

НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

М И С И



Национальный исследовательский
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНТЕГРАЦИЯ, ПАРТНЕРСТВО И ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬНОЙ НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Сборник материалов
Международной
научной конференции

16–17 ноября 2016 г.,
г. Москва

© Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет, 2017

ISBN 978-5-7264-1451-5



Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г., Ван Чжуан, Поляков Д.Б., Титов С.П., Харитонов Е.И.	
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В БЕТОНОВЕДЕНИИ....	687
Мюллер М., Людвиг Х.-М.	
ДОЛГОВЕЧНЫЕ БЕТОННЫЕ ДОРОЖНЫЕ ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ В ВЕРХНЕМ И НИЖНЕМ СЛОЯХ БЕТОНА.....	696
Ушеров-Маршак А.В., Кабусь А.В.	
ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ - ФЕНОМЕН И ФАКТОР ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА.....	704
Фаликман В.Р.	
ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ МЕЖДУНАРОДНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ: НОВЫЕ ПРОЕКТЫ И ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ РАБОТ В ОБЛАСТИ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА.....	714
Харченко И.Я., Кривчун С.А., Бурьянов А.Ф., Харченко А.И.	
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГРУНТОБЕТОНА ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ.....	722
Шамис Е.Е., Присяжнюк М.И., Иванов В.Д.	
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ.....	729

СЕКЦИЯ 6. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ. ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ЖКХ. МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

Подсекция 6.1. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ. ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ. МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

Акопов В.С., Салова И.А.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПОВЫШАЮЩЕГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ.....	734
Александров В.Д., Соболев О.В., Соболев А.Ю., Покинтелица Е.А.	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОПЕРЕХОДНЫХ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ... ..	740
Боронина Л.В., Онкаев В.А., Серпокрылов Н.С., Тажиева С.З.	
ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ВОДОДЕФИЦИТНЫХ РАЙОНОВ.....	745
Говоров О.Б., Говоров В.О.	
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ.....	750
Говорова Ж.М., Семеновых В.А., Медведева В.М.	
К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОДОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА.....	754
Данилычева М.Н., Андрианов А.П.	
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ «ЗЕЛЕННЫХ» ИНГИБИТОРОВ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ОБРАТНОГО ОСМОСА.....	757

Кондращенко В.И., д-р техн. наук, проф. кафедры
строительных материалов и технологий

Ван Чжунан, Поляков Д.Б., Титов С.П., Харитонов Е.И., магистранты
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
путей сообщения Императора Николая II»

Кесарийский А.Г., канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник
ООО «Лаборатория комплексных технологий», (г. Павлоград, Украина)

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В БЕТОНОВЕДЕНИИ

Методами лазерной интерферометрии исследованы сложноструктурированные системы – бетоны. Определены особенности их деформирования, сопровождающиеся образованием упругих блоков, окаймленных высокоградиентными линейно-протяженными зонами повышенных упруго-пластических деформаций.

By the methods of laser interferometry is investigated complex structured systems – concretes. Detected the processes of deformation of samples, accompanied by the formation of elastic blocks, bordered by high-gradient linearly extended areas of high elastic-plastic deformations.

Бетоны представляют собой сложноструктурированные многоуровневые системы, описание которых наиболее корректно может быть выполнено методами структурно-имитационного моделирования [1]. В свою очередь для построения таких моделей целесообразно применять экспериментальные методы, оперирующие не точечными измерениями, а массивами, полями параметров, описывающими свойства и/или процессы, происходящие в объекте исследования. При этом методы регистрации должны иметь высокую чувствительность, обладать хорошим пространственным и временным разрешением, а также обеспечивать бесконтактный съем информации с исследуемого объекта. Этим требованиям удовлетворяют методы лазерной интерферометрии [2, 3]. Эффективность применения лазерно-интерференционных методов для исследования строительных материалов хорошо иллюстрируют приведенные ниже примеры практических исследований, выполненных с использованием голографической и спекл-интерферометрии [4, 5].

Тяжелый бетон, полученный по ротационной (методом механического набрызга) технологии сравнивали с бетоном, изготовленным по технологии виброуплотнения.

На рисунке 1 представлены аншлифы, интерферограммы и 3D-график поля перемещений поверхности бетонного образца, изготовленного по ротационной технологии. При этом образец был повторно нагружен до уровня напряжений $\sigma = 12,6$ МПа (регистрацию интерферограммы проводили при перепаде напряжений $\Delta\sigma = 1,0$ МПа) после полной разгрузки. На интерферограмме (рисунок 1б) отчетливо проявляются аномальные изгибы интерференционных полос, характерные для зон начала трещинообразования (красная линия на рисунке 1а). Причем визуальное наблюдение не позволяет обнаружить наличие трещины даже при использовании оптических приборов.

