталостного разрушения асфальтобетонного покрытия автомобильной дорогой является сложным. Несмотря на то, что и по настоящее время оно изучается специалистами многих стран мира, вопрос усталостной долговечности асфальтобетонов и асфальтобетонного покрытия остается актуальным.

2. Фактические материалы. На рисунках 2–4 представлены фотографии, показывающие усталостную деструкцию асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги «Караганды-Шахтинск». На этих фотографиях достаточно хорошо видно, что усталостная деструкция происходит стадийно: сначала на полосе наката появляются параллельные квазипрямолинейные продольные трещины, между которыми образуются квазипрямолинейные асфальтобетонные полосы, затем эти квазипрямолинейные асфальтобетонные полосы делятся на ячейки мелких размеров из-за появления квазипоперечных трещин. Таким образом, в рассмотренном случае образование сетки усталостных трещин типа «крокодиловая кожа» на асфальтобетонном покрытии представляет собой двухстадийный процесс, каждый из которых реализуется в течение менее или более продолжительного времени.



Рисунок 2 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги «Караганды-Шахтинск» (июль, 2016 год)



Рисунок 3 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги «Караганды-Шахтинск» (июль, 2016 год)



Рисунок 4 –
Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги «Караганды-Шахтинск» (июль, 2016 год)

Фрагменты другой последовательности появления трещин в стадийном процессе усталостной деструкции типа «крокодиловая кожа» на асфальтобетонном покрытии представлены на рисунках 5–8. Как видно из рисунков 5, 6, на асфальтобетонном покрытии в пределах полосы наката имеются только отдельные (несвязанные друг с другом) квазипараллельные поперечные трещины. На первый взгляд, они похожи на низкотемпературные трещины. Но это не так. Рассматриваемая автомобильная дорога находится в г. Шарджа (Объединенные Арабские эмираты), где практически не бывает зимы. Это, во-первых. Во-вторых, низкотемпературные трещины, как правило, распространяются на всю ширину проезжей части. А на рисунках 7 и 8 показаны сетки усталостных трещин типа «крокодиловая кожа», которые образуются при последующем появлении продольных трещин, соединяющих уже имеющиеся поперечные. В период наблюдения было установлено, что по этой автомобильной дороге движутся большое количество многоосных тяжеловесных автомобильных транспортных средств (рисунки 9 и 10), что наталкивает на мысль о том, что этот вид стадийности усталостной деструкции связан с интенсивным движением многоосных тяжеловесных транспортных средств.

На основе показанного выше видов стадийной деструкции асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог сформулируем следующий принцип: *«Процесс усталостной деструкции асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог происходит стадийно и по разным видам»*

стадийности. Вид 1: стадия I – на полосах наката появляются параллельные квазилинейные продольные трещины, между которыми образуются квазипрямолинейные асфальтобетонные полосы; стадия II – образование сетки усталостных трещин типа «крокодиловая кожа» делением квазипрямолинейных полос асфальтобетона на ячейки мелких размеров квазипоперечными трещинами. Вид 2: стадия I – появление отдельных квазипараллельных поперечных трещин; стадия II – образование сетки трещин типа «крокодиловая кожа» с относительно большими размерами ячеек из-за появления продольных трещин, соединяющих уже имеющиеся поперечные; стадия III – уменьшение размеров ячеек сетки трещин из-за последовательных появлений поперечных и продольных трещин в пределах каждой ячейки».



Рисунок 5 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия: поперечные усталостные трещины (г. Шарджа, Объединенные Арабские эмираты, август, 2010 год)



Рисунок 6 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия: поперечные усталостные трещины (г. Шарджа, Объединенные Арабские эмираты, август, 2010 год)



Рисунок 7 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия: сетка трещин типа «крокодиловая кожа» (г. Шарджа, Объединенные Арабские эмираты, август, 2010 год)



Рисунок 8 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия: сетка трещин типа «крокодиловая кожа» (г. Шарджа, Объединенные Арабские эмираты, август, 2010 год)



Рисунок 9 – Многоосный тяжеловесный автомобильный транспорт на участке дороги с усталостными трещинами (г. Шарджа, Объединенные Арабские эмираты, август, 2010 год)



Рисунок 10 – Другие виды тяжеловесного автомобильного транспорта на участке дороги с усталостными трещинами (г. Шарджа, Объединенные Арабские эмираты, август, 2010 год)

Предполагаем, что стадийная реализация усталостной деструкции механически и термодинамически «выгодна» системе – асфальтобетонному покрытию, а какой вид стадийности будет реализовываться – «выбирает сама система» в зависимости от конкретных условий: интенсивность и состав движения, режим и скорость движения, погодно-климатические условия, конструктивные особенности, свойства материалов, в том числе асфальтобетонов и др.

3. Классификация усталостных трещин.

3.1. В Казахстане. В действующем казахстанском нормативном документе по диагностике и оценке транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог [12] усталостные трещины на асфальтобетонном покрытии не идентифицируются отдельно, а рассматриваются вместе с другими видами трещин (температурные, просадочные, отраженные), несмотря на то, что они имеют разные причины возникновения и характер развития.

Визуальная оценка состояния дорожного покрытия осуществляется по трехбалльной системе (таблица 1). Если состояние покрытия оценивается баллом I, то рекомендуется отдельно оценить состояние покрытия по наличию деформаций, которые не свидетельствуют о недостаточной прочности, но могут оказывать влияние на скорость движения автотранспорта, по четырехбалльной шкале (оценки: 1, 2, 3, 4).

Таблица 1 – Система оценки состояния дорожного покрытия

Балл	Характерные признаки	
I	Дорожная одежда прочная, поперечный профиль сохранен, отсутствуют деформации и дефекты на покрытии, возможны отдельные трещины на расстоянии более 40 метров.	
	1 - отлично	Покрытие ровное, без деформаций.
	2 - хорошо	Покрытие ровное с отдельными редкими деформациями, которые не влияют на режим, скорость и безопасность движения.
	3 - удовлетворительно	На проезжей части небольшие неровности, редко расположенные трещины или незначительное количество других деформаций.
	4 - неудовлетворительно	На проезжей части имеются значительные неровности, выбоины, выкрашивание и другие деформации, сказывающиеся на скорости и режиме движения транспорта, кроме того, могут быть разрушения кромки покрытия и др.
II	Имеются деформации, свидетельствующие о недостаточной прочности дорожной одежды, распространенность которых превышает: 5 % - для капитальных типов дорожных одежд, 10 % - для облегченных; 30 % - для переходных. Возможны отдельные искажения поперечного профиля.	
III	Деформации, свидетельствующие о недостаточной прочности, ярко выражены и значительно (в два и более раза) превышают указанные выше пределы, ячейки в сетке трещин распатаны. Возможны проломы.	

Все дефекты (деформации и разрушения) на дорожных покрытиях делятся на две группы: дефекты, свидетельствующие о недостаточной прочности (таблица 2) и дефекты, не свидетельствующие в явном виде о недостаточной прочности (таблица 3). В этих таблицах приведены только те дефекты, которые связаны с трещинами.

Анализ данных таблиц 2 и 3 показывает, что:

- трещины разного вида (усталостные, температурные, отраженные, просадочные) не идентифицируются отдельно;

- не отражен стадийный характер развития усталостных трещин;

- не содержатся предельно допустимые характеристики трещин, в том числе усталостных.

3.2. В США. В 1987 году в США в рамках так называемой Стратегической дорожной исследовательской программы (SHRP) была начата в истории самая большая и широкая программа по исследованию эксплуатационного поведения дорожных конструкций (дорожных одежд автомобильных дорог). В течение 20 лет дорожные агентства штатов Америки и 15 других стран собирали данные об эксплуатационном состоянии дорожных одежд, климате, составе и интенсивности движения на более 1 000 опытных участках автомобильных дорог.

