

Статья

Исследование метода ремонта трещин для задержки разрушения Инициирование стальных элементов, подвергающихся малоцикловой усталости

Сампат Абейгунасекара 1,*¹, Джива Чандани Пушпакумари Гамаге¹ и Сабрина Фавзия²¹ Департамент гражданского строительства, инженерный факультет, Университет Моратувы, Катубедда 10400, Шри-Ланка;² kgamage@uom.ac.lk Школа гражданской и экологической инженерии, Технологический университет Квинсленда, Брисбен 4000, Австралия; sabrina.fawzia@qut.edu.au

* Переписка: abeygunasekarasampath@gmail.com

Аннотация: Концентрации напряжений стали обычным явлением в стальных элементах при остановке разрушения с помощью метода отверстия для остановки трещины (CSH). Внедрение CSH в полимер, армированный углеродным волокном (CFRP), увеличивает усталостную долговечность за счет задержки разрушения и достижения восстановления жесткости благодаря превосходным механическим характеристикам материала углепластика. Таким образом, в этом контексте было исследовано поведение низкой циклической усталости (LCF) 90 усиленных и неусиленных образцов CSH. Эти образцы подвергались воздействию от 0 до 10 000 циклов усталостной нагрузки с частотой 5 Гц. По окончании усталостной выдержки в каждом случае измеряли среднюю прочность на разрыв. Применение пластира из углепластика на CSH эффективно восстановило потери прочности, одновременно повышая прочность в диапазоне от 32% до 45% по сравнению с неусиленными образцами. Разработанная численная модель на основе метода циклического J-интеграла согласуется с результатами испытаний. В этом исследовании были представлены рекомендации по проектированию этой новой гибридной технологии CSH, связанные с геометрией.

Ключевые слова: стальные элементы; отверстие для остановки трещин (CSH); Гибридный композит CSH/CFRP; низкая цикловая усталость; средняя прочность на разрыв



Цитирование: Абейгунасекара, С.; Гамаге, JCP; Фавзия, С.

Исследование технологии ремонта трещин для задержки начала разрушения стальных элементов, подвергающихся малоцикловой усталости. Здания 2023, 13, 2958. <https://doi.org/10.3390/buildings13122958>.

Академические редакторы: Байцяо Чен, Юде Ван, Лян Цзун и Цзунсин Чжан

Поступила: 17 сентября 2023 г.

Пересмотрено: 25 октября 2023 г.

Принято: 2 ноября 2023 г.

Опубликовано: 28 ноября 2023 г.



Копирайт: © 2023 авторов.

Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе. распространяется на условиях и условия Creative Commons

Лицензия с указанием авторства (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Введение

Старые конструкции уязвимы к усталости из-за деградации материалов и тяжелых нагрузок, возникающих в результате увеличения текущего спроса на услуги. Усталость обычно вызывает переломы на микроструктурном уровне, которые невозможно наблюдать визуально [1]. По данным предыдущих исследований, 90% разрушений конструкций происходят из-за усталостных разрушений [2]. Однако усталость не является инженерной проблемой, поскольку она связана с поведением любого материала под воздействием колебаний напряжений. Циклический эффект вызывает изменение механических свойств материала, что приводит к разрушению, которое происходит ниже предела текучести пластичного материала. Интересно, что быстрый и внезапный отказ происходит без какого-либо предварительного предупреждения в течение очень короткого периода времени, что приводит к потере жизни и имущества из-за усталости. Поэтому ремонт стальных конструкций, связанный с усталостью, очень важен для продолжения их эксплуатации в пределах безопасности. Обычно стальные пластины соединяют с треснувшими элементами с помощью сварки или гаек и болтов в качестве метода ремонта. Однако эти методы имеют ограничения, к которым относятся тяжелое оборудование, квалифицированная рабочая сила, увеличение собственного веса, изменение микроструктуры материала из-за нагрева, неоднородность поперечного сечения, сложность использования в аварийной ситуации и большое время простоя.

Фишер и др. в 1980 году предложили метод размещения отверстий для контроля трещин [3]. Метод CSH имеет большой потенциал для преодоления большинства недостатков, упомянутых выше. Эту технику можно считать быстрым, простым и экономически эффективным методом. Процедура метода CSH заключается в просверливании отверстия на конце вершины трещины, чтобы превратить трещину в выемку. Результатом является снижение напряжений на треснувшие элементы конструкции. Этот метод успешно используется в аэрокосмической промышленности с 1950 года [4], и в настоящее время этот метод также применяется при ремонте стальных мостов. Однако,

CSH начинает повторно растрескиваться из-за постоянных эксплуатационных нагрузок, а также снижения средней прочности поперечного сечения из-за удаления материала CSH. Следовательно, должно быть решение, позволяющее улучшить производительность этой техники. Размер CSH является основным предметом споров в отношении метода CSH, и для определения размера CSH требуется соответствующее руководство по проектированию.

Исследование, проведенное Fish et al. рекомендовали диапазон диаметра CSH от 50 до 100 мм для эффективной работы [5], в то время как Ishikawa et al. рекомендовал диапазон диаметров от 6 мм до 25 мм [6]. Минимальный размер отверстия должен быть менее 25 мм для типичных автодорожных мостов [3]. Dextor и Осе подтвердили, что минимальный размер CSH составляет 25 мм в диаметре [7]. Формула была разработана Рольфе и Барсомом в 1977 году для оценки размера CSH [8]. Фишер и др. ввел корреляцию для оценки размера CSH [3]. Это ясно указывает на то, что размер CSH является основным предметом споров относительно этого метода и что необходимы некоторые соответствующие рекомендации по проектированию, чтобы определить размер CSH в условиях усталости. Браун и др. предположили, что CSH, установленный с помощью тупых сверл, приведет к усталости, аналогичной усталости пробойников [9]. Углепластики успешно применяются для восстановления изношенных стальных конструкций с 1980 года [10] благодаря их устойчивости к коррозии, небольшому весу и замечательной усталостной прочности [11]. Исследования, проведенные Боччарелли и др. доказали, что углепластик демонстрирует лучшие усталостные характеристики, чем методы со сварными накладками [10]. Юана и др. и Лю и др. также подтвердили усталостные характеристики метода упрочнения на основе углепластика в ходе своих исследований [12,13]. Тан и Калавагунта и др. подтвердили способность углепластика увеличивать срок службы и увеличивать усталостную способность элементов конструкции [14,15]. Исследования, проведенные Калавагунтой и др. также исследовали способность стального профиля набирать прочность с помощью углепластика [15]. По мнению Кадеи и др., листы и полосы углепластика можно эффективно использовать для восстановления утраченной емкости материала [16]. Гите и др. показали, что углепластик способен снизить вес на одну треть и усилить прирост в пять раз по сравнению со сталью [17]. Следовательно, усиление CSH с использованием углепластика имеет большой потенциал для остановки трещин и может повысить усталостные характеристики из-за задержки растрескивания по своей природе. Это исследование было сосредоточено на оценке усталостного поведения гибридной системы CSH/CFRP и одновременном представлении расчетной формулы для метода CSH.

2. Методология. Был

проведен обзор литературы, чтобы обобщить существующие исследования, связанные с отверстиями для остановки трещин, а также методами, усиленными углепластиком, и выявить пробелы в исследованиях. Спроектирован и изготовлен аппарат усталостного нагружения на базе электрогидравлического управления грузоподъемностью 10 кН. Была выполнена программа экспериментальных испытаний с четырьмя сериями испытаний для исследования измерений CSH, связанных с усталостью. FEM был разработан с использованием программного обеспечения для анализа методом конечных элементов (ABAQUS 6.14) с аналогичной испытательной установкой и лабораторными испытаниями. Модель использовалась для сравнения результатов лабораторных испытаний с целью валидации. Результаты модели были использованы для проведения параметрического исследования для оценки влияния неизвестных параметров на производительность CSH. Результаты испытаний и результаты МКЭ были представлены вместе с рекомендациями по проектированию и рекоменда

3. Тестовая установка и материалы.

Всего было испытано девяносто образцов, которые были разделены на семь серий. подробности указаны в таблице 1.

