



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФАКУЛТЕТ ПО ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ
Катедра “Производствени Технологии и Системи”

Маг. инж. Константин Любомиров Димитров

МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО
ПРОТОТИПИРАНЕ НА ВИСОКОСКОРОСТНИ ДИНАМИЧНИ
ПРОЦЕСИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 „Машинно инженерство“

Научна специалност: „Автоматизация на инженерния труд и системи за
автоматизирано проектиране“

Научни ръководители: чл. -кор. проф. дн. инж. Георги Тодоров
проф. д-р инж. Константин Камберов

СОФИЯ, 2026г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Производствени технологии и системи към „Факултет по индустриални технологии“ на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 02.02.2026 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 30.04.2026 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ 5.1-21/17.02.2026 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Явор Софронов – председател
2. доц. д-р инж. Цветозар Иванов – научен секретар
3. проф. д-р инж. Стоян Малешков
4. доц. д-р инж. Валентин Атанасов
5. доц. д-р инж. Калин Крумов

Рецензенти:

1. доц. д-р инж. Явор Софронов
2. доц. д-р инж. Валентин Атанасов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на „Факултета по индустриални технологии“ на ТУ-София, блок №3, кабинет № 3230.

Дисертантът е редовен докторант към катедра “Производствени технологии и системи” на „Факултет по индустриални технологии“. Изследванията по дисертационната разработка са осъществени от автора с методичното ръководство на ръководителите му, като част от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът изказва специални благодарности на:

На екипа и ръководството на лабораторията „CAD/CAM/CAE в индустрията“ към ФИТ при ТУ-София, чието оборудване бе използвано при редица изследвания, описани в дисертационния труд;

На „Национален център за мехатроника и чисти технологии“, създаден по договор No BG05M2OP001-1.001-0008, за възможността да се ползва наличното специализирано оборудване;

На научните ми ръководители проф. дн Георги Димитров Тодоров, чл.-кор. и проф. д-р Костантин Христов Камберов за безценните съвети и съдействие по време на оформянето на дисертационния труд

На моите близки и приятели, които ми оказваха подкрепа за завършването на труда.

Автор: маг. инж. Константин Любомиров Димитров

Заглавие: Моделиране и изследване чрез виртуално прототипиране на високоскоростни динамични процеси

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИТУС на Технически университет - София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Дисертационният труд е насочен в областта на високоскоростните динамични въздействия и виртуалното прототипиране, като фокусът на изследването е върху моделирането, провеждането на експеримент, и валидацията на числени модели при бързопротичащи нелинейни процеси, което определя научно-приложната значимост и актуалността на изследването.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Въз основа на направеният анализ на състоянието на разглежданият проблем и на така описаните по-горе изводи, е формулирана следната цел на дисертационната работа:

Да се създаде работещ подход за моделиране и изследване на високоскоростни динамични процеси чрез анализи при използване на валидирани виртуални прототипи. От така определената цел произтичат следните основни задачи:

Задача №1: Да се изгради концепция за моделиране и изследване на високоскоростни динамични процеси чрез виртуално прототипиране.

Задача №2: Да се създаде методология за изграждане на виртуален прототип за извършване на инженерни анализи на високоскоростни динамични процеси

Задача №3: Да се създаде методология за провеждане на експериментални изпитвания за изследване на поведението на физически прототипи при високоскоростни динамични процеси;

Задача №4: Да се създаде подход за валидиране на виртуалните прототипи на високоскоростни динамични процеси посредством провеждане на експериментални изследвания на физически прототип

Задача №5: Да се оцени адекватността и приложимостта на създадения подход чрез апробация върху високоскоростен динамичен процес

Разработените методики целят повишаване на достоверността на симулационните резултати и създаване на систематичен и проследим процес за съпоставка между физически експеримент и числен анализ.

Научна новост

Разработена е методология за провеждане експериментални изследвания за изследване на поведението на физически прототипи при високоскоростни динамични процеси, разработена е методология за изграждане на изчислителен модел за извършване на инженерни анализи на високоскоростни динамични процеси на базата на виртуален прототип, разработен е интегриран подход за валидиране и изследване на високоскоростни динамични процеси, който съчетава методологиите за виртуално прототипиране и експериментални изследвания чрез доразвитие на метода „черна – бяла кутия“ в единна логическа структура

Практическа приложимост

Изготвени са практически насоки за планиране и провеждане на експериментални изпитвания при високоскоростни динамични въздействия, отчитащи ограниченията, свързани с разрушителния характер на тестовете, ограничен брой прототипи и спецификите на измервателната техника. Анализирано е влиянието на експерименталната техника върху възпроизводимостта на резултатите, като са идентифицирани фактори, влияещи върху ориентацията и кинематиката на падащите тела на чиято основа са формулирани препоръки за подобряване на точността при изпитвания от тип свободно падане. Извлечени са ползи за детайлната разработка и

оптимизация на дизайна на изделието батериен модул в съответствие с модела “черна-бяла кутия”.

Апробация

Изследванията по дисертацията са извършени в лабораториите “CAD/CAM/CAE в индустрията” към ФИТ на ТУ-София и “3D Креативност и бързо прототипиране“ към СНИРД, като част от изследванията са осъществени при работата по проекта “Национален център за върхови постижения по мехатроника и чисти технологии” .

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **204** страници, като включва увод, **5** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **123** литературни източници, като **121** са на латиница и **2** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **63** фигури и **5** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Публикации

Резултатите от дисертационната работа са публикувани и докладвани в следните научни публикации и научни форуми:

1. Todorov G., Kamberov K., **Dimitrov K.**, Approaches To Virtual Prototype Validation of Drop Tests, (2025) AIP Conference Proceedings, 3274 (1), art. no. 050009, DOI: 10.1063/5.0258754, Q4, SJR 2024: 0.153
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105000344621&doi=10.1063%2f5.0258754&partnerID=40&md5=c36756a357b70869d4ec4f361604c654>
2. Todorov G., Kamberov K., Gavrilov T., **Dimitrov K.**, “Drop test validation of a virtual prototype of EV Battery Pack”, 14th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 2024, Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Bulgaria), 55 (4), pp. 387 – 401 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105027095513&partnerID=40&md5=5ee9c74c0e9213462130a771fb6af633>
3. Todorov T., Bankov B., Zagorski M., Gavrilov T., **Dimitrov K.**, Rapid Prototyping and Measuring Assessment of a Complex Geometry (2024) 34th International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance 2024, MMA 2024, DOI: 10.1109/MMA62616.2024.10817673,
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85216922578&doi=10.1109%2fMMA62616.2024.10817673&partnerID=40&md5=5f05e60f87cbaad35bf73991c6d55f4c>
4. Todorov G, Kamberov K, Ivanov T, **Dimitrov K.** Virtual and Physical Prototyping in Mechanical Shock Test of an EV Battery Module. *Engineering Proceedings*. 2026; 121(1):12. <https://doi.org/10.3390/engproc2025121012>

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. ЛИТЕРАТУРНО ПРОУЧВАНЕ

Нарастващите изисквания към безопасността и надеждността на съвременните инженерни продукти мотивират изследвания в сферата, повишавайки нивото на знание и давайки възможност те да бъдат покривани чрез все по-точни, систематични и доказуеми инженерни анализи. В условията на ускорени цикли на разработка, усложняващи се конструкции и широка употреба на тънкостенни и композитни решения, динамичните въздействия се превръщат в критичен фактор при проектирането и оценката на изделията.

Високоскоростни динамични процеси

Високоскоростните динамични процеси обхващат явления, при които движението, деформацията и взаимодействията между обектите се случват в кратки времеви интервали – под $1 \cdot 10^{-1} \text{s}$. Те се характеризират с високи скорости, значителни инерционни ефекти и резки промени в натоварванията, които водят до сложни механични, термични и вълнови явления. Тези процеси могат да включват удари, експлозии, свръхзвукови движения, както и високоскоростни деформации на материали. Разбирането и анализът на такива процеси са важни за множество инженерни приложения, като проектирането на разнообразни потребителски продукти, автомобилната и аерокосмическата индустрия, балистичната защита, производствените технологии и материалознанието. [29] Чрез усъвършенствани методи на числено моделиране и експериментални техники, инженерите могат да предвиждат и оптимизират поведението на конструкции и материали при различни условия, което допринася за повишаване на безопасността, надеждността и ефективността на съвременните технологии.



Фигура 1-2: Обобщение на високоскоростните процеси и обхвата на изследването

Симуляционното моделиране като основен инструмент при изследването на високоскоростни динамични процеси

В съвременната индустрия изискванията към продуктите стават все повече, независимо дали става въпрос за изследване на поведението на изделието, гарантиране на безопасността на потребителя или целостта на продукта. От динамични влияния като удари и катастрофи до тестове на изпускане, в днешно виртуалните анализи са незаменим инструмент за проектиране на оптимизирани конструкции. [103] Тестовите на свободно падане са част от стандартните изпитвания, които гарантират надеждността, безопасността и качеството на продуктите. [104] Тези изпитвания се прилагат в различни

индустриални сектори, включително потребителски продукти, автомобилна индустрия, медицинска техника, опаковки и други. [22]

Програмни средства и инструменти за моделиране на високоскоростни динамични процеси

Съвременното симулационно моделиране на високоскоростни динамични процеси е неразривно свързано с използването на специализирани програмни средства, които осигуряват възможност за числено моделиране, анализ и интерпретация на силно нелинейни явления като удари, свободно падане, разрушаване и взаимодействие между различни среди. развитието на CAE (Computer Aided Engineering) софтуерите през последните десетилетия ги превръща в основен инженерен инструмент, без който провеждането на надеждни симулационни анализи е практически невъзможно. [3]

Изкуствен интелект в инженерните анализи

В последните години изкуственият интелект се използва като инструмент за предварителна оценка на резултати от инженерни анализи, като представлява естествено продължение на развитието на компютърно подпомогнатото инженерство. Към настоящия момент тези подходи все още не са напълно развити и широко разпространени в областта на високоскоростните динамични процеси и експлицитните числени анализи.

Изводи към глава 1

В рамките на текущата глава е извършено целенасочено литературно проучване, обхващащо съвременната научна и приложна литература в областта на виртуалното моделиране и числените анализи на високоскоростни динамични процеси, като:

- Обобщени са основните понятия, свързани с инженерните анализи и в частност с динамичните такива;
- Разгледана е физическата същност на високоскоростните процеси с акцент върху инерционните ефекти, вълновото разпространение и скоростно-зависимото материално поведение;
- Разгледани са високоскоростните динамични анализи като съществен елемент от жизнения цикъл на изделията с оглед намаляване на времето и разходите за разработка на продукти със специфични изисквания към поведението им при импулсни въздействия;
- Анализирани са актуални сфери на приложение на високоскоростните динамични симулации с цел позициониране на разработката в контекста на съвременните инженерни тенденции;
- Обобщени са основните методи за експериментална валидация на симулационни модели при високоскоростни динамични въздействия, включително високоскоростно заснемане, акселерометрични и тензометрични измервания, както и комбинирани подходи;
- Разгледани са използваните програмни среди и числени подходи за провеждане и валидация на динамични анализи, като са формулирани насоки за бъдещата работа по тематиката;
- Установено е, че в анализираните източници липсва ясно структуриран и формализиран подход за валидация на симулационния анализ при високоскоростни динамични процеси;
- Набелязани са критични параметри и настройки на динамичните симулации, които следва да бъдат отчетени още във фазата на концептуално изграждане на модела;
- На база на извършения анализ са формулирани целта и задачите на дисертационния труд.

2. КОНЦЕПЦИЯ ЗА МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВИСОКОСКОРОСТНИ ДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ

Главата формулира концептуална рамка за моделиране и изследване на високоскоростни динамични процеси чрез виртуално прототипиране. Представените постановки и критерии са резултат от извършеното литературно проучване и обобщават утвърдените в научната и приложната практика принципи за числено описание на бързопротичащи нелинейни явления. В този контекст са синтезирани основните изисквания към избора на числен подход, дефинирането на гранични и начални условия, формулирането на материални и контактни модели, както и условията за осигуряване на числена устойчивост и физическа достоверност на резултатите.

Основни елементи на концепцията

Концепцията за моделиране и изследване на високоскоростни динамични процеси чрез виртуално прототипиране се основава на три взаимосвързани направления, които определят цялостния подход, методи и критерии за оценка в настоящата дисертация:

- Изграждане на изчислителен модел
- Избор на метод за решение и настройка на анализа
- Верификация и валидиране на модела

Аналитично описание и числена формулировка на изчислителните модели

В главата са разгледани основните специфики на изчислителните модели при анализи на бързопротичащи явления, като се обобщават фундаменталните принципи на численото моделиране и факторите, влияещи върху устойчивостта, точността и физическата обосновааност на решенията. Представени са характерните особености на времевата интеграция, дискретизацията, материалното и контактното моделиране, както и основни насоки при избора и настройката на анализа. Формулирани са и препоръки, произтичащи от литературното проучване и инженерната практика, които подпомагат правилното конфигуриране на симулационните модели.

Концептуална рамка за изграждане на изчислителен модел

Изграждането на изчислителен модел за извършване на анализ на високоскоростни динамични процеси на базата на виртуален прототип изисква систематичен и последователен подход, при който геометрията, материалното поведение и граничните условия се разглеждат като взаимосвързани елементи на една обща числено-физична постановка.

В рамките на настоящата концептуална рамка изчислителният модел се разглежда не като директно копие на CAD геометрията, а като целево изградена числена репрезентация, съответстваща на характера на разглеждания динамичен процес. Това предполага осъзнат баланс между геометрична детайлност, материална адекватност и коректно зададени гранични и контактни условия, с цел разбиране на поведението на обекта при високоскоростни взаимодействия.

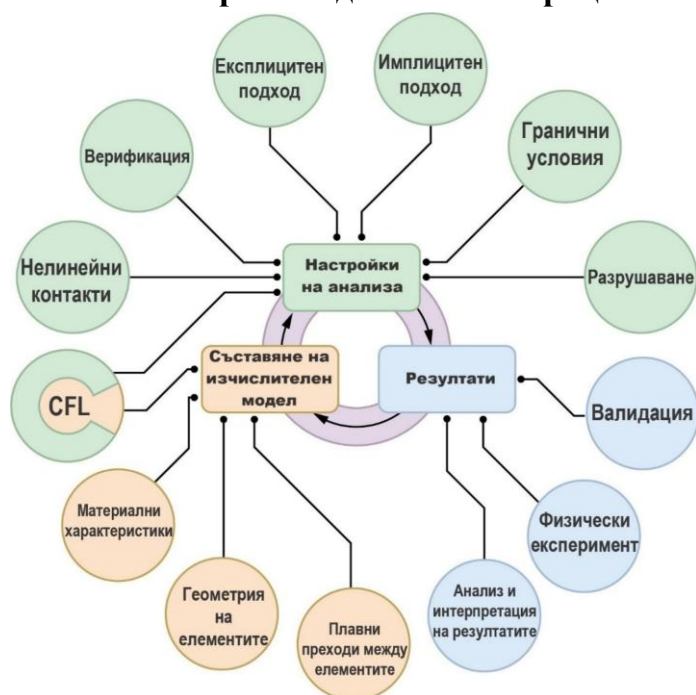
Избор на метод за числено решение

Изборът на метод за числено решение е ключов елемент от концепцията за моделиране и изследване на високоскоростни динамични процеси чрез метода на крайните елементи. Той определя начина на времевата интеграция, стабилността на решението и възможността за адекватно описание на нелинейните ефекти, характерни за ударните и шоките натоварвания.

Концептуална рамка за верификация и валидация

Верификацията и валидацията са два концептуално различни етапа в процеса на виртуално прототипиране, чрез които се оценява надеждността на числения модел и неговата приложимост. Верификацията е насочена към проверката на изчислителния модел и цели да установи дали моделът е изграден и параметризиран в съответствие с предварително дефинираната числена и концептуална постановка, без да се използват експериментални данни. Валидацията има за цел да оцени доколко изчислителния модел отговаря на реалното физическо поведение на изследваната система чрез сравнение с независими експериментални резултати.

Концептуална схема на направлението при моделирането на високоскоростни динамични процеси



Фигура 2-3: Специфики при моделирането на високоскоростни динамични процеси

Представена е концептуална схема, обобщаваща основните направления и ключови точки, към които трябва да се прояви повишено внимание при изграждането на изчислителен модел базиран на виртуален прототип за високоскоростни динамични процеси.

Схемата групира критичните аспекти на моделирането в три основни направления – съставяне на изчислителен модел, настройки на анализа и интерпретация на резултатите, като целта ѝ е да акцентира върху чувствителните параметри, които оказват доминиращо влияние върху стабилността, точността и физическата достоверност на численото решение.

Изводи към глава 2

Формулирана е концепция за моделиране и изследване на високоскоростни динамични процеси

чрез виртуално прототипиране, която дефинира основните принципи и критерии за изграждане на устойчиви числени модели. Концепцията обединява отделните етапи на анализа в единна логическа рамка за конкретен изследван обект в дисертационния труд;

Обобщени са основните математически зависимости и уравнения, описващи методите за времева интеграция систематизирайки принципите на симулационното моделиране при високоскоростни въздействия. Формирани са ценни препоръки за изграждането на виртуалния модел на концептуално ниво на база на разгледаните публикувани проучвания в сферата;

Всеки елемент е разгледан като част от взаимосвързана система, в която геометрията, материалните модели, числените настройки и оценката на резултатите оказват взаимно влияние върху резултатите от анализа;

Разработената концепция за виртуално моделиране предоставя гъвкава методологична рамка, която не е обвързана с конкретна числена реализация и може да бъде адаптирана към различни високоскоростни динамични задачи. Това създава необходимата основа за последващото разработване на методологии и реализиране на конкретни числени изследвания, представени в следващите глави на дисертационния труд.

3. МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ВИРТУАЛЕН ПРОТОТИП ЗА ИЗВЪРШВАНЕ НА ИНЖЕНЕРНИ АНАЛИЗИ НА ВИСОКОСКОРОСТНИ ДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ

Разработена е методология за изграждане на изчислителен модел базиран на виртуален прототип и провеждане на числен инженерен анализ на високоскоростни динамични процеси. Представената последователност осигурява систематична и възпроизводима основа за последваща експериментална валидация чрез интегриране във валидационен подход и за използване на виртуалния прототип като надежден инженерен инструмент в процеса на разработване и оценка на конструкции, подложени на високоскоростни динамични въздействия.

Роля на виртуалния прототип и инженерните анализи при високоскоростни динамични процеси

Виртуалният прототип е основен инструмент в съвременния инженерен анализ на високоскоростни динамични процеси, тъй като позволява изследване на поведението на конструкции при ударни и импулсни натоварвания още в ранните етапи на проектиране. С развитието на числените методи и изчислителната техника виртуалното прототипиране се утвърждава като ефективно средство за анализ, оптимизация и оценка на риска, като значително намалява необходимостта от многобройни физически прототипи.

Методология за изграждане на изчислителен модел на свободно падане

Въз основа на изградената концепция за съставяне на симулационен модел при високоскоростни динамични натоварвания, в настоящият раздел е разработена последователна методология за изграждане на изчислителен модел базиран на виртуален прототип. Процеса е дефиниран като последователност от методи за дефиниране на отделните стъпки, като конкретните настройки на модела и стъпки зависят от изследваната физика и конкретната задача, като насоки за тяхното дефиниране са дадени в предишната разгледана концептуална глава. Методологията има за цел да систематизира отделните етапи на численото моделиране и да осигури логическа връзка между теоретичните принципи, числените методи и експерименталната валидация.

Изграждане на изчислителен модел и провеждане на анализ на свободно падане

С цел демонстриране и валидиране на разработената методология за виртуално моделиране и валидация на високоскоростни динамични процеси е разгледан опростен ударен сценарий – свободно падане на стоманена сачма от търкалящ лагер върху твърда метална плоча, както вече е дефинирано в предишната глава.

Глобалният валидиращ параметър в изследването е височината на отскачане, регистрирана чрез високоскоростно видеозаснемане, която се използва за:

- експериментална оценка на загубите на енергия при удара;
- валидация на симулационния модел;
- аналитично изчисление на коефициента на възстановяване (COR).

В резултат на числения анализ е определена скоростта на сачмата след удара, на база на която е изчислена височината на отскачане. Получената стойност показва добро съответствие с експериментално измерената височина, регистрирана чрез високоскоростната камера, подробно описана в следващата глава. На база на началната скорост и тази на отскок е определен коефициентът на възстановяване, който служи като основен количествен индикатор за енергийните трансформации при удара. Съпоставката в етапа на валидация между числените, експерименталните и аналитичните резултати показва консистентно поведение и очаквана посока на отклоненията, обусловени от реалните контактни и материални ефекти.



Фигура 3-1: *Методология за изграждане на изчислителен модел (M1)*

контекста на свободното падане;

Описани са подробно стъпките от методологията в контекста на изграждането на виртуален модел за изпитване на свободно падане;

Методологията е апробирана чрез опростен пример – падане на стоманена сачма от търкалящ лагер върху твърда контактна повърхност, което позволява ясно дефиниране на геометрията, материалните характеристики и граничните условия;

Получените числени резултати създават надеждна основа за последваща експериментална и аналитична съпоставка, чрез която в следващите глави се извършва валидация на виртуалния модел и оценка на приложимостта на разработената методология.

Получените резултати потвърждават, че изграденият виртуален прототип има близко до очакваното поведение и може да бъде използван като надеждна основа за валидация на методологията и за последващи разширени числени изследвания.

Изводи към глава 3

Разработена е последователна методология за изграждане на виртуален прототип и провеждане на числен анализ на високоскоростен динамичен процес от тип свободно падане, като са отчетени насоките и етапите отбелязани в концептуалната глава. Останалите изводи са обобщени в следните точки:

Направено е сравнение между различни подходи в

4. ИЗСЛЕДВАНЕ МЕТОДОЛОГИЯ ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗПИТВАНИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОВЕДЕНИЕТО НА ФИЗИЧЕСКИ ПРОТОТИПИ ПРИ ВИСОКОСКОРОСТНИ ДИНАМИЧНИ ПРОЦЕСИ

Експерименталните изпитвания са неразделна част от изследването на високоскоростни динамични процеси, тъй като осигуряват обективна информация за реалното поведение на физическите прототипи при ударни натоварвания, в съответствие с модела „черна-бяла кутия“ . Те позволяват наблюдение и оценка на цялостното поведение на конструкцията, на механизмите на деформация и разрушаване, както и на енергийните процеси, които трудно могат да бъдат оценени коректно само чрез виртуално прототипиране.

Роля на експерименталните изследвания при анализ на високоскоростни динамични въздействия

Експерименталните изпитвания заемат ключово място в изследването на високоскоростни динамични процеси, тъй като позволяват оценка на реалното поведение на конструкциите при комплексни условия, характеризиращи се със силна нелинейност, контактни взаимодействия и високи скорости на деформация. В тези случаи, виртуалните прототипи, независимо от тяхната сложност, са ограничени от идеализации в геометрията, зададените материални характеристики и настройките на конкретния анализ. Поради наличието на много променливи за решението на подобна задача, както и на трудно предвидимото поведение на системата, често пъти се налага да се извърши валидация за гарантирането на коректни резултати. В практиката експериментът може да изпълнява няколко основни функции. От една страна, той често служи като средство за сертификация и проверка на съответствието на изделия и конструкции с нормативни изисквания при ударни натоварвания. Фокусът на текущата работа е насочен към експерименталните изпитвания които позволяват идентифициране на реалните механизми на деформация, разрушаване и трансформация на енергия, които често не могат да бъдат еднозначно извлечени от числени резултати. В този смисъл експериментът предоставя качествена и количествена информация за поведението на обекта при удар.

Измервателни методи при високоскоростни динамични експерименти

При изпитванията от тип свободно падане информацията за динамичното поведение на тестовия образец не може да бъде получена директно чрез класически статични или квазистатични измервания. Оценката на резултатите се базира на регистриране на глобални кинематични параметри (скорост, преместване, време на контакт) и на наблюдение на настъпилите еластични и пластични деформации.

В главата са разгледани основните експериментални подходи за регистриране и оценка на динамичното поведение при ударни натоварвания, използвани както в индустриалната практика, така и в съвременните научни изследвания. Представен е обзор на физическите, виртуалните и хибридните методи за измерване и анализ, като акцентът е поставен върху тяхната приложимост при валидация на виртуални прототипи. Анализирани са предимствата, ограниченията и нивото на достоверност на различните подходи в зависимост от геометрията, материала и характера на динамичното въздействие. Основните използвани подходи са:

- Високоскоростно видеозаснемане
- Оценка на остатъчна пластична деформация
- Аналитични пресмятания
- Хибридни подходи

Методология за провеждане на експериментални изпитвания при тестове на високоскоростни динамични въздействия

В подглавата е формулирана методология за провеждане на експериментални изпитвания при високоскоростни динамични въздействия, попадащи в обхвата на дисертационния труд. методологията стъпва върху разгледаните в предходните раздели класификации на експериментални

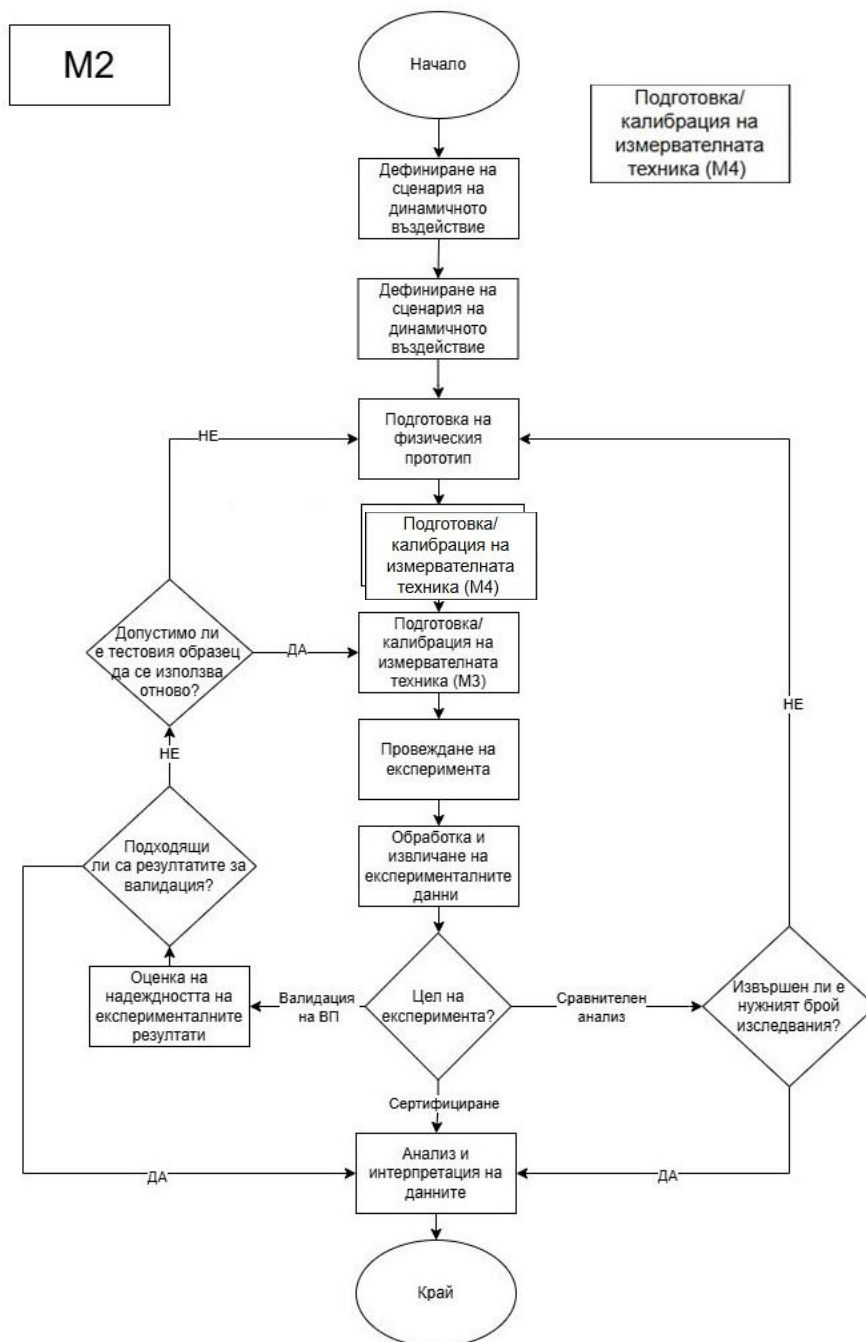
методи, измервателни подходи и принципи за валидация на виртуални прототипи.

Предложената методология е приложима за различни типове високоскоростни въздействия в разглеждания времеви диапазон, включително свободно падане, ударни взаимодействия и други импулсни сценарии, характеризиращи се с кратка продължителност на контакта, силно нелинейно поведение и ограничени възможности за директно измерване на вътрешните процеси.

Методологията обединява последователно планиране на експеримента, дефиниране на граничните условия и натоварващите случаи, подготовка на прототипа и измервателната система, провеждане на изпитванията и първична оценка на резултатите. Подходът е формулиран на концептуално ниво, без обвързване с конкретна конструкция или мащаб, което позволява адаптация към различни инженерни приложения.

Оценка и анализ на резултатите. Протоколи от изпитвания

Оценката на резултатите се извършва въз основа на предварително дефинирани критерии, съобразени с целта на експеримента – валидация, сравнителен анализ или



Фигура 4-1: Методология за провеждане на експериментално изследване – (M2)

сертифициране. Ключов елемент в този процес са протоколите от изпитвания, които осигуряват структурирано и проследимо документиране на проведените тестове.

Протоколите от изпитвания съдържат информация за тестовия образец, експерименталната постановка, използваната измервателна техника, настройките на оборудването, условията на изпитване и наблюдаваните резултати. Те служат като основа за последваща интерпретация на данните, за оценка на повторяемостта и за аргументиране на надеждността на експерименталните резултати. В контекста на настоящото изследване протоколите от изпитвания имат допълнителна роля като връзка между физическите експерименти и числения анализ, позволявайки директна съпоставка на ключови параметри и обективна оценка на степента на съответствие между експерименталния и виртуалния прототип.

Изследване на експерименталната техника

В настоящата глава е извършено изследване на работата на машина за изпитвания на свободно падане, с фокус върху динамиката на падащата маса и влиянието ѝ върху запазването на ориентацията на тестовия обект. Анализирани са реалните движения на установъчната маса в началния етап на изпитването чрез високоскоростно видеозаснемане, като целта е да се идентифицират източници на отклонения от идеалното поведение и да се оцени приложимостта на машината за изпитвания по различни стандарти. Получените резултати служат като основа за формулиране на практически насоки относно използването на машината, както и за критична оценка на ограниченията, които следва да бъдат отчетени при интерпретация на експерименталните данни.

Експериментални изследвания на динамични високоскоростни процеси и валидация на представената методология

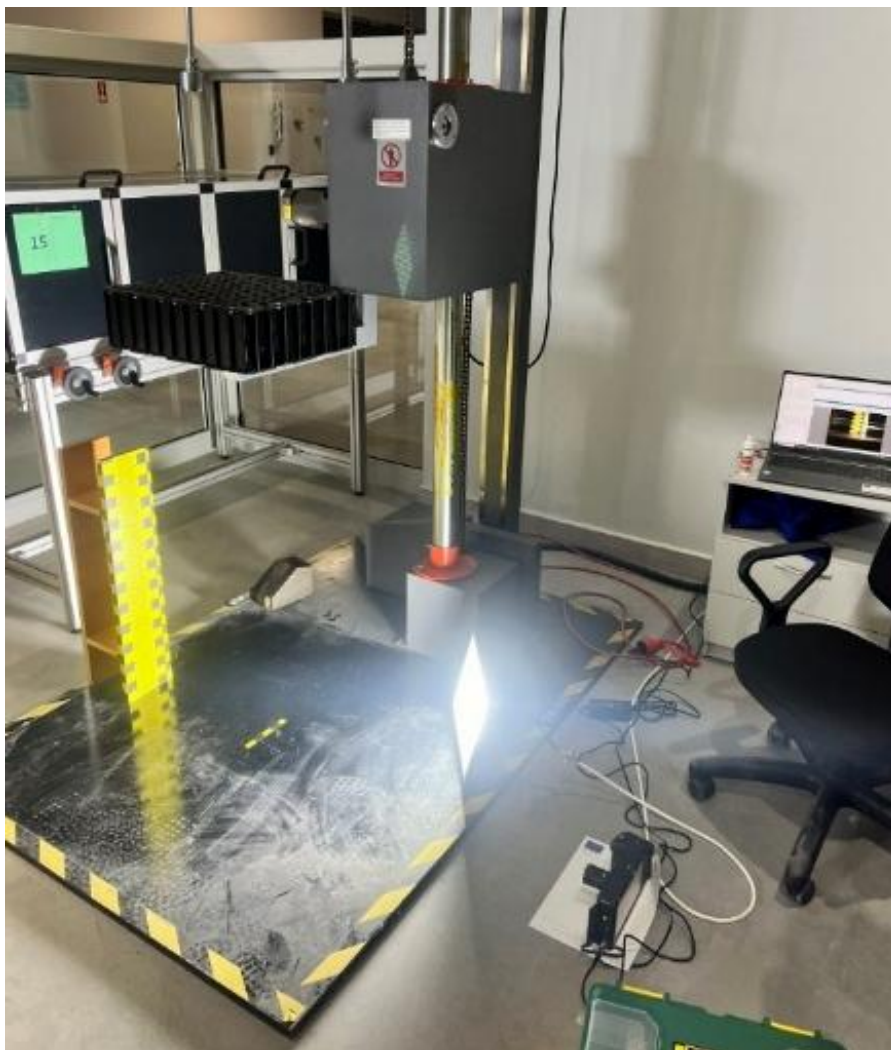
В главата е представено прилагането на разработената експериментална методология за изследване на високоскоростни динамични процеси чрез изпитвания от тип свободно падане. За целите на валидацията е използван опростен и добре дефиниран експериментален обект от предишните глави с цел продължаване на изследването – стоманена сачма от търкалящ лагер, което позволява ясна интерпретация на резултатите и минимизиране на допълнителни конструктивни и технологични влияния.

Проведените експерименти имат за цел да осигурят надеждна експериментална база за определяне на кинематичните показатели при удар, като основен оценъчен параметър е използвана височината на отскачане и съответно коефициентът на възстановяване. Получените резултати служат за експериментална и аналитична съпоставка с числения модел, представен в предходната глава.

Експериментите са проведени с помощта на стандартна машина за изпитвания на свободно падане без направляващи, в съответствие с изискванията на стандарт ISO 2248. Използваната постановка осигурява добра повторяемост на условията на изпитване и минимално влияние на паразитни движения и завъртания на тестовия обект.

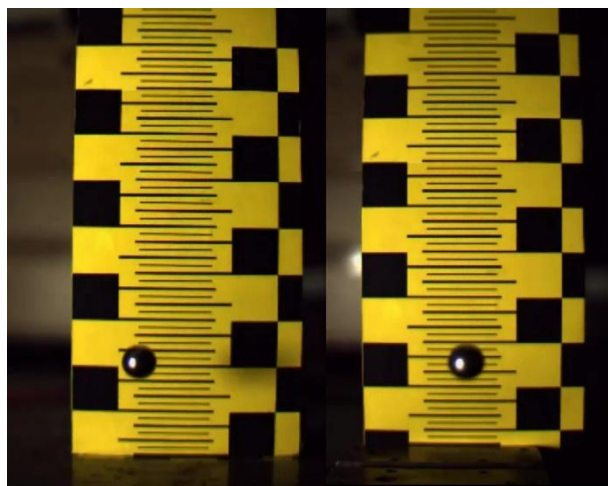
Височината на падане е зададена като 1 m, което съответства на скорост на контакт приблизително 4.43 m/s. Механизмът на машината ускорява падащото тяло с по-висока начална скорост в сравнение със свободното падане под действие на земното притегляне, което води до висока повторяемост на контактната позиция и улеснява регистрирането на процеса чрез високоскоростно видеозаснемане. За регистриране на движението е използвана високоскоростна камера със скорост на запис 1500 кадъра в секунда. Полето на зрение е ориентирано вертикално, което позволява при изпитванията с по-меката контактна плоча да бъде заснета пълната траектория на отскока и съответната височина, а при по-твърдата плоча – точно определяне на скоростта непосредствено след контакта.

