

УДК 67.02
МРНТИ 67.09.55
<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2023-20-2-13-26>

Темірхан М.С.

ТОО «Институт новых материалов», 050062, г. Алматы, Казахстан
E-mail: maksat.temirkhan@nu.edu.kz

АНАЛИЗ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ЛЮКОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПОЛИЭФИРНОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА (SMC), ЧЕРЕЗ ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ И СИМУЛЯЦИИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Настоящая научная статья посвящена исследованию и моделированию композитных крышек люков из полиэфирного стеклопластика, которые являются альтернативой традиционным металлическим крышкам. Введение этих заменителей обусловлено проблемами, связанными с коррозией и кражами стальных и чугунных крышек, а также с их недостаточной устойчивостью к химическим веществам. Крышки люков, изготовленные из полиэфирного стеклопластика, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными металлическими крышками. Они обеспечивают высокое соотношение прочности и жесткости к массе, что делает их легкими и удобными в установке. Этот материал также обладает высокой стойкостью к коррозии, что значительно продлевает срок его службы. Несмотря на преимущества композитных крышек люков, исследования, связанные с их моделированием, симуляцией и механическими испытаниями, остаются недостаточными. В данной статье представлены результаты исследования, в котором крышка люка была изготовлена из двух слоев полиэфирного листового пресс-материала с использованием дополнительного ребра жесткости. Далее проводились испытания на изгиб, а полученные результаты были проанализированы с помощью симуляции метода конечных элементов (МКЭ). Целью данного исследования являлось подтверждение валидности модели, построенной для композитных крышек люков, а также сопоставление результатов с экспериментальными данными по деформациям. Полученные результаты имеют важное практическое значение для дальнейшего развития и оптимизации конструкции композитных крышек люков, а также для повышения их надежности и долговечности.

Ключевые слова: крышки люков, полиэфирный-листовой пресс-материал, армирование стекловолокном, сэндвич-композит, метод конечных элементов.

Темірхан М.С.

«Жаңа материалдар институты» ЖШС, 050062, Алматы, Қазақстан
E-mail: maksat.temirkhan@nu.edu.kz

ІІЛУ СЫНАҚТАРЫ ЖӘНЕ СОҢҒЫ ЭЛЕМЕНТТЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ АРҚЫЛЫ ПОЛИЭФИРЛІ ШЫНЫ ТАЛШЫҚТАН (SMC) ЖАСАЛҒАН ОҢТАЙЛАНДЫРЫЛҒАН ЛЮКТЕРДІ ТАЛДАУ

Аңдатпа. Бұл ғылыми мақала дәстүрлі металл кәріз қақпақтарына балама болып табылатын шыны талшықтарымен нығайтылған полиэфирден жасалған композиттік люк қақпақтарын зерттеуге және модельдеуге бағытталған. Болат пен шойыннан жасалған кәріз қақпақтарының тоттануы және ұрлануы, сондай-ақ олардың химиялық заттарға жеткіліксіз төзімділігі алмастырғыштардың пайда болуының негізгі себептері. Полиэфирлі шыны-пластиктан жасалған люк қақпақтары дәстүрлі металл қақпақтармен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарға ие. Олар жоғары беріктік пен салмақ қатынасын қамтамасыз етеді. Бұл оларды орнатуды оңай және ыңғайлы етеді. Бұл материал сонымен қатар коррозияға жоғары төзімділікке ие, бұл оның қызмет ету мерзімін едәуір ұзартады. Композиттік люк қақпақтарының артықшылықтарына қарамастан, оларды модельдеуге және механикалық сынауға қатысты зерттеулер жеткіліксіз болып қала береді. Бұл мақалада, люк қақпағын әзірлеу үшін қосымша қаттылық қабырғасы орнатылып, екі түрлі полиэфирлі қаңылтыр қолданылды. Люк қақпақтары механикалық сынақтардан өткізілді және шекті элементтер әдісі көмегімен талданды. Нәтижелердің және құрастырылған модельдің дұрыстығын растау үшін эксперимент барысында алынған деформация нәтижелері шекті элементтер әдісі нәтижелерімен салыстырылды. Алынған нәтижелер композиттік люк қақпақтарының дизайнын одан әрі дамыту және оңтайландыру, сондай-ақ олардың сенімділігі мен беріктігін арттыру үшін маңызды практикалық мәнге ие.

Тірек сөздер: люк қақпақтары, шыны талшықтарымен нығайтылған полиэфир, сэндвич композиті, шекті элементтер әдісі.

Temirhan M.S.

“Institute of New Materials” LLP, 050062, Almaty, Kazakhstan

E-mail: maksat.temirkhan@nu.edu.kz

ANALYSIS OF OPTIMIZED MANHOLE COVERS MADE OF GLASS-REINFORCED POLYESTER (SMC) THROUGH BENDING TESTS AND FINITE ELEMENT SIMULATIONS

Abstract. This scientific article is devoted to the study and modeling of composite manhole covers made of polyester fiberglass, which are an alternative to traditional metal covers. These substitutes were introduced due to the problems associated with corrosion and theft of steel and cast iron manhole covers, as well as their insufficient resistance to chemicals. Manhole covers made from fiber reinforced plastic have a number of advantages over traditional metal covers. They provide a high strength-to-weight ratio, making them easy and comfortable to install. This material also has a high resistance to corrosion, which greatly extends its service life. Despite the advantages of composite manhole covers, studies related to their mechanical testing and simulations remain insufficient. This article presents the results of a study in which a manhole cover was made from two layers of polyester sheet press material using an additional stiffener. Then, bending tests were carried out, and the results were analyzed using finite element method (FEM) simulation. The purpose of this study was to confirm the validity of the model built for composite manhole covers, as well as to compare the results with experimental data on deformations. The results obtained are of great practical importance for the further development and optimization of the design of composite manhole covers, as well as for improving their reliability and durability.

Key words: manhole covers, glass-fiber reinforced polyester sheet press material, sandwich composite, finite element method.