Увеличение напряжений до $\sigma = 14,77$ МПа ($0,30R_{сж}$ при однократном нагружении) приводит к появлению предвестников оптически не наблюдаемых псевдотрещин – аномальных высокоградиентных зон деформаций и началу формирования блоков (рисунок 1в, г). На 3D-диаграмме наглядно показаны происходящие в образце процессы при $\Delta\sigma = 1,47$ МПа (рисунок 1д). По мере роста общего уровня напряжений в образце проявляется проворот заполнителя, однако значения его углов проворота невелики и при перепаде напряжений $\Delta\sigma = 2,1$

МПа составляют всего 0,003 градуса. Тем не менее, интерферограммы позволяют отчетливо выявить аномальное поведение этих структурных элементов бетона.

На рисунке 2 представлены интерферограммы тяжелого бетона, полученного по вибрационной технологии.

В зоне 1 на рисунке 2а отчетливо проявляется выклинивание мелкого заполнителя, окруженного более крупными зернами щебня. В зоне 2 нагрузка приводит к аномальному деформированию крупного зерна щебня, который проворачивается относительно связующего.

Зона 3 представляет собой развивающуюся, оптически неразличимую трещину, проходящую между элементами заполнителя по наиболее податливым участкам связующего (рисунок 2д).

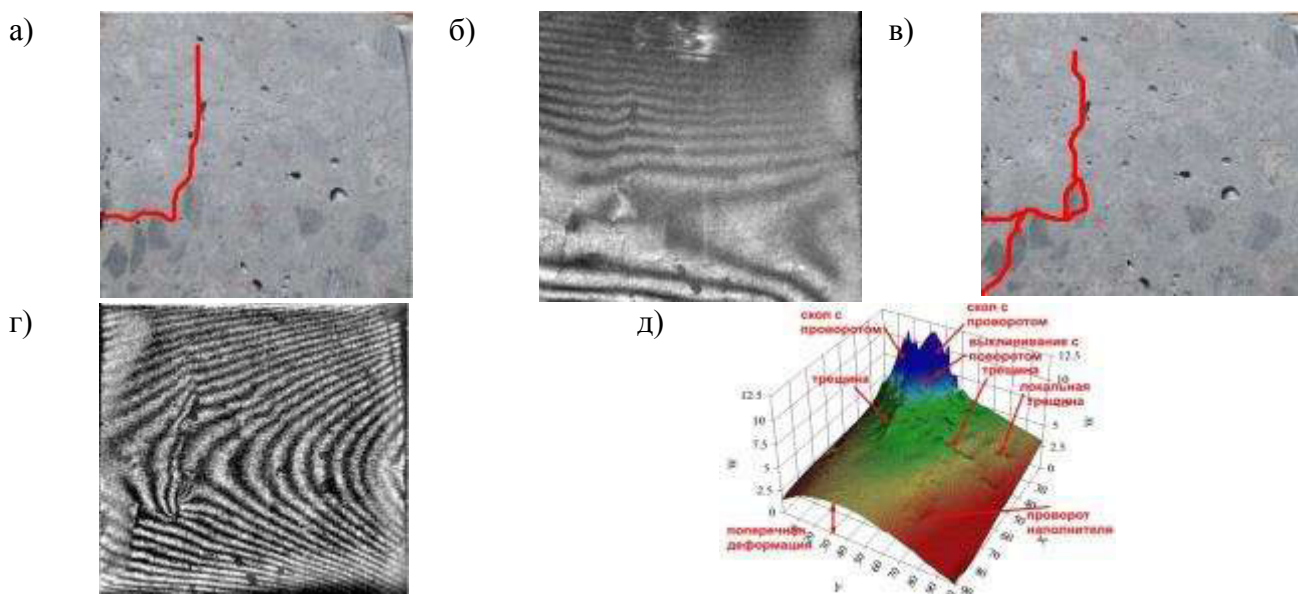
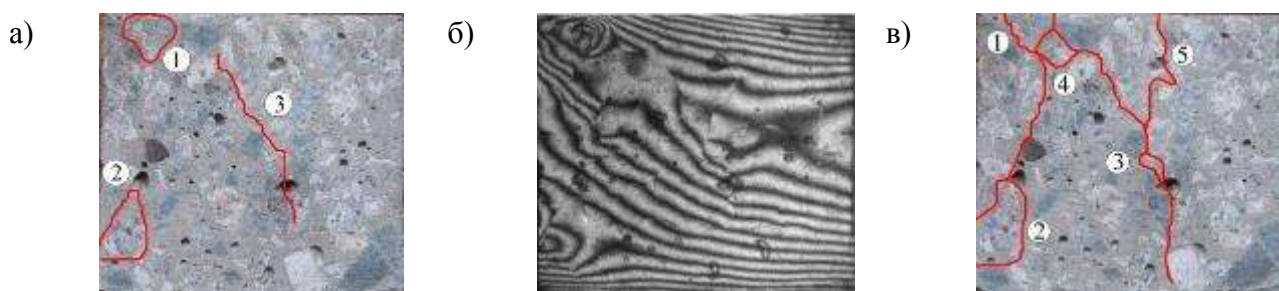


