

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Цвета Светлин Тодорова

**СЪВРЕМЕННИ АДИТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ
РЕКОНСТРУКЦИЯТА И МОДЕРНИЗАЦИЯТА НА
ДЕКОРАТИВНИ ФАСАДНИ ЕЛЕМЕНТИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна
научна степен „доктор“**

**по докторска програма: „Ергономия и промишлен дизайн“
към професионално направление направление 5.13. „Общо
инженерство“**

Научни ръководители:

доц. д-р инж. Тихомир Атанасов Доврамаджиев

доц. д-р инж. Пенка Нелиева Златева

Рецензенти:

- 1.**
- 2.**

Варна, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден на202...г. в катедра
“Индустириален дизайн” и е насочен за защита.

Автор: инж. Цвета Светлин Тодорова

Заглавие: СЪВРЕМЕННИ АДИТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ
РЕКОНСТРУКЦИЯТА И МОДЕРНИЗАЦИЯТА НА ДЕКОРАТИВНИ ФАСАДНИ
ЕЛЕМЕНТИ

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - ВАРНА

инж. Цвета Светлин Тодорова

**СЪВРЕМЕННИ АДТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ
РЕКОНСТРУКЦИЯТА И МОДЕРНИЗАЦИЯТА НА
ДЕКОРАТИВНИ ФАСАДНИ ЕЛЕМЕНТИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „ДОКТОР“**

Варна, 2026 г.

Дисертационният труд съдържа 127 страници, включително 36 фигури, 3 формули и 3 таблици, оформени в 4 глави, изводи и заключения и списък на използваната литература от 146 заглавия, от които 22 на кирилица, 62 на латиница и 62 интернет източника.

Номерацията на фигурите представени в автореферата е номерацията от дисертационния труд

Защитата на дисертационния труд ще се състои на __/__/2026 г. от ч. в на открито заседание на жури, сформирано със Заповед на Ректора № ____/_____ г. Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Съхраняването на архитектурната идентичност и културната стойност на градската среда е от съществено значение в съвременното общество. Декоративните фасадни елементи са не само естетически компонент, но и носители на историческа, технологична и художествена информация за съответната епоха. Част от историческите сгради от края на миналия и началото на този век в България, често не попадат в регистъра на културното наследство, въпреки че притежават ясно изразена стилова идентичност и са подложени на ускорена деградация, вследствие на атмосферни, биологични и човешки фактори. Това води до загуба на уникални фасадни детайли, чието възстановяване с класически методи често е неефективно, скъпо и трудно приложимо.

В този контекст, използването на съвременни адитивни технологии (като 3D сканиране, дигитално моделиране и CNC фрезозане) предлага нови възможности за точно, бързо и икономически изгодно възстановяване на разрушени декоративни елементи. Актуалността на темата произтича от нуждата за прилагане на научно обосновани и технологично иновативни методи, които съчетават висока прецизност с естетическа и културна отговорност.

Дисертационният труд разглежда именно този съвременен подход и цели разработване на методика за реконструкция и модернизация на фасадни орнаменти чрез адитивни технологии, с което се отговаря на нарастващата необходимост от опазване и адаптиране на архитектурното наследство към съвременните реалности.

ФОРМУЛИРАНЕ НА ПРОБЛЕМА

В архитектурната практика се наблюдава нарастваща нужда от запазване и възстановяване на фасадите при сгради, които носят висока естетическа и културна стойност, но често остават извън обхвата на официалната реставрационна политика. Основният проблем произтича от факта, че голяма част от декоративните фасадни елементи са силно увредени или напълно разрушени, а използваните традиционни методи за реставрация са трудоемки, неточни и икономически неефективни. Липсва систематизиран, технологично осъвременен подход, който да съчетава прецизност, автентичност и дълготрайност при реконструкцията на такива фасадни орнаменти.

В този контекст възниква необходимост от формулиране на иновативна методика, която да използва възможностите на съвременните адитивни технологии – включително 3D сканиране, дигитално моделиране и цифрово фрезозане – с цел създаване на точни, устойчиви и визуално автентични реплики на увредените декоративни фасадни елементи. Липсата на подобна методика затруднява както практическото възстановяване на фасадното богатство на сградите, така и устойчивото съхранение на визуалната и културна идентичност на градската среда.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Целта на дисертационният труд е да се обоснове и създаде методика за възстановяване на декоративни фасадни елементи чрез съвременни адитивни технологии, като се търси оптималният баланс между традиционните реставрационни практики и дигиталните иновации. Така се поставя основа за устойчиво и съвременно съхранение на съществени елементи от визуалното наследство и стилового многообразие на архитектурната среда.

За постигането на тази цел са поставени следните основни задачи:

1. Да се изследва и анализира развитието на технологиите за реставрация на декоративни фасадни елементи
2. Да се създаде критерий за оценка на състоянието на фасадните елементи.
3. Да се разработи и експериментално валидира методика, включваща алгоритъм на технологичната последователност за реконструкция на декоративни фасадни елементи чрез прилагане на адитивни технологии.
4. Да се постигне модернизиране на репликите, чрез подобряване на визуалните и изолационни качества, спрямо тези на оригинала.

ОБЕКТ И ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Обект на изследване са декоративните фасадни елементи на сгради, които притежават стилова и естетическа идентичност, но не са със статут на недвижимо културно наследство. Въпреки това, те имат важно архитектурно и градоустройствено значение и често страдат от увреждания или загуба на автентични детайли.

Предмет на изследването са липсващите или силно увредени декоративни фасадни елементи, които често са най-застрашени от пълна загуба, поради своята конструктивна и материална деликатност.

ГРАНИЦИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Изследванията, резултатите, анализите и оценката на ефективността на предложената методика са извършени в контекста на архитектурни обекти и технологични решения, съответстващи на действащите нормативни изисквания и законодателства на Европейския съюз (ЕС) и Република България.

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

За изпълнение на поставената цел и задачи са използвани *следните* методи:

1. Аналитико-прогностичният метод – при изследването на традиционните технологии, прилагани в миналото за създаване и възстановяване на декоративни фасадни елементи, както и при анализа на съвременните дигитални и адитивни технологии, които разширяват възможностите за тяхното точно възпроизвеждане и модернизация;

2. Експерименталният метод – при провеждането на практически научно-изследователски експерименти за реконструкция на декоративни фасадни елементи, включващи 3D сканиране, триизмерно моделиране, създаване на физически модели чрез CNC фрезование, изработка на матрици посредством вакуумно формоване и повишаване на топлоизолационните качества на новите отливки от полимербетон.

МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследванията, представени в дисертацията, са проведени на следните места:

1. Лабораториите на катедра „Индустиален дизайн“ в ТУ– Варна;
2. Теренните наблюдения и документиране на фасадни елементи са извършени в град Варна

НАУЧНА НОВОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Направен е опит за систематизиране на основните принципи и последователност при дигиталната реконструкция на декоративни фасадни елементи чрез съвременни адитивни технологии. Формулирани са етапи и подходи, които могат да бъдат адаптирани, разширени или модифицирани в зависимост от конкретната архитектурна ситуация и степента на увреждане на елементите, като

акцентът е поставен върху запазването на визуалната автентичност и културната стойност на фасадните детайли.

Разгледаните и апробирани технологични процеси – от 3D сканиране и моделиране до създаване на матрици и отливки от полимербетон – предлагат нови възможности за ефективна и достъпна реконструкция на декоративни фасадни елементи. Допълнителен принос представлява прилагането на термоизолиращи покрития, които съчетават естетически и функционални предимства, като надграждат традиционната роля на фасадната декорация в съвременната архитектурна среда.

ПРАКТИЧЕСКА ЦЕННОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Разработената методика за реконструкция на декоративни фасадни елементи с помощта на адитивни технологии може да бъде приложима в реални архитектурни и дизайнерски практики, свързани с възстановяване, реновиране и модернизация на фасади на сгради с естетическа и културна стойност.

Систематизираният преглед на подходите и инструментите, разгледан в първите две глави на дисертацията, както и демонстрираната методика в третата и експерименталната четвърта глава, могат да послужат като основа за практическа работа на архитекти, проектанти, реставратори и индустриални дизайнери. Освен това, те могат да бъдат използвани и в обучението на студенти по архитектура, промишлен и екстериорен дизайн, като част от дисциплини, свързани с дигитално моделиране и реставрация.

АПРОБАЦИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Резултатите от дисертационния труд са апробирани чрез участие в авторитетни научни форуми и публикации в международни рецензирани издания. Изследването е представено и обсъждано на заседания на катедра „Индустриален дизайн“ при Технически университет – Варна. Основните научни приноси са публикувани в специализираното списание *Acta Technica Napocensis – Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, издавано от Техническия университет в Клуж-Напока, Румъния (брой 65/2022 и брой 66/2023), както и в *Annual Journal of Technical University of Varna* (брой 7/2023). Част от резултатите са представени и на Международната конференция ICMSMT 2024 – International Conference on Materials Science and Manufacturing Technology, проведена в Ченай, Индия, и публикувани в сборника *Materials Research Proceedings*, том 46, 2024 г.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ НА ТЕХНОЛОГИИТЕ ЗА РЕКОНСТРУКЦИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ НА ДЕКОРАТИВНИ ФАСАДНИ ЕЛЕМЕНТИ

В първа глава се разглеждат основните етапи и тенденции в развитието на фасадните технологии и декоративните архитектурни елементи, като се проследява тяхното значение в исторически, културен и технологичен контекст. Анализирани са промените във функцията и естетиката на фасадите – от класическите орнаменти и художествени решения до съвременните методи за реставрация и реконструкция, подпомагани от дигитални технологии.

Фасадата, като „лицето“ на сградата, изпълнява както естетическа, така и функционална роля – тя осигурява защита от външни влияния, регулира светлина и

топлина, и придава архитектурна идентичност. Декоративните фасадни елементи – корнизи, орнаменти, релефи и пластични детайли – са неизменна част от архитектурния израз, като отразяват стила и техниката на съответната епоха. В съвременния контекст те се разглеждат не само като украса, а като ключов компонент на архитектурното наследство и градската идентичност.

Историческият преглед очертава развитието на фасадната декорация в Европа и България – от античните и византийските архитектурни традиции до възрожденската и сецесионната стилистика на XIX и XX век. През вековете се променят материалите и технологиите: от камък и гипс до бетон, цимент и керамика, като всеки период носи своите специфични художествени и конструктивни решения. В България се открояват ярки примери на фасадно изкуство в градовете Пловдив, Русе, Варна и София, където декоративните елементи са съществена част от културния облик на сградите.

С времето фасадите се подлагат на комплексно въздействие от атмосферни, механични и биологични фактори, които водят до прогресивна деградация на материалите и декоративните детайли. Това налага системна поддръжка, реставрация и реконструкция, които придобиват ключово значение за съхраняването на архитектурното наследство. В настоящата глава се разглеждат и систематизират както традиционните, така и съвременните подходи за възстановяване – от класически техники с гипсови и циментови отливки до иновативни решения с въглеродно армирани полимери, епоксидни смоли и 3D принтиране. Прегледът на съвременните методики показва ясно технологично надграждане спрямо класическите подходи. Използването на 3D технологии и нови материали предлага прецизност, повторемост и висока ефективност, което отваря нови възможности за реставрация, особено при липсващи или силно разрушени фасадни елементи. Настоящата дисертация разработва именно такава методика, базирана на съвременни адитивни технологии и адаптирана към архитектурната практика в България. Разгледани са също и възможностите, които предлагат адитивните технологии – чрез дигитално моделиране, 3D сканиране и принтиране вече е възможно точно възпроизвеждане на сложни орнаменти, съчетание на автентичност и устойчивост, както и създаване на модернизирани фасадни решения, които съхраняват историческия облик на сградата. Тези технологии позволяват интегриране на нови материали, които подобряват устойчивостта, визуалните и топлоизолационни качества на декоративните фасадни елементи, като разширяват границите между традиция и иновация.