Таблица 2 – Дефекты дорожного покрытия, свидетельствующие о недостаточной прочности

Вид дефекта	Описание
Трещины	Разрушения дорожного покрытия, без удаления материала, выразившиеся в нарушении сплошности покрытия.
Трещины продольные	Образуются, как правило, на полосах наката. При ширине раскрытия более 0,5 см обычно сопровождаются мелкой сеткой трещин. К ним не относятся продольные трещины на стыках полос движения, характер появления которых связан с низким качеством укладки верхнего слоя покрытия.
Трещины косые	Трещины, пересекающие покрытие под углом к оси дороги не более 30°. Нередко такие трещины сопровождаются ответвлениями, не связанными между собой. Возможно сочетание с частыми поперечными трещинами с расстоянием между ними до 3 м.
Сетка трещин	Взаимопересекающиеся поперечные, продольные и криволинейные трещины, образующие замкнутые фигуры на покрытии, чаще всего на полосах наката или в местах просадок. Различают крупную сетку трещин и мелкую. Размеры мелкой сетки трещин составляют менее 0,5 м между трещинами в любом поперечном сечении. Могут сопровождаться выбоинами. Иногда сопровождаются разрывами покрытия. Чаще наблюдаются на крутых спусках, в местах остановок и торможения автомобилей.
Выбоины в сетке трещин	Местные разрушения дорожного покрытия, имеющие вид углублений с резко выраженными краями. В данном случае представляют собой результат развития сетки трещин и рассматриваются только совместно с ней.
Ямочность	Местные разрушения покрытия в виде углублений толщиной большей, чем толщина дорожного покрытия, как результат развития выбоин.
Проломы	Полное разрушение дорожной одежды на всю ее толщину с резким искажением поперечного профиля, сопровождающееся сеткой трещин.

Таблица 3 – Дефекты дорожного покрытия, не свидетельствующие в явном виде о недостаточной прочности

Вид дефекта	Описание
Трещины: поперечные, косые, сезонные	Трещины поперечные и косые без признаков, указанных выше. Трещины температурные и сезонные появляются ранней весной под воздействием резкого перепада температур воздуха и, как правило, затягиваются в летнее время под действием солнечной радиации и транспорта.

Чтобы осуществить сбор данных по единой методике было разработано специальное Руководство, которое в последующие годы переиздавалось ещё три раза [13]. В этом Руководстве дано следующее определение усталостным трещинам на дорожном асфальтобетонном покрытии: «Появляются на площадях, подвергаемых к повторным нагрузкам от движущихся автомобилей (полосах наката). В ранних стадиях развития могут представлять собой взаимосвязанные трещины. В поздних стадиях переходят на многоугольные куски с острыми углами, имеющие наибольшую длину стороны не более 0,3 м, похожие на крокодиловую кожу». Усталостные трещины разделены на три уровня. Низкий уровень: отдельные несвязанные между собой или связанные в нескольких местах трещины. Средний уровень: взаимосвязанные трещины, формирующие ячейки. Высокий уровень: площади с семейством сформированных ячеек; куски могут двигаться под воздействием движения автомобилей.

На рисунках 11–14 представлены фотографии из Руководства [13], которые наглядно демонстрируют уровни усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия по принятой классификации.

Как видно, в отличие от казахстанского руководства, в американском усталостные трещины идентифицируются отдельно от других видов трещин и установлены три уровня их развития. А в другом американском нормативном документе [14] усталостные трещины подразделены на два вида: возникающие на поверхности асфальтобетонного покрытия и распространяющиеся вниз (surface-down fatigue cracking) и возникающие на нижней поверхности асфальтобетонного покрытия и распространяющиеся вверх (bottom-up fatigue cracking); указаны предельно допустимые значения этих видов трещин для surface-down – 1000 фут/миля = 190 м/км и для bottom-up – 25-50 % площади полосы движения.

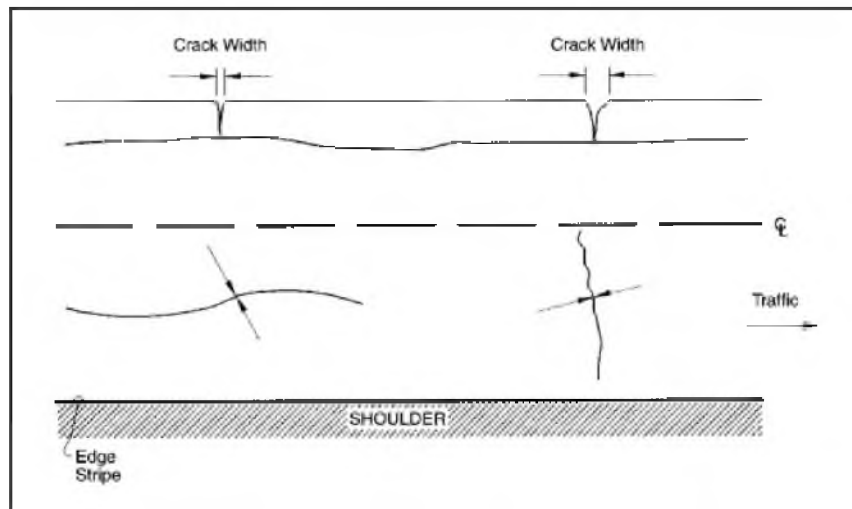


Рисунок 11 – Все уровни усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги по Руководству [13]



Рисунок 12 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги по Руководству [13]: низкий уровень

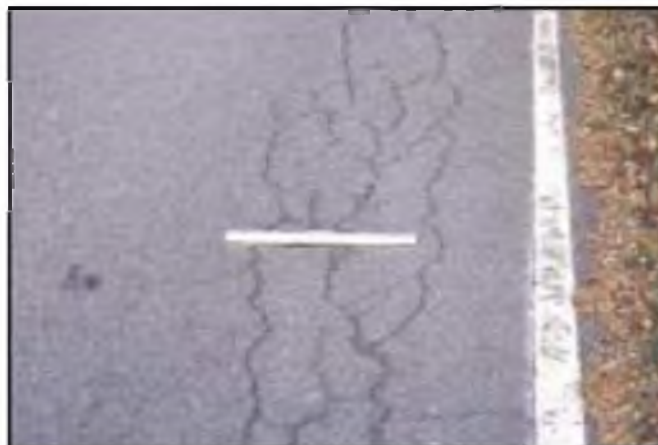


Рисунок 13 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги по Руководству [13]: средний уровень



Рисунок 14 – Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги по Руководству [13]: высокий уровень

4. Самоорганизация. В работах [15-17] на основе положений термодинамики необратимых процессов и динамики нелинейных систем (синергетики) было показано, что асфальтобетонное покрытие с низкотемпературными трещинами есть специфическая диссипативная структура, являющаяся формой адаптации термодинамической системы к внешним условиям и каждый раз, когда температура воздуха достигает критической температуры покрытия, возникает трещина. Это – закономерность, обусловленная коллективным поведением (самоорганизацией) структурных элементов асфальтобетонного покрытия в критических условиях.

В термодинамике [18, 19], системы, обменивающиеся энергией и массой с окружающей средой, считаются открытыми и являются структурно сложными. Из-за сложности открытых систем, в них в критических условиях возникают различного рода структуры. В образовании этих структур конструктивную роль играет диссипация энергии. Чтобы подчеркнуть это, И. Пригожин ввел термин «диссипативные структуры» [20-23], а Г. Хакен ввел термин «синергетика», чтобы подчеркнуть роль коллективного поведения подструктурных элементов в образовании диссипативных структур [24, 25].

Пригожиным И. показано, что изменение энтропии ds открытой термодинамической системы можно рассматривать как сумму двух слагаемых [19-21]:

$$ds = ds_e + ds_i, \quad (1)$$

где ds_e – изменение энтропии, связанное с ее притоком или оттоком; ds_i – количество энтропии, производимое внутри системы.

Для краткости ds_i называется просто «производство энтропии».

Составляющая ds_e может иметь как положительный, так и отрицательный знак в зависимости от того, система получает или отдает энергию в результате взаимодействия с окружающей средой. Согласно второму закону термодинамики, производство энтропии ds_i положительно или равно нулю:

$$ds_i \geq 0. \quad (2)$$

Равенство нулю производства энтропии, т.е. $ds_i = 0$ будет иметь место только при условии равновесия.