Образцы для испытаний были спроектированы в соответствии с ASTM D 790 [18] с размерами Размеры 40 мм (ширина) × 5 мм (толщина) × 280 мм (пролет) (рис. 1).

Рисунок 2. Испытательная установка для (а) усталостной нагрузки и (б) растягивающей нагрузки.

Здания 2023, 13, 2958 г.

Модуль упругости и предел прочности стали и углепластика определялись экспериментально с помощью купонного испытания. Предел прочности и модуль упругости стали измеряли по стандартам ASTM D 3039^{4 из 16} [19].

Фактически сообщалось о пределе прочности на разрыв 583 МПа и среднем модуле упругости 200 ГПа. Растяжение Модуль упругости и предел прочности стали и углепластика были

Прочность и средний модуль упругости углепластика были зарегистрированы при давлении 175 МПа и определены экспериментально с использованием купленного оборудования. Предельно прочностные и модуль упругости материалов стали, измеренными в соответствии со стандартами ASTM D 3039 [19]. На самом деле, растяжение термические свойства в соответствии с ASTM D 3039/3039 M, которые приведены в таблице 2. Сообщалось о прочности 583 МПа и среднем модуле упругости 200 ГПа. Растяжимый

Сообщается, что прочность и средний модуль упругости углепластика составили 175 МПа. Таблица 2. Измеренные и предоставленные производителем свойства материала [11,20], и 15/5 МПа соответственно. Производители предоставили данные по сравнению с измеренными.

свойства материала, в соответствии с ASTM D 3039/3039 M, которые указаны в Таблице 2.

Таблица 2. Измеренные и предоставленные производителем свойства материала [11,20].

Свойство материала	Сталь 200	Эпоксидный клей	углепластик
Средний модуль упругости (ГПа)	200	0,379	175
Средняя прочность на разрыв (МПа)	583	25	1575 г.
Средний коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,3
Средний модуль упругости (ГПа)	200	0,579	175
Средний коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,3

4. Результаты.

4.1. Влияние диаметра CSH 4.1.

Влияние диаметра ЦСН

Всего было испытано шестьдесят образцов. Двадцать четыре из них не подвергались усталости. Всего было (некоторые образцы считались контрольными образцами), а остальные были конди- (некондиционными) и считались контрольными образцами, а остальные были в кондиции. В четырех случаях до 10 000 циклов нагрузки усредненной 2 кН и частотой 5 Гц. В остальных случаях до 10 000 циклов нагрузки усредненной 2 кН и частотой 5 Гц. В обоих случаях, соотношение диаметра ЦСН и неупрочненных образцов, соотношение диаметра ЦСН и ширины элемента (d/b) изменялась от 0,1 до 0,6 с шагом 0,1 путем размещения элемента (d/b) изменялась от 0,1 до 0,6 с шагом 0,1 путем размещения ЦСН в центре ЦСН в центре промехутка. Однонаправленный, нормальный модуль упругости углепластик длиной 200 мм среднего пролета. Для изготовления использовалась однонаправленная ткань из углепластика с нормальным модулем длиной 200 мм. ткань использовалась для прочности. По окончании усталостной выдержки испытуемый образец был прочным. По окончании усталостной выдержки образец фиксировали универсальным фиксатором.

фиксируется универсальным растягивающим устройством, которое необходимо измерить, растягивающую нагрузку, которую необходимо определить, растягивающее устройство, которое необходимо измерить, растягивающую нагрузку, которую необходимо определить, и среднее напряжение для сравнения, как показано на рисунке 3.

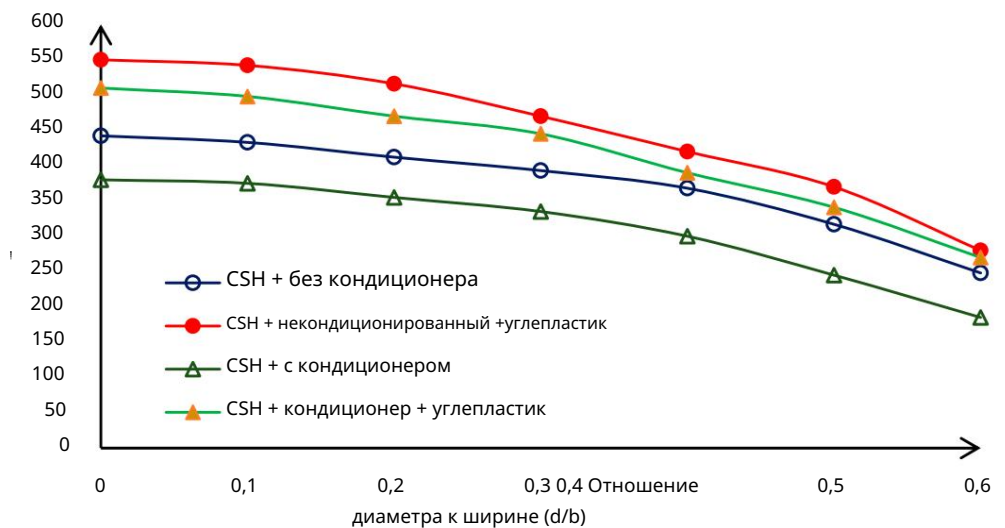


Рисунок 3. Потери прочностных характеристик и природооборонити за счет угнетения.

В среднем в образце б была отмечена потеря прочности на 14 % из-за усталостных эффектов. В среднем даже без СШ в образце отмечена потеря прочности на 14 % из-за усталостных эффектов . Это происходит главным образом из-за деградации материала, вызванной повторяющимися без СШ. В основном это происходит из-за деградации материала, вызванной повторяющимися действиями по загрузке и разгрузке (усталость). В среднем отмечалась потеря прочности от 13% до 25%. Погрузочно-разгрузочные действия (усталость). В среднем при изменении отношения d/b от 0,1 до 0,6 в конце усталостной выдержки в образцах отмечалась потеря прочности от 13 до 25 %. При изменении отношения d/b от 0,1 до 0,6 в конце усталостной выдержки в образцах с КШ. В целом, СШ вызывает снижение жесткости из-за удаления микроструктуры материалов вблизи отверстия. С другой стороны, изменения металлической структуры и прочности материала на растяжение обусловлены эффектами усталости. Изменения средней прочности материала на растяжение обусловлены эффектами усталости. Изменение средней прочности материала на растяжение обусловлено эффектами усталости. Изменение средней прочности материала на растяжение обусловлено эффектами обратные движения дислокаций и пластическая деформация по плоскостям скольжения металлических

эффектами пластического течения, несовершенствами кристаллической решетки материала, эффектами прямого

обратные деформации и воздействие на статическую жесткость деформаций в деталях металлов, сплавов и композитов.

[illegible]

Гибридная технология ремонта CSH/CFRP потенциально не может повлиять жесткости и усталостную выносливость трубопровода. Всплошная и точечная сварка, используемая для фиксации армирующих элементов, не оказывает влияния на жесткость несущая способность материала. Виды разрушения, наблюдаемые во время испытаний на усталость на трубах с термической обработкой, являются следствием образования трещины в контролируемого напряжения при приложении усталостной нагрузки. Обычные тензорезисторы, используемые для остановки трещины контролировалось во время приложения усталостной нагрузки. Во время приложения усталостной нагрузки контролировалось обычное отверстие для остановки растрескивания от сварки, крепятся к сварной поверхности на расстоянии 3 мм от периферии ЦШ. Для фиксации ЦШ для проверки крестится к стальной поверхности на расстоянии 1 мм от периферии ЦШ. Конец каждого деформации вблизи CSH в конце каждого заранее определенного цикла нагрузки представлена на рисунке 5. Деформация вблизи CSH в конце каждого заранее определенного цикла нагрузки представлена на рисунке 5.