Список сокращений и специальных терминов

SMC – Sheet Moulding Compound. Полиэфирный листовой пресс-материал;

GRC – Glass fiber Reinforced Concrete. Бетон, армированный стекловолокном;

GRP – Glass fiber Reinforced Plastic. Пластик, армированный стекловолокном;

CSM – Chopped Strand fiberglass Mat. Мат из рубленого стекловолокна;

MAT – Matted Fiberglass. Матовое стекловолокно, полученное путем рубки; стекловолокна типа E;

МКЭ (FEM) – Finite Element Method. Метод конечных элементов;

ISO – International Organization for Standardization. Международная организация стандартизации;

UTS – Universal Testing Machine. Универсальная машина для статических испытаний.

1. Введение

В области гражданского строительства, а именно в изготовлении трубопроводов, применяемых для подачи и транспортировки питьевой воды, химических установок для перекачки агрессивных жидкостей и систем канализации для сточных вод, использование пластика, армированного стекловолокном, уже не является новинкой [1]. В таких стеклопластиковых трубах для склеивания стеклянных волокон обычно применяются термореактивные смолы, такие как полиэфирные, винилэфирные и эпоксидные [2]. Гибкие композитные трубы из высокотемпературного полиэтилена, армированные арамидными волокнами, обладают термостабильностью при температуре ниже 95 °C и внутреннем давлении ниже 4 МПа [3]. Готовые элементы, такие как крышки люков для водопроводных и канализационных сетей или пешеходные дорожки, также производятся с использованием цементных композитов, армированных волокном, и композитов на основе термопластичных отходов с армированием из литейного песка и стали [4].

В последние годы композитные крышки люков и крышки резервуаров из композитных материалов широко применяются для обеспечения доступа к системам центрального теплоснабжения, системам транспортировки жидкостей, канализационным системам и геотермальным установкам [5]. В коррозионных средах традиционные крышки люков, изготовленные из материалов, таких как сталь, литая сталь и железобетон, часто заменяются композитными материалами нового поколения, такими

как GFRP, для решения проблем коррозии. Крышки люков, изготовленные из композитных материалов, имеют множество преимуществ по сравнению с металлическими крышками. Они обеспечивают высокое соотношение прочности и жесткости к массе, а также обладают легкостью, что позволяет справиться с их установкой одному человеку. Кроме того, они характеризуются высокой стойкостью к химическим веществам (коррозии), обладают электроизоляционными свойствами и обеспечивают значительное снижение теплопередачи, защищая пешеходов от воздействия подземной среды. Они также генерируют меньше шума при движении пешеходов или автомобилей по сравнению с чугунными покрытиями [5].

Композитные материалы сложные в переработке, не имеют перепродажной стоимости, что исключает риск кражи и связанных с ней случаев серьезных аварий и травм, вызванных отсутствием крышек люков. Еще одним преимуществом использования стеклопластика для изготовления покрытий является то, что такие материалы практически не мешают сигналам беспроводной связи в случае защитных применений электрической коммутации для технологии интеллектуальных сетей [1]. Стеклопластики, применяемые при создании крышек для люков, подвержены воздействию условий окружающей среды, таких как влажность, температурные циклы, ультрафиолетовое излучение. Это объясняется тем, что свойства полимерной матрицы меняются под долгосрочным влиянием окружающей среды [6]. Для винилэфирной смолы наблюдается увеличение некоторых характеристик (степень сшивки, температура стеклования, прочность на растяжение) при выдержке в атмосферных условиях до 12 месяцев, однако длительное воздействие приводит к небольшому снижению показателей [7].

Композитные материалы на основе полиэфирных смол, произвольно армированных стекловолокном (SMC), демонстрируют стабильные механические свойства даже после длительного контакта с водой [8]. При этом после погружения полиэфирной смолы в воду более чем на год отмечается незначительное снижение модуля изгиба E на 5% и прочности на изгиб на 3,2% [8]. При аналогичной продолжительности погружения водой винилэфирного композита модуль упругости при изгибе и предел прочности при изгибе снижаются на 6,7 и 12,2% соответственно [8]. В случае стеклопластика на основе эпоксидной смолы подобные условия приводят к уменьшению механических свойств: модуль упругости при изгибе снижается на 22%, а предел прочности при изгибе – на 31,25% [8]. Такие результаты указывают на то, что полиэфирную смолу можно использовать при изготовлении труб или крышек люков, используемых в канализационных системах. Снижение механических свойств полимерной матрицы, армированной стекловолокном, основывается на деградации поверхности соединения стекловолокна и матрицы, а также самой матрицы [8]. Исследования указывают на важность учета анизотропии композиционных материалов и стыков между сегментами при проектировании и анализе надежности композитных крышек [9].

В этой работе был спроектирован новый люк, сделанный из трехслойного композита на основе полиэфирного стеклопластика с дополнительным ребром жесткости, чтобы численно оценить валидность использования подобных материалов для производства люков.

2. Основные положения

Цель исследования. Чтобы использовать новый многослойный композит для изготовления крышек люков, необходим тщательный анализ напряжений и деформаций в механически нагруженных крышках. Следовательно, основной целью данного исследования является анализ напряжений и деформаций, возникающих в крышке люка, изготовленной из многослойного композитного материала, используя метод конечных элементов (МКЭ). Также целью является валидация модели, созданной МКЭ, через экспериментальные тестирования фактического люка.

Новизна проекта. В области гражданского строительства уже давно применяется пластик, армированный стекловолокном, для изготовления трубопроводов и других систем. Однако в данном исследовании был разработан новый трехслойный композитный материал для люков на пешеходных линиях. Он также может быть использован для дорожных люков с армированием стальной сеткой. Многослойный композит состоит из листов полиэфирной смолы, армированных стекловолокном. Новизной данного исследования является многослойная композитная структура и топология с использованием ребра жесткости для повышения прочности. Композитные материалы из полиэфирной смолы также обладают большей пластичностью перед потерей целостности [8].

3. Материалы и методы

Крышки люков представляют собой круглые или квадратные пластины, которые составляют покрытие канализационных систем. Как правило, они располагаются на тротуарах или дорогах и поэтому должны быть очень прочными и долговечными, чтобы выдерживать нагрузку и воздействие на них постоянного веса транспортных средств. Обычно они изготавливаются из чугуна, а иногда и из бетона, чтобы выдерживать большие нагрузки. Обычно они весят около 50 кг в зависимости от используемого материала и размера и часто имеют круглую форму.