Рис. 1. Анишлифы (а, в), интерферограммы (б, г) и 3D-график поля перемещений (д) образца ротационного бетона при уровне напряжений σ : а, б – $\sigma = 12,6$; в, г – $\sigma = 14,77$; д – $\sigma = 16,24$ МПа

По мере роста нагрузки зоны трещинообразования расширяются и формируются блоки, обозначенные красными линиями на рисунке 2в при уровне напряжений $\sigma = 21,1$ МПа. Угол проворота заполнителя при этой нагрузке составляет 0,0047 градуса. При дальнейшем росте напряжений до $\sigma = 28$ МПа активно деформируется центральная часть образца, что приводит к последующему его разрушению.



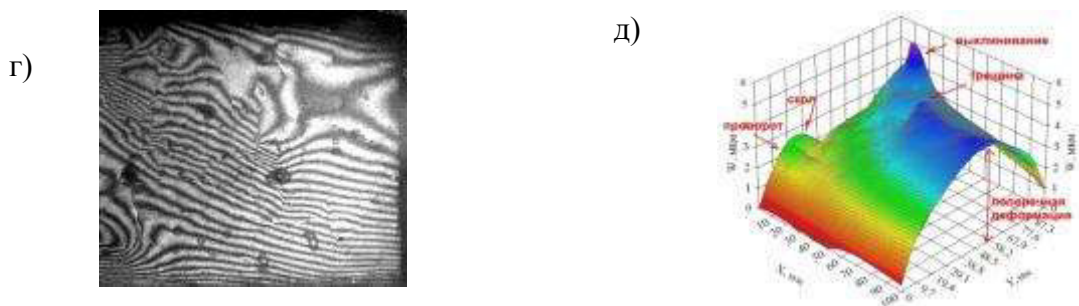


Рис. 2. Анилифы (а, в), интерферограммы (б, г) и 3D-график поля перемещений (д) образца вибрационного бетона при уровне напряжений σ : а, б, – $\sigma = 16,25$; в, г – $\sigma = 21,1$; д – $\sigma = 28,0$ МПа

Легкие бетоны на основе керамзитового заполнителя проявляют иной характер структурных изменений в процессе деформирования. На рисунке 3 показаны результаты исследования образца такого бетона при уровне напряжений $\sigma = 10,55$ МПа.

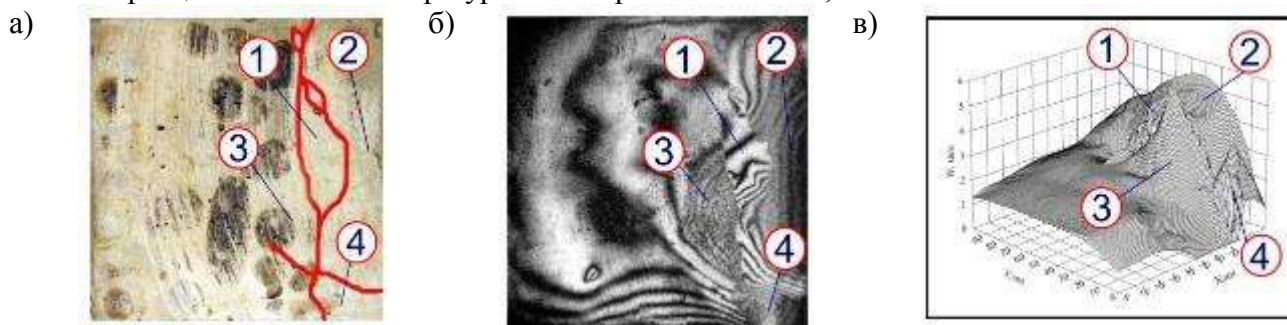


Рис. 3. Анилиф (а), интерферограмма (б) и график поля перемещений (в) в образце легкого бетона при уровне сжимающих напряжений $\sigma = 10,55$ Мпа (см. пояснения в тексте)

Под нагрузкой в образце легкого бетона формируются блоки – области, ограниченные протяженными зонами высокоградиентных деформаций: 1 – центральный блок в виде фрагмента, отделенного от основного массива сеткой трещин; 2 – скол части образца с боковой поверхности; 3 – участок высокоградиентных нормальных перемещений основного массива, частично ослабленного трещиной; 4 – область локального всплеска нормальных перемещений на участке, потерявшем, по-видимому, механическую связь с основным телом образца. Особо следует отметить, что области 2, 3 и 4 на интерферограмме имеют пониженный контраст, что свидетельствует об активной их деформации даже за короткий период экспозиции, составляющий 8 с. Обращает внимание метастабильность положения области 1, что, скорее всего, вызвано противодействием сил со стороны областей 2 и 3. При данной нагрузке образец уже содержит основные поверхности разделения и сохраняет целостность только благодаря геометрическому замыканию отдельных блоков.

