

## Abstracts

---

*Камончайванич К., Кубояма К., Огизава Т.* Конечноэлементный анализ и экспериментальное исследование прочности при изгибе керамической плитки с двусторонним покрытием полимочевиной // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 5–13.

Изучена возможность улучшения механических свойств керамической плитки путем нанесения покрытия из полимочевины. Использовано покрытие из полимочевины без растворителя. Влияние стороны нанесения покрытия на керамическую основу и толщины пленки на механические свойства исследовано при испытаниях на трехточечный изгиб. Прочность при изгибе керамической плитки с покрытием на нижней стороне существенно лучше (на 25...30%) по сравнению с таковой покрытия, нанесенного на ее лицевую поверхность. Выполнен анализ распределения напряжений в основе с помощью метода конечных элементов и проведено обсуждение механизма улучшения механических свойств. Как показал конечноэлементный анализ, покрытие из полимочевины, нанесенное на нижнюю сторону, обеспечивает более высокую эффективность в отношении распределения напряжений. Напряжения в керамической плитке с покрытием на нижней стороне распределены более равномерно за счет амортизирующего эффекта опор. Механизм действия покрытия из полимочевины оценивали экспериментально и с помощью конечноэлементного анализа. Установлено, что распределение напряжений, достигаемое при нанесении покрытия, имеет важное значение для повышения прочности основы при изгибе.

*Йе К. Ф., Оган Х., Ким К. В.* Анализ отклонений напряженно-деформированного состояния в пространстве комбинаций при оценке состояния бетонной коробчатой балки // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 14–21.

Концепция пространства комбинаций возникла из теории подпространства и комбинаторики. Пространство комбинаций может рассматриваться перестраиванием как пространства, так и подпространства. Предложен ряд новых аналитических методов, основанных на принципах комбинации применительно к некоторым операциям. В условиях нарастающего повреждения конструкции с помощью исходных данных нельзя адекватно охарактеризовать непрерывно изменяющийся процесс и предотвратить значительное повреждение на ранних стадиях или потери устойчивости к опасному повреждению. Поэтому такие данные подлежат дальнейшей обработке для установления новых критериев и факторов оценки повреждения. С использованием пространства комбинаций были экспериментально установлены три метода оценки. Для оценки повреждения и его предотвращения предложен ряд факторов, которые в случае применения метода пространства комбинаций позволяют выявлять структурные изменения на более ранних стадиях, чем при использовании пространства исходных данных. При несоответствии между различными условиями и исходным состоянием этот метод может способствовать восстановлению конструкции, предотвращая тем самым ее разрушение.

*Алисджабана С., Сафрилах, Путра Дж. К., Асми А., Алисджабана И., Кирю С., Ган Б. С.* Динамическая реакция мостовых плит на положительные и отрицательные фазы нагрузки Фридендера // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 22–30.

Выполнен анализ динамической реакции мостовых плит на локализованную нагрузку Фридендера на базе трехпараметрической модели основы с учетом инерции грунта. Мостовая плита представлена тонкой ортотропной пластиной конечной размерности, которая может вращаться и передавать деформацию по контуру. Грунтовое основание описывают с помощью модели основания Пастернака с учетом показателя инерции грунта, локализованную динамическую нагрузку моделируют в виде убывающей функции Фридендера с учетом положительной и отрицательной фаз при временном распределении, описываемым дельта-функцией. Основное уравнение задачи решают с помощью модифицированного метода Болотина для определения собственных частот и индексов мод системы. Программа “Математика” использована для определения собственных частот системы с помощью трансцендентных уравнений. Приведены результаты анализа ряда параметров, относящихся к динамической реакции пластин на локализованную динамическую нагрузку, включающую положительную и отрицатель-

ную фазы. Выполнено численное моделирование воздействия нагрузки Фридендера при введении отрицательной фазы на реакцию мостовой плиты.

*Жанг К. К., Янг К. Х., Гао Х.* Моделирование вызванного пористостью разрушения бетонной балки неоднородной структуры при трехточечном изгибе с помощью расширенного метода конечных элементов // *Проблеми міцності.* – 2018. – No. 5. – С. 31–44.

Моделирование вызванных пористостью зарождения и распространения трещины в бетонных балках неоднородной структуры при трехточечном изгибе выполнено с помощью расширенного метода конечных элементов и закона линейного разупрочнения. Проведен ряд операций численного моделирования, проверенных экспериментально. Установлено, что трещина всегда зарождается на нижней грани балки в точке, ближайшей к поре, прорастая сквозь нее. Если пора в большей степени смещена относительно среднего пролета балки, последняя проявляет более высокое сопротивление разрушению и диссипацию энергии, затрачиваемой на разрушение. По мере увеличения расстояния от поры до нижней грани балки допустимая нагрузка также возрастает, а диссипация энергии несколько изменяется. Показано, что размеры пор оказывают незначительное влияние на сопротивление бетонной балки разрушению.