4.1. Эффект Бенара. Известно, что одним из ярких примеров образования диссипативных структур в открытой термодинамической системе является эффект Бенара [26-28]. Он возникает при критической разности температур $\Delta T_{кр}$ нижней и верхней поверхностей тонкого слоя вязкой жидкости (например, в силиконовом масле) в подогреваемом снизу плоском сосуде. При достижении $\Delta T_{кр}$ поведение жидкости резко меняется – возникает конвекция и жидкость разбивается на гексагональные ячейки (рисунок 15). Новая структура создается совместным кооперативным движением молекул жидкости. Как видно из рисунка 16, при $\Delta T_{кр}$ происходит резкий излом зависимости скорости переноса тепла dQ/dt от разности температур ΔT и имеет место образование

новой структуры. До $\Delta T_{кр}$ отток (экспорт) энтропии в точности компенсируется производством энтропии внутри жидкости, а при достижении $\Delta T_{кр}$ скорость переноса теплоты увеличивается вследствие конвективного механизма теплообмена.

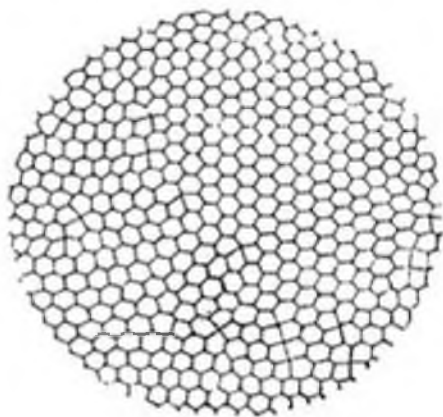


Рисунок 15 – Эффект Бенара

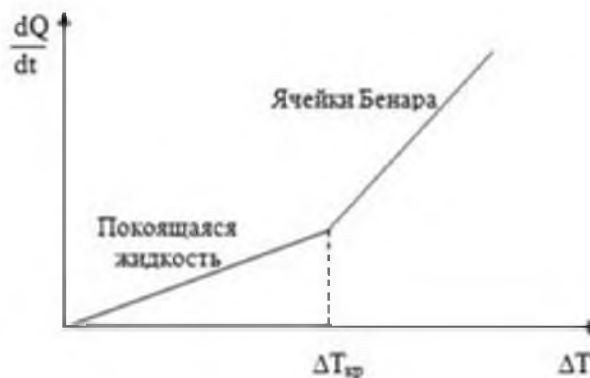


Рисунок 16 – Зависимость скорости переноса теплоты от разности температур

4.2. Деление клетки. В работе М. В. Волькенштейна [26] приведен еще один пример образования диссипативной структуры в открытой термодинамической системе. Это – разделение клетки живого организма.

Для простоты клетка считается сферой с радиусом R . Производство энтропии внутри клетки ds_i пропорционально её объему $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, а отток энтропии из клетки ds_e пропорционален площади её поверхности $S_{пов.} = 4\pi R^2$. Тогда в соответствии с выражением (1) имеем:

$$ds = A \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 - B \cdot 4\pi R^2, \quad (3)$$

где A, B – параметры пропорциональности, имеющие соответствующие размерности.

С ростом организма растет и клетка, увеличивается радиус R сферы. Клетка по механизму самоорганизации старается отвести избыток накапливаемой энтропии. Так как производство энтропии ds_i растет пропорционально кубу радиуса R , т.е. R^3 , а отток энтропии – квадрату радиуса R , т.е. R^2 , имеет место постепенное накопление энтропии по выражению (3). При $R = \frac{3B}{A}$

достигается стационарное состояние, т.е. $ds = 0$. А при $R > \frac{3B}{A}$ $ds > 0$, поэтому при $R_k > \frac{3B}{A}$ (R_k – критический размер клетки) клетке нужно разделиться, иначе она погибнет. Объемы материнской и двух дочерних клеток одинаковы, а суммарная площадь поверхностей новых клеток больше.

Приведенные выше примеры самоорганизации в термодинамических системах – ячейки Бенара и деление клетки в последующем будут использованы в объяснении явления усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия.

Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия, конечно, прямым образом связана с прочностью асфальтобетона.

5. Прочность асфальтобетона.

5.1. Битум. В настоящей работе для приготовления мелкозернистого плотного асфальтобетона в лабораторных условиях был использован битум марки БНД 100/130, произведенный Павлодарским нефтехимическим заводом (ПНХЗ). Битум удовлетворяет требованиям стандарта СТ РК 1373-2013 [29]. Стандартные показатели битума представлены в таблице 4. Содержание битума в асфальтобетоне составляло 4,8 % по массе сухого заполнителя.

Таблица 4 – Основные стандартные показатели битума

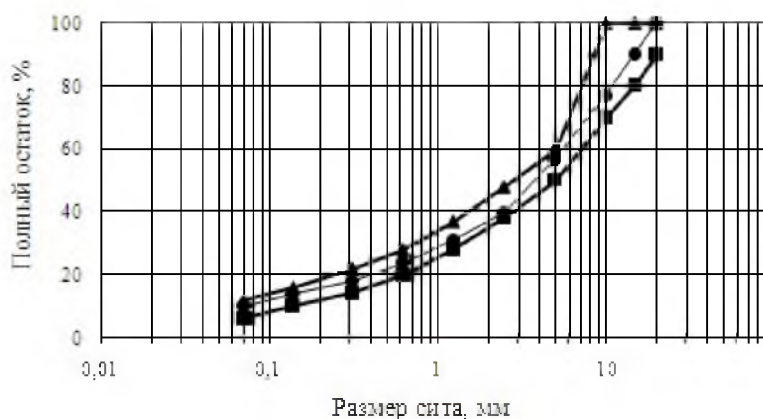
Показатель	Единица измерения	Требования СТ РК 1373-2013	Значение показателей
Глубина проникания иглы: - 25 °С - 0 °С	0,1 мм	101-130 30	110 37
Индекс пенетрации	–	-1,0...+1,0	-0,82
Растяжимость: - 25 °С - 0 °С	см	≥90 ≥4,0	135 6,6
Температура размягчения	°С	≥43	44,0
Температура хрупкости	°С	≤-22	-30,2
Динамическая вязкость, 60 °С	Па·с	≥120	121,0
Кинематическая вязкость	мм ² /с	≥180	329,0

5.2. Асфальтобетон. Для испытания был принят горячий плотный мелкозернистый асфальтобетон типа Б, удовлетворяющий требованиям стандарта СТ РК 1225-2013 [30], и был приготовлен с использованием щебня фракций 5-10 мм (20 %), 10-15 мм (13 %), 15-20 мм (10 %) из Ново-Алексеевского карьера (Алматинская область), отсева дробления фракции 0-5 мм (50 %) из завода «Асфальтобетон-1» (г. Алматы) и активированного минерального порошка (7 %) из Кордайского карьера (Жамбылская область). Основные стандартные показатели асфальтобетона представлены в таблице 5. Кривая гранулометрического состава минеральной части асфальтобетона показана на рисунке 17.

Таблица 5 – Основные стандартные показатели асфальтобетона

Показатель	Единица измерения	Требования СТ РК 1225-2013	Значение показателей
Средняя плотность	г/см ³	–	2,38
Водонасыщение	%	1,5-4,0	3,4
Пористость минеральной части	%	≤19	15,1
Пористость асфальтобетона	%	2,5-5,0	3,8
Прочность при сжатии: 0 °С 20 °С 50 °С	МПа	≤13 ≥2,5 ≥1,3	7,4 3,5 1,38
Водостойкость	–	≥0,83	0,80
Сдвигостойчивость	МПа	≥0,38	0,39
Трещиностойкость	МПа	4,0-6,5	4,5

Рисунок 17 –
Кривая гранулометрического
состава минеральной части
асфальтобетона



5.3. Методы испытания. В настоящей работе испытание асфальтобетонных образцов было выполнено по следующим методам:

1. Определение прочности асфальтобетона при прямом растяжении при разных температурах было осуществлено на приборе TRAVIS с термокамерой (рисунок 18), изготовленном компанией Infracore (Германия). Испытание образцов выполнялось при деформировании с постоянной скоростью 1 мм/мин в соответствии с европейским стандартом pr EN 12697-46 [31]. Образцы имели размер 5x5x16 см.