Крышки люков имеют определенные стандарты и спецификации, которых необходимо придерживаться независимо от материала, размера и формы крышки люка. Стандарты, на которые следует обратить внимание, включают:

- BS EN 124: европейский стандарт для крышек желобов и люков для транспортных средств и пешеходов (послужил основой и руководством для этой работы) [10].
- BS 497: спецификация для крышек люков, решеток дорожных водостоков и рам для дренажа.
- BS 7903: руководство по выбору и использованию крышек желобов и люков для установки на шоссе.
- BS PAS 25: пластмассовые рамы для использования в верхушках водостоков и люков в пешеходных зонах.
- ASTM F1142-98: стандартные технические условия для сборки крышки люка на болтах масло- и водонепроницаемой.
- ASTM F1143-98: стандартные технические условия для сборки крышки люка, закрепленной болтами, приподнятой, масло- и водонепроницаемой.

Крышки люков, предназначенных для входа человека, должны соответствовать требованиям безопасности, действующим в месте установки. Как правило, диаметр люка должен быть не менее 600 мм. Крышки люков должны быть подвергнуты нагрузочным испытаниям, чтобы убедиться в их долговечности и прочности.

3.1. Оптимизированная геометрия крышки канализационных люков

Оптимизация геометрии люков предполагает проектирование их формы и структуры с целью достижения максимальной прочности, долговечности и эффективности. Композитные люки обычно изготавливаются из армированных материалов, таких как стекловолокно или углеродное волокно, которые обеспечивают выдающееся соотношение прочности и веса по сравнению с традиционными материалами, такими как бетон или чугун. Однако для достижения максимальной прочности канализационных люков необходимо правильно подобрать оптимальную геометрию в соответствии с выбранными материалами.

1. Круглая форма: композитные люки часто имеют конусообразную или цилиндрическую форму, поскольку эти формы распределяют нагрузки более эффективно, обеспечивая структурную целостность и минимизируя концентрацию напряжений. Более того, такая конструкция также обеспечивает удобство при демонтаже и установке.

2. Ребристая структура: геометрия композитных люков включает в себя внутренние ребра или арматурные конструкции. Эти элементы повышают жесткость и несущую способность, предотвращая деформации и обеспечивая долговременную прочность. Был проведен ряд исследований, где увеличение количества радиальных ребер на люках влияет на уменьшение максимального напряжения. Вдобавок анализ результатов максимального прогиба в центре крышки показывает, что при увеличении радиуса внутреннего кругового ребра максимальное вертикальное смещение уменьшается. В нашем исследовании оптимальная геометрия канализационного люка базируется на результатах следующей статьи [11].

3. Конструкция фланца и кромки: верхние отверстия композитных люков обычно имеют фланец или выступающую кромку. Такая конструкция обеспечивает простоту установки и надежное соединение с крышкой люка, предотвращая проникновение воды и повышая общую герметичность.

4. Отверстия для доступа и каналы: конструкция композитных люков предусматривает соответствующие отверстия и каналы для доступа в целях обслуживания и осмотра. Эти отверстия обеспечивают легкий доступ к подземным коммуникациям, таким как канализационные линии или электрические кабели, что упрощает ремонт и техническое обслуживание.

5. Противоскользящие элементы: для повышения безопасности композитные люки часто оснащаются противоскользящими элементами на поверхности, такими как текстурированные рисунки или покрытия. Это помогает предотвратить несчастные случаи, обеспечивая лучшее сцепление для рабочих или пешеходов, которые могут ходить по люку [12].

6. Коррозионностойкие материалы: композитные люки известны своей превосходной устойчивостью к коррозии, что делает их идеальными для использования в суровых условиях. Оптимизированная геометрия обеспечивает покрытие материалами всех участков, подверженных коррозии, таких как стыки и края, что обеспечивает долговременную прочность и снижает потребность в техническом обслуживании.

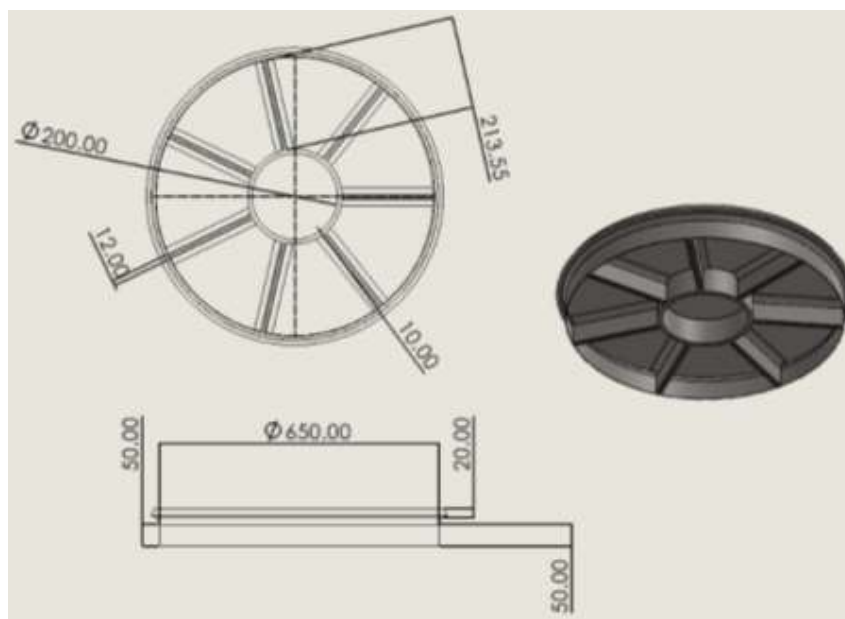


Рисунок 1 – Геометрия люка

При проектировании композитных люков крайне важно учитывать факторы, такие как требования к нагрузке, условия движения, состояние почвы, и любые специфические требования проекта. Оптимизированная геометрия гарантирует, что композитные люки эффективно справятся с внешними нагрузками, обеспечивая долговечное и надежное решение для доступа к подземным коммуникациям. Финальная геометрия канализационного люка включает в себя семь радиальных ребер для прочности, с фланцами для достижения герметичности и с узорами на поверхности для достижения противоскользящих элементов, как представлено на рисунке 1.