Образцы из пенобетона демонстрируют существенные отличия в механике деформирования, по сравнению с бетонами, имеющими крупный заполнитель. На рисунке 4 приведена диаграмма деформирования образца пенобетона плотностью 500 кг/м^3 с ниспадающей ветвью. Индексы 1-7 на диаграмме « $\sigma - \varepsilon$ » определяют состояние образца в моменты регистрации голографических интерферограмм.

До уровня напряжений в образце, составляющих 45-50 % от разрушающих напряжений σ_p , наблюдается его линейное деформирование, соответствующее упругой области на диаграмме « $\sigma - \varepsilon$ ». Но уже при достижении уровня напряжений $\sigma = 0,62\sigma_p$ поле перемещений теряет свою равномерность и начинают проявляться первые признаки деструкции образца (рисунок 5а(1)). Локальные искажения интерференционных полос в зоне «а» характеризуют участок потенциального выклинивания части материала. В зоне «б» обнаруживаются разрывы интерференционных полос, свидетельствующие о зарождении в ней трещины.

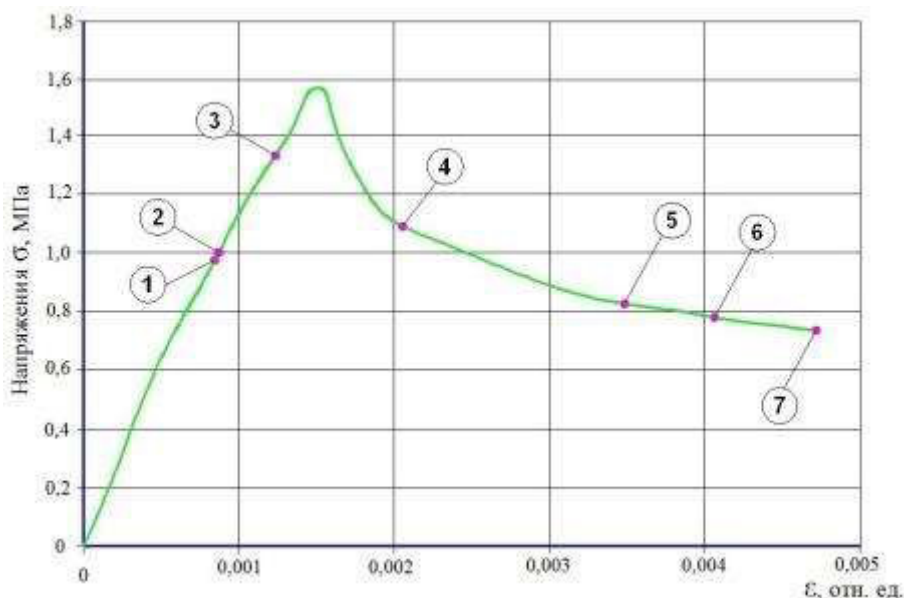


Рис. 4. Диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » пенобетона плотностью 500 кг/м^3 при сжатии

В ходе эксперимента выполнялось незначительное снижение сжимающей нагрузки (4-5 %) во время движения по восходящей ветви кривой деформирования. Голографическая интерферограмма, полученная после восстановления уровня напряжений, позволяет констатировать, что уровень упругих деформаций на этой стадии деформирования начинает существенно уменьшаться, о чем свидетельствует падение частоты полос по сравнению с предыдущей интерферограммой, полученной при том же перепаде и уровне нагрузки. Интерферограмма на рисунке 5а(2) позволяет обнаружить необратимую зону зарождения трещины, хорошо различимую в зоне «а». При этом наблюдается полное отсутствие аномалий в верхней части образца, что свидетельствует об упругом характере деформирования на участке ранее обнаруженных локальных дефектов и отсутствие деструкции образца в этой зоне.