В резултат на проведените изпитвания е отчетена височина на отскока от приблизително 85 cm при използване на по-твърдата контактна плоча и около 32 cm при по-меката плоча. Тези резултати ясно демонстрират значителното влияние на механичните свойства на контактната повърхност върху енергийните загуби при удар. При изпитванията с по-меката плоча е наблюдавана ясно изразена локална пластична деформация в зоната на контакт, показана на Фигура 4-11. Тази деформация води до значително пониска височина на отскока и съответно пониска стойност на коефициента на възстановяване.

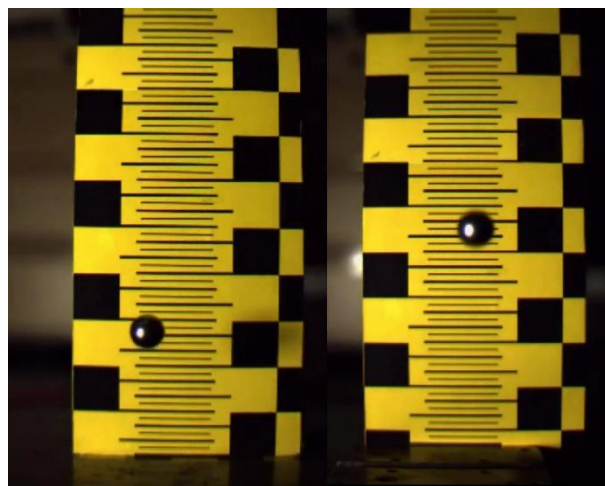


Фигура 4-12: Експериментална установка

Резултатите, получени при по-твърдата контактна плоча, са използвани за последваща аналитична и числена съпоставка, тъй като механичните свойства на плочата са по-близки до тези на стоманеното топче и влиянието на пластичната деформация е ограничено. На тази база е определен коефициент на възстановяване $COR \approx 0.85$, който е в съответствие с очакваните стойности за контакт между стоманени тела с висока твърдост.



(а) Преди контакта



(б) След контакта

Фигура 4-13: Сравнение на височината на отскачане

Експериментални изследвания на динамични високоскоростни процеси и валидация на представената методология

Надеждното отчитане на експерименталните резултати при изпитвания от тип свободно падане изисква контрол върху три ключови елемента: (1) възпроизводимост на условията на падане, (2) достатъчна визуална информация за ориентацията и контактния момент и (3) измерима величина, подходяща за количествена съпоставка с изчислителния модел. В настоящото изследване основният експериментален индикатор за валидация е коефициентът на възстановяване (COR), определян чрез височината на отскачане и/или скоростта след удара, извлечени от високоскоростно видеозаснемане.

Изводи от глава 4

Разработена е методология за планиране, провеждане и анализ на експериментални изследвания при високоскоростни динамични въздействия, ориентирана към подготовка на надеждни данни за последваща валидация на виртуални прототипи. Останалите изводи са обобщени в следните точки:

- Извършено е изследване на използваното лабораторно оборудване за тестване при свободно падане с акцент върху възпроизводимостта и запазването на ориентацията при контакт. Чрез високоскоростни записи са идентифицирани странични отмествания на падащата маса.
- Формулирани са практически насоки за минимизиране на влиянието на отместването на падащата маса
- Методологията е апробирана с прост пример – свободно падане на метална сфера, в съответствие с предишните глави на концепиране и провеждане на симулационен анализ.
- Експериментите са успешно проведени, като е заснета прецизно височината на отскок за целите на валидацията на симулационния модел.

5. ПОДХОД ЗА ВАЛИДИРАНЕ НА ВИРТУАЛНИТЕ ПРОТОТИПИ ПОСРЕДСТВОМ ПРОВЕЖДАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ФИЗИЧЕСКИ ПРОТОТИПИ

Валидацията на виртуалните прототипи представлява ключов етап в анализа на високоскоростни динамични процеси, тъй като чрез нея се установява степента на съответствие между числения модел и реалното физическо поведение. Този процес не се свежда до директно съвпадение на отделни резултати, а изисква целенасочен избор на валидиращи показатели, подходящи методи за сравнение и ясни критерии за приемане на корелацията.

Роля на валидирането при виртуално прототипиране на високоскоростни динамични процеси

Самостоятелното използване на числени модели при високоскоростни динамични процеси е ограничено от редица допускания и идеализации. Независимо от напредъка на изчислителните методи и софтуерните инструменти, численият анализ не може еднозначно да гарантира коректно възпроизвеждане на реалното физическо поведение без експериментална референция. Поради това валидирането не следва да се разглежда като еднократно сравнение на резултати, а като итеративен процес, при който численият модел се оценява, коригира и усъвършенства на базата на експериментално установени зависимости и тенденции.

В този контекст валидирането заема централно място в цялостния изследователски цикъл, свързвайки експерименталните изпитвания и числения анализ в единна методологична рамка. Чрез него се осигурява преход от физическите наблюдения към

задълбоченото интерпретиране на процесите във виртуална среда и обратно. Валидираният виртуален прототип не само възпроизвежда измерими експериментални показатели, но и позволява анализ на вътрешни величини, които не могат да бъдат директно наблюдавани експериментално. Концептуалната основа на този подход може да бъде описана чрез модела „черна – бяла кутия“. Физическите прототипи се разглеждат като „черна кутия“, при която са достъпни единствено входните въздействия и изходните реакции, без възможност за директно наблюдение на вътрешните процеси. За разлика от тях, виртуалните прототипи функционират като „бяла кутия“, при която структурата, логиката и взаимовръзките между отделните елементи са напълно известни и подлежат на анализ. Комбинирането на двата подхода в итеративна свързаност позволява физическият експеримент да служи като референция за проверка на числения модел, а виртуалният анализ – като инструмент за интерпретация и обобщаване на наблюдаваното поведение.

Методи за валидация

Извършена е обобщена съпоставка между основните методи за валидация на виртуални прототипи чрез физически експерименти на база на разгледаните в литературното проучване трудове. В Таблица 5-1 са систематизирани различните експериментални подходи, съответните валидиращи индикатори, нивото на точност, бързината на прилагане, приложимостта и потенциала им за валидация на виртуални модели. Анализът показва, че част от методите имат универсален характер и могат да бъдат прилагани при широк клас задачи, докато други са силно ограничени до специфични приложения и геометрии, което е отразено в колоната „Ниво на приложимост“. Нивото на валидация оценява в каква степен съответният експериментален метод е достатъчен за надеждна валидация на виртуалния модел, при условие на добра кореспонденция между експериментални и числени данни. Посочената точност е обобщена на база релевантни научни публикации, а критерият „Бързина“ отчита необходимия обем операции и времето за обработка на експерименталните резултати.

<i>Таблица 5-1: Методи за виртуална валидация чрез физически експерименти</i>					
Метод	Индикатори	Точност (%)	Бързина	Ниво на приложимост	Ниво на валидация
VIS	Видима пластична деформация	Средна	Бавно	Средно	Високо
3DSC	Сканирана конструкция преди и след физически експеримент	Висока	Бавно	Средно	Високо
HSC	Първоначална скорост, максимална деформационна дължина, височина на отскачане	Средна	Бавно	Високо	Високо
HSC	Честота	Средна	Средно	Ниско	Средно
EFC	Честота	Средна	Бързо	Ниско	Средно
HSC	Ускорение при удара	Висока	Средно	Високо	Ниска
ACC	Таблични стойности	Висока	Бързо	Високо	Ниска
SG	Таблични стойности	Висока	Бързо	Средно	Средна
Хибриден подход	В зависимост от случая	Висока	Бавно	Високо	Високо

, където:

HSC – Високо скоростно заснемане (High speed capturing)

PIE – Физическо - визуална инспекция (Physical inspection by eye)

EC – Аналитични изчисления (Energy calculations)

ACC – Акселерометър (Accelerometer)

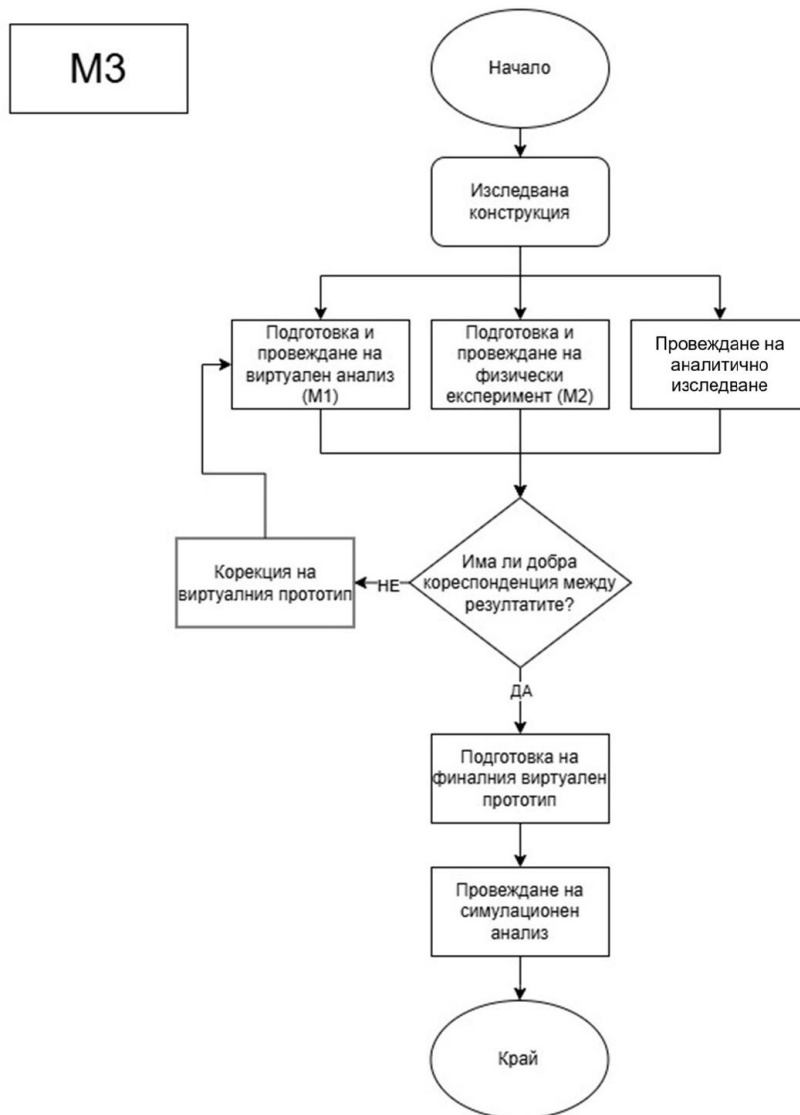
SG – Тензومتър (Strain gauge)

3DSC – 3Д сканиране за оценка на пластична деформация (3D scanner for plastic deformation measurement)

VIS – Визуално (Visual)

Подход за валидиране на динамични симулации

В рамките на подхода са включени двете представени методологии както и блок за аналитична оценка на поведението на тестваните обекти, следвани от проверовъчен блок, като тази структура позволява прилагане на итеративен подход, до достигане на добро ниво на кореспонденция на резултатите от симулационния анализ в контекста на разгледания модел „черна-бяла“ кутия. Не е задължително условие да се провеждат както експериментални, така и аналитични изследвания, възможно е да се ползва само един метод на валидация, но практиката показва че хибридният подход води до най-оптимални резултати. Представената блок схема е дефинирана като подход, тъй като използва методологии като дискретни стъпки в последователността си.



Фигура 5-1: Подход за валидиране на ВП на динамични натоварвания (M3)

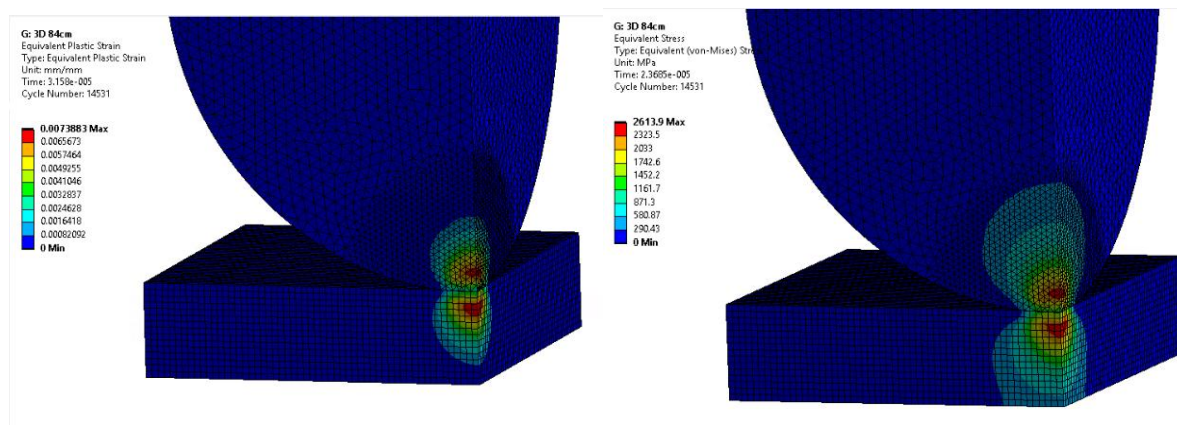
физическата система. В главата е приложен хибриден валидационен подход, съчетаващ аналитична оценка и експериментална съпоставка, като междинна и обективна референтна величина е използван коефициентът на възстановяване. Изборът на този показател е обоснован от факта, че той описва глобалното енергийно поведение на системата при удар и може да бъде определен както аналитично, така и експериментално и числено. При прост геометричен обект, какъвто е стоманена сфера,

Валидация на виртуален симулационен модел на високоскоростен динамичен процес

Валидацията на виртуални модели при високоскоростни динамични процеси често изисква комбиниране на различни подходи, особено в случаи, при които входните данни за материала и контактните тела не са напълно известни или са обект на значителни неопределености. В такива ситуации директната експериментална съпоставка със симулационните резултати може да доведе до значителни отклонения, които не произтичат от некоректност на числения модел, а от ограниченията в описанието на

COR представлява надежен и лесно интерпретируем параметър за оценка на адекватността на виртуалния модел.

Постигнато е много добро съответствие между резултатите, получени чрез трите независими подхода за определяне на коефициента на възстановяване. Аналитично изчислената стойност е $e = 0.844$, експериментално определената стойност е $e = 0.85$, а резултатът от числения анализ е $e = 0.84$. Близостта между тези стойности показва консистентност на подходите и потвърждава приложимостта на комбинирания аналитично–експериментално–числен метод за валидация на тестове от тип свободно падане и за оценка на поведението на обекта при удар.



Фигура 4-11: Представяне на напреженията и деформациите

Валидиран виртуален прототип като основа за разширени числени изследвания

След извършената валидация, симулационният модел може да бъде използван като надеждна основа за разширени числени изследвания, надхвърлящи обхвата и ограниченията на физическите експерименти. Това позволява ефективно използване на модела като инженерен инструмент в по-късните етапи от разработката на изделието.

Основните направления на приложение на валидирания виртуален прототип включват:

- Изследване на сценарии извън експерименталния обхват, като по-големи височини на падане, различни контактни повърхности или комбинирани натоварвания;
- Анализ на неблагоприятни и трудно реализуеми експериментални случаи, включително несиметрични удари и гранични ориентации;
- Използване на модела за параметрични изследвания, конструктивна оптимизация и оценка на риска при ударни натоварвания.

Допълнително предимство на валидирания виртуален прототип в контекста на черна – бяла кутия е възможността за детайлен достъп до вътрешни величини, които не могат да бъдат директно измерени по експериментален път, като разпределения на напрежения, локални пластични деформации, скорости на деформиране и енергийни компоненти по време на удара. По този начин валидираният виртуален прототип не се ограничава до възпроизвеждане на експерименталните резултати, а се превръща в разширение на експерименталното изследване, позволяващо задълбочен анализ на физическите процеси и подпомагащо вземането на обосновани инженерни решения при високоскоростни динамични въздействия. Друго голямо предимство е възможността за използване на вече валидирания виртуален прототип за разширяване на обхвата на изследвания.

Изводи към глава 5

Разработена и приложена е последователен подход за валидация на виртуални прототипи при високоскоростни динамични процеси, който интегрира аналитичен, експериментален и числен подход в единна логическа рамка. Останалите изводи са обобщени в следните точки:

- Систематизирани са разгледаните проучвания, касаещи се до валидиране на динамични симулационни анализи
- На база на разгледаните проучвания са анализирани и сравнени методите за валидация на виртуалните динамични анализи;
- Извършеният сравнителен анализ на методите за валидация показва, че комбинирането на различни експериментални и аналитични подходи води до по-високо ниво на достоверност спрямо използването на единичен метод.
- Извършеният сравнителен анализ на методите за валидация показва, че комбинирането на различни експериментални и аналитични подходи води до по-високо ниво на достоверност спрямо използването на единичен метод.
- Изпълнен е хибриден подход за валидиране, при който коефициентът на възстановяване е използван като глобален и устойчив индикатор за енергийното поведение на системата при удар.
- Приложен е разработения подход, като се наблюдава много добро съответствие между резултатите от апробацията на изследваните методологии за изграждане на изчислителни модели на виртуални прототипи и провеждане на експериментално изследване, както и на валидация чрез аналитично пресмятане.
- Разработения подход работи успешно в контекста на прост пример на динамичен симулационен анализ.