3.2. Материалы

В этой работе в качестве основы для люка был использован полиэфирный листовой пресс-материал (SMC), армированный стекловолокном. Стекловолокно – это продукт, изготовленный из очень тонких стеклянных волокон. Он стал полезным и эффективным благодаря своей способности заменить асбест во многих областях применения в качестве экологически чистой альтернативы. Непрерывное стекловолокно используется в электроизоляции, а также в качестве армирующего агента для армирования цемента и пластмассы.

Есть несколько видов/классов стекловолокна: A, AR, C, E, S и т.д. Эти наиболее распространенные типы характеризуются следующим образом [13]:

стекло A: щелочесодержащее стекло, используемое для производства волокна;

стекло E: обычное стекло, используемое в непрерывных стеклянных волокнах, обладает высоким электрическим сопротивлением и содержит щелочи менее 1%;

стекло S: характеристики аналогичны стеклу E, но имеют более высокую прочность.

Эти различные классы основаны на производственном процессе стекловолокна. Однако при выборе стекловолокна в качестве композитного материала необходимо сначала оценить желаемые свойства. Например, для GRC необходимо использовать стекловолокна типа E или стекла AR, которые либо обладают низкой щелочностью, либо устойчивы к щелочным средам в связи с реактивностью, возникающей при взаимодействии со щелочными компонентами цемента [14]. Если продукт требует высокой прочности на растяжение и способен выдерживать большие нагрузки, то, вероятно, следует использовать стекловолокно типа S [14]. Крайне важно оценить характеристики и свойства желаемого изделия, чтобы правильно понять, что нужно для армирования.

Пластмассовые смолы, как правило, обладают достаточной прочностью на сжатие, но довольно слабы на растяжение. В то время как стеклянные волокна прочные на растяжение, но слабые на прочность сжатия. В этом отношении вместе они могут сопротивляться сжимающим и растягивающим нагрузкам [15]. Крошечные нити из стекловолокна предотвращают образование трещин или дефектов внутри продукта и его разрушение в результате.

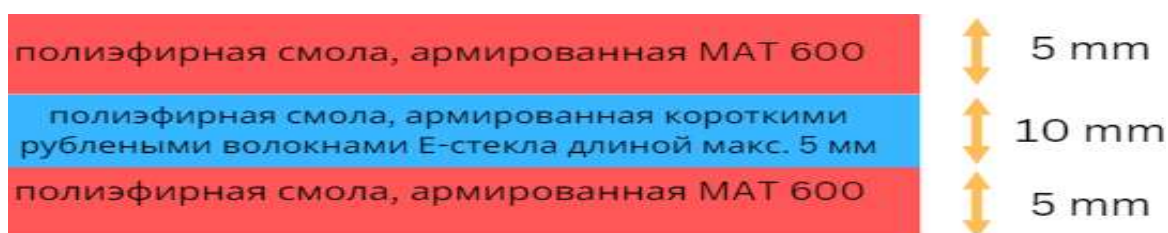


Рисунок 2 – Структура люка

На рисунке 2 изображена структура композитного материала, используемого для изготовления крышки люка для этой работы. Сэндвич-композит содержит три слоя в поперечном сечении: сердцевина сделана из подслоев полиэфирной смолы, армированной MAT 600, и с двух сторон его покрывает два слоя полиэфирной смолы, армированных короткими рублеными волокнами E-стекла длиной макс. 5 мм. Ребро жесткости полностью сделано из полиэфирной смолы, армированной MAT 600. Материал MAT представляет собой стекловолоконный материал с рублеными нитями, также известный как нетканое полотно. Плотность этого материала составляет 600 г/м². Он представляет из себя нетканый материал, изготовленный из E-стекловолокна путем случайного и равномерного распределения непрерывных ровингов нитей длиной 50 мм, сочетаемых с полиэфирным связующим в порошковой форме. Он подходит для использования в ручном формовании стеклопластика, такого как различные листы, панели, корпуса лодок, а также для создания коррозионноустойчивых транспортных средств.

Согласно коммерческому производителю, используемый SMC материал (полиэфирная смола, армированная MAT 600) имеет следующие свойства [16]:

Таблица 1 – Свойства SMC армированный MAT 600

| № | Свойство | Значение |
|---|-------------------------|-------------------------|
| 1 | Плотность | 11,90 г/см ³ |
| 2 | Прочность на изгиб | 115 МПа |
| 3 | Модуль изгиба | 14.000 МПа |
| 4 | Коэффициент Пуассона | 0.324 |
| 5 | Прочность на растяжение | 86 МПа |
| 6 | Ударная вязкость | 120 кДж/м ² |
| 7 | Дугостойкость | 180 сек |

| | | |
|----|---------------------------|---------------|
| 8 | Огнестойкость по UL 94 HB | V0 на 1,6 мм |
| 9 | Теплостойкость | 250 °C |
| 10 | Водопоглощение | 0,03 – 0,05 % |

Как известно, при проведении конечно-элементного анализа крышки люка необходимо определить механические свойства материалов, составляющих каждый слой. Для определения механических свойств материалов, соответствующих каждому слою, проводились экспериментальные испытания стандартизированными образцами в соответствии с европейскими стандартами (ISO 14125), учитывающими форму и размер образцов. Для создания композитных образцов, армированных либо материалом МАТ 600, либо короткими рублеными волокнами из стекловолокна типа Е, сначала были изготовлены две композитные плиты размером 400×300×6,5 мм³. Содержание стекловолокна в композите полиэфирной смолы, армированном МАТ 600, составляло 42 массовых процента. Содержание стекловолокна в композите, армированном короткими рублеными стекловолокнами, составляло 30 массовых процента. Затем из каждого типа композитной плиты, армированной либо материалом МАТ 600, либо короткими рублеными стекловолокнами, было вырезано по десять образцов для испытания на изгиб методом трех точек.

3.3. Процесс изготовления

Процесс производства имеет решающую важность в определении механических свойств люка, изготовленного из композитных материалов. Сначала на специально подготовленную форму, смазанную воском 827, помещается слой полиэстера, армированного МАТ 600. Затем на форму были нанесены слои полиэфирной смолы, армированные рублеными стекловолокнами. Затем в соответствии с рисунком 1 на форму наносился последний слой крышки люка. Ламинированная композитная крышка люка была затем запрессована гидравлическим прессом. После того как он был уплотнен, он был оставлен для затвердевания примерно на 30 минут, а затем удален, чтобы продолжить сушку и отверждение.