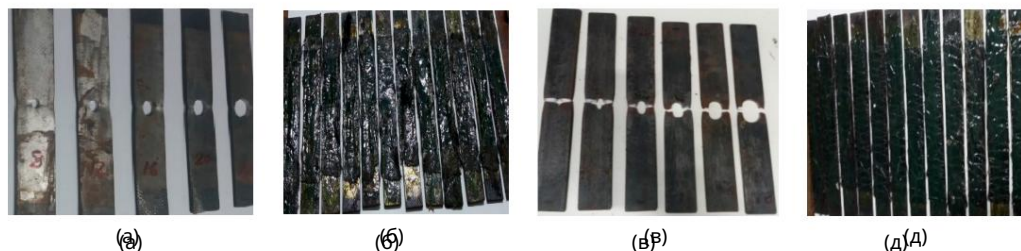


Рисунок 4. Режим отказа СБН: (а) неустановленный и установленный (б) установленные и упрежденные (в) установленные и упрежденные (г) установленные и упрежденные.

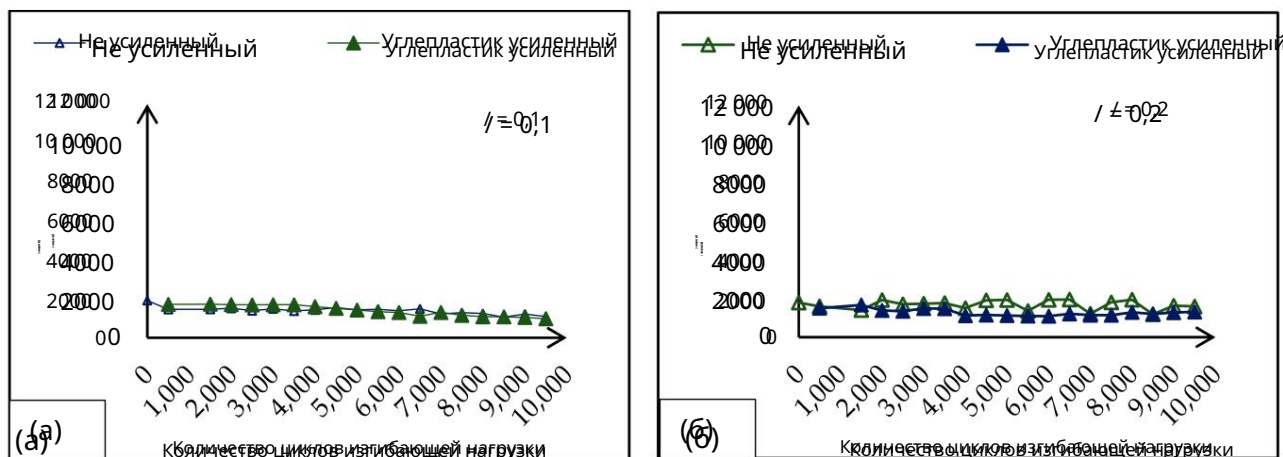
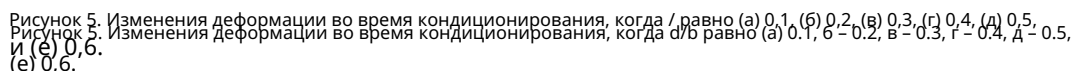


Рисунок 5. Продолжение.



Согласно рисунку 5а,б существенных отклонений не отмечено в усиленных и согласно рисунку 5а,б существенных отклонений не отмечено в усиленных и

неупрочненных образцы. Вклад углепластика незначителен, а также неупрочненных образцов. Вклад углепластика незначителен, и

близкая нагрузка может противостоять воздействию влаги. При увеличении соотношения от 0,3 до 0,4 изменение деформаций на образцах при нагрузке в 600 Н/mm² составляет 0,01 мм. Это свидетельствует о снижении деформации по сравнению с неусиленным СШ, как показано на рисунке 4ж. Это достигается за счет эффективной способности распределять нагрузку, приклепленного слоя углепластика к поверхности металла при заливании

вклад в контроль деформации, что достигается за счет введения распределителя трещин в СШ. Следовательно, изменение деформации указывает на эффективность предлагаемого гибридного метода ремонта стали.

для стальных элементов, подверженных коррозии, по сравнению с традиционным методом СШ.

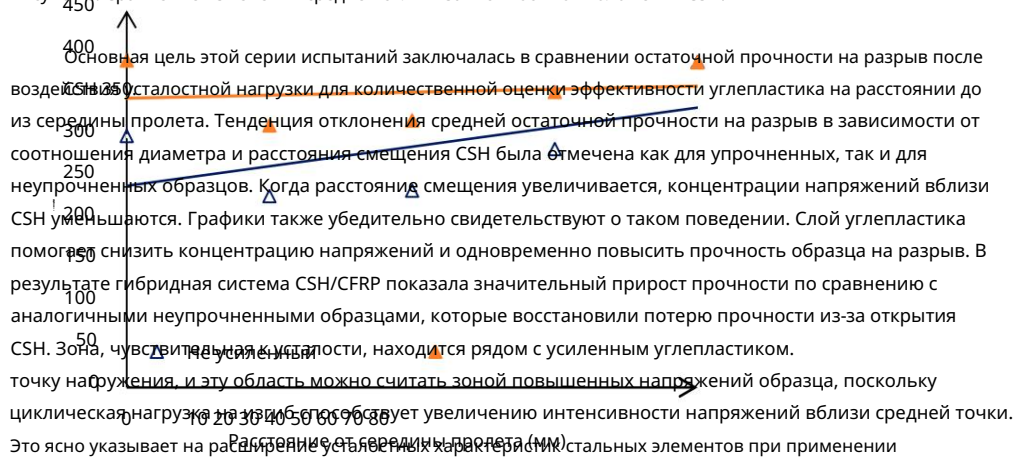
[illegible]

Основной целью этой серии испытаний было сравнение остаточной прочности на растяжение после воздействия усталостной нагрузки для количественной оценки эффективности углепластика на расстоянии до CSH из середины пролета. Тенденция отклонения среднего остаточного предела прочности при растяжении с

450

соотношение между диаметром и расстоянием смещения CSH было отмечено с обоих усиленные и неупрочненные образцы. Когда расстояние смещения увеличивает напряжение концентрации вблизи CSH уменьшаются. Графики также убедительно свидетельствуют о том, что такое поведение. Слой углепластика помогает снизить концентрацию напряжений и одновременно улучшить предел прочности образца. В результате гибридная система CSH/CFRP показала значительный прирост прочности по сравнению с аналогичными неупрочненными образцами, восстановившими потеря прочности из-за открытия ЦШ. Чувствительная к усталости зона находится вблизи точку нагружения, и эту область можно считать зоной повышенных напряжений образца, поскольку циклическая изгибающая нагрузка способствует увеличению интенсивности напряжения вблизи средней точки. Это явно указывает на увеличение усталостных характеристик стальных элементов при применении гибридной репарации, предложенная в этом исследовании, независимо от местоположения CSH. с гарантированной производительностью по сравнению с традиционным методом CSH. Режим отказа наблюдалось как расслоение слоя углепластика.

Рисунок 6. Сравнение изменения средней силы в зависимости от положения CSH.



предлагаемого метода гибридного ремонта в этом исследовании, независимо от местоположения. Рисунок 6. Сравнение изменения средней силы в зависимости от положения CSH. CSH с гарантированной производительностью по сравнению с традиционным методом CSH.

Вид отказа наблюдался как расслоение слоя углепластика. Тензодатчики были закреплены рядом с образцами, как показано на рисунке 7. Среднее значение деформации CSH во время усталости измерялось в конце каждого заранее определенного цикла нагрузки, как показано на рисунке 8, основываясь на расстоянии до CSH от середины точки. Когда CSH находится вблизи середины пролета, он подвергается сильным напряжениям, которые рассеиваются через лист углепластика. В результате в стальной подложке возникает сравнительно меньшая деформация. гибридов вблизи середины пролета также убедительно свидетельствуют о гибридной схеме по сравнению с традиционной компоновкой CSH. Когда позиция такого поведения от центра к опоре, усталостные напряжения также уменьшаются. Следовательно, определяется предел прочности образца. В результате гибридная система CSH/CFRP показала значительный прирост прочности по сравнению с аналогичными неупрочненными образцами, образцы которых подвергались повторной выборке. Это ясно указывает на то, что предлагаемая гибридная схема CSH/CFRP может компенсировать потерю прочности из-за открытия CSH. Чувствительная к усталости зона почти успешно размещает деформацию вблизи CSH точку нагружения, и эту область можно считать зоной повышенных напряжений образца, поскольку циклическая нагрузка на изгиб способствует увеличению интенсивности напряжений вблизи средней точки. Это ясно указывает на расширение усталостных характеристик стальных элементов при применении предложенного в этом исследовании метода гибридного ремонта, независимо от местоположения CSH, с гарантированными характеристиками по сравнению с традиционным методом CSH.