Рисунок 18 – Испытуемый образец асфальтобетона на прямое растяжение в термокамере прибора TRAVIS

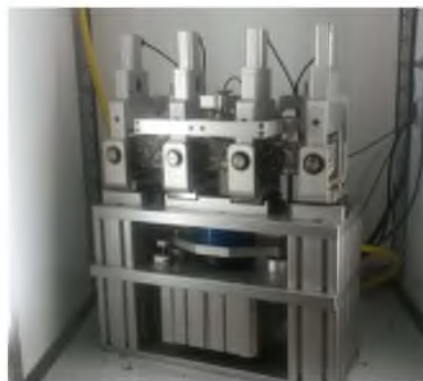


Рисунок 19 – Испытание образца асфальтобетона на приборе четырехточечного изгиба, помещенном в термокамере

2. Циклическая (усталостная) прочность асфальтобетона при разных температурах определялась путем испытания образцов размером 5x5x38 см на приборе четырехточечного изгиба в термокамере (рисунок 19) по европейскому стандарту EN 12697-24 [32]. Частота нагружения составляла $f = 10$ Гц. Напряжение, равное $\sigma = 1400$ кПа, поддерживалось постоянным до разрушения образцов.

3. Образцы асфальтобетона в форме балочки размером 4x4x16 см были испытаны при разных температурах на механическом прессе с использованием специального приспособления для осуществления деформирования образца по схеме поперечного изгиба по стандарту СТ РК 1218-2003 [33]. Скорость деформирования составляла 3 мм/мин.

4. Прочность асфальтобетонных образцов разных форм (цилиндрической и прямоугольной), различных размеров и при разных температурах при осевом сжатии была определена посредством испытания их на механическом прессе (рисунок 20) по стандарту СТ РК 1218-2003 [33]. Скорость деформирования составляла 3 мм/мин.



Рисунок 20 – Испытание образца асфальтобетона цилиндрической формы на механическом прессе по схеме сжатия

5.4. Изготовление образцов. Образцы асфальтобетона цилиндрической формы, предназначенные для испытания на осевой сжатие, были изготовлены по стандарту СТ РК 1218-2003 [33] путем уплотнения навески асфальтобетонной смеси в специальной форме. А образцы прямоугольной формы и в форме балочки разных размеров были изготовлены следующим образом.

Сначала с помощью роллерного компактора (модель CRT-RC2S, компания Соорег, Великобритания) (рисунок 21) были приготовлены образцы асфальтобетона в форме квадратной плиты размером 5х30,5х30,5 см (рисунок 22) в соответствии с европейским стандартом EN 12697-33 [34]. Затем путем разрезания в специальной установке из квадратных плит были получены образцы в форме прямоугольной призмы разных размеров (рисунок 23).



Рисунок 21 – Роллерный компактор CRT-RC2S



Рисунок 22 – Образец асфальтобетона размером 5х30,5х30,5 см в стальной форме



Рисунок 23 – Образцы асфальтобетона размером 5х5х16 см

5.5. Одноразовая, циклическая и длительная прочность асфальтобетона. На рисунке 24 представлены графики, показывающие зависимость прочности асфальтобетона при разных видах одноосного напряженного состояния – растяжении, сжатии и изгибе. Как видно, в рассмотренном интервале температуры (0...50 °С) асфальтобетон имеет наименьшую прочность при растяжении, а наибольшую – при сжатии. Прочность при изгибе занимает промежуточное положение между растяжением и сжатием. При этом прочность асфальтобетона при сжатии и изгибе с повышением температуры уменьшается почти с одинаковой скоростью во всем рассмотренном интервале температуры, а при растяжении скорость понижения выше более двух раз по сравнению с прочностью при сжатии и изгибе. Также видно, что разность между температурными кривыми прочности при изгибе и сжатии сохраняется постоянной во всем рассмотренном интервале температуры и равна в среднем 1,0 МПа. А максимальная разность между температурными

кривыми прочности при растяжении и изгибе (и сжатии) имеет место при низких температурах (0...10 °С), которая равна 2,5 МПа (3,5 МПа) и с повышением температуры уменьшается; при температуре 50 °С эти разности составляют 0,8 МПа и 1,6 МПа соответственно.

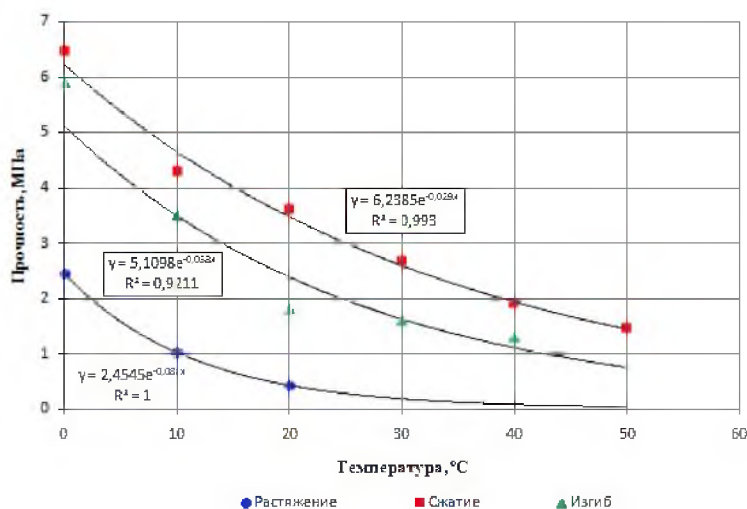


Рисунок 24 – Прочность мелкозернистого асфальтобетона типа Б (БНД 100/130, ПНХЗ) при разных видах одноосного напряженного состояния

Общепринято, что усталостные трещины появляются из-за многократного действия растягивающего напряжения в нижней поверхности асфальтобетонного покрытия [35-40], величина которого при прочих равных условиях тем больше, чем больше отношение модуля упругости асфальтобетонных слоев к модулю упругости нижележащих слоев основания дорожной одежды и грунта земляного полотна [10, 41]. Считается, что указанное отношение модулей упругости в конструкции дорожной одежды имеет наибольшее значение в весенний период, когда верхняя часть земляного полотна оттаяла и ослаблена, а асфальтобетонное покрытие имеет большую жесткость из-за все еще относительно низкой температуры воздуха, находящейся в пределах от 0 до +10 °С [38, 42-44].

Как видно из рисунка 24, именно в интервале температуры от 0 до +10 °С разность в прочности асфальтобетона при растяжении и изгибе (сжатии) наибольшая!

На рисунке 25 показаны графики циклической прочности мелкозернистых плотных асфальтобетонов при изгибе и растяжении при температуре 20 °С. Верхний график получен при испытании асфальтобетонных образцов по схеме чистого изгиба на приборе четырехточечного изгиба в Казахском дорожном научно-исследовательском институте, а нижний построен по данным экспериментов, выполненных в Университете штата Северная Каролина (США) при прямом растяжении [45]. Хорошо видно, что циклическая прочность асфальтобетона при изгибе существенно выше, чем при растяжении. Аналогичную закономерность можно видеть и на кривых длительной прочности асфальтобетона, показанных на рисунке 26 [46, 47].

Таким образом, одноразовая, циклическая и длительная прочность асфальтобетонов при растяжении существенно меньше, чем при изгибе и сжатии.

Чтобы ответить на вопрос: «зависит ли прочность асфальтобетона при сжатии от размеров испытываемого образца?», было выполнено испытание образцов мелкозернистого плотного асфальтобетона типа Б (БНД 100/130) на осевое сжатие. Толщина всех образцов была одинаковой и равной 5 см, а длина и ширина образцов имели значения, равные 2, 5, 7, 10, 12 и 15 см. Испытание было проведено при температурах 0, 10 и 20 °С. При каждой температуре и размерах образцов было проведено по три параллельных испытания.

Как видно из рисунка 27, прочность асфальтобетона при сжатии существенно зависит от размера образца. При температурах 10 и 20 °С наибольшая прочность имеет место при длине стороны образца, равной 7 см, а при температуре 0 °С прочность почти линейно увеличивается с уменьшением размера образца.