6. ОЦЕНКА НА АДЕКВАТНОСТТА И ПРИЛОЖИМОСТТА НА СЪЗДАНИЯ ПОДХОД ЧРЕЗ АПРОБАЦИЯ ВЪРХУ ВИСОКОСКОРОСТЕН ДИНАМИЧЕН ПРОЦЕС НА СВОБОДНО ПАДАНЕ

Разгледано е практическото прилагане на разработения системен подход за моделиране на високоскоростни динамични процеси чрез инструментите на виртуалното прототипиране. Фокусът е върху изграждането на изчислителен модел на виртуален прототип и провеждането на експлицитен числен анализ на сценарий от тип свободно падане, като процесът е структуриран така, че да осигури проследимост между входните допускания, числената постановка и измеримите изходни показатели. По този начин се създава основа за верификация на модела (последователност на постановката) и валидиране спрямо експериментални резултати (съответствие с физическото поведение).

Като пример е разгледан батериен модул за електрическо превозно средство, част от модулна оребрена структура, при която отделни функционални компоненти са интегрирани в сборна единица и носеща система. Подобни конструкции са реалистично изложени на механични въздействия по време на производство, монтаж и сервизни операции, поради което оценката на поведението при падане от ограничена височина представлява релевантен и практически значим сценарий. Изборът на този обект е мотивиран от факта, че механични въздействия могат да възникнат не само при експлоатация, но и по време на транспорт, монтаж и обслужване, като в определени случаи те могат да представляват риск за безопасността. В рамките на дисертационния труд са разгледани динамични въздействия на ускорение и свободно

падане, дефинирани в приложимите стандарти ISO 16750-3 и UN/ECE-R100, които дефинират минимални изисквания към подобни изпитвания, но в рамките на текущата работа те са разширени чрез разглеждане на допълнителни неблагоприятни сценарии с научна цел.

Изграждане на изчислителен модел и провеждане на анализ на свободно падане

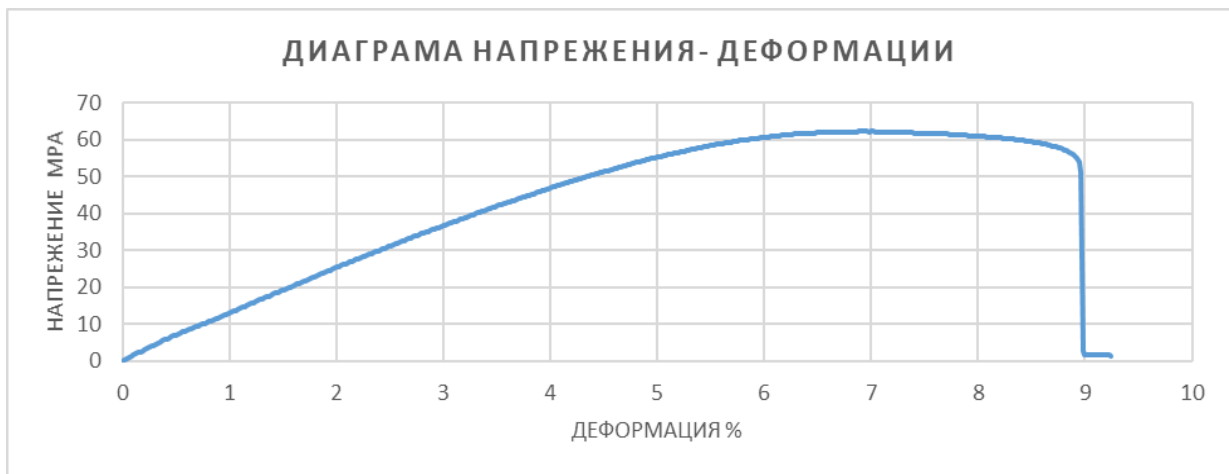
Както е споменато и в концептуалната глава, за целите на валидиране на разработената методология е изграден симулационен анализ на ударно натоварване от тип свободно падане и е извършена последваща валидация чрез експериментални изпитвания. Изследваният обект представлява модулна структура, съдържаща като компоненти електрически батерии, използвана в електрическо превозно средство, който е част от модулна структура съгласно т.нар. концепция – клетки, обединени в базов модул, сглобена единица и интеграция в носеща структура на превозното средство. Подобна конфигурация предполага възможност за механични въздействия при производство, монтаж и сервизна дейност, което налага изследване на поведението при падане от ограничена височина. Изходният CAD модел на батерийния модул е разработен извън рамките на настоящата дисертационна работа и отразява основните конструктивни, функционални и технологични изисквания към изделието. При проектирането са взети предвид вътрешната структура на базовия модул (компоненти електрически батерии, управляваща електроника и окабеляване), външните интерфейси с останалите подсистеми, както и ограничения, свързани с топлинно поведение, производствена технология и възможности за рециклиране. След изработване на физически прототип и одобрение на конструктивната концепция, тази геометрия е използвана като изходна основа за изграждане на виртуалния прототип в рамките на настоящото изследване. За целите на числения анализ и фазата на валидиране, геометрията е опростена в съответствие с приетата методология, като са премахнати нейни компоненти, които не допринасят съществено за якостните характеристики и динамичното поведение на конструкцията при ударно натоварване. Функционалните батерийни клетки са заменени с олекотени макети, при които е запазена геометрията и носещата способност на корпуса на клетките, но масата е значително намалена.



Фигура 6-1: Виртуална геометрия

За числения анализ е конфигурирана експлицитна динамична постановка със специфични настройки, съобразени с характера на разглеждания процес. В началния етап са проведени итерации с опростено материално описание, включващо единствено линейно-еластично поведение. В резултат на това е установено, че за коректното описание на отговора при ударно натоварване е необходимо въвеждане на реалистични материални характеристики, включително пластично поведение. С цел

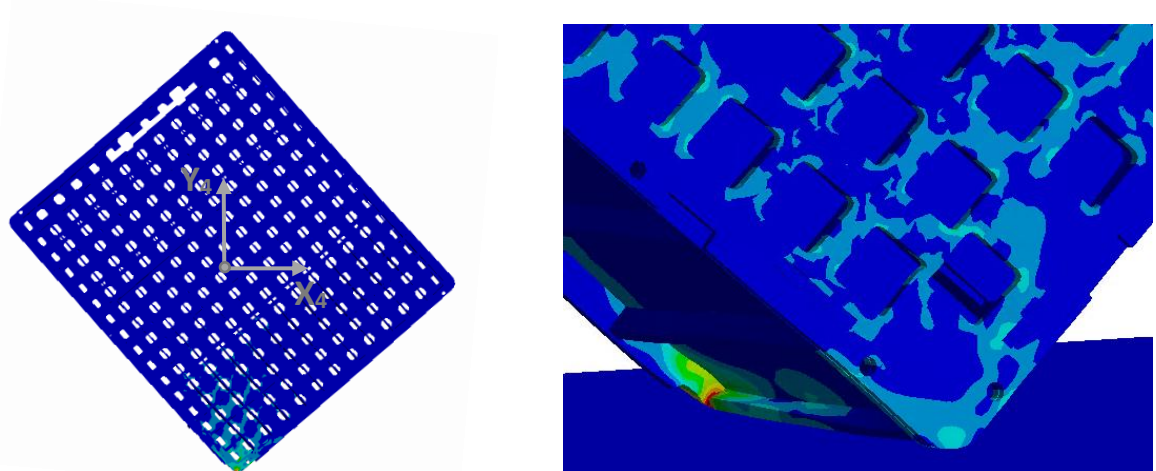
определяне на надеждни данни за материалните характеристики са проведени експериментални изпитвания на опън върху три идентични образеца от производствения материал на корпуса на базовия пакет – BayBlend® FR3040 EV (поликарбонат–ABS). На база на получените резултати е определена експериментална диаграма напрежение–деформация, представена на Фигура 6-2.



Фигура 6-2: BayBlend® FR3040 получена крива на напрежения/деформации

Дефинирането на контактните взаимодействия е от съществено значение за коректното представяне на виртуалния прототип, поради относителното преместване на отделните компоненти на батерийния модул по време на удара. Използването на опростени линейни контакти между батерийните клетки и корпуса би довело до изкуствено повишаване на общата коравина на системата, което от своя страна би довело до по-високи пикови ускорения, напрежения и по-голяма скорост на отскок, както и до възможна числена нестабилност на модела. Поради тази причина в настоящия анализ са използвани нелинейни контактни формулировки.

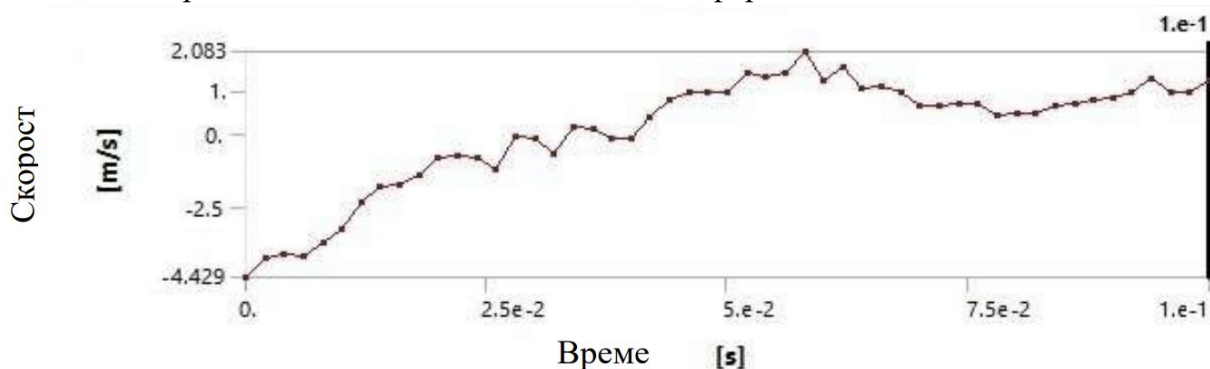
Между компонентите електрически батерии и корпуса са дефинирани контакти с триене, като са приети коефициент на статично триене 0,4 и коефициент на динамично триене 0,3. Тези стойности се намират в горната граница за разглежданите материали и са съобразени с реалното състояние на контактните повърхности на физическия прототип, изработен чрез лазерно рязане, при което се наблюдава повишена грапавост на ръбовете.



Фигура 6-3: Контакт с плочата

Съществен етап при изграждането на изчислителния модел е дискретизацията на обема. Поради различните ориентации на контакт при разглежданите случаи на свободно падане, отделни зони от конструкцията се подлагат на значително по-високи градиенти на напрежения и деформации. Това налага използването на нееднородна мрежа, при която плътността на крайните елементи се адаптира спрямо очакваното локално натоварване. Критичните области в зоните на контакт са идентифицирани по итеративен път на база предварителни числени решения. В тези области е приложено локално уплътняване на мрежата чрез използване на сфери на влияние с радиус 30 mm. За осигуряване на плавен преход между уплътнените и по-грубите зони са зададени коефициент на преход 0,5 и коефициент на нарастване на размера на елементите 2, което гарантира адекватно качество на мрежата както в критичните обеми, така и в преходните области.

След извършване на численото решение максималната стойност на еквивалентните напрежения в корпуса достига 153 МПа, като отчетената пластична деформация е приблизително 0.4%. В батерийните клетки максималните напрежения не надвишават 3 МПа, като при тях не се наблюдава пластична деформация.



Фигура 6-4: Скоростен профил на LC4 на виртуалния модел в момента на удара

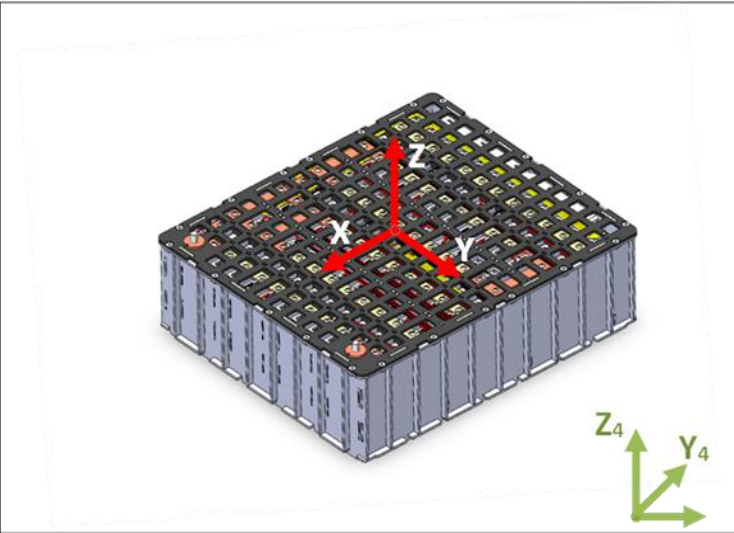
Идентифицирана е критична зона в областта на контактния ъгъл, където се очаква инициране на разрушаване, което съответства на наблюдаваното експериментално поведение. На Фигура 6-4 е представено изменението на скоростта като функция на времето по вертикално направление за една от характерните проследявани точки, използван впоследствие при валидацията чрез сравнение с експерименталните данни. Показани са началната скорост преди удара и скоростта след контакта, като се отчита контактно време от порядъка на 0.1 s. В този интервал се наблюдава рязка промяна в скоростта, което ясно индикира момента на удара, след който движението преминава към режим на затихващо забавено движение.

Експериментални изследвания на динамични високоскоростни процеси и валидация на представената методология

В главата е представено прилагането на разработената експериментална методология за изследване на поведението на физически прототипи при високоскоростни динамични въздействия. Чрез изпитвания от тип свободно падане се демонстрира практическата реализация на избраните експериментални сценарии, измервателни подходи и критерии за оценка.

На Фигура 6-5 е показан тествания обект и съответно ориентацията на контакт в различните итерации на експеримента, подредени от LC1-LC4. За физическото тестване е използван един прототип – често срещана практика в автомобилната индустрия, като е наблюдавано и записвано състоянието му след всеки експеримент, като всяка ориентация на контакт при различните итерации не е засегната от предишна такава.

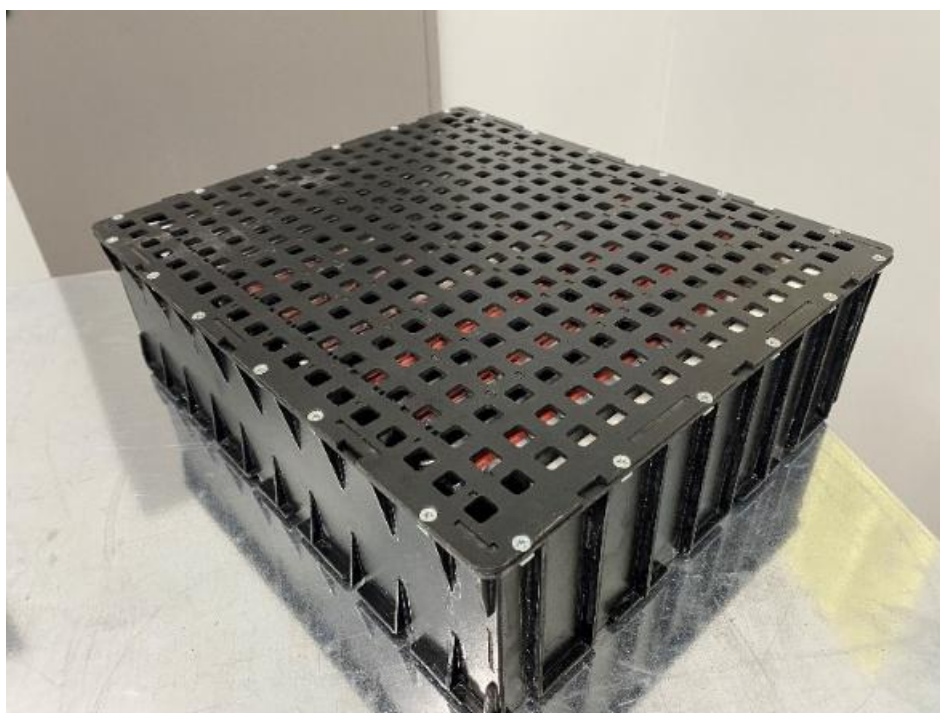
Постановка #	Посока на свободно падане
LC1	Ос Z
LC2	Ос Y
LC3	Ос X
LC4	XY комбинация (ос Y ₄)
LC5	XYZ комбинация



Фигура 6-5: Ориентации на контакт при тестовете на свободно падане

Физическият прототип, показан на Фигура 6-6, е изграден на базата на проектната геометрия и е реализиран чрез технологии за бързо прототипиране, в конкретния случай лазерно рязане и химично слепване. Този подход е избран, тъй като в процеса на разработване на нови изделия често се налагат конструктивни изменения, които чрез използване на RP технологии могат да бъдат реализирани бързо и с минимални разходи, без необходимост от модификация на скъпо производствено оборудване.