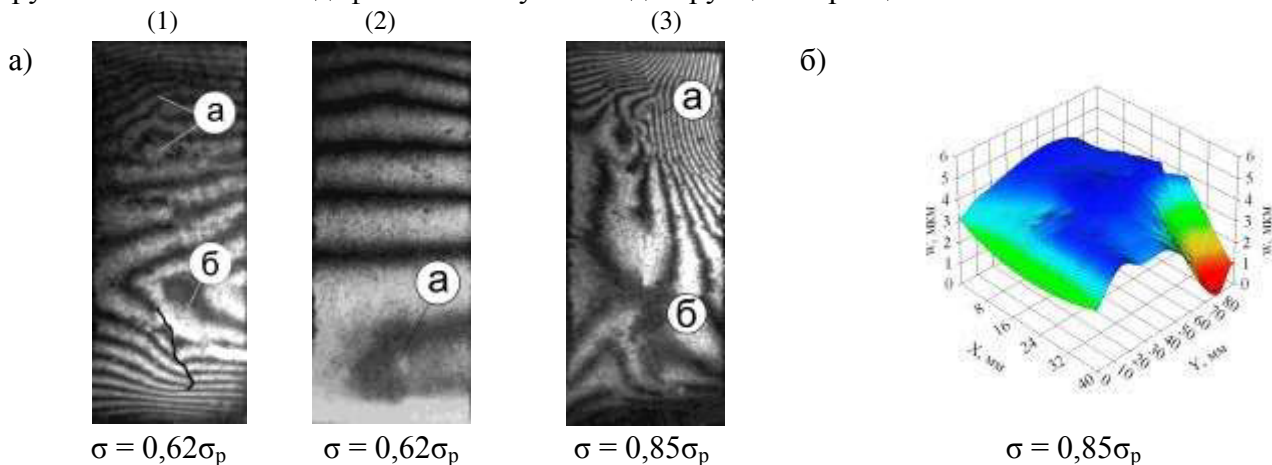


Рис. 5. Интерферограммы пенобетона (а) на восходящей ветви диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » с индексами (1)-(3) и 3D-диаграмма поля перемещений (б)

Дальнейшее увеличение нагрузки на образец приводит к активному развитию ранее обнаруженных аномалий деформирования – по разрывам в интерференционных полосах (зоны «а» и «б» на рисунке 5а(3)) при $\sigma = 0,85\sigma_p$ отчетливо проявляются трещины, которые визуально на образце не видны.

Особенность деформирования пенобетона на восходящей ветви проявляется в том, что даже в процессе образования трещин развитие деформаций сравнительно быстро затухает, а

общее напряженно-деформированное состояние образца стабилизируется, о чем свидетельствует хороший контраст интерферограмм, представленных на рисунке 5. На ниспадающей ветви кривой деформирования характер интерферограмм существенно изменяется. Так, например, при снижении уровня напряжений до $0,69\sigma_p$ (рисунок 6(4)) зона «а» выглядит темной вследствие того, что даже за короткое время экспонирования 4-5 с темп развития нормальных к поверхности образца деформаций здесь составлял не менее $0,05 \text{ мкм/с}$.

Зона «б» на рисунке 6(4) испытывает сильное влияние деформирующейся части, о чем свидетельствует пониженный контраст интерференционных полос. При этом, основываясь на существовании зоны локальной стабильности «г», можно предполагать, что эта часть образца сохраняет стабильность как единое целое, но подвергается повороту за счет усилий со стороны разрушающейся центральной части. В зоне «в» формируется локальный максимум перемещения без образования трещины, что свидетельствует о наличии внутреннего силового давления, возникающего при взаимодействии двух крупных блоков.

Падение напряжений в образце до уровня $0,51\sigma_p$ происходит на фоне активной подвижности зоны «а» (рисунок 6(5)). При этом видно, что темп деформации снижается, поскольку прослеживается расширение стабильности состояния зоны «б». Зона «в» стабилизируется как единый блок, но еще испытывает активное силовое воздействие зоны «а», но со стороны внутренней структуры, поскольку границы блоков отчетливо просматриваются и практически не имеют существенной силовой взаимосвязи.

Структура наблюдаемых трещин $0,50\sigma_p$ (рисунок 6(6)) позволяет подтвердить предположения о механизме разрушения, основанные на анализе предшествующих интерферограмм. Блок «а» выполняет роль силового клина, а блок «б» сохранил целостность структуры за счет отделения от блока «а» по магистральной трещине. Энергия разрушения, в основном, расходовалась на деструкцию приграничных зон по берегам магистральных трещин. Блок «в» подвергался активному воздействию со стороны блока «а», но сохранил целостность структуры даже в своей нижней части. Блок «г» сформировался трещинами, наблюдаемыми еще на ранних стадиях деформирования образца.

