



Министерство науки и образования РФ
Российская академия архитектуры
и строительных наук
Тул'sкий государственный университет
ООО «Строительное проектирование»

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

**XIX Международной
научно-технической конференции
«Актуальные проблемы строительства,
строительной индустрии и промышленности»
(28-29 июня 2018 г.)**



**ТУЛА
2018**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

**XIX Международной
научно-технической конференции
«Актуальные проблемы строительства,
строительной индустрии и промышленности»
(28-29 июня 2018 г.)**



**ТУЛА
2018**

В настоящем сборнике опубликованы материалы, представленные участниками XIX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности» (Тульский государственный университет, 28-29 июня 2018 года, г. Тула).

Тезисы докладов соответствуют авторским оригинал макетам, поступившим в оргкомитет конференции.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

Механика материалов и строительных конструкций, проектирование зданий и сооружений.

Технология и экологические проблемы строительных материалов.

Эксплуатация, обследование и усиление строительных конструкций.

Промышленная безопасность зданий, сооружений и оборудования.

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Грызев М.В. – чл. корр. РАН, д.т.н., проф., ректор ТулГУ

Зам. председателя:

Трещёв А.А. – чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., зав. каф. ТулГУ

Члены оргкомитета:

Моисеев В.А. – президент НП СРО ОПТО,

Захарова И.А. – к.ф.-м.н., доц. ТулГУ,

Теличко В.Г. – к.т.н., доц. ТулГУ,

Секретариат – Фомичёва А.А., ст. лаборант ТулГУ

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели:

Травуш В.И. – академик РААСН, д.т.н., проф., РААСН (г. Москва);

Карпенко Н.И. – академик РААСН, д.т.н., проф. РААСН (г. Москва);

Петров В.В. – академик РААСН, д.т.н., проф., СГТУ (г. Саратов);

Чернышов Е.М. – академик РААСН, д.т.н., проф., ВГТУ (г. Воронеж)

Члены программного комитета:

Белов В.В. – советник РААСН, д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь);

Зубчанинов В.Г. – д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь);

Малинин В.Г. – д.ф.-м.н., проф., ОрёлГАУ (г. Орёл);

Мионов В.А. – почётный член РААСН, д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь)

Овчинников И.Г. – академик АТ, д.т.н., проф., СГТУ (г. Саратов);

Трещёв А.А. – чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., ТулГУ (г. Тула).

Müller W.H. – д.е.н., проф., Берлинский техн. ун-т (г. Берлин, Германия).

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF THE RUSSIAN FEDERATION

Federal State budget educational institution of higher Education
«Tula State University»

INFORMATION PACKAGE

**XIX International
scientific and technical conference
«Contemporary issues of engineering
and building industry»
(June 28-29, 2018)**



TULA
2018

This package consists of articles submitted by participants of XIX International scientific and technical conference «Contemporary issues of engineering and building industry» (Tula State University, June 28-29, 2018, Tula).

Theses of reports match with original drafts that were submitted to organizing committee.

CONFERENCE SESSIONS

Mechanics of materials and engineering structures, structural design.

Technology and ecological issues of constructional materials.

Operation, structural survey and reinforcement of engineering structures.

Industrial safety of buildings, structures and equipment.

ORGANIZING COMMITTEE

Convener:

Gryazev M.V. – corresponding member of Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Doctor of Engineering, professor, president of Tula State University;

Deputy convener:

Treschev A.A. – corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Engineering, professor, head of the department, Tula State University;

Members of the committee:

Moiseev V.A. – president of NP SRO OPTO (Tula);

Zaharova I.A. – candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent, Tula State University;

Telichko V.G. – candidate in Engineering Sciences, docent, Tula State University;

Secretary – Fomicheva A.A., senior departmental assistant, Tula State University.

PROGRAM COMMITTEE

Co-conveners:

Travush V.I. – member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Doctor of Engineering, professor RAACS (Moscow);

Karpenko N.I. – member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Doctor of Engineering, professor RAACS (Moscow);

Petrov V.V. – member of RAACS, Doctor of Engineering, professor, Saratov State Technical University;

Chernyshov E.M. – member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Doctor of Engineering, professor, Voroneg State Technical University;

Members of program committee:

Belov V.V. – advisor of RAACS, Doctor of Engineering, professor, Tver State Technical University;

Zubchaninov V.G. – Doctor of Engineering, professor, Tver State Technical University;

Malinin V.G. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, Orel State Agrarian University;

Mironov V.A. – honorary member of RAACS, Doctor of Engineering, professor, Tver State Technical University.

Ovchinnikov I.G. – member of AT, Doctor of Engineering, professor, Saratov State Technical University;

Treschev A.A. – corresponding member of RAACS, Doctor of Engineering, professor, Tula State University.

Müller W.H. – Doctor of Engineering, professor, Technical University of Berlin.

ТЕХНОЛОГИЯ ОГРАЖДЕНИЯ СТЕН КОТЛОВАНОВ С СПОЛЬЗОВАНИЕМ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ

Айгумов М.М., Клевцевич Р.А.
СГТУ, г. Саратов, Россия

В условиях современной городской застройки традиционные методы разработки котлованов с откосами не всегда возможно использовать, поэтому котлованы в этих условиях устраиваются с вертикальными стенками, с различным ограждением. При глубине разрабатываемого котлована до 4-5 м крепление стенок может быть выполнено путём погружения шпунта, труб или других профильных металлических элементов, которые работают по консольной схеме [1]. При большой глубине котлована или действии дополнительной нагрузки на бровке выемки, например, от работающей строительной техники, жёсткости металлического ограждения с консольной схемой работы не всегда хватает и верх ограждения начинает отклоняться от вертикали, что приводит к деформациям окружающей застройки, повреждению существующих дорог и подземных коммуникаций [2].

Для обеспечения устойчивости стенок при глубине котлована более 5 м, в конструкцию ограждения вводят дополнительные элементы крепления: внутренние распорные системы и анкерное крепление. Преимущества распорных систем по сравнению анкерными креплениями общеизвестны: простота устройства, низкая стоимость, не требуется специальное оборудование для установки, элементы крепления можно использовать повторно. Применение анкерного крепления ограждающих конструкций котлованов взамен распорных систем во многих случаях даёт ряд технико-экономических преимуществ. Однако дополнительные элементы распорной системы устанавливаются внутри котлована по мере его разработки, что значительно усложняет дальнейшее производство земляных работ и процессы возведения конструкций нулевого цикла.

Более прогрессивными и эффективными при разработке глубоких котлованов являются технологии ограждения стен с использованием буронабивных свай или способом «стена в грунте» [3]. При возведении подземных сооружений в открытых котлованах технология ограждения стенок разрабатываемого котлована по способу «стена в грунте» является одним из наиболее прогрессивных и универсальных. Способ «стена в грунте» может применяться в любых дисперсных грунтах и состоит из следующих основных технологических этапов: разработка траншеи под защитой глинистого раствора; установка арматурного каркаса;

заполнение траншеи монолитным или сборным железобетоном; замоноличивание стыков и устройство распорных конструкций; устройство днища внутренних конструкций.

Ограждение глубоких котлованов из буронабивных свай относится к малодеформирующимся видам крепления и его целесообразно применять в случае больших нагрузок на бровке котлована. При этом способе ограждающие конструкции (буронабивные сваи) могут быть использованы в качестве несущих конструктивных элементов подземной части строящегося сооружения.

В качестве несущих элементов ограждения глубоких котлованов из буронабивных свай применяются три разновидности свайных стен (рис. 1):

- а) с прерывистым расположением свай,
- б) с касательным сопряжением свай,
- в) из буресекущихся свай.

Свайное ограждение котлована из буресекущихся свай состоит из бетонных опережающих свай первой очереди, которые чередуются с железобетонными пересекающимися сваями второй очереди (рис. 1, в).

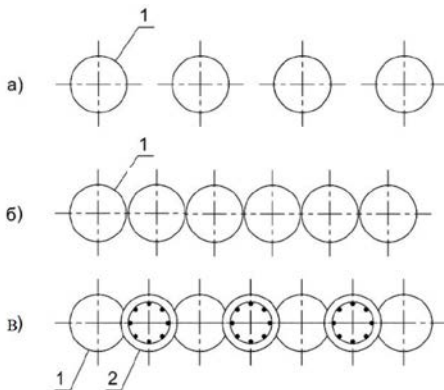


Рис. 1. Виды ограждения котлована из буронабивных свай:

1 – бетонная свая первой очереди;

2 – железобетонная пересекающаяся свая второй очереди.

На первом этапе изготавливаются бетонные опережающие сваи без арматурных каркасов. После этого забуриваются промежуточные скважины между бетонными сваями, срезая при этом часть бетона существующих свай, затем армируют скважины пересекающихся свай арматурными каркасами и производится бетонирование. Устройство буресекущихся свай позволяет создать сплошную герметичную ограж-

дающую конструкцию в грунтовом массиве вблизи существующего фундамента. Технология устройства буресекущих свай это аналог метода «стена в грунте», который предусматривает не разработку траншеи под стену, а последовательное бурение скважин под сваи на ширину стены.

Технология устройства буресекущих свай достаточно проста, не требует сваебойного оборудования и актуальна при строительстве в густонаселенных городских кварталах. При производстве работ по устройству ограждения из буронабивных свай предъявляются жёсткие требования к самому технологическому процессу. Особенно это важно при устройстве буресекущихся свай, изготовление которых требует обеспечения непрерывности процесса производства работ. По регламенту устройство секущихся армированных свай должно быть выполнено в течение 1,5-2 суток, начиная с момента выполнения бетонных неармированных свай первой очереди.

Буронабивные сваи изготавливаются по типовой технологической схеме: бурение скважины, установка арматуры, бетонирование скважины. Более совершенной и рациональной является технология проходного шнека, когда скважина заполняется бетоном в процессе бурения через отверстия в полом шнеке, а арматурный каркас погружается в уложенный бетон при помощи виброзадавливания.

Библиографический список

1. Снарский, В.И. Технологические процессы в строительстве: Учеб. пособие / В.И. Снарский, М.М. Айгумов, С.В. Снарский. – Саратов: СГТУ, 2014. – 368 с.

2. <http://psk-stroitel.ru/tekhnologii/geotekhnika.htm>

3. <http://www.new-ground.ru/vidy-rabot/ograzhdenie-kotlovanov>

ПРИЧИНЫ СВЕРХНОРМАТИВНЫХ ОСАДОК ЖИЛОГО ЗДАНИЯ, ПОСТРОЕННОГО НА ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТАХ

Айгумов М.М., Магомедов Г.Г.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Рассматриваются результаты натурного обследования ленточных фундаментов многоэтажного жилого дома и исследования грунтов основания в шурфах с определением физико-механических характеристик несущего слоя. Обследуемый жилой дом – кирпичный, четырёхэтажный, сложной формы в плане, с подвалом под частью здания. Наибольшие размеры здания в плане по наружным обмерам составля-

ют 44,8х18,2 м, общая высота здания – более 13 м, высота этажа - 3,3 м, высота подвального этажа от 2,1 до 2,4 м [1-2].

По конструктивной схеме здание имеет неполный внутренний каркас с несущими кирпичными стенами и столбами. Фундаменты под несущие кирпичные стены здания - ленточные, на естественном основании, выполнены из бутобетона и частично из керамического кирпича на известковом растворе. Фундаменты под кирпичные столбы в подвальной части здания - из монолитного бетона на естественном основании [3].

В геоморфологическом отношении площадка строительства приурочена к поверхности III надпойменной (хазарской) террасе р. Волги. Рельеф территории вокруг жилого дома спланированный с уклоном на восток и юго-восток. В геологическом строении площадки строительства на глубину до 20 м от поверхности принимают участие суглинки четвертичного возраста разной природной влажности и консистенции, которые с поверхности перекрыты насыпным грунтом современного возраста.

Обследованием грунтов основания в шурфах установлено, что под подошвой ленточных фундаментов здания залегают рыхлые светло-коричневые и зеленовато-серые суглинки твёрдой консистенции с включениями гравия опоки и карбонатов. Грунты несущего слоя по результатам лабораторных испытаний относятся к просадочным грунтам по 1 типу ($p_s = 0,18$ МПа). Под несущим слоем имеют распространение зеленовато-серые и серо-коричневые туго-мягкопластичные суглинки значительной мощности, которые имеют одинаковое геологическое происхождение и условия формирования с верхним слоем.

Библиографический список

1. Айгунов, М.М. Опыт усиления фундаментов аварийного жилого дома по улице Котовского в г. Саратове / М.М. Айгунов, Ю.Г. Иващенко // Научное обозрение, 2015. – № 11. – С. 69-74.
2. Айгунов, М.М. Обустройство подвального помещения и усиление фундаментов жилого дома при реконструкции / М.М. Айгунов, Т.Э. Байрамкулов // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе. – Саратов, 2017. – С. 250-253.
3. Айгунов, М.М. Фундаменты пристроенной части жилого дома: особенности их устройства и последствия / М.М. Айгунов, Т.Э. Байрамкулов // Сб. науч. тр. IV Международной научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе». – Саратов, 2016. – С. 228-230.

ЛЕГКИЕ СТАЛЬНЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Анпилов С.М., Гарибов Р.Б.

БИТИ НИЯУ МИФИ, г. Балаково, Россия

Социально-экономическое развитие России в современных условиях определяется эффективностью функционирования локомотивных отраслей экономики государства, в число которых входит инвестиционно-строительный комплекс. Дальнейшее развитие страны возможно за счёт широкого развития инновационного потенциала на предприятиях строительного комплекса, за счёт внедрения экологически безопасных ресурсосберегающих экономически-эффективных производств, технологий и конструкций.

Комплексная оптимизация строительного производства – это разработка проектов организации строительных процессов в эффективном взаимодействии проектных, изыскательских и строительно-монтажных фирм по согласованию принимаемых экономически-обоснованных, энергоэффективных технических, конструктивных и организационных решений.

Для строительства быстровозводимых каркасно-монолитных зданий в 2016 году введена в эксплуатацию первая очередь из двух линий промышленного высокотехнологичного производства по выпуску несущих и ограждающих конструкций для энергоэффективных экологически-безопасных сооружений на основе конкурентоспособных высоких технологий из лёгких стальных компонентов (лёгкие стальные тонкостенные конструкции – ЛСТК) на Самарском заводе лёгких металлических конструкций в г. Тольятти, производительностью по 100 000 кв. м. конструкций по площади пола в год на каждой линии.

ЛСТК изготавливаются на высокопроизводительных автоматических линиях из оцинкованного гнутого профиля швеллерного типа, С, П-образного, высотой полки 89 и 150 мм, высотой фланца 41-45 мм, толщиной 0,8-1,6 мм, а также: для устройства обшивки, обрешётка – «шляпный» профиль высотой 35, 45, 65 мм.

Для производства изделий ЛСТК используются высокопрочные конструкционные стали с нормативным пределом текучести 350, 550 МПа, первого класса цинкования – 270 г/ кв. м.

Технологию ЛСТК используют самостоятельно и в монолитном каркасном строительстве. Панели из лёгких стальных оцинкованных профилей образуют металлический каркас здания (рис. 1).



Рис. 1

Вес одного квадратного метра несущего стального каркаса находится в пределах 50 кг, а вес готового квадратного метра здания в среднем составляет 200 кг. Следовательно, такая конструкция снижает нагрузку на фундамент, позволяя строить дома практически на «любых» грунтах. Это большой «плюс» при реконструкции (в том числе и сильно ослабленных зданий), а также строительстве в условиях тесной городской застройки без применения грузоподъемной техники.

В настоящее время накопленный опыт строительства подтверждает соответствие лёгких стальных тонкостенных конструкций большинству предъявляемым нормам и требованиям к возводимым объектам. Поэтому, строительство объектов с применением ЛСТК развивается высокими темпами, так как позволяет инвесторам:

- сократить инвестиционный цикл;
- исключить затраты на проектирование и создание производственной базы;
- выполнить работы за 1 технологический цикл на строительном объекте (при сборном строительстве – это выполняется, как минимум за два цикла (завод + стройка);
- увеличить срок службы объектов до 150-300 лет;
- обеспечить высокую устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды, к землетрясениям;
- достичь высокой скорости строительства;
- разнообразить архитектурный облик объектов и обеспечить гибкость архитектурно-планировочных и объёмно-пространственных решений;
- сократить объёмы отделочных работ и «мокрых» процессов;
- снизить трудоёмкость работ на строительной площадке до 35%, при использовании индустриальных методов строительства и несъёмных опалубочных систем.

Конкурентные преимущества технологии ЛСТК:

экономическая выгода(снижение совокупных расходов на строительство и долгосрочное техобслуживание здания);

высокая скорость строительства (80 % каркасных конструкций собираются на производстве, а крупные узлы быстро монтируются на объекте);

легковесность и высокая прочность (снижение более чем в два раза веса объекта, затрат на изготовление фундамента, возможность повышения этажности существующих зданий и создания скатных крыш на них);

отсутствие ограничений и совместимость на 100 % (отсутствуют ограничения по архитектурному проектированию, полная совместимость со стандартными строительными и отделочными материалами);

комплексность поставки и установки (заказ «под ключ» включает в себя каркас, все промежуточные и отделочные покрытия и установку готовых изделий на объекте);

предсказуемые цены и сроки (стабильность цен на металл, управляемый ЭВМ производственный процесс, отсутствие задержек из-за погодных условий);

пожаробезопасность и энергоэффективность (конструкции из невоспламеняемой оцинкованной стали, испытанные сборочные узлы, высокая эффективность энергопотребления);

экологичность (безопасная для окружающей среды конструкция, производственный процесс без вредных выбросов);

чистота, безопасность и мобильность;

точность нарезки по длине профилей, в пределах 0,1 мм;

автоматически выполняются отверстия для инженерных систем (электросеть, водоснабжение);

проектируются и затем производятся отверстия для инженерных систем с учётом распределения нагрузок;

станок, пробивает отверстия под саморезы, с точностью до 0,1 мм;

вокруг отверстий, предназначенных под саморезы, производится зиговка, т. е. образуется специальное углубление. В него «заподлицо» будут покрыты стандартные шляпки от саморезов, что позволит крепить плитные материалы утеплителя без обрешётки, напрямую к несущему металлическому каркасу. Результат – экономия металла на 15-20%;

пресс станка создаёт специальные обжимы профиля в местах будущего соединения, что позволяет соединять профили вручную, без нескольких дополнительных операций;

в местах угловых соединений станок в автоматическом режиме срезает необходимые 2-е поля, что увеличивает скорость монтажа;

встроенный в станок принтер маркирует каждую деталь индивидуально, в полном соответствии с проектом и монтажной схемой. Исполнителям – монтажникам не придётся терять время на замеры и поиск нужных деталей.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ОДНОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЕГО УСИЛЕНИЮ

Барченкова Н.А., Сафронов В.С. Калгин А.Ю.

ВГТУ, г. Воронеж, Россия

В работе изучается напряжённое состояние возведённого в 1963 г. одноэтажное промышленное здание для оценки его прочности и решения вопроса о дальнейшей эксплуатации. Прямоугольное в плане здание 12×41,2 м площадью 499 м² имеет металлический несущий каркас, выполненный из семи рам в виде двух защемлённых двутавровых стоек, объединённых стропильными фермами с треугольной решёткой из спаренных равнобоких уголков 63×5 мм из стали С-345. Стойки установлены в уровне верха фундаментных блоков на неразрезную горизонтальную раму из стального прокатного швеллера № 24.

Пространственная жёсткость обеспечивается устройством горизонтальных распорок из спаренных уголков 63×5 мм, расположенных в нескольких уровнях по периметру здания.

Над всем зданием по стропильным фермам устроено покрытие из каркасных трёхслойных сэндвич-панелей с размерами 6,0×1,2 м.

Плиты покрытия опираются на шесть металлических прогонов из прокатных швеллеров № 20, прикреплённых к верхнему поясу фермы покрытия, причём 2 прогона, расположенные посередине каждого ската смещены от соответствующего узла на 0,5 м [4]. Двускатные уклоны кровли составляют 6,2°.

При обследовании указанного здания было установлено, что за время эксплуатации оно получило ряд дефектов и повреждений, наиболее заметные и важные из которых – это уменьшение толщин уголков фермы на 0,5 мм.

Для выполнения расчётов на прочность, применительно к ПВК ЛИРА-САПР 2013 была сформирована КЭ плоская модель описанной выше рамы, как основной части несущего каркаса здания. При моделиро-

вании элементов фермы и колонн использовались КЭ – тип 1 и тип 2 [1].

Для учёта неблагоприятного сочетания нагрузок были построены линии влияния продольных усилий и изгибающих моментов в стержнях фермы.

Численные расчёты были выполнены для трёх различных сочетаний постоянной нагрузки от собственного веса и временных нагрузок от снега и ветра, соответствующих району эксплуатации: 3-ий снеговой район и 1-ый ветровой район (по действующему в настоящее время СП [2]):

1 сочетание – собственный вес и полная снеговая нагрузка;

2 сочетание – собственный вес и ветровая нагрузка;

3 сочетание – собственный вес и снеговая нагрузка совместно с ветровой.

По построенным в ПВК ЛИРА-САПР эпюрам внутренним усилий выявлены наиболее нагруженные стержни верхнего пояса №14 и 26 воспринимающие усилия от прогонов в середине скатов и стержень №29 – опорный раскос в крайней панели стропильной фермы с подветренной стороны здания. В табл. 1 приведены значения внутренних усилий и моментов для наиболее нагруженных стержней.

Таблица 1

№ стержня	1 сочетание		2 сочетание		3 сочетание	
	N, кН	M, кН·м	N, кН	M, кН·м	N, кН	M, кН·м
14	- 83,40	10,20	-33,4	3,41	-83,3	10,20
26	- 83,40	10,20	-21,2	3,41	-73,1	10,20
29	- 101,69	0,07	-53,1	0,07	-117,02	0,07

Расчёт коэффициентов запаса проводился по приведённым ниже формулам:

- для сжатого стержня № 29 по формуле:

$$\sigma \leq \varphi R_y \gamma_c; \quad (1)$$

- для 14(26) стержня находящегося в состоянии продольно-поперечного изгиба:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq R_y \gamma_c; \quad (2)$$

- коэффициент запаса прочности:

$$K_{пч} = R_y \gamma_c / \sigma \quad (3)$$

где $R_y = 335$ Мпа – расчётное сопротивление для стали С-345 по СНиП 2-23-81; $\gamma_c = 0,9$ – коэффициент условий работы для сжатых и растянутых элементов ферм из спаренных уголков [3]; $\varphi = 0,211$ – коэффициент продольно-поперечного изгиба при гибкости $\lambda = 154,4$.

Для наиболее напряжённых, указанных выше стержней верхнего пояса при 3 сочетании нагрузок без учёта дефектов коэффициенты запаса для 14 стержня $K_{пч} = 1,087$, для 16 стержня $K_{пч} = 1,094$.

Также для 3 сочетания нагрузок был выполнен расчёт с учётом дефектов в виде уменьшения толщин уголков фермы на 0.5 мм. Внутренние усилия и напряжения для наиболее нагруженных стержней сведены в табл. 2.

Таблица 2

№ стержня	N, кН	M, кН·м	σ , МПа
14	-84,4	10,20	329,92
26	-78,1	10,20	328,63
29	-117,42	0,07	258,21

Коэффициенты запаса с учётом дефектов для 14 стержня $K_{пч} = 0,91$, для 16 стержня $K_{пч} = 0,92$.

По итогам выполненных численных исследований рекомендуется для обеспечения надёжной дальнейшей эксплуатации здания [5, 6, 7] усилить выявленные 2 наиболее нагруженных стержня путём увеличения их толщины.

Библиографический список

1. Городецкий, Д.А. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013: Учебное пособие / Д.А. Городецкий, М.С. Барабаш. – Киев-Москва, 2013. – 376 с.
2. СП 20.13330 2016. Нагрузки и воздействия. – М.: 2017. – 105 с.
3. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. – М.: 2011. – 173 с.
4. Барченкова, Н.А. Исследование влияния проектного решения несущей конструкции покрытия здания на её материалоемкость / Н.А. Барченкова, В.С. Сафронов, А.А. Блинова // Сборник трудов XII Международной конференции. – Воронеж 26-28 сентября 2011 г. – Воронеж, ИПЦ ВГУ, – С. 2.
5. Сафронов, В.С. Прогнозирование риска разрушения длительно эксплуатируемой железобетонной фермы покрытия здания / В.С. Сафронов, Д.Т. Чан // Строительная механика и конструкции, 2016. – Т. 2. – № 13 (13). – С. 45-54.

6. Сафронов, В. С. Вероятностная оценка риска возникновения предельных состояний в сечениях изгибаемых железобетонных балок / В.С. Сафронов, Нгуен Динь Хоа // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура, 2010. – № 1. – С 152-166.

7. Сафронов, В.С. Надёжность несущего каркаса реконструируемого производственного здания при перепрофилировании / В.С. Сафронов, Д.Т. Чан // Строительная механика и конструкции, 2018. – Вып. 1 (16). – С. 54-65.

ВЛИЯНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ТРУБОПРОВОДНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Баширзаде С.Р.

СГТУ, г. Саратов, Россия

Трубопроводные конструкции, являясь протяжёнными линейными объектами, становятся уязвимыми перед опасными природными воздействиями. Землетрясения – одни из природных угроз, которые вызывают резкие колебания грунта и наносят сильные повреждения трубопроводным конструкциям [1].

В процессе распространения сейсмоволн в трубопроводной конструкции возникают инерционные силы, которые создают дополнительную нагрузку и вызывают сильные деформации трубы (смятие, гофрообразование) [2]. Если пластические свойства материала трубы низкие, возможно появление трещин, изломов, а также разрывов, что в дальнейшем может привести к образованию вторичных техногенных аварий (выбросы химически опасных веществ, пожары, взрывы и др.) [3, 4].

В отчётах по авариям магистральных трубопроводов Ростехнадзора [5, 6], а также иностранных организаций [7, 8] процент аварий, причинами которых были землетрясения, оказывается незначительным. Однако из-за низкой степени прогнозируемости любое сейсмическое событие может нанести ущерб, который во много раз превысит ущерб от любых других геологических процессов, например, оползней или пучений.

Анализ аварийности трубопроводных систем [9] позволяет выделить следующие основные причины их возникновения:

- Распространение сейсмической волны вдоль трубопровода, деформации грунтового массива. Рядом с эпицентром землетрясения, где амплитуда смещения грунта в сейсмической волне достаточно велика

возникают сильные напряжения сжатия или растяжения, приводящие к деформации и разрушению конструкции.

- Возникновение осевых удлинений или укорочений некоторых частей трубопровода, вызванных различными деформациями соседних участков трассы, находящихся в грунтах, у которых динамические свойства различны.

- Деформации от изгиба, изломы, срезы трубопроводов; осевые деформации в местах соединения отдельных участков трубопроводов между собой, присоединения трубопроводов к различному оборудованию или трубопроводам другого диаметра или направления.

- Вертикальные перемещения появляются на трубопроводах с нежёсткими стыками и на вертикальных участках трубопроводов, которые присоединены к горизонтальным просевшим участкам.

В дальнейшем представляет интерес разработка моделей динамического поведения различных участков трубопроводов в сейсмически активных зонах, при различных видах сейсмических воздействий, что позволит прогнозировать наступление аварийных ситуаций и разрабатывать мероприятия, препятствующие их наступлению или смягчающие последствия их наступления.

Заметим, что пересечение трубопроводами зон активных тектонических разломов в приведённом анализе не рассматривается.

Библиографический список

1. Гумеров, Р.А. Оценка влияния поперечных нагрузок на подземный трубопровод при сейсмическом воздействии / Р.А. Гумеров, В. И. Ларионов, С.П. Суцев // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4(106). – С. 146–155.

2. Напетваридзе, Ш. Г. Сейсмостойкость магистральных трубопроводов и специальных сооружений нефтяной и газовой промышленности / Ш.Г. Напетваридзе, А.С. Гехман [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 170 с.

3. Александров, А.А. Методы анализа сейсмического риска с учётом вторичных техногенных аварий на объектах нефтегазового комплекса / А.А. Александров, В.И. Ларионов, Р.А. Гумеров // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов / ИПТЭР. – Уфа, 2014. – № 4 (98). – С. 165-175.

4. Александров, А.А. Оценка сейсмостойкости магистральных нефтепроводов [Текст] / А.А. Александров, В.А. Котляревский, В.Ч. Кушнарев [и др.] // Энциклопедия безопасности. Строительство, промышленность, экология: в 3 т. Т. 3: Сейсмостойкость и теплозащита

сооружений / В.А. Котляревский, В.И. Ларионов, С.П. Суцев. – М.: АСВ, 2010. – С. 132-164.

5. Интернет-сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). – Режим доступа: <http://www.gosnadzor.ru/>; дата обр. 01.04-07.04.2018.

6. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2015 [Текст] / Ростехнадзор; НТЦ «Промышленная безопасность». – М., 2015. – Вып. 5 (80) – 96 с.

7. Интернет-сайт Европейской группы по сбору данных об авариях на газопроводах EGIG (EuropeanGasPipelineIncidentDataGroup). – Режим доступа: www.eggi.nl; дата обр. 04.04–07.04.2018.

8. Girgin S., Krausmann E. Analysis of pipeline accidents induced by natural hazards: Final Report: 2014 [On-line]. European Commission. Joint Research Centre. Institute for the Protection and Security of the Citizen. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. – 72 pp. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/259849584_Analysis_of_pipeline_accidents_induced_by_natural_hazards_Final_Report; дата обр. 05.04–07.04.2018.

9. Овчинников, И.Г. Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций в сложных грунтово-геологических условиях. Часть 1. Обобщенная модель деформирования трубопровода / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, С.Р. Баширзаде // Интернет-журнал «Науковедение», 2016. – Т. 8. – № 4. – <http://naukovedenie.ru/PDF/60TVN416.pdf> (доступ свободный).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС КОМПОЗИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ С УЧЕТОМ КИНЕТИКИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Башкатов А.В., Теличко В.Г.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Проблема обеспечения долговечности и безопасности сооружений при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов промышленных предприятий и транспортных сетей является одной из важнейших сторон деятельности научно-исследовательских и проектных организаций всего мира. Между тем, анализ известных определяющих соотношений для разносопротивляющихся материалов, эксплуатируемых в агрессивных средах, приводит к выводу, что подавляющее большинство из них имеют существенные недостатки, не позволяющие учесть важные особенности их деформирования. Кроме того, на сего-

дняшний день существует весьма ограниченное количество математических моделей, которые позволяли бы достаточно просто и эффективно прогнозировать результат длительного воздействия агрессивных эксплуатационных сред на конструктивные элементы сооружений и имели бы при этом, доступную для реализации на ЭВМ форму.

В связи с выше отмеченным, авторы доклада ставили перед собой задачу разработки универсальной математической модели деформирования слоистых армированных плит из нелинейных разнородных композитных материалов с учётом кинетики агрессивных сред, а также, по разработке и реализации алгоритмов расчёта конструкций по деформированной схеме с учётом чувствительности к виду напряжённого состояния и физической нелинейности материала в условиях воздействия внешней агрессивной среды.

Решать эффективно подобного рода задачи на ЭВМ позволяет метод конечных элементов, в частности, с использованием гибридной формулировки [1]. Однако, применение разработанных Р. Куком [1] конечных элементов, непосредственно к расчёту железобетонных пространственных конструкций может приводить к некорректным результатам. Поэтому, использовалась, разработанная авторами, особая модификация гибридного конечного элемента треугольной формы с пятью степенями свободы в узле [3].

Наиболее полно и адекватно поведение современных разнородных материалов описано в работах Н.М. Матченко, А.А. Трещёва, что позволило принять указанную теорию в качестве базовой для решаемой научной задачи. Для учёта влияния агрессивной эксплуатационной среды на защитный полимербетонный слой, использована функция деградации материала и закон проникновения агрессивной среды, предложенные в работе [2]. Специально для конечного элемента [3] построена модель фиктивного слоя, описывающая деформирования защитного полимербетонного слоя [4].

Численный анализ разработанной модели проводился на примере расчёта напряжённо-деформированного состояния железобетонных плит. В качестве основы приняты железобетонные плиты, прошедшие глубокое экспериментальное исследование в опытах О. Bach и О. Graf, W. Gehler и Н. Amos. Предложенные плиты были модифицированы добавлением в сжатую зону плит защитного слоя из тяжёлого полимербетона, который в рамках предложенной задачи воспринимает внешнее воздействие сред [3, 4].

Модуль упругости арматурной стали был принят равным $E_s = 2 \times 10^5$ МПа. Полимербетонный слой принят из эпоксидного бетона, начальный модуль упругости которого на основании нормативной литературы равен $E_b = 3,2 \times 10^5$ МПа. Агрессивная среда – 20% раствор NaCl, с плотностью $\rho = 1,219 \text{ г/см}^3$. Константы потенциала [4] для материала плит приняты в соответствии с работами Трещёва А.А. для бетона $R^- = 28,4$ МПа.

Граничные условия для плит принимались следующие в соответствии с принятыми в работе [4] обозначениями. Для плиты № 1 (плита № 711): $w_i = 0$ в узлах по осям OX и OY; для плит № 2, № 3, № 4 (плиты № 825, № 844, № 863): в угловых точках разрешены все перемещения, в других точках: 1) по сторонам параллельным оси OX $w_i = 0, \psi_{1i} = 0$, 2) по сторонам параллельным оси OY $w_i = 0, \psi_{2i} = 0$.

Проведённые исследования показывают наличие количественных эффектов, связанных с учётом разносопротивляемости материалов, деградации слоя защитного материала под воздействием агрессивной эксплуатационной среды и повреждаемости несущих слоёв в форме трещинообразования. Показано, что по мере увеличения концентрации агрессивной среды в полимербетонном слое, происходит перераспределение напряжений и деформаций. В частности, увеличение прогибов плиты до образования трещин, доходит до 17%, а после образования трещин и увеличения периода воздействия агрессивной эксплуатационной среды достигает 35%. Рост максимальных напряжений в железобетоне составляет до 20% при сроке влияния среды до 12 месяцев, при сроке 24 месяца и более, рост напряжений достигает 48%, а значение моментов, воспринимаемых плитой, уменьшается на 25-28%. Результаты работы показывают, что по мере повреждения слоя защитного материала происходит ускорение процесса трещинообразования и увеличение величины трещин по толщине рассматриваемых плит.

Библиографический список

1. Cook, R.D. Two hybrid elements for analysis of thick thin and sandwich plates / R.D. Cook // Int. J. num. Meth. Engng. – 1972. – Vol. 5. – P. 277-288.
2. Пенина, О.В. Расчет плит из нелинейно-деформируемого материала с произвольной диаграммой деформирования с учетом воздействия агрессивной эксплуатационной среды / О.В. Пенина, В.В. Петров, П.В. Селяев // Academia. 2008. – №3. – С. 87-92.

3. Теличко, В.Г. Гибридный конечный элемент для расчета плит и оболочек с усложненными свойствами / В.Г. Теличко, А.А. Трещёв. // Известия вузов. Строительство, 2003. – № 5. – С. 17-23.

4. Трещёв, А.А. Построение математической модели деформирования комплексной железобетонной плиты с полимербетонным слоем под действием агрессивной среды / А.А. Трещёв, В.Г. Теличко, А.В. Башкатов // Вестник МГСУ, 2014. – № 3. – С. 126-132.

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ ОПТИМАЛЬНОЙ ГРАНУЛОМЕТРИИ

Белов В.В., Смирнов М.А.

ТверьГТУ, г. Тверь, Россия

Формирование оптимальной макроструктуры минеральной части сыпучих смесей является фундаментальной научной базой для разработки новых более совершенных методов проектирования сухих строительных смесей оптимального состава, обеспечивающих возможность получения экстремально выраженных показателей физико-механических свойств [1].

Установленные закономерности проверялись на сухих строительных смесях, выпускаемых ОАО КСК «Ржевский». Наиболее эффективным с точки зрения технологии и затрат на просеивание является разделение песка на фракции с размерами частиц: 0-0,5 мм; 0,5-1,25 мм; 1,25-3,2 мм. Рассев песка, применяемого на данном предприятии, на указанные три фракции показал, что их содержание составляет соответственно 30, 46, 24 % (контрольный состав). Для нахождения оптимальной гранулометрии заполнителя определяли область соотношений фракций песка, обеспечивающих наиболее плотную упаковку частиц заполнителя, при этом критерием плотной упаковки служило максимальное значение насыпной плотности заполнителя. Эта методика позволила наметить составы смесей, соответствующие их оптимальной гранулометрии, а именно: 30% фракции 0-0,5 мм, 20% фракции 0,5-1,25 мм, 50 % фракции 1,25-3,2 мм (опытный состав). Далее изготавливались образцы-кубы с размером ребра 70 мм из цементно-песчаной смеси (1:4,5) нормальной консистенции на песке контрольного и оптимального гранулометрического составов и определялась прочность при сжатии в возрасте 3 и 28 суток (таблица).

Применение оптимальной гранулометрии позволило повысить предел прочности при сжатии цементно-песчаной смеси в среднем на 18 % по сравнению с применением песка контрольного гранулометрического

состава. Существенные различия в структуре цементно-песчаного раствора с наполнителем контрольного и оптимального составов подтверждаются результатами электронно-микроскопического исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа Cam Scan 4. За счет использования наполнителя оптимального состава структура материала становится более плотной, образующиеся агрегаты равномерно распределены по объёму материала.

Одним из способов улучшения физико-механических свойств композиционных материалов, в том числе сухих строительных смесей, является наполнение матрицы цементного вяжущего высокодисперсными минеральными частицами различной природы и фракционного состава. В качестве минеральных наполнителей смесей могут быть использованы как местные сырьевые ресурсы, например, измельчённый кварцевый песок, так и техногенные отходы необходимой дисперсности, что, безусловно, эффективнее.

Для определения оптимального содержания тонкомолотого минерального компонента составляли полидисперсные системы на основе песка оптимальной гранулометрии. Оптимальное количество наполнителя 6 %, при этом наблюдается максимум насыпной плотности, что говорит о достижении такого состояния, при котором частицы дисперсной части (тонкомолотый компонент) располагаются между частицами зернистой части, не раздвигая их. При дальнейшем увеличении количества дисперсной части происходит резкое снижение насыпной плотности системы, что говорит о существенной роли поверхностных сил в закономерностях упаковки дисперсных систем.

Усиление указанного выше эффекта упрочнения контактных зон при оптимальной концентрации тонкодисперсного наполнителя может быть обеспечено за счёт перераспределения баланса внутренних сил в системе с помощью полимерных добавок, вводимых с целью улучшения адгезии, деформативности, водонепроницаемости и других свойств в современные сухие строительные смеси. В качестве полимерной добавки к растворным и бетонным смесям может использоваться поливиниловый спирт (ПВС), выпускаемый отечественной промышленностью в гранулированном состоянии. В данной работе сухой поливиниловый спирт использовался по запатентованному способу [2] совместно с тонкомолотым минеральным компонентом в оптимальной концентрации.

При увеличении концентрации добавки ПВС до 0,5 % от массы цемента происходит увеличение прочности цементно-песчаного раствора по сравнению с бездобавочным раствором. Прирост предела прочности

при сжатии при оптимальной концентрации добавки ПВС составляет около 6 МПа или 22 % от прочности бездобавочного раствора. При этом наблюдаются минимальное значение открытой капиллярной пористости (9 %) и максимальное значение морозостойкости (190 циклов), что больше на 73 % по сравнению с контрольной смесью.

Таким образом, эффективными способами модификации сухих цементно-песчаных смесей с целью управления их физико-механическими характеристиками и существенного улучшения эксплуатационных свойств являются использование заполнителя оптимальной гранулометрии, а также введение в состав смесей добавки поливинилового спирта и тонкомолотого минерального компонента в оптимальных концентрациях, определяемых по специальным методикам.

Библиографический список

1. Белов, В.В. Компьютерное моделирование и оптимизирование составов композиционных строительных материалов / В.В. Белов, А.Н. Бобрышев, В.Т. Ерофеев и др. – М: Изд-во АСВ, 2015. – 264 с.
2. Патент РФ № 2302398 «Сухая строительная смесь» / Белов В.В., Смирнов М.А.; заявитель и патентообладатель Тверской гос. техн. ун-т; приоритет 5.04.2004 г.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ ОБЛИЦОВОЧНОГО КИРПИЧА ОТ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ

Божко Ю.А.

ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Прочностью называется свойство материалов сопротивляться разрушению под действием определённой нагрузки. Предел прочности представляет собой максимальную нагрузку, которую способен выдержать испытуемый образец. Базовое правило «при увеличении плотности материала увеличивается и прочность» не всегда применимо для стеновых керамических материалов [1-2]. Степень уплотнения пресс-порошка в основном зависит от влажности и давления прессования, что в дальнейшем сказывается на прочности готовых изделий. Температура обжига для всех образцов составила 1000 °С, а зерновой состав характеризовался размером зерна не более 1 мм.

На основании проведённых испытаний образцов на основе кремнистых опоковидных пород установлен ряд закономерностей:

– даже при малом давлении прессования изделия на основе опоковидного сырья обладают хорошими прочностными показателями для стеновой керамики;

– при увеличении давления прессования образцов небольшой влажности практически равномерно возрастает и их прочность. Данная зависимость обусловлена сокращением расстояния между частицами пресс-порошка и возрастанием площади соприкасающихся частиц [3];

– если влажность в испытуемых образцах повышена, то при определённом прессовочном давлении, их прочность почти не увеличивается;

– наибольшую прочность образцов удаётся получить при высоком давлении прессования и низкой влажности. Негативным последствием таких условий являются перепрессовочные трещины, зависящие от упругого расширения и появляющиеся после обжига изделий;

– образцы на основе карбонатных опок обладают минимально необходимыми значениями прочности при изгибе, в некоторых случаях даже превосходя их. Данная закономерность напрямую связана с минералогическими преобразованиями при обжиге изделий. Для стандартного полнотелого кирпича на основе карбонатных опоковидных опок определяется пределом прочности на сжатие;

– выявлена закономерность, при которой образцы с зерновым составом 0-0,25 мм имеют прочностные характеристики в 1,5-2 раза выше, чем те, которые имеют зерновой состав 0-2 мм. Похожие зависимости присущи и другим литологическим разновидностям опок, что является вполне закономерным условием, потому что дисперсность материалов является одним из главных факторов спекания.

На основании данных лабораторных испытаний, можно сделать вывод, что облицовочный кирпич на основе карбонатных опоковидных пород может иметь достаточную прочность даже при высокой влажности пресс-порошка и низком давлении прессования [4]. Таким образом, можно говорить о том, что опоки является перспективным сырьём для производства лицевого кирпича. Ввиду широкой распространённости залегания опок на Юге России и в Поволжье, себестоимость готовых изделий значительно сокращается.

Библиографический список

1. Котляр, В.Д. Особенности прессования керамических порошков на основе опок при производстве стеновой керамики / В.Д. Котляр // Строительные материалы. – 2009. – № 12. – С. 28-32.

2. Божко, Ю.А. Особенности спекаемости опоковидных пород при производстве изделий стеновой керамики / Ю.А. Божко, К.А. Лапунова

// Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – №1. – С. 65-73.

3. Горшков, В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, Н.Ф. Фёдоров // – М.: «ВШ», 1988. – 400 с.

4. Котляр, В.Д. Классификация кремнистых опоковидных пород как сырья для производства стеновой керамики / В.Д. Котляр // Строительные материалы. – 2009. – № 3. – С. 36–39.

О ВОДОРОДНОМ ПОКАЗАТЕЛЕ КОНСТРУКЦИОННОГО ФИБРОПЕНОБЕТОНА

Вотрин Д.А.

ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Вопрос о долговечности фибропенобетонных и фибропеножелезобетонных изделий является насущным в настоящее время. Глубокое исследование долговечности и прочности данного материала и сооружений из него актуально в связи с повышением предъявляемых требований к строительным материалам [1], недостаточностью сведений о долгосрочной работе и состоянии дисперсной арматуры в теле бетона [2], а также расширением областей применения материалов в строительстве.

Как показывают научные источники [3, 4, 5, 6, 7, 8], одним из факторов, косвенно связанных с долговечностью армированных газонаполненных бетонов является водородный показатель (рН). Изучение водородного показателя фибропенобетона и фибропеножелезобетона необходимо для определения: возможности коррозии металлической арматуры;

Коррозия стальной арматуры в фибропеножелезобетоне является одной из важных проблем, с которой сталкиваются исследователи сегодня при попытке поддерживать конструкции в работоспособном состоянии [4]. Условием продолжительной работы в теле бетона является щелочная среда, которая предотвращает коррозию металла путём формирования тонкого слоя из оксида железа на поверхности. Эта защита известна под названием пассивность. Слой пассивного оксида железа разрушается, когда рН опускается ниже 11, а ниже рН 7 начинается деструкция бетона [3]. Исходя из этого, важно знать водородный показатель на начальном этапе приготовления смеси и на более поздних этапах эксплуатации для оценки карбонизации и влияния окружающей среды.

Анализ научной литературы показал [5, 6], что величина рН среды в которую помещена фибра, важна для понимания возможности сохра-

нения целостности структуры волокна в процессе эксплуатации. Некоторые виды широко используемой фибры (полиэфирное, стекловолоконно и т.д.) разрушаются в высоко концентрированных щелочах, что при длительном воздействии может повлиять на прочность и способность сопротивления нагрузкам. Так к примеру, следует отметить, что на базе предприятия ООО “Си-Айрлайд” были проведены исследования показавшие, что полиэфирные волокна, содержащиеся в растворе NaOH в течение 4 суток, уменьшились в массе на 16%.

Из научных источников известно [7, 8], что электрокинетический потенциал волокон нелинейно зависит от pH среды. Данный параметр важен, поскольку ξ -потенциал фибры является одним из факторов, влияющих на скорость начального структурообразования фибропеносмеси [9] и соответственно на конечную прочность фибропенобетона. Поэтому, значения водородного показателя важно знать для точного определения величины из научной литературы.

Стоит отметить, что, не смотря на существующие научные работы, посвящённые pH тяжёлых бетонов, исследования касающиеся изучения водородных показателей фибропенобетонов не проводились. Исходя из этого, были проведены эксперименты в которых определялось значение pH свежеприготовленной смеси фибропенобетона ($\rho_{\text{ср}}=900 \text{ кг/м}^3$) сдобавлением ПАВ 0,2; 0,3 и 0,4% от массы смеси и полипропиленового волокна. Была установлена кинетика водородного показателя водной вытяжки из середины образца фибропенобетона (возраст 2 месяца) при изменении температуры от 20-30°C. Также, был определён pH поверхности эксплуатируемого изделия из фибропенобетона возрастом 15 лет.

Для определения pH использовалась универсальная индикаторная бумага, а также pH-метр.

Данные показали, что все представленные фибропеносмеси имеют $\text{pH} > 12$ (рис. 1).



Рис. 1. Проверка pH фибропенобетонной смеси с помощью индикаторной полоски

Более детальное изучение установило, что образцы содержанием ПАВ 0,2, 0,3 и 0,4% от массы смеси имеют рН среды 12,85, 12,8 и 12,78, соответственно. Это говорит о том, что содержание ПАВ не значительно влияет на рН, однако среда является достаточной для обеспечения пассивности стальной арматуры.

Определение водного показателя поверхности образца возрастом 15 лет показал наименьшее значение -10,7. Это говорит о процессах карбонизации в результате реакции с углекислым газом в окружающей среде. Однако исследования рН на нижних слоях образца не проводились, поэтому остаётся неизвестным глубина проникновения карбонизации. Данные результаты схожи с показаниями рН тяжёлого бетона схожего возраста [10].

Изучение кинетики рН от температуры показало, что с нагреванием водной вытяжки 20-30 С°, водный показатель наоборот уменьшается (12,77-12,59). Это коррелируется с исследованиями тяжёлого бетона [11], где раствор Ca(OH)₂ нагревали от 0 до 60 С°, при этом значения рН падали от 13.423 до 11.449.

В итоге, на основании проведённых исследований было установлено, что фибропенобетон по показаниям рН не отличается от тяжёлого бетона и обладают достаточно концентрированной щелочной средой для защиты арматурных стержней.

Библиографический список

1. Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности».
2. Muhammad H.A. Durability Properties of Foamed Concrete with Fiber Inclusion// International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering, 2014. – Vol. 8, –No 3. – P. 269-272.
3. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты /В.М. Москвин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
4. Ступень, И.С. Прогнозирование долговечности бетона по данным количественного определения хлорид-ионов / И.С. Ступень // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі, 2014. – № 1. – С. 5-9.
5. Qin Xiaochun. The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement // Corrosion mechanism and performance analysis International Journal of Pavement Research and Technology, 2017. – P. 536-544.

6. Кнунянц, И. Л. Химическая энциклопедия / И.Л. Кнунянц, Н.С. Зефиоров. – Т. 3. – 1989. – 458 с.
7. Roy, S. Study the effect of denier and fiber cutlength on zeta potential of nylonand polyester fibers for sustainable dyeing process / S. Roy. S. Ghosh // Journal of Environmental Research And Development. – Vol. 11. – No. 02. – P. 392-397.
8. Bellmann, C. Caspari A., Loan Doan T. T., Mäder E. Electrokinetic Properties of Natural Fibres / C. Bellmann, A. Caspari, T.T. Loan Doan, E. Mäder // Polymer Research, 2004. – P. 23-37.
9. Моргун, Л.В. Структурообразование и свойства фибропенбетон-ов неавтоклавногo твердения: Теория и методология рецептурно-технологического регулирования: дисс. докт. техн. наук: 05.23.05. – Ростов-на-Дону. 2005. – 336 с.
10. Jennifer, A. Grubb. Testing pH of Concrete / Jennifer A. Grubb, He- mant S. Limaye // Concrete international, 2007. – P. 78-83.
11. Bates, R.G., Determination of pH-Theory and Practice, 2nd Edition. – John Wiley & Sons: New York, 1973. – 479 pp.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ ДЛЯ БЕТОНА ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ ОБЛУЧЕНИЯ

Гарибов Р.Б.

БИТИ НИЯУ МИФИ, г. Балаково, Россия

Для использования модели армированного материала (железобетона) нужно определить функцию $\psi_j^{\bar{\sigma}}$ (1) для бетона, функцию ψ^a (2) для арматуры:

$$\psi_j^{\bar{\sigma}} = \frac{\sigma_{ij}^{\bar{\sigma}}(e_u, \Phi)}{e_u}, j = 1, 2 \quad (1)$$

$$\psi^a(e, \Phi) = a(\Phi) \cdot e^{m(\Phi)-1} \quad \text{или} \quad \psi^a = \begin{cases} E^a(\Phi), & \sigma^a < \sigma_T^a \\ 0, & \sigma^a > \sigma_T^a \end{cases} \quad (2)$$

Так как функция $\psi_j^{\bar{\sigma}}$ может быть принята в виде (3), то для нахождения коэффициентов этой функции можно использовать методику рассмотренную выше для фибробетона:

$$\psi_j^{\bar{\sigma}} = \begin{cases} (A_j - B_j e_u^2), & \Phi < \Phi_{1нор} \\ (A_j(\Phi) - B_j(\Phi) e_u^2), & \Phi \geq \Phi_{1нор} \end{cases} \quad (3)$$

где $A_j(\Phi) = A_{j0}(1 - \alpha_{j1}(\lg \beta_{j1} \cdot \Phi))$, $B_j(\Phi) = B_{j0}(1 - \alpha_{j1}(\lg \beta_{j1} \cdot \Phi))$.

