

## Рефераты

---

*Хе Ж., Лин Дж.-Х., Сун Кс. Ю., Гу Кс.* Численное моделирование влияния отношения давлений на входе и выходе на коэффициент теплопередачи в ступени аэротурбины // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 5–15.

На основе разработанных методов оценки теплопередачи газовой ступени турбины предложена теоретическая модель двухмерной ступени аэротурбины, в которой газ течет мимо контура лопасти турбины. Поля скоростей, температур и давлений, а также распределение коэффициента теплопередачи вдоль поверхностей давления и разрежения, передней и задней кромок лопасти турбины рассчитывались с помощью программы FLUENT при разном отношении давлений. Это позволило исследовать эволюцию коэффициента теплопередачи при различном отношении давлений в одинаковом положении и при одинаковом отношении давлений в различных положениях.

*Чанг Ж.-Л., Жао В.-Л., Зоу Г.-П., Сун Х.-К.* Пропорциональное моделирование оптимизации легковесной брони из композита керамика/алюминиевый сплав // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 16–23.

Конструкция легковесной брони из композита керамика/алюминиевый сплав рассматривается и оптимизируется для улучшения защитных характеристик. Процесс проникновения в броню моделируется с использованием программы SPH программного обеспечения ANSYS/AUTODYN. Точность метода сглаженных частиц (метод SPH) была подтверждена путем сравнения полученных данных с известными. Рассматривались три типа композитной брони общей толщины 30, 40, 50 мм и с пятью различными отношениями толщина керамики/толщина металла при моделировании остаточной скорости пули и конечной длины. Результаты моделирования сравниваются с теоретической моделью. Лучшие пулезащитные характеристики трех типов брони из керамического композита были получены при отношении толщина керамики/толщина алюминия в композитной броне 4:1.

*Гуо А. Ф., Ли Дж. Ф., Ли Ф. Й., Ксу Дж., Жанг Ч. В., Чен Ш.* Свойства при сжатии композитов на основе термопластичного крахмала с различными пластификаторами // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 24–31.

Композиты на основе термопластичного крахмала оказались в центре внимания как отечественных, так и зарубежных ученых, так как они основаны на экологичном сырье и полностью разлагаются. Такие композиты получали формовкой с использованием крахмала и сизалевых волокон в качестве основных материалов. Изучено влияние термопластичного крахмала с различной долей простых и составных пластификаторов на амортизационные свойства композитов. Экспериментальные результаты показали, что в определенных пределах с увеличением содержания пластификаторов повышается сопротивление материала давлению и его амортизационные характеристики. При содержании составного пластификатора 15% сопротивление давлению четырех типов композитов, полученных с использованием различных массовых соотношений фомамида и мочевины, изменяется в ряду  $2:1 > 1:1 > 1:2$ , а с использованием различных массовых соотношений глицерина и этиленгликоля – в последовательности  $1:2 > 2:1 > 1:1$ . Композиты на основе крахмала, содержащие составной пластификатор, являются нерегулярными эластомерами, и зависимость между напряжением и деформацией описывается в первую очередь функцией гиперболической тангенсоиды и во вторую очередь функцией тангенсоиды.

*Чен Ж., Ли Дж. Кс., Лин Ж. Г., Кви Дж. Дж., Сун Л., Ванг Г. Д.* Технологические и промышленные масштабные исследования горячекатаного листа, плакированного нержавеющей сталью/углеродистой сталью // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 32–38.