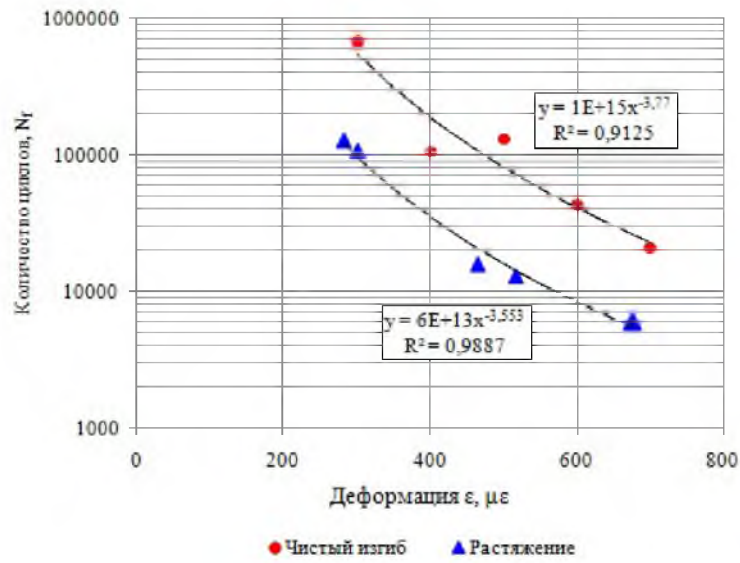


Рисунок 25 – Циклическая прочность асфальтобетонов при чистом изгибе и прямом растяжении при температуре 20 °С

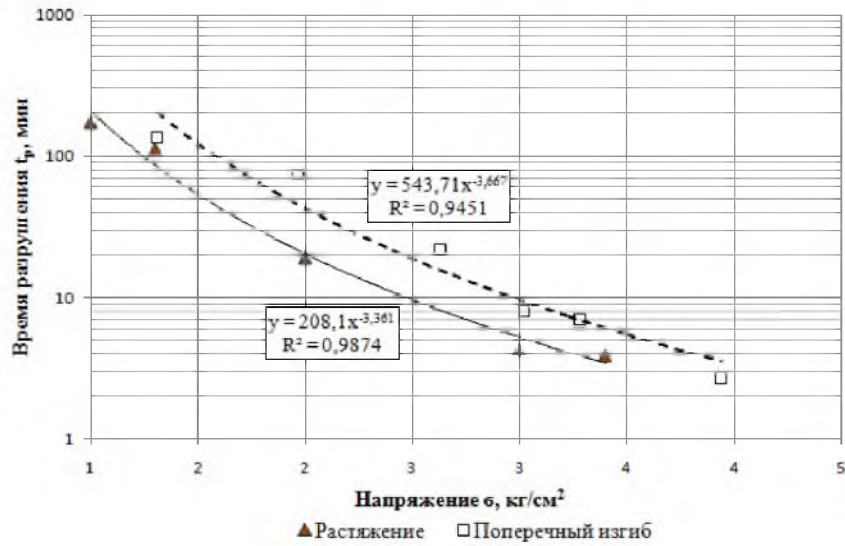
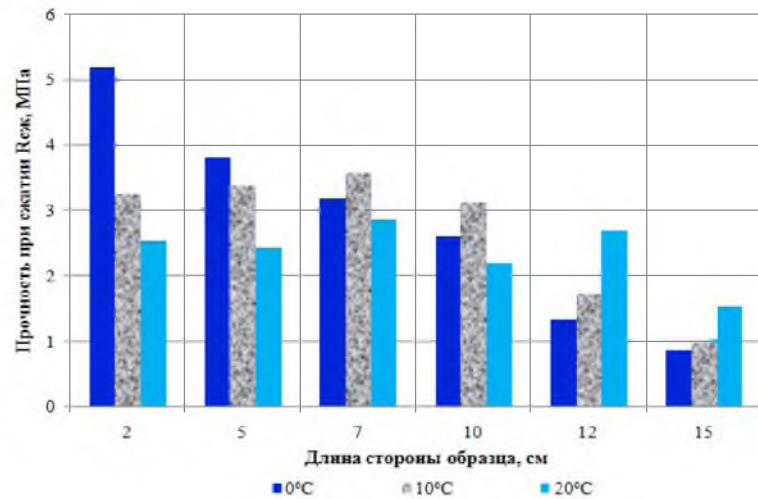


Рисунок 26 – Длительная прочность мелкозернистого асфальтобетона типа Б (БНД 60/90) при поперечном изгибе и прямом растяжении

Рисунок 27 – Прочность при сжатии образцов мелкозернистого асфальтобетона типа Б (БНД 100/130, ПНХЗ) разных размеров при различных температурах



Эти результаты служат надежным объяснением постепенному уменьшению плановых (горизонтальных) размеров ячеек асфальтобетонного покрытия при его усталостной деструкции с приобретением конечной формы, так называемой «крокодиловая кожа».

5.6. Остаточная прочность асфальтобетона. Усталостная трещина на асфальтобетонном покрытии появляется тогда, когда он практически полностью потерял прочность на растяжение (растяжение при изгибе). Поставим вопрос: может ли такой асфальтобетон иметь остаточную прочность при сжатии? Чтобы выяснить это, нами был проведен специальный эксперимент. Для испытаний был принят тот же самый мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б (битум марки БНД 100/130). Сначала на приборе четырехточечного изгиба образцы асфальтобетона с размерами 5x5x38 см при температурах 10, 20 и 30 °С были испытаны на изгибную усталость до разрушения (снижение жесткости до 10 % от начальной). Затем из этих образцов были изготовлены образцы с размерами 5x5x5 см и испытаны на осевое сжатие при тех же температурах. При каждой температуре было испытано по три образца асфальтобетона. Результаты первоначального испытания образцов асфальтобетона на циклический изгиб представлены в таблице 6, а последующего испытания их на осевое сжатие – на рисунке 28. Как видно, асфальтобетон имеет высокую остаточную прочность при сжатии после циклического изгиба до разрушения, сопоставимую с прочностью нового асфальтобетона (рисунки 24 и 27).

Таблица 6 – Результаты испытания мелкозернистого плотного асфальтобетона типа Б (БНД 100/130, ПНХЗ, $f = 10$ Гц, $\sigma = 1400$ кПа) на усталость на приборе четырехточечного изгиба

T, °C	Число циклов до разрушения N_f			
	Параллель 1	Параллель 2	Параллель 3	Среднее
+10	5 187	4 965	10 180	6 777
+20	568	512	534	538
+30	565	219	222	335

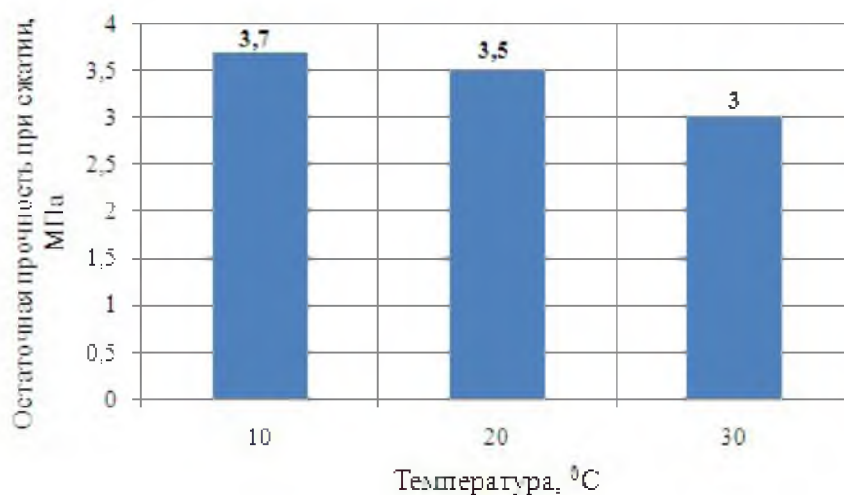


Рисунок 28 – Остаточная прочность асфальтобетона при сжатии после циклического изгиба при разных температурах

6. Принцип последовательной смены видов деформирования. Как известно, явление самоорганизации имеет место в сложных открытых термодинамических системах и в критических условиях в них возникают новые структуры, такие как ячейки Бенара, разделенные клетки живых организмов, лазерные лучи и др. Возникновение специфических диссипативных структур в критических низкотемпературных условиях на асфальтобетонном покрытии было показано в работах [15-17, 48]. Установленная выше стадийность усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия, принципиальная возможность возникновения в нем диссипативных структур при крити-

ческих условиях как результат самоорганизации его структурных элементов, существенная зависимость одноразовой, циклической и длительной прочности асфальтобетона от вида деформирования (напряженного состояния) и наличие остаточной прочности при другом виде деформирования после разрушения при одном виде деформирования позволяют сформулировать **новую закономерность усталостной деструкции**:

Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия под многократно повторным воздействием нагрузок реализуется по последовательно сменяемым стадиям, на каждой из которых части покрытия функционируют как специфические диссипативные структуры с характерным видом деформирования, которые сменяются в последовательности: растяжение-изгиб-сжатие.