Методика нахождения коэффициентов функции ψ^a при задании этой функции в виде (4) или (5) аналогична рассмотренной выше.

$$\psi^a(e, \Phi) = a(\Phi) \cdot e^{m(\Phi)-1} \quad \text{или} \quad \psi^a = \begin{cases} E^a(\Phi), & \sigma^a < \sigma_T^a \\ 0, & \sigma^a > \sigma_T^a \end{cases} \quad (4)$$

$$\varepsilon_\Phi^a = \begin{cases} 0, & \Phi < \Phi_{2нор} \\ \delta \cdot \varepsilon_{\max} \left[\exp(\nu \cdot (\Phi - \Phi_{2нор})) - 1 \right] / \left[\varepsilon_{\max} + \delta \exp(\nu \cdot (\Phi - \Phi_{2нор})) \right], & \Phi \geq \Phi_{2нор} \end{cases} \quad (5)$$

Для иллюстрации методики определения зависимости коэффициентов A , B , E в выражениях (5) и (6) от флюенса используем несколько преобразованные экспериментальные данные по влиянию флюенса на характер кривой деформирования бетона при сжатии заимствованного из [1, 2, 3].

$$\sigma = \begin{cases} A_1^{\phi\delta}(\Phi) \cdot e - B_1^{\phi\delta}(\Phi) \cdot e^n, & \sigma \geq 0 \\ A_2^{\phi\delta}(\Phi) \cdot e - B_2^{\phi\delta}(\Phi) \cdot e^n, & \sigma < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi_j^\sigma = \begin{cases} E_j^\sigma, & \Phi < \Phi_{1нор} \\ E_j^\sigma(\Phi), & \Phi \geq \Phi_{1нор} \end{cases}, \quad j = 1 \text{ при } \sigma_0^\sigma \geq 0, j = 2 \text{ при } \sigma_0^\sigma \leq 0, \quad (7)$$

где E_j - модуль упругости фибробетона при растяжении $E_1^{\phi\delta}(\Phi)$ и при сжатии $E_2^{\phi\delta}(\Phi)$.

Значения коэффициентов для разных величин флюенса, определённые с использованием выше описанной методики приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Коэффициенты моделей для разных величин флюенса

Φ , нейтрон/см ²	A_2 , кг/см ²	B_2 , кг/см ²	E_2 , кг/см ²
$4,03 \times 10^{17}$	$6,14 \times 10^5$	$1,6 \times 10^8$	$5,68 \times 10^5$
$1,46 \times 10^{18}$	$5,7 \times 10^5$	$1,76 \times 10^8$	$5,03 \times 10^5$
$5,38 \times 10^{18}$	$5,01 \times 10^5$	$1,61 \times 10^8$	$4,38 \times 10^5$
$1,98 \times 10^{19}$	$4,3 \times 10^5$	$1,52 \times 10^8$	$3,68 \times 10^5$
$7,3 \times 10^{19}$	$3,6 \times 10^5$	$1,22 \times 10^8$	$3,07 \times 10^5$
$2,6 \times 10^{20}$	$2,9 \times 10^5$	$1,05 \times 10^8$	$2,41 \times 10^5$
10^{21}	$2,3 \times 10^5$	$1,03 \times 10^8$	$1,76 \times 10^5$

На рис. 1 приведены нелинейные и линейные кривые деформирования бетона при сжатии при разных уровнях облучения.

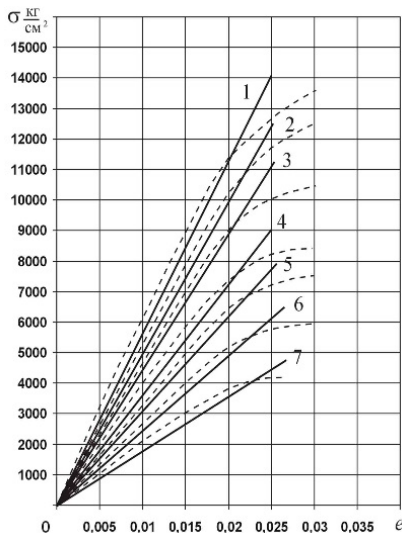


Рис. 1. Кривые деформирования бетона при разных уровнях облучения (величине флюенса Φ , нейтрон/см²):

- 1) $\Phi = 4,03 \times 10^{17}$; 2) $\Phi = 1,46 \times 10^{18}$; 3) $\Phi = 5,38 \times 10^{18}$;
 4) $\Phi = 1,98 \times 10^{19}$; 5) $\Phi = 7,3 \times 10^{19}$; 6) $\Phi = 2,6 \times 10^{20}$; 7) $\Phi = 10^{21}$.

На рис. 2, 3 и 4 точками показаны найденные значения коэффициентов A_2 , B_2 , E_2 для указанных семи уровней облучения, а линиями графики функций, аппроксимирующие зависимости $A(\Phi)$, $B(\Phi)$, $E(\Phi)$.

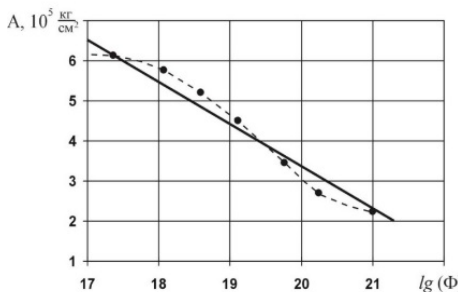


Рис. 2. Значения коэффициента A для различных величин флюенса (из табл. 1)

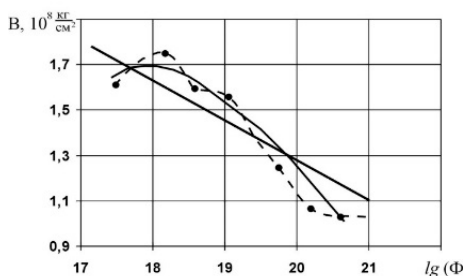


Рис. 3. Значения коэффициента B для различных величин флюенса (из табл. 1)

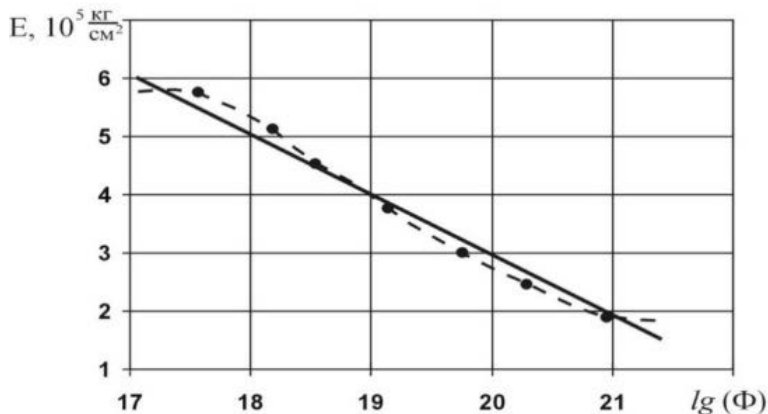


Рис. 4. Значения коэффициента E для различных величин флюенса (величины флюенса приведены в табл. 1)

В диссертации [2] использовалась следующие зависимости:

$$\begin{aligned} A &= A_0 - A_1(\lg \Phi) \\ B &= B_0 - B_1(\lg \Phi) - B_2(\lg \Phi)^2 \\ E &= E_0 - E_1(\lg \Phi) \end{aligned} \quad (8)$$

Таблица 2. Значения коэффициентов зависимости

Коэффициенты	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$
$A_k, \text{кг/см}^2$	$6,1 \times 10^6$	$4,4 \times 10^6$	0
$B_k, \text{кг/см}^2$	$1,6 \times 10^9$	$-1,1 \times 10^9$	$-2,52 \times 10^5$
$E_k, \text{кг/см}^2$	$6,13 \times 10^6$	$4,5 \times 10^6$	0

Библиографический список

1. Андреев, В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел: Монография /В.И. Андреев. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 288с.
2. Дубровский, А.В. Исследование напряжённо-деформированного состояния строительных конструкций, находящихся под воздействием ионизирующих излучений. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – 1986. – 21 с.
3. Дубровский, В.Б., Аблевич З. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующего излучения / В.Б. Дубровский, З. Аблевич. – М.: Стойиздат. 1983. – 240 с.

ЗАРОЖДЕНИЕ ТРЕЩИНЫ В ПОКРЫТИИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Гасанов Ш.Г.

АТУ, г. Баку, Азербайджан

Анализ современного состояния покрытий выявил, что материалам покрытия свойственны трещиновидные несплошности. В сечениях покрытия могут образовываться переходные зоны, в которых физико-механические свойства материала отличаются от свойств основного покрытия. Эти повреждения в сечении покрытия могут иметь как естественное происхождение (расслоение, включения, поры), так и вызываться технологическими процессами. Опытные данные практики эксплуатации пары «покрытие – упругое основание» убедительно показывают, что на стадии проектирования необходимо принимать во внимание случаи, когда в покрытии могут возникать трещины. Существующие методы прочностного расчёта пар «покрытие – упругое основание» игнорируют это обстоятельство. В связи с этим необходимо осуществлять предельный анализ пары «покрытие – упругое основание», чтобы установить, предельные нагрузки, при которых происходит трещинообразование в покрытии. Размер предельной минимальной зоны предразрушения, при которой происходит появление трещины, следует рассматривать как проектную характеристику материала покрытия.

Рассмотрим задачу механики разрушения для двухслойного тела, когда к наружной поверхности покрытия приложена нормальная нагрузка. Остальная поверхность покрытия считается ненагруженной. Принято, что в материале покрытия после многократного нагружения появляется концентратор напряжений (область ослабленных межчастичных связей материала). При нагружении внешней нагрузки в прослойке перенапряжённого материала образуется зона пластического течения. Пусть для определённости силовая нагрузка изменяется так, что в области ослабленных межчастичных связей материала осуществляется пластическое деформирование. Через некоторое число нагружений возможность пластического деформирования в области ослабленных межчастичных связей материала исчерпывается, и раскрытие берегов зоны пластического течения резко увеличивается. Если раскрытие берегов зоны предразрушения в точке максимальной концентрации достигнет предельного значения δ_c для данного материала покрытия, то в этой точке зарождается трещина. В предлагаемой расчётной модели

удлинение зародышевой трещины происходит непрерывно от нулевой длины.

Задача моделирования процессов образования и развития трещины редуцируется к последовательно решаемым упругопластическим задачам.

По мере нагружения покрытия в материале будут возникать зоны предразрушения, которые моделируются как области ослабленных межчастичных связей материала. Взаимодействие берегов зоны предразрушения моделируется линиями пластического течения между ними (вырожденными зонами пластических деформаций). Размеры зоны предразрушения заранее неизвестны и подлежат определению.

Твёрдое деформируемое тело (покрытие) деформируемое за пределом упругости представляется как тело, деформируемое упруго всюду, кроме некоторых поверхностей зон предразрушения. Так эти зоны (прослойки перенапряжённого материала) малы по сравнению с остальной упругой частью покрытия, их можно мысленно удалить, заменив разрезами, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удалённого материала. Таким образом, задача о деформации покрытия на упругом основании за пределами упругости сводится к задаче о деформации некоторого упругого тела, имеющего условные разрезы. Силы, действующие по поверхностям этих зон, называются силами ослабленных связей, а зоны, в которых они появляются, зонами предразрушения или областями ослабленных связей.

Считается, что зоны предразрушения ориентированы в направлении действия максимальных растягивающих напряжений, возникающих в покрытии. Будем считать, что в сечении покрытия имеется N прямолинейных зон предразрушения длиной $2l_k$ ($k = 1, 2, \dots, N$). В центрах зон предразрушения разместим начало локальных систем координат $x_k O_k y_k$, оси x_k которых совпадают с линиями зон предразрушения и образуют углы α_k с осью абсцисс.

Взаимодействие берегов зоны предразрушения (связи между берегами) сдерживает зарождение трещины. При действии внешней силовой нагрузки P на поверхности покрытия в связях, соединяющих берега зон предразрушения, возникают нормальные $q_{y_k} = \sigma_S$ и касательные $q_{x_k y_k} = \tau_S$ напряжения, где σ_S – предел текучести материала покрытия на растяжение; τ_S – предел текучести материала покрытия на сдвиг.

Граничные условия задачи запишутся в виде (верхний индекс 1 соответствует покрытию, верхний индекс 2 – полуплоскости):

$$\text{при } y = 0 \quad \sigma_y^{(1)} = -P\delta(x), \quad \tau_{xy}^{(1)} = 0, \quad (1)$$

$$\text{при } y = -h \quad u^{(1)} + iv^{(1)} = u^{(2)} + iv^{(2)}, \quad (2)$$

$$\sigma_y^{(1)} + i\tau_{xy}^{(1)} = \sigma_y^{(2)} + i\tau_{xy}^{(2)},$$

$$\sigma_{y_k} = \sigma_S, \quad \tau_{x_k y_k} = \tau_S \quad \text{на берегах зон предразрушения}, \quad (3)$$

где $\delta(x)$ – импульсная функция Дирака, σ_x , σ_y , τ_{xy} – компоненты тензора напряжений; h – толщина покрытия; u , v – компоненты вектора перемещений; при $y \rightarrow \infty$ перемещения и напряжения исчезают.

Для определения внешней нагрузки, при которой происходит зарождение трещины, постановку задачи нужно дополнить условием появления трещины. В качестве такого условия примем критерий критического раскрытия берегов зоны предразрушения

$$\left| (v^+ - v^-) - i(u^+ - u^-) \right| = \delta_c. \quad (4)$$

где δ_c – характеристика сопротивления материала покрытия трещинообразованию.

Это дополнительное условие позволяет найти параметры покрытия, при которых появляется трещина.

Для решения рассматриваемой задачи используем принцип суперпозиции. Напряжённо-деформированное состояние двухслойного тела представляется в виде суммы двух напряжённо-деформированных состояний:

1) адгезионное соединение материалов без зоны предразрушения под действием внешней нормальной нагрузки P на наружной поверхности покрытия;

2) напряжённо-деформированное состояние покрытия с зонами предразрушения, на берегах которых дополнительно приложены напряжения равные по величине и обратные по знаку, определяемые первым напряжённо-деформированным состоянием при $y_k = 0$.

Определение неизвестных параметров, характеризующих образование трещин, сводится к решению системы сингулярных интегральных уравнений. Получено условие, определяющее предельное значение внешней нагрузки, при котором появляется трещины.

На некотором этапе нагружения возможно одновременное существование в покрытии зон предразрушения и образовавшихся трещин с концевыми зонами. Методика решения в этом случае объединяет одновременный учёт зон предразрушения и трещин.

На основе предложенной расчётной модели, учитывающей в покрытии наличие повреждений (зон, ослабленных межчастичных связей материала), разработан метод расчёта параметров покрытия, при которых происходит трещинообразование. Зная основные значения критических параметров трещинообразования и влияния на них свойств материалов, можно обоснованно управлять явлением трещинообразования путём конструкторско-технологических решений на стадии проектирования.

Численная реализация полученных уравнений позволяет решать следующие практически важные задачи проектирования:

- 1) оценить гарантированный ресурс пары «покрытие – упругое основание» с учётом ожидаемых дефектов и условий нагружения;
- 2) установить допустимый уровень дефектности и максимальные значения рабочих нагрузок, обеспечивающие достаточный запас надёжности;
- 3) проводить выбор материала с необходимым комплексом статических и циклических характеристик трещиностойкости.

Построенная модель, описывающая начало разрушения материала покрытия, основана на дислокационных механизмах зарождения трещины.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА СОХРАННОСТЬ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ

Гриднев С.Ю., Подлесных И.С.
ВГТУ, г. Воронеж, Россия

В асфальтобетонном покрытии сталежелезобетонных пролётных строений автодорожных мостов в течение короткого срока эксплуатации могут появляться продольные трещины над главными балками, приводящие к снижению долговечности покрытия и в дальнейшем накладной плиты, нарушению совместности работы дорожной одежды и накладной плиты. При этом расчёт слоёв покрытия выполняют без учёта влияния воздействия солнечной радиации и распределения температуры по высоте поперечного сечения пролётного строения. В процессе эксплуатации одежда ездового полотна и пролётное строение в целом подвержены различным климатическим воздействиям. В работе [1] авторами была разработана конечно-элементная модель пролётного строения, позволяющая исследовать напряжённо-деформированное состояние (НДС) с учётом одежды ездового полотна и оценивать сохранность дорожной одежды. В статье [2] исследовался характер изменения максимальных растягивающих напряжений в верхнем слое ас-

фальтобетона сталежелезобетонных пролётных строений с учётом изменения температуры по толщине покрытия в зимнее время года.

При исследованиях использован сталежелезобетонный пролёт автодорожного моста по типовому проекту серии 3.503-50. Было рассмотрено три варианта положения солнца относительно пролётного строения. Подробно рассмотрен случай, при котором солнце находится высоко над горизонтом и дорожная одежда подвержена наиболее сильному нагреву. Характер распределения температуры по высоте поперечного сечения был определён с использованием закономерностей результатов натурных измерений, приведённых в [3] и проверен с помощью программы ELCUT Student.

Для расчёта НДС пролётного строения была разработана уточнённая пространственная конечно-элементная модель. В ней слои дорожной одежды учитывались как конструктивные элементы пролётного строения, что позволило оценить НДС каждого отдельного слоя и учитывать изменение температуры по высоте поперечного сечения.

Произведён расчёт на совместное действие нагрузки от собственного веса, подвижной автомобильной нагрузки А14 и температурного воздействия при конструкции дорожной одежды, описанной в [2]. Сравнение растягивающих напряжений в слоях дорожной одежды приведено на рис.1.

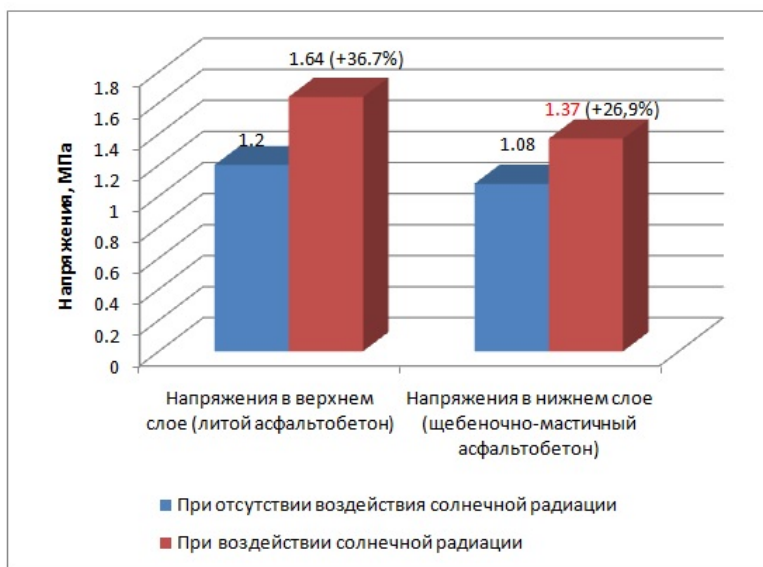


Рис. 1 Сравнение растягивающих напряжений в слоях дорожной одежды

Как видно из рисунка, в верхнем слое дорожной одежды при воздействии солнечной радиации растягивающие напряжения увеличились на 36,7%. В нижнем слое напряжения увеличились на 26,9% и составили 1,37 МПа, что превышает предел прочности на растяжение щебеночно-мастичного асфальтобетона.

Таким образом, солнечная радиация оказывает существенное влияние на НДС и сохранность асфальтобетонного покрытия. Анализ результатов выполненных расчётов показывает, что воздействие солнечной радиации увеличивает вероятность образования продольных трещин в асфальтобетоне и их дальнейшего развития в слоях дорожной одежды.

Библиографический список

1. Подлесных, И.С. Расчёт сталежелезобетонных пролётных строений автодорожных мостов с учётом одежды ездового полотна / И.С. Подлесных, С.Ю. Гриднев // Опыт прошлого – взгляд в будущее: 7-я Международная научно-практическая конференция молодых учёных и студентов: материалы конференции. – 2017. – С. 193-198.

2. Гриднев, С.Ю. Расчёт напряжённо-деформированного состояния сталежелезобетонных пролётных строений с учётом распределения температуры в слоях дорожной одежды / С.Ю. Гриднев, И.С. Подлесных // Строительная механика и конструкции. – 2017. – № 2 (15) – С. 75-84.

3. Безбабичева, О.И. Прогнозирование температурных напряжений в фасадных балках мостовых конструкций / О.И. Безбабичева, А.В. Бильченко, А.Г. Кислов // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта, 2010. – № 33. – С. 28-31.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ВЫСОТЕ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ АВТОДОРОЖНОГО МОСТА

Гриднев С.Ю., Подлесных И.С.
ВГТУ, г. Воронеж, Россия

При расчёте сталежелезобетонных пролётных строений на воздействие солнечной радиации необходимо представлять характер распределения температуры по толщине слоёв дорожной одежды и железобе-

тонной плиты. Это позволяет более точно определять напряжённо-деформированное состояние (НДС) несущей конструкции.

Авторами в работе [1] с помощью разработанной конечно-элементной модели было оценено влияние слоёв дорожной одежды на общую изгибную жёсткость пролётного строения, податливости главных балок совместно с накладной плитой на НДС верхних слоёв дорожной одежды с целью выявления причины образования продольных трещин в асфальтобетонном покрытии. В работе исследовалось влияние отрицательной температуры на сохранность верхнего слоя дорожной одежды в [2].

Для исследования характера распределения температуры в слоях дорожной одежды и железобетонной плите, был рассмотрен случай воздействия солнечной радиации, при котором солнце находится в самом высоком положении над горизонтом и нагреву подвергается только асфальтобетонное покрытие. Начальная температура поверхности дорожного покрытия от нагрева солнечными лучами определялась на основе закономерности результатов натурных измерений [3]. Рассматриваемая дорожная одежда представляет собой трёхслойную конструкцию, состоящую из щебеночно-мастичного асфальтобетона, плотного асфальтобетона типа Б и гидроизоляционного слоя.

Для получения распределения температуры в слоях дорожной одежды и железобетонной плите был использован программный комплекс ELCUT Student. Одной из функциональных возможностей программы является моделирование тепловых полей. Для этого в специальном модуле «теплопроводность» необходимо задать:

- 1) геометрическую модель рассматриваемой конструкции,
- 2) плотность и коэффициент теплопроводности материалов,
- 3) граничные условия, в виде заданной температуры на верхнем слое дорожного покрытия и нижней границе накладной плиты.

На рис.1 показан график распределения температуры по высоте дорожной одежды и железобетонной плиты.

Далее был выполнен расчёт напряжённо-деформированного состояния пролётного строения длиной $L = 42,5$ м на совместное действие постоянной, временной и температурной нагрузок. Для реализации конечно-элементной модели с учётом неравномерного нагрева элементов использовался комплекс ПК ЛИРА САПР. При расчётах пролётного строения учитывалась податливость главных балок и совместная работа дорожной одежды с железобетонной плитой. Разработанная КЭ модель пролётного строения подробно описана в статье [2].

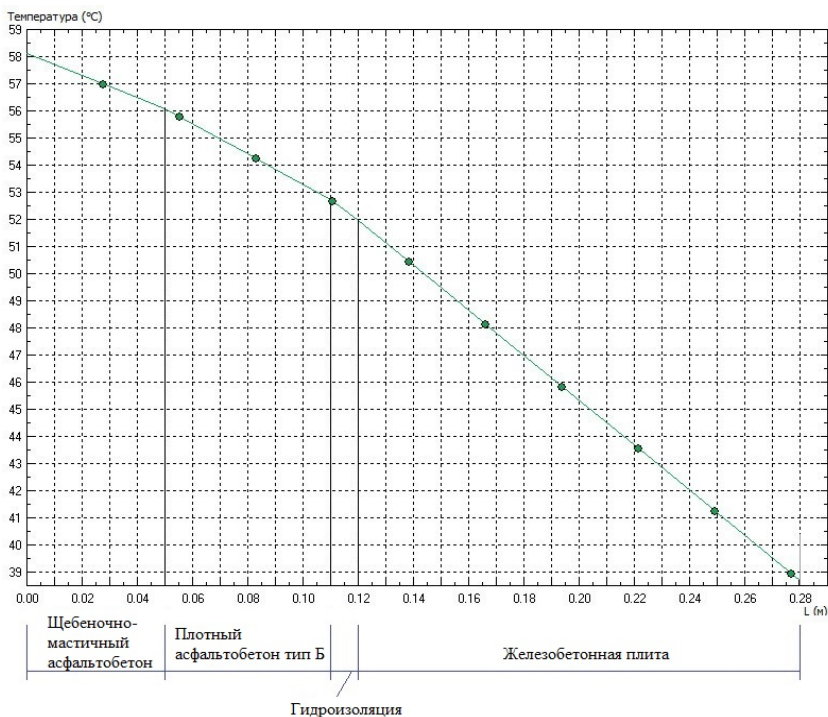


Рис. 1. График изменения температуры по толщине дорожной одежды и железобетонной плиты

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что при учёте изменения температуры по высоте поперечного сечения в главных балках, накладной плите и дорожной одежде возникают дополнительные напряжения. Так максимальные растягивающие напряжения в зоне над главной балкой в щебеночно-мастичном асфальтобетоне увеличились на 34,7%, а в железобетонной плите на 12,6%.

Таким образом, неравномерное распределение температуры в дорожной одежде и железобетонной плите от нагрева солнечной радиации влияет на НДС элементов пролётного строения. Появление дополнительных напряжений может привести к образованию трещин в асфальтобетонном покрытии и накладной плите пролётного строения.

Библиографический список

1. Подлесных, И.С. Расчёт сталежелезобетонных пролётных строений автодорожных мостов с учётом одежды ездового полотна / И.С.

Подлесных, С.Ю. Гриднев // Опыт прошлого – взгляд в будущее: 7-я Международная научно-практическая конференция молодых учёных и студентов: материалы конференции. – 2017. – С. 193-198.

2. Гриднев, С.Ю. Расчёт напряжённо-деформированного состояния сталежелезобетонных пролётных строений с учётом распределения температуры в слоях дорожной одежды / С.Ю. Гриднев, И.С. Подлесных // Строительная механика и конструкции, 2017. – № 2 (15) – С. 75-84.

3. Безбабичева, О.И. Прогнозирование температурных напряжений в фасадных балках мостовых конструкций / О.И. Безбабичева, А.В. Бильченко, А.Г. Кислов// Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта, 2010. – № 33. – С. 28-31.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЬЕВОГО МЕТОДА ПРОИЗВОДСТВА ОРГАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Данилов В.М.

ТГТУ г. Тамбов, Россия

Органическое стекло, так же известное в Европе как акрил, в новейшей архитектуре получило широкое распространение. Связано это прежде всего с современной модой, которая выражается в желании минимизировать грань между пространством здания и окружающим его миром. Такую возможность создают большие остеклённые пролёты здания. Акриловое стекло было изобретено относительно недавно в 30-х годах прошлого века в Германии Отто Рёмом. Запатентовал он его под названием PLEXIGLAS. Акрил применяется для остекления не только фасада здания, но и в декоре, например, аквариумы с большими объёмами или потолок с подсветкой. Для остекления высотных зданий применяют несколько таких стёкол с наполнителем из полимерной плёнки между ними, называемое триплекс. У акрила много плюсов: небольшой вес, экономичность, декоративность, повышенная безопасность и прочность. Такое стекло сложно разбить, а если удастся, то осколки не будут опасны для человека. Так же высокая светопрозрачность, которая доходит до 93%.

Производство такого стекла давно освоенный процесс. Применяют два метода производства – экструзии и литьём. В случае с литьевым методом в качестве сырья используют мономер метилметакрилат, который преобразуют в состояние форполимера во время нагрева до 72-78°C в эмалированном реакторе автоклавного типа. Это состояние характеризуется как густая жидкость с большой вязкостью.

Для того чтобы исходный продукт получил дополнительные свойства, например, цвет, большую ударопрочность, скорость полимеризации вносят дозированные добавки. Такие добавки вносят в самом начале производства, то есть связь с основным материалом происходит прямо в момент реакции полимеризации. Полученный форполимер ещё не прошёл процесс полимеризации, смесь перемешивают и начинают продавливать через специальный фильтр в герметизированную форму из силикатного стекла.

Возможно применение не только стекла, но алюминия или стали. Между листами формы вносят специальные прокладки. Такие прокладки благодаря пластичности позволяют регулировать толщину готового изделия. В этих формах при температуре 93-116 °С и при давлении 1,5-2 кгс/см² происходит процесс полимеризации. Затем форма на 20 листов помещается в камеру, в которой происходит последовательное циркулирование воздухом для равномерного охлаждения. Для окончательного охлаждения погружают формы в ванны. После охлаждения процесс полимеризации окончен и готовые изделия извлекают из форм.

На завершающем этапе листам придают форму, в которой лист будет поставлен заказчику. Для этого используют формовку. Предполагается термическая (частичное расплавление и распределение по специальным матрицам) или вакуумная (создание нужной формы с помощью перепада давления). Стекло в зависимости от требований заказчика полируют, если требуется максимальная прозрачность или матируют. Так же возможна резка, гравировка и склейка в нужные объёмные фигуры.

Благодаря тому, что литьевой процесс предполагает получение продукта блоками, т.е. отдельными порциями, возможно производство его отдельными партиями. В таком случае не будет происходить такого явления как перепроизводство. Стоит отметить что на производстве, где требуются большие и непрерывные объёмы поставки продукции оргстекла более предпочтителен экструзивный метод, т.к. он предполагает именно постоянное производство.

Приведённая технология литьевого производства органического стекла является общей и требует уточнения в части рецептуры, в зависимости от требуемых свойств и технологических параметров, что и обуславливает актуальность поднятой темы.

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЁТУ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ GPP DN 1800 PN1 SN2500 ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКЕ

Делягин М.Ю., Батырев К.Г., Теличко В.Г.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Стеклопластиковые трубы находят широкое применение при подземной прокладке сетей водоотведения. Базовая методика расчёта таких трубопроводов приведена в СП 40-104-2001. ТУ 2296-004-9967534-2007 и ГОСТ Р 54560-2011 «Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Технические условия» предусматривают большой разброс характеристик материалов в рамках одной марки трубы, поэтому для повышения надёжности проектирования особо ответственных объектов необходимо привлекать дополнительные методики расчёта и проводить испытания материалов.

Были рассмотрены стеклопластиковые трубы GPP DN 1800 PN1 SN2500, укладываемые на площадке Индустриального парка «Узловая» в Тульской области. В лаборатории ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» были определены фактические прочностные и деформационные характеристики стеклопластиков. В рамках расчётов оценивалось влияние модуля упругости грунта засыпки пазух траншеи на несущую способность труб.

Рассматривалось четыре подхода к расчёту трубопровода. Помимо стандартной методики СП 40-104-2001 трубопровод был смоделирован с помощью программного комплекса SCAD Office 21.1, причём грунтовые условия моделировались через совокупность упругого основания в вертикальной плоскости и упругих связей в горизонтальной плоскости. Расчёт проводился в геометрически линейной и нелинейной постановках. Четвёртый вариант расчёта предполагал рассмотрение задачи геотехнического прогноза в PLAXIS 2D с учётом стадийности устройства трубопровода и геологических условий площадки строительства.

Для полимерных труб максимальное допустимое значение относительного вертикального укорочения вертикального диаметра составляет 5-6%. При использовании в качестве засыпки пазух очень тонкого песка с коэффициентом уплотнения 0,95 и модулем деформации не более 6 МПа суммарное укорочение по СП 40-102-200 составляет 7,63%. Для данного уровня укорочений деформации от грунтовой нагрузки, вычисленные по формулам СП 40-102-200, начинают расходиться с результатами конечно-элементного расчёта в геометрически нелиней-

ной постановке, выполненного в SCAD, и расчёта по деформированной схеме в PLAXIS 2D. Максимально расхождение расчётов достигает 77,65%.

Согласно данным поверочного расчёта устойчивость труб SN2500 при проектном заглублении и использовании в качестве засыпки пазух очень тонкого песка с коэффициентом уплотнения 0,95 и модулем деформации не более 6 МПа не обеспечена.

ДЕФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОЗЕЛЕНЁННЫХ КРЫШ

Дорожкина Е.А.

МГСУ, г. Москва, Россия

Опыт проектирования и строительства объектов с озеленяемыми покрытиями на сегодняшний день невелик. Однако, они приобретают все большее распространение в архитектурном проектировании. В практике эксплуатации таких объектов возникают повреждения, ведущие к отказам здания-основы, а также поверхностные разрушения, в разной степени снижающие качество самих конструкций, качественное состояние внутренней среды нижерасположенных помещений и внешних частей здания.

Дефектность озеленяемых конструкций связана с тремя группами ошибок: проектными при конструировании, технологическими при строительстве объекта и эксплуатационными. Сбор данных производился на основании дефектных ведомостей и технических отчётов.

Основным аспектом исследования является выявление слабых мест конструкции, ведущих к образованию дефектов. Необходимо рассматривать работу отдельных конструктивных узлов, а также строительных материалов под воздействием внешней среды, а также от агрессивного влияния растения и человека.

Полученные при обследовании данные дают системные представления на наиболее «слабых» местах строительных конструкций здания-основы и на каком этапе (проектирования, строительства или эксплуатации) совершаются ошибки, приводящие к дефектам конструкций.

При обследовании эксплуатируемых, в особенности «зеленых» крыш, выявляется ряд дефектов, которые могут быть классифицированы следующим образом:

- дефекты несущего основания (прогиб, выгиб несущего основания, температурные деформации, полное или частичное разрушение, эрозия элементов конструкций);

- дефекты теплоизоляции;
- дефекты кровли (основания, гидроизоляционного ковра);
- дефекты эксплуатируемого покрытия террасы;
- дефекты элементов водоотвода, электрооборудования;
- дефекты вентиляционных устройств;
- дефекты элементов оборудования и благоустройства.

Озеленение выступает агрессором в отношении здания. Помимо существенного увеличения нагрузок на здание, существует опасность нарушения целостности конструкций. Эти процессы связаны в первую очередь с вегетацией произрастающей растительности. В этом аспекте необходимо рассматривать изменение геометрических параметров растения, изменение его массы, развитие корневой системы, а также потребность растения в органических и минеральных веществах и воде, необходимых для его нормальной жизнедеятельности, и одновременно, крайне агрессивных для строительных материалов.

Говоря о нормальной эксплуатации конструкций крыш с интегрированным озеленением, необходимо предупреждать образование дефектов, вызванных в том числе, в следствии роста и развития растений.

Указанные дефекты приводят к различным разрушениям декоративной отделки, образованию плесени в следствии намокания элементов конструкции.

В связи с интенсивным намоканием может наблюдаться заметное ухудшение качества теплоизоляции, а также отделки элементов фасада здания.

Наиболее неблагоприятным при эксплуатации таких конструкций является переходный температурно-влажностный режим (соответствующий периодам весна, осень).

Выявленные дефекты приводят к заметному ухудшению качественных характеристик помещений, а также к частичному или полному отказу несущих конструкций зданий.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН СРЕДНЕЙ ТОЛЩИНЫ ИЗ ОРТОТРОПНЫХ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛЫХ ПРОГИБАХ

Журин ЕА.
ТулГУ, г. Тула, Россия

На сегодняшний день теория деформирования материалов с усложнёнными свойствами является относительно молодой ветвью механики

деформируемого твёрдого тела. В связи с тем, что инженерная практика ежедневно требует повышения точности расчёта элементов строительных конструкций, деталей машин и аппаратов, было предложено построение достаточно большого количества определяющих соотношений, учитывающих чувствительность их механических характеристик к виду напряжённого состояния разносопротивляющихся сред, базирующихся на различных технических гипотезах.

В представленной работе учёт влияния вида напряжённого состояния материала на НДС элементов конструкций базируется на теории деформирования анизотропных нелинейных материалов А.А. Трещёва [1, 2], которая в настоящее время наименее противоречива и даёт результаты наиболее близкие к экспериментальным данным.

Расчёт таких пластин в линейной постановке изучен достаточно подробно, чего нельзя сказать о пластинах из нелинейного разносопротивляющегося ортотропного материала. Это связано, в первую очередь, с недостаточностью экспериментальных исследований для прочностных расчётов и большим разбросом экспериментальных данных. Поэтому математическое моделирование нелинейной зависимости напряжений от деформаций для анизотропных материалов является подспорьем для дальнейших экспериментальных исследований.

Исследуется напряжённо-деформированное состояние прямоугольной пластинки шириной « b » (м), длиной « a » (м) и толщиной « h » (м) с различными вариантами опирания. Толщину пластин принимаем средней: $h = \frac{1}{10} \cdot b$. Пластины рассмотрим при их загрузке поперечной равномерно-распределённой нагрузкой интенсивностью « q » (МПа). Материал пластины принимаем с нелинейными характеристиками, обладающей прямоугольной ортотропией и свойствами разносопротивляемости.

Рассматривается шарнирно-опертая прямоугольная пластина в соответствии с рис. 1.

Рассматриваем упругое равновесие прямоугольной однослойной пластины, отнесенной к декартовой системе координат. В произвольной точке пластины одна из плоскостей упругой симметрии параллельна срединной поверхности, а остальные две перпендикулярны к координатным линиям $x_1 = const$; $x_2 = const$.

Примем, что пластина нагружена нормально приложенной равномерно распределённой нагрузкой q . Вертикальную ось x_3 направим вниз.

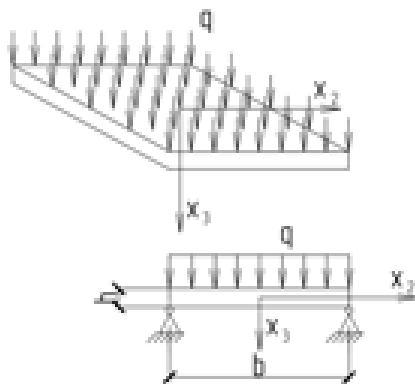


Рис. 1. Расчётная схема шарнирно-опёртой прямоугольной пластины

При решении поставленной задачи по всей толщине пластины введены традиционные для данного класса задач технические гипотезы Тимошенко [1, 2]:

1) нормальное к срединной плоскости перемещение w не зависит от координаты x_3 ($e_3 = 0$).

2) нормаль к срединной плоскости после деформации поворачивается на угол ψ_1 относительно оси x_1 и ψ_2 относительно оси x_2 ;

3) при определении параметров напряжённого состояния влиянием нормальных напряжений σ_3 пренебрегаем.

В результате необходимых преобразований получили систему нелинейных разрешающих дифференциальных уравнений изгиба ортотропных пластин средней толщины из нелинейного разносопротивляющегося материала.

Решение системы нелинейных разрешающих дифференциальных уравнений (3) было реализовано с помощью метода переменных параметров упругости в сочетании с пошаговым нагружением [3].

Суть данного метода состоит в том, что нагружение прямоугольной пластины, в сочетании с шаговым нагружением, будет осуществляться постепенно, небольшими величинами по нагрузке с определённым фиксированным шагом.

Для реализации алгоритма решения данного класса задач была разработана программа в среде программного комплекса MatLAB.

Согласно принятой теории расчёта пластины, нелинейные характеристики материала должны соответствовать следующим

соотношениям: $A_{1122} \approx A_{2211}$ и $B_{1122} \approx B_{2211}$. Результаты расчёта в математическом комплексе MatLAB приведены в таблице.

Q, Па	A_{1122}	A_{2211}	B_{1122}	B_{2211}
$20 \cdot 10^4$	$5,2949 \cdot 10^{-12}$	$7,8713 \cdot 10^{-12}$	$2,2184 \cdot 10^{-13}$	$1,8641 \cdot 10^{-13}$
$21 \cdot 10^4$	$5,2737 \cdot 10^{-12}$	$8,1812 \cdot 10^{-12}$	$2,426 \cdot 10^{-13}$	$2,062 \cdot 10^{-13}$
$22 \cdot 10^4$	$5,0648 \cdot 10^{-12}$	$8,3714 \cdot 10^{-12}$	$2,711 \cdot 10^{-13}$	$2,146 \cdot 10^{-13}$

В результате получены графики распределения прогибов (рис. 2, рис. 3) и оценена сходимость решения.

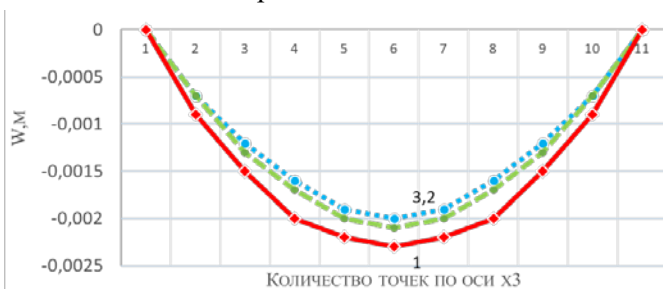


Рис. 2. Распределение прогибов в прямоугольной пластине

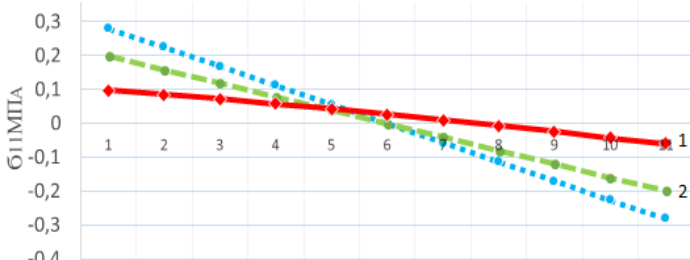


Рис. 3. Распределение напряжений σ_1 по толщине в прямоугольной пластинке

Условные обозначения графиков:

- 1 – решение, соответствующее используемой математической модели;
- 2 – решение с использованием гипотезы единой кривой с характеристиками только при сжатии;
- 3 – решение с использованием гипотезы единой кривой с характеристиками только при растяжении.

Библиографический список

1. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведённой чувствительностью к виду напряжённого

состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.

2. Трещёв, А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов: монография / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2007. – 160 с.

3. Биргер, И.А. Сопротивление материалов: Учебное пособие / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлюков. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986 – 560 с.

К РАСЧЁТУ НЕЛИНЕЙНО-ДЕФОРМИРУЕМЫХ ПЛАСТИНОК НЕКЛАССИЧЕСКОГО ОЧЕРТАНИЯ

Закирова О.А.

СГТУ, г. Саратов, Россия

При проектировании конструктивных элементов разнообразного назначения, как в строительстве, так и в машиностроении часто встречаются пластины неклассического очертания. Пластинами классического очертания будем называть пластины прямоугольные в плане и очерченные по окружности.

При расчёте пластин неклассического очертания используются численные или вариационные методы. При применении вариационных методов возникает проблема выбора системы аппроксимирующих функций. В работе [1] для пластинок с кусочно-гладким контуром при построении аппроксимирующих функций рекомендуется использовать идею Л.В. Канторовича, который рекомендовал для выпуклых многогранников, ограниченных прямыми и криволинейными отрезками для построения аппроксимирующих функций применять уравнения контурных линий.

В качестве примера рассмотрим пластину из нелинейно-деформируемого материала параболического очертания, ограниченную по оси η .

Нагрузка – равномерно распределённая интенсивностью q_0 . Считаем, что пластинка жёстко закреплена по контуру, поэтому на контуре при $\xi = \bar{\xi}$, $\eta = \bar{\eta}$ имеем следующие граничные условия: $w = \frac{\partial w}{\partial n} = 0$. Здесь n – нормаль к контуру пластинки, а $\bar{\xi}, \bar{\eta}$ – координаты контурных точек.

Диаграмму деформирования материала пластинки аппроксимируем кубической параболой $\sigma_i(\varepsilon_i) = E\varepsilon_i - m\varepsilon_i^3$, где σ_i, ε_i – интенсивности напряжений и деформаций соответственно, а E, m – параметры характеризующие нелинейность материала, которые в численном примере были приняты равными $E = 1.66 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $m = 1.49 \cdot 10^{15} \text{ Па}$.

Дифференциальное уравнение изгиба пластины из нелинейно деформируемого материала в безразмерном виде имеет вид [2]:

$$\nabla^2(\bar{D}_c \nabla^2 W) - \frac{1}{2} L(\bar{D}_c, W) = q(\xi, \eta), \quad (1)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа, $L(\bar{D}_c, W)$ – дифференциальный оператор, определяемый по формуле:

$$L(D_c, W) = \frac{\partial^2 D_c}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 D_c}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} - 2 \frac{\partial^2 D_c}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial^2 W}{\partial \xi \partial \eta}. \quad (2)$$

Переменная безразмерная жесткость \bar{D}_c определяется по формуле:

$$\bar{D}_c = 1 - \frac{1}{5} \alpha^4 \gamma R(W),$$

$$\text{здесь, } R(W) = \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} \right)^2 + \beta^4 \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} \right)^2 + \beta^2 \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} + \beta^2 \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \xi \partial \eta} \right)^2,$$

где, $\beta = \frac{a}{b} = 1$ – параметр удлиненности пластины; $\alpha = \frac{h}{a}$, $\gamma = \frac{m}{E}$ – безразмерные коэффициенты, h – толщина пластины.

Для решения нелинейного дифференциального уравнения (1) применим комбинацию двух методов: линеаризация производится методом переменных параметров упругости И.А. Биргера и на каждой итерации линеаризованное уравнение с переменными коэффициентами решается вариационным методом Бубнова-Галеркина.

Для линеаризации уравнения расставим индексы итерации следующим образом

$$\nabla^2(D_c^{(j)} \nabla^2 W^{(j+1)}) - \frac{1}{2} L(D_c^{(j)}, W^{(j+1)}) = q(\xi, \eta). \quad (3)$$

Для применения метода Биргера в первом приближении прогиб ищем в виде:

$$W^{(j+1)} = K^{(j+1)} \varphi(\xi, \eta), \quad (4)$$

где $K^{(j+1)}$ – амплитуда прогиба на j -ой итерации, а $\varphi(\xi, \eta)$ – аппроксимирующая функция, не зависящая от номера итерации. Переменная жесткость определяется по формуле:

$$\bar{D}_c = 1 - \frac{1}{5} \alpha^4 \gamma R(W^{(j+1)}),$$

Аппроксимирующую функцию в соответствии с рекомендацией Л.В. Канторовича выбираем в виде

$$\varphi(\xi, \eta) = (\eta - \xi^2)^2 (\eta - 1)^2, \quad (5)$$

где $\eta - \xi^2 = 0$ уравнение параболы, а $\eta - 1 = 0$ уравнение прямой, ограничивающей площадь пластинки. Для того чтобы аппроксимирующая функция соответствовала области определения уравнения (1), уравнение контурных линий возводим в квадрат.

Применяя к уравнению (3) вариационный метод Бубнова-Галеркина получим линейное рекуррентное алгебраическое уравнение относительно $K^{(j+1)}$, решение которого имеет вид:

$$K^{(j+1)} = \frac{Q^{(j+1)}}{(f_1 - K_j^2 f_2)} \quad (6)$$

Коэффициенты алгебраического уравнения определяются по формулам:

$$f_1 = \int_0^1 \int_{-\sqrt{\eta}}^{\sqrt{\eta}} [\nabla^4 \varphi] \varphi(\xi, \eta) d\xi d\eta; \quad \Delta Q = \int_0^1 \int_{-\sqrt{\eta}}^{\sqrt{\eta}} \Delta q \varphi(\xi, \eta) d\xi d\eta;$$

$$f_2 = \frac{6}{5} \alpha^2 \lambda^2 \gamma (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6)$$

$$\Delta_1 = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_{-\sqrt{\eta}}^{\sqrt{\eta}} \varphi R(\xi, \eta) \nabla^4 \varphi d\xi d\eta; \quad \Delta_2 = \int_0^1 \int_{-\sqrt{\eta}}^{\sqrt{\eta}} \varphi \frac{\partial R(\xi, \eta)}{\partial \xi} \left(\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial \xi^3} + \frac{\partial^3 \varphi}{\partial \xi \partial \eta^2} \right) d\xi d\eta$$

$$\Delta_3 = \int_0^1 \int_{-\sqrt{\eta}}^{\sqrt{\eta}} \varphi \frac{\partial R(\xi, \eta)}{\partial \eta} \left(\beta^2 \frac{\partial^3 \varphi}{\partial \eta^3} + \frac{\partial^3 \varphi}{\partial \xi^2 \partial \eta} \right) d\xi d\eta; \quad \Delta_4 = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_{-\sqrt{\eta}}^{\sqrt{\eta}} \varphi \frac{\partial^2 R(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} \left(\frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} + 0,5 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \eta^2} \right) d\xi d\eta$$

$$\Delta_5 = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_{-\sqrt{\eta}}^{\sqrt{\eta}} \varphi \frac{\partial^2 R(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} \left(\beta^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \eta^2} + 0,5 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} \right) d\xi d\eta; \quad \Delta_6 = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_{-\sqrt{\eta}}^{\sqrt{\eta}} \varphi \frac{\partial^2 R(\xi, \eta)}{\partial \xi \partial \eta} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi \partial \eta} d\xi d\eta$$

$$\text{где } R(\xi, \eta) = \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} \right)^2 + \beta^2 \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} \right)^2 + \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \xi \partial \eta} \right)^2.$$

В случае пластинок, имеющих криволинейные отрезки контура, аппроксимирующую функцию не удаётся представить в виде произведения функций с разделяющимися переменными, поэтому приходится

вычислять двойные интегралы с пределами в виде функций от переменных, тогда как в пластинах классического очертания интегралы можно было представить в виде произведения одиначных интегралов.

Решая рекуррентное уравнение (6) до достижения необходимой точности найдём амплитуду прогиба и вычислим эпюры прогибов и изгибающих моментов (см. рис. 1)

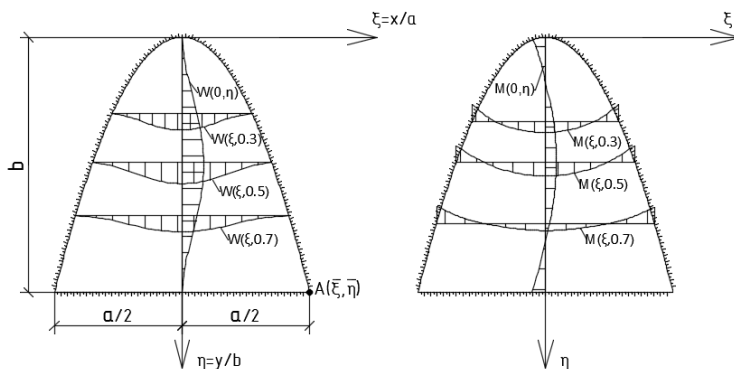


Рис.1. Эпюры прогибов и изгибающих моментов пластинки.