Рисунок 3 – Крышка люка после прессы

3.4. Тестирование

Метод измерения, используемый для измерения и регистрации деформаций, возникающих в крышке люка, основан на методе электрореактивной тензометрии.



Рисунок 4 – Испытания крышки люка на механическую прочность на машине UTS

Давление в 2000 Н было оказано на изготовленный люк с середины, вертикально вниз, как показано на рисунке 4. По всей толщине люка были установлены тензодатчики, которые высчитывали деформацию люка при разных значениях давления. В результате был построен график силы против максимальной деформации.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Анализ канализационного люка методом конечных элементов

Модель крышки люка была протестирована конечно-элементным анализом с использованием коммерческого программного обеспечения Comsol Multiphysics. Конечно-элементная модель крышки люка представлена на рисунке 6. Геометрия была создана в SolidWorks и экспортирована с помощью Livelink для проведения анализа МКЭ. Для моделирования композитных материалов и расчета действующих напряжений и сил на крышку люка в Comsol использовались две физические модели: Solid Mechanics и Layered Shell.

Для описания поведения твердых материалов при механических нагрузках, включая упругую и пластическую деформацию, анализ методом конечных элементов требует определения соответствующих граничных условий, которые описывают напряжение, деформацию и их взаимосвязь. Эти условия и начальные параметры обеспечивают основу для моделирования и анализа механической реакции материалов с использованием физического модуля Comsol Solid Mechanics.

Конструкция крышки люка соответствует Госстандарту Республики Казахстан (2013) [17], где устанавливается расчетная нагрузка в размере 5.3 фунта на поверхность обшивки люка. Композитная версия стальной крышки люка отвечает жесткостным и прочностным требованиям Комитета технического регулирования и метрологии РК [17], включая максимальный прогиб в пределах 70 мм и коэффициент безопасности 3,3 для обеспечения структурной прочности. Переходя к геометрии, канализационный люк технологически ограничен максимальной толщиной композитной оболочки в 20 мм и диаметр люка должен быть более 600 мм [18]. Прочностной анализ композитных оболочек проводится с использованием критерия максимальных напряжений (уравнение 1) [19].

$$\xi = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sigma_{XT}^f}{\sigma_{XT}^f} \text{ or } \frac{\sigma_{XC}^f}{\sigma_{XC}^f} \\ \frac{\sigma_{YT}^f}{\sigma_{YT}^f} \text{ or } \frac{\sigma_{YC}^f}{\sigma_{YC}^f} \\ \frac{\sigma_{XT}^f}{\sigma_{YT}^f} \text{ or } \frac{\sigma_{XC}^f}{\sigma_{YC}^f} \end{array} \right. \quad (1)$$

Предел прочности слоя оболочки при растяжении (сжатии) вдоль и поперек волокон представлен соответственно σ_{XT}^f и σ_{YT}^f (σ_{XC}^f и σ_{YC}^f). Прочность на сдвиг слоя в его плоскости обозначается σ_{XY}^f . Компоненты тензора напряжений σ_{XT} , σ_{YT} (σ_{XC} , σ_{YC}) и σ_{XY} определяются относительно той же системы координат, что и заданные предельные прочности слоя. Значение $\xi \geq 0,3$ (с учетом коэффициента безопасности) свидетельствует о соответствии критерию разрушения.

Используя граничные условия метода конечных элементов (МКЭ), канализационный люк с радиусом $R=650$ мм и простым подкрепленным краем был подвергнут равномерной постоянной нагрузке q в области квадрата, расположенного в центре канализационного люка (см. рисунок 5 а и б). Условие равновесия для радиуса r элемента пластины, как показано на рисунке 5, было использовано для определения внутренней поперечной силы Q (уравнение 2) [20].

$$Q = \frac{-\pi r^2 q}{2r\pi} \quad (2)$$

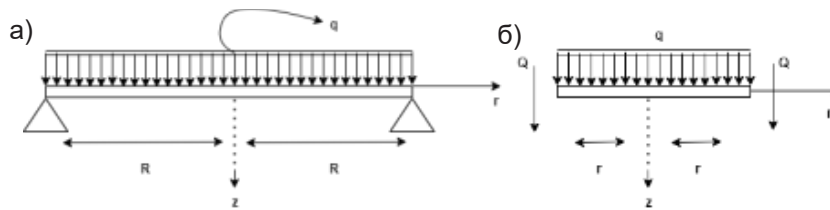


Рисунок 5 – а) конечно-элементная модель крышки люка и б) конечно-элементная модель участка приложенной силы

В результате симуляции каждый узел элемента имеет шесть степеней свободы. Конечно-элементная модель, используемая в анализе, состоит из 63 102 элементов и 18 126 узлов. Конкретно 5586 узлов соответствуют крышке, 669 узлов соответствуют опоре и 1022 узла соответствуют пуансону. Для построения данной модели использовалась сетка, разработанная в программе Comsol Solid Mechanics.

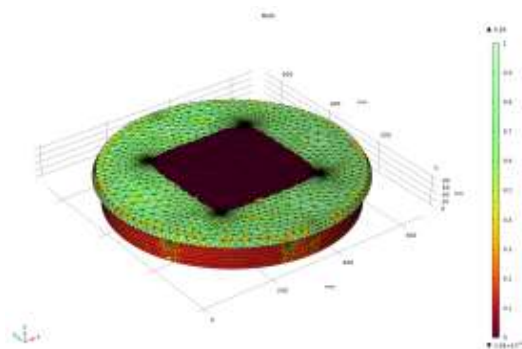


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель

На рисунке 7 (а и б) представлены граничные условия и внешняя нагрузка, которая прикладывается к модели. Внешняя сила постепенно передается к блоку (участок зеленого цвета), а затем через контактную область между блоком и композитной крышкой доходит до люка. В конечно-элементной модели определен контакт «узел-поверхность» между крышкой и блоком, а также между крышкой и опорой. В дополнение к этому внешней боковой силой канализационного люка определен как граничное условие в связи с ограничением люка грунтом.