*Жанг Дж., Ма Л., Жанг З. Х.* Модель упругопластического повреждения бетона при трехосном сжатии и знакопеременной циклической нагрузке // *Проблеми міцності.* – 2018. – No. 5. – Р. 45–56.

Построена модель упругопластического повреждения бетона, которая может использоваться при различных напряженных состояниях. Ранее авторами была разработана трехмерная модель упругопластического повреждения, основанная на критерии текучести Люблинера и законе течения Друкера–Прагера. Упрощенные формы двух функций налагают определенные ограничения на расчеты, выполняемые при истинном трехосном сжатии и высоком всестороннем давлении. Требуется большая точность определения поверхности текучести и потенциальной пластичной поверхности. Принят критерий текучести Менетрея–Виллама, анализируемый в пространстве эффективных напряжений. Методы, определяющие функции твердения и разуплотнения в терминах объемной пластической деформации, не используются в некоторых успешных трехмерных моделях, поскольку в них применяются двойное твердение и двухскалярное повреждение для описания увеличения эффективного предела текучести и снижения жесткости. Предотвращение накопления повреждений при трехосном сжатии учитывают путем сложного разложения напряжений на составляющие. Проверена надежность специфических параметров в силовой функции пластичности новой модели. Разработан и реализован итерационный алгоритм обратного отображения. Надежность предлагаемой модели подтверждена результатами численного моделирования в сравнении с имеющимися экспериментальными данными.

*Лонг Й. К., Ю К. Т.* Численное моделирование поведения бетонной балки с помощью модели анизотропного повреждения // *Проблеми міцності.* – 2018. – No. 5. – С. 57–65.

Предложена модель анизотропного повреждения для описания нелинейного поведения бетонных балок в условиях монотонного и циклического нагружения. Поведение бетона при гистерезисе ориентировочно моделируют с использованием траектории напряжения при нелинейной нагрузке/линейной перегрузке с последующей реализацией модели в программе ABAQUS. Введены линейная, билинейная, экспоненциальная функции и функция Рейнхардта деформации разуплотнения для изучения их влияния на точность расчетов. Значения характеристики нагрузка–прогиб, полученные с помощью модели повреждения, отражают нелинейное поведение бетонных балок, вызванное повреждением, результаты сравнимы с данными испытаний. Функции деформации разуплотнения существенно влияют на точность моделирования, а значения, полученные с использованием функции Рейнхардта, наилучшим образом согласуются с экспериментальными результатами. Численные данные, полученные при циклическом нагружении, соответствуют таковым, определенным экспериментально, последние характеризуют потерю жесткости бетонных балок и их поведение при гистерезисе. Установлено, что модель анизотропного повреждения может применяться для описания нелинейного поведения бетонных конструкций.

Тіан З. Г., Ан К. Й., Янг Й., Жао И. К. Анализ напряжений при динамической нагрузке композиционной электромагнитной направляющей // Проблеми міцності. – 2018. – No. 5. – С. 66–75.

Показано, что выстрел электромагнитной пушки приводит к перемещению брони по направляющей, что может вызывать выталкивание, износ, обдирание и другие процессы, которые налагают ограничения на ее применение. Свойства направляющей могут быть модифицированы путем изменения ее состава, что обеспечит хорошую удельную электропроводность, коррозионную стойкость и прочность. Для простоты композиционная направляющая представлена в виде упругой фундаментной балки, общее решение для прогиба направляющей при динамической нагрузке получают с помощью двухмерного интегрального преобразования Фурье, на его основании получают распределение изгибающего момента и выражение для напряжения при динамической нагрузке. Выполнен анализ характеристик распределения напряжений и влияющих на них факторов. Рассмотрено влияние доли композиционного слоя и его параметров на напряжение направляющей при динамической нагрузке.

Шенг Л. Й., Джиао Дж. К., Лай К. Оценка микроструктуры и механических свойств лазерного соединения нержавеющей стали и реактопласт, армированный углеродным волокном // Проблеми міцності. – 2018. – No. 5. – С. 76–88.