Можно сделать вывод, что при построении аппроксимирующих функций на базе уравнений контурных линий пластинки предложенная методика позволяет довольно просто решать сложные нелинейные задачи по расчёту физически нелинейных пластинок.

Библиографический список

1. Петров, В.В. Теория расчёта пластин и оболочек / Петров В.В. – М.: АСВ, 2018. – 410 с.
2. Петров, В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика / Петров В.В. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 480 с.

СТРУКТУРНЫЕ СИСТЕМЫ В СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЯХ

Захаренко А.А., Ращепкина С.А.

ИТИ НИЯУ МИФИ, г. Балаково, Россия

В работе представлен краткий обзор пространственных конструкций, применяемых в гражданском (рис. 1) и промышленном (рис. 2) строительстве. Дан анализ каждого конструктивного решения.

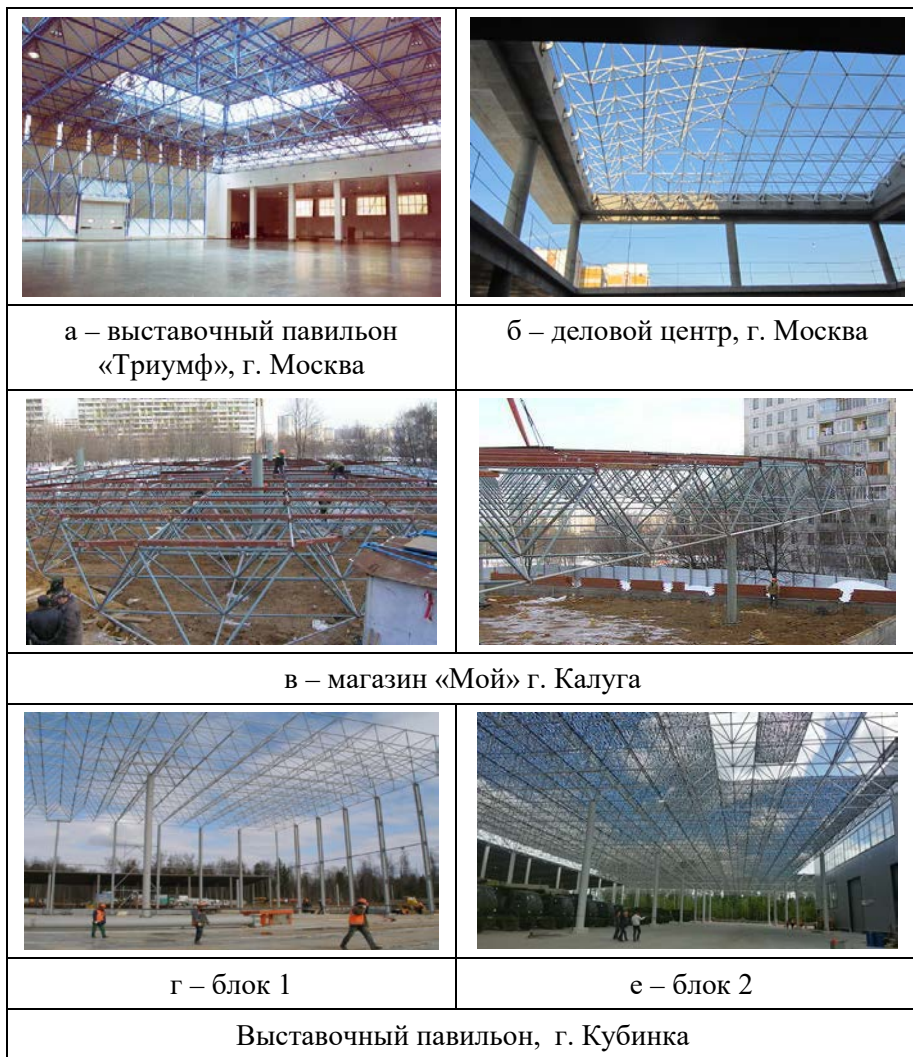


Рис. 1. Гражданские здания

Павильон «Триумф» на территории выставочного комплекса «Росстройэкспо» на Фрунзенской набережной, г. Москва, 1985 г. [1]. Общий размер павильона 113х33м (рис.1, а).

В покрытии применены две полурамы размером 33х33м с контурным опиранием с переходом конструкции на вертикальную стену (система МАРХИ). Расход стали 24,0 кг/м².

Атриум делового центра расположен в Москве, в районе Сокол [1]. Конструкция впарушенной формы, покрыта стеклом (рис.1, б). Размеры конструкции в плане – 14,5х14,5 м. Расход стали составил 21,6 кг/м². Конструкция была собрана на земле, затем поднята на рабочую отметку башенным краном в стеснённых условиях (рис.1, в).

Магазин «Мой» построен в г. Калуга с размерами в плане 36х36м [1]. Здесь применены конструкции системы МАРХИ с диагональной структурой решётки. Расход стали 11,3кг/м² (рис.1, в).

Павильон Военно-Промышленного комплекса на территории парка «Патриот» [1], расположен в г. Кубинка Московской области (рис.1, г). Общая площадь павильона – более 5,1 тыс. м². Приведённая масса конструкции к площади покрытия – 22 кг/м² Высота здания до оси нижнего пояса конструкции – 17,4 м. Блок 2 П-образной формы является пристройкой к павильону Военно-Промышленного комплекса на территории парка "Патриот" (рис.1, е) [6]. Конструкция покрыта маскировочной сетью для создания тени над экспозицией. Размер конструкции в плане – 72х141 м. Общая площадь – более 8 600 м². Расход стали на покрытие составил 15,74 кг/м².

Восстановление разрушенных конструкций на Саяно-Шушенской ГЭС (рис. 2: а). В 2009г. в результате аварии на Саяно-Шушенской ГЭС были разрушены полностью перекрёстно-стержневые пространственные конструкции системы МАРХИ шатра машинного зала [3]. Сильно пострадала вертикальная стена-стойка рамы, и получили различного рода повреждения отдельные стержни во всех остальных рамных секциях шатра.

Благодаря высокому профессионализму работников НПЦ «Виктория», в течение 10 дней с учётом имеющихся разрушений была разработана на стадии рабочего проекта КМД и передана на завод вся техническая документация по восстановлению разрушенных конструкций с необходимыми расчётами, учитывающими специфику состояния конструкций, обеспечивающими их эксплуатационную надёжность (рис.2, а). Вопросы, связанных с расчленением на части основных монтажных блоков каждой новой секции рамного шатра и их взаимные стыковки на рабочей отметке, а также сохранение шатра в зоне 1-го агрегата, потребовало выполнения большого объёма вычислительных работ, обес-

печаивающих надёжность рамной конструкции на всех этапах возведения пространственного сооружения.



Рис. 2. Промышленные здания

Бурейская ГЭС. Машинный зал представляет собой рамную конструкцию системы МАРХИ размером в плане 150x28,5 м (рис.2, б) [4]. Конструкция собрана из стержней длиной 2,0 м. Ригель рамы двухъярусный высотой сечения 2,82 м. Стойки рамы двухъярусные с размером сечения 1,0 м. Бурейская ГЭС является крупнейшей электростанцией на Дальнем Востоке России. Расход металла (включая стены) составил 42,55 кг/м².

Каркас склада с применением покрытия системы МАРХИ [2]. Структурное покрытие 108,6 x 72,4 м, г. Пермь, 2012г. Подъём первого фрагмента структуры размерами 36x36м показан на рис.2. Монтаж велся автокраном ГП 300 тонн с вылетом стрелы 24 м³ (рис.2, в).

Выводы. На основе анализа было показано широчайшее применение структурных покрытий, выявлено их уникальные особенности и новые возможности.

Библиографический список

1. Информационный портал: http://www.systems-marhi.ru/works/exhibition_centers.php?ELEMENT_ID=380 (Дата обращения: 17.05.18).
2. Информационный портал: <http://www.doski.ru/metallokonstruksii-sistemy-marhi-msg1070846.htm> (Дата обращения: 22.05.18).
3. Информационный портал: <https://www.chel.kp.ru/daily/26306/3184540/> (Дата обращения: 20.05.18).
4. Информационный портал: <https://engineering-ru.livejournal.com/299494.html> (Дата обращения: 20.05.18).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ С РАСТЯЖЕНИЕМ БЕТОНА В35

Зиборов Л.А., Теличко В.Г.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Экспериментальное исследование прочности бетона в условиях сжатия с растяжением, накопления опытных данных для различных классов бетона позволяет решать различные задачи предельного состояния железобетонных конструкций, снизить обоснованно материалоемкость. Исследование прочности бетона в условиях сложного напряжённого состояния связано с определёнными техническими трудностями получения образцов.

Выбор критерия прочности бетона, обладающего различным сопротивлением растяжению и сжатию, не имеет однозначного решения. Условие прочности должно быть простого вида и хорошо совпадать с опытами. Среди существующего большого числа условий прочности мы использовали двухпараметрическое условие прочности Гениева Г.А.

Предлагается предельное условие в виде поверхности второго порядка, которое имеет пять расчётных параметров

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + A_{13}\sigma_3\sigma_1 + A_{12}\sigma_1\sigma_2 + A_{23}\sigma_2\sigma_3 + (R_b - R_{bt})(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = R_b R_{bt}, \quad (1)$$

где $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ - главные напряжения; R_b - предел прочности при осевом сжатии ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -R_b$); R_{bt} - предел прочности при осевом растяжении ($\sigma_1 = R_{bt}, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$); A_{12}, A_{23}, A_{13} - экспериментально опре-

деляемые параметры; A_{12} – определяют при двухосном растяжении, A_{23} – при двухосном сжатии, A_{13} – при двухосном сжатии с растяжением.

Рассмотрим напряжённое состояние сжатие с растяжением $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, когда $\sigma_2 = 0$, получим условие в виде (2)

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + A_{13}\sigma_1\sigma_3 + (R_b - R_{bt})(\sigma_1 + \sigma_3) = R_b R_b, \quad (2)$$

где

$$A_{13} = 2 - \frac{R_b R_{bt}}{T^2}, \quad (3)$$

T – предел прочности при сдвиге $\sigma_1 = -\sigma_3 = T$, $\sigma_2 = 0$.

Для определения A_{13} , R_b , R_{bt} и экспериментальной проверке условия (1) в виде (2) бетона В35 при сжатии с растяжением провели ряд опытов с бетонными трубчатыми образцами.

Напряжённое состояние сжатия с растяжением бетона достигалось осевой силой сжатия пресса и внутреннего давления воздуха, поступающего в резиновый цилиндр, расположенный внутри трубчатого образца. После определения T , R_b , R_{bt} для бетона В35 из условия (3) вычислена величине A_{13} . Для бетона В35, когда $\sigma_2 = 0$, из условия (2) получим условие (4):

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - 17,34\sigma_1\sigma_3 + 28,94(\sigma_1 + \sigma_3) = 84,06. \quad (4)$$

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗДАНИЙ

Зобкова Н.В., Горелкин В.Д., Иванов И.И.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Повышение энергоэффективности существующих зданий одно из приоритетных направлений Государственной программы «Энергосбережение повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» [1].

Многочисленные расчёты и исследования показывают, что тепловые потери через наружные элементы здания различны, зависят от теплоизоляционных качеств конструкций, а также их размеров; и составляют для стен – 20-30%, окон и дверей – 15-30%, крыш 10-25%, пола первого этажа – 5-10%.

Энергоэффективность существующих зданий возможно увеличить повышением теплоизолирующих характеристик ограждающих конструкций. Снижение потерь тепла через стены достигается за счёт до-

полнительного утепления стен, а потери тепла через окна можно уменьшить с помощью установки энергоэффективных стеклопакетов.

Обычные стеклопакеты ещё недавно являлись верхом совершенства, а сегодня признаны не самыми эффективными и надёжными. Стеклопакеты с энергосберегающим стеклом по своим техническим характеристикам позволяют свести теплотери к минимуму даже в сложных климатических условиях.

Стеклопакет с энергосберегающим стеклом отличается от обычного наличием покрытия, пропускающего лучи солнца, но не позволяющему «уходить» тепловой энергии, отражая её потоки.

В своей работе [6] авторы расчётом показали целесообразность применения стекла с низкоэмиссионным покрытием. Расчёт производится в соответствии с разделом 5 [2].

Исходными данными являются: жилой пятиэтажный дом в г. Саратов, площадь остекления (S) – 336 м², расчётная температура внутреннего воздуха (t_в) – [20 °С] в соответствии с табл.1 [3], расчётная температура наружного воздуха (t_н) наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 – [-25 °С], средняя температура отопительного периода – [-3,5 °С], продолжительность отопительного периода – 202 суток в соответствии с табл. 3.1* [4].

При использовании двухкамерного стеклопакета с низкоэмиссионным мягким покрытием по сравнению с двухкамерным стеклопакетом без покрытий теплотери сократились на 27,83 Гкал/год·м², что составляет 30 %. При этом экономическая выгода при использовании стеклопакета с низкоэмиссионным покрытием составила 49793,16 руб./год.

Библиографический список

1. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года».
2. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.
3. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
4. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*.
5. Пшенов, А.А. Материалы и способы утепления стен зданий / А.А. Пшенов, Н.В. Зобкова // Инновации, логистика, техническое знание –

2014: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. (Брянск, 17-19 декабря 2014 г.). – Брянск: НДМ, 2014. – С. 132-135.

6. Зобкова, Н.В. Использование остекления с низкоэмиссионным покрытием для повышения энергоэффективности зданий / Н.В. Зобкова, И.И. Иванов, В.Д. Горелкин // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона, 2018. – № 2(9). – С. 337-340.

ОРГАНИЗАЦИЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Зобкова Н.В., Усенин С.В., Гриняев А.Д.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Своевременный контроль технического состояния зданий и сооружений, проверка исправности строительных конструкций и частей зданий имеют большее значение при их эксплуатации. Преждевременный износ строительных конструкций зданий и сооружений можно предотвратить регулярным визуальным, а при необходимости, и инструментальным контролем.

Плановые осмотры зданий и сооружений проводятся два раза в год весной и осенью. В результате весеннего визуального планового осмотра производственного корпуса специалистами ОКС предприятия ООО «Завод Саратовгазавтоматика» были выявлены ряд дефектов частей здания, что вызвало необходимость проведения технического обследования строительных конструкций и других частей здания специализированной проектной организацией.

Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений проводилось в соответствии с СП [1].

Целью обследования являлось определение фактического состояния основных несущих строительных конструкций здания производственного здания с выдачей рекомендаций по их усилению и дальнейшей безаварийной эксплуатации.

Обследование строительных конструкций осуществлялось на основе задания и включало в себя следующие этапы.

- Предварительный визуальный осмотр с целью ознакомления с объектом исследования, выявления возможных аварийных участков, а также определения действительного возраста, наличия технической документации, предполагаемых изменений в эксплуатации объекта.

- Составление программы обследования с обязательными мероприятиями по технике безопасности при проведении работ.

- Геалагічныя і гідрогеалагічныя даследаванні, дазваляючыя ацаніць стан грунту асновавання, глыбіню заложэння фундаменту, а таксама канструктыўнае рашэнне фундаменту.

- Геадэзічныя работы па вызначэнні становішча будынка і яго частак (адрозкі, крыны і г.д.), у тым ліку і вызначэнне памераў агульных памераў будынка.

- Абымер канструкцый, узлоў і элементаў з мэтай вызначэння фактычных памераў. Складанне абмерочных чарцяжоў канструкцый, узлоў, планаў, разрезаў, фасадаў будынка. Выкананне фотакфіксацыі.

- Дэтальны агляд элементаў будынка з выяўленнем износу, дэфектаў, павреждзенняў канструкцый, складаннем дэфектных карт. Агляд прычын.

- Складанне заключэння аб тэхнічным стане канструкцый на аб'ект даследавання.

- Разробка рэкамендацый па далейшай нармальнай эксплуатацыі канструкцый.

Бібліяграфічны спісак

1. СП 13-102-2003. Правіла абследавання несучых будавельных канструкцый будынкаў і саоруждзенняў. – М.: ФГУП ЦПП, 2003. – 31 с.

РАСЧЁТ НДС МНОГОЭТАЖНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЗДАНИЯ С УЧЁТОМ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ И ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

Золотов Н.В., Теличко В.Г.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Інтэнсіўнае развіццё тэхналогій і навука аб матэрыялах у апошняе дзесяцігоддзе, а таксама ўсе павышаючыяся патрабаванні да эканамічнасці і надзейнасці будавельных канструкцый прад'яўляюць сер'ёзныя патрабаванні да развіццю будавельнай механікі. Пры дэтальным даследаванні дэфармавання некаторых шырока існуючых у інжынернай практыцы матэрыялаў, такіх як бетон, было ўстаноўлена, што іх паводзіны значна адрозніваюцца ад звыклых прадстаўленняў. Дэфармацыйныя і трываласць характэрыстыкі такіх матэрыялаў праяўляюць чутлівасць да віду рэалізаванага ў кропцы напружанага стану, прычым пры эксплуатацыйных нагрузках залежнасць паміж напружаннямі і дэфармацыямі аказваюцца сутэсна нелінейнымі. Для вызначэння напружана-дэфармаванага стану нелінейных разнасопротывляючыхся

материалов был предложен ряд определяющих соотношений [1]. Однако, практически все указанные модели имеют существенные недостатки, ограничивающие их применения для расчёта конструкций, находящихся в сложном напряжённом состоянии. Поэтому в данной работе используется вариант уравнений состояния изотропных разносопротивляющихся материалов, базирующийся на методике нормированных пространств напряжений [1].

Важно иметь в виду тот факт, что для учёта всего комплекса эффектов, связанных с моделированием поведения нелинейных разносопротивляющихся материалов, разрушения материала в форме трещинообразования, пластических деформаций в арматуре необходимо совершенствовать соответствующую расчётную базу, так как, существующие пакеты прикладных программ, а также известные математические модели далеко не всегда удовлетворяют требованиям для проведения расчётов с необходимой точностью. Поэтому, в данном исследовании предложен вариант гибридного конечного элемента (КЭ), с учётом физически нелинейного поведения материала и его разрушения в форме образования трещин [1]. Создание новых математических моделей для описания механического поведения конструкций из железобетона с наиболее полным учётом усложнённых свойств, а также совершенствование соответствующих расчётных моделей, без сомнения, является актуальной задачей строительной отрасли и механики деформируемого твёрдого тела.

Как показано в работе [2] достаточно эффективными для расчёта железобетонных конструкций являются гибридные КЭ, Р. Куком получены две модификации гибридных КЭ с тремя степенями свободы в узле. Непосредственное применение конечных элементов Р.Кука к расчёту железобетонных пространственных конструкций показало, что они не учитывают продольные усилия и перемещения в срединной поверхности, а также не позволяют определить вектор обобщённых сил в центре КЭ достаточно просто и точно [2]. Поэтому была разработана модификация гибридных КЭ с пятью степенями свободы в узле и матрицей жёсткости, полученной непосредственно для произвольного плоского треугольного элемента. На основе выбранных определяющих соотношений рассмотрена модель гибридного изгибного треугольного конечного элемента с 5-ю степенями свободы в узле, учитывающая продольные усилия и деформации поперечного сдвига, позволяющая просто и эффективно исследовать НДС конструкций произвольной

геометрии. Процедуры связанные с получением матрицы жёсткости гибридного конечного элемента подробно описаны в работе [2].

Очевидно, что математическая модель определения НДС армированных плит из которых состоит здание должна достаточно точно учитывать специфические особенности взаимодействия сложной среды «бетон-арматура» на различных стадиях, быть вполне обозримой и практически реализуемой. Данная модель не может быть полностью свободной от дополнительных технических гипотез, в частности, считается справедливым следующее [2]:

1) нагружение простое, деформация активная, деформации ползучести бетона не рассматриваются;

2) размеры плит сооружения в плане велики по сравнению со средним расстоянием между арматурными стержнями, арматура моделируется размазанным слоем с учётом коэффициента армирования слоя;

3) в виду неоднородности конструкции по толщине, плиты расчленяются на ряд фиктивных слоёв:

а) не армированные (бетонные) слои без трещин;

б) армированные (железобетонные) слои без трещин;

в) не армированные (бетонные) слои с трещинами;

г) армированные (железобетонные) слои с трещинами;

д) армированные (железобетонные) слои с пересекающимися трещинами.

4) Напряжения в пределах армированных слоёв элемента определяются как сумма напряжений в бетоне и арматуре, а за условие совместности бетона и арматуры принимается равенство деформаций этих двух материалов;

5) срединная поверхность плиты представляется сетью гибридных конечных элементов с учётом разбиения по толщине на ряд фиктивных слоёв;

6) жест костные характеристики, рассчитанные для центра фиктивного слоя данного конечного элемента, распространяются на весь слой;

7) критерий прочности бетона в каждом фиктивном слое принимается согласно условию П.П. Баландина [2];

8) трещины в области треснувшего фиктивного слоя в пределах конечного элемента считаются сквозными и параллельными друг другу;

9) при наличии трещин бетон в пределах фиктивного слоя моделируется трансверсально-изотропным телом с плоскостью изотропии, параллельной плоскости трещин. Моделирование фиктивных слоёв подробно рассмотрено в работе [3].

Для демонстрации особенностей разработанной авторами модели была решена задача об определении НДС здания. Здание содержит 7 этажей имеющих одинаковую планировку, размеры здания в плане 13,25 м на 18,55 м. Высота этажей 3 м. В качестве основного материала здания использовался бетон с пределом прочности на сжатие $R^- = 28,4$ МПа [1, 3]. Армирование плит перекрытия принято стержнями А400 диаметром 14 мм в виде сетки расположенной симметрично в сечении плиты (защитный слой 35 мм, предел текучести $\sigma_p = 400$ МПа), армирование пилонов принято стержнями А400 диаметром 12 мм в виде двух сеток симметрично расположенных в сечении пилона (защитный слой 30 мм, предел текучести $\sigma_p = 400$ МПа). Учитывалась ветровая нагрузка и нагрузка на перекрытия. Произведён расчёт вертикальных прогибов в перекрытиях здания в характерных точках. Прогибы представлены в сравнении с аналогичными расчётами, выполненными в STARK ES, ANSYS и LIRA-SAPR.

Проведённый численный эксперимент по решению задачи об определении напряжённо-деформированного состояния здания позволяет объективно утверждать, что данная модель обладает рядом преимуществ перед существующими, реализованными в популярных САПР. Модель позволяет учесть разносопротивляемость материала, образование трещин, пластические деформации в арматуре, построенный конечный элемент получен в форме удобной для его программной реализации, что и было продемонстрировано в данной работе. Не учёт явления разносопротивляемости, а также эффектов, связанных с трещинообразованием в железобетонных конструкциях, приводит к значительным погрешностям при вычислении основных характеристик напряжённо-деформированного состояния строительных конструкций. Для получения достоверных результатов инженерных расчётов и для предотвращения возникновения аварийных состояний элементов конструкций и сооружений необходимо учитывать влияние усложнённых свойств материалов в полном объёме.

Библиографический список

1. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.

2. Теличко, В.Г. Гибридный конечный элемент для расчёта плит и оболочек с усложнёнными свойствами / В.Г. Теличко, А.А. Трещёв. // Известия вузов. Строительство, 2003. – № 5. – С. 17-23.

3. Теличко В.Г. Расчёт напряжённо-деформированного состояния трубчатых железобетонных оболочек при чистом кручении методом конечных элементов / В.Г. Теличко, А.А. Трещёв. // Железобетонные конструкции: Исследования, проектирование, методика преподавания. Сборник докладов Международной научно-методической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения В.Н. Байкова. – М.: МГСУ. – 2012. – С. 409-416.

К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Калякин А.М., Нанаджанов Д.Р., Зивьев Д.Е., Нерсиян Э.А.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Так называемый пассивный способ моделирования приземного слоя, состоящий в размещении элементов шероховатости перед рабочей частью в аэродинамической трубе (АДТ) часто используется при моделировании ветрового воздействия на здания и сооружения. При его использовании одновременно образуется эпюра набегающего потока и степень турбулентности, близкие к натурным.

Одним из недостатков этого способа является то, что заранее трудно предвидеть результат его воздействия на поток, имеется ввиду точные значения. Это происходит по причине влияния на форму эпюры скорости и на степень турбулентности сразу нескольких независимых параметров.

Эти параметры следующие:

- форма выступов шероховатости;
- размеры выступов (точнее отношений D/d , где D – размер канала трубы, d – размер выступа);
- расстояние от начала системы выступов до модели; т.е. расстояние, на котором параметры набегающего потока изменяются без влияния выступов;
- порядок расположения выступов (коридорный, шахматный и т.д.)
- линейные размеры, определяющие расположения;
- длина системы выступов.

Физическое содержание этого процесса, видимо, такое – на линии отрыва выступов создаётся вихревой слой и вихри, его составляющее отрываются и сносятся потоком. В результате над шероховатостью со-

здаётся вихревой слой (турбулентный пограничный слой с повышенной степенью турбулентности). Этот слой преобразуется в вихри меньших размеров, в результате чего поток делается однородным по содержанию вихрей.

По некоторым перечисленным выше пунктам дадим краткие комментарии.

Расстояние от модели до начала системы выступов играет ту же роль, что и начальный участок в трубах; т.е. поток самонастраивается после исключения асимметрии. Турбулентный программный слой продолжает нарастать уже при одинаковых условиях на границах. Таким образом, этот параметр один из самых важных и иногда следует укорачивать систему выступов, чтобы при данной длине начала расстояния до модели увеличить.

Длина системы выступов не играет, видимо, основной роли, т.е. начиная с некоторой длины ничего не меняется и главное определить минимальную длину всей системы.

Чтобы рассмотреть другие параметры, возможно, представить систему выступов не с точки зрения внешней задачи обтекания, а как внутреннюю задачу течения в канале с повышенной шероховатостью; При этом, чем большая сила будет действовать на систему со стороны потока, тем больше энергии транзитного потока будет преобразовываться в энергию вихревого слоя.

При этом очевидно, что потери механической энергии при заданной площади миделевого сечении выступов неодинаковы для элементов различной формы.

Из выражения [1]

$$h_{nom} = \frac{F \cdot V}{\rho g Q}, \quad (1)$$

где h_{nom} – удельные потери механической энергии, имеющие смысл местных потерь при обтекании систем препятствий; F – сила, действующая на систему со стороны потока; V – скорость набегающего потока; Q – расход потока.

Следует что потери (и, возможно, та часть их, которая превращается в энергию вихря) зависит от коэффициента сопротивления выступа C_a .

Тогда величину кинетической энергии, перешедшей в энергию вихревого слоя с образованием турбулентного приземного слоя, возможно, определить как

$$E_{кин} \cdot f(C_a), \quad (2)$$

Причём функция $f(C_{\Sigma})$ монотонна, с увеличением C_{Σ} она увеличивается, с уменьшением C_{Σ} – уменьшается, оставаясь, все время меньше единицы.

Функция $f(C_{\Sigma})$ безразмерная и зависит также от безразмерных величин, в частности, выступы должны быть плохо обтекаемой формы с возможно большим значением C_{Σ} , чтобы линия отрыва потока были фиксированы и зарождения вихрей происходило интенсивно. Порядок расположения выступов – шахматный, чтобы исключить проходные коридоры или скоростные струи, порождающие неоднородность.

На величину $f(C_{\Sigma})$ очень заметно влияет расстояние между выступами в направлении течения, известные в гидравлике как расстояния взаимного влияния. Оно требует поиска оптимального значения, так как при малом расстоянии на последующий выступ будет воздействовать застойная зона от предыдущего. При большом расстоянии на данной площади выступов будет малое количество. Таким образом, расстояния должны быть такими, чтобы функция $f(C_{\Sigma})$ имела максимальное значение.

Так как параметров, от которых зависит формируемые системой шероховатости эпюра скоростей и степень турбулентности несколько, то нашей задачей было выбрать те из них, которые влияют в наибольшей степени.

Для решения этой задачи очевиден следующий приём: все параметры, кроме одного, в опытах фиксировались, а изменялся он один и т.д.; аналогично относительно остальных параметров.

Эксперименты по изучению влияния различных параметров на формирование эпюры скоростей и степени турбулентности проводились в лаборатории кафедры «Теория сооружений и строительных конструкций» Саратовского Государственного Технического Университета имени Гагарина Ю.А.

Базовой установкой служила аэродинамическая труба малых скоростей замкнутого типа с открытой рабочей частью. Общая длина канала трубы составляла 26 метров, сечение рабочей части прямоугольное со сторонами

1,1×1,1 м; длина рабочей части 1,1 м. Шестилопастной вентилятор с диаметром колеса 0,8 м приводился в действие электродвигателем мощностью 18,5 квт. Для плавного регулирования числа оборотов двигателя применялся частотный регулятор.

В качестве элементов шероховатости использовались кубики с рёбрами $d_1 = 5,0$ см и $d_2 = 2,0$ см из алебаstra. Расположение элементов во всех опытах шахматное.

Опыты проводились с тремя типами размещения элементов (во всех типах расположения расстояние между продольными рядами равнялось d , т. е. кубики полностью заслоняли просвет между продольными рядами):

№1 – расстояния между гранями соседних кубиков $d_1 = 5,0$ см;

№ 2 - расстояния между гранями во всех поперечных рядах $d_1 = 5,0$ см; расстояние между гранями в продольных рядах $3d = 15$ см

Результаты экспериментов. В опыте с геометрией № 1 расстояние от центра рабочей части до первого ряда изменялось на $6d$ (всего в системе шероховатости было 17 рядов); при этом на эпюре скорости на значения α практически остались постоянными. На системе шероховатости с геометрией №2 были выполнены опыты по влиянию скорости потока (при других оборотах вращения вентилятора).

В опытах расстояние от центра рабочей части до первого ряда равнялось $35d_1$.

При средней скорости 5,8 м/с наблюдались плавные кривые распределения скорости и α , а при скорости 3,5 м/с поток не успевал полностью выравняться. Производился опыт с размещением по геометрии № 2 с тем отличием, что на каждой большой кубик с $d_1 = 5,0$ см ставился сверху кубик с $d_2 = 2,0$ см. Всего поперечных было 9 рядов; расстояние от центра рабочей части до первого ряда $22d_1$.

Ниже приведена таблица значений скорости и величины степени турбулентности в зависимости от расстояния до нижней плоскости. Расстояние 0 в таблице на самом деле равно 0,5 см.

Таблица 1 – Значения скорости и степени турбулентности в зависимости от расстояния до нижней плоскости рабочей части

H, см	V, м/с	α
0	2,1	0,21
10	4,084	0,18
20	5,094	0,089
40	5,67	0,085
60	5,85	0,1
80	5,0053	0,1

Ниже приведены графики, построенные по табличным данным.

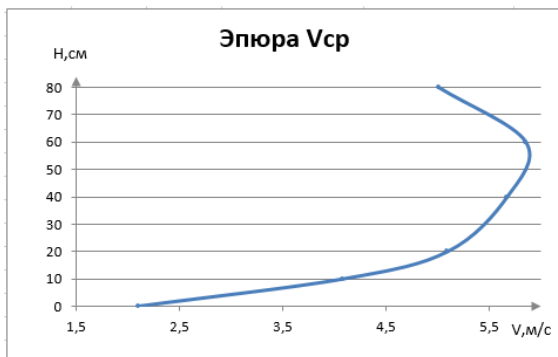


Рис.1. Осреднённая скорость

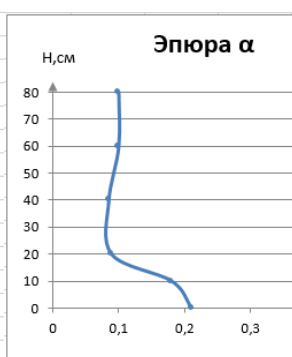


Рис.2. Степень турбулентности

Выводы по данной работе основаны на небольшом числе опытов и носят предварительный характер. Они относятся к шероховатости в форме кубов с шахматным расположением и отношением $H/d_1 = 20$, где H – высота рабочей части.

Установлено:

- заметное влияние оказывают расположение от места установки модели до начала системы шероховатости;
- расход воздуха (средняя скорость);
- расстояние между выступами в продольных рядах.

По нашему мнению, перед началом продувки моделей следует изучить основные свойства шероховатости в смысле распределения скорости и α при скоростях продувки.

Библиографический список

1. Калякин, А.М. Модель процесса размыва перед препятствием типа мостовой опоры на основе представления о вихре / А.М. Калякин // Совершенствование методов гидравлических расчётов водопропускных и очистных сооружений: Межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 1997. – С. 13-43.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Калякин А.М., Чеснокова Е.В., Сауткина Т.Н.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Несмотря на успешное решение многих задач моделирования ветрового воздействия на здания некоторые детали этого требуют пояснения, а некоторые – детального изучения.

Задачи моделирования обычно заключаются в определении давлений на некоторых участках площади натуральных объектов с целью в последующем определить:

- силовое воздействие воздушного потока на здания;
- характер и степень аэрации в нем.

Обычно при моделировании ветрового воздействия на здания и сооружения коэффициент геометрического подобия α_L равный

$$\frac{L_H}{L_M} = \alpha_L, \quad (1)$$

где L_M и L_H – соответственные размеры натуре и модели, принимает значение десятков и сотен.

Если следовать классической теории моделирования, то скорости в соответственных точках натуре и модели должны удовлетворять условию кинематического подобия.

$$\frac{L_H}{L_M} = \alpha_L \cdot \alpha_t^{-1} = \alpha_L. \quad (2)$$

В качестве примера представим, что $\alpha_L = 100$ (обычно он больше) и максимальная скорость ветра $V_H = 40$ м/с. Тогда на модели $V_M = 0,4$ м/с

Если моделировать $V_H = 2$ м/с (если, конечно, такое необходимо), то на скорость набегающего потока на модели ($V_M = 0,02$ м/с) может повлиять конвекционное течение, т.е. начинают действовать другие силы.

С другой стороны, равенство чисел Рейнольдса $Re_M = Re_H$ в данном случае приводит к соотношению

$$V_H L_H = V_M L_M \quad (3)$$

или

$$\frac{V_H}{V_M} = \alpha_L^{-1}, \quad (4)$$

что противоречит условию (2).

Хорошо известно, что равенство $Re_M = Re_H$ необходимо соблюдать при условии существования ламинарного режима на натуре и на модели с учётом подобия сил трения и сил инерции.

В конечном счёте, для моделирования силового воздействия при турбулентном режиме необходимо равенство чисел Эйлера, которое сводится к равенству коэффициентов лобового сопротивления на натуре и на модели.

Приближенное равенство их возможно в автомодельной области по числу **Re** (обычно модели зданий представляют собой плохообтекаемые тела с фиксированными границами отрыва).

Необходимо отметить, что в результате опытов в аэродинамических трубах выяснилось, что коэффициент лобового сопротивления слабо зависит от степени турбулентности α для плохообтекаемых тел, но при моделировании все же стремятся добиться равенства и абсолютного значения α и одинакового распределения его по высоте на натуре и на модели.

Таким образом, при определении давления на модели важным условием является ее обтекание в автомоделльной по числу Re зоне.

Условное равенство $C_{dM} = C_{dH}$ обычно не выполняется точно, так как во-первых график изменения C_d от Re не является идеальной горизонтальной линией, а создание скоростей в аэродинамических трубах, чтобы выполнялось (4) практически невозможно.

Во-вторых, необходимо при переносе с модели на натуру считается с таким возможным фактом, что C_d природы отличается от C_d модели по причине существования градиентных течений вдоль поверхностей модели и природы. Эти течения существуют в виде вихрей, движущихся сверху вниз, т.е. если эпюра скорости набегающего потока выражена обычной кривой с нулевой скоростью у земли, то вихри, возникающие около твёрдой вертикальной поверхности здания, перемещаются от больших скоростей к меньшим, и у самой земли расходятся в радиальных направлениях. Результаты экспериментов по обтеканию цилиндров и данные о вихрях приведены в работе [1]. В ней, в частности, приводятся значения чисел Струхала для частоты нисходящих вихрей. Возможно, что на генерирование и движение вихревых образований оказывает влияние натуральная шероховатость здания в виде балконов, остекления и т.д.

Сам процесс образования и движения вихрей зависит от формы эпюры скорости и от абсолютных её значений. Некоторые результаты относительно динамики этих вихрей приведены в [2, 3].

Степень турбулентности: физический смысл степени турбулентности известен – это отношение кинетической энергии пульсаций к кинетической энергии, подсчитанной по осреднённой скорости в данной точке (на данной высоте над плоскостью отсчёта).

Известным и удобным для вычислений является выражение для степени турбулентности α в виде

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (\bar{v} - v_i)^2}}{\bar{v}}. \quad (5)$$

Отношение степени турбулентности α , природы α_H и модели α_M как следует из (5) равно

$$\frac{\alpha_H}{\alpha_M} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{\sum \bar{V}_H^{-2} \left(1 - \frac{V_{iH}}{\bar{V}_H}\right)^2}{\sum \bar{V}_M^{-2} \left(1 - \frac{V_{iM}}{\bar{V}_M}\right)^2}}. \quad (6)$$

При преобразованиях для получения (6) было принято $n_H = n_M$ – число измерений, а также $V_H = \alpha_L \cdot V_M$.

Для того, чтобы (6) было близко к единице, необходимо

$$\frac{V_{iH}}{V_H} \approx \frac{V_{iM}}{V_M}, \quad (7)$$

но строго говоря, последнее соотношение не имеет явного физического смысла, т.к. V_{Hi} и V_{Mi} – мгновенные скорости. Тем не менее в аэродинамических трубах при моделировании обтекания зданий стремятся приблизить α_M к α_H созданием шероховатости для моделирования приземного слоя.

При моделировании приземного слоя можно ожидать, что кривая зависимости α от расстояния до нулевой плоскости является монотонной.

Для оценки α были проведены эксперименты в аэродинамической трубе в лаборатории кафедры ТСК Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.; она относится к трубам малых скоростей замкнутого типа с открытой рабочей частью. Рабочая часть имеет в сечении размеры $1,1\text{м} \times 1,1\text{м}$.

В опытах на нулевую плоскость – нижнюю плоскость канала трубы укладывалась в шахматном порядке искусственная шероховатость в виде кубиков с ребром 5 см. Измерение скоростей производилось тепловым анемометром testo 425. При максимальной скорости в осевом сечении 5,2 м/с наблюдалась максимум α на нижней плоскости, равный 0,26, а минимум находился близко к середине, т. е. на высоте ≈ 40 -50 см и он был равен в среднем 0,06. Таким образом, в данном случае кривая зависимости α не представляла монотонную функцию, чему видимо мешала верхняя плоскость канала.

Библиографический список

1. Belik, L. The Secondary Flow about Circular Cylinders Mounted Normal to a Flat Plate / L.Belik // Aeronautical Quarterly, 1982. – Vol. 24. – Pp. 47-54.

2. Калякин, А.М. Метод анализа размерностей в задачах механики жидкости / А.М. Калякин, Е.В. Чеснокова. – Саратов: СГТУ, 2015. – 80 с.

3. Калякин, А.М. Обобщённая модель обтекания препятствия открытым турбулентным потоком / А.М. Калякин, Е.В. Чеснокова // Инженерно-строительный журнал, 2015. – № 3. – С. 49-56.

ВЛИЯНИЕ ПРОПИТКИ ГЕРМЕТИКОМ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЖАТИИ И ИЗГИБЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Клепиков А.С., Зимнухов А.Н., Ярцев В.П.
ТГТУ, г. Тамбов, Россия

Для испытания при сжатии готовили образцы кубической формы размером 5x5x5 см, при изгибе призмы размером 12x2,5x2,5 см. Пропитку в битумно-полимерном герметике БП-Г-35 осуществляли в специальной ёмкости в течение 120 минут.

Перед испытанием образцы выдерживали 60 минут при постоянных температурах 20 ± 2 °С. Образцы горячего и тёплого асфальтобетона выдерживали в течение 1 ч в водяной бане, образцы холодного асфальтобетона – 2 ч в воздушной среде в ёмкости того же объёма.

Предел прочности при сжатии и изгибе асфальтобетонных образцов определяли на прессе с механическим приводом при скорости деформирования образца $3,0 \pm 0,5$ мм/мин. Пресс снабжён силоизмерителем, позволяющим определять прочность при сжатии и изгибе с погрешностью 0,05 МПа ($0,5$ кгс/см²).

Для уменьшения потерь тепла образцов при соприкосновении с металлическими плитами между образцом и плитами прокладывают плотную бумагу.

За результат определения прочности принимали среднее арифметическое значение испытания трёх образцов. Расхождение между результатами испытаний отдельных образцов не должно превышать 10%. Полученные экспериментальные данные представлены в таблице.

Таблица 1 – Прочность асфальтобетона до и после пропитки

Асфальтобетон	Температура окружающей среды, °С	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при статическом изгибе, МПа
Без пропитки	20	2,8	25,6
Пропитанный герметиком		2,8	27,7

Продолжение таблицы 1

Без пропитки	50	2,33	16
Пропитанный герметиком		1,57	20,2

Из табл. 1 видно, что при повышении температуры с 20⁰С до 50⁰С прочность падает почти в два раза. При этом пропитка герметиком оказывает положительное влияние на прочность асфальтобетона с повышением температуры, что, по-видимому, связано с повышением активности герметика.

ЗАЩИТА МОСТОВ ОТ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ

Козырева Л. В., Биринова А.А.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Пропуск ледовой нагрузки при эксплуатации мостовых переходов очень ответственный период, требующий как подготовительных мероприятий, так и конкретных работ. Эти вопросы особенно актуальны для северных и сибирских рек, где при большой толщине льда и размеров льдин, ледовая нагрузка часто бывает опасной для мостов. Различные воздействия льда на опоры и регулиционные сооружения, такие как заторы, зажоры, шуга и сам ледоход, наносят существенные повреждения и могут привести к сносу моста.

К мероприятиям на подготовительном этапе можно отнести околку льда, в результате которой по периметру опор вырубается борозды, устройство продольных и поперечных полос по осям опор и параллельно мосту, образование майн – участков, освобожденных от ледяного покрова, которые устраиваются с применением подрывных работ. Для зарядов применяют аммиачно-селитровые взрывчатые вещества (аммониты и аммоналы). Заряды погружаются в лунки под лёд, предварительно привязанные к шестам или подвешиваются к рейке. Расстояние между зарядами рассчитывается, вес и расстояние уточняется пробными взрывами.

Во время ледохода на подходах к мосту необходимо выполнить дробление больших льдин до размеров, безопасных для пропуска в пролёты моста. Большие льдины подрывают зарядами и направляют в отверстие моста баграми и пешнями, не давая им сталкиваться с опорами. Льдины, застрявшие между опорами, немедленно раскалывают. При заторе льда в нём создают каналы, по которым постепенно пропускают льдины.

При проходе высоких вод необходимо следить за размывами дна у опор моста. Обнаруженные размывы забрасывают камнем весом более 10кг или мешками с песком. Их погружение на дно ведётся по лоткам, опущенным в воду на максимальную глубину и насколько возможно приближенным к опоре (если это местный размыв).

Для обеспечения безаварийной работы мостового перехода в период половодья к пропуску льда и высоких вод службы по эксплуатации должны быть заблаговременно подготовлены. Необходимо использовать прогнозы гидрометрических служб для определения времени начала паводка и ледохода и их интенсивности.

КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МОСТОСТРОЕНИИ

Козырева Л. В., Козлова Е.В.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Городские эстакады и многоуровневые транспортные развязки имеют свои особенности проектирования, обусловленные их расположением в плотной городской застройке, характеризующиеся стесненностью местных условий и повышенными требованиями к безопасности движения транспорта и пешеходов как по самим сооружениям, так и в уровне городских улиц и площадей. Эти условия часто требуют от проектировщика принятия нестандартных решений, поиску новых подходов к проектированию и внедрению новых материалов.

К традиционным материалам используемых при строительстве объектов транспортной инфраструктуры относятся железобетон и металл, которые позволяют создать разнообразные конструкции малых, средних и больших пролётов. Однако в последнее время в практику мостостроения внедряются новые долговечные и надёжные материалы- композиты. Композитные материалы для строительства городских эстакад – это стеклопластиковые или базальтопластиковые профили. Можно выделить четыре основных направления использования полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве и конкретно в мостостроении:

- изготовление целых мостовых сооружений или их элементов (пролётных строений, плит проезжей части, тротуарных настилов, и т.д.) из полимерных композиционных материалов;

- применение неметаллической композитной арматуры для армирования бетонных конструкций, сюда же можно отнести и оболочки из полимерного композиционного материала в трубобетонных конструкциях;

-применение композитных материалов для усиления существующих металлических и железобетонных мостовых сооружений;

-применение композитных материалов в малонагруженных конструкциях (перильные ограждения, водоотводные лотки и т.д.).

К основным преимуществам эстакад из композитных профилей по сравнению со стальными или железобетонными конструкциями следует отнести:

1. Невосприимчивость к коррозии и агрессивным химическим средам, устойчивость к плесени и вандализму.

2. Композитные материалы не гниют и не деформируются при воздействии высоких или низких температур.

3. Простота монтажа даёт возможность привлекать меньше рабочих рук и устанавливать пролёты за короткое время.

4. Меньший вес по сравнению с бетонными и стальными конструкциями, который снижает нагрузку на опоры.

5. Невысокая стоимость. Она не превышает стоимость железобетонной конструкции. Кроме того, отсутствие затрат на обслуживание после возведения делает совокупную стоимость ещё меньшей, чем при использовании стандартных материалов.

6. Большой выбор архитектурных решений, позволяющий создавать уникальные с эстетической точки зрения мосты.

7. Пожаробезопасность, обеспеченная невоспламеняемыми элементами, входящими в состав.

8. Отсутствие необходимости специального ухода, дополнительной покраски и нанесения защитного покрытия.

Обязательными требованиями к материалу мостовых пешеходных конструкций является негорючесть и «вандалоустойчивость».

МОНОРЕЛЬСОВЫЕ ЭСТАКАДЫ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ РОССИИ

Козырева Л.В., Кравцов С.О.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Городские дороги, не рассчитанные на возросшую интенсивность движения, «захлёбываются» от количества транспорта, проходящего по ним, и не всегда способны пропустить новые транспортные потоки. Для решения данной проблемы наряду со строительством новых автомобильных дорог, развязок, эстакад, путепроводов и других транспортных сооружений, для организации пассажироперевозок в крупных городах, для связи отдалённых районов с центральной частью города и

між сабой, найбольш оптымальнымі з'яўляюцца монорельсавыя эстакады.

Монорельсавыя эстакады адносяцца да надземнага транспарту і маюць многа дасційнасць.

- Монорельсавыя эстакады забяспечваюць высокую скорасць руху і высокую прапускную здольнасць.

- На монорельсавых трасах дасягаецца комплексная бяспаснасць руху, так як адсутваюць перасячэння з іншымі відамі транспарту.

- Монорельсавыя эстакады вельмі кампактныя і могуць прокладвацца ў самых розных умовах і шчыльнай гарадской забудове.

- Монорельсавыя эстакады экалагічныя, прымяненне электратягі і пневмацін зніжае ўзровень шуму ў горадзе і не павышае забрудненасць асяроддзя.

- Страіцельства монорельсавых дарог дазваляе захаванне існуючых памераў гарадской дарожнай сеткі.

- Адным з галоўных дасційнасць монорельсавых эстакадаў з'яўляецца іх адносіцельная дэшевизна страіцельства і эксплуатацыі.

Монорельсавыя эстакады цэласообразныя ў гарадах з населеннем не менш 1 млн. чалавек, большасць абласных цэнтраў Расіі разам з прыгарадамі маюць такую колькасць. Поезд монорельсавой дарогі, так і поезд метраполітэна, складаецца з некалькіх вагонаў і можа перавозіць буйное колькасць пасажыраў.

Канструкцыя апор монорельсавых эстакадаў дазваляе вар'іраваць у шчыльнай гарадской забудове. Пры вузкіх вуліцах можна выкарыстаць Г-образную опору, у выпадку будавання монорельсавой эстакады над невялікім каналам ці рэкай, цэласообразна выбраць П-образную опору, пры уладкаванні двухпутнага монотранспарту опора можа быць Т-образная. Канструкцыя монорельса залежыць ад ходовай часткі вагона і можа выконвацца з жалезабетона, металу ці сталжалезабетона. Монорельсавыя эстакады з'яўляюцца рацыянальным і індустрыяльным падыходам да вырашэння транспартнай праблемы ў буйных гарадах.

ВЫБОР ПРОГИБА ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ НАДВИЖКЕ

Козырева Л.В., Никитин Н.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Продольная надвигка пролётных строений, широко применяемая в отечественном и зарубежном мостостроении, является очень эффек-

тивным методом при строительстве неразрезных систем средних и больших пролётов. Метод позволяет выполнять работы по строительству мостовых сооружений на большой высоте, не занимая подмостовое пространство, что актуально для мостов на судоходных реках при большой высоте промежуточных опор и при строительстве городских транспортных сооружений над действующими магистралями. Сборка пролётного строения выполняется на стапеле из блоков или секций заводского изготовления и не требует дорогостоящего оборудования.

Значительные деформации и напряжения в конструкции пролётного строения в процессе надвигки при больших пролётах мостов могут быть уменьшены различными известными способами. Самыми распространёнными и эффективными являются- монтаж пролётного строения с применением аванбeka и шпренгельных систем.

Аванбек – это вспомогательная конструкция, прикрепляющаяся впереди надвигаемого пролётного строения для уменьшения усилий в нем на стадии монтажа. Длина аванбeka назначается в зависимости от величины пролёта.

Шпренгельные системы применяются в двух вариантах- «верхние» и «нижние». В верхнем шпренгеле система состоит из пилона, надстроенного над пролётным строением, и прикреплённым к нему тросам, обеспечивающим жёсткость конструкции. В «нижнем» шпренгеле поддерживающая конструкция располагается на ростверке опоры, к которой перемещается пролётное строение, или на плавсредствах при большой величине надвигаемого пролёта.

Продольная надвигка может выполняться с использованием временных опор в том случае, когда это экономически целесообразно.

Выполнен аналитический расчёт продольной надвигки пролётного строения длиной $l=126$ м и расчёт в ПК MIDAS Civil, основанной на методе конечных элементов (МКЭ).

При определении прогиба консоли надвигаемого пролётного строения от равномерно распределённой постоянной нагрузки учтены деформации прилётного строения в процессе надвигки, определены углы поворота сечения от прогиба в предыдущем пролёте и от прогиба консоли.