Вид отказа наблюдался как расслоение слоя углепластика. Тензодатчики были закреплены рядом с образцами, как показано на рисунке 7. Среднее изменение деформации во время усталости измерялось в конце каждого заранее определенного цикла нагрузки, как показано на рисунке 8, на основе расстояния до CSH от середины точка. Когда CSH находится вблизи середины пролета, он подвергается сильным напряжениям, которые рассеиваются через лист углепластика. В результате в стальной подложке гибридной конструкции (b) возникает сравнительно меньшая деформация по сравнению с традиционной компоновкой CSH. При перемещении положения ЦШ от центра к опоре усталостные напряжения также уменьшаются. Таким образом, Рисунок 7. Прикрепленные тензорезисторы: (a) неупрочненный и (b) упрочненный углепластиком образец с аналогичными изменениями деформации наблюдались как в усиленных, так и в неусиленных sam-off CSH. пожалуйста. Это ясно указывает на то, что предлагаемая гибридная схема CSH/CFRP может успешно разместить штамп вблизи CSH.

Рисунок 7. Прикрепленные тензорезисторы, (а) неупрочненный образец и (б) усиленный углепластиком образец со смещением CSH.

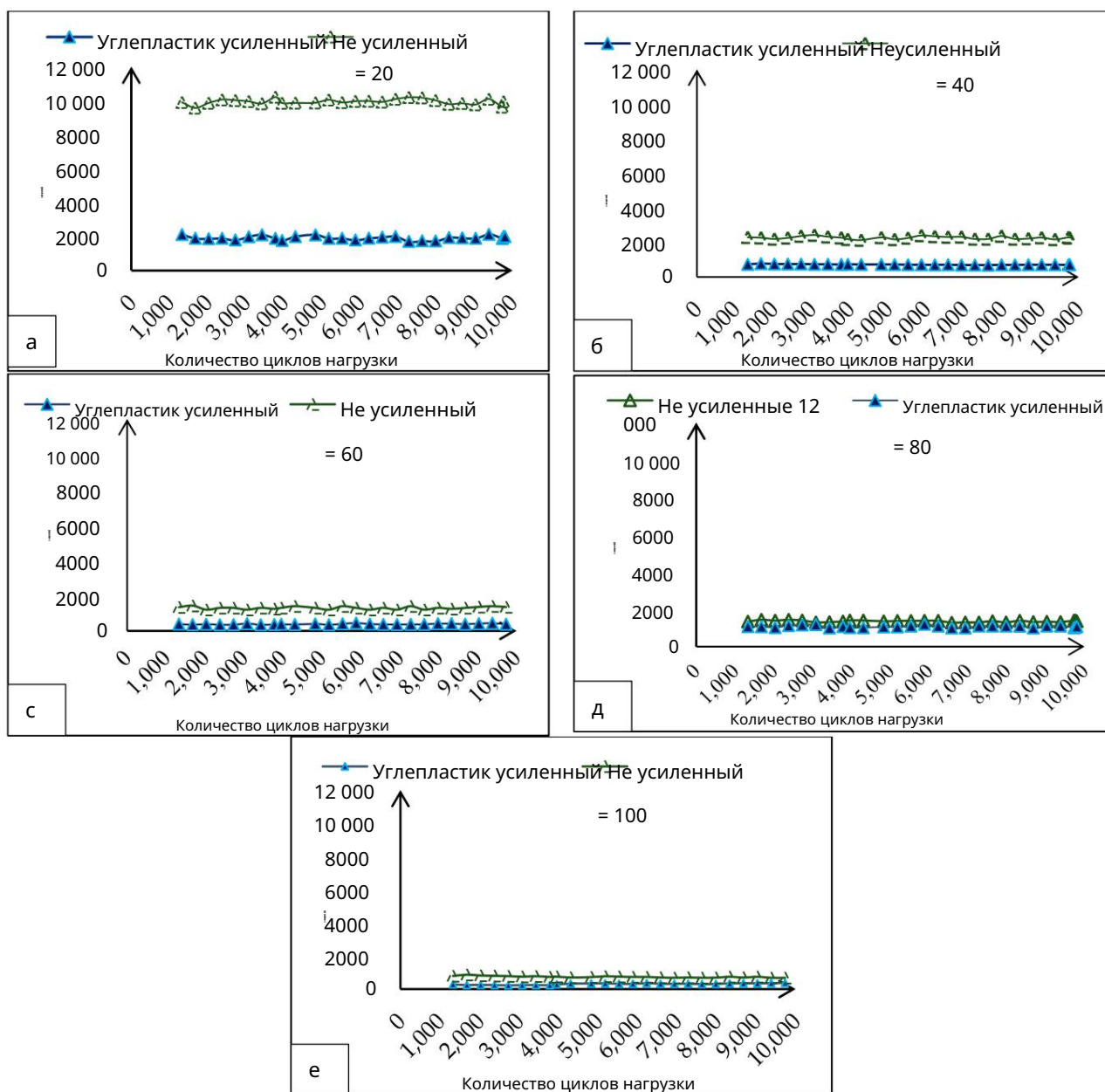


Рисунок 8. Изменения деформации в зависимости от расстояния смещения CSH , когда x равен (а) 20 мм, (б) 40 мм, (в) 60 мм, (г) 80 мм, (д) 100 мм.

5. Моделирование методом конечных элементов (МКЭ)

[illegible]

Программа испытаний 2023, 13, 2958. Стандартный вариант ABAQUS с общим контактом был использован с механическим трением

9 из 16

для моделирования взаимодействия между двумя опорными роликами и нижней поверхностью пластины и носиком нагрузки на средней плоскости стальной пластины. В каждую модель образца был загружен режим LCF с использованием опции прямой циклической нагрузки. Ввод 10 000 с режимом LCF с использованием опции прямой циклической нагрузки и ввод 10 000 циклы. Когда размер элемента не был определен, то это приводит к образованию бесконечного количества элементов, что является проблемой. Напряжения в точках температуры считаются бесконечными. Поэтому, учитывая все перечисленные факторы, в качестве подходящего размера был выбран результат МКЭ с размером ячейки 2 мм. Поэтому, учитывая все вышеперечисленные факторы, в качестве этого анализа был выбран результат FEM с размером ячейки 2 мм, как показано на рисунке 9.