Изводи от Глава 1

Развитието на технологиите за реконструкция и модернизация на декоративни фасадни елементи е тясно свързано с културните и инженерните аспекти на архитектурното наследство. Фасадната декорация не е просто естетическа добавка, а носител на историческа идентичност, чието съхранение изисква устойчиви и прецизни технологични решения.

През вековете фасадните елементи преминават от ръчно изработени каменни и гипсови орнаменти до индустриално произведени облицовки и серийни детайли. Въпреки технологичния напредък, предизвикателство остава запазването на оригиналния характер и художествена стойност на детайлите.

Днешните реставрационни практики показват, че липсата на точна документация и деградацията на традиционните материали затрудняват възстановяването на фасадите. В този контекст адитивните технологии предлагат ефективна алтернатива за създаване на реплики с висока точност и дълготрайност, като се съчетава автентичност и модерна инженерна ефективност.

Въз основа на проведенния литературен анализ и актуалността на проблематиката може да се заключи, че съществува необходимост от разработване на методика за приложение на съвременни адитивни технологии при реконструкцията на декоративни фасадни елементи. Тази методика следва ясно да дефинира последователността на етапите чрез алгоритъм, който да определи ролята на дигиталните инструменти в процесите на възстановяване и формообразуване, както и да очертае техните предимства и приложимост в архитектурната практика. Формулирането и обосноваването на такава систематизирана технологична рамка представлява основна цел на настоящия дисертационен труд.

ГЛАВА 2. ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА АДИТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИЯ НА ДЕКОРАТИВНИ ФАСАДНИ ЕЛЕМЕНТИ

В някои случаи състоянието на фасадата е толкова компрометирано, че реставрацията на оригиналните декоративни елементи е невъзможна. Това се случва при сериозни структурни повреди, разрушения или силна ерозия на материалите, когато единственото решение е пълно възпроизвеждане на орнаментите.

Пълната репликация се прилага при разрушени или нестабилни конструкции, при необратимо увредени материали и когато се налага цялостна реконструкция на сградата. Целта е възстановяване на автентичния облик чрез създаване на точни копия на декоративните детайли. Традиционният метод включва изработване на калъп от оригинала, което често води до повреди и неточности, пренасяне на дефекти и нужда от ръчна корекция. Този процес е бавен, трудоемък и зависим от човешкия фактор.

Съвременните технологии като 3D сканиране, цифрова обработка, CNC фрезозане и 3D принтиране позволяват по-бързо, прецизно и безопасно възпроизвеждане на фасадни елементи без физически контакт с оригинала. Те осигуряват по-голяма точност, повторяемост и устойчивост на репликите, като същевременно съхраняват архитектурния стил и историческата стойност на сградата.

Настоящото изследване има за цел да анализира и демонстрира ефективността на съвременните технологични подходи, като покаже, как адитивните технологии могат да ускорят и подобрят възстановителните процеси в случаите, когато класическите методи са невъзможни или твърде трудоемки.

1. Разработване на критерий за оценка на състоянието на декоративните фасадни елементи

Оценката на състоянието на фасадните орнаменти е ключова стъпка в реставрационния процес, тъй като определя степента на увреждане, избора на метод за възстановяване и обхвата на необходимите интервенции. За целта е разработена система от критерии, която класифицира елементите според тяхното състояние и улеснява планирането на реставрационните дейности.

Критериите се основават на визуален анализ, механична стабилност и степен на материална загуба, като се разграничават четири категории:

● (Категория 1) - Добро състояние - минимална намеса.

● (Категория 2) - Леки увреждания - реставрация на място.

● (Категория 3) - Сериозни повреди – частична реконструкция или създаване на реплика.

● (Категория 4) - Пълна загуба - създаване на реплика.

Разработената система за оценка на декоративните фасадни елементи чрез цветови кодове позволява обективен анализ на тяхното състояние и избор на най-подходящ метод за възстановяване. Изследването се концентрира върху елементите в жълтата (●) и червената (●) категории, при които е необходимо цялостно възпроизвеждане чрез съвременни адитивни технологии. При жълтия код състоянието е сериозно компрометирано, като има значителни загуби на материал, дълбоки пукнатини или деформации, които правят класическата реставрация на място не винаги достатъчна, а при червения код, където декоративните детайли са напълно унищожени или липсват се изисква пълна реконструкция по аналогии или архивни данни. Елементите в зелената (●) и синята (●) категории позволяват локални интервенции с класически методи – като запълване на пукнатини, доизграждане на фрагменти и защитна обработка. Така системата осигурява практическа основа за вземане на решения при реставрация и реконструкция според реалното състояние на орнаменталните детайли.

2. Използване на 3D скенер за безконтактно и прецизно сваляне на дигитален отпечатък

Сканирането на декоративен елемент директно от фасадата е ключов етап в процеса на дигитализация, тъй като именно тогава се създава неговият цифров двойник, необходим за последващо възпроизвеждане. Този подход е особено важен при неподвижни или крехки елементи, които не могат да бъдат демонтирани без риск от повреда. Използването на ръчен 3D скенер позволява високоточен и безконтактен запис на геометрията и текстурата, като улавя дори най-фините релефи и декоративни детайли. Методът осигурява висока точност и запазва автентичността на оригинала, без да се засяга неговата структура. За да се гарантира качеството на дигиталния модел, процесът изисква внимателна подготовка — оценка на осветеността, състоянието на повърхността и оптимално позициониране на скенера. Правилното планиране и събиране на пълна база от данни са решаващи за успешната реконструкция и създаване на точна цифрова реплика на фасадния елемент.

3. Корекция и подобрене на 3D модел в софтуер за триизмерно моделиране

След 3D сканирането на декоративния фасаден елемент следва цифрова обработка и оптимизация на модела, за да се отстранят дефекти като шупли, пукнатини и неравности. Това се извършва в софтуери за 3D моделиране като ZBrush, които позволяват прецизно изглаждане и подобряване на текстурата, без загуба на детайли. Съвременните програми използват алгоритми с изкуствен интелект за автоматично възстановяване на липсващи части чрез симетрично копиране, анализ на сходни елементи или пълна реконструкция, когато няма референтен модел. Тези техники значително ускоряват процеса и осигуряват точност и автентичност на резултата. Предимствата на дигиталната обработка включват подобро качество,

елиминирани на човешките грешки и готовност на модела за 3D печат или CNC фрезозване. Така се постига висока повторяемост, прецизност и ефективност, недостижими при класическите ръчни методи.

4. Създаване на реално изделие от 3D модела

След оптимизацията на 3D модела следва създаването на негов физически еквивалент, който служи като основа за калъпи и серийно производство на фасадни елементи. Двата основни метода за това са 3D принтиране и CNC фрезозване.

3D принтирането предлага висока детайлност и гъвкавост при работа с различни материали (PLA, PETG, ABS). То е подходящо за сложни геометрии и прототипи, но има ограничения по отношение на размер, здравина и време за изработка. По-големите модели често се принтират на части и изискват сглобяване, което може да доведе до видими шевове.

CNC фрезозването осигурява по-висока механична устойчивост, точност и възможност за работа с разнообразни материали (дърво, MDF, полиуретанови блокове, пластмаси). Получените модели са монолитни, здрави и подходящи за създаване на калъпи. Макар процесът да е по-бавен и материално интензивен, качеството и стабилността на резултата го правят по-надежден.

За целите на експерименталната част CNC фрезозването върху MDF е най-подходящият избор, тъй като материалът осигурява отлична гладкост, устойчивост и прецизност при сравнително ниска цена, което го прави оптимален за изработка на детайлни фасадни реплики.

5. Създаване на калъп за новите отливки

Класическият метод за изработка на калъпи от полиестерна смола и стъклومات е широко използван поради своята здравина, дълготрайност и висока детайлност. Той осигурява прецизно възпроизвеждане на форми и е подходящ за многократна употреба при серийно производство. Недостатъците му са свързани с по-дългото време за изработка, токсичността на материалите и по-голямото тегло на калъпите. Въпреки това, методът остава надежден и предпочитан при реставрация и възпроизвеждане на фасадни елементи, изискващи висока точност и издръжливост.

Методът на вакуумно формование използва нагрят термопластичен лист, който прилепва към матрица под вакуум, възпроизвеждайки нейната форма. Той е бърз, икономичен и подходящ за малки серии и прототипи. Най-често се използват материали като ABS, PVC, PET и HIPS, а за модели – MDF, алуминий или силикон, в зависимост от нужната устойчивост. Основните му предимства са ниска себестойност, гъвкавост и кратко време за изработка, но е ограничен при сложни форми и има по-кратък живот на матриците.

Заключение: За експерименталната част най-подходящ е методът на вакуумно формование, тъй като осигурява бързо, евтино и достатъчно прецизно създаване на калъп за еднократна употреба, без необходимост от скъпи материали и дълго технологично време.

6. Материали за отливка на декоративни фасадни елементи: класически и съвременни подходи

След приключване на етапите по 3D сканиране, моделиране и изработка на калъп, следва създаването на отливка, която възстановява липсващия декоративен елемент. Изборът на материал е решаващ за постигане на висока естетическа точност, здравина и устойчивост на атмосферни влияния.

Класически материали като гипс и циментови смеси предлагат добра детайлност и достъпност, но са ограничени по здравина и издръжливост, което ги прави неподходящи за външни приложения без допълнителна защита.

Съвременните композитни материали – полимерни смеси, фиброцимент и полимербетон – предлагат по-висока устойчивост, гъвкавост и дълъг живот. Сред тях **полимербетонът със стъклофибърна армировка** се откроява като най-подходящ. Той съчетава здравината на бетона с еластичността и лекотата на фибростъклото, осигурявайки отлична детайлност, устойчивост на влага, UV лъчи и температурни колебания.

В контекста на изследването, **полимербетонът с фиброармиране** е оптималният материал за създаване на фасадни реплики – лек, издръжлив и естетично прецизен, отговарящ на изискванията за съвременна реставрация и дълготрайна експлоатация.

7. Възможности за повишаване на топлоизолационните свойства на фасади с декоративни елементи

Едно от основните предизвикателства при реновацията на сгради с декоративни фасади е невъзможността за използване на стандартни топлоизолационни системи, без да се наруши архитектурната им пластика. При богато орнаментирани повърхности прилагането на плоскостни изолации води до загуба на релеф и стилистична автентичност.

Решение предлагат тънкослойните термоизолационни покрития, които запазват геометрията на фасадата.

Тези покрития подобряват енергийната ефективност без конструктивна намеса, запазват архитектурните детайли и са съвместими с материали, използвани при реконструкция и 3D изработка на декоративни елементи.