При расчёте в ПК MIDAS Civil были проанализированы напряжения в элементах прилётного строения в процессе надвигки для самого опасного надпорного сечения при максимальной длине консоли надвигаемого прилётного строения. Расчёты показали, что напряжения

во всех конструктивных элементах главной балки находятся в допустимых пределах.

Использование программных средств в расчётах позволяет наиболее полно проанализировать напряжённое состояние и деформации прилётного строения в процессе надвижки.

НАДЁЖНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Козырева Л.В., Перов М.М.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Железобетонные мосты являются самыми многочисленными среди мостовых сооружений с малыми и средними пролётами, и от их эксплуатационного состояния в том числе зависит безопасность на наших дорогах. Построенные 50-70 лет тому назад, многие железобетонные мосты, эстакады и путепроводы находятся в неудовлетворительном состоянии.

Причинами снижения эксплуатационной пригодности железобетонных мостовых сооружений является целый ряд факторов: физический износ; снижение грузоподъёмности мостов, связанное с увеличением величины временных подвижных нагрузок; ошибки проектирования; низкая прочность строительных материалов и плохое качество выполненных работ; дефекты, полученные в процессе эксплуатации (плохое состояние водоотвода, деформационных швов, въездов, дорожной одежды и пр); негативное воздействие окружающей среды; ошибки проектирования при реконструкции мостов.

Важным фактором, влияющим на работоспособное состояние железобетонных мостовых сооружений, являются коррозионные процессы в железобетонных конструкциях, которые, как правило, развиваются в результате негативного воздействия окружающей среды. Железобетонные конструкции мостовых сооружений подвергаются нескольким видам коррозии: карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии, коррозионному растрескиванию. Наступление коррозии в железобетонных конструкциях мостовых сооружений в большинстве случаев происходит в результате параллельно протекающих процессов: карбонизации бетона защитного слоя; проникновения к арматуре хлоридов, чаще всего поваренной соли, которая попадает на поверхность конструкции в качестве антиобледенителя.

Для увеличения надёжности и долговечности железобетонных мостов необходимо обеспечить качественную их эксплуатацию, при ко-

торой появляющиеся дефекты и повреждения сразу бы фиксировались и своевременно устранялись. При строительстве, реконструкции и ремонте железобетонных мостов следует их защищать от коррозии путём нанесения специальных лакокрасочных покрытий. Необходимо продолжать исследования и изучение вопросов, влияющих на надёжность и долговечность железобетонных конструкций с учётом требований морального и физического износа в зависимости от условий их работы и внешних воздействий, качества материалов и способа изготовления.

При проектировании мостовых сооружений необходимо предусматривать возможность дальнейшей реконструкции прилётного строения и опор, возможности их усиления при увеличении нагрузок, что обеспечит надёжную эксплуатацию этих сооружений и более длительный срок службы.

Эксплуатационная система содержания мостов требует разработку и освоение специальных машин для осуществления осмотра, проведения текущего ремонта и реконструкции. В вопросах долговременной работы мостовых сооружений особое внимание следует уделить равной надёжности всех элементов моста в зависимости от сроков физического и морального износа, что обеспечит максимальную экономичность конструкции.

МОНИТОРИНГ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Козырева Л.В., Харитонов В.И.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Мониторинг строительного-монтажных работ при строительстве мостовых сооружений подразумевает оценку качества производственных операций и строительных процессов, строительных материалов и конструкций, используемых при их сооружении. Мониторинг позволяет обеспечить соответствие строительного-монтажных работ рабочим чертежам и проекту производства работ. Мониторинг строительного-монтажных работ необходим при строительстве всех объектов, но особенно при возведении уникальных мостовых сооружений, для того, чтобы соблюсти технические условия и особенности рабочего проекта, оценить эффективность инновационных решений и новых технологий, применённых при строительстве.

Мониторинг строительного-монтажных работ может быть осуществлён строительными-монтажными организациями, отделами технического

надзора заказчика, отделами авторского надзора проектных организаций.

При мониторинге строительно-монтажных работ выполняется визуальный осмотр и используются технические средства для оценки качества работ. Визуальный осмотр проводится перед поступлением и непосредственным вводом в процесс строительства конструкций, изделий и материалов, которые используются в строительстве. Это позволяет обнаружить различные дефекты: трещины, сколы, неправильные сечения, обнажение арматуры и т.д. Если же железобетонные, бетонные и прочие мостовые конструкции изготавливаются на месте строительства, необходимо выполнять мониторинг изготовления этих конструкций и качества заготовки местных материалов (песка, щебня и т.д.), применяемых при создании конструкций.

Мониторинг с применением технических средств выполняется с использованием отечественных и зарубежных приборов неразрушающего контроля и технической диагностики. При мониторинге строительно-монтажных работ популярностью пользуются, например, различные вихретоковые дефектоскопы. Данные приборы позволяют обнаружить и оценить глубины трещин и поверхностных несплошностей в металлоконструкциях, сварных швах и т.п. Благодаря малой трудоёмкости и высокой надёжности вихретоковой дефектоскопии, подобные приборы в последнее время завоевывают популярность, тесня тем самым методы ультразвукового контроля и магнитно-порошковой дефектоскопии. Вихретоковые дефектоскопы, как правило, позволяют работать в различных погодных условиях, что также играет им на пользу. Также при мониторинге часто используются измерители механических напряжений и колебаний. Основным предназначением данных приборов является измерение частотным методом механических напряжений в частных элементах проволочной, стержневой и канатной арматуры. Измерители механических напряжений и колебаний выявляют величину напряжения, его отклонение от проектного значения, а также поправку на длину реза арматурного стержня. Данные приборы неприхотливы в использовании, благодаря чему их часто применяют при мониторинге.

Мониторинг строительно-монтажных работ при строительстве мостовых сооружений позволяет выполнить работы качественно, на высоком уровне, обезопасить процесс строительства, обеспечивает соответствие параметров сооружения к проектным данным и отдалает срок реконструкции или капитального ремонта сооружения.

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР И ЕГО ВЗАИМОСВЯЗЬ С РАЗРУШЕНИЯМИ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Кокодеев А.В., Овчинников И.Г.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Рассуждая о современном состоянии сферы мостостроения, необходимо отметить, что эта отрасль строительства качественно преобразовывалась в последние несколько десятилетий. Развитие и внедрение новых качественных и надёжных строительных материалов, более совершенных технологий строительства, появление автоматизированных компьютерных технологий проектирования существенно расширили грани возможностей человека – в настоящее время в разных уголках мира, с высокой точностью расчётов и сокращающимися без потери в качестве сроками строительства претворяются в жизнь масштабные проекты мостовых сооружений.

И при этом существует мнение, что в связи с вышесказанным риск разрушения конструктивных элементов транспортных сооружений будет стремиться к нулю или отсутствовать вовсе. Однако, как показывает практика и многочисленные сообщения в СМИ последних лет, число возникающих аварийных ситуаций и катастроф на транспортных сооружениях, приводящих к человеческим и экономическим потерям, не снижается, а в определённых регионах мира и растёт. В связи с этим, безусловно, изучение характерных случаев разрушения мостовых сооружений является приоритетным способом и необходимым условием предотвращения подобных инцидентов в будущем. Информация и опыт, извлечённые из анализа аварий, связанных с отказами конструктивных элементов мостовых сооружений, позволят проследить причинно-следственную связь и определить основные факторы нарушения режима безопасной эксплуатации сооружений, что, в конечном счёте, позволит снизить риск возникновения и развития повреждений конструкций мостовых сооружений.

Человеческий фактор, очевидно, чаще всего становится определяющим, что обнаруживается при углублённом исследовании катастроф, связанных с мостовыми сооружениями. Ошибки допускаются на каждом из их жизненных этапов: при изыскательных работах и в процессе проектирования, при строительстве, эксплуатации или проведении ремонтных и восстановительных работ. Существует риск возникновения дефектов и повреждений любой из частей мостовых сооружений: свайного основания и железобетонных опор; железобетонных, сталежелезобетонных и металлических пролётных строений; подходов и сопря-

жений с насыпью; мостового полотна; деформационных швов и опорных частей, и др.

Одними из основных направлений проводимого авторами данной статьи фундаментального, комплексного исследования причин разрушения транспортных сооружений и потенциальных мер по снижению аварийности мостовых сооружений, станут, в первую очередь:

- анализ и вынесение уроков из реально произошедших случаев разрушения транспортных сооружений, вызванных человеческими ошибками;

- взаимосвязь уровня внедрения системы управления качеством организаций в сфере транспортного строительства и снижения безопасности транспортных сооружений вследствие аварийных ситуаций и разрушений;

- роль обеспечения мониторинга состояния, регулярных обследований и осмотров эксплуатируемых транспортных сооружений в поддержании безопасного режима работы сооружений.

О ГРАНИЦАХ ПРИМЕНЕНИЯ КВАДРАТИЧНОГО УСЛОВИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ МИЗЕСА К ОПИСАНИЮ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АНИЗОТРОПИИ ЛИСТОВЫХ ПРОКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко И.Н., Матченко Н.М.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Сформулировано условие пластичности анизотропных сред на базе критерия Мизеса- Хилла в форме функции компонент тензора напряжений. При формулировке основных соотношений, использована гипотеза о независимости пластического деформирования от гидростатического давления.

Рассматривается жесткопластический ортотропный материал с декартовой системой координат, совпадающей с осями ортотропии. Хилл предложил для ортотропных материалов соотношения пластичности Мизеса.

На примере листового прокатного материала рассмотрена возможность экспериментального определения параметров анизотропии, при этом ось x совпадает с направлением прокатки, ось y направлена поперек прокатки, а ось z направлена по нормали к плоскости листа.

Выпишем связь напряжений и деформаций для ортотропного тела для случая действия гидростатического давления, коэффициенты податливости в гидростатическом давлении. Сумма напряжений равна

нулю для случая объемного сжатия материала от гидростатического давления.

Выпишем условие пластичности Мизеса-Хилла для ортотропного материала нечувствительного к гидростатическому давлению:

$$2f(\sigma_{ij}) = F s_{23}^2 + G s_{31}^2 + H s_{12}^2 + 2L \sigma_{23}^2 + 2M \sigma_{31}^2 + 2N \sigma_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

Принимая аналогичные коэффициенты, получим новый пластический потенциал в обозначениях Хилла для плоского напряженного состояния:

$$f(s_{ij}) = \sum_{n=1}^p 2^{-2n} \{ F_n (s_{22}^n)^2 + G_n (s_{11}^n)^2 + H_n [(s_{11} - s_{22})^n]^2 + 2N_n (s_{12}^n)^2 \}. \quad (2)$$

Разложив условие в ряд, получим определяющие соотношения для случая $q=6$.

$$f(\sigma_{ij}) = \sum_{n=1}^q \frac{1}{2n} (F_n \sigma_{22}^{2n} + G_n \sigma_{11}^{2n} + H_n (\sigma_{11} - \sigma_{22})^{2n} + 2N_n \sigma_{12}^{2n}), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x = & G_1 \sigma_x + H_1 (\sigma_x - \sigma_y) + G_2 \sigma_x^3 + H_2 (\sigma_x - \sigma_y)^3 + G_3 \sigma_x^5 + H_3 (\sigma_x - \sigma_y)^5 + \\ & + H_4 (\sigma_x - \sigma_y)^7 + H_5 (\sigma_x - \sigma_y)^9, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_y = & F_1 \sigma_x - H_1 (\sigma_x - \sigma_y) + F_2 \sigma_x^3 - H_2 (\sigma_x - \sigma_y)^3 + F_3 \sigma_x^5 - H_3 (\sigma_x - \sigma_y)^5 - \\ & - H_4 (\sigma_x - \sigma_y)^7 - H_5 (\sigma_x - \sigma_y)^9, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{xy} = N_1 \sigma_{xy} + N_2 \sigma_{xy}^3 + N_3 \sigma_{xy}^5 + N_4 \sigma_{xy}^7 + N_5 \sigma_{xy}^9, \quad (6)$$

В случае одноосного растяжения прокатного образца вдоль оси x

$$\sigma_{xi} = X_i, \sigma_{xi} = \sigma_{xyi} = 0, (i = 1, 2, 3)$$

$$\varepsilon_{xi} = -H_1 X_i - H_2 X_i^3 - H_3 X_i^5 - H_4 X_i^7 - H_5 X_i^9 \quad \varepsilon_{zi} = -G_1 X_i - G_2 X_i^3 - G_3 X_i^5 \quad (7)$$

Для экспериментально определяемых логарифмических значений деформаций

$$\varepsilon_{y,0,1} = -H_1 X_{0,1} - H_2 X_{0,1}^3 - H_3 X_{0,1}^5 - H_4 X_{0,1}^7 - H_5 X_{0,1}^9, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{z,0,1} = -G_1 X_{0,1} - G_2 X_{0,1}^3 - G_3 X_{0,1}^5, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{y,0,1} = -H_1 X_{0,1} - H_2 X_{0,1}^3 - H_3 X_{0,1}^5 - H_4 X_{0,1}^7 - H_5 X_{0,1}^9, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{z,0,1} = -G_1 X_{0,1} - G_2 X_{0,1}^3 - G_3 X_{0,1}^5, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{y,0,15} = -H_1 X_{0,15} - H_2 X_{0,15}^3 - H_3 X_{0,15}^5 - H_4 X_{0,15}^7 - H_5 X_{0,15}^9, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{z,0,15} = -G_1 X_{0,15} - G_2 X_{0,15}^3 - G_3 X_{0,15}^5, \quad (13)$$

В случае одноосного растяжения прокатного образца вдоль оси y

$$\sigma_{yi} = Y_i, \sigma_{xi} = \sigma_{xyi} = 0, (i = 1, 2, 3), \quad (14)$$

$$\varepsilon_{xi} = -H_1 Y_i - H_2 Y_i^3 - H_3 Y_i^5 - H_4 Y_i^7 - H_5 Y_i^9, \quad (15)$$

$$\varepsilon_{yi} = (F_1 + H_1) Y_i + (F_2 + H_2) Y_i^3 + (F_3 + H_3) Y_i^5 + H_4 Y_i^7 + H_5 Y_i^9, \quad (16)$$

$$\varepsilon_{zi} = -F_1 Y_i - F_2 Y_i^3 - F_3 Y_i^5, \quad (17)$$

Для экспериментально определяемых логарифмических значений деформаций

$$\varepsilon_{x0,01} = -H_1 Y_{0,01} - H_2 Y_{0,01}^3 - H_3 Y_{0,01}^5 - H_4 Y_{0,01}^7 - H_5 Y_{0,01}^9, \quad (18)$$

$$\varepsilon_{z0,01} = -F_1 Y_{0,01} - F_2 Y_{0,01}^3 - F_3 Y_{0,01}^5, \quad (19)$$

$$\varepsilon_{x0,1} = -H_1 Y_{0,1} - H_2 Y_{0,1}^3 - H_3 Y_{0,1}^5 - H_4 Y_{0,1}^7 - H_5 Y_{0,1}^9, \quad (20)$$

$$\varepsilon_{z0,1} = -F_1 Y_{0,1} - F_2 Y_{0,1}^3 - F_3 Y_{0,1}^5, \quad (21)$$

$$\varepsilon_{x0,15} = -H_1 Y_{0,15} - H_2 Y_{0,15}^3 - H_3 Y_{0,15}^5 - H_4 Y_{0,15}^7 - H_5 Y_{0,15}^9, \quad (22)$$

$$\varepsilon_{z0,15} = -F_1 Y_{0,15} - F_2 Y_{0,15}^3 - F_3 Y_{0,15}^5, \quad (23)$$

В результате преобразований получим систему из 12 уравнений с 12-ю неизвестными с возможностью численного решения системы уравнений. Подставляя экспериментальные значения напряжений и соответствующих им логарифмических деформаций для материала стали толщиной $s_0 = 1,0 \text{ мм}$, 08X18H10T и углов вырезки образца $\alpha^0 = 0$, $\alpha^0 = 90$.

ОТСЕВЫ ДРОБЛЕНИЯ ТЕРРИКОНИКОВ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА КАК СЫРЬЁ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Котляр В.Д., Явруян Х.С., Гайшун Е.С.
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

В настоящее время в угледобывающих районах Ростовской области (Восточный Донбасс) активно ведётся переработка террикоников в первую очередь с целью извлечения угля, которое стало экономически целесообразным в последние годы. Помимо получения угля в процессе переработки получают попутные продукты, которые классифицируются по зерновому составу. Фракции 0-0,5 и 0-2 мм, содержащие уголь

в количестве 15-50%, используются как топливная добавка при производстве керамического кирпича и как низкокалорийное топливо [1-3]. Материал крупностью от 4-6 мм до 80-90 мм фракционируется и реализуется как щебень для применения в строительстве. Фракция 2-6 мм, практически не содержащая угля и называемая отсевом, по ряду причин является самой невостребованной. Общие запасы отсевов в Ростовской области составляют несколько миллионов тонн и продолжают увеличиваться.

По преобладающему виду слагающих пород все терриконики Восточного Донбасса условно делятся на 3 группы:

- сложенные аргиллитами и глинистыми сланцами;
- сложенные алевролитами и песчаниками;
- смешанного состава, сложенные аргиллитами, глинистыми сланцами, алевролитами и песчаниками.

Последние являются самыми распространёнными. Кроме того, особенностью геологического строения угольных толщ Восточного Донбасса является слоистое строение и чередование пластов аргиллитов, глинистых сланцев, алевролитов и песчаников, что отражается и на составе терриконигов. В процессе переработки горная масса терриконигов подвергается дроблению на щековых и конусных дробилках, расसेву, гравитационному обогащению и т.д., в результате чего в отсев попадают наиболее слабые породы, а именно глинистые сланцы и аргиллиты. Изучив несколько десятков отсевов дробления терриконигов нами по виду и количеству слагающих пород, они были разделены на 4 группы:

- I группа – отсевы, на где содержание аргиллитов и глинистых сланцев составляет более 80%;
- II группа – отсевы, где содержание аргиллитов и глинистых сланцев колеблется в интервале 50-80% и содержание алевролитов и песчаников от 20 до 50%;
- III группа – отсевы, где содержание аргиллитов и глинистых сланцев колеблется в интервале 20-50% и содержание алевролитов и песчаников от 50 до 80%;
- IV группа – отсевы, на где содержание алевролитов и песчаников составляет более 80%.

Усреднённый зерновой состав отсевов представлен в таблице 1. Он характеризуется достаточно высоким модулем крупности, и по этому показателю может быть отнесён к группе песка с повышенной крупно-

стью, небольшим количеством фракции 0,16-0,315 мм и менее 0,16 мм. По химическому составу отсе́вы не имеют принципиальных отличий от глинистого сырья и характеризуется содержанием Al_2O_3 от 16 до 22 % и содержанием оксида калия более 4 %.

Таблица 1 – Усреднённый зерновой состав отсе́вов

Наименование отсе́вка	Остатки, % по массе, на ситах					Проход через сито с сеткой № 016, % по массе	Модуль крупности
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16		
Частный	28,3	31,8	14,7	11,5	7,3	6,4	3,43
Полный	28,3	60,1	74,8	86,3	93,6	–	

Проведённые нами исследования показали, что подготовка отсе́вов в качестве сырья для производства строительной керамики заключается в их измельчении до фракций 0-0,63–0-0,16 мм. Наиболее подходящим оборудованием для этого являются маятниковые мельницы. При этом зерновой состав может характеризоваться как непрерывным, так и прерывистым зерновым составом. Чем более тонко измельчено исходное сырьё, тем больше прочность обожжённых изделий. Наиболее рациональным способом получения изделий является способ компрессионного формования. Для отсе́вов I группы может применяться и способ жёсткой (полужёсткой) экструзии с прямой садкой изделий на печные вагонетки. При варьировании технологических факторов возможно получение изделий с широкой номенклатурой свойств.

Библиографический список

1. Столбоушкин, А.Ю., Отходы углеобогащения как сырьевая и энергетическая база заводов керамических стеновых материалов / А.Ю. Столбоушкин, Г.И. Стороженко // Строительные материалы, 2011. – № 4. – С. 43-46.
2. Котляр, В.Д. Стеновые керамические изделия на основе тонкодисперсных продуктов переработки террикоников / В.Д. Котляр, Х.С. Явруян // Строительные материалы, 2017. – № 4. – С. 38-41.
3. Явруян, Х.С. Исследование среднефракционных материалов переработки террикоников для производства изделий стеновой керамики / Х.С. Явруян, В.Д. Котляр, Е.А. Лотошникова и др. // Строительные материалы, 2018. – № 4. – С. 17-20.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА НДС КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Кузнецова В.О.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Рассмотрим упругое равновесие пологой сферической оболочки толщиной h под действием поперечной осесимметричной равномерно-распределенной нагрузки q и водородосодержащей среды с концентрацией λ . Срединная поверхность оболочки является частью сферы, характеризуемой радиусом R (м). Оболочка имеет жесткую заделку по контуру.

Примем оболочку достаточно тонкой, при этом будут использоваться традиционные для данного класса задач технические гипотезы Кирхгофа-Лява:

а) компоненты деформации в срединной поверхности согласно теории Т. Кармана [1]:

$$\varepsilon_r = u_{,r} - kw + 0,5\theta_\varphi^2; \varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} - kw, \quad (1)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ – относительные деформации в срединных поверхностях; u, w – радиальные перемещения и прогибы; k – главная кривизна; $\theta_\varphi = -w_{,r}$ – поворот нормали к срединной поверхности, r – радиальная координата;

б) компоненты изгибной деформации (кривизны):

$$\chi_r = -w_{,rr}; \chi_\varphi = -\frac{w_{,r}}{r}; \quad (2)$$

в) компоненты тензора деформаций через параметры деформации $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ и кривизны χ_r, χ_φ срединной поверхности:

$$e_r = \varepsilon_r + z\chi_r; e_\varphi = \varepsilon_\varphi + z\chi_\varphi, \quad (3)$$

где z – вертикальная координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки.

Подставляя (1) в (3), получим компоненты тензора деформаций через перемещения и прогибы:

$$e_r = u_{,r} - kw + 0,5w_{,r}^2 - zw_{,rr}; e_\varphi = \frac{u}{r} - kw - z\frac{w_{,r}}{r}; \quad (4)$$

$$e_{ij} = f(\sigma_{ij}); \quad \sigma_{ij} = \Psi(e_{ij}).$$

Усилия и моменты найдём через напряжения следующим образом:

$$\begin{aligned} N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz; N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi dz; \\ M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz; M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi z dz; \end{aligned} \quad (5)$$

Моменты и усилия запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} M_r &= K_{11}\varepsilon_r + K_{12}\varepsilon_\varphi + D_{11}\chi_r + D_{12}\chi_\varphi; \\ M_\varphi &= K_{21}\varepsilon_r + K_{22}\varepsilon_\varphi + D_{21}\chi_r + D_{22}\chi_\varphi; \\ N_r &= C_{11}\varepsilon_r + C_{12}\varepsilon_\varphi + K_{11}\chi_r + K_{12}\chi_\varphi; \\ N_\varphi &= C_{21}\varepsilon_r + C_{22}\varepsilon_\varphi + K_{21}\chi_r + K_{22}\chi_\varphi, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } C_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) dz; K_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z dz; D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z^2 dz;$$

$$B_{11} = \Delta_{22} / \Delta; B_{12} = B_{21} = -\Delta_{21} / \Delta = -\Delta_{12} / \Delta; B_{22} = \Delta_{11} / \Delta$$

$$\Delta_{11} = \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_r}; \Delta_{12} = \Delta_{21} = \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_\varphi} = \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_r}; \Delta_{22} = \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_\varphi}; \Delta = \Delta_{11}\Delta_{22} - \Delta_{12}\Delta_{21}.$$

Принимая за основу те или иные определяющие соотношения, мы не вносим изменений в соотношения статико-геометрической природы. Внутренние усилия и моменты приводятся к срединной поверхности $z=0$, т. е. уравнения равновесия для пологих сферических оболочек принимают вид:

$$\begin{aligned} M_{r,r} - M_{\varphi,r} / r + 2M_{r,\varphi} / r + k(N_r + N_\varphi) + N_r w_{,rr} &= -q; \\ N_{r,r} + (N_r - N_\varphi) / r - k[M_{r,r} + (M_r - M_\varphi) / r] &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Используя зависимости условия равновесия, а также выражения для усилий и моментов получаем систему двух нелинейных дифференциальных уравнений относительно функций u и θ .

Следуя двухшаговому методу последовательного возмущения параметров В.В. Петрова [5], запишем выражения для приращений деформаций срединной поверхности:

$$\delta \varepsilon_r = \delta u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r}; \quad \delta \varepsilon_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k \delta w, \quad (8)$$

Приращения кривизн срединной поверхности:

$$\delta \chi_r = -\delta w_{,rr}; \quad \delta \chi_\varphi = -\frac{\delta w_{,r}}{r}; \quad (9)$$

Приращения деформаций через приращения деформаций $\delta\varepsilon_r$, $\delta\varepsilon_\varphi$ и кривизн срединной поверхности $\delta\chi_r$ и $\delta\chi_\varphi$:

$$\delta\varepsilon_r = \delta\varepsilon_r + z\delta\chi_r; \delta\varepsilon_\varphi = \delta\varepsilon_\varphi + z\delta\chi_\varphi. \quad (10)$$

Используя формулы (8) – (10), получаем выражения, связывающие приращения деформаций и перемещений:

$$\delta\varepsilon_r = \delta u_{,r} - k\delta w + w_{,r}\delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}; \delta\varepsilon_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k\delta w - z\frac{\delta w_{,r}}{r}. \quad (11)$$

Согласно работе Трещёва А.А. [2], физические зависимости примем в виде:

$$\delta e_r = \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_r} \delta \sigma_r + \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_\varphi} \delta \sigma_\varphi; \delta e_\varphi = \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_r} \delta \sigma_r + \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_\varphi} \delta \sigma_\varphi; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \delta N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_r dz; \delta N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_\varphi dz; \\ \delta M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_r z dz; \delta M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_\varphi z dz; \end{aligned} \quad (13)$$

где δN_r , δN_φ – приращения усилий в срединной поверхности оболочки, δM_r , δM_φ – приращения моментов.

Получим зависимости приращений усилий и моментов от приращений перемещений:

$$\begin{aligned} \delta N_r &= C_{11}(u_{,r} - k\delta w + w_{,r}\delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) - \\ &- K_{11}\delta w_{,rr} + C_{12}\left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z\frac{\delta w_{,r}}{r}\right) - K_{12}\frac{\delta w_{,r}}{r}; \\ \delta N_\varphi &= C_{12}(u_{,r} - k\delta w + w_{,r}\delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) - \\ &- K_{12}\delta w_{,rr} + C_{22}\left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z\frac{\delta w_{,r}}{r}\right) - K_{22}\frac{\delta w_{,r}}{r}; \quad (14) \\ \delta M_r &= K_{11}(u_{,r} - k\delta w + w_{,r}\delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) - \\ &- D_{11}\frac{\delta w_{,r}}{r} + K_{11}\left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w\right) - D_{12}\frac{\delta w_{,r}}{r}; \\ \delta M_\varphi &= K_{12}(u_{,r} - k\delta w + w_{,r}\delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) - \end{aligned}$$

$$-D_{12}\delta w_{,rr} + K_{22}\left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w\right) - D_{22}\frac{\delta w_{,r}}{r}.$$

Запишем в приращениях уравнения равновесия пологой сферической оболочки, воспринимающей нагрузку в виде равномерно распределённого давления, учитывая пренебрежения членами второго порядка малости и выше:

$$\delta M_{r,rr} - \delta M_{\varphi,r} / r + 2\delta M_{r,r} / r + k(\delta N_r + \delta N_{\varphi}) + \delta N_r w_{,rr} + N_r \delta w_{,rr} = -\delta q;$$

$$\delta N_{r,r} + (\delta N_r - \delta N_{\varphi}) / r - k[\delta M_{r,r} + (\delta M_r - \delta M_{\varphi}) / r] = 0. \quad (15)$$

Подставляя выражения для усилий и моментов (6) в уравнения равновесия (7), выведем систему разрешающих дифференциальных уравнений в частных производных относительно прогибов и радиальных перемещений, получим:

$$\begin{aligned} & [B_{11}(\lambda)z(\delta U_{,r} - k\delta w - w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) + K_{11}(\delta U_{,r} - k\delta w - w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) + \\ & + K_{12}\varepsilon_{\varphi} - B_{11}(\lambda)z^2\delta w_{,rr} - D_{11}\delta w_{,rr} - D_{12}\frac{w_{,r}}{r}] - [B_{21}(\lambda)z\varepsilon_r + K_{21}(\delta U_{,r} - \\ & - k\delta w - w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) + K_{22}\varepsilon_{\varphi} - B_{21}(\lambda)z^2w_{,rr} - D_{21}\delta w_{,rr} + D_{22}\frac{w_{,r}}{r}] / r + \\ & + 2[B_{11}(\lambda)z\varepsilon_r + K_{11}(\delta U_{,r} - k\delta w - w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) + K_{12}\varepsilon_{\varphi} - B_{11}(\lambda)z^2w_{,rr} - \\ & - D_{11}\delta w_{,rr} - D_{12}\frac{w_{,r}}{r}] / r + k(C_{11}\varepsilon_r + C_{12}\varepsilon_{\varphi} - K_{11}w_{,rr} - K_{12}\frac{w_{,r}}{r} + C_{21}\varepsilon_r + \\ & + C_{22}\varepsilon_{\varphi} - K_{21}w_{,rr} - K_{22}\frac{w_{,r}}{r}) + [B_{11}(\lambda)z\varepsilon_r + C_{11}(\delta U_{,r} - k\delta w - w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) + \\ & + C_{12}\varepsilon_{\varphi} - B_{11}(\lambda)zw_{,rr} - K_{11}\delta w_{,rr} - K_{12}\frac{w_{,r}}{r}]w_{,rr} = -\delta q; \\ & B_{11}(\lambda)z\varepsilon_r + C_{11}(\delta U_{,r} - k\delta w - w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) + C_{12}\varepsilon_{\varphi} - B_{11}(\lambda)zw_{,rr} - K_{11}\delta w_{,rr} + \\ & - K_{12}\frac{w_{,r}}{r} + [C_{11}\varepsilon_r + C_{12}\varepsilon_{\varphi} - K_{11}w_{,rr} - K_{12}\frac{w_{,r}}{r} - (C_{21}\varepsilon_r + C_{22}\varepsilon_{\varphi} - K_{21}w_{,rr} + \\ & - K_{22}\frac{w_{,r}}{r})] / r - k[B_{11}(\lambda)z\varepsilon_r + K_{11}(\delta U_{,r} - k\delta w - w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr}) + K_{12}\varepsilon_{\varphi} + \\ & + K_{12}\left(\frac{\delta U}{r} - k\delta w + z\frac{\delta w_{,r}}{r}\right) - B_{11}(\lambda)z^2w_{,rr} - D_{11}\delta w_{,rr} - D_{12}\frac{w_{,r}}{r} + \\ & + (K_{11}\varepsilon_r + K_{12}\varepsilon_{\varphi} - D_{11}w_{,rr} - D_{12}\frac{w_{,r}}{r} - K_{21}\varepsilon_r + K_{22}\varepsilon_{\varphi} - D_{21}w_{,rr} - D_{22}\frac{w_{,r}}{r}) / r] = 0; \end{aligned}$$

Полученную систему разрешающих уравнений дополним граничными условиями. Так как задача является осесимметричной, в центре

оболочки поворот нормали к срединной поверхности и радиальные перемещения задаём равными нулю ($w_r = 0, u = 0, \dots$). Что касается граничных условий по периметру оболочки, то они зависят от выбора закрепления. В случае жёсткого защемления оболочки по периметру, принимаем на контуре оболочки радиальные перемещения, прогибы, поворот нормали к срединной поверхности равными нулю ($u = 0, w = 0, w_r = 0, \dots$).

При химической адсорбции молекулы водорода в конечном итоге распадаются на атомы, которые затем диффундируют вглубь металла. Для одномерной задачи уравнение переходит в первый закон Фика, запишем его в виде [3]:

$$J = -D\delta\lambda_z, \quad (16)$$

где z – координата в направлении диффузии, D – коэффициент диффузии.

Если коэффициент диффузии не зависит от концентрации, то из первого закона Фика вытекает второй закон Фика в виде:

$$(\delta\lambda)_t = D(\delta\lambda)_{zz}, \quad (17)$$

где t – текущее время.

Степень проникновения распределения концентрации по толщине получается из решения уравнения диффузии, ввиду одномерности задачи по диффузии уравнение соответствует второму закону Фика, решение строим по двойным преобразованиям Фурье (прямым и обратным).

$$\lambda(r, t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Psi_k(\gamma_k, r/R_2)}{\Psi_k} K_0 \exp(-\gamma_k^2 \frac{Dt}{R_2^2}), \quad (18)$$

где функция $\Psi_k(\gamma_k, r/R_2)$ зависит от направления воздействия водорода.

При действии водорода изнутри оболочки получим

$$\Psi_k(\gamma_k, r/R_2) = Y_0(\gamma_k R_1/R_2) J_0(\gamma_k r/R_2) - J_0(\gamma_k R_1/R_2) Y_0(\gamma_k r/R_2). \quad (19)$$

Полученную систему разрешающих уравнений дополняем граничными условиями. Так как оболочка по периметру имеет жесткую заделку, то принимаем на контуре оболочки радиальные перемещения, прогибы и угол поворота срединной поверхности в радиальном направлении равными нулю ($u = 0, w = 0, w_r = 0$) [4].

Библиографический список

1. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого

состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.

2. Трещёв, А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещёв. – М.; РААСН; ТулГУ, 2007. – 160 с.

3. Гервиц, Г.Я. Влияние газонасыщения на статическую прочность титановых сплавов / Г.Я. Гервиц // ФХММ. – 1981. № 2. – С. 45-48.

4. Овчинников, И.Г. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородосодержащей средой и ее приложения / И.Г. Овчинников, А.Б. Рассада // Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах. – Саратов: Саратов. политехн, ин-т, 1989. – С. 12-16.

5. Петров, В.В. Методы расчёта балок, пластин и призматических оболочек из нелинейно-деформируемого материала / В.В. Петров, И.В. Кривошеин, П.В. Селяев. – Саранск: МордГУ, 2009. – 164 с.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗРЫВОСТОЙКОСТИ И ГАРАНТИРОВАННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИН ВЗРЫВОМ

Куриен Н.С., Журавлев Г.М.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Определение условий взрывостойкости и гарантированного разрушения элементов является актуальной задачей при проектировании несущих строительных конструкций. Сложность заключается в том, что при решении поставленной задачи нужно найти связь между энергетическими и геометрическими характеристиками заряда и геометрическими и механическими характеристиками конструкции, что зачастую, требует использования многочисленных опытных данных. Однако, данная проблема не нова. На сегодняшний день существует множество различных теорий, позволяющих с достаточной точностью, определять условия взрывостойкости и гарантированного разрушения несущих конструкций.

Для решения задачи выбран энергетический метод Т.М. Саламахина [1,2]. Основная идея энергетического метода заключается в том, что кинетическая энергия, получаемая преградой в момент взрыва, приравнивается к энергии, потраченной на работу упругих деформаций. Под разрушением элемента конструкции будем понимать потерю его несущей способности.

щей способности в связи с появлением трещин, сколов, разделений на фрагменты.

Постановка задачи действия взрывной нагрузки осуществляется на основе энергетических принципов механики, строящихся на теоремах об экстремальных свойствах действительных полей скоростей и напряжений. Эти принципы получили в теории деформирования свою формулировку [3, 4].

Первый принцип гласит, что действительному полю скоростей деформации соответствует абсолютный минимум полной мощности процесса деформирования. Определение действительного поля скоростей деформации осуществляется через произвольно заданное кинематически возможное поле скоростей деформации.

Второй принцип говорит о том, что мощность действительных поверхностных сил, соответствующая заданным скоростям, больше мощности, развиваемой поверхностными силами, соответствующими любой другой статически возможной системе напряжений текучести. Данный принцип не нашёл широкого применения в силу большой громоздкости вычислений.

В работе используется первый принцип и основные соотношения и уравнения, которое характеризует состояние материала при данных условиях действия взрывной волны и метод баланса мощностей.

Задача решается в вариационной постановке, согласно которой кинетическая энергия, полученная пластиной от действия взрыва, полностью расходуется на работу её упругого деформирования вплоть до разрушения. Записывается некоторый функционал, составляющие которого полностью характеризуют состояние деформируемой среды в данных условиях, представляющий собой разность мощностей внутренних и внешних сил.

Библиографический список

1. Саламахин, Т.М. Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок / Т.М. Саламахин. – М.: ВИА, 1974. – 255 с.
2. Саламахин, Т.М. Разрушение взрывом элементов конструкций / Т.М. Саламахин. – М.: ВИА, 1961. 275 с.
3. Колмогоров, В.Л. Краевые задачи обработки металлов давлением, их решение вариационными методами и некоторые математические модели. Препринт / В.Л. Колмогоров. – Свердловск: Уральское отделение АН СССР. 1990. – 46 с.

4. Черноусько, Ф.Л. Вариационные задачи механики и управления / Ф.Л. Черноусько, И.В. Баничук. – М.: Наука, 1973. – 238 с.

ДООБЖИГОВЫЕ СВОЙСТВА АРГИЛЛИТОВ КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКОЙ ЧЕРЕПИЦЫ

Лазарева Я.В., Котляр А.В. Орлова М.Е.
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аргиллиты являются перспективным сырьём для производства керамической черепицы, к которой предъявляются повышенные требования к пределу прочности по изгибу, водопроницаемости и водопоглощению, морозостойкости [1]. Во многом свойства изделий зависят от технологической схемы производства, оптимальный выбор которой определяется дообжиговыми керамическими свойствами используемого сырья. Аргиллиты являются камневидным трудноразмокаемым сырьём и обладают, в отличие от обычного глинистого сырья, особыми свойствами [2-4].

Пластичность важная характеристика глинистого сырья, и её определение является обязательным. Классификация сырья по пластичности осуществляется согласно ГОСТ 9169 – 75 «Сырьё глинистое для керамической промышленности. Классификация». Выделяют следующие группы сырья – высокопластичные (число пластичности свыше 25), среднепластичные (число пластичности 15-25), умереннопластичные (число пластичности 7-15), малопластичные (число пластичности 3-7) и непластичные (не дают пластичного теста). Существуют различные методы определения пластичности. Согласно ГОСТ 21216–2014 «Сырьё глинистое. Методы испытаний» (п. 5.3.1) принят метод А.М. Васильева, основанный на определении разности влажностей массы, соответствующих нижней границе текучести и границе раскатывания. Подготовка пробы заключается в её «мягком» измельчении до прохождения через сито с сеткой 0,5 мм.

Проведённые нами исследования показали, что сильнолитифицированные глинистые породы (собственно аргиллиты) имеют пластичность 4-7 единиц. Важной их особенностью, в отличие от обычных размокаемых глин, является способность к увеличению пластичности при более тонком измельчении. Это имеет важное технологическое значение, которое заключается в возможности регулирования формовочных свойств аргиллитов. Также нами было установлено, что их пластичность возрастает на 1-3 единицы при многократном увлажнении и

высушивании порошка и продолжительном нахождении его во влажном состоянии (неделя – месяц).

Как отмечали многие исследователи, пластичность глинистых пород обусловлена главным образом дисперсностью минеральных частиц и их взаимодействием между собой и водой. Кондратенко В.А. и другими исследователями для обычных размокаемых глин была установлена прямолинейная зависимость от содержания в глине тонкодисперсной фракция с размером частиц менее 0,01 мм и пластичностью. Проведённые нами исследования, показали, что данные закономерности могут быть частично применены и для аргиллитов, с учётом того, что содержание фракции 0,01 мм во многом зависит от степени измельчения аргиллитов.

Под формовочной влажностью понимают количество воды, необходимое для придания керамической массе нормальной рабочей консистенции при пластическом формовании, при которой масса, проявляя формовочные свойства, сохраняет без деформации приданную форму и при раскатывании не прилипает к рукам и металлу. Это не регламентируемый показатель и в зависимости от способа производства изделий он существенно изменяется: минимальная влажность у пресспорошка при компрессионном способе формования, большая – при способе «жёсткой» экструзии, ещё большая – при обычном экструзионном способе и самая большая – при мягком («ручном») формовании. В практическом общем плане считается, что чем меньше формовочная влажность, тем лучше, т.к. потребуется меньше энергозатрат на сушку изделий.

В лабораторных условиях обычно формовочную влажность определяют визуально. Однако этот способ в некоторой степени субъективен и не имеет строгого научного обоснования. Для глинистого сырья нормальная формовочная влажности колеблется в интервале от 16 до 30 %. Большие показатели у монтмориллонитовых глин, меньшие – у отощённых суглинков, каолиновых сухарных глин, глинистых сланцев. Аргиллиты в силу особенностей вещественного состава и структуры имеют небольшую формовочную влажность – 15-17 %. Важной их особенностью, в отличие от обычных размокаемых глин, является способность к увеличению формовочной влажности (на 1-2 %) при их более тонком измельчении, а также при длительном вылеживании во влажном состоянии.

Связующую способность глинистого сырья, согласно ГОСТ 21216–2014 «Сырье глинистое. Методы испытаний», оценивают по измене-

нию механической прочности при статистическом изгибе и сжатии высушенных при температуре (105 ± 5) °С образцов, сформованных из глиняных масс.

Основным практическим смыслом данного свойства является способность после сушки получать достаточно прочный полуфабрикат (сырец), который может выдерживать без разрушения и дефектов последующие производственные операции – транспортировку, пакетировку и т.д. Учитывая практическую целесообразность и камнеподобный характер аргиллитов, наиболее приемлемым для них способом определения связующей способности является определение механической прочности образцов-балочек при статистическом изгибе при различной степени измельчения. Согласно ГОСТ 9169 – 75 «Сырьё глинистое для керамической промышленности. Классификация» в зависимости от механической прочности на изгиб в сухом состоянии глинистое сырьё подразделяют на группы, указанные в таблице 1.

Как показывает практика, для современных технологических линий предел прочности при изгибе должен составлять не менее 0,5-1 МПа. Для аргиллитов наблюдается закономерная зависимость – с увеличением степени измельчения увеличивается и прочность высушенных образцов. Прочность менее 1 МПа имеют только образцы из аргиллита при степени его измельчения 0,0-1,25 мм и 0,0-2,5 мм. При этом, как показали предварительные исследования, прочность образцов компрессионного формования выше в сравнении с образцами полученными пластическим способом.

Таблица 1 – Классификация глинистого сырья в зависимости от механической прочности на изгиб в сухом состоянии

Наименование группы	Норма прочности на изгиб в сухом состоянии, МПа
С очень низкой механической прочностью	Менее 1
С низкой механической прочностью	1 – 2
С умеренной механической прочностью	2 – 5
Со средней механической прочностью	5 – 10
С высокой механической прочностью	Св. 10

Анализируя полученные свойства аргиллитов можно говорить, что это достаточно обособленная группа пород с рядом положительных свойств – достаточная пластичность и формующая способность, малая воздушная усадка и чувствительность к сушке и т.д. Важной особенностью аргиллитов является возможность регулировать свойства за счёт

изменения степени измельчения, которая для каждого месторождения, вида продукции и технологии будет индивидуальна. Полученные данные позволяют предполагать, что производство керамической черепицы на основе аргиллитов можно осуществлять традиционными двумя способами – экструзионное формование заготовки и пластическое штампование изделия или просто экструзионное формование. Выбор того или иного способа производства зависит от конкретных факторов – свойств сырья, вида и ассортимента продукции, стоимости оборудования, особенностей его эксплуатации и т.д. В целом же, свойства аргиллитов являются весьма благоприятными для их использования в качестве сырья для производства керамической черепицы.

Библиографический список

1. Котляр, В.Д. Основные тенденции и перспективные виды сырья при производстве керамической черепицы / В.Л. Котляр, К.А. Лапунова, Я.В. Лазарева и др. // Строительные материалы, 2015. – № 12. – С. 28-31.
2. Котляр, А.В. Технологические свойства аргиллитоподобных глин при производстве клинкерного кирпича / А.В. Котляр // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2016. – № 2 (55). – С. 164-175.
3. Талпа, Б.В., Котляр А.В. Минерально-сырьевая база литифицированных глинистых пород Юга России для производства строительной керамики / Б.В. Талпа, А.В. Котляр // Строительные материалы, 2015, – № 4. – С. 31-33.
4. Лазарева, Я.В. Взаимосвязь водопоглощения и водонепроницаемости керамической черепицы из аргиллитоподобных глин / Ф.В. Лазарева, К.А. Лапунова, М.Е. Орлова и др. // Строительные материалы, 2018. – № 4. – С. 36-39.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК НДС ПРИ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Леонов В.М.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Задачи пластического формоизменения неосесимметричных заготовок в трёхмерной постановке недостаточно хорошо изучены. Аналитическое решение в случае конечных деформаций пластически неоднородных тел практически невозможно из-за возрастающих математиче-

ских трудностей. При этом решение задач обработки металлов давлением, связанных с рассмотрением конечных пластических деформаций, нередко осуществляется весьма приближенными инженерными аналитическими методами. Анализ производится в виде многофакторной модели, что позволяет оценить взаимосвязанные процессы в различных сегментах деформируемого материала (реализующая программа Tetra Compond v.1.1, свидетельство № 2013610558 с применением соотношений Трещёва А.А. [1, С. 54 – 75]). В качестве одного из объектов исследования выбрана цилиндрическая заготовка из материала АМг2М с наружным радиусом 40 мм, толщиной стенки 1 мм, высотой 60 мм и начальным диаметром бокового отверстия 11...31 мм, диаметр отверстия в матрице был равен 16...36 мм, и следующими параметрами импульса: частота разряда 6...30 кГц, декремент колебаний 20 кГц, условное начальное давление ИМП 15...46 МПа.

Схема процесса, сечения и характер НДС показаны на рисунке 1. Рассмотрение значений компонентов тензора деформаций в точках 1-2 и 3-4 приводит к выводу, что деформации в точках 1 и 2, принадлежащих осевому сечению, превышают деформации в точках 3 и 4 из среднего поперечного сечения в 1,2 и 2,1 раза соответственно для рассматриваемого случая при частоте 24 кГц, что обусловлено различием в геометрии и распространении деформации для каждого из сечений I и II.

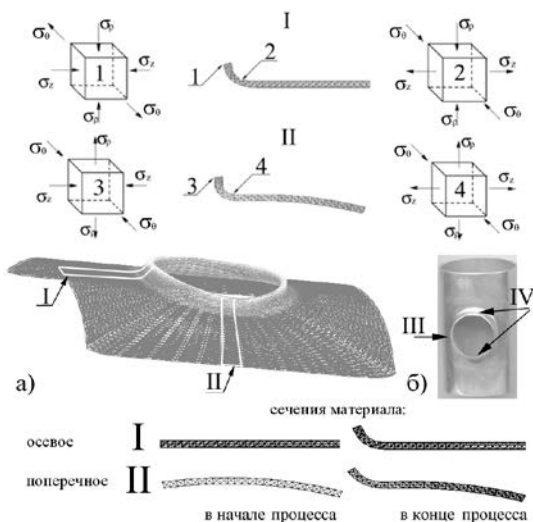


Рис. 1 – Характер нагружения в операции отбортовки бокового отверстия цилиндрической заготовки:
I – осевое; II – поперечное сечения (модель по МКЭ)

На рис. 2-4 представлено распределение компонентов тензора деформаций для половины отверстия (5 мм от края). Стоит отметить знакопеременный характер их изменения на представленных диаграммах, а также наличие сегментов исчерпания ресурса пластичности при значительных степенях деформации.

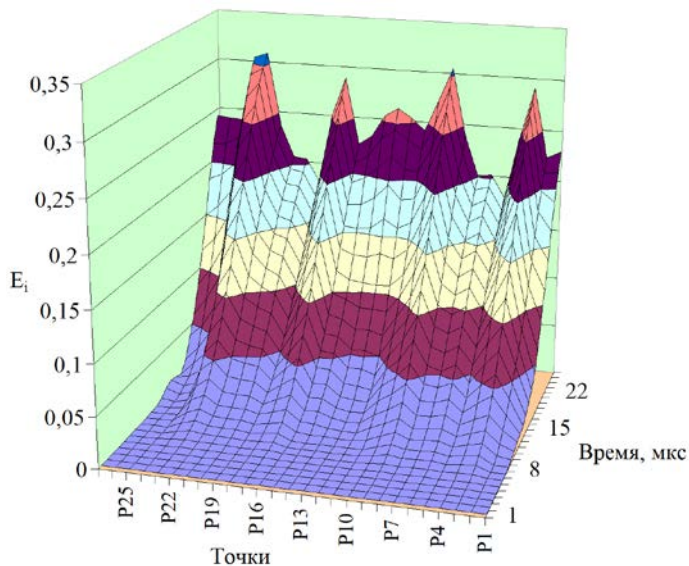


Рис. 2. Распределение интенсивности деформаций

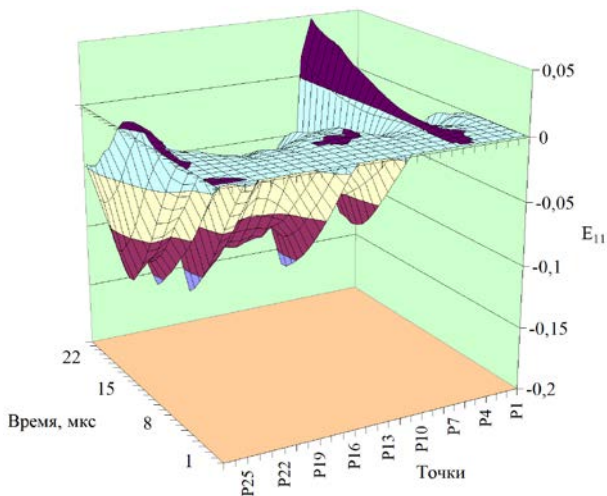
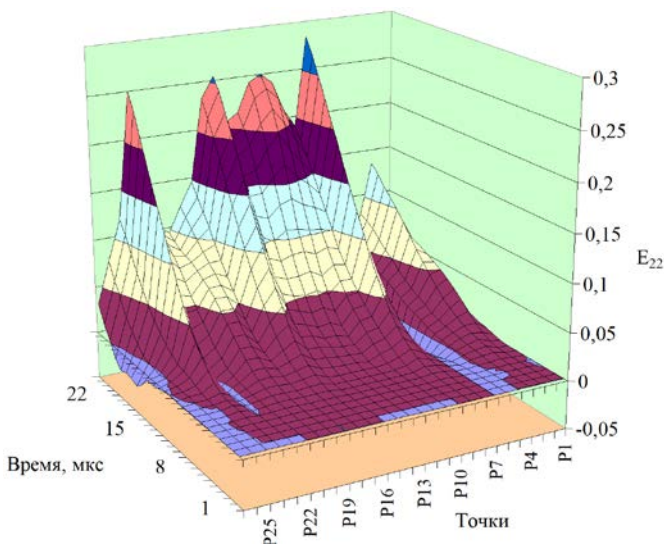


Рис. 3. Распределение E_{11}

Рис. 4. Распределение E_{22}

В свою очередь, послойное представление изменения во времени этих и других характеристик материала даёт возможность произвести оценку взаимосвязи между ними. Так, например, установлено, что в точке 2 при отношении диаметра отверстия к диаметру заготовки равном 0,14 для снижения напряжений и деформаций предпочтительными являются высокие частоты разряда, порядка 20 кГц, а при отношении диаметров равном 0,4 – низкие частоты, порядка 8-10 кГц. При этом наименьшая величина работы деформации заготовки достигается для $d / D = 0,26$ при частоте разряда 18-20 кГц и декременте колебаний 20 кГц. Высокие частоты приводят к выравниванию распределения характеристик НДС в объёме деформируемого материала. Выполненные ранее [4] исследования, показали значительное влияние электроимпульсного воздействия на эксплуатационные показатели, анизотропию механических свойств. Показано, что для алюминиевых Д16, АМг6 и титановых сплавов ОТ4, ВТ20 предел прочности возрастает на 8-15% без снижения пластических свойств. Эксперименты показали, что с увеличением плотности подведённой энергии коэффициент поперечной анизотропии уменьшается вплоть до $\mu_{21} = 0,5$, что соответствует изотропному материалу. С учётом предшествующих исследований стоит отметить, точка минимакса работы деформации достигается при значении относительного диаметра отверстия 0,28 и рабочей частоты 9,27 кГц. Значение работы в этой точке составляет 24,5 Дж. Изменение относи-

тельного диаметра отверстия от точки минимакса в обе стороны ведет к увеличению работы деформации на 30-47%. Уменьшение относительного диаметра отверстия с 0,4 до 0,14 приводит к росту напряжений в среднем в 1,45 раза и деформаций в 2 раза вблизи края отверстия. Параметры внешнего воздействия во многом определяют соотношение предельных деформаций в основании и на крае отверстия, а также геометрию после прохождения электромагнитного импульса. Как показали предшествующие исследования, более предпочтительно с точки зрения минимума работы деформации является величина относительного диаметра отверстия 0,26. Возрастание работы деформации при увеличении относительного диаметра отверстия до 0,4 обусловлено ростом объёма деформируемого материала, несмотря на общее снижение показателей объёмного напряжённо-деформированного состояния (НДС). Дальнейшее исследование пространственно-временных характеристик НДС в процессах обработки способно вплотную подвести к формализации в виде соотношений на макроуровне во взаимосвязи с энергосиловыми параметрами импульса внешнего воздействия.