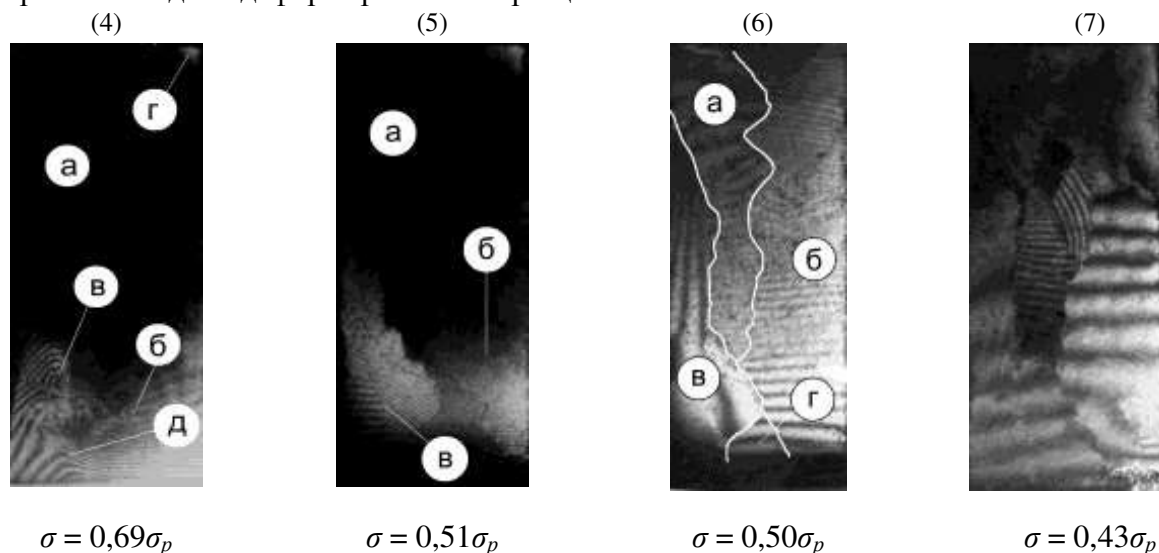


Рис. 6. Интерферограммы пенобетона на ниспадающей ветви « $\sigma - \varepsilon$ » (см. пояснения в тексте)

Дальнейший рост нагрузки на образец приводит, в основном, к взаимному смещению блоков (рисунок 6(7)), сколам приграничных областей и снижению общей несущей способности образца, сопровождающегося его распадом и разделению на отдельные блоки.

Арболит в процессе разрушения имеет свои особенности (рисунок 7). Точная привязка перемещений к конкретным элементам такой сложноструктурированной системы как арболит

весьма затруднительна в силу крайне большого количества древесных частиц и границ их контакта. Но сопоставительный анализ поверхности образца и интерферограмм показывает, что зарождение трещин начинается либо в зоне несплошностей (поз. 1, 4 на рисунке 7в), либо в зоне древесного заполнителя более крупного (чем окружающие) размера (поз. 2, 3 на рисунке 7в). Сочетание этих факторов приводит к наиболее вероятному началу разрушения (поз. 5 на рисунке 7в). Особенно рельефно аномальные перемещения, характеризующие появление трещин, видны на 3D-графике нормальных к поверхности образца перемещений (рисунок 7г).

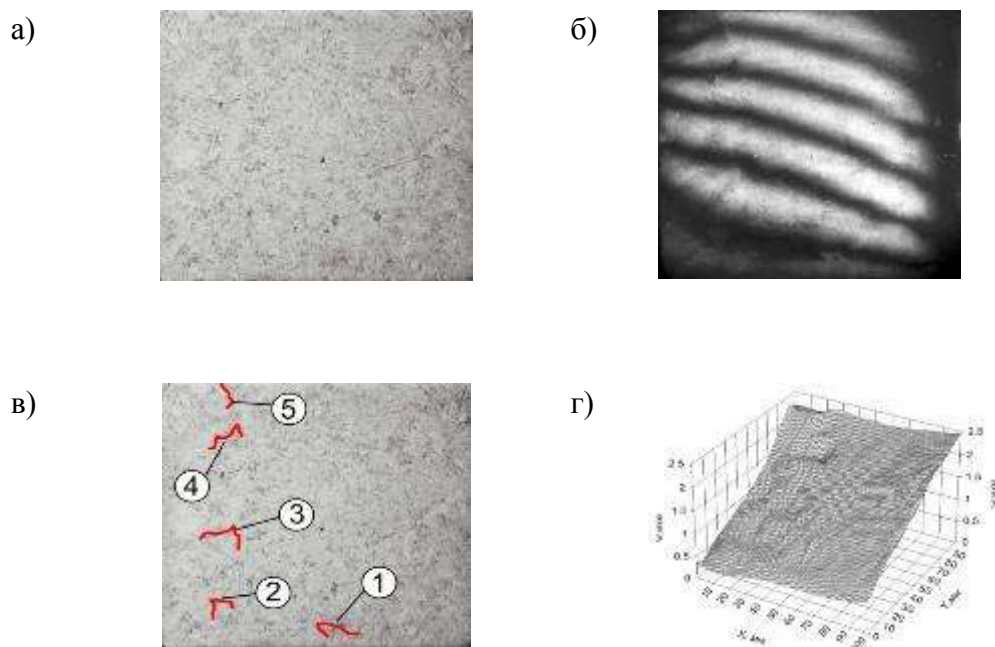
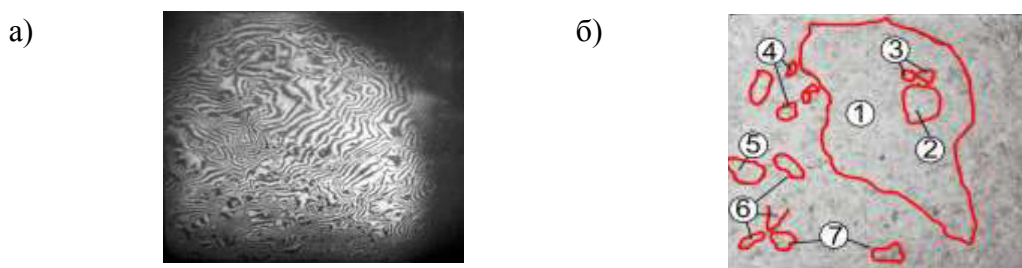


