

дифференциальные уравнения могут быть линейными или нелинейными, граничные условия могут являться условиями Дирихле, Неймана, смешанными или периодическими. Уравнения и соотношения математической постановки могут описывать разнообразные физические системы, включая как прямые, так и обратные задачи механики деформируемого твёрдого тела. При этом как прямая, так и обратная задача рассматриваются в рамках одной нейросетевой модели – с помощью подхода, основанного на использовании ФИНС, обе проблемы могут быть решены «за один проход», т. е. в рамках одного цикла обучения (оптимизации). В таком контексте основная цель – «научить» нейронную сеть аппроксимировать заданные дифференциальные уравнения, начальные, граничные условия и дополнительные соотношения (в случае обратной задачи) путем определения матриц весов и векторов смещений нейронной сети, приводящих к минимизации функции потерь, которая представляет собой сумму невязок (возможно, взвешенную), включающую невязки всех уравнений, начальных и граничных условий, а также дополнительных соотношений, составляющих математическую постановку задачи. Именно построение такой специальной функции потерь, которая включает в себя полную информацию о математической модели, отличает ФИНС от других типов нейронных сетей. В то же время сама математическая модель и является «учителем» для нейронной сети. Таким образом, нет необходимости в огромных базах тренировочных и проверочных наборов данных, которые необходимы, например, для обучения нейронной сети распознаванию образов или речи. Иными словами, такая нейронная сеть «заранее знает», чему она должна обучиться.

Впоследствии физико-механические свойства материала могут быть определены путем сопоставления экспериментальных данных или аналитических решений с предполагаемым методом глубокого машинного обучения и физически информированных нейронных сетей.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-19-00217, <https://rscf.ru/project/20-19-00217>.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН С ПРЯМЫМИ И ЗЕНКОВАННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В. А. ВЕСТЯК

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Е. И. СМАГИН

ПАО «Яковлев», г. Москва, Российская Федерация

М. И. МАРТИРОСОВ

Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация

Интенсивное внедрение ортотропных материалов в различных областях промышленности показывает большой потенциал полимерных композиционных материалов (ПКМ) по показателям прочности и весовой эффективности. Применение ПКМ сопровождается исследованиями свойств материала и конструкции в местах соединений. В работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований прочности ортотропных пластин со свободным и нагруженным отверстиями. Рассмотрены различные методы испытаний для образцов, моделирующих работу конструкции с проходящей и сминающей нагрузкой, а также образцы, моделирующие совместное действие указанных выше нагрузок. Для различных методов испытаний представлены виды образцов, схемы нагружения. На образцах со свободным и нагруженным отверстиями проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) и остаточной прочности ПКМ на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна.

Для экспериментальной оценки несущей способности в ортотропных пластинах с концентраторами в виде свободных отверстий и отверстиями с зенковкой проводится статическое нагружение образцов со схожей схемой армирования. Испытания проводились в соответствии с существующими стандартами, представленными в ГОСТ 33498–2015, ГОСТ Р 56788–2015 и ГОСТ 33375–2015.

Исследование прочности образцов с прямым и зенкованным 90° отверстиями из ортотропного материала на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна с укладками монослоев из 50 % слоев по направлению 0° , 38 % слоев по направлению 45° , 13 % слоев по направлению 90° (50/38/13) позволяет оценить изменение несущей способности от разных форм концентраторов напряжений. Так, при испытании образцов на наиболее чувствительный вид нагружения – сжатие – наблюдается снижение несущей способности на 0,86 относительно прямого отверстия.

Экспериментальные данные подтверждают чувствительность ортотропных пластин на основе рассмотренного ПКМ к геометрическим концентраторам напряжений. При анализе изменения концентратора на отверстие с зенковкой в 90° и глубиной конуса 2,92 мм внутрь материала можно наблюдать незначительное изменение площади поперечного сечения в 0,96 относительно прямого отверстия.

Для экспериментальной оценки несущей способности в ортотропных пластинах, а также изучения влияния плоскости среза и зенковки проводились статические испытания с использованием различных типов образцов с концентраторами в виде нагруженных отверстий. Испытания на статическое нагружение проводились по стандарту, описанному в ГОСТ 33498–2015.

Указанные методы позволяют получить оценку механических характеристик материала и области их применений. Обработка результатов испытаний ПКМ на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна позволяет определить область несущей способности при совместном действии сминающей и проходящей нагрузки, что в свою очередь может служить консервативной оценкой соединения с ортотропной пластиной при заданных условиях смятия.

Для экспериментальной оценки несущей способности ортотропных пластин с концентраторами в виде нагруженных отверстий испытания на статическое нагружение проводилось по стандарту, описанному в ГОСТ Р 56790–2015. Метод позволяет учесть различные варианты концентраторов напряжений в виде заполненных зенкованных, прямых отверстий, а также комбинации нагружения растяжения и сжатия.

Для учета влияния плоскости среза ГОСТ Р 56790–2015 предусматривает различные схемы нагружения образца по методу А и методу В. В пластине реализуется сложное напряженное состояние, состоящее из растягивающих / сжимающих, а также сдвиговых напряжений и сминающего напряжения в отверстии. Представлены технологическая оснастка и образцы, закрепленные в захватах испытательной машины, при действии комбинации сминающей и проходящей нагрузок.