В заключение, тънкослойните изолационни покрития са ефективно, естетично и практично решение за енергийно обновяване на фасади с историческа и декоративна стойност.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЗА РЕКОНСТРУКЦИЯ НА ДЕКОРАТИВНИ ФАСАДНИ ЕЛЕМЕНТИ, ПОСРЕДСТВОМ АДИТИВНИ ТЕХНОЛОГИИ

За създаването на прецизна реплика на оригиналния декоративен фасаден елемент изцяло чрез адитивни технологии са нужни специализирани машини и софтуери, както и проектант или екип от такива, които притежават познания и умения за работа с технологиите. Методиката, цели да структурира последователността на необходимите действия и да предостави обоснован избор между алтернативни решения в зависимост от конкретните условия, с оглед оптимизиране на създаването на висококачествени реплики на декоративни фасадни елементи с нарушена цялост.

1. Избор на оптимално запазен фасаден декоративен елемент за 3D сканиране: анализ и документация

Изборът на оптимално запазен декоративен елемент за сканиране е първият ключов етап в процеса на реконструкция на фасадни детайли, особено когато целта е автентично възстановяване.

1.1 Фактори за избор на елемент за сканиране

За да се избере подходящ елемент за 3D сканиране, първо се изготвя фасаден план с обозначение на всички декоративни детайли и тяхното състояние, съгласно

системата за оценка от Глава 2, т.1. Елементите се класифицират като здрави, частично повредени, силно повредени или липсващи.

Цялост: Елементът трябва да е във възможно най-добро физическо състояние, без дълбоки пукнатини или значителни увреждания, за да позволи точно триизмерно заснемане.

Характерност: Подходящият образец следва да отразява автентичната стилистика на фасадата – пропорции, пластичност и декоративен ритъм, характерни за оригиналния архитектурен замисъл.

Местоположение: Елементи, разположени под защитени зони (корнизи, арки, балкони, ниши), обикновено са по-добре запазени, тъй като са по-слабо изложени на влага и температурни колебания. Такива позиции улесняват достъпа и позволяват по-прецизна дигитализация.

След сканирането данните се сравняват с други сходни орнаменти за потвърждаване на еднородността на дизайна. При разлики се анализират причините — износване, ремонти или оригинални вариации. Тази проверка осигурява точна база за 3D моделиране и гарантира, че реставрираните елементи ще запазят формата и пропорциите на оригиналните.

1.2 Подготовка за сканиране. Оценка на условията и обработка на повърхността

Преди 3D сканирането е необходимо да се оцени обстановката на място и да се осигури безопасен достъп, особено при елементи, разположени на височина. Повърхността се почиства внимателно от прах и замърсявания с меки четки или сгъстен въздух, за да се избегнат деформации в дигиталния модел. При гланцови, метални или полирани материали се нанася тънък слой матиращ спрей, който намалява отраженията и подобрява точността на сканирането. Процесът се извършва при контролирано осветление – най-добре дифузно и равномерно, което предотвратява сенки и отблясъци и гарантира високо качество на цифровия модел.

2. Генериране на 3D модел на елемента, посредством скенер за триизмерна геометрия (3D скенер)

2.1 Избор на подходящ 3D скенер.

За постигане на висока точност при 3D сканиране е необходимо оптимално калибриране на оборудването спрямо характеристиките на фасадния елемент. Основен критерий при избора на устройство е високата разделителна способност и възможността за улавяне на фини релефи и орнаменти, характерни за декоративната архитектура. За целите на изследването е използван 3D Maker Pro Lynx – ръчен скенер с точност до 0.1 mm, работещ без маркери и чрез структурирана инфрачервена светлина, безопасна за външна употреба. Устройството поддържа ръчен и стационарен режим, което осигурява гъвкавост при различни условия. Широкото зрително поле и съвместимостта с файлови формати като STL и OBJ позволяват бърза дигитализация и лесна последваща обработка на модела. Модерните системи, включително Lynx, работят по принципа plug and scan – автоматично калибрират експозицията и реконструкцията на повърхността чрез вградени алгоритми, които минимизират необходимостта от ръчна намеса. Това осигурява висока точност, стабилност и ефективност на процеса, като значително улеснява оператора и намалява риска от грешки.

2.2 Процедура за сканиране. Ръчно сканиране

Скенераът 3D maker Pro Lynx предлага два режима на работа – ръчен (Handheld Mode) и стационарен (Fixed Mode). Изборът между тях зависи от характеристиките на обекта, желаната прецизност и условията на работа. Стационарният режим е подходящ за по-малки или лесни за позициониране обекти, които могат да бъдат поставени стабилно върху стойка или въртяща се маса. При този режим скенераът остава неподвижен, а обектът се върти или се сканира от няколко фиксирани позиции. Това осигурява висока симетричност и точност при сканиране на прости форми. Ръчният режим, от своя страна, е предпочитан при обекти с по-сложна геометрия, по-големи размери или такива, които не могат да бъдат лесно позиционирани върху платформа. Именно затова, за целите на настоящия експеримент е избран ръчният режим, който осигурява необходимата гъвкавост и прецизен контрол при сканиране на архитектурния елемент, дори когато те са неподвижна част от фасадата. При ръчен режим операторът държи скенера стабилно в ръка, като се движи плавно около обекта, за да гарантира непрекъснато и равномерно сканиране. Вграденият стабилизатор минимизира клатенето и поддържа устойчиво изображение, което е особено важно при детайлно заснемане на орнаменти и релефи. Визуализацията на процеса се осъществява в реално време на екрана на софтуера, като той предоставя информация за позицията и фокусното разстояние. Системата използва цветни индикатори, които улесняват работата – зелената индикация потвърждава правилната дистанция, докато червената сигнализира, че разстоянието трябва да бъде коригирано.

2.3 Сканиране. Оптимална позиция и стратегии за дигитализиране.

За да се постигне максимална точност и прецизност при дигитализацията на декоративния фасаден елемент, е необходимо скенераът да бъде позициониран оптимално спрямо повърхността. Поддържането на постоянно разстояние между сканиращото устройство и обекта е критичен фактор, който гарантира, че всички детайли ще бъдат заснети без изкривявания или загуба на информация. Разстоянието трябва да отговаря на спецификациите на скенера, като всяко отклонение може да доведе до изкривяване на геометрията или загуба на фините релефи. За да се избегнат грешки, операторът трябва да избягва резки движения, накланяния или промяна на скоростта на сканиране, които биха могли да доведат до разминавания в точковия облак или пропуски в данните. С цел постигане на пълно и детайлно заснемане, всеки елемент трябва да бъде сканиран от множество ъгли. Тази техника, известна като многоъгълно заснемане, позволява елиминиране на "мъртви зони", които могат да останат незаснети при единично преминаване на скенера. Операторът трябва методично да обхожда целия елемент, като се увери, че всички релефи, извивки и вдлъбнати участъци са заснети, включително труднодостъпните места, които често крият най-фините декоративни детайли. Ключов момент в процеса е мониторингът в реално време, който позволява незабавна проверка на качеството на сканирането. Софтуерът на скенера предоставя възможност за визуализация на точковия облак в момента на заснемане, като всякакви пропуски или несъответствия могат да бъдат идентифицирани и коригирани незабавно. При по-сложни геометрии, особено при дълбоки орнаментални мотиви или фино структурирани повърхности, може да се наложи използването на специални приставки, които разширяват възможностите на скенера и позволяват улавяне на недостъпните зони с висока прецизност.

2.4 Обработка на данните: Прецизиране и финализиране на 3D модела

След успешно завършване на процеса на сканиране, следващата ключова стъпка е обработката на събраните данни и финализирането на 3D модела. Софтуерът, който управлява 3D maker Pro Lynx, е оборудван с интелигентна функция "One Click Process", която позволява автоматично сглобяване на сканираните данни в единна и детайлна триизмерна мрежа. Благодарение на този автоматизиран алгоритъм, повечето модели се генерират с висока прецизност, без да е необходима ръчна намеса или допълнителна обработка от оператора. Това значително оптимизира работния процес, като елиминира времеемките корекции и ръчното съединяване на частите от сканирания обект. В резултат на това, софтуерът предоставя почти готов за използване цифров модел, който може да бъде използван за реставрация, дигитално архивиране или директно производство чрез 3D принтиране.

Извод: Процесът на 3D сканиране с 3D Maker Pro Lynx показва, че съвременните технологии осигуряват висока точност, мобилност и ефективност при реставрация, дигитална архивизация и възпроизвеждане на архитектурни детайли. Интегрираните автоматизирани функции оптимизират обработката на данните, свеждат до минимум нуждата от ръчни корекции и ускоряват създаването на завършен триизмерен модел.

3. Корекция и подобрене на 3D модел в софтуера ZBrush

Настоящият текст разглежда етапите на работа в ZBrush, които ще бъдат приложени за почистване, доизглаждане и финализиране на сканирания 3D модел. Основната цел е постигането на максимална реалистичност и точност, така че крайният резултат да бъде напълно подготвен за 3D печат или CNC фрезозане. Чрез инструменти за ретопология, детайлна корекция на повърхностите и добавяне на фини текстурни слоеве, ще бъде осигурено, че моделът не само запазва своята автентичност, но и придобива оптимални характеристики за физическо възпроизвеждане.

3.1 Импортиране на модела и подготовка за редактиране

Първата стъпка в ZBrush е импортирането на STL файла, генериран от сканирането. Това се извършва чрез функцията "Import", която позволява бързо зареждане на 3D модела в работната среда на софтуера. След като моделът бъде внесен, той се преобразува в PolyMesh3D формат, което му позволява по-нататъшна манипулация и детайлна обработка. Преобразуването е необходимо, тъй като оригиналните модели от сканиране често съдържат прекалено висока плътност на полигони, което може да затрудни корекциите. Чрез тази процедура, моделът става по-гъвкав за редактиране, като запазва необходимата детайлност.

3.2 Идентифициране и анализ на дефектите

След като моделът е подготвен, следващата стъпка е детайлният анализ на повърхността с помощта на инструмента "Inspect". Този инструмент сканира цифровата геометрия и локализира проблемните участъци, които могат да включват деформации, дупки, шупли, пукнатини или липсващи детайли. Често тези дефекти възникват в резултат на несъвършенства в оригиналния обект или грешки в процеса на сканиране, което ги прави нежелани за финалния модел. Чрез интерактивна визуализация, операторът може да маркира проблемните зони и да определи най-подходящия метод за тяхното коригиране, като изглаждане, допълнително скулптуриране или ремоделиране.

3.3 Изглаждане и корекция на повърхността

След локализиране на дефектите се извършва **изглаждане и усъвършенстване на повърхността**, за да се постигне по-добра естетика и функционалност на модела. Инструментът Close Holes автоматично запълва липсващи зони в полигоналната мрежа, като анализира околната геометрия и създава нова непрекъсната повърхност – особено полезно при сканирани обекти с пропуснати участъци.

За фино изглаждане се използва Smooth Brush, който премахва дребни неравности и шупли, без да нарушава релефа и орнаментите. Оптимален ефект се постига при интензитет 20–50%, осигуряващ баланс между гладкост и запазване на детайла. Допълнително подобрение може да се постигне чрез четки като Standard, Flatten, Polish и SnakeHook, които позволяват прецизна корекция на повърхността според специфичните нужди на модела.