Библиографический список

1. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 326 с.
2. Деклу, Ж. Метод конечных элементов / Ж. Деклу. – М.: Мир, 1976. – 95 с.
3. Деменко, В.Ф. Разработка и внедрение метода расчета процесса магнитно-импульсной раздачи трубчатых деталей ЛА / В.Ф. Деменко. – Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1983. – 18 с.
4. Попов, О.В. Перспективы использования электроимпульсного воздействия для интенсификации операций листовой штамповки / О.В. Попов, С.В. Власенков, Д.Ю. Танненберг. – М.: ЦРДЗ, 1993. – С.18-20.

ЧАСТИЧНОЕ ЗАКРЫТИЕ ТРЕЩИН СО СВЯЗЯМИ В ПОДКРЕПЛЁННОЙ ПЛАСТИНЕ С ОТВЕРСТИЕМ

Мир-Салим-заде М.В.

ИМиМ НАН, г. Баку, Азербайджан

Рассматривается бесконечная изотропная тонкая пластина, имеющая круговое отверстие радиуса R . К пластине приклепаны поперечные ребра жёсткости с постоянным шагом по всей длине стрингеров, симмет-

рично относительно поверхности пластины. Пластина и стрингеры выполнены из разных упругих материалов.

Из контура отверстия исходят две прямолинейные симметричные трещины вдоль оси абсцисс. Полагается, что в зонах трещин, примыкающих к вершинам, между берегами происходит взаимодействие, которое моделируется связями (силами сцепления). Физическая природа связей между берегами (сил сцепления) зависит от материала пластины, размеров трещин и зон взаимодействия (концевых зон). В рассматриваемом случае берега трещин частично сомкнулись. Размер зон контакта заранее неизвестен. Действие стрингеров в расчётной схеме заменяется неизвестными эквивалентными сосредоточенными силами P_{mn} ,

Принимаются следующие допущения: а) в тонкой пластине реализуется плоское напряжённое состояние; б) подкрепляющая система стрингеров ферменного типа, их ослабление за счёт постановки точек крепления не учитывается; в) пластина и стрингеры взаимодействуют друг с другом в одной плоскости и только в точках крепления; г) точки крепления одинаковы, их радиус (площадка сцепления) мал по сравнению с их шагом и другими характерными размерами. Действие точки крепления моделируем: в стрингере – действием в сплошном ребре сосредоточенной силы, приложенной в точке, соответствующей центру точки крепления, в пластине – действием сосредоточенной силы.

На бесконечности пластина подвержена однородному растяжению вдоль стрингеров напряжением $\sigma_y^\infty = \sigma_0$. Контур кругового отверстия и берега трещин вне концевых зон свободны от внешних усилий. В зонах контакта $[-\ell_1, -\ell_2]$ и $[\ell_2, \ell_1]$ будут возникать нормальные напряжения $\sigma_y = q(x)$. Величина контактных напряжений $q(x)$ и сил сцепления $p(x)$ заранее неизвестна и подлежит определению в процессе решения задачи.

Граничные условия в рассматриваемой задаче имеют вид:

- на контуре отверстия $\sigma_r - i\tau_{r\theta} = 0$ при $|z| = R$;

- на берегах трещины

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = 0 \quad \text{при } y = 0, \quad R \leq |x| < \ell,$$

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = p(x) \quad \text{при } y = 0, \quad \ell \leq |x| < \ell_2,$$

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = q(x) \quad \text{при } y = 0, \quad \ell_2 \leq |x| \leq \ell_1.$$

Для перемещений раскрытия трещин имеем условия:

$$v^+(x,0) - v^-(x,0) = C(x, p(x))p(x) \quad \ell \leq |x| < \ell_2,$$

$$v^+(x,0) - v^-(x,0) = 0 \quad \ell_2 \leq |x| \leq \ell_1.$$

На основании формул Колосова-Мусхелишвили и граничных условий на контуре отверстия и берегах трещин задача сводится к определению двух аналитических функций $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$ из условий

$$\Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - [\overline{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} = 0,$$

$$\Phi(t) + \overline{\Phi(t)} + t\Phi'(t) + \Psi(t) = \begin{cases} 0 & R \leq |x| < \ell \\ p(x) & \ell \leq |x| \leq \ell_2 \\ q(x) & \ell_2 \leq |x| \leq \ell_1 \end{cases}$$

Для определения параметров, характеризующих закрытие трещин, получено сингулярное интегральное уравнение, которое с помощью процедуры алгебраизации сведено к конечной нелинейной алгебраической системе. Решая алгебраическую систему методом последовательных приближений, были найдены силы сцепления в связях, контактные напряжения и размер контактных зон трещин. Для определения величин сосредоточенных сил была получена бесконечная линейная система уравнений.

Полученные соотношения позволяют решать обратную задачу, т.е. определить характеристики и напряжённое состояние стрингерной пластины с круговым отверстием, при которых достигается заданная область контакта берегов трещин.

КРИТЕРИИ РАБОТЫ ДВУТАВРОВОЙ БАЛКИ, УСИЛЕННОЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА, ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗ ОБЛАСТИ ПЛОСКОГО ИЗГИБА В ЗАДАЧУ УСТОЙЧИВОСТИ

Муртазин М.Р., Муртазина Г.Р., Акчурин Д.Г.
СГТУ, г. Саратов, Россия

В рамках научных исследований, проводимых под руководством к.т.н. доцента кафедры «Теория сооружений и строительных конструкций» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Муртазина Марата Расимовича по

изучению характера поведения под нагрузкой двутавровой балки, усиленной композитными материалами на основе углеродного волокна был проведён ряд экспериментов.

По результатам проведённых испытаний было выявлено, что несущая способность двутавровой балки усиленной композитными материалами на основе углеродного волокна увеличивается приблизительно на 15 % относительно не усиленной балки. В то же время, разрушение образца, усиленного углеволокном, происходит в результате потери устойчивости стенкой балки. Данный факт свидетельствует о том, что задача теоретического обоснования работы усиленной балки переходит из области плоского изгиба в задачу устойчивости.

Решение задачи устойчивости двутавровых балок при изгибе было предложено С.П. Тимошенко ещё в 1905 году. Однако при решении данной задачи условия «принудительного дополнительного» увеличения несущей способности не ставились. Таким «принудительным дополнительным» увеличением несущей способности как раз можно считать усиление балки композитными материалами.

В нашей стране на текущий период времени усилением металлических конструкций композитными материалами на основе углеродного волокна практически никто не занимается, имеются только скудные данные о намерениях отдельных специалистов заняться данной проблемой. А вот за рубежом, особенно в США и Германии, данной проблеме, уделяется больше внимания. Однако занимаются данной проблемой, в основном, специалисты мостовики.

Анализируя опыт зарубежных специалистов по усилению металлических конструкций элементами внешнего армирования композитными материалами на основе углеродного волокна [1, 2] можно констатировать, что в виду специфики мостовых конструкций там для исследований выбираются элементы, в том числе и двутавровые балки, либо свободно опёртые без горизонтального раскрепления, либо раскрепленные в горизонтальном направлении настилом или связями. Но такое раскрепление не может препятствовать повороту сечений вокруг некоторой оси, в общем случае не совпадающей с геометрической осью балки. В этом случае очевиден переход задачи из области плоского изгиба в задачу устойчивости, что и было подтверждено экспериментально при проведении испытаний на кафедре ТСК СГТУ имени Гагарина Ю.А.

По результатам проведённых экспериментов становится ясно, что использование внешнего армирования композитными материалами на

основе углеродного волокна при усилении металлических конструкций в виде тонкостенных стержней с двумя осями симметрии при отсутствии жёсткого закрепления элемента в горизонтальной плоскости имеет незначительный эффект, а возведение в процессе усиления дополнительных конструкций, обеспечивающих жёсткое раскрепление усиливаемой конструкции в горизонтальной плоскости может оказаться экономически не целесообразно.

Тем не менее, существуют конструкции, эксплуатируемые в таких условиях, где данное направление исследований весьма актуально. Это, так называемая, историческая застройка городов, в которой преобладают стеснённые условия и ограниченность доступа при проведении работ по усилению несущих конструкций.

К примеру, в городе Саратове большинство объектов культурного наследия относятся к концу XIX началу XX веков. В этот период широкое применение нашли конструкции междуэтажных перекрытий, состоящих из несущих элементов в виде металлических балок, уложенных с шагом 800÷1200 мм. В пространстве между балками, как правило, выполнялись кирпичные (в более поздних вариациях бетонные) цилиндрические своды – своды типа «Монье». В более поздние годы указанного периода возводились плоские железобетонные перекрытия, несущими элементами которых также были металлические балки. В качестве несущих элементов применялись металлические балки из прокатного профиля двутаврового или рельсового поперечного сечения. Это означает, что несущие металлические балки в подобных конструкциях перекрытий имеют жёсткое горизонтальное раскрепление по всей длине, а в качестве усиливаемой поверхности может выступать только нижняя полка балки.

Усиление композитными материалами на основе углеродного волокна конструкций, имеющих как в описанных случаях жёсткое раскрепление в горизонтальной плоскости, может дать более значительное увеличение несущей способности металлических конструкций (по предварительной оценке – от 25% до 40%). Помимо этого, не маловажным фактором для объектов культурного наследия является сохранение элементов интерьера здания.

Библиографический список

1. Bartholomé, S.; Pasternak, H.; Götz, F.; Ummenhofer, T.; Geßler, A.; Feldmann, M. (2015), Kleben von CFK-Lamellen im Stahlbau, DVS-Berichte Band 315, S. 927-932, Düsseldorf.

2. Bartholomé, S; Pasternak, H.; Götz, F.; Ummenhofer, T.; Geßler, A.; Feldmann, M. (2016), Systematische Untersuchung zur Verstärkung von Stahlkonstruktionen mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK); Conference: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, At Köln, Volume: 16. Kolloquium, March 2016 with 47 Reads.

ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАГРУЗОК ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЫСОТНОГО ОБЪЕКТА

Муртазин М.Р., Муртазина Г.Р., Иноземцев В.К., Акчурин Д.Г.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Одним из видов уникальных объектов являются высотные здания, так называемые «Небоскрёбы». Для возможности развития инженерных методов расчёта подобных объектов наряду с теоретическими исследованиями должны выполняться и экспериментальные исследования. Данные объекты, как ни какие другие, подвержены влиянию различных факторов окружающей среды, одним из которых, и, наверное, наиболее важным, можно считать ветровое воздействие. В тоже время ветровое воздействие имеет прямое влияние на грунтовое основание высотного объекта посредством его фундамента. Передаваемые на основание фундамента здания усилия учитывают статические и пульсационные составляющие ветровой нагрузки. Последняя выражается интенсивностью турбулентности продольной компоненты скорости в пограничном слое атмосферы. Продольная компонента скорости, в свою очередь, представляет собой соотношение стандартного отклонения колебаний скорости в среднем направлении ветра к средней скорости. Помимо этого, имеются значительные отличия интенсивности турбулентности. Так в приповерхностном слое атмосферы значение интенсивности турбулентности составляет 10-30%, а на высоте от 500 до 1000 метров уже всего 5-10%.

Одним из решаемых для высотного объекта вопросов можно считать оценку его общей устойчивости, иными словами устойчивость исходного строго вертикального положения равновесия высотного объекта, расположенного на деформируемом грунтовом основании. От общей устойчивости под воздействием горизонтальных ветровых нагрузок зависит и величина развивающихся деформаций крена высотного объекта.

С теоретической точки зрения оценка общей устойчивости высотного объекта основана на решении уравнений устойчивости «возмущённого» состояния равновесия объекта [1,2]. Уравнение общей устойчивости включает в себя главный вектор и главный момент реактивных сил в основании высотного объекта. Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе ставят вопрос об оценке данных величин для соответствующей модели. Модель высотного здания или сооружения представляет собой объект с высоко расположенным центром сил тяжести на деформируемом основании Винклера. Теоретическая оценка общей устойчивости для такой модели высотного здания связана с рассмотрением «возмущённого» состояния равновесия при начальном отклонении центра сил тяжести от исходного равновесного положения т.е. начальном эксцентриситете Θ_0 . Приращение эксцентриситета на n -ом шаге нагружения определяется разностью приращений осадок основания.

Особая точка решения, соответствующая бифуркации исходного идеализированного решения при $\Theta_0 = 0$, получается из условия равенства нулю определителя системы уравнений устойчивости, она же и определяет критическую нагрузку общей устойчивости высотного объекта.

Очевидно, что при теоретической оценке общей устойчивости условие «возмущённого» состояния равновесия в задаче устойчивости может быть сведено к рассмотрению двух интегральных параметров реактивных сил отпора основания, приложенных в центрах тяжести площадей, распределённого реактивного давления отпора основания высотного объекта, что позволяет в экспериментальных исследованиях общей устойчивости высотного объекта использовать его упрощённую модель, в которой распределённое реактивное давление отпора основания k заменяется на две упругие опоры с соответствующей эквивалентной жёсткостью на сжатие $K = 3abk/2$.

Данная система позволяет решить проблему сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований. В тоже время такая система, компактна и позволяет выполнять экспериментальные исследования общей и динамической устойчивости высотного объекта, взаимодействующего с деформируемым основанием. Результаты экспериментальных исследований можно сопоставлять с простыми теоретическими решениями.

Амплітуда вынуждзенных колебаний при динамической силе, изменяющейся по гармоническому закону $P_i(t) = P_0 \cos(\theta t)$. При отношении θ/ω , стремящемся к единице, динамический коэффициент μ быстро возрастает, а при совпадении частот колебаний обращается в бесконечность. Также можно отметить, что для объекта с высоко расположенным центром сил тяжести динамический коэффициент зависит так же и от общей устойчивости объекта.

При приближении к критическому значению вертикальной статической нагрузки на систему, амплитуда колебаний системы неограниченно возрастает и система «высокий объект–основание» теряет устойчивость.

Свойства основания, как правило, характеризуются различного рода нелинейностями, так называемыми, сложными инженерно-геологическими условиями. Под действием внешних источников на таких территориях могут возникать микросейсмические местного характера интенсивностью до 5 баллов. Одним из основных параметров надёжности высотного объекта в этом случае является его общая статическая и динамическая устойчивость, как единой системы «объект–основание».

Библиографический список

1. Иноземцев, В.К., Деформации крена высотного объекта на деформируемой плите / В.К. Иноземцев, О.В. Иноземцева, С.А. Жесткова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2017. – № 2 – С. 74-78.
2. Иноземцев, В.К. Расчёт общей устойчивости конструкций с высоко расположенным центром сил тяжести / В.К. Иноземцев, В.И. Редков, С.А. Жесткова и др. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2017. – № 5. – С. 61-65.

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ ЭКСТРУЗИОННОГО ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

Мухин А.А., Максимова А.А., Ярцев В.П.

ТГТУ, г. Тамбов, Россия

В процессе эксплуатации экструзионный пенополистирол подвергается различным атмосферным воздействиям. Для определения их влия-

ния на теплофизические свойства материала требуется более глубокое их изучение.

После воздействия циклов замораживания – оттаивания, замачивания – высушивания и повышенных температур были получены dilatометрические зависимости.

Результаты исследования показали, что замораживание и оттаивание не оказывает заметного влияния на структуру исследуемого пенополистирола. Все зависимости имеют практически линейный характер. Однако после 75 и 100 циклов повышается жёсткость материала – удлинение образцов происходит медленнее и имеет меньшее значение.

Периодическое увлажнение привело к изменению структуры исследуемого пенополистирола. Жёсткость материала увеличилась для пенопласта, подверженного этим воздействиям.

Возможно, такое поведение материала связано с тем, что при нахождении полистирольных пластмасс в воде происходит вымывание из них пластификаторов и стабилизаторов, а также миграция мономера – стирола.

Под действием повышенной температуры коэффициент теплового расширения снижается почти в два раза. По-видимому, материал при данных температурах становится жёстче, возможно это связано с удалением сорбционной влаги. Дальнейшее увеличение коэффициента говорит о нарушении структуры и связей в материале, сдерживающих его от температурных деформаций. Материал становится более эластичным и легче поддается деформациям. При температуре 100 °С также меняется форма образцов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

Наумов А.А.

ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Известно, что при производстве стеновой керамики ввод в шихту выгорающих топливосодержащих добавок даёт возможность улучшить природные свойства глинистого сырья, а также позволяет сократить его расход. Топливосодержащие материалы в тонкодисперсном состоянии

являются пластифицирующей добавкой, корректирующей гранулометрический состав и свойства глинистого сырья, интенсифицируют процесс обжига, дают возможность повысить прочность сырца и обожжённых образцов.

В работе при изготовлении лабораторных образцов полусухого прессования в качестве топливосодержащей добавки применяли золу-унос Новочеркасской ГРЭС. Данный материал представляет собой тонкодисперсный (размер частиц менее 0,25 мм) порошок чёрного цвета, что позволяет использовать его для ряда производств без помола. Характерной особенностью золы является присутствие в ней около 9 % несгоревшего топлива. В качестве основного сырья использовали глину Сальского месторождения, которая характеризуется как легкоплавкая, низкодисперсная, умереннопластичная, неспекающаяся и обладает высокой чувствительностью к сушке.

Как показали проведённые исследования, введение топливосодержащей добавки в пресс-порошок, подготовленный по традиционной технологии (подсушка и измельчение глинистого сырья до 3 мм), значительно снижает прочность сырца и обожжённых образцов.

Предварительная пластическая обработка глинозоломассы и последующее гранулирование с подсушкой до нужной влажности [1] способствует повышению прочности при сжатии сырца в 2-3 раза, обожжённых образцов в 1,5-2 раза, кроме этого, заметно улучшается внешний вид образцов.

В результате получены следующие оптимальные технологические параметры производства кирпича с предварительной пластической подготовкой:

- содержание топливосодержащей добавки – 20-25%;
- влажность глинозоломассы при гранулировании – 18-19%;
- влажность пресс-порошка – 8-9%;
- давление прессования – 20-35 МПа;
- температура обжига – 1000 °С.

При этих параметрах возможно получение обожжённых изделий с повышенными физико-механическими характеристиками: прочностью при сжатии до 40 МПа и морозостойкостью более 35 циклов.

Библиографический список

1. Наумов, А.А. К вопросу улучшения качества и расширения ассортимента керамического кирпича для действующих заводов полусухого прессования / А.А. Наумов, И.В. Трищенко, Н.Г. Гуров // Строительные материалы, 2014. – № 4. – С. 17-19.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ СТРУКТУРНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕЗОДЕФЕКТАМИ

Овчаренко А.Ю., Тутышкин Н.Д.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Анализ и моделирование процессов пластической деформации конструкционных металлических материалов с учётом повреждаемости мезодефектами требует определения полей напряжений и деформаций, с учётом реологического поведения обрабатываемых материалов. Анализ этих процессов основывается на использовании системы основных уравнений для механических и физико-структурных параметров пластически деформируемых материалов. За основной физико-структурный параметр принимается параметр повреждаемости материала дефектами деформационного происхождения (ω). Пластическая деформация материалов с прогнозируемой деформационной повреждаемостью описывается следующими основными уравнениями [1]:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla_i v_i + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = 0, \quad (2)$$

$$f(s_{ij}, \Lambda, T) = 0, \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\lambda} \frac{df}{ds_{ij}}, \quad (4)$$

и определяющим соотношением [1, 2]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \dot{\omega}(\Lambda, \bar{\sigma}, T), \quad (5)$$

где σ_{ij} - компоненты тензора напряжений; v_i - компоненты вектора скорости; s_{ij} - девиаторные компоненты напряжений; $\dot{\epsilon}_{ij}$ - компоненты тензора скорости деформации; Λ - степень деформации сдвига (параметр Одквиста), $\bar{\sigma} = \sigma/T$ - параметр трехосности напряженно-

го состояния (σ - среднее напряжение, Γ - интенсивность касательных напряжений), $f(s_{ij}, \Lambda, T)$ - пластический потенциал, T - термодинамическая температура; ω - параметр повреждаемости (физико-структурный параметр); $\dot{\lambda}$ - положительная скалярная величина, пропорциональная мощности пластической деформации; ρ - плотность материала; t - время.

Система (1)-(5) состоит из дифференциальных уравнений равновесия (1), условия сплошности (2), уравнения поверхности текучести (3), условия градиентности скоростей деформации (4) и кинетического уравнения деформационной повреждаемости (5).

Шесть уравнений (4) не являются взаимно независимыми и сводятся к трём уравнениям соосности:

$$\frac{\dot{e}_{ij}}{\sigma_{ij}} = \frac{\dot{e}_{ii} - \dot{e}_{jj}}{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}} \quad (i, j = 1, 2, 3, \quad i \neq j) \quad (6)$$

и условию подобия

$$\phi_{\dot{e}} = \phi_{\sigma} \quad (7)$$

девиаторов скорости деформации $D_{\dot{e}}$ и напряжения D_{σ} ($\phi_{\dot{e}}, \phi_{\sigma}$ - фазовые углы девиаторов).

В дальнейшем в качестве поверхности нагружения (3) принимается обобщенная функция текучести Мизеса

$$f(s_{ij}, \Lambda, T) = \frac{1}{2}(s_{ij}s_{ij}) - \tau_s^2(\Lambda, T) = 0. \quad (8)$$

где τ_s - предел текучести материала при сдвиге.

Как показали многочисленные эксперименты, обобщенная функция текучести (8) вполне удовлетворительно описывает поведение металлических конструкционных материалов при больших конечных деформациях.

Степень деформации сдвига (параметр Одквиста) определяется как

$$\Lambda = \int_s \sqrt{2(de_{ij}de_{ij} - de_{ii}de_{jj})}, \quad (9)$$

где de_{ij} - компоненты девиатора приращения деформации D_{de} .

Интенсивность скоростей деформации сдвига H связана с параметром Одвишта Λ неголономным уравнением:

$$\frac{d\Lambda}{dt} = H. \quad (10)$$

Значения параметра Λ определяются интегрированием соотношения (2.9) для каждого известного пути деформации S , когда приращения деформации de_{ij} известны.

Уравнение поверхности нагружения (3) совместно с соотношениями (4) определяют ассоциированный закон пластического течения металлов. Условие градиентности (4) позволяет построить определяющие соотношения между скоростями \dot{e}_{ij} (или приращениями de_{ij}), деформациями e_{ij} и напряжениями S_{ij} для больших пластических деформаций. Структура соотношений (4), удовлетворяющих функции нагружения (3), устанавливается из принципа минимума работы истинных напряжений на приращениях пластической деформации:

$$\partial\lambda = \dot{\lambda}dt = h d'f, \quad (11)$$

где $h > 0$ - функция переменных параметров, определяющих физико-механическое состояние материала; $d'f$ - дифференциал поверхности нагружения (3) при неизменных деформациях. Неравенство $d'f > 0$ является условием активного нагружения (для последующего продолжения пластической деформации).

При анализе процессов пластического формоизменения целесообразно рассматривать эволюцию поверхности нагружения (8) с учётом влияющих на неё факторов.

Библиографический список

1. Тутьшкин, Н.Д. Связанные задачи теории пластичности и повреждаемости деформируемых материалов / Н.Д. Тутьшкин, В.И. Трегубов. – Тула: ТулГУ - РАРАН, 2016. – 267 с.
2. Tutyshkin, N.D. Constitutive equations of a tensorial model for strain-induced damage of metals based on three invariants / N.D. Tutyshkin, P. Lofink, W.H. Müller, R. Wille, O. Stahn // International Journal of Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2016. – 28. – P. 1-19.

УСТОЙЧИВОСТЬ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Охлопков Н.Л., Березин В.А.
ТверьГТУ, г. Тверь, Россия

Одной из самых актуальных проблем механики твёрдого деформируемого тела является проблема устойчивости элементов конструкций в пределах и за пределами упругости. Она также тесно связана с развитием машиностроения и строительной отрасли. В данной работе исследуется устойчивость лёгких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) при упругих и пластических деформациях, что имеет важное значение для развития строительной отрасли.

ЛСТК являются частью более широкого класса стальных конструкций. Их основными преимуществами являются малая металлоёмкость, высокая технологичность, приспособленность для транспортировки и возможность поставки целых зданий-модулей и их несущих конструкций.

Для анализа поведения стержня любого сечения под нагрузкой, ограниченной пределом упругости, используется основная система дифференциальных уравнений устойчивости тонкостенных стержней открытого профиля при центральном нагружении, которая имеет вид [1,2].

В ходе работы была представлена методика расчёта тонкостенных профилей с различными длинами и характеристиками сечений, а именно крестообразного (2 оси симметрии), кольцевого с углом раскрытия $\alpha = 11\pi / 6$, (1 ось симметрии), сечения в виде швеллера, и неравнополочного уголка (несимметричный профиль). Для каждого типа сечения был рассмотрен пример определения критической нагрузки стержня и проведён анализ его несущей способности в зависимости от длины, что было показано на графиках, и определена длина стержня, при которой не будет превышен предел пропорциональности, и устойчивость будет потеряна в упругой зоне. При решении задач был использован численный метод решения определённых интегралов (метод Симпсона); составлены программы в среде *MS Excel 2007*, позволяющие определить критическую нагрузку для сечений с различными начальными геометрическими характеристиками (толщина стенки, высота, ширина, угол раскрытия α).

Также, в работе исследуется устойчивость стержней при упругопластических деформациях на основе формул Кармана и Энгессера. При-

водится решение задачи потери устойчивости стержня идеального двутаврового сечения с применением данных, полученных в ходе проведения эксперимента на стали марки 9Х2 в лаборатории кафедры Сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета.

Библиографический список

1. Зубчанинов, В.Г. Механика сплошных деформируемых сред / В.Г. Зубчанинов. – Тверь: ТверьГТУ, ЧуДо, 2000. – 703 с.
2. Пономарев, С.Д. Расчёты на прочность в машиностроении: в 4 ч. / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, К.К. Лихарев, В.М. Макушин, Н.Н. Малинин, В.И. Феодосьев. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1959. Ч.3: Инерционные нагрузки, колебания и ударные нагрузки. Выносливость. Устойчивость. – 1959. – 1116 с.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УТЕПЛЕНИЮ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ

Панькин С.С.

РГСУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

В XXI веке к стеновым строительным материалам предъявляются повышенные требования. Так как до 40% производимой в мире энергии потребляет ЖКХ, то одним из способов защиты жизни на Земле является сокращение тепловых выбросов через стены зданий. Частичное решение этой проблемы лежит в рамках утепления фасадов зданий.

Фасады зданий в настоящее время утепляют с помощью органических и минеральных теплоизоляционных материалов. К ним относятся минераловатные, пено- или газополимерные плитные изделия. У каждого из перечисленных материалов есть достоинства и недостатки.

Минераловатные изделия обладают низкой теплопроводностью, пожарной безопасностью, воздухопроницаемостью, но в силу волокнистой недостаточно жёсткой структуры такие материалы в условиях эксплуатации слеживаются и утрачивают исходные свойства.

Ячеистополимерные изделия обладают прекрасными теплоизоляционными свойствами, однако паронепроницаемы и выделяют токсины при пожаре.

Изделия из ячеистых бетонов лишены перечисленных выше недостатков, однако обладают низкой прочностью на растяжение, хрупки и поэтому их практически не используют для утепления фасадов зданий,

хотя широко применяют как современный энергоэффективный стеновой материал.

В РГСУ разработана и совершенствуется технология изготовления пенобетона безавтоклавного твердения дисперсно армированного отрезками синтетических волокон (ФПБ). Этот материал при плотности 300...500 кг/м³ обладает свойствами, достаточными для его применения в качестве утеплителя фасадов зданий. Предлагаемый вариант за счет использования повышенной прочности ФПБ при растяжении позволяет изготавливать изделия такой формы, которая исключает возможность продувания стены после завершения изоляционных работ. Изменяя модификацию плиты с геометрическими размерами 500×300×100 мм, были получены различные вариации (рис.1).



Рис. 1. Конструкционно-композиционный ряд

Такая технология получила название «пазл», она позволяет крепить плиты без использования связующих смесей и крепёжных элементов. Их можно располагать как вертикально, так и горизонтально.

КОНТРОЛЬ НДС ТРУБОПРОВОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Пикалов А.А.

АО «Ревизия Контроллинг Консалтинг», г. Саратов, Россия

Обширные сети трубопроводов, как внутри страны, так и за рубежом, поддерживают жизненно важные функции государств, а также являются одним из основных факторов экономического развития. Выход из строя даже небольших участков трубопроводов, нередко сопровождающийся взрывами и пожарами, может вызвать серьёзные последствия, связанные с потерей перекачиваемого продукта, высокой стоимостью ремонта, а также привести к значительному загрязнению окружающей среды [1].

К настоящему времени трубопроводная сеть России включает 250 тыс. км магистральных газо- и нефтепроводов, а также весьма разветвлённую сеть внутрипромысловых трубопроводов. На этих трубопроводах происходят аварии различного уровня, приводящие к разливам пе-

рекачиваемого продукта. Одним из условий уменьшения и предотвращения аварийных ситуаций является контроль напряжённо-деформированного состояния (НДС) трубопроводных конструкций. Для выполнения задачи оценки НДС в условиях эксплуатации применяются различные методы:

- натурные наблюдения и съёмки пространственного положения трубопровода с последующей аналитической оценкой его НДС;
- оценка уровня действующих напряжений в стенках трубопровода методами и средствами неразрушающего контроля;
- тензометрирование.

Неразрушающий контроль. К основным методам неразрушающего контроля можно отнести магнитные, акустические методы контроля, контроль методами вихревых токов и просвечиванием.

1. *Магнитные методы контроля* основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий. Магнитные методы контроля классифицируют по способам регистрации магнитных полей рассеяния или определения магнитных свойств контролируемых изделий. В работе Брук Н.В. и Лопырева Н.К. [2] подробно описаны все магнитные методы, используемые для обнаружения дефектов, таких как разрывы металла в ферромагнитных продуктах.

Помимо обнаружения дефектов типа нарушения сплошности материала (трещин, волосовин, закатов, флокенов и др.), магнитные методы позволяют решать задачи исследования структуры, определять качество термообработки деталей, наличие и количество остаточного аустенита, магнитную анизотропию, контролировать процесс распада твёрдого раствора и дисперсионного твердения, определять механические характеристики ферромагнитных сталей и чугунов по изменению их магнитных характеристик, а также контролировать толщину цементированного или азотированного слоёв и толщину поверхностного упрочнения изделий.

2. С помощью *акустических методов* в заготовках и изделиях, изготовленных практически из любых материалов, можно обнаруживать поверхностные и внутренние дефекты, представляющие собой нарушение сплошности, неоднородность структуры, зоны поражения межкристаллитной коррозией, дефекты склейки, пайки, сварки и т. п. Акустические методы позволяют измерять геометрические параметры, например толщину при одностороннем доступе к изделию, а также физико-механические свойства материалов без их разрушения.

В работах Брук Н.В. и Лопырева Н.К. [2], Выборнова Б.И. [3] и Гольденвейзер А.Л. [4] эти методы используются для изучения кинетики начальной стадии разрушения образцов и изделий при усталостных испытаниях. Важным преимуществом акустических методов является возможность их применения для контроля элементов конструкций в условиях эксплуатации без их демонтажа, особенно в тех случаях, когда требуется обеспечить надёжную работу дорогостоящих и уникальных объектов, а также машин и конструкций ответственного назначения.

Основные преимущества акустических методов:

- высокая чувствительность к мелким дефектам;
- большая проникающая способность;
- возможность автоматизации контроля благодаря мгновенной индикации дефектов;
- простота и высокая производительность контроля.

Недостатки акустических методов:

- необходимость методик контроля деталей отдельных типов;
- необходимость большой частоты обработки поверхности контролируемых объектов;

3. При контроле *методами вихревых токов* (МВТ) в работах [2, 3] используют зависимость амплитуды, фазы, траекторий, переходных характеристик и спектра частот токов, возбуждаемых в изделии, от его формы и размеров, физико-механических свойств и сплошности материала, расстояния до датчика, частоты и скорости перемещений, в том числе вибрации.

К особенностям МВТ относятся:

- возможность проверки большого числа параметров изделия;
- возможность проверки слоёв материала небольшой толщины;
- отсутствие необходимости электрического и даже механического контакта датчика с изделием;
- большая скорость и незначительная трудоёмкость контроля;
- сравнительная простота реализации дистанционного контроля деталей,
- установленных в малодоступных местах машин;
- возможность измерения толщины листа, стенки труб и деталей при одностороннем доступе;
- электрическая природа сигнала, быстрое действие, что позволяет легко автоматизировать контроль;
- возможность контроля быстро движущихся изделий.

4. *Методы просвечивания* оптически непрозрачных объектов основаны на законе ослабления интенсивности излучения, проходящего через контролируемый объект. Интенсивность излучения меняется в зависимости от плотности материала и толщины. По результатам измерения интенсивности излучения за объектом определяют наличие в нём дефектов (раковин, включений и т. д.). Различают радиографические; радиоскопические, называемые способами радиационной интроскопии и радиометрические способы регистрации радиационных изображений.

Тензометрирование. Первые два метода определения НДС конструкций трубопроводов эпизодичны и не применимы для контроля НДС в режиме реального времени или высокой частоты измерений, и требуют дорогостоящий высококвалифицированный персонал. Реализация метода тензометрирования позволяет определять НДС в реальном времени и на любой заданной периодичности.

Интеллектуальная вставка (ИВ) позволяет осуществить этот контроль как в режиме реального времени, так и в режиме посещений. Основным назначением ИВ является контроль механических напряжений, возникающих на пересечении опасных участков трубопровода. Контроль напряжений осуществляется в четырёх контрольных точках: снизу, сверху, справа и слева трубы по направлению перекачки. В результате полученные данные позволяют регистрировать НДС трубопровода, как на месте установки ИВ, так и на прилегающих участках.

Проблемы, возникающие при применении метода тензометрирования в полевых условиях, полностью решаются путём переноса работ по установке датчиков на патрубок в заводские условия, где могут быть реализованы недоступные в трассовых условиях технологии и проектные решения.

Библиографический список

1. Овчинников, И.Г., Овчи. Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций в сложных грунтово-геологических условиях. Часть 1. Обобщённая модель деформирования трубопровода / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, С.Р. Баширзаде // Интернет-журнал «Наукоедение», 2016. – Т. 8, № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/60TVN416.pdf> (доступ свободный).
2. Брук, Н.В., Лопырев Н.К. Неразрушающий контроль в судостроении и судоремонте / Н.В. Брук, Н.К. Лопарев. – М.: Транспорт, 1973. – 158 с.
3. Выборнов, Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия / Б.И. Выборнов. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с.

4. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. – М.: Гостехиздат, 1953. – 544 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Сергеева С.Б., Трещёв А.А.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Элементы конструкций, выполненные из титановых сплавов, нередко эксплуатируются в условиях совместного воздействия водородосодержащей среды и температурного поля.

Хотя механические свойства титана при комнатной температуре довольно высоки, повышение температуры приводит к резкому падению прочностных характеристик. Предел прочности титана снижается примерно вдвое при повышении температуры от 20 до 250⁰С.

Пластические характеристики титана обнаруживают своеобразную зависимость от температуры. Относительное удлинение титана при повышении температуры от комнатной до 200⁰С возрастает в 1,5 – 2 раза, но при дальнейшем повышении температуры начинает падать.

В работе ставилась задача учесть влияние двух агрессивных факторов, используя диаграммы деформирования титановых сплавов с различным содержанием водорода (полученных при комнатной температуре) и диаграмм деформирования при разных температурах (200⁰С и выше, полученных без учета наводороживания).

Вращающийся диск является одним из важных элементов машин и механизмов. Диски постоянной толщины встречаются редко, но полученные решения необходимы для упрощенных оценок и сравнений с результатами, полученными различными методами вычислений.

Рассматривалась задача осесимметричного растяжения вращающегося диска постоянной толщины в условиях воздействия водородосодержащей среды и температурного поля, выполненного из материала чувствительного к виду напряженного состояния.

Потенциал деформаций принимался в виде:

$$W = \{K_e\}\{W_o\} + (\{K_p\}\{W_o\})^n, \quad (1)$$

где $\{K_e\}, \{K_p\}$ - константы квазилинейной и нелинейной частей потенциала, определяемые в результате обработки стандартных опытов;

$$\{K_e\} = \{A_e \ B_e \ C_e \ D_e\}; \quad \{K_p\} = \{A_p \ B_p \ C_p \ D_p\};$$

$$[W] = S^2 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha_1^3 + \alpha_2^3 + \alpha_3^3 \\ \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2\alpha_3 + \alpha_3\alpha_1 \\ \alpha_1\alpha_2^2 + \alpha_1\alpha_3^2 + \alpha_2\alpha_3^2 + \alpha_2\alpha_1^2 + \alpha_3\alpha_1^2 + \alpha_3\alpha_2^2 \end{bmatrix};$$

$S = (\sigma_k \sigma_k)^{1/2}$ -модуль вектора полного напряжения в пространстве главных осей; σ_k -главные напряжения; n -показатель степени, учитывающий нелинейную связь между напряжениями и деформациями; $\alpha_k = \sigma_k / S$ -направляющие косинусы.

Для определения констант потенциала примем зависимости между главными деформациями и напряжениями в виде:

$$e_k^\pm = P_k^\pm \sigma_1^\pm + T_k^\pm (\sigma_1^\pm)^m, \quad k = 1, 2, \dots,$$

где $m = 2n - 1$; P_k, T_k -коэффициенты; верхние индексы «плюс» относятся к характеристикам растяжения, а «минус» - к характеристикам сжатия. При фиксированном показателе степени m коэффициенты P_k и T_k определяются по результатам обработки экспериментальных диаграмм деформирования, построенных в условиях простого нагружения и обработанных по методу наименьших квадратов.

Для создания математической модели деформирования титановых сплавов в условиях воздействия водородосодержащей среды и температурного поля константы потенциала и показатель степени следует выразить в виде функций, от уровня наводороживания λ и от температуры среды Q . Функциональную зависимость следует вести на этапе обработки экспериментальных диаграмм деформирования. Ввиду вышеизложенного, параметры P_k^\pm, T_k^\pm , и n заменяем функциями:

$$P_k^\pm = P^\pm(\lambda); \quad T_k^\pm = T_k^\pm(\lambda); \quad \text{и} \quad n = n(\lambda), \quad (2)$$

$$P_k^\pm = P^\pm(Q); \quad T_k^\pm = T_k^\pm(Q); \quad \text{и} \quad n = n(Q),$$

В рамках данной работы построена математическая модель деформирования титановых сплавов в условиях воздействия водородосодержащей среды и температурного поля в виде потенциала деформаций материала, учитывающего наведённую разностойчивость. Константы потенциала были представлены в виде функций от уровня наводороживания и высокотемпературной среды. Функциональная зависи-

мость констант вводилась на этапе обработки экспериментальных диаграмм деформирования при одноосном растяжении и сжатии с различной степенью наводороживания и температуры среды. Результаты работы показывают хорошее совпадение реальных диаграмм деформирования и их аппроксимаций.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОПОКИ «ЖУРАВСКОГО» МЕСТОРОЖДЕНИЯ, КАК ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕЙСТЫХ БЕТОНОВ

Симоненко П.С., Петров В.И.
ДГТУ, г. Ростов-на-Дону, Россия

Актуальность выбранной темы обусловлена тем, что пенобетоны являются энерго- и ресурсосберегающими строительными материалами, которые востребованы не только строительным комплексом Российской Федерации, но и во многих других странах мира [1]. Газонаполненные бетоны одни из самых эффективных и востребованных строительных материалов в современном строительстве.

Традиционно такие бетоны изготавливают из вяжущего - портландцемента, кварцевого песка, являющегося мелким заполнителем, воды и пенообразователя. Для получения пенобетонов кварцевый песок тщательно измельчают до удельной поверхности $1500-2500 \text{ см}^2/\text{г}$. Помол кварцевого песка необходим потому, что толщина межпоровых перегородок в газонаполненных бетонах очень невелика и находится в диапазоне от долей мм, до нескольких мм. Помол песка является энергоёмким процессом, требующим значительных энергетических затрат [2].

Известно, что при добыче и переработке минеральных ресурсов образуются многотоннажные минеральные отходы [3], негативно влияющие на экологическое равновесие окружающей среды. Поэтому нами было принято решение о необходимости исследования возможности применения пылевидных фракций опок (сырья, используемого в технологии керамики) в технологии пенобетонов.

Опоки различных месторождений обладают довольно разнообразным минералогическим составом [4], который существенно отличается от минералогического состава кварцевого песка. Однако учитывая распространённость этой осадочной горной породы, было бы полезно оценить возможность её применения в качестве сырьевого компонента в ячеистых бетонах.

В таблице представлен химический состав различных опок по данным В.Д. Котляра [5].

Таблица 1 – Химический состав различных опок

Химический состав опок	Содержание в % по массе в месторождениях			
	<i>Журавское</i>	<i>Бекешевское проявление</i>	<i>Усть-Грязнухинское</i>	<i>Масловское</i>
SiO ₂	66,18	42,51	58,11	52,23
Al ₂ O ₃	10,54	8,98	8,13	4,28
Fe ₂ O ₃	2,97	4,77	2,44	1,98
CaO	8,55	19,2	14,26	21,99
MgO	0,95	2,66	1,12	0,63
SO ₃	0,30	0,50	0,27	0,07
K ₂ O	1,42	2,46	1,03	0,52
Na ₂ O	0,62	0,29	0,59	0,11
Потери при прокаливании	8,28	18,65	13,98	17,65
Всего	99,81	99,02	99,82	99,46

Из табл. 1 следует, что Журавская опока содержит в своём составе наибольшее количество оксида кремния. Поэтому в ходе настоящих экспериментальных исследований выполнена оценка ряда физических свойств опоки Журавского месторождения.

Экспериментально установлено, что её:

- насыпная плотность опоки зависит от фракции. Для фракции 0,315 – 0,63 мм она составляет 0,773 кг/л, а для фракции 0,16-0,315 мм 0,646 кг/л;

- истинная плотность составляет 2,336 г/см³;

- содержание ПГЧ 51,2%;

- водопоглощение составляет 62,5%;

- средняя плотность в куске 1,414 кг/л;

- водопоглощение в куске по массе составляет 25,38%, по объёму 35,90%.

Вывод. Дальнейшие исследование опок Журавского месторождения будут направлены на экспериментальную оценку влияния опоки на возможность получения пенобетонов с заданными плотностью и прочностью.

Библиографический список

1. Сивальнева, М.Н. Современные способы повышения эффективности неавтоклавных пенобетонов / М.Н. Сивальнева // Научные труды

нологіі і іннавацыі» (ХХІ навучныя чтэння): сб. матэрыялаў Міжнароднага навука-практ. канф., посвяшчанага 60-летію БГТУ ім. В.Г. Шухова, Белгород, 9–10 окт. 2014 г. – Белгород: Ізд-во БГТУ ім. В.Г. Шухова, 2014. – Ч. 3. – С. 331-335.

2. Портык, А.А. Все о пенобетоне / А.А. Портык. – СПб.: 2003. – 224 с.

3. Дистанов, У.Г. Кремнистые породы СССР / У.Г. Дистанов. – Казань: Татарское книжное изд-во, 1976. – 412 с

4. Котляр, В.Д., Опоки – перспективное сырье для стеновой керамики / В.Д. Котляр, Б.Д. Талпа // Строительные материалы. – 2007. - № 2. – С. 31-33.

5. Котляр, В.Д. Стеновые керамические изделия на основе кремнистых опал-кристаллитовых пород – опок.: автореф. дис. ... д-ра технич. наук / В.Д. Котляр. – Ростов-на-Дону, 2012. – 48 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНОМ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В МОСТОСТРОЕНИИ

Скоба В.А.

СГТУ, г. Саратов, Россия

Армированные волокном полимерные композитные материалы (АВПК) – это новый строительный материал, с постепенно растущим спросом в гражданском строительстве. Мостостроение одно из направлений гражданского строительства, которое извлекает пользу из внедрения АВПК в строительство. Преимущества АВПК перед традиционными материалами, такие как железобетон и металл, являются высокий коэффициент прочности на растяжение и высокий коэффициент надёжности, возможность изготовления различных форм и фигур, а также высокая устойчивость к атмосферным воздействиям, что приводит к потенциальному снижению стоимости конечной продукции и дальнейшей эксплуатации. Эти свойства делают АВПК хорошей альтернативой традиционным материалам.

Армированные волокном композиты (АВК) представляет собой композиционный материал, изготовленный путём объединения двух и более материалов, чтобы дать новую комбинацию свойств. Однако, отличие АВК от других композитов состоит в том, что его составные материалы различны на молекулярном уровне и являются механически разделяемы. Механические и физические свойства АВК контролируются его составными свойствами и структурными конфигурациями на мик-

роуровне. Поэтому проектирование из АВК требует хороших знаний свойств материалов, которые входят в конфигурацию АВК [1].

АВПК представляет собой двухсоставной материал, из волокна и вяжущего вещества. Каждое из составляющих выполняет свою требуемую функцию, так, чтобы композитная система удовлетворительно работала в целом. В таком случае, волокно обеспечивает твёрдость и жёсткость, в то время как вяжущее вещество даёт форму и защиту от атмосферных воздействий [2].

Основная функция волокон – это переносить нагрузку и обеспечивать жёсткость, прочность, термическую стабильность и другие свойства в АВПК. Чтобы обеспечить эти функции волокна должны отвечать следующим требованиям:

- 1) высокий модуль упругости;
- 2) высокая прочность;
- 3) высокая стабильность их прочности во время обработки.

В гражданском строительстве пользуются популярностью 3 типа волокон: стеклонить, углеродные и арамидные волокна, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Стеклонить представляет собой обработанную форму стекла, которая содержит в себе ряд оксидов, таких как оксид кремния из кварцевого песка, вместе с другими сырьевыми материалами, такими как известняк, глина, борная кислота. Стеклонить имеет высокую прочность и сравнительно низкую стоимость.

Арамидное волокно является одним из высокоэффективных волокон, используемых в гражданском строительстве. Изготавливают их следующим путем: комплексные нити получают методом сухо-мокрого формования жидкокристаллического раствора полимера РРТА в концентрированной серной кислоте. После экструдирования через формовочные отверстия жидкие микрофиламенты проходят сквозь воздушный зазор и попадают в коагуляционную ванну с водой. Затем полученные нити моют, нейтрализуют, высушивают и наматывают на бобины.

В прядильном растворе жёсткие молекулы арамида формируют жидкокристаллические домены, в которых цепочки полимера строго сориентированы. В ходе процесса формования волокна, продольное вытягивание этих доменов в воздушном зазоре способствует их дальнейшему формированию и ориентации цепочек в направлении потока.

Арамидные волокна имеют высокую прочность, отсутствие электропроводности, низкую воспламеняемость, хорошие показатели со-

хранения целостности ткани в высоких температурах. Недостатком является то, что арамидные волокна трудно резать и обрабатывать [3].

Углеродные волокна – это ещё один тип высокоэффективных волокон, применяемые в гражданском строительстве. Углеродные волокна обычно получают термической обработкой химических или природных органических волокон, при которой в материале волокна остаются главным образом атомы углерода. Температурная обработка состоит из нескольких этапов. Первый из них представляет собой окисление исходного (полиакрилонитрильного, вискозного) волокна на воздухе при температуре 250 °С в течение 24 часов. В результате окисления образуются лестничные структуры, представленные на рис. 1. После окисления следует стадия карбонизации — нагрева волокна в среде азота или аргона при температурах от 800 до 1500 °С. В результате карбонизации происходит образование графитоподобных структур. Процесс термической обработки заканчивается графитизацией при температуре 1600-3000 °С, которая также проходит в инертной среде. В результате графитизации количество углерода в волокне доводится до 99% [4].

Вязущее вещество представляет собой полимер, состоящий из молекул, из многих простых составных частей, называемые мономерами. Без присутствия вязущего вещества, сами себе волокна мало пригодны. Основные свойства вязущих веществ: 1) связывать волокна вместе и переносить нагрузку на волокна; 2) обеспечивать жесткость и форму конструкционному элементу; 3) Обеспечивать защиту волокон от химических и физических воздействий.

Тип материала вязущего вещества и его совместимость с волокнами также существенно влияют на конечную конструкцию. Существуют различные типы вязущих веществ, которые могут быть использованы в гражданском строительстве. Различают два основных полимера: термопластичные и термореактивные. Термопластичные полимеры являются вязкими по своей природе и более крепкими чем термореактивные. Их форму можно сменить за счет нагрева и охлаждения. Обычно используют такие термопласты как: полиолефины, алифатические и ароматические полиамиды, фторопласты и др.