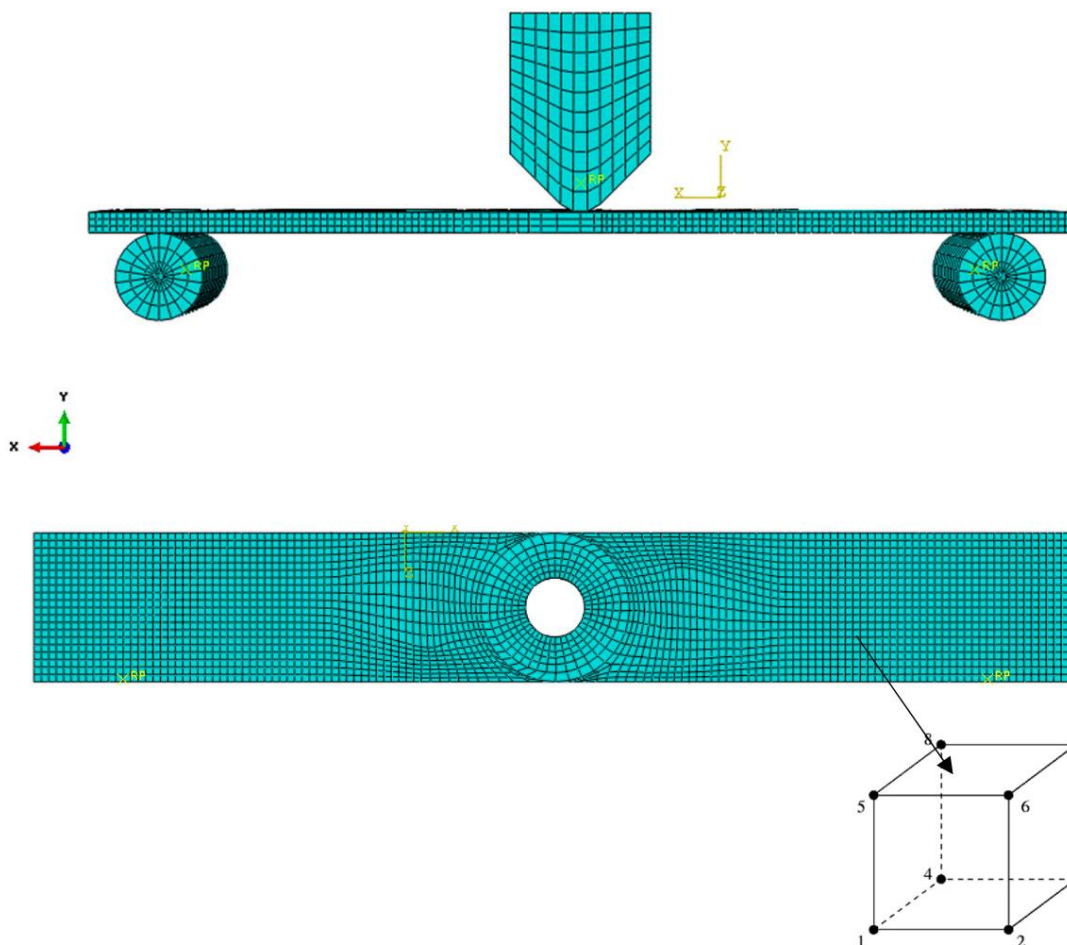


Рис. 9. Сборочная модель образца.

Величина давления, приложенного к вершине нагрузочного носика, была выбрана как 1,25 Н/мм² (2 кН), а частота нагрузок фиксировалась 5 Гц. При учете граничных условий два опорных цилиндра были зафиксированы во избежание обих вращений. Скорость загрузки поддерживалась постоянной и составляла 0,2 мм/мин на протяжении всего анализа. Опция повреждения Хашина использовалась для моделирования ткани из углепластика. Коэффициент трения между каждой поверхностью принимался равным 0,15. Для создания трещины использовались специальные параметры, использовались для создания трещины, а направление растяжения выбиралось с помощью вектора q а направление расширения с помощью опции вектора y. Модель имела те же конфигурации, что и лабораторная установка. Каждый образец был загружен в режиме сжатия с помощью опции сжатия. Радиус 8 мм использовался для моделирования носика. Нагруженный носик имел радиус 8 мм и использовался для приложения нагрузки к средней плоскости стальной пластины. Для моделирования упругопластического поведения использовались кирпичные элементы (C3D8R). Для моделирования стальной пластины использовались материалы на основе железа. Кирпичные элементы использовались для моделирования носика. Процедура испытания описана в таблице 2. Третьим этапом для повышения уровня процедуры испытаний в таблице 2 следовало рассмотреть ситуацию, когда уточнение сетки является наиболее важным методом оценки размера сетки, который можно классифицировать как грубую сетку, среднюю сетку или мелкую сетку. Уменьшение размера элемента — самая простая стратегия уточнения сетки. Размеры элементов уменьшены во всех областях моделирования. Этот подход привлекателен тем, что

Здания 2023, 13, 2958 г.

Самый важный метод определения размера сетки, его можно классифицировать как грубую сетку, мелкую

Диагностика сетки или мелкая сетка. Уменьшение размера элемента — это самая простая стратегия уточнения

сетки, при которой размеры элементов уменьшаются во всех областях моделирования. Этот подход

привлекателен своей простотой, но недостатком является отсутствие предпочтительного измельчения

к своей простоте, но недостатком является то, что в регионах нет преимущественного измельчения сетки

сетки в регионах, где может потребоваться локально более мелкая сетка. Поэтому становится важной

где может потребоваться локально более мелкая сетка. Поэтому необходимо выбрать достаточно хороший

необходимость выбора достаточно хорошего размера сетки для предлагаемого МКЭ с требуемым уровнем

размер сетки для предлагаемого МКЭ с требуемым уровнем точности становится важным. В

точности. В производственной практике мелкая сетка вводится только вокруг чувствительных областей с

в промышленной практике мелкая сетка применяется только вокруг чувствительных областей с высоким напряжением.

высокой концентрацией напряжений, а оставшаяся площадь, имеющая меньшую значимость, вводится на

концентрации, а оставшаяся площадь, имеющая меньшее значение, вводится на

более грубую сетку. Тест сходимости — это еще один способ проверить, подходит ли размер сетки для FEM.

более грубая сетка. Тест сходимости — это еще один способ проверить, соответствует ли размер сетки

В этом методе выбирается половина размера сетки и сравнивается с предыдущим анализом, а программа

стоит того или нет для ФЭМ. В этом методе выбирается и сравнивается половина размера сетки.

перезапускается с новым анализом. Если результаты незначительны по сравнению с предыдущим размером

с предыдущим анализом, и программа перезапускается с новым анализом. Если результаты

сетки такой размер сетки считается подходящим. Это можно повторять до тех пор, пока не будет достигнут

незначительных по сравнению с предыдущим размером сетки, это считается подходящим

уровень принят. Однако при запуске этого теста на сходимости не существует определений относительно

уровня ячейки. Это можно повторять до уровня принятия, однако нет никаких

размера ячейки, и его следует повторять не менее трех раз с разными размерами ячеек, пока не возникнут

определения относительно размера сетки при запуске этого теста сходимости, и это должно быть

повторяется не менее трех раз с разными размерами ячеек до тех пор, пока не возникнут незначительные изменения.

высокое напряжение вблизи области СН демонстрирует более высокий уровень конвергенции, чем в других областях.

напряжений, поскольку не позволяет им сходить. Когда размер сетки очень мал, это приводит к

при анализе следует обратить внимание на сингулярность напряжений, поскольку очень мал, это приводит к

обходиться, когда размер сетки очень мал, это приводит к сингулярности. Считается

бесконечным. Поэтому, учитывая все вышеперечисленные факторы, результат FEM с размером ячейки 2

мм был выбран в качестве приемлемого размера в этом анализе. Этот размер ячейки был выбран в качестве

чувствительности. Этот размер сетки был выбран в качестве чувствительности сетки и

результаты анализа чувствительности сетки. Композиционный вариант укладки материала

В этом типе модели для внедрения слоя материала была использована модель композитной компоновки

модели своей структуры материала. В качестве элементов были выбраны материалы и цитированы элементы оболочки и

типа материала. Общие свойства материала и их влияние на результаты были определены только для анализа

ограничений между этими свойствами. Для анализа были использованы материалы, которые были использованы для анализа

сетки. Результаты были собраны из файла ODB в

модуле визуализации. Результаты МКЭ для анализа были собраны из файла ODB в

изменения напряжений в зависимости от диаметра для усиленных и гибридных систем. Визуализация

показаны на рисунке 10.а) б) соответственно.