Експерименталната установка е използваната и при предишните изпитвания, като тя е съставена от машина ASLI-DT-2000, високоскоростна камера, измервателно уво, записващо уво и светлинен източник. Изпитванията в съответствие с ISO 16750 – 3 са започнати от най-благоприятния

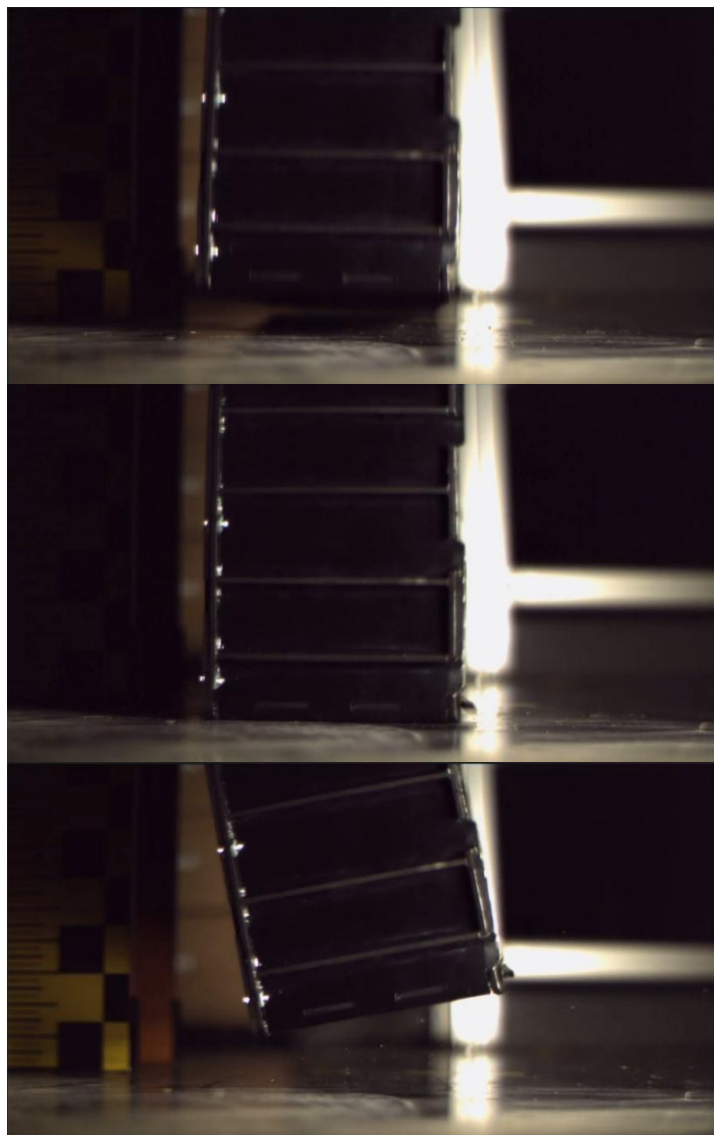


Фигура 6-6: Физически Прототип

натоварващ случай (LC1 - Load Case) и са продължени последователно до най-неблагоприятния (LC5). След всеки удар прототипът е подлаган на визуален оглед за наличие на разрушения и остатъчни деформации, като ориентацията за следващото изпитване е подбираема така, че засегнатите зони да не попадат в критичните области на контакт. Високоскоростна камера е конфигурирана да заснема със скорост на запис от 1000 кадъра в секунда.



a) LC1



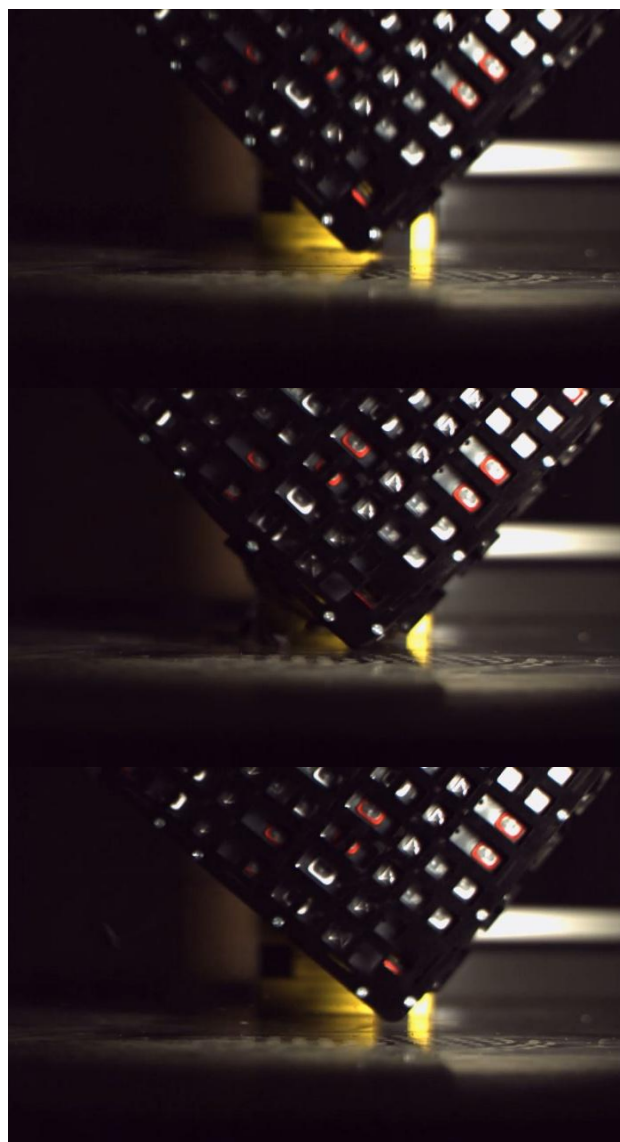
b) LC2

Фигура 6-8: Кадри преди – по време на и след контакта на експерименталното изследване

Показани са част от кадрите от високоскоростната камера на Фигура 6-8 използвани с цел да се измери скоростта на отскок чрез методите на DIC на избрани точки, като след това да се използва за целите на валидация на виртуалния прототип. Важно е да се отбележи обаче че избраните точки следва да са лесно проследими и от част на корпуса без значителни еластични деформации, тоест проследяваща глобалното поведение на системата. Допълнително може да се наблюдава характера на еластичната деформация в други точки за допълване на възможностите на валидация. На Фигура 6-9 са показани кадри от Постановки №3 и №4, като при №3 се наблюдава високо ниво на фрагментация на корпуса, правейки експеримента неприложим за целите на виртуална валидация. Макар и №4 да е по-неблагоприятен се наблюдава еластичен демпфиращ отговор, моделируем във виртуална среда. Не са показани кадри от LC5 тъй като поради масивното разрушаване те също не са подходящи за целите на валидация, като за сметка на това на Фигура 6-11 са показани резултатите от тази итерация.



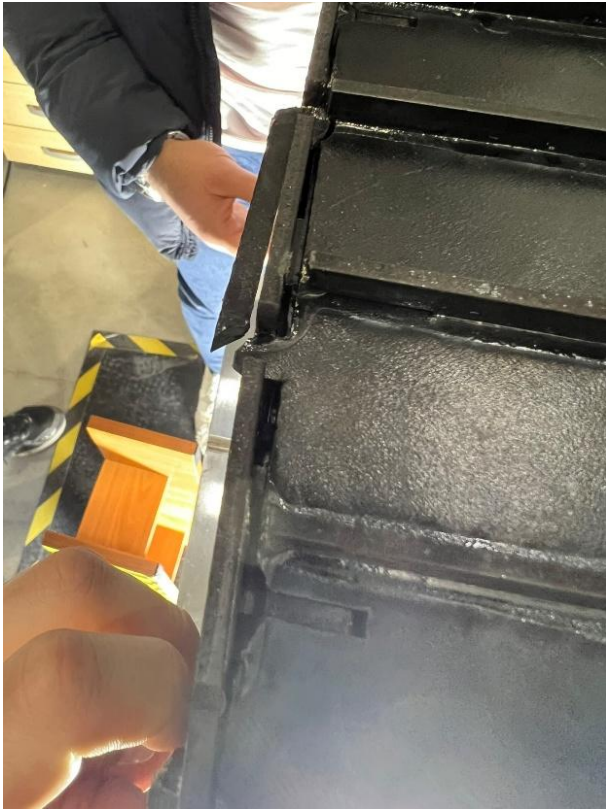
a) LC3



б) LC4

Фигура 6-9: Кадри преди – по време на и след контакта на експерименталното изследване

На следващите фигури са показани кадри на някои от повредите настъпили вследствие от експерименталното тестване. Направено е обобщение на по-значимите повреди, тъй като копирането на тестовия протокол от изследването не е обект на настоящия труд. Наблюдават се счупвания и пропуквания по корпуса на батерийния модул, но след обследване не е установено нарушаване на целостта на електрическите елементи. При по-благоприятните ориентации се наблюдават локални зони на счупване, като е оценено че те са породени от дефекти от производството на физическия прототип. При по-неблагоприятните постановки – падане на ръб и връх се наблюдават зони на разрушаване поради голямата концентрация на енергия в тях, но този ефект е търсен при проектирането, тъй като той дава възможност за демпфиране на удара и запазване на вътрешните компоненти. След приключване на изпитванията, записите и експерименталната документация са анализирани, като натоварващите случаи от LC3 и LC5 са изключени от по-нататъшната обработка, поради наблюдавано масивно разрушаване и отделяне на фрагменти. Подобни явления са трудни за възпроизвеждане чрез виртуално прототипиране и не позволяват надеждна количествена съпоставка с виртуалния прототип.

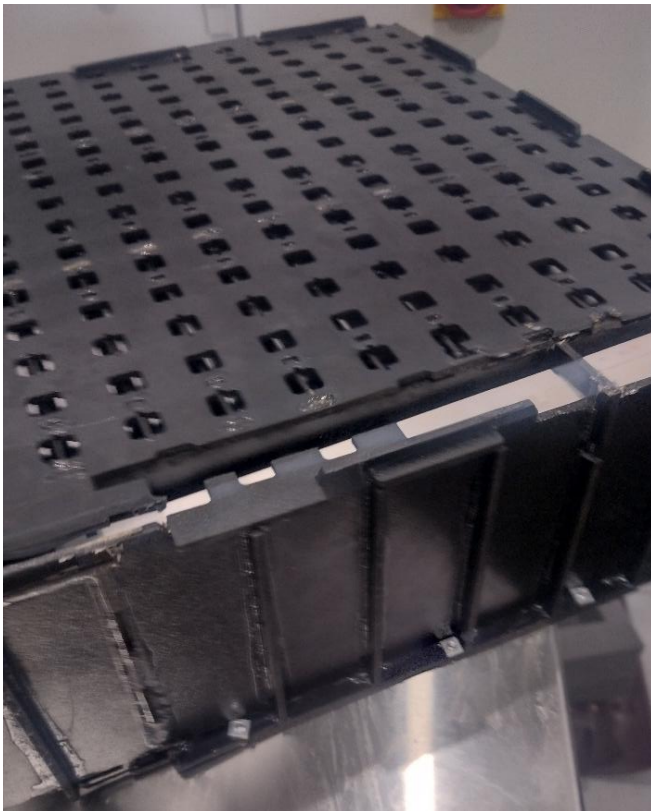


а) Повреди след LC1



б) Повреди след LC2

Фигура 6-10: *Резултати от изпитванията на физическия прототип*



а) Повреди след LC3



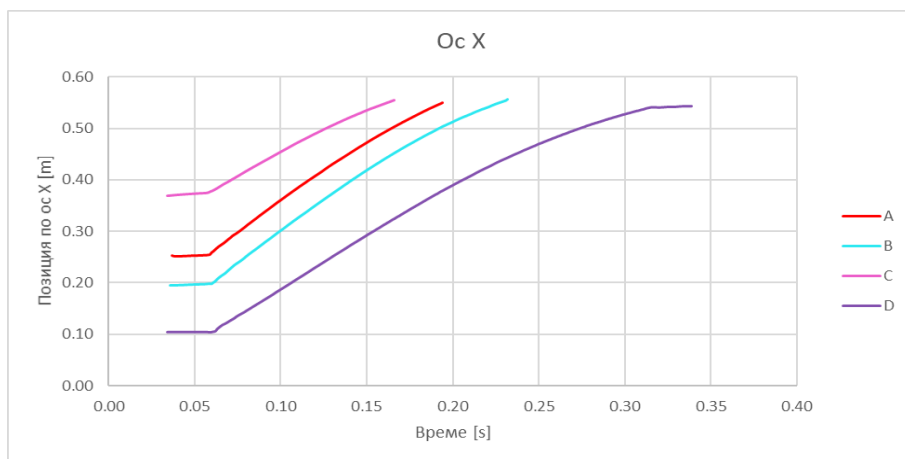
б) Повреди след LC5

Фигура 6-11: *Резултати от изпитванията на физическия прототип*

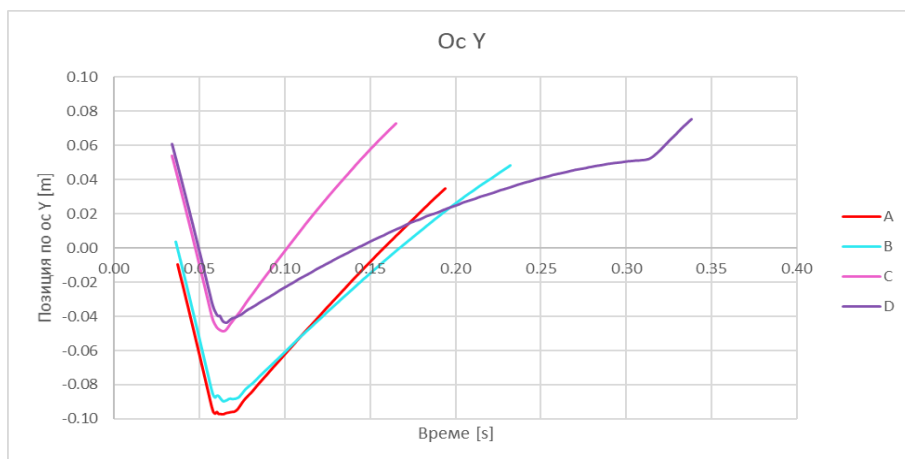
Извлечени са стойности за скоростта на отскок и еластичните деформации за няколко характерни точки А, В, С, D от прототипа при различните ориентации чрез

на използване на софтуерен пакет за анализ на движение. Тези параметри са използвани в процеса на валидация на виртуалния прототип. Особено внимание е отделено на LC4, като на Фигура 6-12 и 6-13 са представени експерименталните скоростни профили на точките по ос X₄ и Y₄ на глобалната координатна система (Фигура 6-5). LC4 е избран за представяне поради добрата визуална проследимост на деформационния процес, като останалите

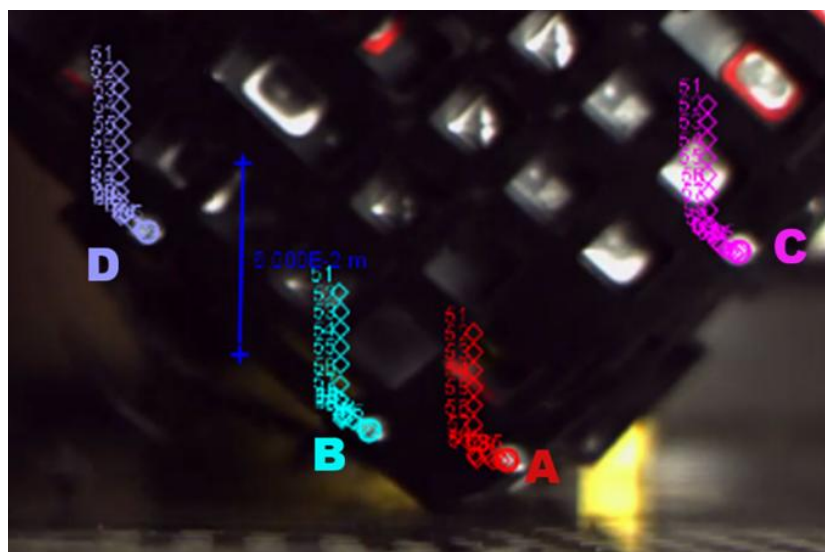
натоварващи случаи са анализирани по аналогичен начин, като показаните точки са маркирани на Фигура 6-13 в експерименталния прототип:



Фигура 6-12: Движение на дефинираните точки по ос X

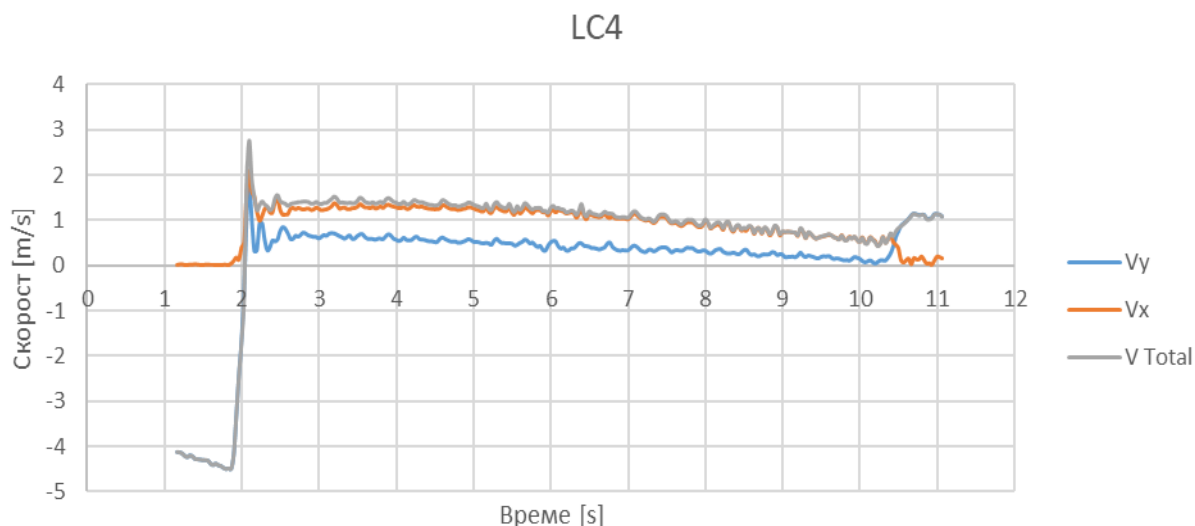


Фигура 6-13: Движение на дефинираните точки по ос Y



Фигура 6-14: Дефиниране на изследваните точки

За целите на валидацията времето на контакт е използвано като основен параметър, вместо контактната сила, тъй като то е по-подходящо за съпоставка между числения и експерименталния модел. Моментът на удара се идентифицира ясно чрез рязка промяна в посоката и стойността на скоростта.



Фигура 6-15: Скоростен профил от експеримента на LC4

От Фигура 6-15 се установява контактно време от порядъка на 0.23 s, както и скорост на отскок приблизително 1.86 m/s. Следва да се отбележи, че в сравнение с числения модел експерименталните данни имат по-ниска времева резолюция, което може да доведе до малки отклонения в определянето на максималните стойности и времето на контакт. Този ефект е отчетен предварително и е прието, че честота на заснемане от 1000 fps осигурява достатъчна точност на дискретизация за целите на настоящото изследване.