Выполнено соединение реактопласта и нержавеющей стали с помощью волоконного лазера. Изучено влияние технологических параметров на качество соединения. Показано, что сканирование поверхности нержавеющей стали лазерным лучом приводит к образованию зон термического влияния и проплавления. В одной зоне происходит осаждение вдоль границ иглообразного феррита, который модифицирует аустенит, а в другой феррит образует скелетную структуру и выделяет аустенит в сетчатую микроструктуру. Лазерное соединение улучшает микроструктуру обеих зон. С увеличением скорости и мощности сканирующего луча сопротивление сдвигу соединения нержавеющей стали и реактопласт сначала возрастает, затем снижается. Малая скорость сканирования или высокая мощность лазерного луча могут вызывать перегрев полифениленсульфида и приводить к его разложению. Эти факторы могут также снижать теплопередачу и вызывать его полное плавление. Соединение нержавеющей стали и реактопласт достигает максимального сопротивления сдвигу при скорости сканирования 4-5 мм/с и мощности лазерного луча 320...350 Вт.

Ванг К. Р., Йин Б. Й., Луо В. Б. Анализ усталостного повреждения битумной смеси с использованием псевдожесткости // Проблеми міцності. – 2018. – No. 5. – С. 89–97.

Выполнен анализ характеристик усталостного повреждения битумной смеси. Построена новая модель усталостного повреждения на основании псевдопараметрической теории Шапери и механики повреждения сплошных сред. В соответствии с теорией Шапери и обобщенным принципом соответствия между упругими и вязкоупругими деформациями экспериментальные кривые напряжение–деформация для битумной смеси преобразуются в кривые напряжение–псевдодеформация. Показано, что последняя линейна, что устраняет вязкоупругий эффект гистерезиса битумной смеси и его временную зависимость. Псевдожесткость постепенно уменьшается с увеличением числа циклов нагружения. Параметр повреждения определяется изменением псевдожесткости. Параметры модели усталостного повреждения верифицировали с помощью испытаний на сопротивление усталости (до 1000 циклов), а усталостное повреждение для 2000 циклов прогнозировали и сравнивали с результатами испытаний, которые хорошо согласуются между собой.

Ван Ж., Сонг К. К., Гао В. С. Упруглопластическая модель песка при сложном нагружении // Проблеми міцності. – 2018. – No. 5. – С. 98–106.

Принцип унифицированной модели уплотнения для переуплотненной глины использован при построении циклической модели песка, которая учитывает зависимость напряжение–деформация и закон ротационного уплотнения. Поведение крупнозернистого песка при дроблении под действием высокого давления описывают уравнения для линии нормального уплотнения и линии критического состояния в  $e - \ln p$  пространстве. В уравнениях использована степенная

функция. Модель обладает следующими характеристиками: уравнения для нормальной линии и критического состояния уточнены в  $e - \ln p$  пространстве; потенциальная прочность определена с помощью степенного параметра линии Хворслева; циклическое поведение песка описывают с помощью законов развития реальной поверхности текучести и ротационного уплотнения; обобщенная циклическая модель реализована посредством метода преобразованного напряжения на основании критерия пространственно-подвижной плоскости. Результаты моделирования показывают адекватность поведения крупнозернистого песка при измельчении и циклической нагрузке.

*Луо В. Б., Лю Ю. П., Ян Б. Й., Лай Й., Лю К.* Ускоренная оценка срока службы до разрушения при ползучести трубы PE100 под давлением на основе медленного усталостного роста трещин // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 107–114.

Полиэтиленовые трубы широко применяются в водоснабжении, системах газоснабжения и канализации благодаря их высоким механическим свойствам. Медленный рост трещин является основным механизмом разрушения полиэтиленовых труб под длительным внутренним давлением. Рассматривая нагружение при ползучести как особый случай усталостного нагружения, кинетика медленного роста трещин в полиэтиленовом материале определяется путем испытаний на усталостное разрушение при различных коэффициентах асимметрии цикла напряжений и экстраполируется на кинетику трещин ползучести. Исходя из теории линейно-упругой механики разрушения долговечность при ползучести полиэтиленовой трубы под давлением, подверженной действию различных окружных напряжений, прогнозируется на основе синтетической кривой роста трещин ползучести, и прогнозы хорошо согласуются со стандартной экстраполяцией в соответствии с ISO 9080.

*Йимит М., Най Л., Ду Й., Бкан Р.* Механические свойства и характеристики старения композитов из полипропилена и стирол-бутадиен-стирола в условиях наружного и внутреннего использования // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 115–126.

Полипропиленовые и стирол-бутадиен-стирольные смеси с различными массовыми фракциями изготавливали из расплавов с использованием двухшнекового экструдера. Влияние содержания стирол-бутадиен-стирола на микроструктуру и свойства указанных смесей оценивалось путем изучения морфологии и механических свойств образцов, подвергнутых старению во внешней среде, с использованием дифференциального сканирующего калориметра, универсального испытательного стенда и капиллярного реометра, а также методов рентгеновской дифракции и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Результаты исследований показали, что наилучшая долговечность композитов достигается при 20%-ной доле стирол-бутадиен-стирола. Низкотемпературный тест в сочетании с динамическим термическим анализом показал, что добавление стирол-бутадиен-стирола существенно улучшает низкотемпературную хрупкость полипропилена. XRD-тесты свидетельствуют, что стирол-бутадиен-стирол может способствовать образованию  $\beta$ -кристаллов в полипропилене. Испытания на открытом воздухе и в помещении подтвердили, что наиболее высокими характеристиками сопротивления старению обладают образцы с 30%-ной долей стирол-бутадиен-стирола.