3.4 Допълнително изграждане на липсващи части от сканирания модел

При наличие на липсващи или силно увредени части от сканирания декоративен елемент се прилага цифрова реконструкция в ZBrush. Чрез активиране на Dynamesh моделът се преобразува в равномерна, гъвкава мрежа, подходяща за ръчно моделиране. С помощта на инструментите Insert Mesh, ClayBuildUp и Standard Brush липсващите зони се възстановяват в съответствие с формата и стилистиката на оригинала. След корекциите Dynamesh се активира повторно, за да слее новата част с останалата повърхност. За постигане на равномерна топология и по-добра геометрична структура се използва ZRemesher, който автоматично създава оптимална полигонална мрежа и подобрява плавността на ръбовете. Когато е наличен друг сходен обект, липсващият участък може да бъде възстановен чрез командата Project All, която прехвърля детайлите от запазената геометрия върху модела, като запазва оригиналната текстура и релеф. В случаите, когато реконструкцията се извършва изцяло ръчно, Sculptriis Pro Mode позволява динамично добавяне и премахване на полигони, осигурявайки плавен преход и висока точност на възстановената форма.

3.5 Оптимизация на полигони с "Decimation Master"

Един от основните проблеми при 3D сканираните модели е прекомерният брой полигони, който затруднява обработката и прави файловете твърде обемни. За оптимизиране на геометрията в ZBrush се използва инструментът **Decimation Master**, който интелигентно намалява броя на полигоните, без да се губят важни детайли.

Този инструмент анализира формата и разпределя плътността на мрежата според сложността на повърхността – зоните с фини релефи запазват висока резолюция, докато по-гладките области се опростяват. В резултат моделът става по-лек и лесен за работа, без компромис с визуалното качество.

Процесът обикновено се извършва поетапно – първоначално с по-голяма редукция за определяне на оптималната граница, след което се прилага финална оптимизация, която поддържа необходимата детайлност и осигурява готов модел за 3D печат, CNC обработка или визуализация.

4. Създаване на модел, посредством 3D принтиране или CNC фрезозане

Най-бързите и ефективни методи за създаване на физически модел от цифров 3D обект са свързани с два основни технологични подхода – адитивно производство чрез 3D принтиране, при което обектът се изгражда слой по слой чрез натрупване на материал, и субтрактивно производство, осъществявано чрез CNC фрезозане, където

моделът се оформя чрез отнемане на материал от твърд блок. Всеки от тези методи предлага свои специфични предимства и недостатъци по отношение на точност, скорост, устойчивост, мащаб и детайлност на крайния резултат, които бяха анализирани и сравнени в Глава 2 на настоящия дисертационен труд.

4.1 Изграждане чрез 3D принтиране

3D принтирането е по-подходящо при създаване на модели с изключително сложна геометрия, фини детайли и вътрешни кухини, които биха били трудни или невъзможни за реализиране чрез субтрактивни технологии.

4.1.1 Експортиране на 3D модела

За да бъде подготвен за физическо производство, оптимизираният 3D модел трябва да бъде експортиран в подходящ файлов формат. В повечето случаи, STL (Stereolithography) е предпочитаният формат, тъй като запазва геометрията на модела и е съвместим с почти всички 3D принтери. При експортирането е важно да се провери целостта на файла, за да се избегнат проблеми като непълни повърхности, изкривявания или дефекти в структурата, които могат да доведат до неуспешен печат.

4.1.2 Настройки в софтуера за принтиране

След експортирането, STL файлът се импортира в специализиран софтуер за подготовка на печата, като Cura, PrusaSlicer или Simplify3D. Тук се извършват настройки на параметрите, които определят качеството, здравината и времето за изработка на модела. Основните настройки включват:

- Резолюция (височина на слоя): Оптимална детайлност се постига при 0.1 mm височина на слоя, докато по-дебелите слоеве (0.2-0.3 mm) позволяват по-бърз, но по-груб печат.
- Плътност на запълване: В зависимост от изискванията за здравина, запълването може да варира между 20-100%. По-голямата плътност осигурява по-здрави модели, но удължава времето за печат.
- Поддръжки (supports): Ако моделът има надвиснали части, софтуерът автоматично генерира поддържащи структури, които се премахват след завършване на печата.
- Прецизността на 3D принтирането зависи от качество на машината, параметрите на печат и сложността на модела. За постигане на висока детайлност се препоръчва:
- Резолюция от 0.1 mm - по-фини детайли, но по-дълъг процес на печат.
- Скорост на печат 40-50 mm/s - баланс между детайлност и ефективност.
- Времетраене: Малките елементи могат да бъдат принтирани за няколко часа, но големи архитектурни реплики могат да изискват 24-48 часа, което е ограничение на този метод.

4.2 Фрезоване на модел, чрез CNC цифров рутер

Сравнителният анализ между 3D принтирането и CNC фрезоването, представен в Глава 2, показва, че CNC фрезоването е най-ефективният и приложим метод за целите на настоящото изследване. Моделите, изработени чрез CNC обработка върху MDF плоскости, се отличават с по-голяма здравина, структурна стабилност и устойчивост в сравнение с обектите, произведени чрез 3D принтиране с термопластични материали.

Качеството на повърхността при CNC фрезозане е значително по-гладко и чисто още в суров вид, което намалява необходимостта от допълнителна ръчна обработка и улеснява последващото създаване на калъп.

Материалът MDF (Medium Density Fiberboard) е предпочетен поради своята хомогенна структура, отлична обработваемост и способност за възпроизвеждане на фини декоративни детайли. Освен това, той е достъпен и икономичен, което го прави подходящ избор при реализацията на мащабни елементи, изискващи висока прецизност при оптимални разходи.

Въз основа на тези предимства, CNC фрезозането върху MDF се определя като най-подходящ метод за създаване на прототип, който служи като междинен етап в процеса на реконструкция на декоративни фасадни елементи.

4.2.1 Генериране на G-код и избор на CAM софтуер

Първият етап при CNC фрезозането включва подготовка на 3D модела и генериране на G-код – набор от команди, управляващи движението, скоростта и дълбочината на инструмента. Кодът се създава чрез специализиран CAM софтуер (Computer-Aided Manufacturing), като *Fusion 360*, *ArtCAM*, *Mach3* или *Vectric Aspire*, който е особено ефективен при обработка на релефни и декоративни повърхности.

След подготовката на модела в ZBrush, той се експортира във формат STL или OBJ и се импортира в CAM средата, където се задават параметрите на обработката – стратегия на рязане, вид на фрезите и технологични настройки. На тази основа се генерира G-кодът, който управлява CNC машината при изработването на физическия модел.

4.2.2 Настройки на CNC машината и избор на инструменти

След като CAM софтуерът е генерирал G-кода, той се зарежда в CNC контролера, който управлява фрезовата машина. Преди стартиране на обработката, е необходимо да бъдат настроени няколко ключови параметъра:

- Скорост на шпиндела (RPM) - обикновено варира от 8000 до 24000 RPM, в зависимост от материала.
- Скорост на подаване (Feed Rate) - определя скоростта на движение на инструмента по осите X, Y и Z. По-ниска скорост се използва при по-детайлни и крехки материали.
- Дълбочина на рязане - при груба обработка (roughing) е по-дълбока, докато при фино фрезозане (finishing) се използват повърхностни слоеве за постигане на максимална детайлност.

В зависимост от сложността на модела, се използват различни видове фрези:

- Спирални (end mills) - за обща обработка и премахване на големи количества материал.
- Конусни фрези - за фино детайлно гравирание, особено при релефни орнаменти.
- Сферични фрези (ball nose) - подходящи за скулптурни и органични форми, използвани при архитектурни орнаменти.

4.2.3. Процес на CNC фрезозане

Фрезозането се извършва в няколко етапа, които осигуряват максимална прецизност и гладкост на финалния модел.

- Грубо рязане (Roughing) - Първоначално фрезата премахва големи количества материал, като създава основната форма на обекта.

- Фина обработка (Finishing Passes) - След грубото фрезозане, машината преминава през по-прецизна обработка, която оформя фините детайли.
- Детайлно гравиране (Detailing Passes) - За модели с релефни повърхности, се използват по-малки фрези, които добавят финалните елементи.

Почистване и ръчна доработка - След фрезозането, повърхността може да бъде шлайфана и грундирана, за да се подготви за калъпно отливане.

5. Избор и направа на подходящ калъп за новите отливки

Изборът на метод за изработка на калъп зависи основно от мащаба на елемента и необходимия тираж на отливките. При големи или сложни форми, както и при серии над 30–50 броя, се предпочита класическият метод с полиестерна смола и стъклومات, който осигурява висока здравина и дълготрайност на матрицата.

5.1. Създаване на калъп по класически метод с полиестерна смола и стъклومات.

Процесът започва с подготовка на оригиналния модел, който се почиства, заглажда и покрива с освобождаващ агент за предотвратяване на залепване. След това се нанася гелкоут – първият слой, осигуряващ гладка повърхност на калъпа. Върху него последователно се полагат няколко слоя полиестерна смола и стъклومات (обикновено 3–5), като всеки слой се притиска с ролка за отстраняване на въздушни мехурчета. След втвърдяване за 24–48 часа, калъпът се отделя внимателно от оригинала и се почиства. Получената матрица е устойчива, детайлна и подходяща за многократна употреба при серийно производство на фасадни реплики.

5.2. Създаване на калъп чрез вакуумно формоване

За експерименталната част е избран методът на вакуумно формоване, подходящ за по-малки и леки елементи с ограничен брой отливки (до 5 броя). Предимствата му са ниска себестойност, бързина (5–10 минути) и малко тегло на калъпа, което улеснява работата в лабораторни условия.

Моделът се подготвя с гладка повърхност, върху която нагрят термопластичен лист (120–180°C) се спуска и формова чрез вакуумно засмукване. След охлаждане материалът се втвърдява, изрязва се излишният ръб и при нужда се извършва минимална доработка.

Методът е икономичен и ефективен за създаване на калъпи за декоративни елементи със сравнително проста или умерено сложна геометрия.

6. Направа на отливка от полимербетон във вакуумно формована матрица

След създаването на калъпа чрез вакуумно формоване, следващата ключова стъпка в процеса на репликиране на декоративен фасаден елемент е изработването на самата отливка. В настоящото изследване за целта е избран полимербетон – високоефективен композитен материал, съчетаващ здравината на традиционните циментови смеси с устойчивостта и технологичните предимства на съвременните полимери.

6.1. Технологичен процес

Процесът започва с изчисляване на обема на елемента, който ще бъде отлят. Всички съставки от базовата рецепта се преизчисляват пропорционално спрямо необходимия обем.

Базова рецепта за 100 литра смес: 60 кг. цимент, 110 кг. промит пясък (фракция 0–4 мм), 110 кг. чакъл (фракция 4–12 мм), 300 гр. стъклофибърна армировка, 16 кг. вода, 1 л. полимерна добавка, 400 гр. Пластификатор, 60 гр. стабилизатор и 30 гр. антипенител.

Стъпки на смесване: В бетоновата смесителна машина се въвеждат първо сухите компоненти (цимент, пясък, чакъл, армировка) и се разбъркват до пълна хомогенизация. Добавя се водата, последвана от полимерната добавка, пластификатора, стабилизатора и антипенителя. Сместа се разбърква отново до пълна еднородност.