Рис. 7. Лазерная интерферометрия арболита при сжатии ($\sigma = 0,16\sigma_p$)
 а – исходный образец; б – интерферограмма образца; в – идентификация зон аномальных перемещений образца; г – 3D-график перемещений (см. пояснения в тексте)

С целью визуализации особенностей активной фазы поведения образца был проведен эксперимент по контролю поля перемещений при снижении напряжений с $0,42\sigma_p$ до $0,39\sigma_p$. Полученная интерферограмма (рисунок 8а) позволила установить, что даже незначительное (на 7 %) снижение нагрузки при высоком уровне напряжений приводит к существенной деформации арболита, сопровождающейся образованием локальных зон аномальной деформации, но при сохранении несущей способности образца как целого.



в)



г)

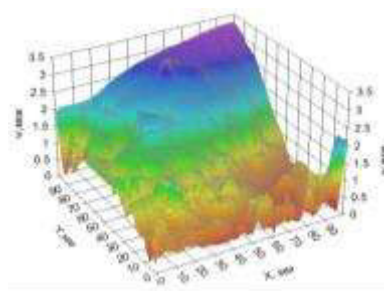


Рис. 8. Лазерная интерферометрия арболита при различном уровне нагружения а – интерферограмма образца при $0,39\sigma_p$; б – тот же образец с идентификацией аномальных перемещений; в – интерферограмма образца при $0,55\sigma_p$; г – 3D-график перемещений при $0,55\sigma_p$ (см. пояснения в тексте)

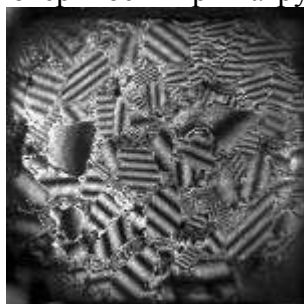
При этом проявляется целый ряд особенностей переходной фазы деформирования арболита, на которой единая цельная структура превращается в конгломерат отдельных элементов, связанных геометрическим замыканием. Зона 1 (рисунок 8б) представляет собой низкоградиентный участок перемещений, сохраняющий свойства исходного материала. Но и в этой зоне идут локальные деления на крупные (поз. 2) и мелкие (поз. 3) фрагменты. В остальной части образца присутствуют фрагменты, которые выкрашиваются (поз. 4), более жесткие участки (поз. 5), сохраняющие локальную целостность, зоны с различными градиентами поворота (поз. 6) и участки сверхвысоких деформаций (поз. 7), соответствующие зонам локальной текучести.

Снижение в три раза перепада тестирующих напряжений (с $\Delta\sigma = 0,06$ кПа до $\Delta\sigma = 0,02$ кПа) позволило уменьшить изменение деформаций и рассмотреть изменения характера распределения поля перемещений с ростом напряжений в образце. Поскольку на этой стадии нагружения (при $\sigma = 0,55\sigma_p$) целостность образца определяется, в основном, кинематическим замыканием отдельных подвижных элементов, то количественный анализ интерферограмм остается весьма затруднительным (рисунок 8в). Тем не менее, использование 3D-графика нормальных к поверхности образца перемещений (рисунок 8г) позволило отчетливо идентифицировать зоны текучести, проявившиеся ранее как низкоконтрастные участки интерферограмм. При этом в левой и нижней частях образца происходит интенсивное дробление структуры на составляющие элементы, соизмеримые с размером древесного заполнителя.

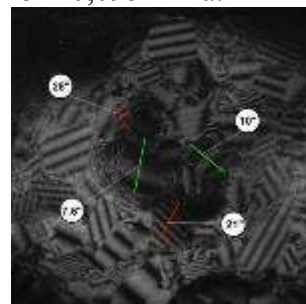
Исследование асфальтобетона с применением методов голографической интерферометрии связано с рядом сложностей, вызванных, в первую очередь, значительными пластическими деформациями, характерными для данного материала даже при минимальном уровне тестирующих нагрузок (образцы асфальтобетона предоставлены Гладких В.А. (МГСУ)).