7. Бифуркация. Сформулированный выше принцип последовательной смены видов деформирования при усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия можно объяснить на основе положений термодинамики необратимых процессов и динамики нелинейных систем (синергетики).

Выше при кратком описании примеров возникновения диссипативных структур – ячеек Бенара и разделения клетки было отмечено, что в обоих случаях действие систем в критических условиях им выгодно: движение жидкости по гексагональным ячейкам позволяет включить дополнительный конвективный механизм теплообмена с окружающей средой; разделение клетки на две спасает её от «гибели».

Мы тоже считаем, что реализация усталостной деструкции по последовательным стадиям, сменяя вид деформирования от «растяжения» на «изгиб» и от «изгиба» на «сжатие» при непрерывном механическом воздействии асфальтобетонному покрытию выгодно, так как:

1. Прочность асфальтобетона при изгибе больше, чем при растяжении, а при сжатии больше, чем при изгибе.

2. Остаточная прочность асфальтобетона при сжатии существенна после разрушения его при деформировании по схеме изгиба (растяжения).

Такая стадийная деструкция с последовательной сменой вида деформирования продлевает время существования («жизнь») отдельных частей асфальтобетонного покрытия.

Сформулированный принцип можно наглядно демонстрировать с помощью предлагаемой ниже схемы бифуркации (рисунок 29).

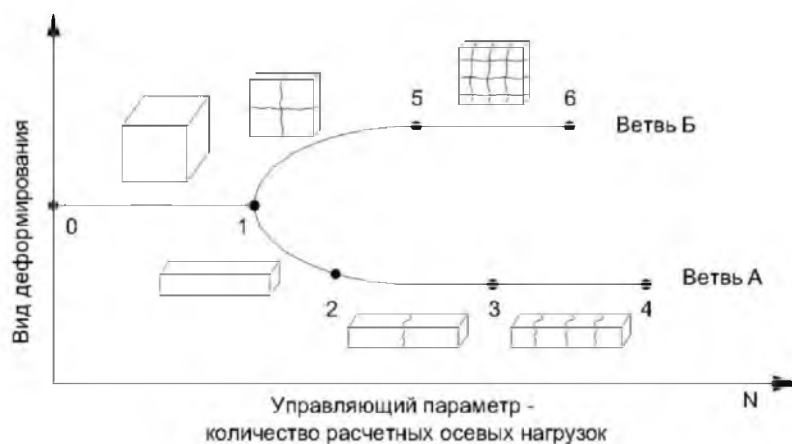


Рисунок 29 – Схема бифуркации при усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия

В термодинамике и синергетике принято считать, что вдали от равновесного состояния система приобретает новые свойства. Она в сильнонеравновесном состоянии «прозревает», все подструктурные элементы системы работают совместно, слаженно, в ней флуктуации усиливаются и в критический момент возникают новые структуры [18-26, 49]. При этом в критических условиях у системы есть выбор – по какому сценарию эволюции идти дальше.

В соответствии с предлагаемой схемой бифуркации, асфальтобетонное покрытие с момента ввода в эксплуатацию до момента исчерпания сопротивления на растяжение (0-1) работает как сплошная среда по схеме объемного напряженно-деформированного состояния. В момент времени

полной потери сопротивляемости к растяжению (точка 1) у термодинамической системы (подструктурных элементов асфальтобетонного покрытия) есть выбор – по какой из термодинамических ветвей (ветвь А и ветвь Б) функционировать в дальнейшем. Если система в точке бифуркации 1 выбирает термодинамическую ветвь А, то в точке 1 на полосах наката появляются параллельные трещины и между точками 1 и 2 полосы асфальтобетона работают как длинная балка и деформируются по схеме изгиба. В точке 2 появляются поперечные трещины, длинные асфальтобетонные полосы делятся на более короткие части, каждая из полученных частей в период времени 2-3 работает как короткая балка и деформируется также по схеме изгиба. В точке 3 число появляющихся поперечных трещин увеличивается и в период времени 3-4 отдельные фрагменты деструкции покрытия работают по схеме осевого сжатия. В момент времени 4 наступает полное разрушение асфальтобетонного покрытия. Примером практической реализации усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия по термодинамической ветви А может служить описанный выше участок автомобильной дороги «Караганды-Шахтинск».

Если система в точке бифуркации 1 выберет термодинамическую ветвь Б, то на покрытии появляются сначала поперечные, затем между ними продольные усталостные трещины и в период времени 1-5 отдельные блоки покрытия функционируют как большие и короткие плиты и деформируются по схеме изгиба. В точке 5 появляются дополнительные поперечные и продольные трещины, сетка трещин сгущается до тех пор, пока каждый из фрагментов покрытия не будет деформироваться по схеме осевого сжатия (период времени 5-6). В момент времени 6 наступает полное разрушение асфальтобетонного покрытия. Примером практической реализации усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия по термодинамической ветви Б может служить описанный выше участок автомобильной дороги, расположенной в г. Шарджа (ОАЭ).

Заключение. Результаты настоящей работы позволяют сделать следующие выводы по усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги:

1. В Казахстане трещины разного вида на асфальтобетонных покрытиях (усталостные, температурные, отраженные и просадочные) не идентифицируются отдельно. Не отмечен стадийный характер усталостной деструкции. Также не определены предельно допустимые характеристики трещин, в том числе усталостных. В США усталостные трещины идентифицируются отдельно от других видов трещин, установлены три уровня их развития, но не учитывается взаимосвязь между этими уровнями.

2. Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия реализуется постадийно. Смена стадий деструкции происходит по механизму самоорганизации подструктурных элементов материала покрытия – асфальтобетона в критических условиях. По аналогии с известными явлениями самоорганизации – эффектом Бенара и деления биологической клетки, предложено считать части асфальтобетонного покрытия специфическими диссипативными структурами. На каждой стадии усталостной деструкции они работают как специфические диссипативные структуры.

3. Сравнение результатов выполненных и известных испытаний асфальтобетонов по определению одноразовой, циклической, длительной и остаточной прочности на растяжение, изгиб и сжатие показало, что всегда прочность при изгибе больше, чем при растяжении; а при сжатии больше, чем при изгибе.