Заливане на калъпа: Преди наливане, вътрешната повърхност на вакуумно формования калъп се обработва с отделител, който може да бъде силиконов отделител или кофражно масло, за да се осигури лесно изваждане на изделието след втвърдяване. Сместа се излива бавно и равномерно в калъпа, като при сложни орнаменти и множество фини вдлъбнатини се използва вибромаса. Вибрациите помагат за изгонване на въздуха и за пълното запълване на геометрията на калъпа без образуване на шупли. След наливането, калъпът се оставя в контролирана среда за 48 часа при температура между 18–28°C, което позволява пълна хидратация и втвърдяване на полимербетона. Изваждането на готовия елемент става лесно и без повреждане, благодарение на отделителя и добрите свойства на материалите. При нужда, може да се използва компресиран въздух за леко подпомагане на отделянето от калъпа.

7. Подобряване на изолационните свойства на фасади с декоративни елементи чрез тънкослойно топлоизолиращо покритие

Фасадите с декоративни архитектурни елементи представляват важен компонент на архитектурната идентичност на сградите, но същевременно са сред най-уязвимите части на ограждащата конструкция. Тяхната сложна геометрия и деликатна повърхностна обработка затрудняват прилагането на традиционни топлоизолационни системи, които могат да променят визуалния облик и да нарушат пропорциите на фасадата. С оглед на това, при реконструкцията и енергийната модернизация на подобни сгради е необходимо използването на тънкослойни топлоизолиращи покрития, които да подобряват топлотехническите характеристики, без да компрометират декоративните елементи и архитектурната автентичност. Основната цел на изследването е да се оцени ефектът от нанасяне на тънкослойно топлоизолиращо покритие върху фасадни повърхности с декоративни елементи и неговото влияние върху вътрешния микроклимат и енергийните характеристики на сградната обвивка.

7.1. Експериментална постановка

Проведен е сравнителен анализ върху две еднотипни еднофамилни сгради: Върху фасадата на първата сграда е нанесено тънкослойно топлоизолиращо покритие в три слоя с обща дебелина $\delta = 0.35 \text{ mm} = 0.00035 \text{ m}$, докато втората сграда служи като контролен образец – без нанесено покритие.

Измерванията са направени при външна температура $t_{\text{вън}} = -5^\circ\text{C}$. Вътрешната температура при сградата без покритие е $t_{\text{вътр, без}} = 16.7^\circ\text{C}$, а с покритие е $t_{\text{вътр, с}} = 20.2^\circ\text{C}$ или повишението е $\Delta t = t_{\text{вътр, с}} - t_{\text{вътр, без}} = 20.2 - 16.7^\circ\text{C} = 3.5^\circ\text{C}$. Полагането на покритието, води до подобряване на ефективността на топлоизолационното покритие при ограничаване на топлинните загуби през фасадата.

7.2. Топлотехнически анализ

За количествена оценка на ефекта е направен анализ на термичните съпротивления и топлинните потоци през фасадната конструкция. При изчисленията са използвани

класически топлотехнически зависимости, адаптирани към тънкослойни покрития, при които радиационните и повърхностните ефекти имат съществено значение. Термичното съпротивление на покритието се определя по зависимостта:

$$R_{\text{пок}} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0.00035}{0.06} = 0.00583 \text{ (m}^2\text{K)/W} \quad (1)$$

където: $R_{\text{пок}}$ – термично съпротивление на покритието ($\text{m}^2\text{K)/W}$; $\delta = 0.00035 \text{ m}$ – дебелина на слоя; $\lambda = 0.06 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ – коефициент на топлопроводност.

Общите термични съпротивления на фасадата с и без нанесено покритие се изменя от $R_{\text{без}} = 0,205 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ на $R_c = 0,205 + 0,00583 = 0,21083 \text{ (m}^2\text{K)/W}$.

Топлинният поток се определя по формулата:

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (2)$$

където ΔT е температурната разлика между вътрешната и външната среда. Температурните разлики показват, че при повърхността без покритие те възлизат на $21,7^\circ\text{C}$, докато при повърхността с термоизолационно покритие достигат $25,2^\circ\text{C}$, което свидетелства за по-добра термична защита при обработената повърхност.

Изчислените топлинни потоци показват, че при повърхност без покритие стойността е приблизително $105,85 \text{ W/m}^2$, докато при повърхност с термоизолационно покритие тя достига около $119,53 \text{ W/m}^2$. Това потвърждава влиянието на покритието върху интензивността на топлообмена. Реално, нанесеното покритие намалява топлинните загуби и води до по-стабилен и комфортен вътрешен микроклимат.

7.3. Среднодневни температурни измервания

Среднодневните вътрешни температури в двете изследвани сгради – едната с нанесено тънкослойно топлоизолиращо покритие, а другата оставена като контролен образец – бяха регистрирани в продължение на седем последователни дни. Целта на проведените измервания е да се определи реалният ефект на покритието върху намаляването на топлинните загуби през ограждащите конструкции при стабилни и контролирани външни климатични условия.

Методика на измерване

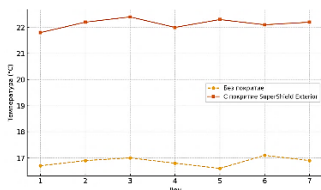
Температурните данни са събрани чрез цифрови сензори за вътрешна температура с точност $\pm 0.1^\circ\text{C}$ и времева резолюция 10 минути. Сензорите са разположени на еднаква височина (1.50 m) в централната част на помещенията, за да се елиминира влиянието на локални температурни градиенти, близост до стени или отоплителни уреди. Среднодневната вътрешна температура за всяка от двете сгради е определяна като средна аритметична стойност на всички регистрирани моментни измервания за денонощие, по следната зависимост:

$$T_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (3)$$

където: T_{cp} – среднодневна температура ($^\circ\text{C}$); n – брой измервания за едно денонощие, а T_i – моментна температура.

Условия при измерване: Външна температура за изследвания период варира в границите от -5°C до -2°C ; Отоплителният режим е еднакъв в двете сгради; Няма промени в режима на обитаване; Избраните фасади са идентични по площ и

ориентация (северна експозиция), което елиминира влиянието на различна слънчева радиация.



Фигура 11. Среднодневна вътрешна температура за 7 последователни дни с и без тънкослойно топлоизолиращо покритие.

Графиката (Фиг. 11) показва стабилно повишаване на вътрешната температура в сградата с нанесено покритие през целия период на наблюдение. Средната разлика между двете сгради е приблизително 3.5°C, като варира в границите от 3.3°C до 3.7°C. Тази температурна разлика се запазва устойчива при почти постоянни външни условия и при еднакъв отоплителен режим, което потвърждава реалния енергоефективен ефект на покритието.

7.4. Влияние на покритието върху декоративните елементи

При визуален оглед на фасадата и декоративните елементи след нанасяне на покритието не се наблюдават промени в текстурата, цвета или релефа. Покритието създава еднороден, еластичен и дифузно-матов слой, който следва формата на орнаменталните детайли, без да замъглява техния релеф.

8. Оценка на реализираната реплика

Финалният етап от предложената методика за възстановяване на декоративни фасадни елементи включва оценка на постигнатия резултат, след като са преминати всички ключови фази: 3D сканиране, дигитално моделиране, CNC фрезование на образец, създаване на вакуумно формован калъп, отливка от полимербетон и финално нанасяне на термоизолационно покритие. Основната цел на тази оценка е да се установи дали създадената реплика отговаря на първоначалния оригинал, както по визуално-естетически критерии, така и по функционални и технологични изисквания, свързани с устойчивостта и приложимостта ѝ в реална архитектурна среда.

8.1. Основни аспекти на оценката

- **Съответствие с оригинала:** Извършва се визуално сравнение между реализираната реплика и наличния оригинален или референтен фрагмент. Оценява се дали са възпроизведени коректно формата, обемът и орнаменталните детайли, както и доколко точно е следвана архитектурната стилистика.
- **Качество на повърхностния завършек:** При CNC фрезването и последващото формоване, се проверява дали фините детайли са добре отчетливи, дали има неравности, шупли или изкривявания. Особено внимание се обръща на зоните с висока орнаментална стойност.
- **Качество на отливката от полимербетон:** Оценява се хомогенността на сместа, липсата на въздушни кухини, здравината на изделието, както и ефективността на добавената стъклофибърна армировка, която цели да повиши якостта и да намали риска от пукнатини.

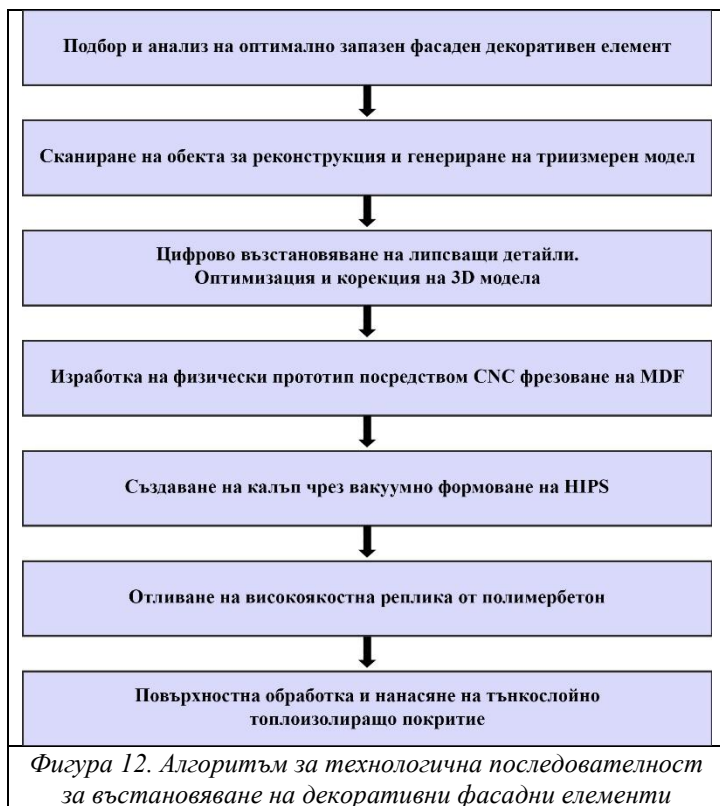
- **Устойчивост на климатични влияния:** Провежда се оценка на устойчивостта на материала при експозиция на влага, UV-лъчи, замръзване, като се прави прогнозна оценка за дълготрайността на елемента в реална фасадна среда.
- **Ефект от нанасяне на тънкослойно топлоизолиращо покритие върху фасади с декоративни елементи:** Нанасянето на тънкослойно топлоизолиращо покритие върху фасади с декоративни елементи повишава топлинната ефективност на ограждащите конструкции и подобрява

ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ПОТВЪРЖДЕНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЯТА

Съвременните технологии в архитектурната реставрация предлагат нови възможности за точно възпроизвеждане на изгубени или силно увредени декоративни фасадни елементи. Чрез интегриране на 3D сканиране, цифрово моделиране и адитивно производство процесът става по-бърз, прецизен и адаптивен. Настоящото изследване демонстрира прилагането на разработената методика чрез последователен експериментален процес – от дигитализация и прототипиране до отливане и завършване на фасадни реплики. За гарантиране на повторяемост и яснота на процедурите е разработен алгоритъм, който систематизира всички основни етапи и служи като методологична основа на експеримента.