Проведено промышленное испытание листа, плакированного нержавеющей сталью 304 с обычной углеродистой сталью Q345B, с использованием линии горячей прокатки группы Hesteel. После двух этапов опытного производства было установлено, что основные техни-

ческие показатели производства листа удовлетворяют требованиям GB/T 8165–2008. Прочность при сдвиге на поверхности раздела плакированного листа превышала 360 МПа, предел текучести конечного продукта превышал 257 МПа, прочность при растяжении испытуемого материала превышала 351 МПа, а удлинение плакированного листа превышало 39,8%. Показано, что степень амальгамации слоя нержавеющей стали и нелегированной углеродистой стали была высокой, а поверхность раздела композита ровной и совершенной. Свойства при растяжении и сдвиге плакированных нержавеющей сталью листов, изготовленных с помощью процесса взрывной прокатки, соответствовали таковым, изготовленным путем взрывного процесса. Однако эффективность процесса взрывной прокатки существенно выше, чем взрывного процесса, при этом производственные затраты были гораздо меньше.

*Ксу Л., Дай Г. З.* Анализ усталости толкателя из алюминиевого сплава на основе ускоренного испытания на долговечность и моделирования на конечноэлементной модели // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 39–47.

Спектр усталостного нагружения при ускоренном испытании на долговечность использован как при численном моделировании, так и при стендовых испытаниях толкателя. Симметричный спектр толкателя был упрощен как положительный спектр пульсирующей нагрузки согласно спектру напряжений критического узла в конечноэлементной модели. Результаты анализа, полученные с помощью модели, свидетельствуют о том, что усталостная трещина зарождается на краю точечного отверстия в первом положении с максимальным напряжением и минимальной усталостной долговечностью. Согласно стендовым испытаниям зарождение усталостных трещин и усталостная долговечность толкателя хорошо согласуются с результатами анализа на конечноэлементной модели.

*Гуан Б., Занг Й., Янг Ф., Янг Кс. Й., Квин К.* Модель термомеханической связи листа, плакированного нержавеющей сталью, при термообработке // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 48–64.

Быстрое и точное прогнозирование внутреннего напряжения и кривизны деформации листов, плакированных нержавеющей сталью, при термообработке остается актуальной проблемой в этой области исследования. Рассматривается модель термомеханической связи листа, основанная на инженерной теории упругих и пластических деформаций. Для реализации эффективного численного расчета модели совместно используются метод дискретизации и разностные уравнения. Применение обобщенной конечноэлементной модели позволяет подтвердить соответствующие условия упрощения и рациональность логики численного расчета модели. Планируются и описываются эксперименты по термообработке таких плакированных листов и анализируется способность модели прогнозировать характер напряжения и деформации плакированного листа в реальном процессе термообработки. Логика расчета модели обоснована, при этом погрешность прогнозирования деформации и внутреннего давления листа составляет ~15%. Модель также имеет очень высокую вычислительную эффективность и может удовлетворять требованиям анализа в режиме он-лайн для процессов термообработки.

*Фенг Р. К., Ли Л. Л., Ли Х. Й., Ванг З. М., Жу З. Кс.* Расчет сопротивления решетки сплава  $\gamma$ -TiAl // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 65–71.

Методом отношения плотностей рассчитаны ширина дислокации и сопротивление решетки (напряжение Пайерлса). Результаты показывают, что сопротивление решетки уменьшается с увеличением ширины дислокации. Путем расчета получена зависимость между напряжением Пайерлса и дислокационным упрочнением, свидетельствующая о том, что предел текучести отрицательно коррелирует с напряжением сдвига материала. Поэтому она может дать полезную информацию для выбора соответствующего напряжения сдвига в процессе растяжения.

*Йоу Ш., Жанг Ч. Х., Ченг Кс. Х., Жу М.* Центрифужное моделирование теплового отклика стенки диафрагмы, вставленной в сухой песок // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 72–79.