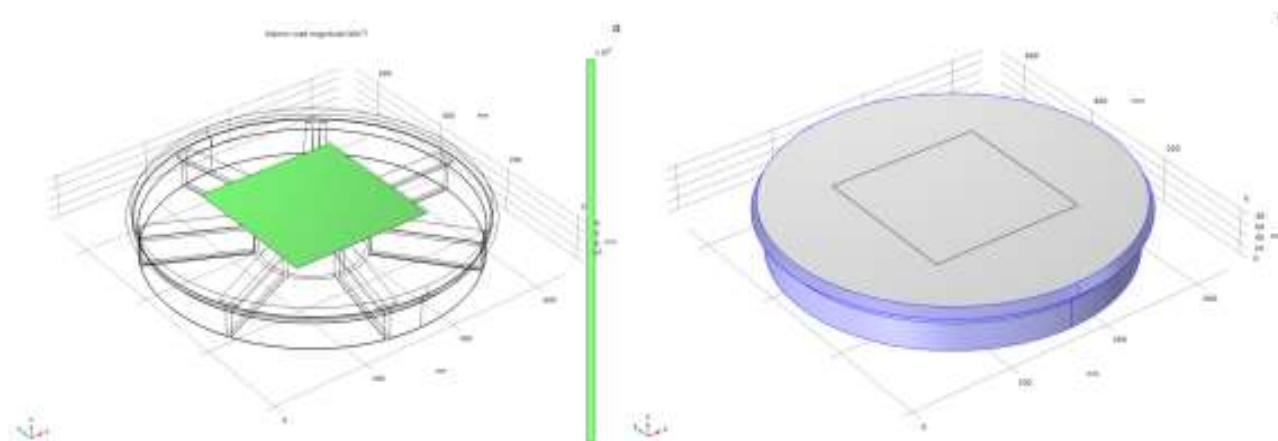


Рисунок 7 – а) участок приложенной силы (левая сторона)
и б) граничные условия и внешняя нагрузка (правая сторона)

На рисунке 8 (а и б) показаны результаты деформации и напряжения крышки канализационного люка. Поскольку внешняя сила была приложена в центре объекта, основные изменения были замечены в соответствующей области. Однако следует отметить, что шкала деформации представлена в -9 степени, указывая на незначительные изменения материала. Следовательно, согласно результатам симуляции, предложенная модель канализационного люка соответствует государственным стандартам и выдерживает соответствующую нагрузку с минимальными деформациями.

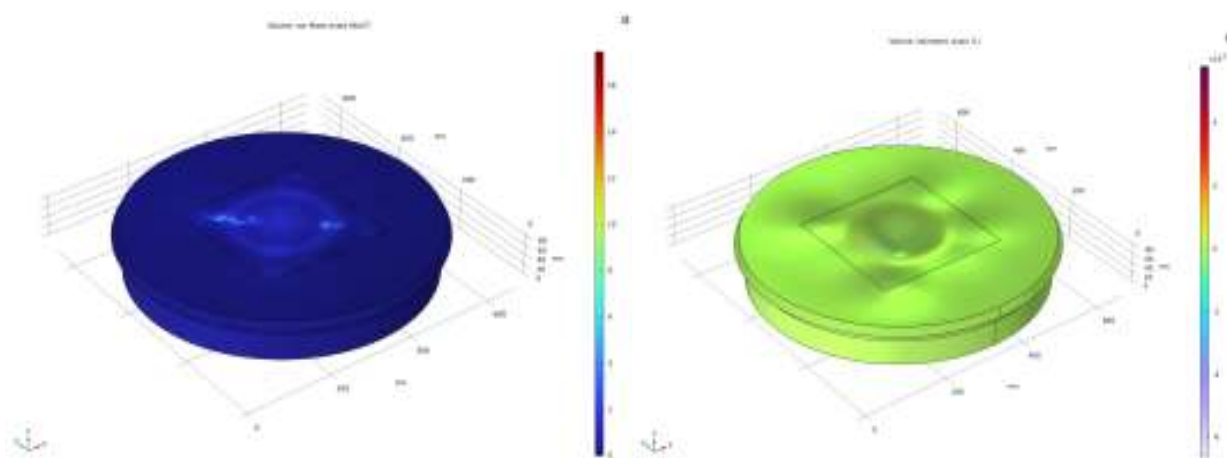


Рисунок 8 – а) изометрический вид результатов напряжения
и б) изометрический вид результатов деформации

4.2 Сравнительный анализ экспериментальной и компьютерной модели

Кривые сила – деформация, полученные в ходе экспериментального испытания, были сравнены с кривыми, полученными в результате анализа МКЭ, как показано на рисунке 9. Значения, полученные из эксперимента и МКЭ, показывают похожую тенденцию, что демонстрирует валидность созданной модели.

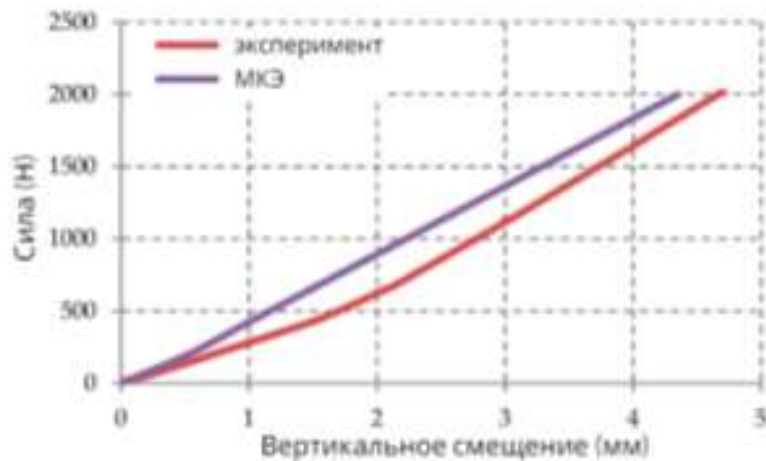


Рисунок 9 – Результаты: сила против смещения

Чтобы еще больше подчеркнуть корреляцию между результатами экспериментального испытания и МКЭ для исследуемой круглой композитной крышки люка, в данном исследовании сравниваются деформации, зарегистрированные при различных положениях датчика деформации: в радиальном и тангенциальном направлениях. Деформации в радиальном и тангенциальном направлениях, соответствующие каждому тензометрическому датчику, строятся против вертикальной деформации люка, вызванной вертикальной силой. Рисунки 10 и 11 демонстрируют сравнительные графики, полученные в радиальном и тангенциальном направлении по отношению к цилиндрической системе координат.