Для определения возможности аппроксимации полученных данных для иных укладок проводится серия расчетов с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Методика определения параметров материала основана на моделировании приведенных выше испытаний в программном комплексе LS-DYNA и сравнении результатов расчета с результатами испытаний. Для моделирования рассматриваемого в работе ПКМ на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна используются восьмиузловые объемные конечные элементы (КЭ) первого порядка.

Для исследования НДС типовых соединений ортотропных пластин с механическими крепежными элементами создавались серии конечно-элементных моделей (КЭМ) с различными схемами армирования.

Для исследования прочности односрезного и двухсрезного соединений ортотропных пластин с танговым крепежным элементом разработаны соответствующие КЭМ. В местах соприкосновения ортотропных пластин и крепежного элемента задавались условия контакта. В разработанных КЭМ пластины имеют различные схемы армирования с 13–50%-м содержанием слоев вдоль направления 0° .

В расчетах используется модель материала ПКМ «MAT_221_ORTHOTROPIC_SIMPLIFIED_DAMAGE», основанная на критерии максимальных деформаций (один из распространенных на практике критериев разрушения ПКМ). Согласно этому критерию разрушение наступает, когда одна из компонент деформации (отнесенная к осям ортотропии) достигает предельного значения, которое определяется из испытаний на одноосное нагружение и чистый сдвиг.

По результатам расчета определены слои получившие повреждения в результате достижения предельного значения согласно критерию разрушения и значения нагрузки, при которой фиксируется потеря несущей способности образца.

Модель материала MAT_221 основана на том, что зависимость напряжений от деформаций в ортотропном слоистом ПКМ имеет три участка: зона упругого поведения, зона повреждения, зона разрушения.

По полученным результатам расчета модели с односрезным соединением наглядно наблюдается совместное действие растягивающих и изгибающих усилий в центральной части. В связи с установкой потайного крепежа наблюдается высокая степень «подмятия» зонкованной области ортотропной пластины, которая в свою очередь провоцирует потерю несущей способности образца. В случае с моделью двухсрезного соединения наблюдается равномерное нагружение модели с выработанной сдвиговой модой разрушения.

В зависимости от различных схем армирования ортотропных пластин наблюдаются различные формы разрушения. Так, для образца односрезного соединения с укладкой монослоев из 13,3 % слоев по направлению 0°, 40 % слоев по направлению 45°, 46,7 % слоев по направлению 90° (13,3/40/46,7), имеет место малое количество поврежденных вдоль 0° слоев и множественные повреждения слоев от сдвиговых деформаций. Данная мода проявляется в разной степени в зависимости от укладки образца из ПКМ. При анализе показателей критерия разрушения в образце двухсрезного соединения явно наблюдается высокая чувствительность от схемы армирования. Так, для модели с укладкой монослоев из 9 % слоев по направлению 0°, 73 % слоев по направлению 45°, 18 % слоев по направлению 90° (9/73/18), т. е. состоящей из большого количества слоёв с ориентацией 45° имеют место множественные повреждения слоев от сдвиговых и сжимающих деформаций.

Анализ результатов работы показывает, что ортотропные пластины подвержены сильному влиянию геометрических концентраторов и типа соединения. При проектировании элементов конструкций из ортотропного материала целесообразно использовать комплексный подход по определению несущей способности. Расчет показал, что введение потайного крепежа в односрезном соединении снижает несущую способность на 0,86 относительно прямого отверстия и не может быть учтено путем пропорционального пересчета на уменьшенную площадь сечения.

Данный подход на изучаемых примерах позволяет значительно увеличить площадь области несущей способности. Учет особенностей типа соединения при проектировании стыков наглядно показывает сужение области несущей способности.

УДК 54-18

ПРИМЕНЕНИЕ КАУЧУКА НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Н. А. ВОЛКОВ, Л. С. КУЩЕНКОВА

*Нижегородский институт путей сообщения –
филиал Приволжского университета путей сообщения, г. Нижний Новгород,
Российская Федерация*

Каучук – универсальный материал, нашедший широкое применение в железнодорожном транспорте. Его свойства, такие как эластичность, стойкость к истиранию и вибрации, делают его идеальным для различных элементов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

Приведем несколько примеров использования каучука.

1 Резиновые прокладки, уплотнители и подушки.

Вагоны: каучуковые прокладки используются для уплотнения дверей, окон и других открытых участков вагонов, предотвращая проникновение влаги, шума и пыли.

Локомотивы: резиновые уплотнители применяются в двигателях, системах охлаждения и других компонентах, обеспечивая герметичность и предотвращая утечки.

Пути: резиновые прокладки используются в стыках рельсов для поглощения вибрации и шума, а резиновые подушки используются для улучшения сцепления с рельсами и снижения износа колес на резких изгибах.

Системы торможения: резиновые уплотнители и прокладки используются в тормозных системах для предотвращения утечки воздуха и обеспечения надежного торможения.

2 Резиновые колеса.

Локомотивы: резиновые колеса применяются в маневровых локомотивах и других типах локомотивов работающих на малых скоростях, обеспечивая плавность хода и снижение шума.

Вагоны: в некоторых типах вагонов, например, в вагонах метро, используются резиновые колеса для повышения комфорта пассажиров и снижения шума.