Геотермальные теплообменники, встроенные в стенку диафрагмы, являются альтернативным видом использования возобновляемой энергии, которая может быть получена из неглубоких

геотермальных ресурсов. Исследован тепловой отклик стенки диафрагмы, вставленной в песочное основание, в условиях термомеханической связи путем лабораторных испытаний в центрифуге. Моделирование теплообменных трубок, встроенных в стенку диафрагмы, вставленную в песочное основание, включало поперечное нагружение стенки и осуществлялось в средах 1 и 50g в центрифуге. Испытания в условиях теплового нагружения, механической разгрузки и термомеханической связи проводились отдельно. Контролировались температура, деформация и давление грунта на стенку. Деформация и тепловое напряжение вдоль консольной стенки контролировались путем численного моделирования в каждом случае. Результаты испытаний показывают, что тепловое напряжение на стенке превышает напряжение, вызванное выемкой грунта. Максимальное тепловое напряжение наблюдалось вблизи основания стенки. Хотя стенка была связана окружающим грунтом, тепловое напряжение накапливалось в процессе нагрева в результате изменения температуры, что необходимо учитывать при конструировании теплообменника в консольной стене зданий.

*Вей Й. Х., Ванг Кс. Л., Лю Ю. П., Чен Л. Дж.* Влияние диаметров штифта на характеристики износа пар трения // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 80–86.

С целью обоснования выбора размеров пар трения проводятся трибологические испытания по оценке влияния диаметров штифта на характеристики износа путем изменения нагрузок и скорости скольжения. Пара трения представляется в виде штифтов из CuZn к кольцам из среднеуглеродистой стали (сталь 1045). Дифференциальная скорость изнашивания и формула для ее расчета определяются для выражения линейной скорости изнашивания или сопротивления износу единицы площади поперечного сечения. Исследуются влияние различного диаметра торцевой поверхности штифтов, дифференциальная скорость изнашивания и ее увеличенный множитель. Результаты показывают, что при поддержании постоянства произведения  $P \times V = 0,095$  потери при истирании образцов малого диаметра ( $d_1 = 0,6$  мм) меньше, чем образцов большого диаметра ( $d_2 = 4,0$  мм). По сравнению со скоростью скольжения изменение нагрузки более существенно влияет на характеристики износа, особенно для образцов малого диаметра. Дифференциальная скорость изнашивания образцов малого диаметра всегда больше, чем образцов большого диаметра. Увеличенный множитель дифференциальной скорости изнашивания всегда превышает увеличенный множитель повышения напряжения контактного давления, особенно для образцов малого диаметра.

*Лю Ш. Х., Ву М. К., Рао М. Дж., Ли Л. Х., Ксиао Х. Л.* Получение проводящего бетона, содержащего графитовый порошок, его свойства и микроструктура // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 87–96.

Проводящий бетон не только сохраняет преимущества обычного бетона, но и имеет высокую электропроводность; может использоваться для удаления снега и плавления льда на дорогах. Для получения такого бетона применялся вместо песка в качестве проводящего мелкого заполнителя графитовый порошок. Исследуются свойства и микроструктура бетона. Установлено, что прочность бетона уменьшается с увеличением содержания графитового порошка. Электрическое удельное сопротивление бетона уменьшается с увеличением мелкости и содержания графитового порошка; температура повышается после электризации, и бетон проявляет высокий нагревательный эффект. Графитовый порошок оказывает незначительное влияние на продукты гидратации проводящего бетона. С увеличением содержания и мелкости графитового порошка увеличивается положительный эффект заполнения графитовым порошком для формирования проводящей дорожки.

*Йин Дж. П., Ши З. Кс., Чен Дж., Чанг Б. Х., Йи Дж. Й.* Характеристика кумулятивного заряда из различных материалов на основе принципов гидродинамики гладких частиц // Проблеми міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 97–107.