4. Установленный стадийный характер усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия, принципиальная возможность возникновения в нем специфических диссипативных структур, зависимость прочности асфальтобетона от вида деформирования (напряженного состояния), причем её увеличения в порядке «растяжение-изгиб-сжатие», а также наличие остаточной прочности асфальтобетона при сжатии после разрушения при растяжении послужили основанием для сформулирования **новой закономерности усталостной деструкции асфальтобетонного покрытия: Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия под многократно повторным воздействием нагрузок реализуется по последовательно сменяемым стадиям, на каждой из которых части покрытия функционируют как специфические диссипативные структуры с характерным видом деформирования, которые сменяются в последовательности: растяжение-изгиб-сжатие.**

ЛИТЕРАТУРА

- [1] СН РК 3.03-19-2006. Проектирование дорожных одежд нежесткого типа. – Астана, 2007. – 87 с.
- [2] Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Под ред. Н.Н. Иванова. – М.: Транспорт, 1973. – 328 с.
- [3] Hveem F.N. Pavement deflections and fatigue failures. Highway Research Board. – Bulletin 114. – Washington, 1955.
- [4] Saal R.N.J., Pell P.S. Fatigue of bituminous road mixes. Kolloid-Zeitschrift. – 1960. – Vol. 171. – P. 61-71.
- [5] Taylor I.F., Pell P.S. Could fatigue be a problem in flexible pavements? Roads and road construction. – August, 1969. – Vol. 47, N 560. – P. 236-243.
- [6] Monismith C.L., Secor K.E., Blackmer W. Asphalt mixture behavior in repeated flexure. Proceedings of Association of asphalt paving technologists. – 1961. – Vol. 30. – P. 188-222.
- [7] Салль А.О. Особенности изгиба асфальтобетонного покрытия при кратковременных нагрузках // Труды СоюздорНИИ. – 1965. – Вып. 3. – С. 19-26.
- [8] Салль А.О., Золотарев В.А., Радовский Б.С., Ильев Э.Б. Расчетные характеристики асфальтобетонов применительно к ВСН 46-72 // Автомобильные дороги. – 1977. – № 5. – С. 28-30.
- [9] Радовский Б.С., Руденский А.В. О влиянии характеристик структуры материалов на их усталостную и длительную прочность // Труды СоюздорНИИ. – 1977. – Вып. 99.
- [10] Радовский Б.С., Супрун А.С., Козаков И.И. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей. – Киев: Будивельник, 1989. – 168 с.
- [11] Руденский А.В., Калашникова Т.Н. Исследование усталости асфальтобетона // Труды ГипродорНИИ. – Вып. 7. Дорожно-строительные материалы. 1973. – С. 3-15.
- [12] ПР РК 218-27-2014. Инструкция по диагностике и оценке транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог. – Астана, 2014.
- [13] Distress identification manual for the long-term pavement performance program. Report No. FHWA-RD-03-031. Federal highway administration. – Georgetown Pike McLean, 2003.
- [14] Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated structures. Final report. Part 3. Design analysis. Chapter 3. Design of new and reconstructed flexible pavements. ARA, Inc., ERES Consulting division. 2004.
- [15] Телтаев Б.Б. Закономерности самоорганизации низкотемпературного растрескивания дорожного асфальтобетонного покрытия // Доклады НАН РК. – 2015. – № 4. – С. 40-65.
- [16] Телтаев Б.Б. Закономерности увеличения количества трещин на асфальтобетонном покрытии автомобильной дороги // Доклады НАН РК. – 2015. – № 5. – С. 35-57.
- [17] Телтаев Б.Б. Дорожное асфальтобетонное покрытие как диссипативная структура // Доклады НАН РК. – 2016. – № 2. – С. 11-37.
- [18] Базаров И.П. Термодинамика. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 384 с.
- [19] Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. – М.: Иностранная литература, 1960. – 128 с.
- [20] Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 281 с.
- [21] Пригожин И. Время, структура и флуктуации (Нобелевская лекция по химии 1977 года) // Успехи физических наук. – 1980. – Т. 131, № 2. – С. 185-207.
- [22] Пригожин И. От существующего к возникающему. – М.: Наука, 1985.
- [23] Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог с природой. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
- [24] Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980 – 405 с.
- [25] Хакен Г. Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985.
- [26] Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 192 с.
- [27] Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 8. – С. 109-116.
- [28] Осипов А.И. Термодинамика: вчера, сегодня, завтра. Ч. 2. Неравновесная термодинамика // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 5. – С. 91-97.
- [29] СТ РК 1373-2013. Битумы и битумные вяжущие. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. – Астана, 2013.
- [30] СТ РК 1225-2013. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. – Астана, 2013.
- [31] pr EN 12697-46. (Darft). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. – 2004.
- [32] EN 12697-24. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 24: Resistance to fatigue. – 2004.
- [33] СТ РК 1218-2003. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – Астана, 2003.
- [34] EN 12697-33. Bituminous Mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor. – 2003.
- [35] Yoder E.J. Principles of pavement design. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1959.
- [36] Yoder E.J., Witczak M.W. Principles of pavement design. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 1975. – 736 p.
- [37] Бируля А.К. Конструирование и расчет нежестких одежд автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1964. – 168 с.
- [38] Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Под ред. Н.Н. Иванова. – М.: Транспорт, 1973. – 328 с.
- [39] Усиление нежестких дорожных одежд / Под ред. О.Т. Батракова. – М.: Транспорт, 1985. – 144 с.
- [40] Приварников А.К. Пространственная деформация многослойного основания / Устойчивость и прочность элементов конструкций. – Днепропетровск, 1973. – С. 27-45.

- [41] Радовский Б.С. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния покрытий автомобильных дорог как слоистого вязкоупругого основания при подвижной нагрузке // Прикладная механика. – 1980. – Т. 16, № 4. – С. 131-135.
- [42] Красиков О.А. Оценка прочности и расчет усиления нежестких дорожных одежд. – Алматы: КазгосИНТИ, 2006. – 308 с.
- [43] Красиков О.А. Закономерности деформирования нежестких дорожных одежд. Причины возникновения деформаций и разрушений // Транспорт и дороги Казахстана. – 2007. – № 1. – С. 17-21.
- [44] Васильев А.П., Сиденко В.М. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения. – М.: Транспорт, 1990. – 304 с.
- [45] Zhang J., Sabouri M., Guddati M.N., Kim R. Development of a failure criterion for asphalt mixture under fatigue leading // Journal of the Association of asphalt paving technologists. – 2013. – Vol. 82.
- [46] Айталиев Ш.М., Искакбаев А.И., Телтаев Б.Б. Экспериментальное исследование закономерности ползучести и длительной прочности асфальтобетона при поперечном изгибе // Вестник НАН РК. – 1998. – № 1. – С. 32-36.
- [47] Айталиев Ш.М., Искакбаев А.И., Исаев Д., Телтаев Б.Б. Закономерности длительной прочности образцов асфальтобетона при чистом растяжении // Вестник МН-АН РК. – 1998. – № 6. – С. 23-25.
- [48] Телтаев Б.Б. Диплом № 495. Научное открытие «Закономерность самоорганизации асфальтобетонного покрытия при низкотемпературном трещинообразовании». – 2016.
- [49] Пригожин И. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 208 с.