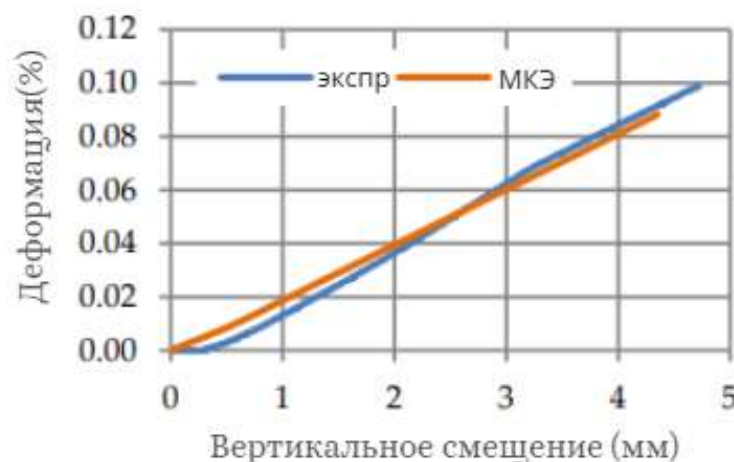


Рисунок 10 – Результаты: радиальная деформация против смещения

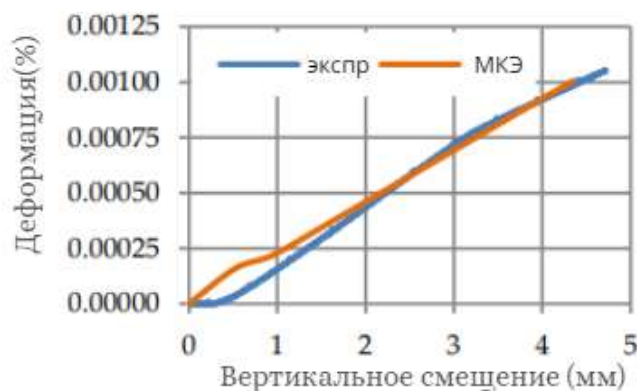


Рисунок 11— Результаты: тангенциальная деформация против смещения

5. Заключение

Схожая тенденция и большое количество почти одинаковых значений между экспериментальными данными по деформации и результатами МКЭ показывают валидность построенной модели МКЭ. Максимальная деформация люка была 0,165% в тангенциальном направлении и 0,111% в радиальном направлении, что показывает: значения деформаций были в пределах приемлемого. Анализ МКЭ показывает максимальное напряжение 12,75 МПа в анализируемой крышке люка, соответствующее полиэфирной смоле МАТ 600. Это напряжение значительно ниже среднего максимального напряжения изгиба 49 МПа для композита МАТ 600 стекловолокно/полиэстер. Композитные крышки люков демонстрируют высокую прочность, способную выдерживать внешние силы, превышающие 2000 Н. Это делает их идеальными для использования не только в водопроводных и канализационных сетях, но и на городских улицах с пешеходным движением. Однако для обеспечения безопасности на улицах с интенсивным транспортным движением требуется дополнительный анализ, исходя из реальных данных о нагрузках от автотранспорта. Это позволит определить максимальную грузоподъемность композитных крышек. Возможно, потребуется внести изменения в геометрию или структуру материала композита, чтобы уверенно обеспечить его способность выдерживать такие нагрузки.

Таким образом, композитные крышки люков предлагают значительные преимущества, включая высокую прочность и пригодность для использования как в водопроводных и канализационных сетях, так и на городских улицах с пешеходным движением. С дополнительным анализом и оптимизацией топологии они могут стать надежным решением для городских улиц с интенсивным транспортным движением.

Список литературы

- 1 Rafiee R. Simulation of the long-term hydrostatic tests on Glass Fiber Reinforced Plastic pipes / R. Rafiee, B. Mazhari // *Composite Structures*. – 2016. – № 136. – С. 56–63.
- 2 Environmental life cycle analysis of pipe materials for sewer systems / E. Vahidi, E. Jin, M. Das [и др.] // *Sustainable Cities and Society*. – 2016. – № 27. – С. 167–174.
- 3 Experimental study on the thermostable property of aramid fiber reinforced PE-RT pipes / G. Qi, Y. Wu, D. Qi [и др.] // *Natural Gas Industry B*. – 2015. – Т. 5. – № 2. – С. 461–466.
- 4 El Haggag, S. Reinforcement of thermoplastic rejects in the production of manhole covers / S. El Haggag, L. El Hatow // *Journal of Cleaner Production*. – 2009. – Т. 4. – № 17. – С. 440–446.
- 5 Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials / B.E. Tawfik, H. Leheta, A. Elhewy, T. Elsayed // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. – 2017. – Т. 2. – № 9. – С. 185–198.