Облицовочный материал – один из ключевых факторов при создании бронебойных боеприпасов, оказывающий влияние на эффективность внедрения. Работоспособность кумулятивного заряда, формируемого его облицовкой, определяется различными свойствами материала в условиях взрывной нагрузки, в частности для мишени с элементами динамической защиты, которые уменьшают проникающую способность, рассеивая кумулятивный заряд. Изучены ра-

бочие характеристики элементов кумулятивного заряда из различных материалов. Конечно-элементное программное обеспечение AUTODYN и метод гидродинамики гладких частиц используются при моделировании формирования этих элементов и их внедрении в пластины-мишени из трех материалов: Cu, ПТФЭ и ПТФЭ/Cu, что было проверено экспериментально. Показано, что кумулятивный заряд для медной облицовки формируется под действием детонационной волны, тогда как ПТФЭ и ПТФЭ/Cu материалы генерируют струю распыленных частиц. Установлено, что в головной части скорость струи частиц Cu наименьшая, глубина внедрения наибольшая, а размер отверстий наименьший, скорость струи частиц ПТФЭ наибольшая, глубина внедрения наименьшая, размер отверстий занимает среднее положение, скорость и глубина внедрения струи частиц ПТФЭ/Cu занимают среднее положение, тогда как отверстия имеют наибольший размер. Струя частиц ПТФЭ/Cu обладает более высокой эффективностью внедрения по сравнению со струей ПТФЭ, а ее проникающая способность выше, чем струи Cu.

*Лиу С. В., Джин М. Д., Ванг К. Т., Чен Б. С.* Оптимизация остаточных напряжений в покрытиях WC(Co,Ni), получаемых лазерной обработкой // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 108–114.

Изготовлена трехкомпонентная смесь порошков карбида вольфрама (WC), кобальта (Co) и никеля (Ni) для получения металлокерамических композиционных покрытий, используемых для плакирования стали 40 Ст. При исследовании покрытия подбирался состав смеси для оценки влияния соотношения ее компонентов на остаточные напряжения в плакировках. Трехкомпонентная смесь WC/Co/Ni имеет более высокие остаточные напряжения, чем двухкомпонентные смеси Co/Ni или WC/Ni, за исключением WC/Co. Однокомпонентные составы WC, Co или Ni обуславливают высокую чувствительность остаточных напряжений, трещины скорее проходят внутри частиц WC, чем вокруг них, рост трещин происходит главным образом вдоль эвтектических фаз для состава 50%Co–50%WC. Приведенная специальная модель четвертого порядка показывает отличное соответствие при подборе состава смеси, хорошо согласуются между собой прогнозируемые и экспериментальные значения остаточных напряжений в лазерных плакировках.

*Лин Х., Генг Х. П., Жанг Й. Й., Лай Х., Лиу Кс. Й., Жоу Кс. Ф., Йю Л.* Усталостная прочность и прогноз долговечности лопатки газовой турбины из суперсплава на никелевой основе MAR-M247 с множественными карбидными включениями // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 115–126.

Литье лопатки газовой турбины из суперсплава на никелевой основе MAR-M247 сопровождается образованием множественных карбидных выделений в результате затвердевания. Микроструктуру карбида изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии и энергетического спектрального анализа. Построена конечноэлементная модель лопатки со случайным карбидным выделением на основе программного обеспечения ANSYS, выполнена оценка напряженно-деформированного состояния. Условия эксплуатации лопатки реализовали на экспериментальной установке для комплексного испытания на вибрацию и растяжение, напряжения измеряли с помощью тензодатчиков, размещаемых на различных участках лопатки. Проведено сравнение эквивалентных напряжений по Мизесу, полученных при моделировании и экспериментально. Установлено, что их можно использовать для оценки усталостной долговечности лопатки на основании полученных кривых усталости и закона накопления повреждений Палмгрена–Майлера. Они служат также основой построения зависимости между объемным соотношением включений в лопатке и ее усталостной долговечностью. Данные, полученные при комнатной температуре, могут быть экстраполированы на повышенные, что обеспечивает более достоверный прогноз усталости и усталостной долговечности лопатки из суперсплава при ползучести.

*Хуанг С. Х., Ву Й., Жао З. Д., Ксиа Кс. С.* Построение и верификация определяющей модели деформирования чистой меди при повышенных температурах // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 127–136.