Валидация на симулационен анализ на високоскоростен динамичен процес

В главата е представена валидацията на симулационен анализ на високоскоростен динамичен процес чрез съпоставка с резултати от експериментални изпитвания от тип свободно падане. Валидацията е извършена на база на разработения експеримент и има за цел да оцени доколко численият модел възпроизвежда реалното физическо поведение на изследвания обект при ударно натоварване.



Фигура 6-16: Визуализация от сравнителния анализ между виртуалния модел и физическия експеримент с проследяване на специфични точки

Получените резултати показват много добра кореспонденция между физическия и виртуалния прототип за LC4. За LC1 и LC2 са отчетени дори по-малки отклонения, докато при LC5 валидацията е ограничена до деформационно поведение поради сложната контактна кинематика и ротации, които правят използването на COR неприложимо.

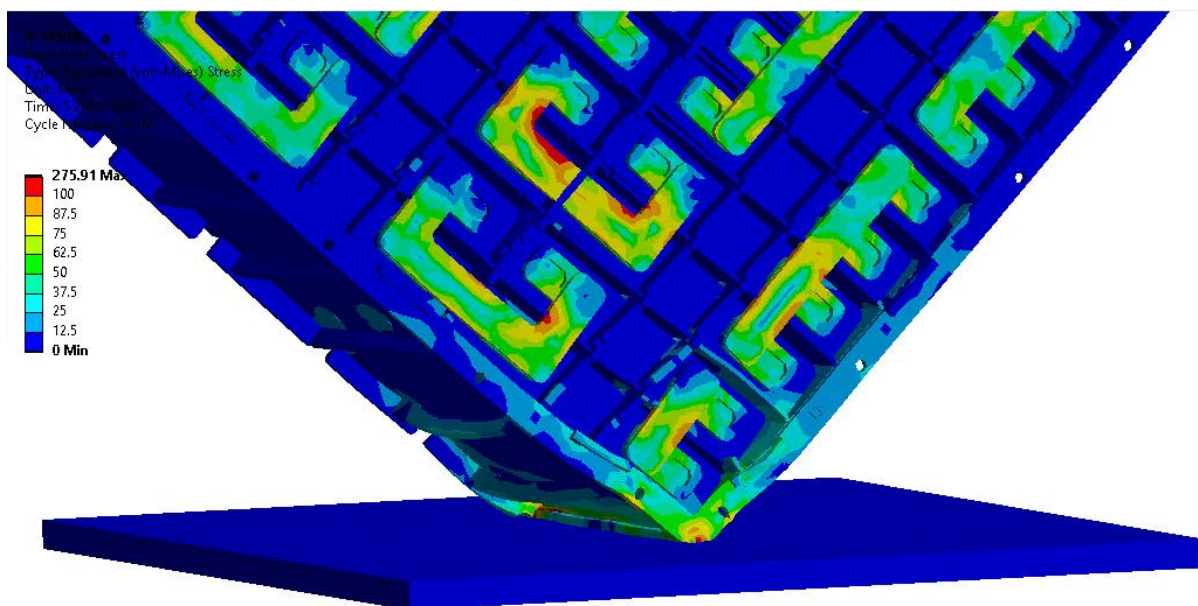
Следва да се подчертае, че виртуалният и физическият прототип не се очаква да се държат идентично, като последователно отклонение в очакваната посока се счита за

достатъчно условие за валидация. Пълно съвпадение с прототип, изработен чрез RP технологии, би означавало несъответствие с поведението на крайния продукт, произведен по целевата технология.

На тази база може да се направи заключението, че разработеният виртуален модел адекватно възпроизвежда физическите механизми на високоскоростния динамичен процес и е валидиран за целите на настоящото изследване, като всички числени анализи за различните натоварващи случаи са проведени при идентични настройки.

Валидация на симулационен анализ на високоскоростен динамичен процес

За симулациите на финалния валидиран виртуален прототип са извършени корекции на предварително валидирания числен модел, като масите на батериите са зададени с реалните им стойности, добавени са връзките между батериите и интерфейсните елементи. В част от разглежданите натоварващи случаи батерийните връзки оказват съществено влияние върху поведението на модула при удар, тъй като поради изискванията за високи токове тяхното напречно сечение е значително. Поради сложността на анализа е изчислен единствено при ориентацията на контакт LC4, определен като най-неблагоприятна валидирана ориентация.

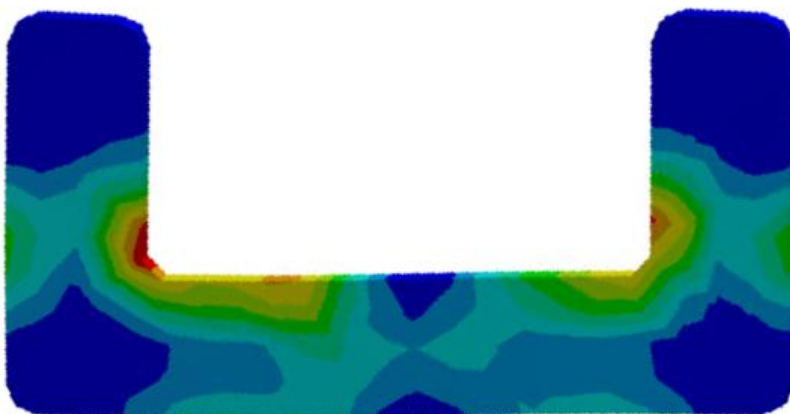


Фигура 6-17 - зоната на удар за LC4 при финалния виртуален модел.

Наблюдава се пластична деформация в областта на ръба на корпуса, както и повишени напрежения в част от батерийните връзки. Поради пластичния характер на материалите напреженията не превишават 275 МРа. Пластичната деформация във връзките не надвишава 0,02 %, което означава, че не се очакват съществени геометрични изменения, съгласно показаното отклонение на формата във Фигура 6-18. Поради високата пластичност на медта, и трансформирането на част от енергията на удара в пластична деформация, алуминиевите батерийни терминали не са значително повлияни от удара и при тях не се наблюдават опасни стойности на напреженията. За корпуса обаче пластичната деформация достига около 0,7 %, което би довело до локално разрушаване – явление, което е предвидимо и практически неизбежно при този сценарий.

Напреженията в батерийните клетки не превишават 30 МРа, което представлява допустима и безопасна стойност и не предполага изтичане на електролит. Последният разгледан критерий са силите в контактните зони между клетките и клемите, както и между терминалите и батерийните връзки. При лазерно заваряване на прототипите

(изследвано извън обхвата на настоящия труд) е осигурена срязваща якост от 1 kN и механична връзка от 2,5 kN, както и опънна якост съответно 1 kN и 4 kN. В числения



Фигура 6-18- Разпределение на пластичната деформация в най-натоварената батерийна връзка.

модел контактните сили не надвишават 110 N, което гарантира висок коефициент на безопасност по този критерий. В заключение, резултатите от числения анализ показват, че при разгледания неблагоприятен LC4, който не е задължителен съгласно стандартите, не се очаква възникване на опасни явления. Съответно, при останалите товарни случаи,

дефинирани от стандартите за безопасност, също не се прогнозира риск. Получените резултати потвърждават адекватността на първоначалния конструктивен дизайн в контекста на ударно въздействие при изпитване чрез свободно падане. Подхода демонстрира възможността да се направи подробен симулационен анализ на изделие което представлява опасност при физическо тестване.

Изводи от глава 6

Апробирането на подхода демонстрира възможността да се направи подробен симулационен анализ на изделие което представлява опасност при физическо тестване. Чрез валидирания виртуален прототип могат да се извършат и други симулационни анализи с високо ниво на достоверност. Останалите изводи са обобщени в следните точки:

- Разработеният подход е апробиран успешно чрез практическото му прилагане за изследване на високоскоростен динамичен процес от тип свободно падане на електрически елемент от автоиндустрията - батерийен модул;
- Постигнато е добро ниво на съответствие между резултатите от симулационния анализ и експерименталните такива;
- Извлечени са ползи за детайлната разработка на дизайна на изделието в контекста на жизнения му цикъл;
- Намалени са разходите и времето по производство и тестване на изделието чрез методите на симулационното моделиране;
- Оценено е влиянието на всички елементи в конструкцията по отношение на изследваното високоскоростно динамично влияние;
- Извлечени са ценни препоръки за подобряване на дизайна му в съответствие с модела черна-бяла кутия;
- Направени са изводи за бъдещи проучвания в сферата.

ОБЩИ ИЗВОДИ

Извършените изследвания, пряко свързани с темата на дисертационния труд, позволяват да се формулират следните по-важни изводи:

- Формирани са препоръки за изграждането на изчислителния модел на концептуално ниво на база на разгледаните публикувани проучвания в сферата;
- Формулирана е концепция за моделиране и изследване на високоскоростни динамични процеси чрез виртуално прототипиране, която дефинира основните принципи и критерии за изграждане на устойчиви числени модели.
- Разработена е последователна методология за изграждане на изчислителен модел базиран на виртуален прототип и провеждане на числен анализ на високоскоростен динамичен процес от тип свободно падане, като са отчетени насоките и етапите отбелязани в концептуалната глава.
- Описани са подробно стъпките от методологията в контекста на изграждането на симулационен анализ за изпитване на свободно падане
- Разработена е методология за планиране, провеждане и анализ на експериментални изследвания при високоскоростни динамични въздействия,
- Извършено е изследване на използваното лабораторно оборудване за тестване при свободно падане. Чрез високоскоростни записи са идентифицирани нежелани отмествания на падащата маса.
- Формулирани са практически насоки за минимизиране на влиянието на отместването на падащата маса
- Методологията е апробирана с прост пример – свободно падане на метална сфера, в съответствие с предишните глави на концепиране и провеждане на симулационен анализ.
- Експериментите са успешно проведени, като е заснета прецизно височината на отскок за целите на валидацията на симулационния модел.
- Извършеният сравнителен анализ на методите за валидация показва, че комбинирането на различни експериментални и аналитични подходи води до по-високо ниво на достоверност спрямо използването на единичен метод.
- Разработен е последователен подход за валидация на виртуални прототипи при високоскоростни динамични процеси, която интегрира аналитичен, експериментален и числен подход в единна логическа рамка.
- Изпълнен е хибриден подход за валидиране, при който коефициентът на възстановяване е използван като глобален и устойчив индикатор за енергийното поведение на системата при удар.
- Приложен е разработения подход, като се наблюдава много добро съответствие между резултатите от апробацията на изследваните методологии за изграждане на изчислителен модел базиран на виртуален прототип и провеждане на експериментално изследване, както и на валидация чрез аналитично пресмятане.
- Разработения подход работи успешно в контекста на прост пример на динамичен симулационен анализ.
- Разработеният подход е апробиран успешно чрез практическото му прилагане за изследване на високоскоростен динамичен процес от тип свободно падане на електрически елемент от автоиндустрията - батериен модул;
- Постигнато е добро ниво на съответствие между резултатите от симулационния анализ и експерименталните такива;
- Намалени са разходите и времето по производство и тестване на изделието чрез методите на симулационното моделиране;

- Оценено е влиянието на всички елементи в конструкцията по отношение на изследваното високоскоростно динамично влияние;
- Извлечени са препоръки за подобряване на дизайна в съответствие с модела черна-бяла кутия;
- Направени са изводи за бъдещи проучвания в сферата.

ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

- Разработена е методология за провеждане експериментални изследвания за изследване на поведението на физически прототипи при високоскоростни динамични процеси;
- Разработена е методология за изграждане на изчислителен модел за извършване на инженерни анализи на високоскоростни динамични процеси на базата на виртуален прототип;
- Разработен е интегриран подход за валидиране и изследване на високоскоростни динамични процеси, който съчетава методологиите за виртуално прототипиране и експериментални изследвания чрез доразвитие на метода „черна – бяла кутия „ в единна логическа структура.

Приложни приноси

- Разработената методология е приложена успешно при реални експериментални изпитвания от тип свободно падане, включително върху опростени референтни обекти и върху физически прототип на батериен модул за електрическо превозно средство;
- Изготвени са практически насоки за планиране и провеждане на експериментални изпитвания при високоскоростни динамични въздействия, отчитащи ограниченията, свързани с разрушителния характер на тестовете, ограничен брой прототипи и спецификите на измервателната техника;
- Анализирано е влиянието на експерименталната техника върху възпроизводимостта на резултатите, като са идентифицирани фактори, влияещи върху ориентацията и кинематиката на падащите тела на чиято основа са формулирани препоръки за подобряване на точността при изпитвания от тип свободно падане;
- Чрез прилагането на валидиран виртуален прототип са осъществени потвърдителни и оптимизационни тестове на иновативно изделие - - батериен модул за електрически превозни средства;
- Извлечени са ползи за детайлната разработка и оптимизация на дизайна на изделието батериен модул в съответствие с модела “черна-бяла кутия”.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES
Department "Production Technologies and Systems"

M.Eng. Konstantin Lyubomirov Dimitrov

**MODELING AND INVESTIGATION THROUGH VIRTUAL
PROTOTYPING OF HIGH-SPEED DYNAMIC PROCESSES**

A B S T R A C T

of the dissertation for the acquisition of the educational and scientific degree
"DOCTOR"

Area: 5. Technical Sciences

Professional field: 5.1 "Mechanical Engineering"

Scientific specialty: "Computer aided design and automation systems"

Scientific supervisors:

Prof., DSc.Eng. Georgi Todorov, CM of BAS
Prof. Dr. Eng. Konstantin Kamberov

SOFIA, 2026

The dissertation work has been discussed and confirmed for public presentation by the Department Council of the Department of Production Technologies and Systems. at the "Faculty of Industrial Technologies" of TU-Sofia at a regular meeting held on 02.02.2026.

The public presentation of the dissertation will take place on April 30, 2026 from 3:00 p.m. in the Conference Hall of the BIC of the Technical University - Sofia at an open meeting of the scientific jury, determined by order No. OЖ 5.1-21/17.02.2026 of the Rector of the Technical University of Sofia, composed of:

1. Assoc. Prof. Dr. Eng. Yavor Sofronov, chairman
2. Assoc. Prof. Dr. Eng. Tsvetozar Ivanov, scientific secretary
3. Prof. Dr. Eng. Stoyan Maleshkov
4. Assoc. Prof. Dr. Eng. Valentin Atanasov
5. Assoc. Prof. Dr. Eng. Kalin Krumov

Reviewers:

1. Assoc. Prof. Dr. Eng. Yavor Sofronov, chairman
2. Assoc. Prof. Dr. Eng. Valentin Atanasov

The defense materials are available to those interested in the office of the Faculty of Industrial Technologies of TU-Sofia, block No. 3, office No. 3230.

The dissertation candidate is a full-time doctoral student at the Department of Production Technologies and Systems of the Faculty of Industrial Technologies. The research on the dissertation was carried out by the author with the methodological guidance of his supervisors, some of which was supported by research projects.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to express special thanks to:

The team and management of the “CAD/CAM/CAE in Industry” Laboratory at the Faculty of Industrial Technology, Technical University of Sofia, whose equipment was used in a number of studies presented in this dissertation;

The National Center for Mechatronics and Clean Technologies, established under Contract No. BG05M2OP001-1.001-0008, for providing access to specialized equipment;

My academic supervisors, Prof. DSc Georgi Dimitrov Todorov, Corresponding Member, and Prof. PhD Konstantin Hristov Kamberov, for their invaluable guidance and support during the preparation of this dissertation;

My family and friends, for their support in completing this work.

Author: M.Eng. Konstantin Lyubomirov Dimitrov

Title: Modeling and investigation through virtual prototyping of high-speed dynamic processes

Circulation: 30 copies

Printed by ITUS Publishing House, Technical University of Sofia

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE DISSERTATION

Relevance of the problem

The dissertation work is focused on the field of high-speed dynamic impacts and virtual prototyping, with the focus of the research being on modeling, conducting an experiment, and validating numerical models in fast-flowing nonlinear processes, which determines the scientific and applied significance and relevance of the research.

Purpose of the dissertation, main tasks and research methods

Based on the analysis of the state of the problem under consideration and the conclusions described above, the following goal of the dissertation work has been formulated:

To create a workable approach for modeling and studying high-speed dynamic processes through analyses using validated virtual prototypes. The following main tasks arise from the goal thus defined:

Task №1: To build a concept for modeling and researching high-speed dynamic processes through virtual prototyping.

Task №2: To create a methodology for building a virtual prototype for performing engineering analyses of high-speed dynamic processes

Task №3: To create a methodology for conducting experimental tests to study the behavior of physical prototypes in high-speed dynamic processes;

Task №4: To create an approach for validating virtual prototypes of high-speed dynamic processes by conducting experimental studies on a physical prototype

Task №5: To assess the adequacy and applicability of the created approach through testing on a high-speed dynamic process

The developed methodologies aim to increase the reliability of simulation results and create a systematic and traceable process for comparison between physical experiment and numerical analysis.

Scientific novelty

A methodology has been developed for conducting experimental research to study the behavior of physical prototypes in high-speed dynamic processes, a methodology has been developed for building a computational model for performing engineering analyses of high-speed dynamic processes based on a virtual prototype, an integrated approach has been developed for validating and studying high-speed dynamic processes, which combines methodologies for virtual prototyping and experimental research by further developing the "black - white box" method into a single logical structure.

Practical applicability

Practical guidelines for planning and conducting experimental tests under high-speed dynamic impacts have been prepared, taking into account the limitations associated with the destructive nature of the tests, a limited number of prototypes and the specifics of the measurement technique. The influence of the experimental technique on the reproducibility of the results has been analyzed, and factors affecting the orientation and kinematics of falling bodies have been identified, on the basis of which recommendations have been formulated for improving the accuracy of free-fall tests. Benefits have been derived for the detailed development and

optimization of the design of the battery module product in accordance with the “black-white box” model.