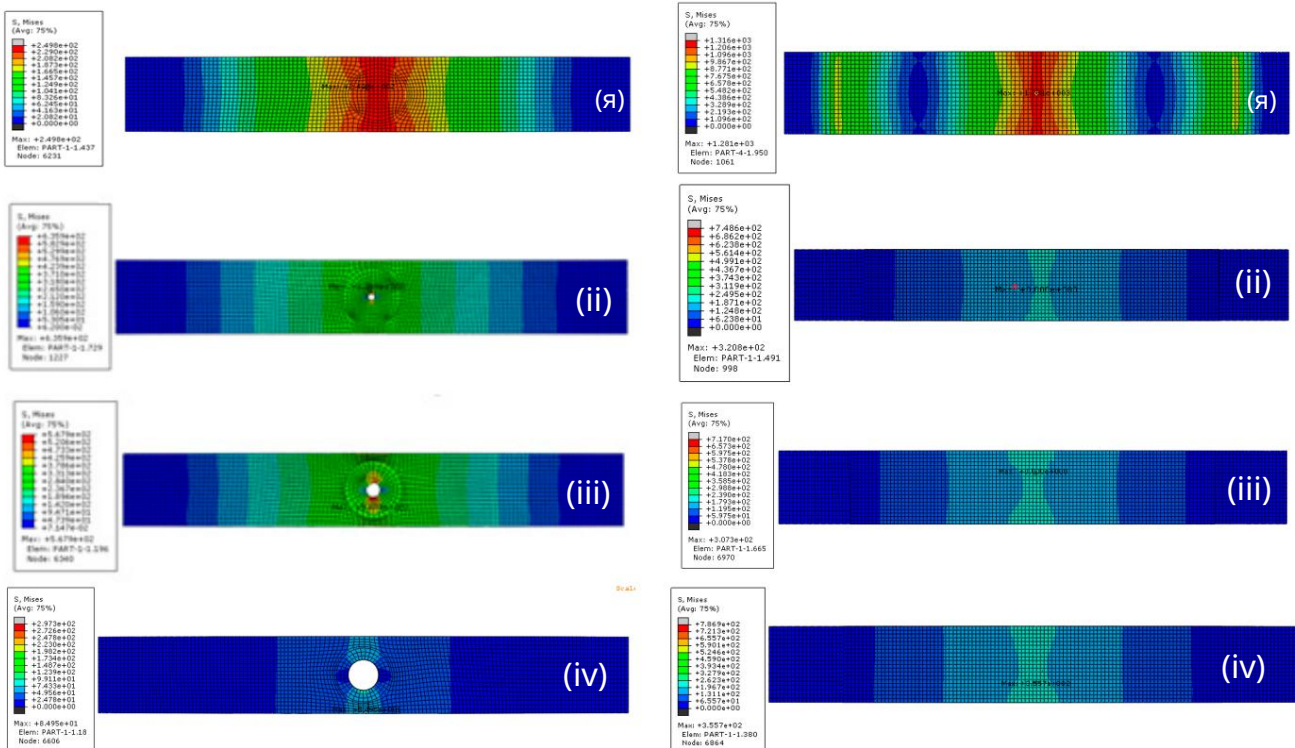
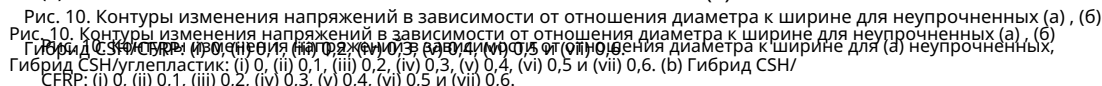
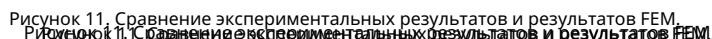
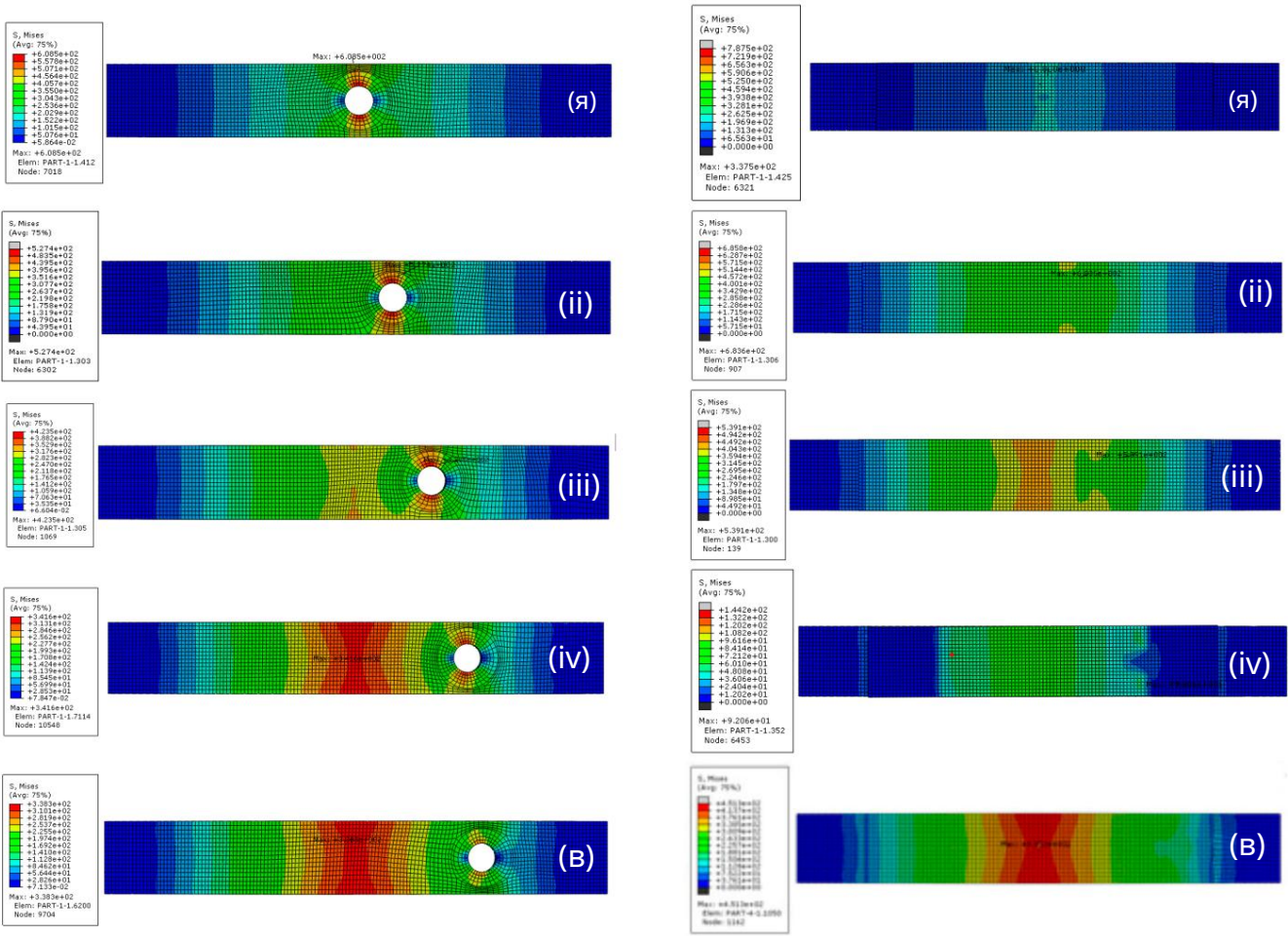


Рисунок 10. Продолжение.

[illegible]

Влияние расстояния смещения CSH было принято во внимание в качестве основного фактора. переменная и менялась от 0 до 80 с шагом 20 мм. Прогнозируемые результаты, принадлежащие сравнивались неусиленная и углепластиковая группы (после усталостного воздействия). с соответствующими экспериментальными результатами, как показано на рисунке 13.



Здания 2023, 13, х ДЛЯ ЭКСПЕРТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ 13 из 16 Рисунок 12. Контуры изменения напряжения с расстоянием смещения для (а) неусиленного, (б) CSH/CFRP Рисунок 12. Контуры изменения напряжения с расстоянием смещения для (а) неусиленный, (б) CSH/гибридная система: (i) ноль, (ii) 20 мм, (iii) 40 мм, (iv) 60 мм и (v) 80 мм. гибридная система: (i) ноль, (ii) 20 мм, (iii) 40 мм, (iv) 60 мм и (v) 80 мм.