Термореактивные полимеры обычно изготавливаются из жидкого и полутвёрдого исходного продукта. Эти исходные продукты затвердевают в серии химических реакций: поликонденсации или полимеризации. В конце производственного процесса они преобразуются в твёрдое тело, образуя плотно связанную трёхмерную полимерную цепочку. В отличие от термопластичных полимеров, термореактивные полимеры,

когда затвердевают, не могут быть переплавлены или реформированы. Термореактивные полимеры являются хрупкими по своей природе. Наиболее распространённые в гражданском строительстве являются: фенолоальдегидные, карбамидные, полиэфирные, эпоксидные и полиуретановые [5].

Укрепление и модернизация существующих сооружений с использование АВПК является одним из практических применений АВПК в гражданском строительстве. Главным преимуществом является то, что это просто, быстро и эффективно. Например, с помощью АВПК было укреплено около 5% мостов в Европе, что позволило сэкономить около 66 млрд. долларов. К примеру, мост Каттенбуш в Германии, в котором конструкция была усилена 20 армированных стекловолокном плит. Серия нагрузочных тестов, после укрепления конструкции показала, что ширина трещины была уменьшена на 50%, а максимальное напряжение было уменьшено на 36% [6].

АВПК, используемые для упрочнения и модернизации, могут быть в виде листа или пластины, в зависимости от их применения. Внешне соединённые АВПК могут быть использованы для увеличения жёсткости изгибающихся и сдвигающихся элементов, такие как балки, плиты. Для применения внешне соединённых АВПК используются 3 метода: усиленное адгезионное соединения (композитный элемент предварительно изготовлен, затем наклеивается на бетонную основу клеем под давлением), наслаивание вручную (смола наносит на бетонную основу, затем слои волокон пропитывают валиком; смесь отвердевает сразу), пропитка (армирующее волокно размещается над рассматриваемой зоной и всю область заключают в вакуумную капсулу.)

Хоть стальная арматура в бетонной конструкции физически защищена бетоном, агрессивное состояние окружающей среды может стимулировать карбонизацию бетона, и образованию в стали гидратированного оксида железа, что приводит к раскалыванию бетона. Основной причиной износа железобетонного моста, является коррозия стальной арматуры. Поскольку АВПК обладает коррозионной стойкостью, его можно использовать для замены стальной арматуры. Тем не менее, есть несколько проблем при использовании арматуры из АВПК. Одной из проблем является то бетонный элемент, армированный арматурой из АВПК может не иметь такого же растяжения, как у стальной арматуры. Это приведёт к такой технической проблеме как, большой прогиб. Поэтому перед его применением необходимо провести больше экспериментов.

АВПК могуць быць выкарыстаны пры сейсмічнай модернізацыі жалезабетонных мастоў у форме аб'ёрнутай колонны. Традыцыйныя метады сейсмоўсілення гэта выкарыстанне сталёвых абалочак і сталёвых тросаў, абмотаных вакол колонны. Прынцып сейсмоўсілення АВПК заключаецца ў наклеўцы з дапамогай спецыяльнага клею на паверхню канструкцыі холстоў ці пліт, а таксама сеткі. Асноўныя перавагі: высокія механічныя характэрыстыкі матэрыялаў, зьмяньшэньне часавых выдаткаў, зьмяньшэньне працоўных выдаткаў, не ўцяжэляюць ісходную канструкцыю [7].

АВПК прадстаўляе сабой патэнцыяльны будавальны матэрыял для мастастроўня. Ён мае некалькі пераваг перад традыцыйнымі матэрыяламі. К яму адносіцца высокае адношэньне трываласьці да вагі, устойлівасьць да атмасфэрных уздзеяньняў. Аднак яго прыняцьце ў галіну мастастроўня адбываецца даволна медльна. Строўць толькі малыя пешаходныя масты з гэтых матэрыялаў, так як гэты матэрыялы яшчэ плахо вывучаны і няма нарматываў. У далейшым гэты матэрыял будзе лепш вывучаны і зьмяніць традыцыйныя на сёньняшні дзень матэрыялы.

Бібліяграфічны спісак

1. Mazumdar, S. Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. CRC Press, 2002.
2. Use of fiber reinforced polymer composite in bridge structures / Chakrapan Tuakta, 2004.
3. <https://www.teijinaramid.com/ru/what-is-aramid/> (дата абрацьце 20.05.18.)
4. Meier, U. "The Development of Composites and Its Utilization in Switzerland." Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction, R. Shenoі, S.Moy, L Hollaway, Eds., 2000, pp. 23-31.
5. <http://domchtonado.ru/polimernie-vyazhuschie.html> (дата абрацьця 20.05.18)
6. Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete. J.L. Clarke. September 16,1993 by CRC Press
7. Овчинников, И.И., Овчинников И.Г., Мандрик-Котов Б.Б., Михалдыкин Е.С. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Б.Б. Мандрик-Котов и др. // Интернет-журнал «Науковедение», 2016. – Том 8. – № 6. – <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN616.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

ВЛИЯНИЕ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ МАТЕРИАЛА И ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НДС ПОЛОГОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОРТОТРОПНОЙ ОБОЛОЧКИ

Спасская М.В., Трещёв А.А.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Рассматривается задача о нагружении пологой сферической оболочки. Материал – трёхармиованный тканый полимер ПЗ6-50 [1]. Геометрические характеристики: толщина оболочки $h = 0,6$ м, радиус в плане $a=9$ м, стрела подъёма $f = 1,5$ м. Срединная поверхность оболочки является частью сферы, характеризуемой радиусом $R = 26,25$ м. Нагрузка на оболочку равномерно распределённая, приложенная перпендикулярно к наружной поверхности ($q = 2$ МПа), также оболочка воспринимает температурное воздействие (на внутренней поверхности оболочки $t = -20$ °С, на внешней – $t = +50$ °С). В качестве граничных условий принято жёсткое защемление по периметру оболочки, в качестве начальных условий принята температура оболочки 0 °С.

Были получены разрешающие дифференциальные уравнения в рамках теории Трещёва А.А. [2], описывающие НДС анализируемой оболочки. Следуя двухшаговому методу последовательного возмущения параметров В.В. Петрова [3], были линеаризованы полученные разрешающие дифференциальные уравнения. С помощью метода конечных разностей [4] получена система линеаризованных алгебраических уравнений. В программном комплексе MATLAB разработана прикладная программа для решения поставленной задачи. Используя разработанную математическую модель и прикладную программу расчёта, решена задача по определению НДС пологой сферической оболочки.

Сравнение результатов расчёта в рамках теории Трещёва А.А. [1] проводилось с результатами расчёта, полученными по классической теории анизотропных материалов, на основе программного комплекса ANSYS, а также с наиболее апробированными моделями разносопротивляющихся материалов С.А. Амбарцумяна, Р.М. Джонса и Д.А.Р. Нельсона, К.В. Берта и Д.Н. Редди. Также выполнено сравнение результатов решения задачи с учётом и без учёта температурного воздействия.

Для максимальных прогибов разница значений, полученные по классической теории и по модели деформирования Трещёва А.А. составляет 39,5%. Расхождение в значениях максимальных прогибов, полученных с учётом и без учёта температурного воздействия (для принятых изменений температуры) составляет 2,6%.

Для максимальных горизонтальных перемещений разница значений, вытекающих из классической теории и из рассматриваемой модели составляет 32,3%. Расхождения в значениях максимальных горизонтальных перемещений с учётом и без учёта температурного воздействия для принятых изменений температуры составляют 2,3%.

Значения максимальных растягивающих радиальных напряжений в заделке оболочки с учётом разносопротивляемости превосходят аналогичные данные, полученные без её учёта на 7,7%, для сжимающих – на 4,4%. Для сжимающих радиальных напряжений в центре оболочки значения напряжений, полученные по классической теории меньше аналогичных результатов, вытекающих из рассмотренной модели на 27,5%. Разница в значениях напряжений с учётом и без учёта температурного воздействия для принятых изменений температуры достигает 10,6%.

Для растягивающих окружных напряжений в заделке значения, полученные с учётом разносопротивляемости превышают аналогичные данные без её учёта на 19,6%, а для сжимающих – на 1,3% ниже. Для максимальных сжимающих окружных напряжений в центре оболочки значения, полученные по классической теории меньше результатов, вытекающих из рассмотренной модели на 26,9%. Расхождение в результатах для окружных напряжений с учётом и без учёта температурной нагрузки для принятых изменений температуры доходит до 30,6%.

Анализируя результаты решения задачи согласно разным моделям деформирования, можно утверждать, что данные по рассматриваемой модели Трещёва А.А. в определённых интервалах хорошо согласуются с результатами расчёта по другим теориям, описывающим деформирование ортотропных разносопротивляющихся материалов. Наиболее близкие результаты к модели Трещёва А.А. получены с применением уравнений деформирования Р.М. Джонса и Д.А.Р. Нельсона. Наибольшее расхождение составляет: для перемещений – 5,1%, для радиальных напряжений – 6,2%, для окружных напряжений – 12,9%. Разница результатов по рассматриваемой модели и по модели деформирования С.А. Амбарцумяна достигает: для перемещений – до 10,2%, для радиальных напряжений – до 12,4%, для окружных напряжений – 25,6%. Наибольшее отличие от модели Трещёва А.А. обнаруживается в данных, вытекающих из модели К.В. Берта и Д.Н. Редди: для перемещений – до 19,3%, для радиальных напряжений – до 12,1%, для окружных напряжений – 22,8%.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что учёт температурного воздействия, а также свойств разносопротивляемости материала необходимы для получения достоверных результатов расчёта пологих сферических оболочек, т. к. эти факторы вносят значительные поправки в картину НДС конструкции.

Библиографический список

1. Розе, А.В., Трехармированные тканые материалы / А.В. Розе, И.Г. Жигун, М.Н. Душин // Механика полимеров. – 1970. – №3. – С. 471-476.
2. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.
3. Петров, В.В. Методы расчёта конструкций из нелинейно деформируемого материала / В.В. Петров, И.В. Кривошеин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 208 с.
4. Варвак, П.М. Метод сеток в задачах расчёта строительных конструкций / П.М. Варвак, Л.П. Варвак. – М.: Стройиздат, 1977. – 160 с.

К РАСЧЁТУ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

Толпашева Д.Р., Артамонова Е.Н.
СГТУ, г. Саратов, Россия

При оценке прочностной надёжности элементов конструкций необходимо решать проблему длительной прочности - падение прочности материалов с течением времени под действием нагрузки [1], а определение законов поведения различных физических систем, исходя из некоторых общих принципов, является одной из основных задач механики.

Анализ экспериментальных данных показывает, что характеристики температурной зависимости процессов релаксации и разрушения вязкоупругих полимеров содержат одни и те же значения энергии активации для каждого материала. Объединение различных подходов к описанию этих процессов, т.е. формулирование общей математической теории деформирования и разрушения полимеров зависит от изучения взаимосвязи деформации, разрушения и действия напряжения, темпе-

ратуры, агрессивных факторов во всём интервале времени работы элемента.

Вязкоупругое поведение отражает комбинированные вязкие и упругие реакции материала под механическим напряжением. Вязкоупругие свойств композитов зависят от многих переменных, таких как температура, давление и время; химический состав, молекулярная масса и распределение веса и кристалличности; разбавление растворителями или пластификаторами; смесь с другими материалами с образованием составных систем. Как известно, физический процесс разрушения можно условно разбить на три стадии: рассеянных разрушений, развитых трещин, интенсивный рост магистральной трещины.

При инженерных расчётах на прочность конструкционных материалов принято предположение, что появление магистральной трещины равносильно полному разрушению.

В работе приводятся результаты исследований в области расчёта длительной прочности элементов из нелинейных вязкоупругих полимеров, строятся математические выражения обобщённых критериев напряжённо-деформированного состояния образцов с условиями разрушения. Согласно кинетическому подходу разрушение представляется как постепенно развивающийся во времени процесс изменения параметров микроструктуры частиц элемента при действии нагрузки. Такой подход целесообразен в связи с все большим применением конструкций из композитных материалов на основе полимербетонов, у которых задача прогнозирования работоспособности осложняется из-за необратимых и обратимых процессов изменений молекулярной и надмолекулярной структур в период эксплуатации.

Для построения теорий длительной прочности используются кривые ползучести и мгновенного деформирования. Приведённые в различных источниках экспериментальные данные из опытов на ползучесть и длительную прочность можно схематично обобщить в виде кривых изменения во времени при фиксированных уровнях напряжений [2]. Будем подбирать для аппроксимации кривых σ - ϵ (напряжение-деформация) при фиксированных моментах времени соответствующие соотношения, как уравнения кривых мгновенного деформирования.

Для получения математических выражений экспериментальные данные зависимостей σ - ϵ можно сгруппировать следующим образом: диаграммы σ - ϵ вязкоупругих образцов, полученные для различных моментов времени, при различных влияниях агрессивных воздействий и

конкретном уровне напряжения; кривые ползучести; кривые длительной прочности материала; кривые зависимости длительной предельной деформации разрушения от времени разрушения при различных условиях эксплуатации; данные о долговечности материала в различных условиях.

На основе совместного использования описанных экспериментальных данных можно построить обобщённые критерии предельного напряжённо-деформированного состояния образцов с условиями разрушения и привести геометрическую интерпретацию напряжённо-деформированного состояния во времени t в виде поверхностей в пространстве σ, ϵ, t .

Уравнения кинетики процесса деградации составлены исходя из положения, что деградация механических свойств $\omega(t)$ – процесс, а не мгновенный акт, т.е. функцией t, σ, ϵ (времени, напряжения и деформации) является не сама величина ω , а её скорость.

Представляя уравнения состояния вязкоупругой среды наследственного типа в виде интегральных уравнений Вольтера II- рода можно установить вид функции $\omega(t)$. Ядро затухающей ползучести $K(t-\tau)$ в интегральных уравнениях Вольтера II- рода, как показывают опыты, хорошо описывается, например, выражением:

$$K(t-\tau) = \delta e^{-\delta_1(t-\tau)}, \quad (1)$$

где δ, δ_1 – параметры ползучести; определяются по результатам длительных испытаний материала.

Полученные в работе критерии обладают значительной общностью, обусловленной интегральной зависимостью от истории деформации, и позволяют оценивать проявления вязкоупругости, длительную прочность материалов с учётом воздействия нагрузки и окружающей среды, исходя из взаимосвязанных, физически обоснованных гипотез вязкоупругости и длительной прочности.

Библиографический список

1. Морозов, Н.Ф. Проблемы динамики разрушения твёрдых тел / Н.Ф. Морозов, Ю.В. Петров. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997.
2. Ломакин, Е.В. Нелинейное вязкоупругое поведение наполненных эластомерных материалов / Е.В. Ломакин, Т.А. Белякова, Ю.П. Зезин // Изв. Сарат. ун-та. Сер. Математика. Механика. Информатика, 2008. – Т.8. – С.56-65.

О КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЯХ ДЛЯ ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Трещёв А.А.

ТулГУ, г. Тула, Россия

Широкое применение обобщённого закона Гука на протяжении более полутора столетий утвердило его как несомненный физический закон. Вместе с тем данные экспериментов по деформированию таких материалов, как чугуны [1-5], графиты [6-18], керамика [19], бетоны [20-24] и широкий спектр композитных материалов [25-30], свидетельствуют о том, что линейная аппроксимация зависимостей между напряжениями и деформациями с определением модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν даже в достаточно узком диапазоне изменения деформаций не может считаться удовлетворительной. Несравненно лучшим оказывается аналитические аппроксимации опытных данных при одноосном растяжении и при одноосном сжатии различными линейными функциями с вычислением модуля деформаций E^+ (секущего модуля упругости), соответствующего одноосному растяжению, и модуля деформаций E^- , отвечающего одноосному сжатию. Соответственно устанавливаются и коэффициенты поперечной деформации ν^+ и ν^- . Так, приходим к представлению свойств изотропного упругого материала, механические характеристики которых зависят от вида напряжённого состояния, получившего в 60-е годы двадцатого столетия название разномодульной теории упругости, которая оперирует квазилинейными уравнениями состояния.

Приоритет в обобщении классического закона Гука на случай материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния, принадлежит учёным России и ряда республик бывшего Союза ССР. Исследования в данном направлении, проводившиеся до 60-х годов, носили эпизодический характер и не вызывали заметного интереса. Позднее развитие систематических прикладных исследований стимулировалось широким внедрением новых материалов, что, несомненно, привело к появлению фундаментальных результатов в области построения определяющих соотношений для материалов, механические характеристики которых, зависят от вида напряжённого состояния. Повышение интереса к подобному физико-механическому явлению, наблюдаемое в последние годы, вызвано широким внедрением композитных материалов и полимеров, наиболее характерной особенностью деформирования которых, как

отмечают многие авторы, является явное отклонение характеристик деформирования от общепринятой «гипотезы единой кривой» [1-30].

Достаточно подробный обзор работ, посвящённых построению определяющих соотношений, учитывающих чувствительность деформационных характеристик изотропных материалов к виду напряжённого состояния, представлен в работах [31, 32]. В этих же работах в рамках двух нормированных пространств напряжений представлены достаточно общие потенциальные соотношения между деформациями и напряжениями в квазилинейном приближении, из которых как частный случай вытекает большинство известных моделей уравнений состояния других авторов.

В первом пространстве потенциал деформаций сформулирован в виде:

$$W = 0,5[(A + B\alpha_1)\sigma_1^2 + (A + B\alpha_2)\sigma_2^2 + (A + B\alpha_3)\sigma_3^2] + \\ + [C + E\alpha_3 + D(\alpha_1 + \alpha_2)]\sigma_1\sigma_2 + [C + E\alpha_1 + D(\alpha_2 + \alpha_3)]\sigma_2\sigma_3 + \\ + [C + E\alpha_2 + D(\alpha_1 + \alpha_3)]\sigma_1\sigma_3, \quad (1)$$

а во втором в следующей форме:

$$W = (\tilde{b}_1 + \tilde{b}_3\xi)\sigma^2 + (\tilde{b}_2 + \tilde{b}_4\xi + \tilde{b}_5\eta\text{Cos}3\varphi)\tau^2, \quad (2)$$

где $\alpha_k = \sigma_k / S$ – главные нормированные напряжения; $S = \sqrt{\sigma_k \sigma_k}$ – норма первого векторного пространства; $\text{Cos}\psi = \xi = \sigma / S_0$, $\text{Sin}\psi = \eta = \tau / S_0$ – нормированные напряжения второго пространства; $\text{Cos}3\varphi = \sqrt{2} \det(S_{ij}) / \tau^3$ – фазовый инвариант; $S_0 = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$ – норма второго пространства; $\sigma = \delta_{ij}\sigma_{ij} / 3$ – нормальное октаэдрическое напряжение; $\tau = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} / 3$ – касательное октаэдрическое напряжение; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$ – девиатор тензора напряжений δ_{ij} – символы Кронекера; $\tilde{b}_1 = 1,5(A + 2C)$, $\tilde{b}_2 = 1,5(A - C)$, $\tilde{b}_3 = 1,5(B + 4D + 2E) / \sqrt{3}$, $\tilde{b}_4 = 4,5(B - E) / \sqrt{3}$, $\tilde{b}_5 = 0,75(B - 2D + 2E)\sqrt{2} / \sqrt{3}$ – константы, вычисляемые через механические характеристики материала.

Между параметрами двух нормированных пространств имеются однозначные зависимости:

$$S_0 = S/\sqrt{3}; I_\alpha = \sqrt{3}\xi; III_\alpha = (3\xi^3 + 9\xi\eta^2 + 1,5\sqrt{2}\eta^3\text{Cos}3\varphi)/\sqrt{3}, \quad (3)$$

где $I_\alpha = \alpha_k = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$; $II_\alpha = \alpha_k \alpha_k = 1$; $III_\alpha = \alpha_k \alpha_k \alpha_k$ – инварианты первого пространства.

Следствием принятых потенциалов являются общие законы деформирования:

а) закон изменения объёма

$$e = \sigma/3K_0 + \tau/3D_0; \quad (4)$$

б) закон изменения формы

$$\mathcal{E} = \sqrt{1 + tg^2} \omega (\tau/2G_0 + \sigma/3D_0); \quad (5)$$

в) уравнение, определяющее фазовую характеристику

$$tg\omega = 3\tilde{b}_5\eta\text{Sin}3\varphi/(3\eta/2G_0 + \xi/D_0), \quad (6)$$

где K_0 – обобщенный «модуль» объемных деформаций; G_0 – обобщенный «модуль» формоизменения (сдвига); D_0 – обобщенный «модуль» дилатации; $\omega = \varphi - \beta$ – разность фаз напряженного и деформированного состояния; $K_0 = 1/[2\tilde{b}_1 + \tilde{b}_3\xi(2 + \eta^2) - \tilde{b}_5\eta^3\text{Cos}3\varphi]$; $D_0 = 1/\tilde{b}_4\eta^3$; $2G_0 = 3/[2\tilde{b}_2 + \xi^3(2\tilde{b}_4 - \tilde{b}_3) + \tilde{b}_5\eta^3(2 + \xi^2)\text{Cos}3\varphi]$; $3e = \theta = \delta_{ij}e_{ij}$ – объёмные деформации; $\mathcal{E} = \gamma/2$; $\gamma = \sqrt{4/3\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}}$ – октаэдрический сдвиг; $\varepsilon_{ij} = e_{ij} - \delta_{ij}\theta/3$ – девиатор тензора деформаций.

В работах [31, 32] показано, что предложенные определяющие соотношения для квазилинейных материалов учитывают дилатационные свойства. С другой стороны, как следует из уравнений (5), изменение формы зависит от средних напряжений. Однако, если касательные напряжения $\tau = 0$, то формоизменения не происходит: $\mathcal{E} = 0$, т. е. при гидростатическом напряжении не возникает деформаций сдвига. Наличие подобных свойств у разносопротивляющихся материалов подтверждается во всех теоретических и экспериментальных исследованиях [1-30].

Видно, что потенциал деформаций в двух формах (1) и (2) содержит пять констант, подлежащих определению. Поэтому в общем случае

опытов по одноосному растяжению и одноосному сжатию, из которых можно установить только четыре константы, недостаточно. Из двух указанных экспериментов вычисляются следующие параметры:

$$A = 0,5(1/E^+ + 1/E^-); \quad B = 0,5(1/E^+ - 1/E^-);$$

$$C = -0,5(v^+/E^+ + v^-/E^-); \quad D = -0,5(v^+/E^+ - v^-/E^-). \quad (7)$$

Как вполне естественным вариантом было рассмотрено [31, 32] производить вычисление пятой константы по данным опытов на простой сдвиг. При этом, обработав результаты экспериментов на простой сдвиг и получив константу материала G_q (модуль сдвига при чистом сдвиге), из выражения потенциала (2) определяется параметр

$$\tilde{b}_2 = 1,5(A - C) = 0,75/G_q. \quad (8)$$

С другой стороны, из опытов на одноосное растяжение и одноосное сжатие из выражения (2) имеем

$$\tilde{b}_2 = 0,75[(1 + v^+)/E^+ + (1 + v^-)/E^-]. \quad (8^*)$$

Данный факт подтвердил то, что соотношения рассматриваемого уровня точности (1) и (2) описывают состояния разносопротивляющихся сред, для которых модуль сдвига G_q не является независимой характеристикой материала, а должен вычисляться согласно условию

$$1/G_q = 1/G = (1 + v^+)/E^+ + (1 + v^-)/E^-. \quad (9)$$

Проблему определения пятой константы предложено [31, 32] решать путём обработки фазовой характеристики, как это рекомендуется в нелинейной теории упругости [33]. Однако в литературе, посвящённой экспериментальным исследованиям разносопротивляющихся материалов, оказалось слишком мало сведений по конкретным данным о величине $tg\omega$. В свете вышеизложенного были предложены [31, 32] априорные определения значений пятой константы, не противоречащие результатам экспериментов и основным законам механики.

В общем случае рекомендованы три вполне приемлемых варианта априорного вычисления пятой константы.

Вариант № 1. Постулируя независимость состояния деформируемой среды от фазы напряжений, а это приводит к равенству $\tilde{b}_5 = 0$ (2) и из опытов на одноосные растяжение и сжатие вытекают зависимости

$$\begin{aligned} \tilde{b}_1 &= 0,75[(1 - 2\nu^+)/E^+ + (1 - 2\nu^-)/E^-]; \\ \tilde{b}_2 &= 0,75[(1 + \nu^+)/E^+ + (1 + \nu^-)/E^-]; \quad \tilde{b}_3 = -1,5\sqrt{3}(\nu^+/E^+ - \nu^-/E^-); \\ \tilde{b}_4 &= 0,375\sqrt{3}[(3 + 2\nu^+)/E^+ - (3 + 2\nu^-)/E^-]. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом константа E , фигурирующая в записи (1) определена следующим образом:

$$E = -0,25[(1 + 2\nu^+)/E^+ - (1 + 2\nu^-)/E^-]. \quad (11)$$

Тогда в форме записи (1) сохраняется пять вычисленных констант, а выражение (2) превращается в четырехконстантное:

$$W = (\tilde{b}_1 + \tilde{b}_3\xi)\sigma^2 + (\tilde{b}_2 + \tilde{b}_4\xi)\tau^2. \quad (2^*)$$

Вариант № 2. Естественным является предположение о малозначимости члена $E\alpha_1\alpha_2\alpha_3$, где сомножителями одновременно являются три главных нормированных напряжения – величины малого порядка по сравнению с нормой векторного пространства S (нормированное пространство № 1) в соотношениях вида (1). Кроме того, одновременный учёт трёх нормированных напряжений в ряду элементов второго порядка малости имеет ещё меньшее значение. Следовательно, в соотношениях (1) можно принять $E = 0$. Тогда потенциал (1) превращается в четырёхконстантный:

$$\begin{aligned} W &= 0,5[(A + B\alpha_1)\sigma_1^2 + (A + B\alpha_2)\sigma_2^2 + (A + B\alpha_3)\sigma_3^2] + \\ &+ [C + D(\alpha_1 + \alpha_2)]\sigma_1\sigma_2 + [C + D(\alpha_2 + \alpha_3)]\sigma_2\sigma_3 + \\ &+ [C + D(\alpha_1 + \alpha_3)]\sigma_1\sigma_3 \end{aligned} \quad (1^*)$$

и простейших опытов на одноосное растяжение и одноосное сжатие вполне достаточно для определения констант в соответствии с условиями (7). В то же время в записи потенциала (2) сохраняется пять констант, которые вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{b}_1 &= 0,75[(1 - 2\nu^+)/E^+ + (1 - 2\nu^-)/E^-]; \\ \tilde{b}_2 &= 0,75[(1 + \nu^+)/E^+ + (1 + \nu^-)/E^-]; \end{aligned}$$

$$\tilde{b}_3 = 0,25\sqrt{3}[(1-4v^+)/E^+ - (1-4v^-)/E^-]; \quad (12)$$

$$\tilde{b}_4 = 0,75\sqrt{3}(1/E^+ - 1/E^-);$$

$$\tilde{b}_5 = 0,125\sqrt{6}[(1+2v^+)/E^+ - (1+2v^-)/E^-].$$

Вариант № 3. Для определения пятой константы можно использовать предположение о совпадении формы записи закона изменения объема квазилинейного разносопротивляющегося материала при гидростатическом сжатии или растяжении с формой, вытекающей из обобщенного закона Гука:

$$\theta^-/3 = \sigma^-(1-2v^-)/E^-; \quad \theta^+/3 = \sigma^+(1-2v^+)/E^+. \quad (13)$$

Из сравнения записей законов изменения объема (4) и (13) при гидростатическом сжатии ($\xi = -1, \eta = 0$) и растяжении ($\xi = 1, \eta = 0$) вытекают следующие зависимости

$$E = 0,25\sqrt{3}[(1-2v^+)/E^+ - (1-2v^-)/E^-] -$$

$$- 0,25[(1-4v^+)/E^+ - (1-4v^-)/E^-];$$

$$\tilde{b}_1 = 0,75[(1-2v^+)/E^+ + (1-2v^-)/E^-];$$

$$\tilde{b}_2 = 0,75[(1+v^+)/E^+ + (1+v^-)/E^-];$$

$$\tilde{b}_3 = 0,75[(1-2v^+)/E^+ - (1-2v^-)/E^-]; \quad (14)$$

$$\tilde{b}_4 = 0,375\sqrt{3}\{[(3-4v^+)/E^+ - (3-4v^-)/E^-] -$$

$$- \sqrt{3}[(1-2v^+)/E^+ - (1-2v^-)/E^-]\};$$

$$\tilde{b}_5 = 0,75\sqrt{2}\{0,5[(1-2v^+)/E^+ - (1-2v^-)/E^-] + \sqrt{3}(1/E^+ - 1/E^-)\}.$$

При таком варианте обе формы потенциала деформаций (1) и (2) остаются пятиконстантными при однозначном определении констант только из двух простейших опытов.

В работе [34] Н.М. Матченко и И.Н. Матченко попытались предложить наиболее универсальные подходы и формы построения квазилинейных четырёхконстантных потенциалов деформаций, одновременно заметив в работе [32] недопустимую оплошность в критике формы потенциалов напряжений, предложенных в статьях [35-37]. Данная оплошность касается утверждения, что согласно

потенциалу [35-37] в изотропном материале чистое гидростатическое напряжение вызывает изменение формы. На самом же деле этого не происходит и данное критическое замечание не соответствует действительности. Однако недостатки потенциала [35-37] имеются для трёхконстантной формы, так как экспериментально определяемых материальных параметров имеется четыре, что непременно приводит к ограничению на механические характеристики материалов, то есть устанавливает функциональную зависимость между некоррелируемыми величинами.

Попытка же предложить новый подход к построению форм квазилинейных четырёхконстантных потенциалов деформаций [34] оказалась лишь переделкой инвариантных обозначений потенциалов (1) и (2). Поясню по сути. Все квазилинейные модели деформирования изотропных материалов базируются на введении тех или иных количественных и качественных характеристик напряжённого состояния сплошной среды. В работе [34] Н.М. Матченко и И.Н. Матченко рассматривают три группы таких параметров:

а) количественные параметры первой группы –

$$H_I = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma = \delta_{ij}\sigma_{ij};$$

$$H_{II} = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 = S^2 = \sigma_k\sigma_k = 3S_0^2; \quad (15)$$

б) количественные параметры второй группы –

$$I_I = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma = \delta_{ij}\sigma_{ij};$$

$$I_{II} = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 9\tau^2; \quad (16)$$

г) количественные параметры третьей группы –

$$J_I = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma = \delta_{ij}\sigma_{ij}$$

$$J_{II} = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 = 3(S_0^2 - 1,5\tau^2). \quad (17)$$

Качественной характеристикой напряжённого состояния для всех этих групп в работе [34] предлагается использовать один следующий параметр:

$$\chi = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = 3\sigma / S = 3\sigma / (\sqrt{3}S_0). \quad (18)$$

В результате использования данных параметров (15)-(18) позволило Н.М. Матченко и И.Н. Матченко [34] получить три формы квазилинейного потенциала:

$$W = (A_h + a_h\chi)H_I^2 + (B_h + b_h\chi)H_{II} ; \quad (19)$$

$$W = (A_i + a_i\chi)I_I^2 + (B_i + b_i\chi)I_{II} ; \quad (20)$$

$$W = (A_j + a_j\chi)J_I^2 + (B_j + b_j\chi)J_{II} . \quad (21)$$

Нетрудно заметить, что все три формы потенциала (19)-(21) с учётом уравнений (15)-(18) легко преобразуются и полностью совпадают с представлением (2*). Поэтому комбинации (19)-(21) самостоятельного значения не имеют, а представляют другую форму обозначений. Тем более показано [31, 32], что пятиконстантный потенциал имеет более высокую точность при описании экспериментальных диаграмм деформирования большинства разнсопротивляющихся материалов при сложных напряжённых состояниях.

С другой стороны в работе [38] утверждается, что автором получен более общий квазилинейный потенциал, чем предложенный в работах [31, 32]. Этот потенциал имеет вид:

$$\Phi = \Phi_1[\sigma_i\varphi_1(u, \zeta)] + \Phi_2[\sigma_0\varphi_2(u, \zeta)] + \Phi_3[S_3^{1/3}\varphi_3(u, \zeta)], \quad (22)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; σ_0 – шаровая часть тензора напряжений; $u = \sigma_0/\sigma_i$ – параметр, учитывающий вид напряжённого состояния (недостатки данного качественного параметра обсуждались в работе [32]); $\varphi_1(u, \zeta)$, $\varphi_2(u, \zeta)$, $\varphi_3(u, \zeta)$ – функции, подлежащие определению из экспериментов; S_3 – третий инвариант тензора девиатора напряжений.

Однако сам автор никак не конкретизировал функции $\varphi_1(u, \zeta)$, $\varphi_2(u, \zeta)$, $\varphi_3(u, \zeta)$ и утверждает, что «... наибольшую трудность представляет определение функций $\varphi_i(u, \zeta)$ ($i = 1, 2, 3$). Тем не менее, это было сделано в [31] при некоторых предположениях». Данные предположения представлены здесь выше (см. выражения (7) – (14)).

Таким образом, в настоящее время наиболее общие квазилинейные определяющие соотношения изотропных материалов, пригодные для безпроблемного использования при решении прикладных научных и инженерных задач являются две формы потенциала деформаций (1) и (2).

Библиографический список

1. Леонов, М.Я. Зависимости между деформациями и напряжениями для полухрупких тел / М.Я. Леонов, В.А. Паняев, К.Н. Русинко // Инж. журн. МГТ. – 1967. – № 6. – С. 26-32.
2. Писаренко, Г.С. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования углеродистой стали в условиях сложного напряжённого состояния при низких температурах / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев, В.П. Ломашевский // Пробл. прочности. – 1968. – № 5. – С. 42–47.
3. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – Киев: Наукова думка, 1976. – 416 с.
4. Стеценко, В.А. Механические характеристики серого чугуна при растяжении и сжатии / В.А. Стеценко // Исслед. по механике деформируемых сред. – Тула: ТПИ, 1972. – С. 103–109.
5. Jamroz, L. Wytzymalosciowe Wlasnosci Zeliwa Sferoidalnegon / L. Jamroz, I. Mechanizne // Prace Instytutu Odlewnictwa. – 1971. – Rok. 21. – №3. – Str. 283-302.
6. Березин, А.В. Влияние повреждений на деформационные и прочностные характеристики твёрдых тел / А.В. Березин. – М.: Наука, 1990. – 135 с.
7. Березин, А.В. Деформируемость и разрушение изотропных графитовых материалов / А.В. Березин, В.И. Строков, В.Н. Барабанов // Конструкционные материалы на основе углерода. – М.: Металлургия, 1976. – Вып. 11. – С. 102-110.
8. Некоторые особенности методик исследования прочности свойств графитов при плоском напряжённом состоянии / А.М. Фридман [и др.] // Заводская лаборатория. – 1972. – № 9. – С. 1137-1140.
9. Соппротивление деформированию и разрушению изотропных графитовых материалов в условиях сложного напряжённого состояния / А.В. Березин [и др.] // Проблемы прочности. – 1979. – № 2. – С. 60-65.
10. Строков, В.И. Методика исследования прочностных и деформационных свойств графита в условиях сложного напряжённого состоя-

ния / В.И. Строков, В.Н. Барабанов // Заводская лаборатория. – 1974. – № 9. – С. 1141-1144.

11. Фридман А.М. Исследование разрушения углеграфитовых материалов в условиях сложного напряжённого состояния / А.М. Фридман, Ю.П. Ануфриев, В.Н. Барабанов // Проблемы прочности. – 1973. – № 1. – С. 52-55.

12. Jones, R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Materials / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1980. – Vol. 18. – №8. – P. 995-1001.

13. Jones, R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15. – № 1. – P. 16-25.

14. Jones R.M. Buckling of Stiffened Multilayered Circular Shells with Different Orthotropic Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1971. – Vol. 9. – № 5. – P. 917-923.

15. Jones, R.M. A Nonsymmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimodulus Orthotropic Materials / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15. – № 10. – P. 1436-1443.

16. Jones, R.M., Further Characteristics of a Nonlinear Material Model for ATJ-S Graphite / R.M. Jones, D.A.R. Nelson // Journal Composite Materials. – 1975. – Vol. 9. – № 7. – P. 251-265.

17. Jones, R.M., Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite / R.M. Jones, D.A.R. Nelson // AIAA Journal. – 1976. – Vol. 14 – № 10. – P. 1427-1435.

18. Jones R.M., Material for nonlinear Deformation / R.M. Jones, D.A.R. Nelson // AIAA Journal. – 1976. – Vol. 14. – №6. – P. 709-716.

19. Романов, В.В. Исследование зависимости модуля упругости шлакокаменелитого материала от вида нагружения / В.В. Романов // Физ.-хим. исслед. по технологии стекла и ситалов. – М.: Наука, 1984. – С. 78–81.

20. Касимов, Р.Г. Прочность и деформативность бетона при трёхосном сжатии: дис. ... канд. техн. наук / Р.Г. Касимов. – НИИЖБ. – М., 1976. – 180 с.

21. Bazant, Z.P. Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete / Z.P. Bazant, P.D. Bhat // Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE. – 1976. – Vol. 102. – № EM4. – P. 701-722.

22. Kupfer H.B. Das nicht-linear Verhalten des Betons bei Zweiachsiger Beanspruchung / H.B. Kupfer // Beton und Stahlbetonbau. – 1973. – № 11. – P. 269-274.

23. Kupfer, H.B. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses / H.B. Kupfer, H.K. Hilsdorf, H. Rusch // ACI Journal. – Vol. 66. – 1969. – № 8. – P. 656–666.

24. Tasuji, M.E. Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Loading / M.E. Tasuji, F.O. Slate, A.H. Nilson // ACI Journal. – 1979. – №7. – P. 806-812.

25. Гольдман, А.Я. Исследование механических свойств тканевых стеклопластиков при растяжении и сжатии нормально к плоскости армирования / А.Я. Гольдман, Н.Ф. Савельев, В.И. Смирнова // Механика полимеров. – 1968. – № 5. – С. 803-809.

26. Деревянко, Н.И. Свойства армированного полистирола при кратковременном растяжении, сжатии и изгибе / Н.И. Деревянко // Механика полимеров. – 1968. – № 6. – С. 1059-1064.

27. Елсуфьев, С.А. Исследование деформирования фторопласта-4 при линейном и плоском напряжённом состояниях / С.А. Елсуфьев // Механика полимеров. – 1968. – № 4. – С. 742-746.

28. Елсуфьев, С.А. Изучение деформирования фторопласта в условиях плоского напряженного состояния / С.А. Елсуфьев, В.М. Чебанов // Исслед. по упругости и пластичности. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1971. – Вып. 8. – С. 209-213.

29. Калинка, Ю.А. Исследование физико-механических свойств хаотически наполненных стеклопластиков / Ю.А. Калинка, С.М. Боровикова // Механика полимеров. – 1971. – № 3. – С. 411-415.

30. Schwartz, R.T., Characteristics of Boron Fibers and Boron-Fiber-Reinforced Plastic Composites / R.T. Schwartz, H.S. Schwartz // AIAA Journal. – 1967. – Vol. 5. – № 2. – P. 119-126.

31. Матченко, Н.М. Определяющие соотношения изотропных разносопротивляющихся сред. Ч. 1. Квазилинейные соотношения / Н.М. Матченко, Л.А. Толоконников, А.А. Трещёв // Изв. РАН. МТТ. – 1995. – № 1. – С. 73-78.

32. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещёв // Москва – Тула: РААСН – ТулГУ, 2016. – 328 с.

33. Толоконников, Л.А. Механика деформируемого твёрдого тела / Л.А. Толоконников. – М.: Высшая школа, 1979. – 318 с.

34. Матченко, Н.М. К построению четырёхконстантных определяющих соотношений квазилинейной изотропной упругой среды / Н.М.

Матченко, И.Н. Матченко // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. – 2016. – № 4. – С. 73-80.

35. Мясников, В.П. Нелокальная модель разномодульного вязкоупругого тела / В.П. Мясников, В.А. Ляховский, Ю.Ю. Подладчиков // Докл. АН СССР. – 1990. – Т. 312. – № 2. – С. 302-305.

36. Мясников, В.П. Деформационная модель идеально сыпучей зернистой среды / В.П. Мясников, А.И. Олейников // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 316. – № 3. – С. 565-568.

37. Мясников, В.П. Основные общие соотношения модели изотропно-упругой разносопротивляющейся среды / В.П. Мясников, А.И. Олейников // Докл. АН СССР. – 1992. – Т. 322. – № 1. – С. 57-60.

38. Березин, А.В. О законах деформирования разномодульных дилатирующих сред / А.В. Березин // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. – 2007. – № 2. – С. 70-72.

ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА НДС ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Трещёв А.А., Владимиров В.В.

ТулГУ, Тула, Россия

Местоположение любой точки на срединной поверхности цилиндрической оболочки определяется гауссовыми координатами α_1 и α_2 , u – осевые перемещения, v – касательные перемещения, w – радиальные перемещения при действии нагрузки q_3 . В рассматриваемом случае [1] коэффициенты Ляме и главные кривизны имеют вид:

$$A = 1; B = R; k_1 = 0; k_2 = R^{-1}. \quad (1)$$

Рассмотрим цилиндрические оболочки, в теории [2, 3] которых используются следующие зависимости:

а) компоненты деформации в срединной поверхности:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5\theta_1^2; \varepsilon_2 = v_{,2} + kw + 0,5\theta_2^2; \gamma = v_{,1} + u_{,2} + \theta_1\theta_2; \quad (2)$$

б) компоненты изгибной деформации срединной поверхности, определяющиеся изменением кривизн и кручением, связанные с перемещениями соотношениями:

$$\chi_1 = -w_{,11}; \chi_2 = -w_{,22}; \chi_{12} = -w_{,12} = -w_{,21}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – удлинения; γ – сдвиг; θ_1, θ_2 – повороты нормали к срединной поверхности:

$$\theta_1 = -w_{,1}; \theta_2 = -w_{,2} + kv. \quad (4)$$

Компоненты деформации в точках, отстоящих на расстоянии α_3 от срединной поверхности, выражаются через компоненты тангенциальных и изгибных деформаций:

$$e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3 \chi_1; e_{22} = \varepsilon_2 + \alpha_3 \chi_2; \gamma_{12} = \gamma + 2\alpha_3 \chi_{12}. \quad (5)$$

Физические зависимости [1] представим следующим образом:

$$e_{11} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}} \sigma_{11} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}} \sigma_{22}; e_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}} \sigma_{11} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}} \sigma_{22} \quad (6)$$

Выражения для напряжений через деформации имеют вид:

$$\sigma_{11} = C_{11}e_{11} + C_{12}e_{22}; \sigma_{22} = C_{21}e_{11} + C_{22}e_{22}, \quad (7)$$

где

$$C_{11} = A_{22} / \Delta; C_{12} = C_{21} = -A_{21} / \Delta = -A_{12} / \Delta; C_{22} = A_{11} / \Delta;$$

$$\Delta = A_{11}A_{22} - A_{12}^2; A_{11} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}}; A_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}}; A_{12} = A_{21} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}}$$

Внутренние усилия и моменты приведём к срединной поверхности $\alpha_3=0$ и с учётом условия $\alpha_3 k_2 \ll 1$ определим их:

$$N_{1,1} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 d\alpha_3; M_{1,1} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 \alpha_3 d\alpha_3; Q_1 = M_{1,1}, \quad (8)$$

где h – толщина оболочки.

Уравнения связи усилий с деформациями срединной поверхности:

$$N_1 = D_{11}\varepsilon_1 + D_{12}\varepsilon_2 + P_{11}\chi_1 + P_{12}\chi_2; N_2 = D_{12}\varepsilon_1 + D_{22}\varepsilon_2 + P_{21}\chi_1 + P_{22}\chi_2;$$

$$M_1 = P_{11}\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_2 + B_{11}\chi_1 + B_{12}\chi_2; M_2 = P_{21}\varepsilon_1 + P_{22}\varepsilon_2 + B_{21}\chi_1 + B_{22}\chi_2, \quad (9)$$

где

$$D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij} dz; P_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij} z dz; B_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} C_{ij} z^2 dz.$$

Здесь λ – концентрация среды.

Кинематические зависимости в силу осесимметричной задачи принимают вид:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} + 0,5\theta_1^2; \varepsilon_2 = kw; \chi_1 = -w_{,11}; e_{11} = \varepsilon_1 + \alpha_3\chi_1; e_{22} = \varepsilon_2.$$

Также принимая во внимание осевую симметрию конкретной рассматриваемой задачи и то, что оболочка нагружена внутренним давлением q_3 , уравнения равновесия и уравнение совместности деформаций запишутся в виде:

$$N_{1,1} = 0; M_{1,1} - Q_1 - N_1\theta_1 = 0; Q_{1,1} - k_2N_2 + q_3 = 0; k_2\chi_1 + \varepsilon_{2,11} = 0. \quad (10)$$

Проинтегрировав соотношения (7) по толщине оболочки в соответствии с (8) и подставив полученные зависимости для поперечной силы в уравнение равновесия (10), кроме того, используя уравнение неразрывности деформаций (10), формируем два дифференциальных разрешающих уравнения:

$$\theta_{1,1} + L_{22}N_{2,11} = -\eta_{2,11}; \theta_{1,11} - \frac{1}{B_{11}}N_2 = -\frac{1}{B_{11}}q_3 + \frac{1}{B_{11}};$$

где

$$L_{12} = -\frac{D_{12}}{D_{11}D_{22} - D_{12}^2}; L_{22} = \frac{D_{11}}{D_{11}D_{22} - D_{12}^2}; B_{11} = C_{11}h^3/12; \eta_2 = L_{12} + L_{22}.$$

Степень проникновения распределения концентрации по толщине получается из решения уравнения диффузии, ввиду одномерности задачи по диффузии уравнение соответствует второму закону Фика, решение строим по двойным преобразованиям Фурье [4] (прямым и обратным):

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2},$$

где $D = \text{const}$ – коэффициент диффузии, t – текущее время.

$$\lambda(r, t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Psi_k(\gamma_k, r/R_2)}{\Psi_k} K_0 \exp(-\gamma_k^2 \frac{Dt}{R_2^2}).$$

Здесь $\psi_k(\gamma_k, l/R_2)$ – функция, зависящая от направления воздействия водорода.

Для случая, когда водородосодержащая среда находится внутри трубы, имеем:

$$\psi_k(\gamma_k, r/R_2) = Y_0(\gamma_k R_1/R_2) J_0(\gamma_k r/R_2) - J_0(\gamma_k R_1/R_2) Y_0(\gamma_k r/R_2).$$

Полученную систему разрешающих уравнений необходимо дополнить граничными условиями. Так как оболочка по периметру имеет жесткую заделку, то принимаем на контуре оболочки радиальные перемещения, прогибы и угол поворота срединной поверхности в радиальном направлении равными нулю ($u = 0$, $w = 0$, $w, l = 0$). Разрешающие уравнения решаются методом конечных разностей [5]. Система полученных алгебраических уравнений решается методом Гаусса.

Библиографический список

1. Трещёв, А.А. Изотропные пластины и оболочки, выполненные из материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2013. – 249 с.
2. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек / В.В. Новожилов. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 332 с.
3. Тимошенко С.П. Пластины и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
4. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.
5. Варвак, П.М. Метод сеток в задачах расчёта строительных конструкций / П.М. Варвак, Л.П. Варвак. – М., Стройиздат, 1977. – 154 с.

К РЕШЕНИЮ СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧЕК, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ МАТЕРИАЛОВ, МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТОРЫХ ЗАВИСЯТ ОТ ВИ ДАПРИЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Трещёв А.А., Делягин М.Ю.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что жёсткость широкого круга начально изотропных дилатирующих материалов может зависеть не только от вида напряжённого состояния, но и

от изменений температурных факторов, причём в связанной форме. Деформационные, прочностные и теплофизические характеристики таких материалов оказываются чувствительными к виду реализуемого в точке напряжённого состояния, причём при эксплуатационных нагрузках зависимости между напряжениями и деформациями оказываются существенно нелинейными. С помощью уточнения законов деформирования материалов с усложнёнными свойствами можно значительно увеличить эффективность использования ресурсов.

Трагические события 2011 года в Японии, в ходе которых из-за повышения температуры были разрушены защитные оболочки ядерных реакторов, показали, что особую важность при расчёте ответственных конструкций приобретает температурная «нагрузка». При термомеханическом нагружении одной из основных величин, существенно влияющих на напряжённо-деформированное состояние, является коэффициент линейного температурного расширения. Возможная зависимость этого коэффициента от вида напряжённого состояния может внести значительные коррективы в расчёт конструкций. На наличие такой зависимости указано в исследованиях, проведённых Р.Е. Hart, который опубликовал результаты экспериментов с графитами AXF, ZTA и ATJ [1]. Для различных видов НДС расхождения в коэффициентах линейного температурного расширения отличаются более чем в 2 раза.

Из обзора основных работ [2-5] установлено, что применявшиеся ранее соотношения не могут с достаточной точностью описать термосиловое деформирование изотропных дилатирующих материалов.

В представленной работе рассматривается жёстко опёртая квадратная в плане оболочка положительной гауссовой кривизны, размером в плане 1×1 м, толщина 0,04 м, стрела подъёма оболочки 0,1 м, радиус кривизны нижней поверхности оболочки 2,55 м. На нижней поверхности температура повышалась на 20 К, на верхней – понижалась на 30 К. Помимо перепада температур на прямоугольном участке верхней поверхности, расположенном с эксцентриситетом относительно оси симметрии оболочки, прикладывалась равномерно распределённая внешняя нагрузка интенсивностью от 0 до 400 кПа.