*Ванг Й. К., Ченг П., Люо К. С., Бао Й. Дж., Гао Х.* Исследование однослойной пластины из плоского тканого композита с трещинами: характер разрушения и анализ повреждений // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 127–134.

Проведены экспериментальные исследования и численные расчеты для изучения распространения трещин плоского тканого композита. Благодаря испытанию на распространение трещин в однослойной композитной пластине можно непосредственно наблюдать процесс распространения трещин. Анализ поверхностей разрушенных образцов позволяет установить траекторию распространения трещин, характер разрушения и механизмы повреждения. Согласно кривой нагрузка–перемещение, процесс распространения трещин разделяется на три стадии. Для исследования интенсивности напряжений в вершине трещины образцов определяется критический коэффициент интенсивности напряжений путем численных расчетов. Полученные результаты демонстрируют хорошее соответствие расчетных данных с экспериментальными.

*Шен Л. Л., Шен З. Б., Куи Х. Р., Лай Х. Й., Жи С. Дж.* Влияние зоны межфазного перехода на основные механические свойства композитного твердого ракетного топлива // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 135–146.

Определение основных механических характеристик играет важную роль в разработке и применении композитного твердого ракетного топлива. Предложен численный метод, получивший название “трехфазный метод конечных элементов ячейки Вороного”, для оценки влияния зоны межфазного перехода. Численные результаты показывают, что эффективный модуль можно улучшить, увеличив толщину зоны межфазного перехода. Модуль композита с неоднородной зоной межфазного перехода выше такового с однородной зоной межфазного перехода. Рассчитано влияние различных зон межфазного перехода на объемные доли и модули матрицы. Для анализа характеристических свойств других трехфазных композитов также можно использовать трехфазный метод конечных элементов ячейки Вороного.

*Лай С., Жанг К. Д., Люо Дж. Й.* Процесс деформации и диффузии композитов на основе нержавеющей и углеродистой сталей вблизи межфазной границы в процессе деформационного соединения // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 147–152.

Композиты на основе нержавеющей и углеродистой сталей получали при различных температурах с использованием цилиндрических образцов и образцов, подверженных поверхностной обработке. Исследовали совместную деформацию и диффузию материалов вблизи межфазной границы с помощью растровой электронной микроскопии и ультразвукового С-сканирования. Результаты показывают, что различие в удлинении двух металлов приводит к разрыву вблизи межфазной границы в процессе деформационного соединения. Трещины в основном располагаются в легкой растяжимой подложке и более резко выражены при низкой температуре деформации. С увеличением температуры деформации качество соединения значительно повышается, но толщина диффузионного слоя в основном одинакова. Качество соединения композитов можно улучшить путем поверхностной механической обработки при нормальной температуре деформации.

*Шенг Л. Й., Ванг Ф. Й., Ванг К., Джао Дж. К.* Оптимизация сдвиговой прочности лазерного соединения термопласта на основе полифениленсульфида, армированного углеродным волокном, и нержавеющей стали // Проблемы міцності. – 2018. – No. 5. – С. 153–160.

Исследовано соединение термопласта, армированного углеродным волокном, и нержавеющей стали с помощью волоконного лазера с добавкой полифениленсульфида и без. Изучены микроструктура полифениленсульфида, морфология поверхности раздела и сдвиговая прочность. Результаты показывают, что лазерное соединение изменяет микроструктуру нержавеющей стали и приводит к образованию зоны термического влияния и зоны плавления, которые содержат кружевной феррит и скелетный феррит соответственно. Без добавки полифениленсульфида термопласт может перегреваться и разлагаться в процессе лазерного соединения, что отрицательно влияет на межповерхностное сцепление. Введение добавки полифениленсульфида может способствовать коалесценции термопласта и нержавеющей стали, однако ее количество должно быть соответствующим. Меньшее количество добавки не может заполнить зазор между нержавеющей сталью и термопластом, однако большее ее количество необходимо тщательно плавить, что не обеспечит соединение с оптимальной сдвиговой прочностью. Установлено, что оптимальная толщина добавки полифениленсульфида составляет 300 мкм, что увеличивает сдвиговую прочность соединения нержавеющей стали и термопласта, армированного углеродным волокном, до 15,1 МПа.