REFERENCES

- [1] CN RK 3.03-19-2006. Design of flexible pavements. Astana, 2007. 87 p. (in Russ.).
- [2] Design and calculation of flexible pavements / Edited by N. N. Ivanov. M.: Transport, 1973. 328 p. (in Russ.).
- [3] Hveem F.N. Pavement deflections and fatigue failures. Highway Research Board. Bulletin 114. Washington, 1955 (in Eng.).
- [4] Saal R.N.J., Pell P.S. Fatigue of bituminous road mixes. Kolloid-Zeitschrift. 1960. Vol. 171. P. 61-71 (in Eng.).
- [5] Taylor I.F., Pell P.S. Could fatigue be a problem in flexible pavements? Roads and road construction. August, 1969. Vol. 47, N 560. P. 236-243 (in Eng.).
- [6] Monismith C.L., Secor K.E., Blackmer W. Asphalt mixture behavior in repeated flexure. Proceedings of Association of asphalt paving technologists. 1961. Vol. 30. P. 188-222 (in Eng.).
- [7] Sall A.O. Peculiarities of asphalt concrete pavement bending at short-term load // Transactions of SoyuzdorNII. 1965. Issue 3. P. 19-26 (in Russ.).
- [8] Sall A.J., Zolotaryov V.A., Radovskiy B.S., Iliyev E.B. Design parameters of asphalt concretes as applied to VSN 46-72 // Automobile roads. 1977. N 5. P. 28-30 (in Russ.).
- [9] Radovskiy B.S., Rudenskiy A.V. Regarding impact of characteristics of the materials structure on their fatigue and long-term strength // Transactions of SoyuzdorNII. 1977. Issue 99 (in Russ.).
- [10] Radovskiy B.S., Suprun A.S., Kozakov I.I. Pavement design for trucks traffic. Kiev: Budivelnyk, 1989. 168 p. (in Russ.).
- [11] Rudenskiy A.V., Kalashnikova T.N. Analysis of asphalt concrete fatigue / Transactions of GiprodorNII. Issue 7. Road construction materials. 1973. P. 3-15 (in Russ.).
- [12] PR RK 218-27-2014. Instruction on diagnostics and evaluation of transport maintenance condition of the automobile roads. Astana, 2014. (in Russ.).
- [13] Distress identification manual for the long-term pavement performance program. Report No. FHWA-RD-03-031. Federal highway administration. Georgetown Pike McLean, 2003 (in Eng.).
- [14] Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated structures. Final report. Part 3. Design analysis. Chapter 3. Design of new and reconstructed flexible pavements. ARA, Inc., ERES Consulting division. 2004 (in Eng.).
- [15] Teltayev B.B. Regularities of self-organization of the low temperature cracking of asphalt concrete pavement // Reports of NAS RK. 2015. N 4. P. 40-65 (in Russ.).
- [16] Teltayev B.B. Regularities of the increase for the number of cracks on the road asphalt concrete pavement // Report of NAS RK. 2015. N 5. P. 35-57 (in Russ.).
- [17] Teltayev B.B. Road asphalt concrete pavement as dissipative structure // Report of NAS RK. 2016. N 2. P. 11-37 (in Russ.).
- [18] Bazarov I.P. Thermodynamics. SPb.: Publisher "Lan", 2010. 384 p. (in Russ.).
- [19] Prigogine I. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. M.: IL, 1960. 128 p. (in Russ.).
- [20] Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations. M.: Mir, 1973. 281 p. (in Russ.).
- [21] Prigogine I. Time, structure and fluctuations (Nobel lecture in chemistry of 1977 year) // Successes of physical sciences. 1980. Vol. 131, N 2. P. 185-207 (in Russ.).
- [22] Prigogine I. From being to becoming. M.: Science, 1985 (in Russ.).
- [23] Prigogine I., Stengers I. Order out of chaos: Man's new dialogue with nature. M.: Progress, 1986. 432 p. (in Russ.).
- [24] Haken H. Synergetics. M.: Mir, 1980. 405 p. (in Russ.).
- [25] Haken H. Synergetics: the hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices. M.: Mir, 1985 (in Russ.).
- [26] Wolkenstein M.V. Entropy and information. M.: Nauka, 1986. 192 p. (in Russ.).
- [27] Klimontovich Yu.L. Introduction to physics of open systems // Soros education journal. 1996. N 8. P. 109-116 (in Russ.).
- [28] Osipov A.I. Thermodynamics yesterday, today and tomorrow. Part 2. Nonequilibrium thermodynamics // Soros education journal. 1999. N 5. P. 91-97 (in Russ.).
- [29] ST RK 1373-2013. Bitumens and bitumen binders. Oil road viscous bitumens. Technical specifications. Astana, 2005 (in Russ.).
- [30] ST RK 1225-2003. Hot mix asphalt for roads and airfields. Technical specifications. Astana, 2003 (in Russ.).

- [31] PR EN 12697-46. (Darft). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests. 2004 (in Eng.).
- [32] EN 12697-24. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 24: Resistance to fatigue. 2004 (in Eng.).
- [33] ST RK 1218-2003. Materials based on the organic binders for road and airfield construction. Test methods. Astana, 2003 (in Russ.).
- [34] EN 12697-33. Bituminous Mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor. 2003 (in Eng.).
- [35] Yoder, E.J. Principles of pavement design. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1959 (in Eng.).
- [36] Yoder, E.J., Witzak, M.W. Principles of pavement design. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 1975, 736 p. (in Eng.).
- [37] Birulya A.K. Design and calculation of flexible pavements. M.: Transport, 1964. 168 p. (in Russ.).
- [38] Design and calculation of flexible pavements / Edited by N. N. Ivanov. M.: Transport, 1973. 328 p. (in Russ.).
- [39] Strengthening of flexible pavements / Edited by O. T. Batrakov. M.: Transport, 1985. 144 p. (in Russ.).
- [40] Privarnikov A.K. Polydimensional deformation of multilayer base course // Stability and strength of structural elements. Dnepropetrovsk, 1973. P. 27-45 (in Russ.).
- [41] Radovskiy B.S. Experimental research of the stress strain behavior of road pavements as the layerwise visco-elastic base course at flexible loading // Applied mechanics. 1980. Vol. 16, N 4. P. 131-135 (in Russ.).
- [42] Krasikov O.A. Evaluation of strength and calculation of strengthening for flexible pavements. Almaty: KazgosINTI, 2006. 308 p. (in Russ.).
- [43] Krasikov O.A. Regularities for deforming of flexible pavements. Causes for occurring of deformations and failures // Transport and roads of Kazakhstan. 2007. N 1. P. 17-21 (in Russ.).
- [44] Vasiliyev A.P., Sidenko V.M. Maintenance of automobile roads and traffic management. M.: Transport, 1990. 304 p. (in Russ.).
- [45] Zhang J., Sabouri M., Guddati M.N., Kim R. Development of a failure criterion for asphalt mixture under fatigue loading. Journal of the Association of asphalt paving technologists. 2013. Vol. 82 (in Eng.).
- [46] Aitaliyev Sh.M., Iskakbayev A.I., Teltayev B.B. Experimental research of regularities for creep and long-term strength of the asphalt concrete at cross bending // Bulletin of NAS RK. 1998. N 1. P. 32-36 (in Russ.).
- [47] Aitaliyev Sh.M., Iskakbayev A.I., Isayev D., Teltayev B.B. Regularities of long-term strength for asphalt concrete samples at pure tension // Bulletin of NAS RK. 1998. N 6. P. 23-25 (in Russ.).
- [48] Teltayev B.B. Regularity of self-organization for asphalt concrete pavement during low temperature cracking. Certificate No. 495 for scientific discovery. 2016 (in Russ.).
- [49] Prigogine I. End of certainty. Time, chaos and new courses of nature. – Izhevsk: RDC “Regular and chaotic dynamics”, 2000. 208 p. (in Russ.).

Б. Б. Телтаев

Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

АСФАЛЬТБЕТОН ЖАМЫЛҒЫСЫНЫҢ ШАРШАУ ДЕСТРУКЦИЯСЫ.

1. ӨЗІНДІК ҰЙЫМДАСУ ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ТҮСІНДІРУ

Аннотация. Жұмыста макрокопиялық деңгейде автомобиль жолының асфальтбетон жамылғысының шаршау деструкциясы талданады. Шынайы автомобиль жолдарының бөліктерінен алынған нақты материалдарды негізге ала отырып, асфальтбетон жамылғысының сатылы шаршау деструкция принципі ұсынылды. Бүгінде бар классификацияларды талдай отырып, Қазақстанда шаршау сызаттарының сатылылығы есепке алынбайтындығы, ал АҚШ-та деструкция сатыларының арасындағы байланыстың анықталмағандығы көрсетілген. Қайтымсыз үдерістер термодинамикасы мен сызықтық емес жүйелер динамикасындағы (синергетикадағы) өзіндік ұйымдасудың белгілі құбылыстарымен – Бенар эффектісімен және биологиялық клетканың бөлінуімен қатар қарастыра отырып, асфальтбетон жамылғысының бөліктерін критикалық жағдайларда пайда болатын ерекше диссипативтік құрылымдар деп санау ұсынылған және шаршау деструкциясының жана заңдылығы анықталып, талқыға ұсынылып отыр. Бұл заңдылық жаңадан жасалған бифуркация схемасымен асфальтбетонның бірреттік, никлдік, ұзақмерзімділік және қалдық беріктіктерін тәжірибелік анықтау нәтижелерін пайдалана отырып түсіндірілген.

Түйін сөздер: асфальтбетон жамылғысы, сатылы шаршау деструкция, деформациялану түрлерінің тізбектік ауысуы, асфальтбетон беріктігі, өзіндік ұйымдасу, диссипативтік құрылымдар, бифуркация.

Сведения об авторе:

Телтаев Бағдат Бурханбайұлы – доктор технических наук, профессор, президент АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», e-mail: bagdatbt@yahoo.com