- 6 Cerbu C. Moisture effects on the mechanical behavior of fir wood flour/glass reinforced epoxy composite / C. Cerbu, C. Cosereanu // *BioResources*. – 2016. – Т. 4. – № 11. – С. 1. ISSN 8364-8385
- 7 Mezghani, K. Long term environmental effects on physical properties of vinylester composite pipes / K. Mezghani // *Polymer Testing*. – 2012. – Т. 1. – № 31. – С. 76–82.
- 8 Effect of Moisture on GFRP Composite Materials / N. Sateesh, P.S. Rao, D.V. Ravishanker, K. Satyanarayana // *Materials Today: Proceedings*. – 2015. – Т. 4-5. – № 2. – С. 2902–2908.
- 9 Bondyra A. Design of composite tank covers / A. Bondyra, M. Klasztorny, A. Muc // *Composite Structures*. – 2015. – № 134. – С. 72–81.
- 10 BS EN 124:1994 Gully Tops and Manhole Tops for Vehicular and Pedestrian Areas. Design Requirements, Type Testing, Marking, Quality Control : дата введения 01-01-1994. – London : BSI Standards, 1994. – 40 с.
- 11 An auto lifting device to lift manhole cover with ergonomics consideration / W.N.A.W. Draman, D.L Majid, M.I. Ishak [и др.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – № 020067. – С. 1.
- 12 Калашникова М.С. Сравнительный анализ изображений на наземных люках зарубежных стран / М.С. Калашникова, В.П. Калашников // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение*. – 2010. – Т. 25. – № 1. – С. 86–92. ISSN 2224-9877.
- 13 Humphreys J. The manufacturing technology of continuous glass fibres: K. L. Loewenstein Elsevier Scientific Publishing Company 300 pp £10.60 / J. Humphreys // *Composites*. – 1974. – Т. 6. – № 5. – С. 267.
- 14 Effect of fiber prestressing on mechanical properties of glass fiber epoxy composites manufactured by vacuum-assisted resin transfer molding / M. Mohamed, M.M. Selim, H. Ning, S. Pillay // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2019. – Т. 1-2. – № 39. – С. 21–30.
- 15 Gotch T. The failure of reinforced plastics: Edited by F.L. Matthews. Published by Mechanical Engineering Publications Ltd, PO Box 24, Northgate Avenue, Bury St Edmunds IP32 6BW, UK. ISBN 0 85298 709 9/297, softcover, 74 pages. 21.00 (UK), 23.10 (rest of the world) / T. Gotch // *Reinforced Plastics*. – 1990. – Т. 5. – № 34. – С. 8.
- 16 Meyer, R. W Handbook of Polyester Molding Compounds and Molding Technology / R.W. Meyer. – New York : Springer, 2012. – 371 с. ISBN 978-1-4613-1961-0.
- 17 СТ РК 2384-2013. Люк смотровых колодцев и дождеприемник ливневых колодцев из композитных материалов: дата введения 2010-10-17. – Астана : Стандарт Республики Казахстан, 2013. – 20 с.
- 18 Hatow L. Utilization of thermoplastic rejects with different reinforcing elements in the production of manhole covers : специальность Environmental Engineering : Master Thesis / Hatow. – Cairo, 2013. – 122 с.
- 19 Chawla, K.K. Composite Materials: Science and Engineering / K.K. Chawla. – New York : Springer, 1998. – 475 с. – ISBN 978-1-4757-2966-5.
- 20 Optimization of the circular manhole cover made of ductile cast iron using the finite element method/ M. Lovrenić-Jugović, M. Glavaš, Z. Štrkalj [и др.] // *Machines. Technologies. Materials*. – 2018. – Т. 5. – № 12. – С. 225–233.

References

- 1 Rafiee R. and Mazhari B. (2016) *Composite Structures*, 136, pp. 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.058>
- 2 Vahidi E., Jin E., Das M., Singh M. and Zhao F. (2016) *Sustainable Cities and Society*, 27, pp. 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.028>
- 3 Qi G., Wu Y., Qi D., Wei B., Li H., Ding N. and Cai X. (2015) *Natural Gas Industry B*, 2(5), pp. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2015.09.023>
- 4 El Haggag S. and El Hatow L. (2009). *Journal of Cleaner Production*, 17(4), pp. 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.07.007>
- 5 Tawfik B. E., Leheta H., Elhewy A. and Elsayed. T. (2017) *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(2), pp. 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.09.005>
- 6 Cerbu C. and Cosereanu C. (2016) *BioResources*, 11(4). <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.8364-8385>
- 7 Mezghani K. (2012) *Polymer Testing* 31(1), pp. 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.10.001>
- 8 Sateesh N., Rao P.S., Ravishanker D.V. and Satyanarayana K. (2015) *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), pp. 2902–2908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.252>
- 9 Bondyra A., Klasztorny M. and Muc A. (2015) *Composite Structures*, 134, pp. 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.008>
- 10 Gully Tops and Manhole Tops for Vehicular and Pedestrian Areas: Design Requirements, Type Testing, Marking, Quality Control. Pretoria: SABS Standards Division (London, UK, 1994).
- 11 Draman W.N.A.W., Majid D.L., Ishak M.I., Rosli M.U., Lailina N.M. and Ismail, R.I., *AIP Conference Proceedings*, 020067, (2017). <https://doi.org/10.1063/1.5002261>
- 12 Kalashnikova M.S. and Kalashnikov B.P. (2010) *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 12(2), pp. 86–92

- 13 Humphreys J. (1974) Composites, 5(6), 267. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(74\)90368-1](https://doi.org/10.1016/0010-4361(74)90368-1)
- 14 Mohamed M., Selim M. M., Ning H. and Pillay S. (2019) Journal of Reinforced Plastics and Composites, 39 (1–2), pp. 21–30. <https://doi.org/10.1177/0731684419868841>
- 15 Gotch T. (1990) Reinforced Plastics, 34(5). [https://doi.org/10.1016/0034-3617\(90\)90088-v](https://doi.org/10.1016/0034-3617(90)90088-v)
- 16 Meyer R.W. (1987) Handbook of polyester molding compounds and molding technology. (Springer, US)
- 17 Lyuk smotrovyyh kolodcev i dozhdepriemnik livnestochnyyh kolodcev iz kompozitnyh materialov. Tekhnicheskie usloviya. Standart Respubliki Kazakhstan, ST RK 2384 (2013).
- 18 Hatow L. (2007) Utilization of thermoplastic rejects with different reinforcing elements in the production of manhole covers, Master thesis. AUC Knowledge Fountain.
- 19 Chawla K.K. (2021) Composite materials: Science and engineering.
- 20 Lovrenić-Jugović M., Glavaš Z., Štrkalj A., Lj S. and Radišić F. (2018) Machines. Technologies. Materials, 12(5), pp. 225–233.

Информация об авторе

Максат Темирхан

PhD Назарбаев университета, научный сотрудник, ТОО «Институт новых материалов»,
ул. Кабдолова, 10, 050062, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0001-6283-3401
E-mail: maksat.temirkhan@nu.edu.kz

Автор туралы мәлімет

Максат Темірхан

PhD Назарбаев Университеті, ғылыми қызметкер, «Жаңа материалдар институты» ЖШС, Кабдолов
көш., 10, 050062, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0001-6283-3401
E-mail: maksat.temirkhan@nu.edu.kz

Information about author

Maksat Temirhan

PhD Candidate Nazarbayev University, Research Assistant, Institute of New Materials LLP, Kabdolova
st. 10, 050062, Almaty, Kazakhstan
ORCID ID: 0000-0001-6283-3401
E-mail: maksat.temirkhan@nu.edu.kz