Изучено деформационное поведение чистой меди при испытании горячих проб на сжатие в диапазоне температур 773–1173 К и скорости деформации  $0.001–1.0 \text{ с}^{-1}$ , построены соответствующие кривые напряжения пластического течения. Разработан новый метод расчета кри-

тического напряжения и напряжения насыщения, представлен количественный анализ деформационного упрочнения и динамического разупрочнения, построена трехступенчатая определяющая модель прогнозирования напряжения пластического течения чистой меди. Как показывает сравнение прогнозируемого и измеренного напряжений пластического течения, с помощью такой модели можно точно описать горячее деформирование чистой меди при динамическом возврате и/или рекристаллизации. Выполнено численное моделирование процесса высадки путем реализации данной модели в рамках коммерческого программного обеспечения. Модель весьма перспективна и может использоваться для повышения эффективности процесса горячейковки деталей из чистой меди.

*Шенг Л. Ю., Лай Ч., Ксу З., Джиао Дж.* Влияние текстуры поверхности на лазерное соединение армированного углеродным волокном реактопласта и нержавеющей стали // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 137–145.

Реактопласт, армированный углеродным волокном, и нержавеющую сталь соединяли с помощью волоконного лазера. Изучено влияние текстуры поверхности на качество соединения. Показано, что царапание абразивной бумагой поверхности нержавеющей стали вызывает появление отдельных направленных бороздок, перемежающихся выступами. Лазерная обработка текстуры приводит к возникновению равномерно распределенных микролунок и выступов, образующих прямоугольную ячеистую структуру. Такая обработка может улучшать текучесть полифениленсульфитного расплава при лазерном соединении. Лазерное сканирование поверхности нержавеющей стали приводит к образованию зон проплавления и термического влияния. В зоне термического влияния игольчатый феррит располагается вдоль границы, тогда как в зоне проплавления он образует скелетную структуру и выделяет аустенит в ячеистую структуру. Модификация текстуры поверхности увеличивает прочность сцепления между нержавеющей сталью и полифениленсульфитом за счет расширения площади поверхности контакта вследствие образования бороздок, микролунок и выступов. Соединение нержавеющей сталь-реактопласт после лазерной обработки текстуры по сравнению с царапанием обладает более высоким сопротивлением сдвигу.

*Хер Ш.-Ч., Чу В.-Б.* Построение профиля поверхности и дефектоскопия композиционной структуры // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 146–153.

Неразрушающий метод оценки свойств материала и целостности структуры основан на ультразвуковом сканировании, сборе и обработке исходных данных, поступающих от ультразвукового датчика. Коммерческое программное обеспечение LabVLEW, разработанное National Instruments Inc., предназначено для обработки ультразвуковых изображений. Создана ультразвуковая система сканирования изображения C-scan. Система обладает функцией построения трехмерного профиля поверхности и выявления дефектов внутри композиционной структуры. Проверку достоверности методики неразрушающего контроля и оценку геометрии выполняли экспериментально на алюминиевой пластине с небольшими отверстиями и композиционной структуре с дефектом расслоения.

*Ху Кс. Л., Лиу Й. Дж., Хуанг Ч. Кс., Ванг К. Й.* Влияние деформации предварительного кручения на малоцикловую усталость конструкционной стали Q345B // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 154–162.

Изучено влияние деформации предварительного кручения на малоцикловую усталость стали Q345B. Вначале образцы скручивали на 0, 180 и 360°, затем методом осесимметричной деформации определяли малоцикловую усталость стали Q345B в диапазоне деформаций 0.3–0.8%. Получены и проанализированы характеристика циклических изменений, зависимость циклического изменения напряжения от деформации, зависимость деформация–долговечность, модель прогнозирования усталостной долговечности и сейсмостойкость при различных углах кручения. Показано, что кривая деформация – долговечность идет вниз и описывается степенной функцией. Усталостная долговечность снижается с увеличением деформации предварительного кручения при постоянном уровне последней. Характеристика циклических изменений варьировала от циклического упрочнения до циклического разупрочнения при кручении, скорость циклического упрочнения возрастала линейно с повышением амплитуды



деформации. Параметры зависимости Коффина–Мэнсона подтверждаются экспериментальными данными. После термообработки сейсмостойкость материала улучшается, при этом деформация предварительного кручения существенно снижает ее. Электронно-микроскопическое исследование усталостного разрушения выявило зарождение усталостной трещины на поверхности образца. Растущая трещина отклонялась от своего направления, пластичность материала снижалась в результате деформации предварительного кручения.