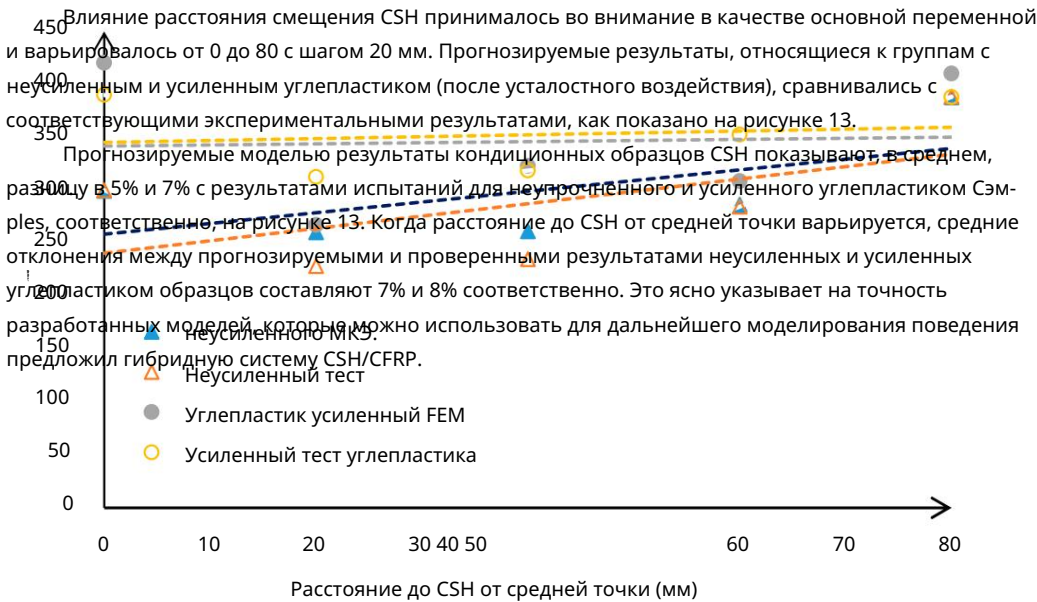


Рисунок 13. Сравнение экспериментальных результатов с результатами FEM.

5.1. Проверка

Механические свойства материала играют жизненно важную роль при рассмотрении усталости. Предел текучести и предел прочности являются двумя основными свойствами материала, которые учитываются при анализе усталости пластичного материала. Эти свойства материала представляют собой сопротивление разрушению из-за деформации и сопротивления разрушению. Предел текучести и предел прочности при растяжении

Результаты, предсказанные моделью для кондиционированных образцов CSH, показывают, в среднем, разницу в 5% и 7% с результатами испытаний для неупрочненных и усиленных углепластиком образцов, соответственно, на рисунке 13. Когда расстояние до CSH от середины -точка варьируется, средние отклонения между прогнозируемыми и испытанными результатами неупрочненных и углепластик-усиленных образцов составляют 7% и 8% соответственно. Это ясно указывает на точность разработанных моделей, которые можно использовать для дальнейшего моделирования поведения предлагаемой гибридной системы CSH/CFRP.

5.1. Проверка

Механические свойства материала играют жизненно важную роль при рассмотрении усталости. Предел текучести и предел прочности являются двумя основными свойствами материала, которые учитываются при анализе усталости пластичного материала. Эти свойства материала представляют собой сопротивление разрушению из-за деформации и разрушения соответственно. Предел текучести и предел прочности имеют разные значения, связанные с усталостью. Предел текучести представляет собой максимальное напряжение непосредственно перед остаточной деформацией, а данные по растяжению представляют собой максимальное напряжение перед разрушением материала. При рассмотрении значения текучести пластичного материала оно становится заметным, а хрупкий материал имеет дело с пределом прочности на растяжение. Так как хрупкий материал не достигает предела текучести, то при выполнении растягивающих нагрузок он внезапно разрушается. Следовательно, в этом исследовании использовалось испытание на растяжение для определения предела текучести (напряжения усталости) CSH в конце состояния для измерения любого остаточного предела текучести.

В этом исследовании был сохранен средний предел текучести материала (отношение предела текучести к площади поперечного сечения), который был оценен в конце усталостных нагрузок как сохраненный предел текучести, что указывает на влияние усталости на образец CSH. Разработанный FEM также оценивал предел текучести в конце усталости и измерялся с использованием напряжения на краю CSH. Это значение почти в три раза превышает приложенную нагрузку на образец. Это приближение является расширением теории, разработанной Инглишом в 1913 году. Автор представил методику расчета напряжений ближе к отверстию. Кроме того, кривая растяжения-деформации в рамках модели визуализации в выходных данных на местах также может использоваться для оценки предела текучести. Распределение деформации вблизи CSH было измерено и сравнено с результатами FEM, как показано на рисунках 11 и 13. Согласно графикам, результаты модели и экспериментальные результаты были приемлемыми для выбранного диапазона CSH. Изменение деформации в результатах испытаний CSH, усиленных углепластиком, хорошо согласовывалось с результатами FEM.

5.2. Параметрическое

исследование. Для исследования параметрического влияния на CSH использовалась численная модель. В этом исследовании толщина элемента, длина трещины и расстояние смещения были выбраны как критически влияющие на геометрические параметры в рассматриваемом диапазоне. В соответствии с экспериментальной программой диаметр CSH и положение эффектов CSH были экспериментально исследованы, и результаты испытаний подтвердили значительные эффекты для этих параметров. Результаты этого исследования можно резюмировать следующим образом: • В этом исследовании сообщалось о потерях прочности в диапазоне от 13% до 25% по сравнению с некондиционным CSH диаметром от 4 мм до 25 мм.

- В этом исследовании сообщалось об увеличении прочности на разрыв при использовании углепластика, которое находится в диапазоне от 32% до 45% по сравнению с неусиленным CSH с изменением диапазона диаметров от 4 мм до 25 мм. •

В этом исследовании зафиксировано увеличение силы по отношению к расстоянию смещения, которое находилось в диапазоне от 36% до 131% по сравнению с CSH в средней

точке. • CSH, усиленный углепластиком, сообщил о значительном приросте прочности, и его изменение было зафиксировано как от 19% до 42% в зависимости от

расстояния смещения. • Вид разрушения наблюдался как расслоение слоя углепластика под действием усталостной а также растягивающая нагрузка.

- На основе свойств материала была разработана надежная численная модель, способная моделировать усталостное поведение CSH, подвергающегося циклическому изгибающему нагружению.
- Рекомендации по проектированию метода CSH приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Рекомендации по проектированию CSH с учетом усталости.

Категория	Параметр	Диапазон действия
Геометрия	Отношение диаметра к ширине (d/b)	$\frac{A}{b}$ 0,2 6
	Отношение толщины к диаметру (t/b)	$\frac{t}{b}$ 0,5
	Отношение диаметра к длине трещины (d/L)	$\frac{A}{L}$ 0,4
	Отношение диаметра к расстоянию смещения (d/x)	$\frac{A}{x}$ 0,2

6. Инженерные последствия

По результатам лабораторных испытаний результаты МКЭ использованы для реализации рекомендаций по проектированию методики CSH. Этот метод может заменить традиционные методы усталостного ремонта и восстановить потери прочности стареющих конструкций. В конечном итоге это может привести к задержкам в ремонте или замене, а также к увеличению интервалов между проверками. Кроме того, это может устранить недостатки, связанные с традиционными методами ремонта. В результате это способствует экономии средств за счет непрерывного обслуживания в соответствии с текущим спросом.

7. Выводы и рекомендации

Подробное экспериментальное и численное моделирование, проведенное с использованием разработанного нового гибридного метода борьбы с трещинами в стальных элементах объектов гражданской инженерной инфраструктуры, позволило

- сделать следующие выводы:
- Введены рекомендации по проектированию для определения подходящего размера CSH для борьбы с трещинами на стальных конструкциях из-за усталости.
 - CSH эффективно восстанавливает потери прочности в диапазоне от 32% до 45% относительно неусиленного состояния.
 - Предлагаемый метод демонстрирует значительное повышение эффективности борьбы с трещинами, и его настоятельно рекомендуется увеличить срок службы стальных инфраструктур при усталостных нагрузках.
 - Разработанная численная модель может быть эффективно использована для оценки последствий неизвестных параметров CSH при усталостной реакции.