1. Алгоритъм на технологичната последователност за възстановяване на декоративни фасадни елементи

Разработената методика за дигитално възстановяване на фасадни декоративни елементи следва ясно дефинирана технологична последователност (Фиг. 12). Алгоритъмът представя логическата структура на процеса — от избора на оригиналния обект до създаването на физическа реплика — и служи като основа за експерименталната реализация. Чрез него се осигуряват повторяемост, прецизност и възможност за технологична оптимизация при възстановяване на фасадни орнаменти.



2. Сканиране на обекта за реконструкция и подобряване на генерирания 3D модел

Експерименталната част на дисертационния труд започва с подбор на подходящ декоративен фасаден елемент, който служи като основа за реконструкция на липсващи или увредени орнаменти от същия тип. Подборът е извършен по предложените в Глава 2 критерии за оценка на състоянието на фасадните елементи, като е избран най-добре запазеният образец, осигуряващ висока точност при създаването на репликите. Избраният елемент представлява стилизирана раковина с барокови акценти – с фини радиални ребра и странични волути, характерни за фасадната декорация от началото на XX век. Подобни орнаменти се използват най-често над прозорци или около портали, като акценти в архитектурния състав.

За целите на експеримента елементът е демонтиран и изследван в преносимо състояние, което позволява работа в контролирана среда без необходимост от административни разрешения. Методът на 3D сканиране и цифрова реконструкция остава напълно идентичен с този при заснемане на фасаден обект на място. Преди сканирането повърхността е почистена внимателно с мека четка и неагресивен разтвор, за да се премахнат замърсяванията, без риск от увреждане на деликатните детайли (Фиг. 13).



Фигура 13 Декоративен фасаден елемент преди и след почистване

Макар да е най-запазен сред наличните образци, елементът показва типични следи от атмосферна ерозия – дребни шупли, мрежовидни пукнатини и частично отчупване в долната зона. Тези дефекти го правят представителен пример за характерните увреждания на фасадната декорация при продължително външно въздействие.

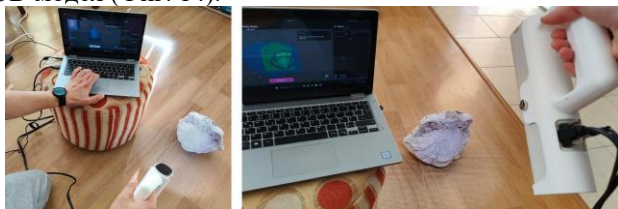
2.1. Оборудване и условия за сканиране

За целите на дигитализацията декоративният елемент беше заснет в контролирана вътрешна среда с дифузно осветление, осигуряващо минимални сенки и отражения. Осветлението се реализира с два LED панела (40 W, 60×60 cm), разположени под различни ъгли за равномерно осветяване на повърхността. Елементът беше поставен върху стабилна основа с достъп от всички страни, което позволи пълно и прецизно заснемане на формата.

2.2. Процес на сканиране

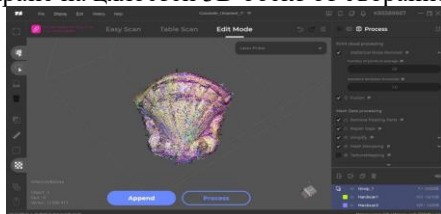
За експеримента беше използван ръчният 3D скенер Maker Pro Lynx, разгледан в Глава 3. Въпреки че обектът бе демонтиран, сканирането се извърши в ръчен режим, за да се симулират реални условия на работа върху фасада. Това позволява оценка на приложимостта на безконтактния метод, подходящ за обекти, които не могат да бъдат демонтирани.

По време на заснемането операторът движеше скенера плавно и равномерно, поддържайки постоянно разстояние от повърхността според релефа на елемента. Така беше осигурено прецизно улавяне на геометрията и стабилност на пространствените данни, необходими за създаване на точен триизмерен модел. Елементът беше сканиран от всички страни с многократни преминавания под различни ъгли, за да се елиминират „мъртви зони“ и да се улови напълно орнаменталната структура и фините детайли във вдлъбнатите участъци. Софтуерът визуализираше точковия облак в реално време, което позволи непрекъснат контрол върху покритието и своевременно заснемане на липсващи участъци до постигане на пълен и детайлен 3D модел (Фиг. 14).



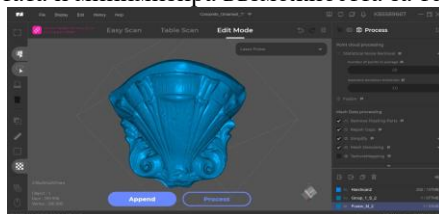
Фигура 14 Процес на безконтактно ръчно сканиране на елемента

Финалният етап от процеса на сканиране включва автоматизираната обработка и генериране на триизмерния цифров модел. След като декоративният фасаден елемент беше заснет от всички страни, сканиращият софтуер премина към следващата фаза – генериране на цялостен 3D обект от събраните данни. (Фиг. 15)



Фигура 15 Автоматично генериране на 3D модел от събраните данни във вградения софтуер на скенера

Благодарение на този напълно автоматизиран алгоритъм, процесът на обработка не изисква ръчна намеса от оператора – отпада необходимостта от съединяване на части, запълване на пропуски или корекция на топологията. Това значително ускорява работата и минимизира възможността за технически грешки.



Фигура 16 Краен резултат от създаването на 3D модел, посредством сканиране

Цялата процедура по сканиране и генериране на 3D модела – от началната калибрация до създаването на финалния цифров обект – отне приблизително 20 минути. Полученият 3D модел е с висока плътност на мрежата и запазени фини релефи, готов за последващи етапи от възстановяването на оригиналния му облик. (Фиг. 16)

3. Цифрово възстановяване на липсващи детайли и усъвършенстване на модела чрез ZBrush

3.1. Импортиране на сканирания модел в ZBrush

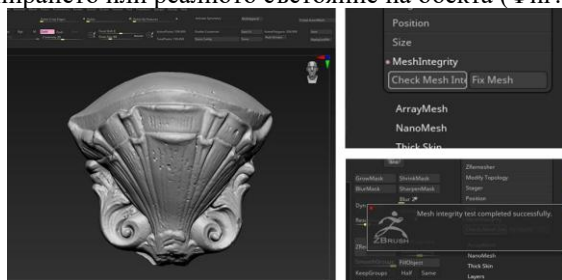
Работата по цифровата реконструкция започна с импортиране на получения STL файл в ZBrush. След зареждането моделът беше преобразуван в PolyMesh3D, за да се осигури пълна възможност за геометрична обработка (Фиг. 17). Това преобразуване беше необходимо, тъй като първоначалната мрежа имаше твърде висока полигонна плътност, затрудняваща изглаждането и скулптурните корекции. След оптимизацията моделът придоби по-гъвкава топология, подходяща за последваща дигитална обработка.



Фигура 17 Импортиране на сканирания модел и преобразуване в PolyMesh3D

3.2. Откриване и оценка на проблемните участъци

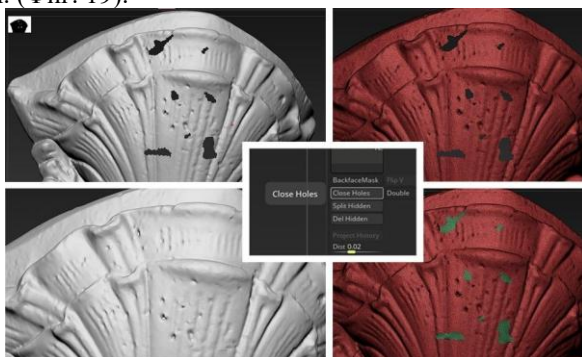
След подготовянето на модела беше извършен обстоен преглед на повърхността. Чрез функцията Check Mesh Integrity се визуализира структурата на мрежата и бяха идентифицирани характерни дефекти – пропаднали участъци, шупли, пукнатини, липсващи фрагменти и геометрични изкривявания, произтичащи от особеностите на сканирането или реалното състояние на обекта (Фиг. 18).



Фигура 18 Откриване и оценка на проблемните участъци

3.3. Корекции и изглаждане на повърхността

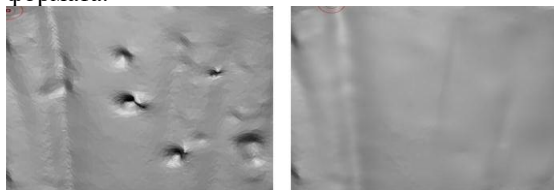
След анализа започна поетапната обработка на повърхността. На местата, където бяха открити отворени участъци, се използва функцията за автоматично затваряне на дупки (Close Holes), която генерира нова геометрия, съобразена с околните полигони. (Фиг. 19).



Фигура 19 Запълване на дупките в полигоналната мрежа

За отстраняване на дребни неравности и подобряване на повърхностната текстура бяха използвани различни скулптурни инструменти (Фиг. 20). Основен инструмент бе Smooth Brush, при който интензитетът се регулираше между 20 и 50%

според зоната, с цел запазване на оригиналната орнаментика. Допълнително се прилагаха четки като Standard, Flatten и Polish, осигуряващи фина корекция и по-добър контрол върху формата.



Фигура 20 Изглаждане на повърхността, чрез различни четки

3.4. Възстановяване на липсваща геометрия

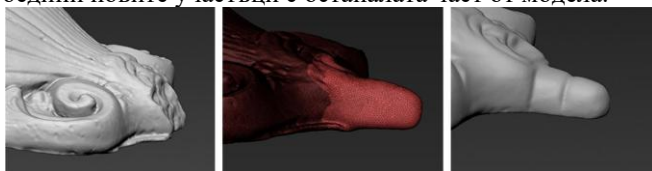
В процеса на работа със сканирания 3D модел на декоративния фасаден елемент е установено, че в долната му част липсва съществен фрагмент от оригиналната геометрия. (Фиг. 21) Поради тази причина сканираният модел не предоставя пълна информация за първоначалната форма и пропорции на орнамента.

За да бъде възстановена автентичната визуална и структурна характеристика на елемента, беше използвана архивна фотография (Фиг. 21), в която декоративният елемент е запечатан в своето оригинално състояние. Благодарение на това изображение е възможно да бъде коректно реконструирена липсващата геометрия в софтуера ZBrush.



Фигура 21 Архивна снимка, показваща оригиналната форма на отчупения елемент

За реконструкцията на липсващите части беше активиран Dynamesh, който уеднакви структурата на мрежата и позволи свободно добавяне на материал. При ръчна реконструкция се използва Sculptris Pro Mode, осигуряващ динамично увеличаване на плътността на мрежата по време на моделиране и улесняващ изработката на фини детайли. С помощта на инструментите Insert Mesh, ClayBuildUp и Standard Brush бяха оформени липсващите обеми в съответствие със стилистиката на оригиналния елемент (Фиг. 22). След дооформяне Dynamesh беше приложен повторно, за да обедини новите участъци с останалата част от модела.