Approbation

The research on the dissertation was carried out in the laboratories "CAD/CAM/CAE in Industry" at the Faculty of Mechanical Engineering of the Technical University of Sofia and "3D Creativity and Rapid Prototyping" at the National Research and Development Institute, with part of the research being carried out as part of the work on the project "National Center of Excellence in Mechatronics and Clean Technologies".

Structure and scope of the dissertation

204 pages long and includes an introduction, 5 chapters to address the formulated main tasks, a list of main contributions, a list of publications on the dissertation and references. A total of 123 literary sources are cited, 121 of which are in Latin and 2 in Cyrillic, and the rest are Internet addresses. The work includes a total of 63 figures and 5 tables. The numbers of the figures and tables in the abstract correspond to those in the dissertation.

Publications

The results of the dissertation work have been published and reported in the following scientific publications and scientific forums:

1. Todorov G., Kamberov K., **Dimitrov K.**, Approaches To Virtual Prototype Validation of Drop Tests, (2025) AIP Conference Proceedings, 3274 (1), art. no. 050009, DOI: 10.1063/5.0258754, Q4, SJR 2024: 0.153
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105000344621&doi=10.1063%2f5.0258754&partnerID=40&md5=c36756a357b70869d4ec4f361604c654>
2. Todorov G., Kamberov K., Gavrilov T., **Dimitrov K.**, "Drop test validation of a virtual prototype of EV Battery Pack", 14th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 2024, Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Bulgaria), 55 (4), pp. 387 – 401 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105027095513&partnerID=40&md5=5ee9c74c0e9213462130a771fb6af633>
3. Todorov T., Bankov B., Zagorski M., Gavrilov T., **Dimitrov K.**, Rapid Prototyping and Measuring Assessment of a Complex Geometry (2024) 34th International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance 2024, MMA 2024, DOI: 10.1109/MMA62616.2024.10817673, <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85216922578&doi=10.1109%2fMMA62616.2024.10817673&partnerID=40&md5=5f05e60f87cbaad35bf73991c6d55f4c>
4. Todorov G, Kamberov K, Ivanov T, **Dimitrov K.** Virtual and Physical Prototyping in Mechanical Shock Test of an EV Battery Module. *Engineering Proceedings*. 2026; 121(1):12. <https://doi.org/10.3390/engproc2025121012>

II. CONTENT OF THE DISSERTATION

1. LITERATURE REVIEW

The increasing demands for safety and reliability of modern engineering products motivate research in the field, increasing the level of knowledge and enabling them to be covered by increasingly accurate, systematic and demonstrable engineering analyses. In the conditions of accelerated development cycles, increasingly complex structures and widespread use of thin-walled and composite solutions, dynamic impacts are becoming a critical factor in the design and evaluation of products.

High-speed dynamic processes

High-speed dynamic processes encompass phenomena in which motion, deformation, and interactions between objects occur in short time intervals—less than $1 \cdot 10^{-1}$ s. They are characterized by high velocities, significant inertial effects, and abrupt changes in loads that lead to complex mechanical, thermal, and wave phenomena. These processes can include impacts, explosions, supersonic motions, and high-speed deformations of materials. Understanding and analyzing such processes is important for a variety of engineering applications, such as the design of a variety of consumer products, the automotive and aerospace industries, ballistic protection, manufacturing technologies, and materials science. [29] Through advanced numerical modeling and experimental techniques, engineers can predict and optimize the behavior of structures and materials under various conditions, which contributes to increasing the safety, reliability, and efficiency of modern technologies.

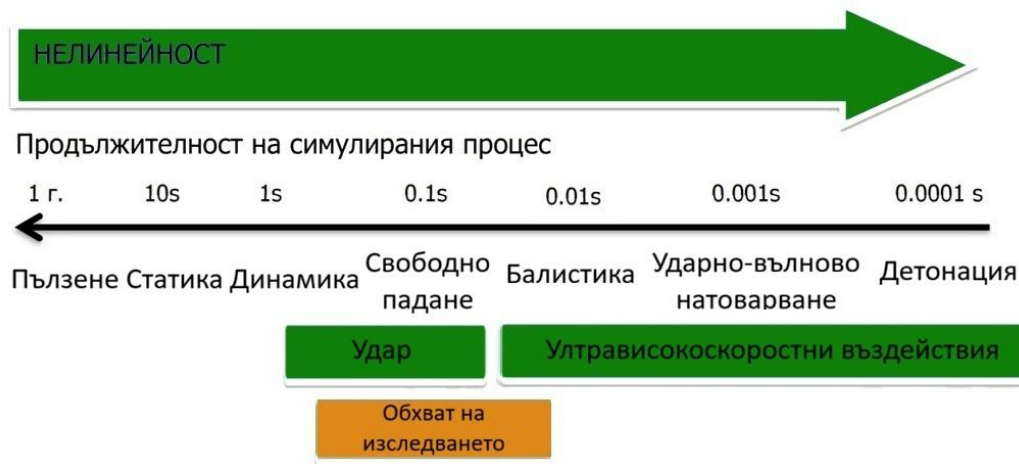


Figure 1 -2 : Summary of high-speed processes and scope of the study

Simulation modeling as a key tool in the study of high-speed dynamic processes

In modern industry, the demands placed on products are increasing, whether it is to study the behavior of the product, ensure user safety, or ensure the integrity of the product. From dynamic impacts such as impacts and crashes to drop tests, virtual analysis is now an indispensable tool for designing optimized structures. [103] Free-fall tests are part of the standard tests that ensure the reliability, safety, and quality of products. [104] These tests are applied in various industrial sectors, including consumer products, automotive, medical devices, packaging, and others. [22]

Software tools and instruments for modeling high-speed dynamic processes

Modern simulation modeling of high-speed dynamic processes is inextricably linked to the use of specialized software tools that provide the ability to numerically model, analyze, and interpret highly nonlinear phenomena such as impacts, free fall, destruction, and interactions between different environments. The development of CAE (Computer Aided Engineering) software in recent decades has turned it into a basic engineering tool, without which conducting reliable simulation analyses is practically impossible. [3]

Artificial Intelligence in Engineering Analysis

In recent years, artificial intelligence has been used as a tool for preliminary evaluation of engineering analysis results, representing a natural extension of the development of computer-aided engineering. At present, these approaches are not yet fully developed and widespread in the field of high-speed dynamic processes and explicit numerical analysis.

Conclusions to Chapter 1

Within the framework of the current chapter, a targeted literature study has been carried out, covering the contemporary scientific and applied literature in the field of virtual modeling and numerical analysis of high-speed dynamic processes, such as:

- The main concepts related to engineering analyses, and in particular dynamic ones, are summarized;
- The physical nature of high-speed processes is examined with an emphasis on inertial effects, wave propagation, and velocity-dependent material behavior;
- High-speed dynamic analyses are considered as an essential element of the product life cycle with a view to reducing the time and costs of developing products with specific requirements for their behavior under impulse impacts;
- Current areas of application of high-speed dynamic simulations have been analyzed in order to position the development in the context of modern engineering trends;
- The main methods for experimental validation of simulation models under high-speed dynamic impacts are summarized, including high-speed imaging, accelerometric and strain gauge measurements, as well as combined approaches;
- The programming environments and numerical approaches used for conducting and validating dynamic analyses are reviewed, and guidelines for future work on the topic are formulated;
- It has been established that the analyzed sources lack a clearly structured and formalized approach for validation of simulation analysis in high-speed dynamic processes;
- Critical parameters and settings of dynamic simulations have been identified, which should be taken into account even in the conceptual phase of the model;
- Based on the analysis performed, the goal and objectives of the dissertation have been formulated.

2. CONCEPT FOR MODELING AND INVESTIGATION OF HIGH-SPEED DYNAMIC PROCESSES THROUGH VIRTUAL PROTOTYPING

The chapter formulates a conceptual framework for modeling and studying high-speed dynamic processes through virtual prototyping. The presented statements and criteria are the result of the literature review and summarize the principles for numerical description of fast-flowing nonlinear phenomena established in science and applied practice. In this context, the main requirements for the choice of numerical approach, the definition of boundary and initial conditions, the formulation of material and contact models, as well as the conditions for ensuring numerical stability and physical reliability of the results are synthesized.

Main elements of the concept

The concept of modeling and studying high-speed dynamic processes through virtual prototyping is based on three interrelated directions that determine the overall approach, methods, and evaluation criteria in this dissertation.

- Building a computational model
- Choosing a solution method and setting up the analysis
- Model verification and validation

Analytical description and numerical formulation of computational models

The chapter discusses the main specifics of computational models in the analysis of fast-flowing phenomena, summarizing the fundamental principles of numerical modeling and the factors affecting the stability, accuracy and physical validity of solutions. The characteristic features of time integration, discretization, material and contact modeling are presented, as well as basic guidelines for the selection and setup of the analysis. Recommendations arising from the literature review and engineering practice are also formulated, which support the correct configuration of the simulation models.

Conceptual framework for building a computational model

Building a computational model for analyzing high-speed dynamic processes based on a virtual prototype requires a systematic and consistent approach in which geometry, material behavior, and boundary conditions are considered as interconnected elements of a common numerical-physical setting.

Within the present conceptual framework, the computational model is considered not as a direct copy of the CAD geometry, but as a purpose-built numerical representation corresponding to the nature of the dynamic process under consideration. This implies a conscious balance between geometric detail, material adequacy, and correctly specified boundary and contact conditions, in order to understand the behavior of the object under high-speed interactions.

Choosing a numerical solution method

The choice of a numerical solution method is a key element of the concept of modeling and studying high-speed dynamic processes using the finite element method. It determines the mode of time integration, the stability of the solution, and the ability to adequately describe the nonlinear effects characteristic of impact and shock loads.

Conceptual framework for verification and validation

Verification and validation are two conceptually different stages in the virtual prototyping process, through which the reliability of the numerical model and its applicability are assessed. Verification is aimed at checking the computational model and aims to establish whether the model is built and parameterized in accordance with the predefined numerical and conceptual setting, without using experimental data. Validation aims to assess how well the computational model corresponds to the real physical behavior of the studied system by comparison with independent experimental results.

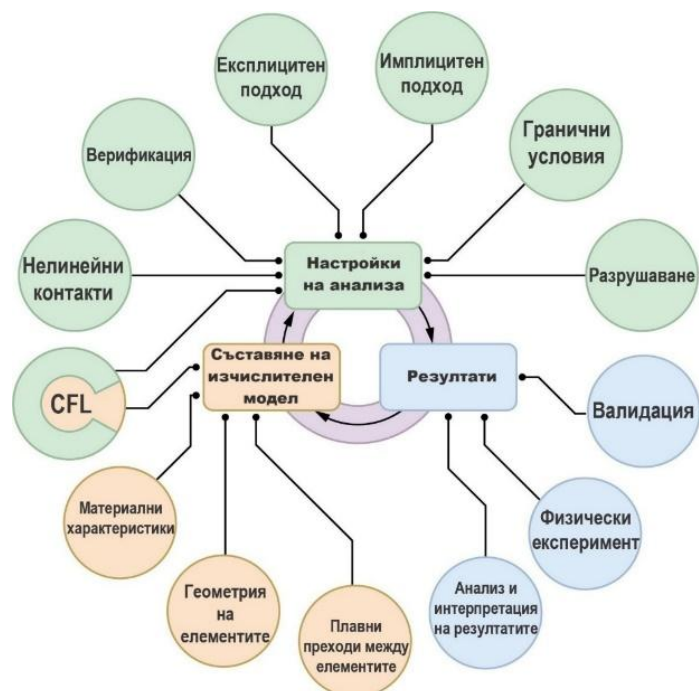


Figure 2-3: Specifics in modeling high-speed dynamic processes

Conceptual diagram of the directions in modeling high-speed dynamic processes

A conceptual scheme is presented, summarizing the main directions and key points to which increased attention should be paid when building a computational model based on a virtual prototype for high-speed dynamic processes.

The scheme groups the critical aspects of modeling into three main areas - compilation of a computational model, analysis settings, and interpretation of results, with the aim of emphasizing the sensitive parameters that have a dominant influence on the stability, accuracy, and physical reliability of the numerical solution.

Conclusions to Chapter 2

A concept for modeling and studying high-speed dynamic processes through virtual prototyping has been formulated, which defines the basic principles and criteria for building sustainable numerical models. The concept unites the individual stages of the analysis into a single logical framework for a specific research object in the dissertation work;

The main mathematical relationships and equations describing the time integration methods are summarized, systematizing the principles of simulation modeling for high-speed impacts. Valuable recommendations for the construction of the virtual model at a conceptual level are formed based on the reviewed published studies in the field;

Each element is considered as part of an interconnected system in which geometry, material models, numerical settings, and result evaluation mutually influence the analysis results;

The developed concept of virtual modeling provides a flexible methodological framework that is not tied to a specific numerical implementation and can be adapted to various high-speed dynamic tasks. This creates the necessary basis for the subsequent development of methodologies and implementation of specific numerical studies, presented in the following chapters of the dissertation.

3. METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING A VIRTUAL PROTOTYPE FOR PERFORMING ENGINEERING ANALYSES OF HIGH-SPEED DYNAMIC PROCESSES

A methodology has been developed for building a computational model based on a virtual prototype and conducting a numerical engineering analysis of high-speed dynamic processes. The presented sequence provides a systematic and reproducible basis for subsequent experimental validation by integrating it into a validation approach and for using the virtual prototype as a reliable engineering tool in the process of developing and evaluating structures subjected to high-speed dynamic impacts.

Role of virtual prototype and engineering analysis in high-speed dynamic processes

Virtual prototyping is a fundamental tool in modern engineering analysis of high-speed dynamic processes, as it allows the study of the behavior of structures under shock and impulse loads in the early stages of design. With the development of numerical methods and computing technology, virtual prototyping has established itself as an effective tool for analysis, optimization and risk assessment, significantly reducing the need for numerous physical prototypes.

Methodology for building a computational model of free fall

Based on the established concept for building a simulation model under high-speed dynamic loads, a sequential methodology for building a computational model based on a virtual prototype is developed in this section. The process is defined as a sequence of methods for defining the individual steps, with the specific model settings and steps depending on the physics under study and the specific task, and guidelines for their definition are given in the previously discussed conceptual chapter. The methodology aims to systematize the individual stages of numerical modeling and to provide a logical connection between theoretical principles, numerical methods and experimental validation.

Building a computational model and conducting a free fall analysis

In order to demonstrate and validate the developed methodology for virtual modeling and validation of high-speed dynamic processes, a simplified impact scenario is considered - the free fall of a steel ball from a rolling bearing onto a solid metal plate, as already defined in the previous chapter.

The global validation parameter in the study is the bounce height recorded by high-speed video capture, which is used to:

- experimental assessment of energy losses during impact;
- validation of the simulation model;
- analytical calculation of the coefficient of recovery (COR).

As a result of the numerical analysis, the velocity of the bullet after impact was determined, on the basis of which the rebound height was calculated. The obtained value shows good agreement with the experimentally measured height, registered by the high-speed camera, described in detail in the next chapter. Based on the initial velocity and the rebound velocity, the recovery coefficient was determined, which serves as the main quantitative indicator of the energy transformations during impact. The comparison in the validation stage between the numerical, experimental and analytical results shows consistent behavior and expected direction of the deviations, determined by the real contact and material effects.

The obtained results confirm that the constructed virtual prototype has close to the expected behavior and can be used as a reliable basis for validation of the methodology and for subsequent extended numerical studies.

Conclusions to Chapter 3

A consistent methodology for building a virtual prototype and conducting a numerical analysis of a high-speed dynamic process of free fall type has been developed, taking into account the guidelines and stages noted in the conceptual chapter. The remaining conclusions are summarized in the following points:

- A comparison has been made between different approaches in the context of free fall;
- The steps of the methodology are described in detail in the context of building a virtual model for free fall testing;
- The methodology is tested through a simplified example – a steel ball falling from a rolling bearing onto a solid contact surface, which allows for a clear definition of the geometry, material characteristics and boundary conditions;

The obtained numerical results create a reliable basis for subsequent experimental and analytical comparison, through which the validation of the virtual model and assessment of the applicability of the developed methodology are carried out in the following chapters.



Figure 3-1: Methodology for building a computational model (M1)

4. RESEARCH METHODOLOGY FOR CONDUCTING EXPERIMENTAL TESTS TO INVESTIGATE THE BEHAVIOR OF PHYSICAL PROTOTYPES IN HIGH-SPEED DYNAMIC PROCESSES

Experimental tests are an integral part of the study of high-speed dynamic processes, as they provide objective information about the real behavior of physical prototypes under impact loads, in accordance with the "black-white box" model. They allow observation and evaluation of the overall behavior of the structure, of the deformation and failure mechanisms, as well as of the energy processes, which can hardly be correctly assessed only through virtual prototyping.

Role of experimental studies in the analysis of high-speed dynamic impacts

Experimental tests occupy a key place in the study of high-speed dynamic processes, as they allow the assessment of the real behavior of structures under complex conditions, characterized by strong nonlinearity, contact interactions and high deformation rates. In these cases, virtual prototypes, regardless of their complexity, are limited by idealizations in geometry, specified material characteristics and settings of the specific analysis. Due to the presence of many variables for the solution of such a task, as well as the difficult to predict behavior of the system, it is often necessary to perform validation to guarantee correct results. In practice, the experiment can perform several main functions. On the one hand, it often serves as a means of certification and verification of the compliance of products and structures with regulatory requirements under impact loads. The focus of the current work is directed to experimental tests that allow the identification of the real mechanisms of deformation, destruction and energy transformation, which often cannot be unambiguously derived from numerical results. In this sense, the experiment provides qualitative and quantitative information about the behavior of the object upon impact.

Measurement methods in high-speed dynamic experiments

In free-fall tests, information about the dynamic behavior of the test specimen cannot be obtained directly through classical static or quasi-static measurements. The evaluation of the results is based on recording global kinematic parameters (velocity, displacement, contact time) and on monitoring the elastic and plastic deformations that occur.