8. Будущие работы

Усталость определяется микроструктурой материала из-за внешнего или внутреннего напряжения. Поэтому необходим микроскопический анализ расположения зерен, дислокации и информация о недостающих атомах материала с критическими параметрами. Модель конечных элементов не позволяет моделировать влияние факторов окружающей среды на характеристики облигаций. Это можно считать существенным пробелом в методах FEM. Кроме того, в будущем также может быть проведена оценка долгосрочных исследований гибридной системы CSH/CFRP, связанных с эффективностью облигаций, чтобы подтвердить долговечность этого метода .

Вклад автора: концептуализация, SA и JCPG; методология, CA; программное обеспечение, SA; валидация, SA, JCPG и SF; формальный анализ, CA; расследование, CA; ресурсы, JCPG; курирование данных , SA; письменное – подготовка оригинального черновика, SA; написание — обзор и редактирование, JCPG; визуализация, CF; надзор, JCPG; администрация проекта, JCPG. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получило внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: данные содержатся в статье.

Благодарность: Мы также хотели бы выразить благодарность всем академическим сотрудникам факультета гражданского строительства Университета Моратувы, Шри-Ланка, за их ценную поддержку. DMNL Диссанаяка, технический специалист Лаборатории структурных испытаний, Йохан, технический специалист Лаборатории вычислительной механики, Чарака Сатарасингхе, технический специалист Компьютерной лаборатории, за ценную поддержку, оказанную на протяжении всего периода исследования. Кроме того, мы хотели бы поблагодарить Airow Solution (PVT) Ltd. за предоставление материалов, а также Рандану де Сильву, Прамода Карунаратну и Варакини за их любезную поддержку на протяжении всего этого периода. Наконец, мы хотим выразить признательность Танудже и Санджали Абейгунасекаре за их любовь, эмоциональную поддержку и ободрение. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории структурных испытаний, а также сотрудникам компьютерной лаборатории факультета гражданского строительства Университета Моратувы, Шри-Ланка, за их ценную поддержку.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Виджесурия, Х.С. Прогнозирование распространения усталостных трещин при истирании с использованием анализа методом конечных элементов. В материалах конференции инженерных исследований Моратувы 2018 г. (MERCon), Моратува, Шри-Ланка, 30 мая – 1 июня 2018 г.
2. Комитет по усталости и надежности разрушения Комитета по структурной безопасности и надежности Структурного отдела Американского общества инженеров-строителей. Усталостная надежность: Разработка критериев проектирования. Дж. Структ. Див. 1982, 108, 71–88.
[Перекрестная ссылка]
3. Фишер, Дж.В.; Бартелеми, Б.М.; Мерц, Д.Р.; Эдингер, Дж. А. Усталостное поведение полномасштабных сварных мостовых креплений; Отчет NCHRP 227; Совет транспортных исследований, Национальный исследовательский совет: Вашингтон, округ Колумбия, США, 1980.
4. Свейндоттир, С.Л. Экспериментальные исследования по усилению бетонных балок с использованием эпоксидного клея и связующего материала на основе цемента. Магистерская диссертация, Хасколинн, Рейкьявский университет Исландии, Рейкьявик, Исландия, 2012.
5. Фиш, П.; Шредер, К.; Коннор, Р.Дж.; Саузер, П. Библиотека усталости и разрушения для проверки, оценки и ремонта автомобильных стальных мостов; Университет Пердью: Вест-Лафайет, Индиана, США, 2015 г.
6. Исигава Т.; Мацумото, Р.; Хаттори, А.; Кавано, Х.; Ямада, К. Снижение концентрации напряжений на краю стопорного отверстия путем закрытие поверхности трещины. Дж. Сок. Матер. наук. 2013, 62, 33–38. [Перекрестная ссылка]
7. Декстер, Р.Дж.; Осел, JM «Руководство по ремонту и модернизации усталостных трещин в стальных мостах» (№ FHWA-IF-13-020); Федеральная трасса Администрация: Вашингтон, округ Колумбия, США, 2013 г.
8. Рольфе, ST; Барсом, Дж. М. Контроль разрушения и усталости в конструкциях: применение механики разрушения; ASTM International: Вест-Коншохокен, Пенсильвания, США, 1977 г.
9. Браун, доктор медицинских наук; Любиц, диджей; Чеков, ЮК; Франк, К.Х.; Китинг, П.Б. Оценка влияния обработки отверстий на характеристики пластин и соединений конструкционной стали (№ FHWA/TX-07/0-4624-1). 2007. Доступно онлайн: <https://trid.trb.org/view/849447> . (по состоянию на 12 августа 2022 г.).
10. Боччарелли, М.; Коломби, П.; Фава, Г.; Погги, К. Усталостные характеристики стальных элементов, усиленных углепластиковыми пластинами. Композиции. Структура. 2009, 87, 334–343. [Перекрестная ссылка]
11. Чандратилака, ERK; Гамаге, JCPH; Фавзия, С. Механические характеристики связи углепластик/сталь, отвержденной и испытанной при повышенных температурах. температура. Композиции. Структура. 2019, 207, 471–477. [Перекрестная ссылка]
12. Юань, Х.; Тенг, Дж.Г.; Серачино, Р.; Ву, ЗС; Яо, Дж. Полномасштабное поведение соединений стеклопластика с бетоном. англ. Структура. 2004, 26, 553–565. [Перекрестная ссылка]
13. Лю, Х.Б.; Чжао, XL; Аль-Махаиди, Р. Влияние усталостной нагрузки на прочность соединения соединений стальных пластин, связанных углепластиком. В материалах Международного симпозиума по поведению стеклопластиков в конструкциях, Гонконг, Китай, 7–9 декабря 2005 г.; стр. 459–464.
14. Тан, Дж. Х.; Шридхар, И.; Шрикант, Н. Анализ статического и усталостного разрушения толстых композитных однонахлесточных соединений, склеенных клеем. Композиции. наук. Технол. 2013, 86, 18–25. [Перекрестная ссылка]
15. Калавагунта, С.; Наганатан, С.; Мустафа, KNB Стальные колонны, нагруженные осевой нагрузкой, усиленные углепластиком. Джордан Дж. Сив. англ. 2014, 8, 58–69. [Перекрестная ссылка]
16. Кадей, Дж. К.; Стратфорд, Техас; Дакетт, В.Г.; Холлауэй, LC. Укрепление металлических конструкций с использованием армированных волокном материалов с внешним соединением. Полимеры; Сирия: Лондон, Великобритания, 2004 г.
17. Гите, Бельгия; Маргай, MSR; Углеродное волокно как новый материал, используемый в строительстве. Портал гражданского строительства. 2013. Доступно онлайн: <https://www.engineeringcivil.com/carbon-fibre-as-a-recent-material-use-in-construction.html> . (по состоянию на 14 июля 2022 г.).
18. ASTM D790-17; Стандартные методы испытаний свойств на изгиб неармированных и армированных пластмасс и электроизоляционных материалов. материалы. Стандарты ASTM: Вест-Коншохокен, Пенсильвания, США, 1997 г.
19. ASTM D3039/D3039M-08; Стандартный метод испытания свойств на растяжение композиционных материалов с полимерной матрицей. Стандарты ASTM: Вест-Коншохокен, Пенсильвания, США, 2014 г.

20. Сильва, МАЛ; Дедигамува, КВ; Гамаж, JCPH Характеристики сильно поврежденных железобетонных соединений плоских плит и колонн, усиленных полимером, армированным углеродным волокном. Композиции. Структура. 2021, 255, 112963. [\[CrossRef\]](#)
21. Коффин, Л.Ф., младший. Исследование воздействия циклических термических напряжений на пластичный металл. Пер. Являюсь. Соц. Мех. англ. 1954, 76, 931–949. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельному автору(ам) и участникам(ам), а не MDPI и/или редактору(ам). MDPI и/или редактор(ы) не несут ответственности за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.