Фигура 22 Моделиране на липсващи обеми чрез софтуерни инструменти

След завършване на корекциите беше приложен ZRemesher, който създаде оптимизирана топология с равномерно разпределени полигони, подходяща за следващи етапи на работа.

3.5. Оптимизация на модела чрез редукция на полигоните

За да бъде моделът съвместим с производствени технологии като 3D принтиране и CNC фрезозане, беше извършено намаляване на броя на полигоните чрез инструмента Decimation Master. Този процес позволи значителна редукция на мрежата, без загуба на обем или важни релефни детайли (Фиг. 23). Процедурата се проведе на етапи — първоначално с по-силна редукция за анализ на поведението на модела, последвана от фина настройка, която гарантира запазване на декоративните елементи и високото качество на геометрията.



Фигура 23 Намаляне на броя полигони от 400 000 на 9 146

Извод: Процесът на цифрово усъвършенстване и оптимизация на 3D модела в ZBrush предоставя изключителни предимства, които гарантират високо качество, функционалност и готовност за физическо възпроизвеждане. Чрез детайлна корекция на повърхността, премахване на дефекти и усъвършенстване на текстурата, и изграждане на липсващите участъци, обработеният модел става съвършено копие на изгубения оригинал, и се адаптира с лекота към различни приложения, като 3D принтиране, CNC обработка и визуални реконструкции. (Фиг. 24)



Фигура 24 Сканиран 3D елемент преди и след обработка в софтуера ZBrush

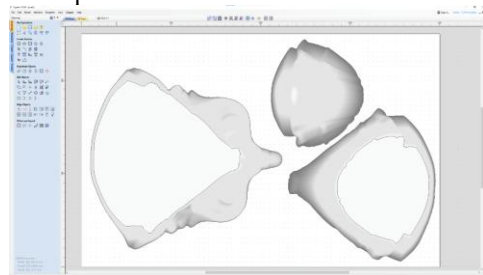
4. Процес по изработване на физически модел чрез CNC фрезозане

За да бъде получен физически прототип на реконструирания декоративен фасаден елемент, цифровият 3D модел, създаден в ZBrush, бе подготвен за производство чрез CNC фрезозане. Процесът включва няколко последователни стъпки, които гарантират висока точност, структурна стабилност и максимална близост до оригиналния орнамент.

4.1. Подготовка на 3D модела и импортиране в CAM софтуер

Първоначално генерираният в ZBrush .stl файл беше импортиран в специализирания CAM софтуер Vectric Aspire, предназначен за генериране на инструментални траектории и G-кодове. Зададох се основните параметри на работната зона, а именно: размери и дебелина на използвания листов материал (MDF), както и ориентацията и позиционирането на модела върху работния плот.

Тъй като височината на декоративния елемент надвишава дебелината на стандартния MDF лист, моделът беше разделен на три хоризонтални „слайса“. (Фиг. 25) Тази техника позволява изработването на обекта на слоеве, които впоследствие се сглобяват в единен триизмерен обем.

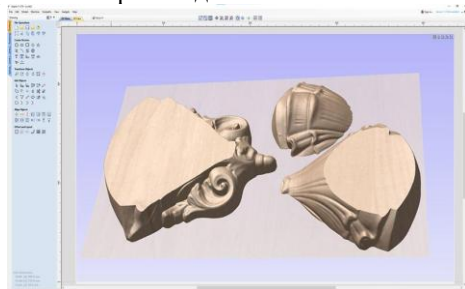


Фигура 25 Разделяне на елемента на 3 части (slices)

4.2. Настройка на параметрите, симулация и фрезование

След дефиниране на работния материал и геометрията, бяха зададени параметрите на фрезование, включително: скорост на подаване (feed rate), скорост на въртене на инструмента, максимална дълбочина на едно преминаване, както и застъпване (stepover) за осигуряване на плавни преходи и висока детайлност.

В Aspire беше извършена пълна симулация на процеса (Фиг. 26), която визуализира: последователността на инструменталните операции, начина на премахване на материала, очакваната детайлност на крайния резултат и общата продължителност на фрезоването. Симулацията позволи оптимизация на параметрите, предотвратяване на грешки и минимизиране на риска от механични неточности по време на реалното производство.



Фигура 26 Симулация на фрезоване на модела

След финализиране на настройките, софтуерът генерира G-код, съвместим с използваната CNC фреза. (Фиг. 27) Този код беше импортиран в системата за управление Mach3, която контролира движенията на инструменталната глава в реално време. (Фиг. 27)



Фигура 27 Данни от софтуера, управляващ цифровата фреза

За да бъде предотвратено разместване на MDF листа по време на обработката, беше използвана вакуумна система за фиксация, която засмуква материала към работния плот и осигурява стабилност през целия процес.

Фрезването на всички слоеве на модела продължи приблизително пет часа, тъй като бяха избрани параметри, оптимизирани за висока резолюция и максимално прецизно възпроизвеждане на детайла.

4.3. Довършителна обработка и завършване на физическия прототип

След приключване на машинната обработка всички елементи бяха отделени ръчно от MDF листа. При необходимост ръбовете и преходите бяха допълнително изгладени чрез фино шкурене, за да се премахнат минимални артефакти от фрезването.

Полученият модел се състоеше от три отделни части (Фиг. 28), съответстващи на предварително зададените хоризонтални слайсове. Те бяха сглобени чрез цианоакрилатно лепило, което осигурява бързо и здраво свързване. След кратък период на фиксация (1–2 минути) моделът придоби окончателната си форма.



Фигура 28 Фрезован модел на три части

Със завършването на CNC обработката и ръчната доработка беше получен пълномасщабен физически модел на възстановения декоративен елемент. (Фиг. 29) Този прототип служи като основа за изработване на калъп, чрез който ще бъдат създадени нови отливки, възпроизвеждащи оригиналния архитектурен орнамент с висока точност.



Фигура 29 Готов модел за направа на калъп

5. Изработка на матрица по технология вакуумно формоване

В рамките на експерименталната част бе приложен методът на вакуумно формоване за създаване на калъп, предназначен за репликация на изследвания декоративен фасаден елемент. Този технологичен подход бе избран след анализ на морфологията и размерите на елемента, както и на необходимото количество отливки. Компактните геометрични параметри и ограничената серийност (пет броя) го правят напълно съвместим с възможностите и предимствата на вакуумното формоване като производствен метод.

5.1. Избор на материал, подготовка и формоване

За изработването на калъпа бе използван листов термопластичен материал – полистирол (HIPS) с дебелина 2 mm, който се отличава с добра формообразуемост, стабилност и способност да възпроизвежда фини детайли при нагряване и вакуумно притегляне. Той бе монтиран в държача–рамка и фиксиран плътно от всички страни. (Фиг. 30) Това осигури стабилност по време на нагряване и предотврати нежелани движения, които биха могли да нарушат равномерността на термичната обработка.



Фигура 30 Листът полистирол, поставен в рамката на машината за вакуумно формоване

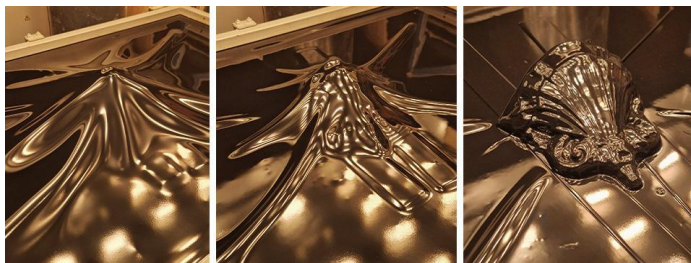
След това, последва позициониране на физическия модел (фрезования прототип) върху работния плот на машината, падайки се точно под нагрявания през това време лист полистирол.

Фиксираният лист беше подложен на контролирано нагряване посредством кварцови нагреватели (Фиг. 28), като температурата постепенно достигна приблизително 140°C – стойност, при която материалът придобива необходимата пластичност за формоване. Равномерното загряване е от съществено значение за минимизиране на вътрешните напрежения в материала и за постигане на еднаква дебелина след формоване. За следене на коректните градуси бе използван безконтактен инфрачервен термометър. (Фиг. 31).



Фигура 31 Кварцови нагреватели, нагряват листа до 137°C

При достигане на оптимална температура термопластичният лист беше спуснат върху подготвения модел, след което вакуумната система евакуира въздуха между тях. В резултат листът прилепна плътно към релефа, точно възпроизвеждайки геометрията и текстурата на декоративния елемент (Фиг. 32).



Фигура 32 Процес на вакуумно формование за получаване на калъп

За прецизно запазване на формата пластмасата беше охладена с вентилатори, осигуряващи равномерно темпериране и предотвратяване на деформации. След втвърдяване калъпът бе отделен от модела, а излишният материал по краищата отрязан и оформен за подготовка за последващо леене.

6. Направа на отливка от полимербетон

Процесът по изработване на отливката започва с подготовка на вакуумно формования калъп от HIPS, който се почиства от прах и се покрива с тънък слой отделител – минерално кофразно масло. След това формата се фиксира в носещата рамка и се нивелира, за да се избегнат деформации и неравномерно разпределение на сместа. След прецизното позициониране се изчислява необходимият обем бетон и се дозират инертните материали според базовата рецепта. Проверява се влажността на фракциите, тъй като водоциментното отношение (W/C) е критичен показател за качеството на сместа. За експеримента е използван планетарен смесител, осигуряващ равномерно хомогенизиране при малки обеми.

6.1. Технология за създаване на полимербетон с оптимални физико-механични характеристики

Следва приготвяне на полимербетоновата смес, при което пълнителите се добавят последователно – от едри към фини, следвани от вода и химически добавки (пластификатор, полимер, антипенител). Процесът се контролира стриктно, като количеството вода се регулира спрямо влажността и температурата на средата.

Получената хомогенна смес се налива бавно в матрицата, започвайки от най-ниската точка за осигуряване на самоуплътняване и отвеждане на въздушните мехурчета. На всеки етап на запълване (приблизително на всеки 20%) се извършва вибриране, което гарантира плътна структура и гладка лицева повърхност на крайния елемент.

6.2. Втвърдяване и отделяне на формовката от калъпа

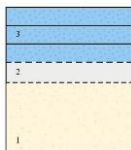
След началното набиране на якост — приблизително 1 час при температура 20°C — отливката се покрива с полиетиленово фолио с цел задържане на влагата и удължаване на процеса на хидратация, което оказва положителен ефект върху крайните якостни показатели. Около 48 часа след заливането се пристъпва към декофриране. Елементът се обръща с видимата страна нагоре и чрез кратки, равномерни вертикални движения се осигурява отделянето на отливката от матрицата. След освобождаването ѝ се извършва фина дообработка на ръбовете посредством шкурка, с цел постигане на окончателния повърхностен завършек. (Фиг. 33).



Фигура 33 Завършена отливка от полимербетон

6.3. Нанасяне на тънкослойно топлоизолиращо покритие, с цел подобряване на изолационните свойства на декоративния елемент.