На рисунке 9а показана интерферограмма, отображающая поле нормальных перемещений исследуемой поверхности при нагружении образца при $\sigma = 0,095$ МПа.

а)



б)



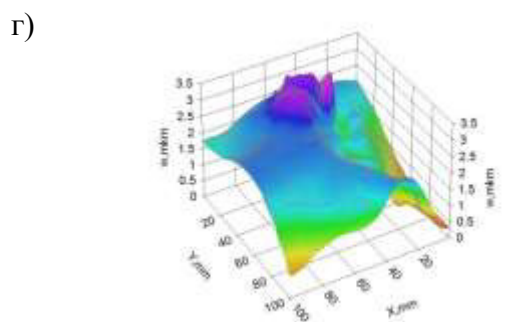
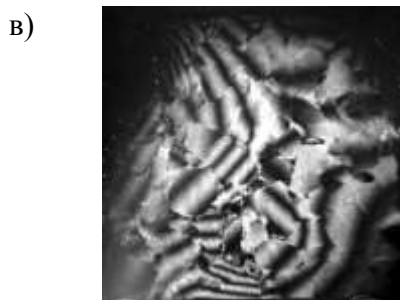


Рис. 9. Интерферограммы (а, б, в) деформирования асфальто- (а, б) и сероасфальтобетона (в, г) при $\sigma = 0,095$ МПа (а), $\sigma = 0,35$ МПа (б), $\sigma = 0,29$ МПа и 3-D график перемещений (см. пояснения в тексте)

Практически все элементы заполнителя претерпевают провороты по случайным направлениям, распределяя силовые потоки сжатия в соответствии с геометрическим силовым замыканием. Роль связующего сводится к удерживанию заполнителя от самопроизвольного разрушения и выполнения роли "смазки", обеспечивающей смещение элементов заполнителя по отношению друг к другу. Только в правом верхнем углу образца наблюдается зона совместного деформирования небольшого конгломерата из элементов заполнителя и связующего. При $\sigma = 0,35$ МПа скорость деформирования возрастает в три раза. В центральной части образца пластические деформации интенсивно развиваются. Практически все зерна заполнителя претерпевают провороты на углы, величины которых отличаются в 3-4 раза (рисунок 9б).

Введение в состав связующего технической серы существенно изменяет характер деформирования модифицированного асфальтобетона. В нем (рисунок 9в) проворот заполнителя локализован в центральной части образца. Здесь происходит интенсивное развитие деформации, в то время как по остальному объему образца сохраняется хорошая механическая связь всех структурных элементов. Удастся также проследить глобальное поле деформирования, характерное для изотропного тела, модулированное локальными полями, сформированными сложноструктурированной системой «заполнитель-связующее» (рисунок 9г).

Подобные эксперименты позволяют сопоставить особенности деформирования образцов асфальтобетона с различными добавками-модификаторами, что создает возможность оптимизации его состава в зависимости от условий эксплуатации дорожных покрытий.

Заключение:

1. Выполненными исследованиями процессов формирования структуры различных бетонов под нагрузкой подтверждена высокая информативность метода лазерной интерферометрии при изучении сложноструктурированных систем.

2. Методами лазерной интерферометрии установлены новые элементарные акты процесса разрушения строительных материалов при действии статической сжимающей нагрузки, к которым относятся: а) образование высокоградиентных линейно-протяженных зон повышенных упруго-пластических деформаций, являющихся зонами диссипации энергии разрушения сложноструктурированных материалов; б) формирование в них при нагружении блочной структуры, состоящей из отдельных "упругих" блоков, окаймленных высокоградиентными линейно-протяженными зонами; в) проворот заполнителя, достигающий в пластичных средах нескольких градусов.

3. В неоднородных материалах формирование блочной структуры начинается на ранних стадиях деформирования, а в относительно однородных – непосредственно предшествует фрагментированию образца на отдельные части.

4. Выполненными исследованиями показана целесообразность учета проворота заполнителя при описании поведения асфальтобетона под нагрузкой.

5. Применение лазерной интерферометрии кардинально изменяет характер получаемой при проведении исследований информации, что будет способствовать переходу на качественно иной уровень разработок новых материалов и технологий их получения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондращенко В.И. Оптимизация составов и технологических параметров получения изделий брускового типа методами компьютерного материаловедения. / Авт. дисс....докт. техн. наук, М., 2005. – 48 с.
2. Кесарийский А.Г. Применение голографической интерферометрии для анализа работоспособности изделий из композиционных материалов // Технологические системы, 2000, №2 (4), с. 43-45
3. Кесарийский А.Г., Кондращенко В.И., Гребенников Д.А., Гузенко С.В. Исследование деформационных характеристик бетонных образцов лазерно-интерференционными методами // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ, № 4, 2009, с. 154-159.
4. Вест Ч. Голографическая интерферометрия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
5. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 328с.