*Гу Л., Ванг Дж., Луан С. Б., Ли Кс. Ю.* Влияние коррозионной среды, содержащей сероводород, на прочность при растяжении и вязкость разрушения трубопроводной стали X80 // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 163–174.

Исследованы прочность при растяжении и вязкость разрушения трубопроводной стали X80 в среде, характерной для нефтехимических процессов. Образцы стали подвергали длительному воздействию воздуха и коррозионной среды, содержащей сероводород, а затем испытывали на растяжение и трещиностойкость при трехточечном изгибе с построением кривых напряжение–деформация и раскрытие трещины в ее вершине–длина трещины. Выполнен анализ влияния сероводородной коррозии на диаграмму роста трещины, вязкость разрушения и работу пластической деформации. Анализ результатов, полученных на образцах в исходном состоянии и подвергнутых воздействию сероводородной среды, показал, что данный фактор незначительно снижает предел прочности стали при растяжении, однако приводит к существенному удлинению, а также к уменьшению сечения образцов при разрушении и вязкости разрушения. На стадии устойчивого роста трещины раскрытие ее вершины при страгивании на воздухе составляло 0,732 мм, что более чем вдвое выше, чем в коррозионной среде (0,364 мм). При этом работа пластической деформации, необходимая для продвижения трещины на одну и ту же длину  $\Delta a$ , при воздействии воздуха в 2,29 раза выше, чем коррозионной среды. При транспортировке природного газа по трубопроводам следует избегать коррозионного воздействия сероводорода, существенно снижающего вязкость разрушения трубопроводной стали.

*Исмаил Али. А., Аль Тамими А.* Оптимизация планирования ускоренных ресурсных испытаний при постоянном напряжении с цензурированием данных с обратным распределением типа Вейбулла // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 175–186.

Предложена модель ускоренных ресурсных испытаний при постоянном напряжении с использованием данных, подвергнутых цензурированию типа II с обратным распределением Вейбулла. С помощью метода максимального правдоподобия определены параметры распределения и коэффициента ускорения. Выполнены оценка соответствующего доверительного интервала и оптимизация ускоренных ресурсных испытаний при постоянном напряжении по D-критерию оптимальности. При этом выборка части программы нагружения для ускоренных ресурсных испытаний оптимизируется таким образом, чтобы минимизировать обобщенную асимптотическую дисперсию показателей максимальной вероятности. Работоспособность предложенного подхода показана на тестовом примере.

*Рафи М. М.* Аналитический расчет адгезионных свойств железобетонных изделий с добавками повторно утилизированного бетона // Проблемы міцності. – 2019. – №. 1. – Р. 187–196.

Для железобетонных изделий выполнен аналитический расчет зависимости адгезионных напряжений на стыке стальных арматурных стержней с матрицей из переработанного бетона от величины проскальзывания между ними. При расчете использовали большой объем результатов адгезионных испытаний на растяжение концентрических образцов, полученных разными исследователями, в том числе и автором данной работы. Предложено обобщенное уравнение для описания зависимости адгезионных напряжений на стыке стальных арматурных стержней с матрицей из переработанного бетона от величины проскальзывания. При этом восходящая ветвь указанной зависимости может быть описана известным уравнением, тогда как для описания нисходящей ветви предложена модифицированная форма этого уравнения. Результаты расчета, полученные с помощью модифицированного уравнения, хорошо согласуются с экспериментальными, полученными разными авторами.