За подобряване на топлотехническите характеристики на изработения декоративен елемент е приложено тънкослойно топлоизолиращо покритие, което осигурява допълнително термично съпротивление без промяна на геометрията. Покритието представлява акрилна дисперсия с кухи керамични микросфери и low-е добавки, които намаляват топлопроводността и инфрачервените загуби на повърхността. Преди нанасяне повърхността е почистена, обезпашена и подготвена за равномерно сцепление. Покритието е нанесено в **три слоя** при оптимална температура 15–25°C, с междинен интервал на съхнене 4–8 часа. Структурата на нанесената система е представена на фиг. 34. Разходната норма е приблизително 0.30 l/m², като полученият сух филм е с дебелина **0.30–0.40 mm**, което гарантира запазване на детайлността на релефа. След нанасяне е осигурена защита от овлажняване за минимум 24 часа. Термичното съпротивление е $R_{\text{покр}} = 0.00583 \text{ m}^2\text{K/W}$.



Фигура 34 Структура на нанесената система, включваща: 1 - декоративна основа; 2 - грундов слой (при необходимост); 3 - последователни слоеве тънкослойно топлоизолиращо покритие

Ефективността на покритието е потвърдена в Глава 3.7, където при външна температура от –5°C е отчетено повишение на вътрешната температура с 3.5°C в сравнение с фасада без покритие, както и понижение на топлинния поток през ограждащата конструкция. Получените резултати ясно показват, че тънкослойните топлоизолиращи покрития представлява ефективно решение за подобряване на енергийните характеристики на фасади с декоративни архитектурни елементи, включително такива, изработени чрез адитивни (3D печатни) технологии, при които използването на традиционни топлоизолационни материали е технически невъзможно или естетически недопустимо.

7. Оценка на изследването.

В рамките на експерименталната част разработената методология за дигитално възстановяване на декоративни фасадни елементи беше представена за външна експертна оценка пред група специалисти, включваща действащи архитекти от гр. Варна с квалификация по реставрация на недвижимо културно наследство, както и

скулптори-реставратори, работещи в областта на архитектурната орнаментика. Целта на представянето беше да се оцени технологичната последователност, качеството на постигнатите резултати и практическата приложимост на използваните дигитални и производствени технологии. Оценка на участниците бяха изключително положителни. Архитектите изтъкнаха високата прецизност на 3D сканирането, последователната логика на цифровата обработка и качеството на физическите модели. Те подчертаха, че бързината на процеса и неговата висока повтораемост представляват значителен напредък спрямо традиционните ръчни методи, които често са по-бавни, трудоемки и рискови за оригиналните елементи. По тяхна преценка методологията е приложима както при реставрация на сгради с културна стойност, така и в съвременни архитектурни композиции, където се търси прецизно възпроизвеждане на исторически фасадни мотиви. Скулпторите и реставраторите акцентираха върху високото качество на финалните реплики, получени чрез описания процес. Те отбелязаха визуалната точност, степента на детайлност и гладкостта на повърхностите, като подчертаха, че липсата на шупли и дефекти – характерни за класическите отливки – е съществено подобрение. Допълнително беше оценена и повишената механична устойчивост на използвания материал, което удължава експлоатационния живот на елементите и улеснява монтажа им. Според експертното становище на участниците методиката предлага устойчив, надежден и технологично осъвременен подход за възстановяване на декоративни фасадни елементи. Нейната дигитално-производствена структура позволява бързо, точно и ефективно възпроизвеждане на сложни архитектурни форми, като минимизира човешките грешки и оптимизира производствения процес. Специалистите единодушно заключиха, че внедряването на разработената методика би довело до съществено подобрение както в практиките за реставрация, така и в съвременното архитектурно проектиране, където историческите орнаменти намират нов живот в градската среда.

ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящият дисертационен труд представя задълбочено изследване на прилагането на съвременни адитивни технологии при реконструкцията и модернизацията на декоративни фасадни елементи. Проведените анализи показват, че комбинацията от 3D сканиране, дигитално моделиране, CNC обработка и вакуумно формование за създаване на калъпи предлага значително по-ефективни и технологично усъвършенствани решения спрямо традиционните реставрационни практики. От друга страна онаправата на отливки от полимербетон и нанасяне на тънкослойно топлоизолационно покритие върху репликите, подобряват визуалните качества на елементите и повишава функционалността им. Методологията е приложима както при частично увредени, така и при напълно липсващи елементи, като гарантира висока точност и оптимизация на производствения процес.

В изследването е разработена цялостна методика за възстановяване на декоративни фасадни елементи, обхващаща процеса от оценка на състоянието до създаване на физическа реплика. Въведена е система за класификация и маркиране на уврежданията, която предлага стандартизиран подход за определяне на подходящите реставрационни интервенции. Разработеният алгоритъм структурира етапите на работа и доказва своята ефективност чрез осигуряване на прецизност,

повторяемост и възможност за технологична оптимизация. Системата и алгоритмът предлагат приложима основа за бъдещи архитектурни обследвания и реставрационна практика.

Въведените методи за дигитализация чрез 3D сканиране доказаха своята ефективност като безконтактни и щадящи технологии, които позволяват улавяне на геометрия и релеф без риск от увреждане на оригинала. Дигиталната обработка на моделите, включително използването на съвременни софтуерни алгоритми и техники за реконструкция чрез симетрия, геометричен анализ и машинно обучение, предостави възможност за прецизно възстановяване на липсващи части и подобряване на дефектни участъци. Това представлява съществено предимство спрямо класическите ръчни техники, които са силно зависими от човешки фактор и ограничени от индивидуалните умения на реставраторите.

Анализът на технологиите за производство на физически модели показва, че CNC фрезоването предлага оптимално съотношение между прецизност, здравина и възможност за мащабиране, което го прави най-подходящ избор за създаване на основни модели за калъпи. Вакуумното формоване бе идентифицирано като бърз, икономичен и гъвкав метод за производство на калъпи, особено при експериментални или малкосерийни приложения.

Проучването на материалите за отливки допълнително потвърди, че съвременните композитни смеси, включително полимербетонът и топлоизолационното покритие, осигуряват значителни предимства по отношение на механичната и атмосферна устойчивост, плътност и дълготрайност на структурата, което ги прави особено подходящи за фасадни приложения. Използването на такива материали допринася за създаване на реплики, които не само възпроизвеждат оригиналната естетика, но и предлагат подобрени експлоатационни характеристики.



Фигура 35 Оригинал на изследвания обект - декоративен фасаден елемент



Фигура 36 Реконструиран декоративен фасаден елемент чрез съвременни адитивни технологии

В заключение може да се обобщи, че разработената методика представлява надежден и ефективен инструмент за дигитална реконструкция и производство на декоративни фасадни елементи. Тя съчетава традиционното художествено майсторство с иновациите на съвременните технологии, като създава нови възможности за реставрация, консервация и интегриране на исторически орнаменти в съвременната архитектурна среда.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Научно - приложни приноси

1. Извършен е систематичен анализ на развитието на технологиите за реконструкция и модернизация на декоративни фасадни елементи, като са проследени традиционните, преходните и съвременните подходи, което позволява да се очертае еволюцията на технологичните решения и ограниченията на класическите методи в съвременния контекст.

2. Разработен е критерий за оценка на състоянието на декоративните фасадни елементи, който позволява обективна класификация на степента на увреждане и подпомага процеса на вземане на решения относно необходимия вид реставрационна намеса.

3. Разработена и експериментално валидирана е методика за реконструкция на декоративни фасадни елементи чрез прилагане на цифрови и адитивни технологии. Методиката включва алгоритъм, който систематизира процеса от цифрово заснемане до създаване на физическа реплика, като осигурява точност, повторямост и реална приложимост при реконструкция на елементи с нарушена цялост.

Приложни приноси

4. Постигнато е подобрене на визуалните, механичните и изолационните качества на произведената реплика спрямо оригиналния декоративен елемент.

ПУБЛИКАЦИИ

1. **Todorova, T.,** Todorov, M., Dovramadjiev, T., Murzova, T., & Murzova, M. (2022). Creation of vacuum-forming matrices for making art-design products from concrete. *Acta Technica Napocensis – Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 65(Special Issue IV), 1397–1402.

2. **Todorova, T.,** Dovramadjiev, T., Murzova, T., Murzova, M., & Dobрева, D. (2023). Utilizing modern methods and technologies in concrete design products. *Acta Technica Napocensis – Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 66(Special Issue II), 409–416.

3. **Todorova, T. S. (2023).** Decorative screens as room dividers: Their historical use, modern materials, advantages, and applications. *Annual Journal of Technical University of Varna, Bulgaria*, 7(1), 61–67. <https://doi.org/10.29114/ajtuv.vol7.iss1.291>

4. **Todorova, T.,** Dobрева, D., Murzova, T., Murzova, M., Iliev, I., & Markov, V. (2024). Optimization of the 3D visualization process when adding additional elements in the design of an existing interior. *Materials Research Proceedings*, 46, 428–435. <https://doi.org/10.21741/9781644903377-54>

РЕЗЮМЕ

Настоящата дисертация е насочена към разработване на иновативна методика за възстановяване на декоративни фасадни елементи чрез интегриране на съвременни адитивни технологии в архитектурната реставрация. В отговор на предизвикателствата, свързани с деградацията на фасадната орнаментика и ограниченията на традиционните методи, изследването предлага технологично осъвременен подход, който комбинира прецизността на дигиталното моделиране с възможностите на 3D сканиране, CNC фрезозване, и вакуумно формоване.

Разработената методика включва ясно структуриран алгоритъм на технологичната последователност, който обхваща целия процес – от първоначалната диагностика и избор на обект, през създаването на цифров модел и физически прототип, до финалната отливка от устойчиви съвременни материали. Този алгоритъм служи като основа за експерименталната част и осигурява висока повтораемост, прецизност и оптимизация на процеса.

В хода на изследването е създадена и система за оценка и маркиране на фасадните елементи, позволяваща обективно класифициране на степента на увреждане и съответната реставрационна намеса. Методиката е валидирана чрез практическа реализация върху реален архитектурен обект, като получените резултати демонстрират висока естетическа стойност, повишена механична устойчивост и технологична ефективност на репликите.

Дисертационният труд доказва, че приложението на адитивни технологии в реставрацията не само съхранява историческите сгради, но и се адаптира успешно към съвременната архитектурна практика. Разработената методология предлага устойчива и мултифункционална платформа с потенциал за приложение както в консервационно-реставрационната дейност, така и в модерния архитектурен дизайн.

ABSTRACT

This dissertation focuses on the development of an innovative methodology for the restoration of decorative façade elements through the integration of modern additive technologies into architectural conservation. In response to the challenges associated with the degradation of façade ornamentation and the limitations of traditional techniques, the research proposes a technologically up-to-date approach that combines the precision of digital modeling with the capabilities of 3D scanning, CNC milling, and vacuum forming.

The developed methodology includes a clearly structured algorithmic sequence, covering the entire process—from the initial diagnosis and selection of the object, through the creation of a digital model and physical prototype, to the final casting using durable contemporary materials. This algorithm forms the basis of the experimental part and ensures high repeatability, precision, and optimization of the restoration process.

As part of the study, a classification and marking system for façade elements was created, enabling objective assessment of the damage and the corresponding restoration intervention. The methodology was validated through practical application on a real architectural object. The results demonstrated high aesthetic quality, improved mechanical resistance, and technological efficiency of the reproduced elements.

The dissertation proves that the application of additive technologies in restoration not only preserves cultural heritage but also adapts it effectively to contemporary architectural practice. The proposed methodology offers a sustainable and multifunctional framework with potential for use both in conservation-restoration work and in modern architectural design.