В качестве уравнений термомеханического состояния материала оболочки принят нелинейный потенциал Гиббса, представленный в двух нормированных пространствах напряжений [3 – 5]. В пространстве, связанном с главными осями тензора напряжений этот потенциал имеет вид:

$$\Gamma_1^* = \left\{ \begin{aligned} & (A_1 + B_1\alpha_1)\sigma_1^2 + (A_1 + B_1\alpha_2)\sigma_2^2 + \\ & + (A_1 + B_1\alpha_3)\sigma_3^2 + [C_1 + D_1(\alpha_1 + \alpha_2)]\sigma_1\sigma_2 + \\ & + [C_1 + D_1(\alpha_2 + \alpha_3)]\sigma_2\sigma_3 + [C_1 + D_1(\alpha_1 + \alpha_3)]\sigma_1\sigma_3 \end{aligned} \right\} + \quad (1)$$

$$+ \left\{ \begin{aligned} & (A_2 + B_2\alpha_1)\sigma_1^2 + (A_2 + B_2\alpha_2)\sigma_2^2 + \\ & + (A_2 + B_2\alpha_3)\sigma_3^2 + [C_2 + D_2(\alpha_1 + \alpha_2)]\sigma_1\sigma_2 + \\ & + [C_2 + D_2(\alpha_2 + \alpha_3)]\sigma_2\sigma_3 + [C_2 + D_2(\alpha_1 + \alpha_3)]\sigma_1\sigma_3 \end{aligned} \right\}^n + \left(\begin{aligned} & \left(\begin{aligned} & B_1\theta + \\ & + A_1\theta I_\alpha \end{aligned} \right) S + \\ & + \frac{1}{2} \cdot C_\sigma (\theta)^2 / T_0, \end{aligned} \right)$$

где $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2$ – константы механической части потенциала, A_t, B_t – константы термомеханической части потенциала; σ_k – главные напряжения; $\alpha_k = \sigma_k / S$ – нормированные главные напряжения; $S = (\sigma_k \sigma_k)^{0.5}$ – модуль вектора полного напряжения; n – показатель степени, который в общем случае не является целым числом; $I_\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ – первый инвариант нормированных напряжений первого пространства; C_σ – теплоёмкость материала при постоянном давлении, $\theta = T - T_0$ – изменение температуры тела в точке; T – температура тела в точке в рассматриваемый момент времени; T_0 – начальная температура тела в точке.

В нормированном пространстве, связанном с девиаторной площадкой потенциал Гиббса (1) принимает вид:

$$\Gamma_1 = \left[(A_p + B_p\xi)\sigma^2 + (C_p + D_p\xi + E_p\eta\cos 3\varphi)\tau^2 \right]^n + (A_e + B_e\xi)\sigma^2 + (C_e + D_e\xi + E_e\eta\cos 3\varphi)\tau^2 + [(b_{11}\xi + b_{12})\sigma + b_{11}\eta\tau]\theta + 0.5 \cdot C_\sigma (\theta)^2 / T_0, \quad (2)$$

где $A_e = 3(A_1 + C_1)$; $B_e = (B_1 + 2D_1)(3)^{0.5}$; $C_e = 3(A_1 - 0.5C_1)$; $D_e = B_1(27)^{0.5}$; $E_e = (B_1 - D_1)(1.5)^{0.5}$; $A_p = 3(A_2 + C_2)$; $B_p = (B_2 + 2D_2)(3)^{0.5}$; $C_p = 3(A_2 - 0.5C_2)$; $D_p = B_2(27)^{0.5}$; $E_p = (B_2 - D_2)(1.5)^{0.5}$, $b_{11} = B_t(3)^{0.5}$; $b_{12} = 3A_t$; $\sigma = \delta_{ij}\sigma_{ij}/3$ – нормальные напряжения на октаэдрической площадке; δ_{ij} – тензор Кронекера; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; $\tau = (S_{ij}S_{ij}/3)^{0.5}$ – касательные напряжения на октаэдрической площадке; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$ – компоненты девиатора напряжений; $\xi = \cos\psi = \sigma / S_0$ – нормированные нормальные напряжения на девиаторной площадке; $S_0 = (\sigma^2 + \tau^2)^{0.5}$ – модуль вектора полного напряжения на октаэдрической площадке; $\eta = \sin\psi = \tau / S_0$ – нормированные касательные напряжения на октаэдрической площадке; ψ –

угол между вектором полного напряжения на девиаторной площадке и нормалью к этой площадке; $\text{Cos}3\varphi = (2)^{0.5} \det(S_{ij}) / \tau^3$; φ – фаза напряжений.

Температурные напряжения сами по себе и в сочетании с силовыми напряжениями от внешней нагрузки могут вызвать появление трещин и разрушение конструкций из материалов с повышенной хрупкостью. Поэтому учет явления разнсопротивляемости материалов, а также исследование влияния температуры на деформирование оболочек в связанной постановке, является актуальной задачей.

Предлагается новая конечно-элементная модель для задач связанной термоупругости. При малых изменениях температур $\theta/T_0 \ll 1$ эту модель можно представить в общем матричном виде:

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [C^{tu}] & [C^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{T}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^{tu}] \\ [0] & [K^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где $[C^{tu}] = -T_0[K^{tu}]^T$ – элемент матрицы термоупругого затухания; $[K^{tu}] = -\iiint_{vol} [B]^T \{\beta\} [C]^T dx dy dz$ – термоупругая составляющая матрицы

жесткости; $\{\beta\} = [D]\{\chi\}$, $\{\chi\}$ – столбец коэффициентов линейного теплового расширения материала по направлениям координатных осей, записанных с учётом зависимости от вида напряженного состояния;

$$\{\chi\} = \left\{ \frac{b_{11}\xi\sigma_{11} + b_{12}}{3\sigma} + \frac{b_{12}}{3} \quad \frac{b_{11}\xi\sigma_{22} + b_{12}}{3\sigma} + \frac{b_{12}}{3} \quad \frac{b_{11}\xi\sigma_{33} + b_{12}}{3\sigma} + \frac{b_{12}}{3} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right\}^T;$$

$\{\dot{u}\}$ – вектор скоростей изменения перемещений; $\{\dot{T}\}$ – вектор скоростей изменения температур, в расчётах для аппроксимации производных по времени будем применять неявную разностную схему; $[C^{tu}] = -\iiint_{vol} C_\sigma \{C\} \{C\}^T dx dy dz$ – элемент матрицы температурного затухания;

$\{C\}$ – матрица интерполяционных функций; C_σ – теплоёмкость материала при постоянном давлении, $[K] = \iiint_{vol} [B]^T [D][B] dx dy dz$ – матрица

жёсткости КЭ в виде тетраэдра при механическом нагружении; $[B]$ – матрица деформаций; $[D]$ – матрица упругости;

$[K^t] = \iiint_{vol} [B_T]^T [D_T] [B_T] dx dy dz$ – элемент матрицы теплопроводности;

$[B_T] = \{L\}\{C\}\{C\}^T\{T\}$; $\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$ – вектор оператор;

$[D_T] = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$; λ – коэффициент теплопроводности; $\{u\}$ – вектор

перемещений; $\{T\}$ – вектор температур; $\{F\}$ – вектор узловых силовых нагрузок; $\{Q\}$ – вектор узловых температурных нагрузок.

Для учёта разнсопротивляемости при определении матрицы жесткости $[K]$ вычисляем матрицу упругости $[D]$ на основе предложенного потенциала Гиббса без температурной составляющей по формуле:

$$e_{ij} = \frac{\partial \Gamma}{\partial \sigma_{ij}} = A_{ijkm} \sigma_{km}; \quad (i, j, k, m = 1, 2, 3), \quad (4)$$

где $[A_{ijkm}] = [D]^{-1}$.

Расчёт оболочки положительной гауссовой кривизны прямоугольной в плане, выполненной из изотропного с нелинейно разнсопротивляющегося материала, на термомеханическое воздействие в связанной постановке производился по деформируемой схеме. Алгоритм решения задачи реализован в среде MATLAB.

Для определения степени влияния рассматриваемых физических эффектов на НДС конструкций проводилось решение задачи согласно 6 моделям: модель № 1 – пошаговый расчёт по деформируемой схеме для нелинейной разнсопротивляемости [3, 6]; модель № 2 – пошаговый расчёт по деформируемой схеме для квазилинейной разнсопротивляемости [3, 4, 7]; модель № 3 – расчёт по недеформируемой схеме для нелинейной разнсопротивляемости [3, 6]; модель № 4 – пошаговый расчёт по деформируемой схеме для линейной термоупругости с использованием осреднённых характеристик материала [8]; модель № 5 – пошаговый расчёт по деформируемой схеме для нелинейной разнсопротивляемости без температуры [3, 6]. Дополнительно для модели №1 проводилось сравнение решений в связанной и несвязанной постановках. Рассматривалась жёстко защемлённая квадратная в плане оболочка положительной гауссовой кривизны, на нижней поверхности ко-

торой температура повышалась на 20 К, а на верхней понижалась на 30 К. Помимо перепада температур на прямоугольном участке верхней поверхности, расположенном с эксцентриситетом относительно оси симметрии оболочки, прикладывалась равномерно распределённая внешняя нагрузка интенсивностью от 0 до 400 кПа (рис. 1-3).

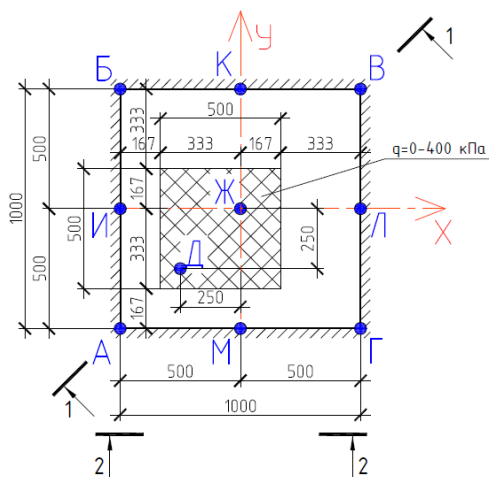


Рис. 1. Оболочка в плане

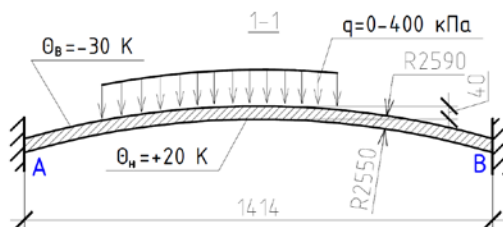


Рис. 2. Сечение 1-1

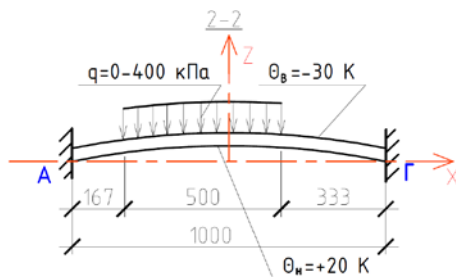


Рис. 3. Сечение 2-2

Для расчёта по квазилинейной теории разнсопротивляемости [4, 7] использовались модуль упругости при растяжении $E^+ = 3750 \text{ МПа}$, модуль упругости при сжатии $E^- = 6130 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона при растяжении $\nu^+ = 0.2$, коэффициент Пуассона при сжатии $\nu^- = 0.35$,

На рис. 4-7 представлены отдельные результаты расчёта оболочек.

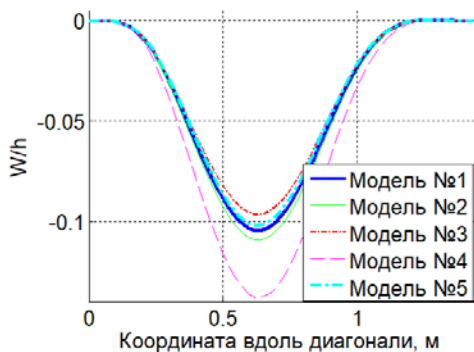


Рис. 4. Распределение прогибов вдоль диагонали оболочки ($q = 400 \text{ кПа}$)

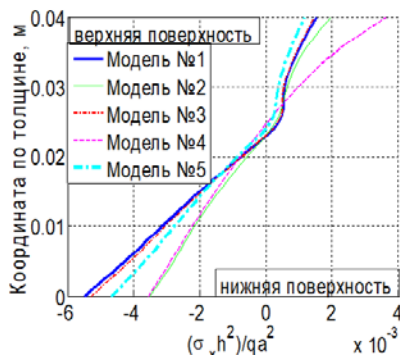


Рис. 5. Распределение напряжений σ_x по толщине в углу оболочки

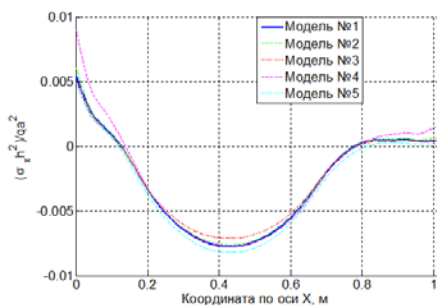


Рис. 6. Распределение σ_x на верхней поверхности оболочки вдоль линии И-Л

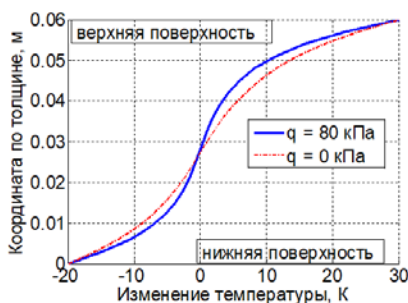


Рис. 7. Распределение температур по толщине оболочки в момент времени $t = 1 \text{ с}$

В результате проведённых расчётов были выявлены значительные поправки в параметры НДС за счёт учёта эффекта чувствительности материалов к виду напряжённого состояния. Решение по классической теории линейной термоупругости в величинах нормальных напряжений приводит к неточностям до 46%. Результаты нелинейной и квази-

линейной теорий разносопротивляемости зачастую весьма близки, но на отдельных участках расхождение доходит до 26%.

Учёт деформируемости схемы для оболочки проявляется и приводит к коррективам нормальных напряжений до 26%. Влияние связанности полей напряжений и температур сказывается только в первые секунды нагружения, максимальные поправки составляют 16%. Также было выявлено влияние вида напряжённого состояния на скорость установления линейного распределения температур по толщине оболочки.

Библиографический список

1. Hart, P.E. The effect of pre-stressing on the thermal expansion and Young's modulus of graphite / P.E. Hart // Carbon. – 1972. – Vol. 10. – P. 233-236.

2. Коваленко, А.Д. Термоупругость / А.Д. Коваленко // Издательское объединение «Вища школа», 1975. – 216 с.

3. Трещёв, А.А., Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А. Трещёв. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.

4. Матченко, Н.М. Теория деформирования разносопротивляющихся материалов. Прикладные задачи теории упругости / Н.М. Матченко, А.А. Трещёв // Прикладные задачи теории упругости. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2004. – 211 с.

5. Трещёв, А.А., Моделирование оболочки из изотропного разносопротивляющегося графита с помощью объёмных конечных элементов с учётом связанности напряжений и температур / А.А. Трещёв, М.Ю. Делягин // Materials Physics and Mechanics. – 2013. – Vol. 17. – No 1. – P. 59-70.

6. Матченко, Н.М. Определяющие соотношения изотропных разносопротивляющихся сред. Ч.2. Нелинейные соотношения / Н.М. Матченко, Л.А. Толоконников, А.А. Трещёв // Изв. РАН. МТТ. – 1999. – № 4. – С. 87-95.

7. Матченко Н.М. Определяющие соотношения изотропных разносопротивляющихся, сред. Ч.1. Квазилинейные соотношения / Н.М. Матченко, Л.А. Толоконников, А.А. Трещёв // Изв. РАН. МТТ. – 1995. – № 1. – С. 73-78.

**КВАЗИЛИНЕЙНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДЕФОРМАЦИЙ
ДЛЯ ОРТОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ, МЕХАНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОТОРЫХ ЗАВИСЯТ
ОТ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Трещёв А.А., Монастырев Ю.А., Чибрикина В.Д.
ТулГУ, г. Тула, Россия

В работах [1-3] на основе анализа многочисленных экспериментальных данных по деформированию анизотропных разносопротивляющихся сред [4-8] были предложены нелинейные потенциальные соотношения между деформациями и напряжениями для ортотропных материалов в виде:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots, \quad (1)$$

где $W = W(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}\tau_{21}, \tau_{23}\tau_{32}, \tau_{31}\tau_{13}, \tau_{12}\tau_{23}\tau_{31})$, W_n — однородный многочлен степени $n+1$ по напряжениям.

Коэффициенты, входящие в разложение (1) являются параметрами материала, которые зависят от вида напряженного состояния и подлежат экспериментальному определению. Так для физически квазилинейных материалов имеем:

$$W_1 = A_1\sigma_{11}^2 + A_2\sigma_{22}^2 + A_3\sigma_{33}^2 + A_4\sigma_{11}\sigma_{22} + A_5\sigma_{22}\sigma_{33} + \\ + A_6\sigma_{33}\sigma_{11} + A_7\tau_{12}\tau_{21} + A_8\tau_{23}\tau_{32} + A_9\tau_{31}\tau_{13}. \quad (2)$$

Число слагаемых в разложении (1) с ростом n быстро увеличивается. Так, для $n=2$ имеем:

$$W_2 = B_1\sigma_{11}^3 + B_2\sigma_{22}^3 + B_3\sigma_{33}^3 + B_4\sigma_{11}^2\sigma_{22} + B_5\sigma_{11}\sigma_{22}^2 + \\ + B_6\sigma_{22}^2\sigma_{33} + B_7\sigma_{22}\sigma_{33}^2 + B_8\sigma_{33}^2\sigma_{11} + B_9\sigma_{33}\sigma_{11}^2 + \\ + B_{10}\sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} + B_{11}\sigma_{11}\tau_{12}^2 + B_{12}\sigma_{11}\tau_{23}^2 + B_{13}\sigma_{11}\tau_{31}^2 + \\ + B_{14}\sigma_{22}\tau_{12}^2 + B_{15}\sigma_{22}\tau_{23}^2 + B_{16}\sigma_{22}\tau_{31}^2 + B_{17}\sigma_{33}\tau_{12}^2 + B_{18}\sigma_{33}\tau_{23}^2 + \\ + B_{19}\sigma_{33}\tau_{31}^2 + B_{20}\tau_{12}\tau_{13}\tau_{23}. \quad (3)$$

При $n=3$ количество слагаемых достигает уже 42.

В работах [1 – 3] разложение (1) ограничено параметром $n=2$. При этом в разложениях (2) и (3) для разносопротивляющихся материалов параметры A_k и B_k являются функциями, определяющие вид напря-

жённого состояния. Было предложено их представлять в виде комбинаций нормированных напряжений [9-11]:

$$\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S ; \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (4)$$

где

$$S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\tau_{12}^2 + 2\tau_{23}^2 + 2\tau_{13}^2} . \quad (5)$$

При этом нормированные напряжения связаны условием нормировки [1-3, 9-11]:

$$\alpha_{ij}\alpha_{ij} = \alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2\alpha_{12}^2 + 2\alpha_{23}^2 + 2\alpha_{13}^2 = 1 . \quad (6)$$

Параметры A_k и B_k представлены следующими функциями:

$$\begin{aligned} A_k &= A_{kk} + A_{km}\alpha_{nn} && \text{— для } k = 1, 2, 3; \\ A_k &= A_{kk} + A_{km}(\alpha_{nn} + \alpha_{pp}) && \text{— для } k = 4, 5, 6; \\ A_k &= A_{kk} + A_{km}\sqrt{2}\alpha_{np} && \text{— для } k = 7, 8, 9; \\ B_k &= B_{kk} + B_{km}\alpha_{nn} && \text{— для } k = 1, 2, 3; \\ B_k &= B_{kk} + B_{km}(\alpha_{nn} + \alpha_{pp}) && \text{— для } k = 4, \dots, 9; \\ B_k &= B_{kk} + B_{km}(\alpha_{nn} + \alpha_{pp} + \alpha_{qq}) && \text{— для } k = 10; \\ B_k &= B_{kk} + B_{km}(\alpha_{nn} + \sqrt{2}\alpha_{qp}) && \text{— для } k = 11, \dots, 19; \\ B_k &= B_{kk} + \sqrt{2}B_{km}(\alpha_{np} + \alpha_{qr} + \alpha_{st}) && \text{— для } k = 20 . \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнения связи компонентов тензоров деформаций и напряжений для нелинейно ортотропных материалов определяются в главных осях анизотропии на основе потенциала деформаций (1) – (3) в соответствии с формулами Кастильяно:

$$e_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \sigma_{ij}} ; \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (8)$$

Из анализа предложенного нелинейного потенциала $W = W_1 + W_2$ видно, что для определения всех констант необходимо провести достаточно большой объем экспериментальных исследований, включая опыты, реализующие комплексы сложных напряжённых состояний, например, различных двухосных, трёхосных растяжений-сжатий и даже опыты по одновременному сдвигу в трёх главных взаимно

ортогональных плоскостях, а это в настоящее время весьма проблематично. Однако в современном строительстве и других отраслях промышленности в настоящее время получили широкое применение конструкционные ортотропные материалы, механические свойства, которых не соответствуют классическим представлениям об упругопластическом деформировании твёрдых тел [4-8]. Поэтому для сооружений, деталей машин и аппаратов, выполненных из подобных материалов, необходимо выполнять деформационные и прочностные расчёты с максимально возможной точностью. Данная ситуация позволяет на современном этапе ограничить разложение (1) квазиквадратичным представлением (2), заменив при этом функции A_7 , A_8 , A_9 константами [9, 10], что поясним ниже. В этом случае потенциал деформаций принимает вид:

$$W_1 = 0,5(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}\alpha_{11})\sigma_{11}^2 + 0,5(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22})\sigma_{22}^2 + 0,5(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33})\sigma_{33}^2 + \\ + [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11}\sigma_{22} + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22}\sigma_{33} + \\ + [A_{3311} + \tilde{A}_{3311}(\alpha_{33} + \alpha_{11})]\sigma_{33}\sigma_{11} + A_{1212}\tau_{12}^2 + A_{2323}\tau_{23}^2 + A_{3131}\tau_{31}^2. \quad (9)$$

Продифференцировав потенциал (9) по формулам Кастильяно (8), получим следующие квазилинейные уравнения состояния для ортотропных разносопротивляющихся материалов:

$$e_{11} = \{(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}\alpha_{11}) + 0,5\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}[\alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)] - \\ - 0,5(\tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) + (1 - \alpha_{11})[\tilde{A}_{1122}\alpha_{22}(\alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \\ + \tilde{A}_{1133}\alpha_{33}] - \tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33})\}\sigma_{11} + [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{22} + \\ + [A_{1133} + \tilde{A}_{1133}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\sigma_{33}; \\ e_{22} = [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11} + \{(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}) + \\ + 0,5\tilde{A}_{2222}\alpha_{22}[\alpha_{11}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)] - 0,5(\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) + \\ + (1 - \alpha_{22})[\tilde{A}_{2233}\alpha_{33}(\alpha_{11}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \tilde{A}_{1133}\alpha_{33}] - \\ - \tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})\}\sigma_{22} + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{33}; \\ e_{33} = [A_{1133} + \tilde{A}_{1133}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\sigma_{11} + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22} + \\ + \{(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}) + 0,5\tilde{A}_{3333}\alpha_{33}[\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)] - \\ - 0,5(\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3) + (1 - \alpha_{33})[\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}(\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \\ + \tilde{A}_{2233}\alpha_{22}(\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})\}\sigma_{33}. \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 & + \alpha_{31}^2)) + \tilde{A}_{2233}\alpha_{22}] - \tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22})\}\sigma_{33}; \\
 \gamma_{12} = & [A_{1212} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) - \\
 & - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\tau_{12}; \\
 \gamma_{23} = & [A_{2323} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) - \\
 & - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33}) - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\tau_{23}; \\
 \gamma_{31} = & [A_{1313} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33}) - \\
 & - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\tau_{31}.
 \end{aligned}$$

Очевидно, что константы потенциала деформаций (9) можно определить по результатам обработки данных испытания образцов ортотропного материала на одноосное растяжение и одноосное сжатие поочередно вдоль главных осей анизотропии, откуда можно получить модули деформации (секущие модули упругости) E_k^\pm и коэффициенты поперечной деформации ν_{ij}^\pm , а также – эксперименты по сдвигу в главных плоскостях анизотропии из которых устанавливаются модули сдвига во взаимно ортогональных главных плоскостях анизотропии G_{ij} .

Из экспериментов на одноосное растяжение и одноосное сжатие вдоль главной оси анизотропии x_1 получим:

$$\begin{aligned}
 1/E_1^+ &= A_{1111} + \tilde{A}_{1111}; & -\nu_{21}^+ &= (A_{1122} + \tilde{A}_{1122})/(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}); \\
 -\nu_{31}^+ &= (A_{1133} + \tilde{A}_{1133})/(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}); & 1/E_1^- &= A_{1111} - \tilde{A}_{1111}; \\
 -\nu_{21}^- &= (A_{1122} - \tilde{A}_{1122})/(A_{1111} - \tilde{A}_{1111}); & -\nu_{31}^- &= (A_{1133} - \tilde{A}_{1133})/(A_{1111} - \tilde{A}_{1111}),
 \end{aligned} \quad (11)$$

вдоль главной оси анизотропии x_2 :

$$\begin{aligned}
 1/E_2^+ &= A_{2222} + \tilde{A}_{2222}; & -\nu_{12}^+ &= (A_{1122} + \tilde{A}_{1122})/(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}); \\
 -\nu_{32}^+ &= (A_{2233} + \tilde{A}_{2233})/(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}); & 1/E_2^- &= A_{2222} - \tilde{A}_{2222}; \\
 -\nu_{12}^- &= (A_{1122} - \tilde{A}_{1122})/(A_{2222} - \tilde{A}_{2222}); & -\nu_{32}^- &= (A_{2233} - \tilde{A}_{2233})/(A_{2222} - \tilde{A}_{2222}),
 \end{aligned} \quad (12)$$

вдоль главной оси анизотропии x_3 :

$$1/E_3^+ = A_{3333} + \tilde{A}_{3333}; \quad -\nu_{13}^+ = (A_{1133} + \tilde{A}_{1133})/(A_{3333} + \tilde{A}_{3333});$$

$$-v_{23}^+ = (A_{2233} + \tilde{A}_{2233}) / (A_{3333} + \tilde{A}_{3333}); \quad 1/E_3^- = A_{3333} - \tilde{A}_{3333}; \quad (13)$$

$$-v_{13}^- = (A_{1133} - \tilde{A}_{1133}) / (A_{3333} - \tilde{A}_{3333}); \quad -v_{23}^- = (A_{2233} - \tilde{A}_{2233}) / (A_{3333} - \tilde{A}_{3333}).$$

Из экспериментов на чистый сдвиг в соответствующих главных плоскостях получим:

$$1/G_{12} = A_{1212}; \quad 1/G_{23} = A_{2323}; \quad 1/G_{13} = A_{1313}. \quad (14)$$

Принимая во внимание зависимости (11)-(14) определим константы потенциала через технические постоянные следующим образом:

$$A_{kkkk} = (1/E_k^+ + 1/E_k^-) / 2; \quad \tilde{A}_{kkkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-) / 2;$$

$$A_{ijij} = -(v_{ij}^+ / E_j^+ + v_{ij}^- / E_j^-) / 2; \quad \tilde{A}_{ijij} = -(v_{ij}^+ / E_j^+ - v_{ij}^- / E_j^-) / 2; \quad (15)$$

$$A_{ijij} = 1/G_{ij}; \quad v_{ij}^+ / E_j^+ = v_{ji}^+ / E_i^+; \quad v_{ij}^- / E_j^- = v_{ji}^- / E_i^-, \quad i, j, k = 1, 2, 3.$$

При определении констант потенциала необходимо проводить проверку энергетической непротиворечивости в соответствии с требованиями постулата Дуккера [9]:

$$\delta e_{ij} \delta \sigma_{ij} = \frac{\partial^2 W_1}{\partial \sigma_{km} \partial \sigma_{ij}} \delta \sigma_{km} \delta \sigma_{ij} \geq 0. \quad (16)$$

Приведем механические характеристики материалов, имеющиеся в литературе. Эти данные представим в табл. 1 и табл. 2. В таблицах, кроме технических констант материалов E_k^\pm , v_{ij}^\pm и G_{ij} в отдельных случаях приведены параметры E_{ij}^\pm – модули деформаций при растяжении и сжатии в направлениях под углом 45° к соответствующим главным осям анизотропии.

Таблица 1

Константы	Материалы [литературные источники]				
	T300/5208 [4]	AR [5]	PR [5]	16K9-27/ATJ-S [6]	AVCO Mod3a [4]
E_1^+	147,5 ГПа	3,58 ГПа	0,617 ГПа	16,56 МПа	11,7 ГПа
E_1^-	147,5 ГПа	0,012 ГПа	0,369 ГПа	12,42 МПа	10,3 ГПа
E_2^+	9,3 ГПа	0,00909 ГПа	0,008 ГПа	–	–
E_2^-	14,3 ГПа	0,012 ГПа	0,0106 ГПа	–	–

Продолжение таблицы 1

E_3^+	–	–	–	10,35 МПа	92,4 ГПа
E_3^-	–	–	–	8,28 МПа	16,5 ГПа
ν_{12}^+	0,25	0,416	0,475	0,12	0,11
ν_{12}^-	0,52	0,205	0,185	0,12	0,11
ν_{13}^+	–	–	–	–	0,05
ν_{13}^-	–	–	–	–	0,05
ν_{32}^+	–	–	–	0,14	–
ν_{32}^-	–	–	–	0,095	–
E_{12}^+	–	–	–	–	9,95 ГПа
E_{12}^-	–	–	–	–	9,31 ГПа
E_{13}^+	–	–	–	11,04 МПа	8,69 ГПа
E_{13}^-	–	–	–	9,315 МПа	5,52 ГПа

Таблица 2

Констант ы	<i>Материалы [литературные источники]</i>					
	<i>П32-57</i> [12]	П36-50 [12]	<i>П41-42</i> [12]	Графит АТJ-S [13]	Стекло- пластик [14]	Стекло- пластик [15]
E_1^+	12,75 ГПа	10,3 ГПа	8,09 ГПа	11,85 ГПа	140 ГПа	60 ГПа
E_1^-	14,03 ГПа	11,77 ГПа	10,79 ГПа	10,48 ГПа	70 ГПа	20 ГПа
E_2^+	16,425 ГПа	17,6 ГПа	16,09 ГПа	11,85 ГПа	280 ГПа	30 ГПа
E_2^-	20,60 ГПа	18,54 ГПа	16,97 ГПа	10,48 ГПа	140 ГПа	15 ГПа
E_3^+	–	–	–	9,45 ГПа	–	–

E_3^-	–	8,34 ГПа	–	7,95 ГПа	–	–
ν_{12}^+	0,176	0,188	0,28	0,1	0,2	–
ν_{12}^-	–	–	–	0,09	0,3	–
ν_{13}^+	0,126	0,115	0,1	–	–	–
ν_{13}^-	–	–	–	–	–	–
ν_{32}^+	–	–	–	–	–	–
ν_{32}^-	–	–	–	–	–	–
E_{12}^+	–	–	–	–	170 ГПа	–
E_{12}^-	–	–	–	–	875 ГПа	–
E_{13}^+	–	–	–	–	–	–
E_{13}^-	–	–	–	–	–	–
G_{12}	3,98 ГПа	3,14 ГПа	–	–	–	–
G_{13}	3,28 ГПа	3,49 ГПа	4,02 ГПа	–	–	–
G_{23}	2,63 ГПа	2,55 ГПа	2,45 ГПа	–	–	–

Предложенные уравнения связи деформаций и напряжений с учётом получаемых из экспериментов констант для ортотропных композитов [4-8, 12-15] удовлетворяют ограничениям (16).

Библиографический список

1. Трещёв, А.А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А.А.Трещёв // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ. – 2017. – № 4-1 (324). – С. 71-74.
2. Трещёв, А.А. Удельная дополнительная работа деформирования ортотропных физически нелинейных материалов / А.А. Трещёв, Ю.А. Монастырев, В.Д. Чибрикина // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 13-я Международная конференция по проблемам горной промышлен-

ленности, строительства и энергетики. – Тула: ТулГУ, 2017. – Т. 2. – С. 208-212.

3. Трещёв, А.А. Нелинейные определяющие соотношения для ортотропных разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещёв // Сборник материалов XVIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности». – Тула: ТулГУ. – 2017. – С. 180-184.

4. Schmuesser, D.W. Nonlinear Stress-Strain and Strength Response of Axisymmetric Bimodulus Composite Material Shells / D.W. Schmuesser // AIAA Journal. – 1983. – Vol. 21. – № 12. – P. 1742-1747.

5. Reddy, L.N. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / L.N.Reddy, C.W.Bert // ZAMM. – 1982. – Vol. 62. – № 6. – P. 213 -219.

6. Jones, R.M. A Nonsymmetric Compliance Matrix Approach to Non-linear Multimodulus Ortotropic Materials / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15. – № 10. – P. 1436-1443.

7. Jones, R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Material / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1980. – Vol. 18. – № 8. – P. 995-1001.

8. Jones, R.M. Bucling of Stiffened Multilayered Circular Shells with Different Ortotropic Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1971. – Vol. 9. – № 5. – P. 917-923.

9. Трещёв, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведённой чувствительностью к виду напряжённого состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещёв // Москва – Тула: РААСН – ТулГУ, 2016. – 328 с.

10. Трещёв, А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещёв // Москва – Тула: РААСН – ТулГУ, 2007. – 160 с.

11. Трещёв, А.А. Определяющие соотношения для нелинейных анизотропных материалов, чувствительных к виду напряжённого состояния / А.А. Трещёв, Д.А. Ромашин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – № 4. – Часть 4. – С. 1740-1742.

12. Розе, А.В. Трехармированные тканые материалы / А.В. Розе, И.Г. Жигун, М.Н. Душин // Механика полимеров. – 1970. – №3. – с. 471-476.

13. Jones, R.M., Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite / R.M. Jones, D.A.R. Nelson // AIAA Journal. – 1976. – Vol. 14 – № 10. – P. 1427-1435.

14. Jones, R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. – 1977. – Vol. 15. – № 1. – P. 16-25.

15. Золочевский, А.А. Расчет анизотропных оболочек из разномодульных материалов при неосесимметричном нагружении / А.А. Золочевский, В.Н. Кузнецов // Динамика и прочность тяжёлых машин. – Днепропетровск: ДГУ, 1989. – С. 84-92.

К РАСЧЁТУ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫХ ПЛИТ, ЗАПОЛНЕННЫХ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫМИ БЛОКАМИ, АРМИРОВАННЫХ КАНАТАМИ КЛАССА К7

Трещёв А. А., Чигинский Д. С., Ходорович П.Ю.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Панели (плиты) перекрытия и покрытия, заполненные предварительно изготовленными керамзитобетонными блоками, армированные предварительно напряжёнными канатами класса К7, предназначены для применения в жилых, общественных и производственных зданиях и могут применяться как при новом проектировании, так и при реконструкции, взамен плит с круглыми пустотами, изготовляемых по агрегатно-поточной или конвейерной технологии, или панелей, выполняемых по технологии безопалубочного формования. Панели выполняются из бетона класса по прочности на сжатие В20 и рассчитываются под унифицированные равномерно распределённые нагрузки (сверх собственной массы плиты) – 4,5; 6,0; 8,0; 12,5 кПа/м². Рассматриваемые номинальные размеры панелей, соответственно, ширина – 1200 и 1500 мм; высота сечения (толщина) – 220 и 160 мм.

Напрягаемая арматура в нижней и верхней зонах принимается стальными арматурными семипроволочными канатами (тип К7) по ГОСТ Р 53772-2010 с номинальным диаметром 11,0 мм. Расчет панелей производился при соблюдении обязательных требований [1] с учётом теоретических положений [3], а также рекомендации [2]. Величина начального предварительного напряжения нижней арматуры плит принимается 1200 МПа и верхней – 600 МПа.

Достоинствами рассматриваемой конструкции плит, по сравнению с технологией безопалубочного формования, в том числе являются: возможность применения подвижных бетонных смесей, вместо жёстких, и отсутствие необходимости заделка пустот в торцах панелей, заводимых в кирпичные или блочные стены.

Анализ имеющихся материалов позволяет сделать вывод, с одной стороны о перспективности указанных разработок, а с другой, о необходимости предстоящего поиска конструктивных и технологических решений по следующим вопросам: обеспечение жёсткости и трещиностойкости в продольном и поперечном направлениях; компенсация уменьшения рабочей высоты сечения; повышенный собственный вес панелей, по сравнению с пустотными плитами; необходимость изготовления панелей в несколько этапов (установка керамзитобетонных блоков, укладка арматуры, заполнение опалубки бетонной смесью).

Библиографический список

1. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003». – М., 2015.
2. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СП 52-102-2004). – М., 2005.
3. Трещёв, А. А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов: монография / А.А. Трещёв. – М.: РААСН; Тула: ТулГУ, 2007. – 160 с.

К ВОПРОСУ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ ДОРОГ

Трофимов В.И., Сиявский А.С., Громов В.В.
ТверьГТУ, г. Тверь, Россия

Для ускоренного освоения стратегически важных для нашей страны нефтегазовых месторождений, расположенных в северных районах, требуется формирование развитой транспортной сети. В свою очередь одним из факторов, влияющих на эффективное функционирование транспортной сети, является наличие надёжного бетонного покрытия дорог.

Строительство и эксплуатация дорог на Севере происходит в сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях. Поэтому все большее применение находит цементобетонное покрытие дорог, как наиболее эффективное, вместо асфальтобетонного покрытия.

Для повышения несущей способности дорожного цементобетонного покрытия разработано и используется в практике строительства несколько технических решений.

Технология повышения несущей способности дорожного цементобетонного покрытия может быть реализована по двум направлениям: в заводских условиях и непосредственно на месте строительства дороги.

В настоящее время в заводских условиях осуществляется изготовление готовых напряжённых и ненапряженных дорожных бетонных плит типа согласно ГОСТа 21924.0-84 «Плиты железобетонные для покрытий городских дорог. Технические условия (с Изменением N 1)» двумя способами: на виброплощадках по агрегатно-поточному способу организации производства и по более современному безопалубочному способу непрерывного формования на длинном стенде. Готовые дорожные плиты доставляются на трассу строящейся дороги и там монтируются.

Одним из недостатков дорожных бетонных плит является их склонность к развитию повышенного трещенообразования, особенно на торцах плит – в местах их соединения между собой. Это объясняется тем, что в этих местах проявляются повышенные динамические нагрузки от колёс транспорта, особенно в процессе эксплуатации в условиях низких температур. Наиболее часто это проявляется на дорогах, где наблюдается интенсивное движение тяжело нагруженной техники, в частности на Севере, где ведётся интенсивное освоение нефтегазовых месторождений.

Из мировой практики известно, что для повышения структурной прочности дорожной бетонной плиты, в частности, торцевой её части как наиболее уязвимой, предлагается усиливать бетонную матрицу фиброй [1]. В тоже время известно, что совместное использование различной фибры или фибры различной длины в виде полиармирования, даёт ещё больший эффект упрочнения структуры бетонной матрицы [2, 3].

В развитие существующих способов повышения несущей способности дорожных бетонных плит на кафедре ПСК ТверьГТУ предложена методика повышения эффективности их работы за счёт дополнительного усиления структуры бетонной матрицы, заключающаяся в комбинированном сетчатом армировании, которое включает линейное и дисперсное армирование. При этом линейное армирование выполняется на основе использования линейных – непрерывных полимерных сеток, а дисперсное - включает использование композитных микросеток, причём с учётом полиармирования (патент № 2490406).

Учитывая, что серьёзным недостатком в технологии строительства дорог, включающей использование готовых бетонных плит, является повышенная трудоёмкость выполнения операций по их сборке, включая операцию по заделке швов, а также необходимостью использова-

ния специальных транспортирующих и грузоподъёмных машин, в последнее время в практике строительства цементобетонных дорог все шире начинают применять технологию монолитного безопалубочного формирования дорожного полотна.

На сегодняшний день согласно СНиПа 2.05.02-85 «Автомобильные дороги (с Изменениями N 2-5)» известно два основных способа укладки монолитного цементобетонного покрытия дороги непосредственно на месте строительства: с напряжённой арматурой и без напряжённой арматуры.

Согласно СНиПа 2.05.02-85 «Автомобильные дороги (с Изменениями N 2-5)»: цементобетонное дорожное полотно без напряжённой арматуры формуется по аналогии с асфальтобетонным покрытием. Основными недостатками такой технологии являются недостаточная надёжность покрытия в случае работы при низких температурах и повышенных нагрузках, что снижает эффективность её применения.

Одной из современных технологий возведения полотна из дорожных плит является его армирование канатами в продольном и поперечном направлениях. Такая методика армирования полотна протяжёнными участками позволяет существенно повысить его несущую способность и долговечность работы. Однако слабым местом по-прежнему остаются места стыков, где возникают значительные динамические нагрузки от действия колёс, особенно тяжёлой техники. Поэтому рекомендуется при устройстве монолитного цементобетонного полотна, в особенности не напряжённого, использовать комбинированное сетчатое армирование – линейное и дисперсное с учётом полиармирования.

В заключение можно сделать вывод, что применение комбинированного сетчатого армирования в виде линейного и дисперсного в комплексе с полиармированием для наиболее уязвимых мест дорожной цементобетонной плиты или дорожного монолитного цементобетонного полотна, позволит снизить риск их разрушения в условиях эксплуатации при низких температурах и увеличить срок их работы.

Библиографический список

1. Иванов, И.А. Комбинированная дорожная плита с использованием фибробетона / И.А. Иванов, М.М. Бузаева // Вестник ВСГУТУ, 2016. – № 4 (61). – С. 12-18.
2. Пухаренко, Ю.В. Эффективность полиармирования фибробетона стальной фиброй разного типоразмера / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков // Искусствоведение, архитектура и строительство, 2013 – С. 60-64.

3. Пантелеев, Д.А. Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетонна / Д.А. Пантелеев // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2015. – № 3. – С. 133-139.

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОПУСТОТНЫХ МЕЖЭТАЖНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Трофимов В.И., Смородинова В.А., Савельева А.С., Порываева А.В.
ТверьГТУ, г. Тверь, Россия

В условиях, когда все шире развивается монолитное многоэтажное строительство зданий и сооружений с большими пролётами, остро встаёт вопрос снижения массы перекрытий.

Для снижения массы железобетонных перекрытий разработано и используется в практике строительства несколько технологий их изготовления.

Технологии изготовления многопустотных межэтажных перекрытий могут быть реализованы по двум направлениям: в заводских условиях и в условиях строительной площадки.

В настоящее время в заводских условиях осуществляется изготовление готовой многопустотной панели перекрытия с каналами внутри типа ПК согласно ГОСТа 9561-91 двумя способами: на виброплощадках по агрегатно-поточному способу организации производства и экструзией по более современному безопалубочному способу формования на длинном стенде. Готовые многопустотные панели доставляются на стройплощадку и там монтируются.

В развитие существующих способов изготовления многопустотных плит перекрытия на кафедре ПСК ТверьГТУ предложено два новых способа их изготовления (патенты: 2247198 и 2433219). Способ изготовления многопустотной плиты перекрытия с каналами согласно патенту № 2247198 реализуется следующим образом.

Сначала формируют отдельно верхнюю, а затем нижнюю часть плиты с полуканалами, причём для верхней части плиты выполняют тепловую обработку. После чего верхнюю и нижнюю части плиты соединяют путём их сцепления (по сырому бетону нижней части) с образованием каналов, где верхняя часть плиты, прошедшая тепловую обработку, используется в качестве пригруза для нижней сырой отформованной части. Далее выполняют тепловую обработку плиты в собранном виде. Эффективность применения разработки обеспечивается возможностью

организации пустотных каналов различного размера и их расположения в плите. При этом значительно упрощается конструкция технологической линии – полный отказ от использования каретки с пустотообразователями или иного устройства, соответственно, повышается надёжность ее работы и снижается себестоимость продукции.

Недостатком известных конструкций многопустотных плит является наличие непрерывных каналов, которые снижают их прочность.

Поэтому известен другой способ изготовления многопустотной плиты, который может быть реализован без каналов, а согласно патенту № 2433219 - с образованием дискретных пустот.

Формование плиты осуществляют путём последовательной укладки в форму одного или нескольких слоёв смеси, при этом на поверхность каждого слоя устанавливают с зазором шаблон с ячейками – отверстиями. Засыпают на шаблон шаровой пустотелый наполнитель и целенаправленно распределяют его по ячейкам шаблона. Затем погружают шаровой пустотный наполнитель в смесь путём вибрирования или вдавливания, после чего операции повторяют со следующим слоем. При этом искусственное - целенаправленное внедрение и распределение пустотелого наполнителя позволяет сформировать, по сути, каркасную бетонную матрицу, которая отличается пониженной пористостью в межпустотном пространстве и, соответственно, повышенной структурной прочностью.

Эффективность применения такого технического решения обеспечивается возможностью организации в бетонной матрице строго равномерного распределения дискретных пустот. Это обеспечивает образование непрерывных структурных связей между пустотами и, соответственно, повышает прочность плиты на изгиб.

На сегодняшний день известно два основных способа изготовления монолитной многопустотной плиты перекрытия в условиях строительной площадки: технология, описанная в нормативном документе – Свод Правил 52-1032007 «Железобетонные монолитные конструкции зданий» и технология БаблДэк, которую предложил датский инженер-строитель Йорген Беннинг.

Согласно Своду Правил 52-1032007 «Железобетонные монолитные конструкции зданий: глава 7 «Несущие железобетонные конструкции», в подпункте 7.8 записано: «Для снижения массы перекрытий желательна применять лёгкие бетоны, пустотелые вкладыши или вкладыши в виде плит и блоков из особо лёгких бетонов».

Основными недостатками такой технологии являются большая трудоёмкость по укладыванию вкладышей на стройплощадке и их фиксации, что снижает эффективность её применения.

Одной из современных технологий изготовления монолитной многопустотной плиты перекрытия в условиях строительной площадки является технология БаблДэк, которую в настоящее время широко внедряют за рубежом при организации межэтажного перекрытия. В основе этой технологии лежит идея равномерного распределения пустот одного объёма. Пустоты в бетонной матрице образуют пластиковыми шарами, заполненными воздухом. При этом в заводских условиях изготавливают модули, представляющие собой нижний бетонный слой перекрытия с арматурным каркасом, в который встроены пластиковые шары. Такие модули транспортируют на стройплощадку, устанавливают как межэтажное перекрытие и заполняют бетонной смесью.

Технология БаблДэк позволяет снизить вес перекрытия, а его «сотовая структура» - повысить прочность всей конструкции. В результате этого межэтажные перекрытия, выполненные по технологии БаблДэк, облегчают конструкцию зданий и экономят бетон.

В заключение можно сказать, что на основе выполненного анализа существующих технологий возведения межэтажных многопустотных перекрытий и выявленных при этом недостатков, наиболее перспективной является новая технология производства многопустотного настила как в заводских условиях, так и в условиях строительной площадки на основе организации в бетонной матрице строго равномерного распределения дискретных пустот одного объёма, образуемые пластиковыми шарами, заполненными воздухом.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОСТОЙКОГО ВЯЖУЩЕГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ СТРОИТЕЛЬНОГО ГИПСА

Уруев В.М., Барковская С.В.
ТулГУ, г. Тула, Россия

В Тульской области достаточное количество месторождений осадочных горных пород: карбонатных и гипсовых. На основе гипсовых пород получают достаточно дешёвые строительные вяжущие вещества, которые не требуют больших энергозатрат при их получении. Но помимо низкой стоимости, простоты применения и доступности у гипсовых вяжущих веществ есть недостатки: относительно низкая прочность, низкая водостойкость, влагостойкость и морозостойкость.

Существует два пути модификации свойств гипсового камня: первый – введение минеральных компонентов в состав гипсового вяжущего и получение композиционного гипсосодержащего вяжущего вещества; второй – введение ПАВ (поверхностно-активных веществ). В данной работе рассматривается гипсомagneзиально-пуццолановое вяжущее (ГМПВ), состоящее из строительного гипса, каустического магнезита, магний хлористый технический (бишофит), колошниковая пыль, керамзитовая пыль; в котором магнезиальная составляющая: каустический магнезит и бишофит, а пуццолановые добавка: колошниковая пыль и керамзитовая пыль.

Предпосылкой исследования вышеизложенного состава было усовершенствование ГЦПВ на основе строительного гипса, портландцемента и пуццолановой добавки. Помимо достоинств (высокой прочностью), недостатками состава были: стоимость смешанного вяжущего, появление трещин на поверхности бетона при нарушении дозировок и недостаточная водостойкость.

Бесклинкерные аналоги [1] включали активный тонкодисперсный оксид магния и тонкомолотую обожжённую глину, а затворялись растворами солей магния, т.е. происходит замена портландцемента.

В ходе исследований ставилась задача увеличения прочности при сжатии через два часа твердения образцов, упрощение технологии изготовления, при этом необходимо было, чтобы не снижалась водостойкость вяжущего (оценивалась по коэффициенту размягчения).

Для реализации задачи в строительный гипс вводили добавку железосодержащих отходов газоочистки доменных печей – колошниковую пыль, каустический магнезит и пылевидную алюмосиликатную добавку - керамзитовую пыль из циклонов (составы приведены в табл. 1).

Таблица 1 – Соотношение компонентов в исследуемых составах

Компонент	Содержание					
	1	2	3	4	5	6
Каустический магнезит	89,30	85,78	83,00	81,20	78,40	73,66
Бишофит (в пересчете на твердое вещество)	5,95	5,64	5,49	5,42	5,34	5,30
Пуццолановая добавка (колошниковая пыль (немолотая) + керамзитовая пыль)	4,75	8,58	11,51	13,38	16,26	21,21

Способ изготовления образцов: смесь сухих составляющих дозировали по массе и затворяли раствором бишофита плотностью 1,1 г/см³

(концентрация твёрдого бишофита 13%), количество раствора бишофита вводили из расчёта получения теста нормальной густоты. Из полученного теста для определения основных свойств водостойкого вяжущего на основе гипса изготавливали образцы-балочки 4×4×16 см. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты определения свойств гипсомagneзиально-пуццоланового вяжущего (ГМПВ)

Свойства	Показатели параметров в составах						
	КО	1	2	3	4	5	6
Средняя плотность, кг/м ³	1400	1620	1469	1468	1459	1443	1433
Прочность на растяжение при изгибе, МПа (возраст 2 часа)	2,10	3,20	3,15	2,90	2,82	2,09	2,05
Прочность при сжатии, МПа (возраст 2 часа)	4,20	6,10	6,00	5,92	5,65	5,35	4,36
Прочность при сжатии, МПа (возраст 28 суток)	4,63	6,52	6,33	6,21	5,90	5,45	5,05
Коэффициент размягчения	0,37	0,97	0,99	1,0	1,05	1,08	0,65

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что частичная замена строительного гипса магнезиальным вяжущим даёт прирост прочности при сжатии в возрасте 2 часа (27 – 65%); увеличение содержания пуццоланической добавки позволяет увеличить водостойкость вяжущего (коэффициент размягчения увеличивается с 0,37 до 1,08).

Библиографический список

1. Коровяков, В.Ф. Перспективы применения водостойких гипсовых вяжущих в современном строительстве / В.Ф. Коровяков // В сб. «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»: материалы семинара. – М., 2002. – С. 34-37.

2. Уруев, В.М. Исследование свойств строительного гипса на основе добавок ПАВ / В.М. Уруев, О.В. Антипова, С.В. Барковская // «Опыт прошлого – взгляд в будущее: 7-я Международная научно-практическая конференция молодых учёных и студентов»: материалы конференции, 2017. – Тула: ТулГУ. – С. 146-151.

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНЫХ ДОБАВОК

Уруев В.М., Барковская С.В.
ТулГУ, г. Тула, Россия

Применение кварцевого песка, при условии отсутствия или дефицита крупного заполнителя – это одно из перспективных и экономически выгодных направлений. Однако, применение только песка в качестве заполнителя значительно увеличивает удельную поверхность и пустотность заполнителя, расходы цемента и воды возрастают, как и усадка бетона. В связи с этим, для решения этих вопросов разрабатываются комплексные добавки (модификаторы), которые используются в качестве вяжущего комплексного состава на основе портландцемента.

В данной работе рассматривается разработка композиционного вяжущего и мелкозернистого бетона с применением комплексного органо-минерального модификатора, который выполняется на основе микрозаполнителя из тонкомолотого кварцевого песка и органической углеродосодержащей составляющей. Органические и неорганические соединения, используемые в качестве специальных добавок к бетону и вводимые в незначительных количествах (десятые и сотые доли процентов по массе цемента) существенно влияют на химические процессы твердения бетона, обеспечивая улучшение его механических и физико-технических свойств (морозостойкости, плотности, коррозионной стойкости и т.д.).

В ходе исследований применялись следующие материалы: портландцемент общестроительный ЦЕМ I 32,5Н, песок природный средний I класса соответствующий ГОСТ (ГОСТ 8736 – 2014), кварцевый микрозаполнитель с удельной поверхностью более 300 м²/кг, полученный помолом в шаровой мельнице, гуминовый препарат «Гумат +7», применяемый в качестве удобрения и раскислителя почвы (тонкодисперсный порошок, растворяющийся в воде полностью).

При исследовании влияния кремнеземистого микрозаполнителя на свойства цементного камня (изготавливались образцы 4 × 4 × 16см, н.у. твердения в течении 28 суток) были получены результаты [1], приведённые в табл. 1. При этом оценивался критерий эффективности минеральной добавки (Эд), численно равный экономии цемента в бетоне эталонного состава.

Таблица 1 – Результаты испытаний влияния микронаполнителя на свойства цементного камня

Маркер состава	Плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Ц _{удел} , кг/МПа	Эд, %
КС	2290	6,6	38,9	13,6	-
КМ-1	2300	6,0	37,2	13,5	93
КМ-2	2300	7,7	35,9	13,3	87
КМ-3	2260	7,3	29,5	15,1	52
КМ-4	2280	5,9	33,9	12,3	78
КМ-5	2280	6,4	29,9	13,2	55
КМ-6	2270	6,1	27,2	13,4	38
КМ-7	2280	7,2	31,1	11,0	62

Помимо этого, исследовалось влияние углеродосодержащего с катионами металла компонента (Гумат+7) на свойства мелкозернистых бетонов (табл. 2). При проведении испытаний (изготавливались образцы 4 × 4 × 16см, н.у. твердения в течении 28 суток) расход углеродосодержащей добавки принимался в % от массы цемента. Добавка вводилась в смесь в виде 2%-ного истинного водного раствора с концентрацией 20г/л. При этом следует отметить, сто стабильность раствора не более 7 суток.

Эффективность введения углеродных наночастиц в цементные композиции обусловлена понижением энергетического порога начала образования кристаллогидратов из водного раствора, насыщенного ионами клинкерных минералов, как результата его взаимодействия с водой затворения.

Таблица 2 – Результаты испытаний влияния на свойства мелкозернистого бетона углеродосодержащего с катионами металла компонента

Маркер состава	Плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа
КС	2290	6,6	38,9
УЖ-1	2350	6,7	39,5
УЖ-2	2330	6,9	42,5
УЖ-3	2310	7,2	39,9
УЖ-4	2310	7,3	39,0
УЖ-5	2260	7,3	41,5
УЖ-6	2300	7,2	46,5

Из приведённых выше результатов (табл. 1) видно, что при увеличении количества кремнеземистого микронаполнителя прочность цементного камня на сжатие уменьшается более чем на 20%, а прочности на растяжение при изгибе практически не меняется, плотность мелкозернистого бетона при расходе микронаполнителя 5 – 10% от массы цемента несколько выше, чем у контрольного состава; однако микронаполнитель уменьшает удельный расход цемента на единицу прочности, т.е. способствует снижению себестоимости.

Применение углеродосодержащего компонента ведёт к увеличению прочности на сжатие (более чем на 19%), прочность при изгибе увеличивается не значительно, плотность мелкозернистого бетона увеличивается.

Затем, после анализа компонентов, модифицирующих вяжущее, в отдельности, была проведена оценка свойств мелкозернистого бетона на основе композиционного вяжущего, основанного на портландцементе с применением органоминерального комплекса, который состоял из активированного углеродосодержащим с катионами металлов раствором кварцевого микронаполнителя (табл. 3).

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что органоминеральный комплекс в составе вяжущего мелкозернистых бетонов даёт рост плотности цементного камня и прочности при сжатии образцов мелкозернистого бетона пропорционально количеству вводимого углеродосодержащего компонента (в исследуемом диапазоне), т.к. уплотняется структура за счёт сокращения микропор и увеличения новообразований в процессе гидратации.

Таблица 3 – Результаты оценки композиционного вяжущего в мелкозернистых бетонах

Составы	Расход материалов			Физико-механические свойства	
	Снижение расхода цемента %	КМ	УЖ, 5 на сухое сверх 100	Плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа
1	0	0	0	2840	41,0
2	15	15	0,2	2963	45,0
3	15	15	0,15	2798	34,9
4	30	30	0,10	2780	30,1
5	30	30	0,05	2777	14,5

Введение щелочного раствора «Гумат+7» создаёт щелочную среду в композитной смеси с кварцевым микронаполнителем, тем самым увеличивая долю активных отрицательных центров кристаллизации.

Библиографический список

1. Уруев, В.М. Исследование и модификация свойств мелкозернистого бетона на основе комплексных добавок / В.М. Уруев, С.В. Барковская, А.С. Солуков и др. // «Опыт прошлого – взгляд в будущее: 7-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов»: материалы конференции. – 2017. Тула: ТулГУ. – С. 154-157.
2. Ахметшина, Л.Ф. Влияние углеродных металлосодержащих наноструктур на прочностные свойства бетонных композитов / Л.Ф. Ахметшина, В.И. Кодолов, И.П. Терешкин // Нанотехнологии в строительстве, 2010. – № 6. – С.35-46.

ПОСТУЛАТ ИЗОТРОПИИ И ПРИНЦИП ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПРИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ СТАЛИ 45 ПО ЛОМАНЫМ ПЛОСКИМ ТРАЕКТОРИЯМ

Фёдоров В.Н., Зубчанинов В.Г.
ТверьГТУ, г. Тверь, Россия

Для актуализации дальнейшего развития современной механики материалов требуется проведение экспериментальных испытаний, обработанные результаты которых будут основой для подтверждения положений, выдвинутых в рамках описания поведения данных материалов при упругопластическом деформировании по сложным траекториям, а также для определения достоверности аналитического решения краевых задач и определяющих соотношений.

А.А. Ильюшиным в 1950-е годы. был выдвинут постулат изотропии, который позволяет ставить и решать краевые задачи для сложных сплошных сред, а также принцип запаздывания. Принцип запаздывания состоит в том, что ориентация вектора напряжений относительно траектории деформации определяется не всей историей процесса деформирования, а некоторым конечным участком, называемым следом запаздывания h [1].

В рамках экспериментальной проверки данных предположений в лаборатории механических испытаний кафедры Сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета была проведена серия испытаний трубчатых образцов из стали 45 (состояние поставки) по двухзвенным плос-

ким ломаным траекториям. Программа испытаний была выполнена на автоматизированном расчётно-экспериментальном комплексе СН-ЭВМ имени А.А. Ильюшина с постоянной скоростью деформирования и реализована в девиаторном подпространстве деформаций Θ_1 – Θ_3 .

Первая программа экспериментальных испытаний включала в себя испытания материала по центральному вееру для установления начальной изотропии стали 45 и определения единой кривой ее упрочнения. Вторая программа испытаний соответствовала вееру по ломаным двухзвенным траекториям в пространстве деформаций Θ_1 – Θ_3 . Первая траектория на первом звене включала в себя чистое растяжение до значения $\Theta_1^* = 1,5\%$, затем осуществлялся излом траектории на 90° и реализовывалось чистое кручение до $\Theta_3^* \approx 1,65\%$. Вторая траектория образована аналогично с деформированием на втором звене до $\Theta_1^* \approx 3,75\%$ путём отражения относительно биссектрисы прямого угла между Θ_1 и Θ_3 .

При анализе диаграмм простого деформирования, построенных по результатам экспериментальных данных, полученных при реализации программы «Центральный веер», было установлено, что исследуемый материал с достаточной степенью точности обладает начальной изотропией, а экспериментальные данные, полученные при его растяжении, допускается использовать для аппроксимации универсального закона упрочнения Одквиста-Ильюшина.

Для стали 45 экспериментально были определены параметры аппроксимаций диаграммы растяжения: $\sigma^T = 300$ МПа, $2G = 1,5 \cdot 10^5$ МПа, $\beta = 125$, $\alpha = 275$, $\sigma = 93$ МПа, $2G = 3900$ МПа.

Для второй программы был получен отклик в пространстве напряжений, который позволил построить образ процесса для каждой составляющей программы и проанализировать выполнение постулата изотропии. Сравнение образов процесса для исследуемых траекторий показало, что постулат изотропии выполняется с достаточной для практических расчётов точностью.

Угол сближения после излома первого звена стабилизируется на участке, равном следу запаздывания h , который определён экспериментально с допуском на отклонение 7° и равен $h = 11,75\epsilon$, где $\epsilon = 0,00219$ – предел деформации текучести данного материала при растяжении (определено в рамках реализации программы «Центральный веер»). Достаточно большой след запаздывания можно объяснить фактическим состоянием исследуемой стали. Таким образом, наглядно наблюдается принцип запаздывания А.А. Ильюшина.

При математическом моделировании описанных программ нагружения использовалась математическая модель теории процессов В.Г. Зубчанинова для плоских траекторий. Определяющие соотношения рассматриваемой модели сведены к задаче Коши, для численного решения которой использовался метод Рунге-Кутты четвёртого порядка точности, реализованный в программе математического моделирования MATLAB.

Сравнение полученных расчётных и экспериментальных данных показало, что используемая математическая модель достоверно описывает исследуемые процессы деформирования материалов.

Значения параметров аппроксимаций функционалов пластичности для двух сложных траекторий принимались одинаковые. В результате получены расчётная диаграмма $\sigma-\varepsilon$, отвечающая за скалярные свойства материала и диаграмма, отвечающая за его векторные свойства, которые с достаточной степенью точности согласуются с экспериментальными данными.

Библиографический список

1. Зубчанинов, В.Г., Механика процессов пластических сред / В.Г. Зубчанинов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010 – 352 с.

РАСЧЁТ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ СОПРЯЖЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Косов Д.А.
СГТУ, г. Саратов, Россия

Рассмотрим систему из двух сопряжённых между собой замкнутых цилиндрических оболочек. Оболочки имеют на одном конце жёсткое закрепление, а на другом – свободный конец. На одну из оболочек действует на свободном конце сосредоточенная нагрузка (рис 1).

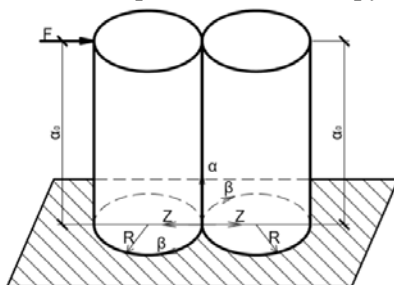


Рис. 1

По линии контакта оболочек возникает реактивное давление. Величина и характер распределения реактивного давления по линии контакта оболочек неизвестны.

Для определения характера распределения реактивного давления по линии контакта оболочек используем подход, изложенный в работе [1].

Эпюра реактивного давления всегда ограничена кривой линией, но практически достаточно найти некоторые ординаты и соединив их прямыми, получить ломанную линию.

В целях сокращения вычислительной работы будем считать реактивное давление равномерно распределено в пределах сколь угодно малых участков, а всю эпюру – ограниченной ступенчатой линией. Кроме того, условимся в дальнейшем иметь дело не с интенсивностью давления в каждом участке, а с равнодействующей давления, приходящейся на этот участок.

Связь между оболочками осуществляется только в отдельных точках, находящихся в серединах прямолинейных участков эпюры. Число этих точек (опор) можно принять, руководствуясь только соображениями о желательной степени точности расчёта. Чем больше опор мы наметим, тем точнее будет и окончательный результат.

Для расчёта применяем один из методов строительной механики – метод сил. Основную систему выберем, разрезая или удаляя все горизонтальные стержни, заменяя их действием неизвестных реактивных сил $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$.

Таким образом, расчёт сложной пространственной системы в нашем случае сводится к расчету отдельных замкнутых цилиндрических оболочек под действием сосредоточенных нагрузок.

Неизвестные реактивные давления F_n находим из условий сопряжения оболочек. В точках контакта оболочек радиальные перемещения оболочек равны.

Для нахождения неизвестных реактивных сил F_n имеем канонические уравнения обычного вида:

Решение системы уравнений даст значения неизвестных реактивных сил F_n , а по ним нетрудно найти и интенсивность давления в пределах каждого участка. После этого можно вычертить ступенчатую линию эпюры давления. При желании ступенчатую эпюру можно заменить эпюрой, очерченной по плавной кривой. Имея величину и характер реактивного давления можно определить напряжённо-деформированное состояние оболочек.

По разработанному способу произведён расчёт пространственной системы (см. рис.1). Параметры оболочек: $L = 30$ м, $h = 0,16$ м, $R = 3$ м, $\alpha_0 = L/R = 10$.

Рассмотрен случай, когда линия контакта оболочек разделена на 8 участков.

Значения радиальных перемещений стенки замкнутой цилиндрической оболочки в любой точке оболочки под действием сосредоточенной силы были определены по аналитическим выражениям, приведённым в работе [2].

Результаты расчёта представлены на рис. 2.

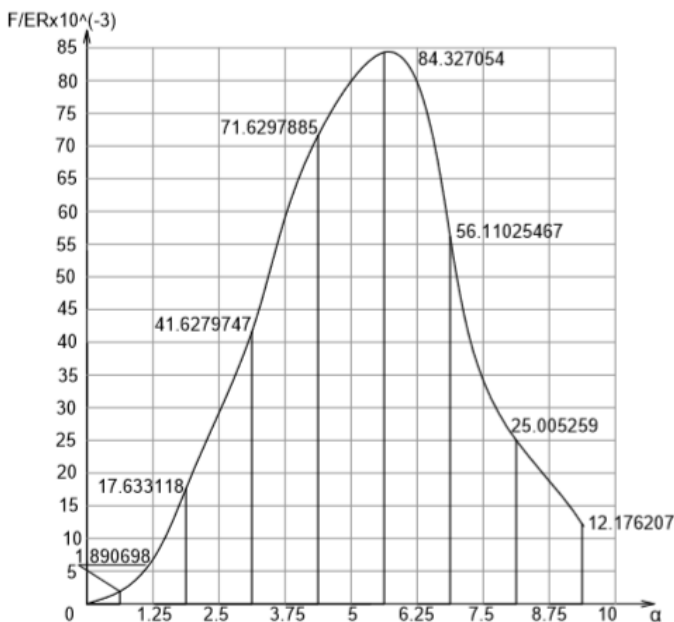


Рис. 2. График распределения реактивного давления по линии контакта оболочек

Зная величину и характер распределения реактивного давления можно определить напряжённо-деформированное каждой оболочки.

Библиографический список

- Шагивалеев, К. Ф. Расчёт тонкостенных пространственных систем, состоящих из связанных между собой замкнутых цилиндрических оболочек, методом сил / К.Ф. Шагивалеев, С.Н. Буров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2011. – № 1 – С. 8-12.
- Шагивалеев, К.Ф. Расчёт замкнутой цилиндрической оболочки на локальные и сосредоточенные нагрузки / К. Ф. Шагивалеев. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2011. – 316 с.

РАСЧЁТ ЗАМКНУТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ, СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ВДОЛЬ ОБРАЗУЮЩЕЙ

Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Растрепин В.Ю.
СГТУ г. Саратов, Россия

Рассмотрим замкнутую цилиндрическую оболочку под действием нагрузки $p_2 \cos n\beta$, сосредоточенной вдоль образующей и распределенной в кольцевом направлении по $\cos n\beta$ (рис.1).

В работе [1] приведены решения для оболочки при действии нагрузки $X(\alpha, \beta)$, равномерно распределенной на участке α_1 вдоль образующей, а в кольцевом направлении по $\cos n\beta$ (рис.2).

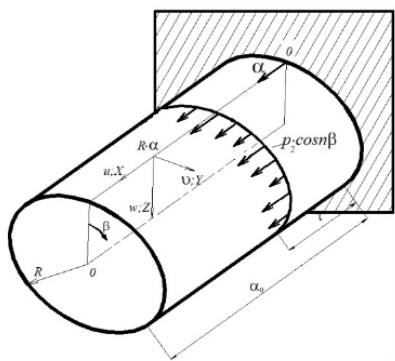


Рис.1

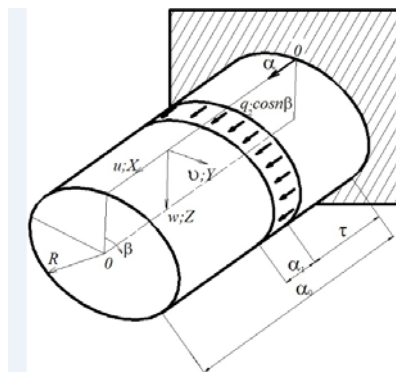


Рис.2

Выражения получены в общем виде, они позволяют рассчитать цилиндрическую оболочку при различных геометрических размерах ее, при любом положении нагрузки по длине оболочки и при различных размерах участка нагружения α_1 (см. рис.2), позволяют получить решения для оболочки при действии на оболочку нагрузки, направленной вдоль образующей по любому закону, в том числе и для оболочки при действии нагрузки $p_2 \cos n\beta$, сосредоточенной по длине оболочки и распределённой в кольцевом направлении по $\cos n\beta$ (рис.1).

Примем, что расстояние $R\alpha_1$ (см. рис.2) бесконечно уменьшается и в то же время q_2 увеличивается так, что произведение $qR\alpha_1$ становится конечным и равным p_2 [2].

В пределе получаем, таким образом, решение для оболочки при действии нагрузки, сосредоточенной по длине оболочки и распределённой в кольцевом направлении по $\cos n\beta$:

$$\Phi(\alpha, \beta) = -\frac{p_2 R}{4 \chi^3 E h} \cdot [(Y_2 - Y_3) \eta(\alpha - \tau) + (B_2 - B_3) X_1 - B_1 (X_2 - X_3) + k_7 X_1 + k_8 (X_2 - X_3)] \cos n \beta ,$$

где

$$\begin{aligned} X_1 &= \cos \chi \alpha \operatorname{ch} \chi \alpha; & Y_1 &= \cos \chi(\alpha - \tau) \operatorname{ch} \chi(\alpha - \tau); \\ X_2 &= \sin \chi \alpha \operatorname{ch} \chi \alpha; & Y_2 &= \sin \chi(\alpha - \tau) \operatorname{ch} \chi(\alpha - \tau); \\ X_3 &= \cos \chi \alpha \operatorname{sh} \chi \alpha; & Y_3 &= \cos \chi(\alpha - \tau) \operatorname{sh} \chi(\alpha - \tau); \\ B_1 &= \cos \chi \tau \operatorname{ch} \chi \tau; & B_2 &= \sin \chi \tau \operatorname{ch} \chi \tau; \\ B_3 &= \cos \chi \tau \operatorname{sh} \chi \tau; & B_4 &= \sin \chi \tau \operatorname{sh} \chi \tau; \\ k_7 &= - [B_4 (\sin 2 \chi \alpha_0 + \operatorname{sh} 2 \chi \alpha_0) + \\ &+ \frac{1}{2} (B_2 + B_3) (\cos 2 \chi \alpha_0 - \operatorname{ch} 2 \chi \alpha_0)] (\cos^2 \chi \alpha_0 + \operatorname{ch}^2 \chi \alpha_0)^{-1}; \\ k_8 &= [B_4 (\cos^2 \chi \alpha_0 - \operatorname{ch}^2 \chi \alpha_0) - \\ &- \frac{1}{2} (B_2 + B_3) (\sin 2 \chi \alpha_0 - \operatorname{sh} 2 \chi \alpha_0)] (\cos^2 \chi \alpha_0 + \operatorname{ch}^2 \chi \alpha_0)^{-1}; \end{aligned}$$

$\eta(\alpha - \tau)$ – единичная функция, которая равна 1 при $\alpha > \tau$ и 0 при $\alpha < \tau$,
 $\eta(\alpha - \tau - \alpha_1)$ – единичная функция, которая равна 1 при $\alpha > \tau + \alpha_1$ и равна 0 при $\alpha < \tau + \alpha_1$.

Зная $\Phi(\alpha, \beta)$, можно определить перемещения, усилия и моменты [3]. Полученные решения могут быть использованы инженерами при расчёте конструкций в виде замкнутых цилиндрических оболочек при действии нагрузок, сосредоточенных вдоль образующей и распределённых в кольцевом направлении по любому закону, в том числе и сосредоточенных.

Библиографический список

1. Шагивалеев, К.Ф. Расчёт замкнутой цилиндрической оболочки при действии нагрузки вдоль образующей / К.Ф. Шагивалеев, Е.К. Сурнина, Ю.А. Поляков // VI Международная научно-практическая конференция «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном

комплексе региона»: сб. научн. Тр. СГТУ. – Саратов, 2018. – С. 459-463.

2. Тимошенко, С.П. Устойчивость упругих систем / С.П. Тимошенко. – М., Л.: Гостехиздат, 1946. – 532 с.

3. Гольденвейзер, А.Л. Теория упругих тонких оболочек / А.Л. Гольденвейзер. – М.: Наука, 1976. – 512 с.

МАТЕРИАЛ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЕРЫ И СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩЕГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОТХОДА

Юсупова А.А., Бараева Л.Р., Ахметова Р.Т., Хацринов А.И.
КНИТУ, г. Казань, Россия

Современная промышленность развивается очень динамично. В отличие от прошлых лет, развитие это идёт интенсивным путём, с привлечением последних научных разработок. Огромное значение приобретает ресурсосберегающая технология. Переработка техногенных месторождений позволит решить как важные проблемы минерально-сырьевого комплекса страны, так и улучшить экологическую ситуацию.

В данной работе рассмотрена возможность получения сульфида кальция с использованием кремнезёмсодержащего отхода Менделеевского завода им Л.Я. Карпова, содержащего 20,5% диоксида кремния и до 14,7% сульфида кальция. Известно, что сульфидные ионы являются нуклеофильными активаторами расщепления серного кольца. Наличие сульфидных ионов – CaS может способствовать повышению химической активации серы и получению сульфида кальция и СКМ на его основе с высокими физико-механическими свойствами.

Наличие сульфидных ионов, являющихся нуклеофильным агентами, позволяет активировать серу, способствуя химическому взаимодействию компонентов и получению серных материалов на их основе с высокими физико-механическими свойствами. Приготовленные по предлагаемой рецептуре образцы при оптимальном соотношении компонентов, обладают высоким коэффициентом стойкости к растворам HCl, H₂SO₄, CaCl₂, NaCl, MgSO₄, высокой ударной прочностью (52 МПа), морозостойкостью (280 циклов).

Физико-химические и квантово - химические исследования в системе сера– сульфидсодержащий промышленный отход – наполнитель.

Механизм взаимодействия компонентов в системе «сульфид кальция – сера» был исследован с применением квантово-химических расчетов.

Для объяснения изменения свойств в структуре образцов были проведены физико-химические и квантово-химические исследования.

Рентгенофазовые исследования образцов серобетона с ПГМ и тонкомолотым наполнителем – отходом производства хлорида бария (Менделеевского завода им. Л.Я. Карпова) показал, что в кристаллической фазе присутствует ромбическая сера (1,621; 1,698; 1,726; 1,781; 2,21; 2,37; 2,43; 2,50; 2,62; 2,84; 3,21; 3,57; 3,86; 4,06; 5,75 7,7) α -кварц (1,818; 1,981; 2,28; 2,46; 3,34; 4,2) барит, сульфид кальция (CaS – 2,84; 2,04, пм).

Проведённые термогравиметрические исследования отхода производства $BaCl_2$ указывают на эндотермические процессы, происходящие в температурном интервале 140-250 °С (эндоеффект при 180 °С) – сопровождающиеся потерей 3,3% по массе образца, что связано с удалением гигроскопической и кристаллогидратной воды.

При дальнейшем увеличении температуры, наблюдается повышение теплосодержания системы, по всей видимости связанного с окислением компонентов смеси (возможно сульфида кальция).

Суммарная потеря массы образца при нагревании до 500 °С составляет 5% масс. Исходя из полученных результатов ДТА с целью предотвращения газообразования и вспучивания серобетона исходный наполнитель – отход подвергали сушке в сушильном шкафу в течение нескольких часов.

ИК- спектроскопическими исследованиями установлено, что в образце серобетона с добавкой тонкомолотого наполнителя – (отхода производства $BaCl_2$) отсутствуют пики поглощения в области 3400-3600 cm^{-1} и 1621 cm^{-1} , отвечающих за деформационные колебания воды.

Появление новых полос поглощения в области 450–550 cm^{-1} , отвечающих за сульфидные связи или изменения в их интенсивностях не отмечается.

Методом ЭПР установлено, что термообработанная сера содержит высокое количество парамагнитных центров (15502 усл. ед).

Наличие активных центров в термообработанной сере говорит о разрыве серных колец и появлении бирадикалов в системе, а взаимодействие серы с отходом $BaCl_2$ приводит к резкому снижению количества ПМЦ в системе (7 усл. ед). «Гашение» ПМЦ после смешения серы

с отходом, содержащим сульфид кальция, говорит о химическом взаимодействии с системой.

Для оценки влияния сульфида кальция на активацию разрыва серных колец были проведены квантово-химические исследования системы сера – сульфид кальция. Расчёты проведены методом функционала плотности в программе Priroda c, базисом 3z.bas, включающим p и d орбитали на атомах.

Как показали расчёты, присоединение CaS к S₆ приводит к значительному снижению энергии связи в цикле на 67,36 кДж/моль и растяжению с 210,5 пм до 243,9 пм. Реакция идёт экзотермически (-302,21 кДж/моль). Вероятно, присоединение идёт за счёт s-орбиталей с образованием валентных связей (Ca–S(7) - 277,7 пм, Ca–S(2) - 277,8) и вакантных p-орбиталей кальция с образованием донорно-акцепторных связей (Ca–S(3), Ca–S(5), Ca–S(1))

Энергия связи Ca – S в соединении Ca(SH)₂ равна 304,14 кДж/моль. На разрыв двух связей Ca – S(2) (валентная) и Ca – S(3) (донорно-акцепторная) связей в CaS₇, согласно проведённым нами расчётам, необходимо затратить 369,51 кДж/моль. Таким образом, энергия донорно-акцепторной связи Ca – S(3) составляет ≈ 60 кДж/моль, а валентной связи Ca – S(2) ≈ 300 кДж/моль. Следовательно, взаимодействие сульфида кальция с серой идёт за счёт s- и p-орбиталей кальция с образованием валентных и донорно-акцепторных связей.

Присоединение CaS к S₈ идёт также экзотермически (-267,27 кДж/моль), с образованием аналогичных валентных и донорно-акцепторных связей. Сравнивая тепловые эффекты реакций образования CaS₇ (-302,21 кДж/моль) и CaS₉ (-267,27 кДж/моль), а также геометрии молекул (Рис. 4) мы можем сделать вывод, что термодинамически наиболее устойчивым является соединение CaS₇.

Таким образом, как показали квантово-химические расчёты, присутствие сульфида кальция способствует ослаблению связей в серных циклах, раскрытию серного кольца и образованию полисульфидов кальция с прочными валентными связями. Эти факторы и определяют получение прочного и химически стойкого материала. Определено, что термодинамически наиболее устойчивой является структура CaS₇.

Существенное влияние на свойства серных композитов оказывают геометрические размеры наполнителя: это, в первую очередь, дисперсность порошка. Тонкодисперсные наполнители вполне подходят для заполнения межфазного пространства между частицами серного вяжущего. Как показывают исследования, с увеличением дисперсности

наполнителя повышается предел прочности материала, что происходит из-за усиления реакционной способности измельчённого кремнезёмсодержащего наполнителя, частицы которого обладают после помола большей поверхностной активностью в результате частичного разрыва связей Si–O–Si в их кристаллической решётке.

Влияние степени наполнения и дисперсности наполнителя на свойства материала нельзя рассматривать изолированно. В действительности речь идёт о величине общей поверхности раздела, точнее, контакта фаз наполнитель – вяжущее в единице объёма связующего.

Как показали петрографические исследования, уменьшение размеров кристаллов серы обуславливает не только увеличение прочности серного вяжущего, формирование оптимальной толщины плёнки вокруг наполнителя, но и образование более прочных адгезионных связей серы с поверхностью наполнителя (Si–O–S). Столь значительное повышение прочности образца с песком (соотношение вяжущее – наполнитель 40–60 % масс) можно объяснить формированием более плотной структуры, когда мелкие частицы наполнителя (фракция менее 0,5 мм) равномерно заполняют межзерновое пространство заполнителя в образце и обеспечивают дополнительные межмолекулярные связи на границе раздела фаз вяжущее – наполнитель. Увеличение доли песка в наполнителе более 20 % приводит к снижению плотности на 0,3 г/см³ композиций, что обусловлено вероятно, снижением интенсивности сцепления вяжущего и заполнителя.

Так как одним из недостатков серы и серных материалов является способность к воспламенению, полученные образцы были исследованы на горючесть. Как показали исследования, образцы серобетонов на основе серы и ПГМ являются горючими. Добавление в состав серных бетонов отходов производства BaCl₂ Менделеевского химического завода значительно снижает горючесть и СКМ на основе техногенных отходов являются самозатухающими. Время затухания составляет 5-6 с.

Анализ рентгенопропускаемости образцов, согласно известной методике, на основе отхода производства BaCl₂ Менделеевского химического завода показал, что присутствие сульфида бария в составе в составе отхода (13% масс.) вдвое снижает рентгенопропускаемость образцов.

Таким образом разработана технология получения сульфидов кальция и СКМ на их основе с использованием кремний содержащих отходов производства хлорида бария, оптимизированы составы и технологический режим.

Квантово-химическими исследованиями подтверждено, что сульфид кальция оказывает активирующее влияние на расплав серы, выражающийся в понижении энергии разрыва серных колец, образовании реакционноспособных серных радикалов, взаимодействии последних с сульфидом кальция и образованию полисульфидов.

Физико-химическими методами исследования установлено химическое взаимодействие серы и кремнеземсодержащего отхода с образованием сульфидов, что определяет создание плотной однородной структуры и высокие физико-механические свойства СКМ на их основе. Установлено, что введение в состав СКМ отхода производства $BaCl_2$ значительно снижает горючесть композиции. Присутствие сульфата бария в составе отхода (13% масс.) вдвое снижает рентгенопропускаемость образцов СКМ.

О КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ

Ярцев В.П., Гаттасс Салех В.С., Альджабуи Д.З.
ГГТУ, г. Тамбов, Россия

В последнее десятилетие в строительных конструкциях широкое распространение получила высокопрочная неметаллическая арматура из композитных материалов. Она выпускается в виде стержней со спиральной рельефностью из стеклянных или базальтовых волокон, пропитанных химически стойким полимером.

Применение стеклопластиковой арматуры в бетонных конструкциях требует дополнительных научных исследований. В связи с этим были проведены испытания бетонных образцов со стеклопластиковой арматурой, а для сравнения образцов с металлической арматурой. Для испытания на поперечный изгиб были изготовлены образцы размерами $2x2x12$ см, а для определения кубиковой прочности $7x7x7$ см с металлическими стержнями 4А-II (А300) и стеклопластиковой арматурой заглублёнными на 1,6-6 см. Целью проведения этих испытаний являлось сравнение несущей способности образцов с металлической и стеклопластиковой арматурой, а также определение величины силы сцепления стеклопластиковых стержней с цементно-песчаным бетоном.

Для оценки влияния агрессивной среды на силу сцепления бетонные образцы с двумя видами арматуры выдерживали в течение заданного времени в 5% солевом растворе воды.

Результаты испытаний показали высокую коррозионную стойкость полимерной арматуры, по сравнению с металлической.

Примеры полученных экспериментальных результатов при поперечном изгибе после воздействия солёной воды показаны на рис. 1.

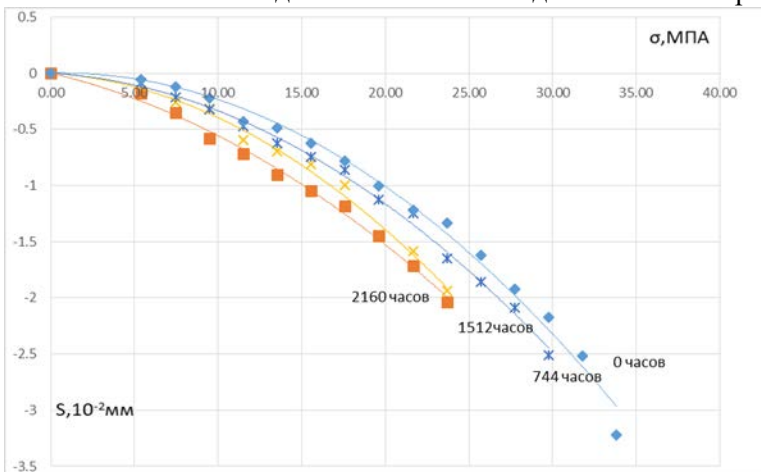


Рис. 1. Зависимость деформации от напряжения образцов со стеклопластиковой арматурой после выдержки в 5% растворе солёной воды

Из рисунка видно, что после 90 дней воздействия агрессивной среды прочность образцов со стеклопластиковой арматурой снизилась менее чем на 10%.

В связи с этим можно сделать вывод, что эффективность использования стеклопластиковой арматуры в приморской зоне будет более высокой.

СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ярцев В.П., Кохистани Самиулла, Аль-Шиблави Карам
ТГТУ, г. Тамбов, Россия

Композитные материалы обладают исключительными физико-механическими характеристиками (высокой прочностью на растяжение и сжатие и модулем упругости, близким к модулю упругости стали) и стойкостью в различных агрессивных средах, что является неоспоримым преимуществом перед классической металлической арматурой.

Относительно высокий модуль упругости стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры предопределяет целесообразность использования её как для предварительно напряжённых конструкций, так и для различного рода ремонтных работ, для усиления железобетонных конструкций, полностью или частично потерявших несущую способность в процессе эксплуатации.

Существенным преимуществом стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры является её коррозионная стойкость, практически по отношению ко всем типам агрессивных воздействий, в том числе и к агрессивному влиянию блуждающих токов.

Испытания на срез проводили на прессе ИП-500 для стеклопластиковой, базальтопластиковой и металлической арматуры в условиях циклических температурновлажностных воздействий и жидкой агрессивной среды (солёная вода различной концентрации)

Полученные экспериментальные результаты показали, что механические свойства стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры заметно падают при замораживании – оттаивании и термостарении, стабильны после замачивания – высушивания и длительном воздействии жидкой агрессивной среды (солёной 5% воды).

Для металлической арматуры все указанные виды воздействия оказывают негативное влияние на её несущую способность, что по – видимому, связано с коррозионной стойкостью. Следовательно, полимерная арматура более предпочтительная для бетонных изделий, работающих в коррозионной среде.

ВЛИЯНИЕ АСБСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫХ БЕТОНОВ

Ярцев В.П., Репина Е.И., Фидоренко Я.И., МождЗахерБехруз
ГГТУ, г. Тамбов, Россия

Вопросам утилизации асбестоцементных отходов в настоящее время уделяется большое внимание, что объясняется, прежде всего, нехваткой практически повсеместно сырьевых ресурсов и их удорожанием. В то же время асбестоцементные отходы в своем составе имеют компоненты, пригодные для получения на их основе строительных материала-

лов разлічнага прызначэння. Праблема утылізацыі асбестоцементных адходаў (АЦО) актуальна і таму, што з яе рашэннем змяншаецца забруджванне асяродка.

Па даным асбестоцементнай прамысловасці, колькасць сухіх адходаў (брак і бой асбестоцементных вырабкі, абрэзкі, стружка ад абточкі труб, пыль ад рэзкі і шліфавкі лістоў) складае 2,6-4% масы выпускаемых вырабкі. Аб'ём вільгнутых адходаў, якія з'яўляюцца асядком сточных вод, у перасчете на сухое рэчыва дасягае 1,5-2% масы сыравіны. Гэта абязвае нас, як можна хутчэй, перагледзець нашы прыёмы кіравання адходамі.

Целью працы з'яўляецца разробка складовых і тэхналогіі прыгатавання цементна-пясчаных бетонаў з выкарыстаннем у якасці напыннеля утылізаваных асбестоцементных адходаў.

Ісходзя з гэтага, у праце былі поставлены наступныя задачы:

- падбор аптымальнага складу бетона з выкарыстаннем напыннеля з сухіх асбестоцементных адходаў;
- вызначэнне фізіка-механічных параметраў разробанага бетона;
- даследаванне ўплыву зернавага складу напыннеля на фізіка-механічныя ўласцівасці кампазіта;
- даследаванне ўплыву атмасферных ўздзейнняў на работаспабнасць напынненага бетона;
- даследаванне заканамернасцей разбурэння бетона пры доўгым папяречным згібе ў шырокім дыяпазоне напружанняў і тэмператур.

Выводы:

- разробаны бетоны з выкарыстаннем асбестоцементных адходаў;
- разробан спосаб прымянення адходаў асбестоцемента пры вытворчасці бетонаў;
- вызначаны маркі морозастойкасці напынненых бетонаў;
- прапанаваны механізм ўзаемадзейння часціц асбестоцемента з вязучым;
- атрыманы велічыны фізічных канстант, якія дазваляюць прагназаванне асноўных параметраў работаспабнасці асбестоцементна напынненых бетонаў.

ВЛИЯНИЕ ФОСФОГИПСА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНЫХ БЕТОНОВ

Ярцев В.П., Репина Е.И., Хворов П.В.
ТГТУ, г. Тамбов, Россия

Одним из возможных путей снижения материальных и энергетических затрат в строительстве является замена традиционных материалов на альтернативные получаемые с использованием многотоннажных отходов промышленности. Находящиеся в отвалах отходы производства и строительный мусор в большей своей части пригодны для повторного использования в качестве активных или пассивных добавок в новые композитные материалы, в частности в бетон.

Фосфогипс - один из многотоннажных отходов химической промышленности Тамбовской области. Он образуется при производстве фосфорной кислоты из апатитовых или фосфоритовых концентратов (руд). Производство одной тонны фосфорной кислоты приводит к получению 4,5-5,5 т фосфогипса, а утилизация его ничтожно мала. Накопленные запасы отходов в России превысили 200 миллионов тонн, ежегодно они увеличиваются более чем на 10 миллионов тонн.

В Тамбовской области отвалы фосфогипса ОАО «Уваровский химический завод» (г. Уварово) занимают площадь более 7 км².

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью утилизации накопленных фосфогипсовых отходов и разработки новых эффективных бетонных композитных материалов из многотоннажных отходов с возможностью прогнозирования их работоспособности в реальных условиях.

Целью работы является разработка композитного материала на цементном вяжущем с использованием в качестве заполнителя фосфорсодержащих (фосфогипсовых) отходов производства минеральных удобрений и исследования эксплуатационных свойств полученного материала.

Выводы:

1. Показана возможность использования (утилизации) фосфогипсовых отходов в производстве строительных материалов. Разработаны составы и технология изготовления композитного материала на цементном вяжущем с использованием в качестве заполнителя фосфорсодержащих (фосфогипсовых) отходов производства минеральных удобрений.

2. Изучено влияние состава композита на прочность и долговечность, влияние атмосферных воздействий на прочностные свойства композита.

3. Полученные материалы исследованы с позиций термофлуктуационной концепции механического поведения твёрдых тел, показана возможность прогнозирования работоспособности материала в заданных условиях эксплуатации.

4. В результате проведённых экспериментальных исследований выбран оптимальный состав бетонных композитов из фосфорсодержащих отходов, изучено влияние состава и внешних эксплуатационных факторов на прочность и долговечность бетонного композита.

5. Описаны закономерности разрушения и деформирования композита в широком диапазоне температур, способ учёта атмосферных воздействий на прочность и долговечность бетонных композитов.

СОДЕРЖАНИЕ

Айгумов М.М., Клевцевич Р.А.

Технология ограждения стен котлованов
с использованием буронабивных свай 5

Айгумов М.М., Магомедов Г.Г.

Причины сверхнормативных осадок жилого здания,
построенного на просадочных грунтах 7

Анпилов С.М., Гарибов Р.Б.

Легкие стальные тонкостенные конструкции:
опыт и перспективы применения 9

Барченкова Н.А., Сафронов В.С. Калгин А.Ю.

Анализ прочности длительно эксплуатируемого одноэтажного здания
и рекомендации по его усилению 12

Баширзаде С.Р.

Влияние землетрясений на трубопроводные конструкции 15

Башкатов А.В., Теличко В.Г.

Определение НДС композитных железобетонных плит
с учётом кинетики агрессивных сред 17

Белов В.В., Смирнов М.А.

Модифицированные сухие строительные смеси
оптимальной гранулометрии 20

Божко Ю.А.

Зависимость прочности облицовочного кирпича
от степени уплотнения 22

Вотрин Д.А.

О водородном показателе конструкционного фибропенобетона 24

Гарибов Р.Б.

Определение коэффициентов модели для бетона
при разных уровнях облучения 27

Гасанов Ш.Г.

Зарождение трещины в покрытии на упругом основании 31

Гриднев С.Ю., Подлесных И.С.

Влияние солнечной радиации на сохранность верхнего слоя
дорожной одежды сталежелезобетонного пролётного строения 34

Гриднев С.Ю., Подлесных И.С.

Распределение температуры по высоте поперечного сечения
сталежелезобетонного пролётного строения автодорожного моста... 36

Данилов В.М.

Технология литьевого метода производства органического стекла ... 39

Деягин М.Ю., Батырев К.Г., Теличко В.Г.

Различные подходы к расчёту стеклопластиковых труб
GPP DN 1800 PN1 SN2500 при подземной прокладке..... 41

Дорожкина Е.А.

Дефекты, возникающие при эксплуатации озеленённых крыш 42

Журин Е.А.

Деформирование прямоугольных пластин средней толщины
из ортотропных разносопротивляющихся материалов
при малых прогибах..... 43

Закирова О.А.

К расчёту нелинейно-деформируемых пластинок
неклассического очертания 47

Захаренко А.А., Ращепкина С.А.

Структурные системы в современных зданиях 50

Зиборов Л.А., Теличко В.Г.

Исследование прочности при сжатии с растяжением бетона В35 54

Зобкова Н.В., Горелкин В.Д., Иванов И.И.

Повышение энергоэффективности существующих зданий 55

<i>Зобкова Н.В., Усенин С.В., Гриняев А.Д.</i> Организация обследования производственного здания в условиях действующего предприятия.....	57
<i>Золотов Н.В., Теличко В.Г.</i> Расчёт НДС многоэтажного железобетонного здания с учётом разносопротивляемости и трещинообразования	58
<i>Калякин А.М., Нанаджанов Д.Р., Зивьев Д.Е., Нерсисян Э.А.</i> К выбору параметров моделирования приземного слоя в аэродинамической трубе	62
<i>Калякин А.М., Чеснокова Е.В., Сауткина Т.Н.</i> Некоторые вопросы моделирования ветрового воздействия в аэродинамической трубе	66
<i>Клепиков А.С., Зимнухов А.Н., Ярцев В.П.</i> Влияние пропитки герметиком на прочность при сжатии и изгибе асфальтобетона	70
<i>Козырева Л. В., Биринова А.А.</i> Защита мостов от ледовой нагрузки.....	71
<i>Козырева Л. В., Козлова Е.В.</i> Композитные материалы в мостостроении	72
<i>Козырева Л.В., Кравцов С.О.</i> Монорельсовые эстакады в крупных городах России	73
<i>Козырева Л.В., Никитин Н.</i> Выбор прогиба пролётного строения при продольной нагрузке.....	74
<i>Козырева Л.В., Перов М.М.</i> Надёжность железобетонных мостовых сооружений.....	76
<i>Козырева Л.В., Харитонов В.И.</i> Мониторинг при строительстве мостовых сооружений.....	77
<i>Кокодеев А.В., Овчинников И.Г.</i> Человеческий фактор и его взаимосвязь с разрушениями мостовых сооружений.....	79

<i>Костиков И.Е., Кузнецов Е.Е., Матченко И.Н., Матченко Н.М.</i> О границах применения квадратичного условия пластичности Мизеса к описанию пластических свойств анизотропии листовых прокатных материалов.....	80
<i>Котляр В.Д., Явруян Х.С., Гайшун Е.С.</i> Отсевы дробления терриконигов восточного Донбасса как сырьё для производства строительной керамики	82
<i>Кузнецова В.О.</i> Математическая постановка задачи моделирования влияния	85
<i>Куриен Н.С., Журавлев Г.М.</i> Постановка задачи математического моделирования взрывостойкости и гарантированного разрушения пластин взрывом	90
<i>Лазарева Я.В., Котляр А.В. Орлова М.Е.</i> Дообжиговые свойства аргиллитов как сырья для производства керамической черепицы	92
<i>Леонов В.М.</i> Анализ характеристик НДС при неосесимметричном деформировании цилиндрических заготовок.....	95
<i>Мир-Салим-заде М.В.</i> Частичное закрытие трещин со связями в подкреплённой пластине с отверстием	99
<i>Муртазин М.Р., Муртазина Г.Р., Акчурин Д.Г.</i> Критерии работы двутавровой балки, усиленной композитными материалами на основе углеродного волокна, при переходе из области плоского изгиба в задачу устойчивости	101
<i>Муртазин М.Р., Муртазина Г.Р., Иноземцев В.К., Акчурин Д.Г.</i> Оценка действия горизонтальных нагрузок при экспериментально- теоретическом моделировании высотного объекта	104
<i>Мухин А.А., Максимова А.А., Ярцев В.П.</i> Влияние атмосферных воздействий на структуру экструзионного пенополистирола	106

<i>Наумов А.А.</i> Использование топливосодержащих отходов в производстве керамического кирпича.....	107
<i>Овчаренко А.Ю., Тутьшкин Н.Д.</i> Основные уравнения и определяющие соотношения пластической деформации конструкционных металлических материалов с учётом структурной повреждаемости мезодефектами	108
<i>Охлопков Н.Л., Березин В.А.</i> Устойчивость тонкостенных стержней открытого профиля при упругопластических деформациях.....	112
<i>Панькин С.С.</i> Предложения по утеплению фасадов зданий.....	113
<i>Пикалов А.А.</i> Контроль НДС трубопроводных конструкций	114
<i>Сергеева С.Б., Трещёв А.А.</i> Математическая модель деформирования титановых сплавов в условиях воздействия водородосодержащей среды и температурного поля	118
<i>Симоненко П.С., Петров В.И.</i> Экспериментальная оценка физических свойств опоки «Журавского» месторождения, как заполнителя для изготовления ячеистых бетонов.....	120
<i>Скоба В.А.</i> Использование армированных волокном полимерных композитных материалов в мостостроении	122
<i>Спаская М.В., Трещёв А.А.</i> Влияние разносопротивляемости материала и температурного воздействия на НДС пологой сферической ортотропной оболочки.....	127

<i>Толпашева Д.Р., Артамонова Е.Н.</i> К расчёту длительной прочности элементов из вязкоупругих материалов.....	127
<i>Трещёв А.А.</i> О квазилинейных определяющих соотношениях для изотропных материалов	132
<i>Трещёв А.А., Владимиров В.В.</i> Влияние наводороживания на НДС цилиндрической оболочки из титанового сплава	143
<i>Трещёв А.А., Деягин М.Ю.</i> К решению связанной задачи термомеханического деформирования оболочек, выполненных из материалов, механические характеристики которых зависят от вида напряжённого состояния	146
<i>Трещёв А.А., Монастырев Ю.А., Чибрикина В.Д.</i> Квазилинейный потенциал деформаций для ортотропных материалов, механические характеристики которых зависят от вида напряжённого состояния	154
<i>Трещёв А.А., Чигинский Д.С., Ходорович П.Ю.</i> К расчёту предварительно напряжённых плит, заполненных керамзитобетонными блоками, армированных канатами класса К7	162
<i>Трофимов В.И., Синявский А.С., Громов В.В.</i> К вопросу улучшения структурно-механических свойств цементобетонного покрытия дорог	163
<i>Трофимов В.И., Смородинова В.А., Савельева А.С., Порываева А.В.</i> К вопросу повышения эффективности технологии изготовления многopустотных межэтажных перекрытий	166
<i>Уруев В.М., Барковская С.В.</i> Исследование водостойкого вяжущего вещества на основе строительного гипса	168

<i>Уруев В.М., Барковская С.В.</i> Мелкозернистые бетоны на основе комплексных добавок.....	171
<i>Фёдоров В.Н., Зубчанинов В.Г.</i> Постулат изотропии и принцип запаздывания при упругопластическом деформировании стали 45 по ломаным плоским траекториям	174
<i>Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Косов Д.А.</i> Расчёт системы из двух сопряженных оболочек	176
<i>Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Растрепин В.Ю.</i> Расчёт замкнутой цилиндрической оболочки при действии нагрузки, сосредоточенной вдоль образующей	179
<i>Юсупова А.А., Бараева Л.Р., Ахметова Р.Т., Хаиринов А.И.</i> Материал строительного назначения на основе серы и сульфидсодержащего промышленного отхода.....	181
<i>Ярцев В.П., Гаттасс Салех В.С., Альджабуби Д.З.</i> О коррозионной стойкости стеклопластиковой арматуры в бетоне.....	185
<i>Ярцев В.П., Кохистани Самиулла, Аль-Шиблави Карам</i> Сравнение механических характеристик полимерной и металлической арматуры в различных условиях эксплуатации.....	186
<i>Ярцев В.П., Ретина Е.И., Фидоренко Я.И., МохдЗахерБехруз</i> Влияние асбосодержащих отходов на эксплуатационные свойства цементно-песчаных бетонов.....	187
<i>Ярцев В.П., Ретина Е.И., Хворов П.В.</i> Влияние фосфогипса на эксплуатационные свойства цементно-песчаных бетонов.....	189

Научное издание

Сборник материалов XIX Международной
научно-технической конференции
«Актуальные проблемы строительства,
строительной индустрии и промышленности»
(28-29 июня 2018 г.)

Авторское редактирование

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать 02.07.2018

Формат бумаги 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная

Усл. печ. л 11,5. Уч.-изд. л. 9,9

Тираж 500 экз. Заказ № 094

Тульский государственный университет

300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, Пр. Ленина, 95