The chapter discusses the main experimental approaches for recording and evaluating dynamic behavior under impact loads, used both in industrial practice and in modern scientific research. An overview of physical, virtual and hybrid methods for measurement and analysis is presented, with emphasis on their applicability in the validation of virtual prototypes. The advantages, limitations and level of reliability of the different approaches are analyzed depending on the geometry, material and nature of the dynamic impact. The main approaches used are:

- High-speed video recording
- Evaluation of residual plastic deformation
- Analytical calculations
- Hybrid approaches

Test protocols contain information about the test specimen, the experimental setup, the measurement technique used, the equipment settings, the test conditions and the observed results. They serve as a basis for subsequent data interpretation, for assessing repeatability and for arguing the reliability of the experimental results. In the context of the present study, test protocols have an additional role as a link between physical experiments and numerical analysis, allowing for a direct comparison of key parameters and an objective assessment of the degree of correspondence between the experimental and virtual prototype.

Research on experimental technique

In this chapter, a study of the operation of a free-fall testing machine has been carried out, focusing on the dynamics of the falling mass and its influence on the preservation of the orientation of the test object. The actual movements of the setting mass in the initial stage of the test have been analyzed using high-speed video recording, with the aim of identifying sources of deviations from ideal behavior and assessing the applicability of the machine for testing according to different standards. The results obtained serve as a basis for formulating practical guidelines for the use of the machine, as well as for a critical assessment of the limitations that should be taken into account when interpreting the experimental data.

Test setup evaluation

The experimental methodology is validated through simplified free-fall scenarios. Reliable and reproducible results require not only proper definition of the test object and loading conditions, but also a clear understanding of the capabilities and limitations of the experimental setup. The quality of the results is therefore governed by the system behavior during the initial stage of the fall and its ability to ensure controlled initial conditions.

This chapter examines the operation of a free-fall testing machine, focusing on the dynamics of the falling mass and its effect on the orientation of the test object. High-speed video analysis is used to identify deviations from ideal behavior and to assess the applicability of the system. The results provide a basis for practical guidelines and for evaluating the limitations of the experimental data.

Experimental studies of dynamic high-speed processes and validation of the presented methodology

The chapter presents the application of the developed experimental methodology for the study of high-speed dynamic processes through free-fall tests. For validation purposes, a simplified and well-defined experimental object from the previous chapters was used to continue the study – a steel ball from a rolling bearing, which allows for a clear interpretation of the results and minimizes additional design and technological influences.

The conducted experiments aim to provide a reliable experimental basis for determining the kinematic indicators upon impact, with the rebound height and the recovery coefficient being used as the main evaluation parameter. The obtained results serve for experimental and analytical comparison with the numerical model presented in the previous chapter. The drop height is set to 1 m, which corresponds to a contact velocity of approximately 4.43 m/s. The machine mechanism accelerates the falling body with a higher initial velocity compared to free fall under the action of gravity, which leads to high repeatability of the contact position and facilitates the recording of the process by high-speed video recording.

As a result of the tests, a rebound height of approximately 85 cm was recorded when using the harder contact plate and about 32 cm with the softer plate. These results clearly demonstrate the significant influence of the mechanical properties of the contact surface on the energy losses during impact. In the tests with the softer plate, a clearly pronounced local plastic deformation was observed in the contact area, shown in Figure 4-11. This deformation leads to a significantly lower rebound height and, accordingly, a lower value of the recovery coefficient. The results obtained with the harder

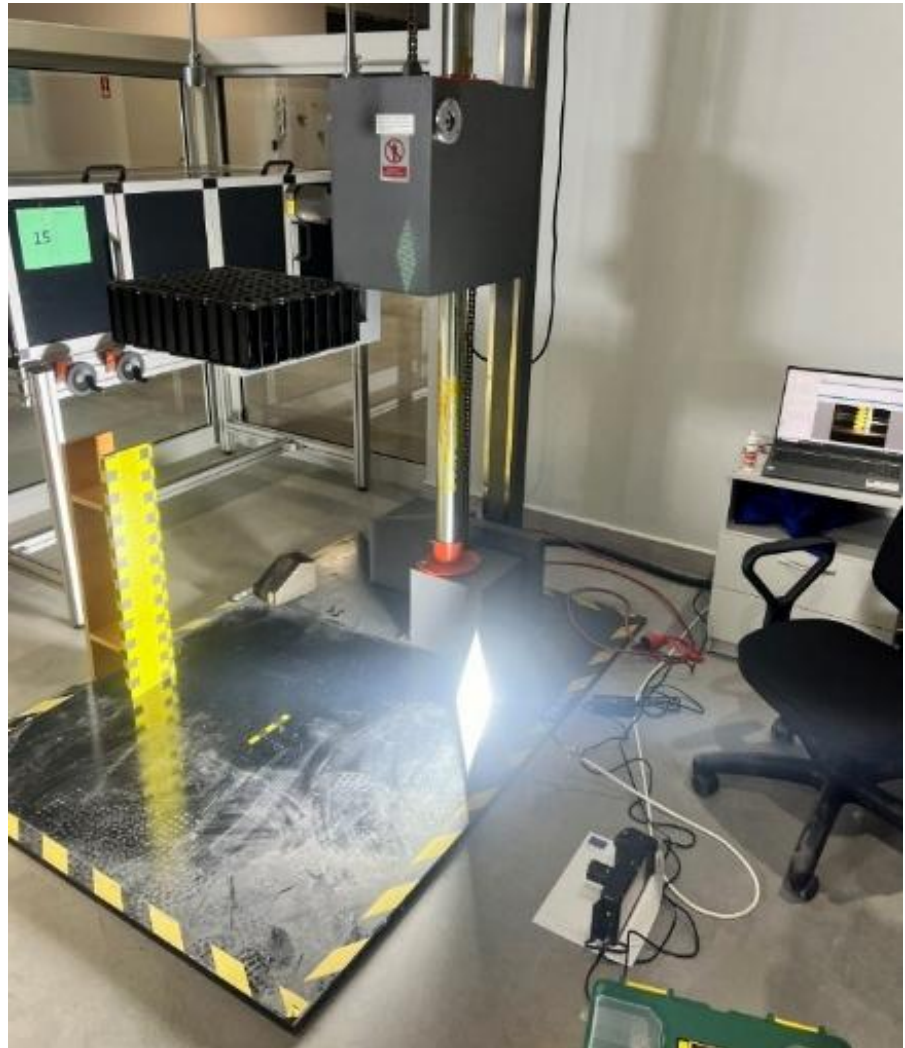
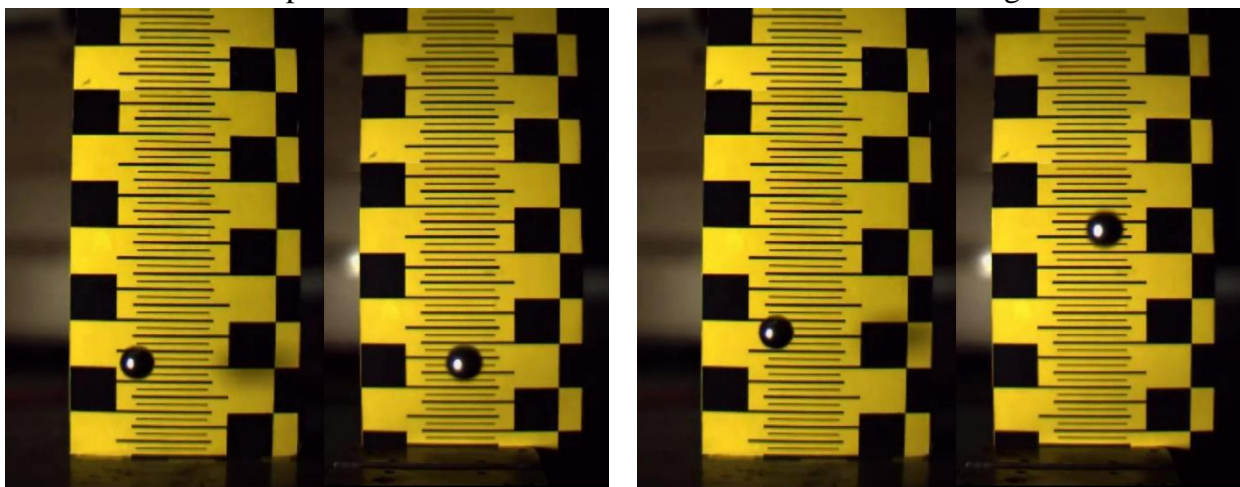


Figure 4-12: Experimental setup

contact plate were used for subsequent analytical and numerical comparison, since the mechanical properties of the plate are closer to those of the steel ball and the influence of plastic deformation is limited. On this basis, a recovery coefficient $COR \approx 0.85$ was determined, which is in accordance with the expected values for contact between steel bodies with high hardness.



(a) Before contact

(b) After contact

Figure 4-13: Bounce height comparison

Experimental studies of dynamic high-speed processes and validation of the presented methodology

Reliable reporting of experimental results in free-fall tests requires control over three key elements: (1) reproducibility of the fall conditions, (2) sufficient visual information about the orientation and contact moment, and (3) a measurable quantity suitable for quantitative comparison with the computational model. In the present study, the main experimental validation indicator is the recovery coefficient. (COR) , determined by rebound height and/or post-impact velocity , extracted from high-speed video footage.

Conclusions from Chapter 4

A methodology for planning, conducting and analyzing experimental studies under high-speed dynamic impacts has been developed, oriented towards preparing reliable data for subsequent validation of virtual prototypes. The remaining conclusions are summarized in the following points:

- A study of the laboratory equipment used for free-fall testing was performed with an emphasis on reproducibility and orientation retention upon contact. Lateral displacements of the falling mass were identified through high-speed recordings.
- Practical guidelines have been formulated to minimize the impact of falling mass displacement
- The methodology is tested with a simple example – the free fall of a metal sphere, in accordance with the previous chapters on conceptualizing and conducting simulation analysis.
- The experiments were successfully conducted, with the bounce height accurately captured for the purposes of validating the simulation model.

5. APPROACH TO VALIDATING VIRTUAL PROTOTYPES THROUGH CONDUCTING EXPERIMENTAL STUDIES ON PHYSICAL PROTOTYPES

Validation of virtual prototypes is a key step in the analysis of high-speed dynamic processes, as it establishes the degree of correspondence between the numerical model and the real physical behavior. This process is not limited to a direct coincidence of individual results, but requires a purposeful selection of validation indicators, appropriate comparison methods and clear criteria for accepting the correlation.

Role of validation in virtual prototyping of high-speed dynamic processes

The independent use of numerical models in high-speed dynamic processes is limited by a number of assumptions and idealizations. Regardless of the progress of computational methods and software tools, numerical analysis cannot unambiguously guarantee the correct reproduction of real physical behavior without an experimental reference. Therefore, validation should not be considered as a one-time comparison of results, but as an iterative process in which the numerical model is evaluated, corrected and improved on the basis of experimentally established dependencies and trends.

In this context, validation takes a central place in the overall research cycle, connecting experimental tests and numerical analysis in a single methodological framework. It provides a transition from physical observations to in-depth interpretation of processes in a virtual

environment and vice versa. The validated virtual prototype not only reproduces measurable experimental indicators, but also allows for the analysis of internal quantities that cannot be directly observed experimentally.

The conceptual basis of this approach can be described by the “black-white box” model. Physical prototypes are considered as a “black box”, where only input impacts and output reactions are available, without the possibility of direct observation of internal processes. In contrast, virtual prototypes function as a “white box”, where the structure, logic and interrelationships between individual elements are fully known and subject to analysis. Combining the two approaches in an iterative connection allows the physical experiment to serve as a reference for checking the numerical model, and the virtual analysis – as a tool for interpreting and generalizing the observed behavior.

Validation methods

A general comparison of the main methods for validation of virtual prototypes through physical experiments was made based on the works reviewed in the literature review. Table 5-1 systematizes the different experimental approaches, the corresponding validation indicators, the level of accuracy, the speed of application, the applicability and their potential for validation of virtual models. The analysis shows that some of the methods are universal in nature and can be applied to a wide class of tasks, while others are strongly limited to specific applications and geometries, which is reflected in the column “Applicability Level”. The validation level assesses to what extent the respective experimental method is sufficient for reliable validation of the virtual model, provided that there is a good correspondence between experimental and numerical data. The specified accuracy is summarized based on relevant scientific publications, and the criterion “Speed” takes into account the required volume of operations and the time for processing the experimental results.

Table 5-1: Methods for virtual validation through physical experiments

Method	Indicators	Accuracy (%)	Speed	Level of applicability	Validation level
VIS	Visible plastic deformation	Medium	Slowly	Average	High
3DSC	Scanned structure before and after physical experiment	High	Slowly	Average	High
HSC	Initial velocity, maximum deformation length, rebound height	Medium	Slowly	High	High
HSC	Frequency	Medium	Average	Low	Average
EFC	Frequency	Medium	Quickly	Low	Average
HSC	Acceleration on impact	High	Average	High	Low
ACC	Tabular values	High	Quickly	High	Low
SG	Tabular values	High	Quickly	Average	Medium
Hybrid approach	Depending on the case	High	Slowly	High	High

, where:

HSC – High speed capturing

PIE – Physical inspection by eye

EC – Energy calculations

ACC – Accelerometer

SG – Strain gauge

3DSC – 3D scanner for plastic deformation measurement

VIS – Visual

Dynamic simulation validation approach

The approach includes the two presented methodologies as well as a block for analytical assessment of the behavior of the tested objects, followed by a verification block, and this structure allows for the application of an iterative approach until a good level of correspondence of the results of the simulation analysis is reached in the context of the considered “black-white” box model. It is not mandatory to conduct both experimental and analytical studies, it is possible to use only one validation method, but practice shows that the hybrid approach leads to the most optimal results. The presented block diagram is defined as an approach, since it uses methodologies as discrete steps in its sequence.

Validation of a virtual simulation model of a high-speed dynamic process

The validation of virtual models in high-speed dynamic processes often requires a combination of different approaches, especially in cases where the input data for the material and the contact bodies are not completely known or are subject to significant uncertainties. In such situations, direct experimental comparison with simulation results can lead to significant deviations that do not arise from incorrectness of the numerical model, but from limitations in the description of the physical system. A hybrid validation approach is applied in the chapter, combining analytical evaluation and experimental comparison, using the coefficient of recovery as an intermediate and objective reference value. The choice of this

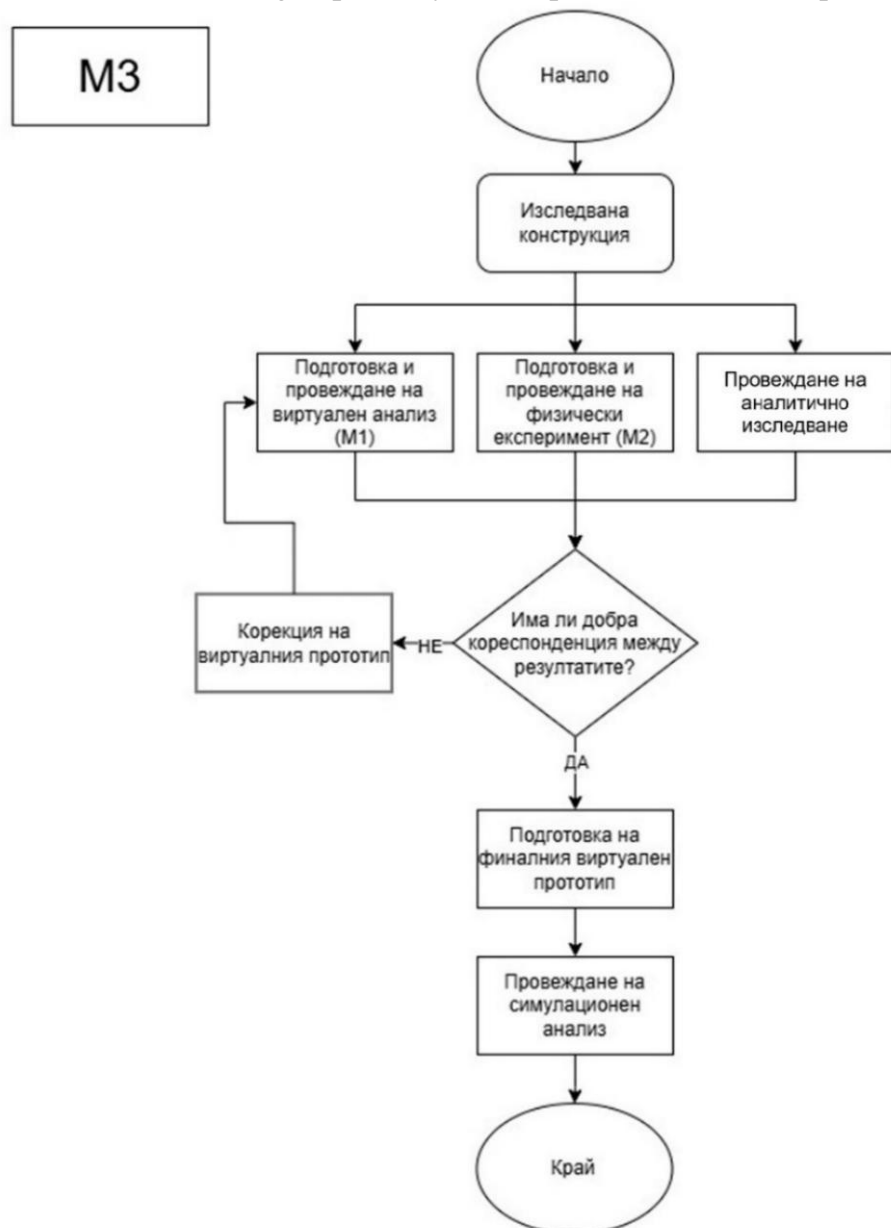


Figure 5-1: Methodology for validation of dynamic load RP (M3)

indicator is justified by the fact that it describes the global energy behavior of the system upon impact and can be determined both analytically, experimentally and numerically. For a simple geometric

object, such as a steel sphere, COR represents a reliable and easily interpretable parameter for assessing the adequacy of the virtual model.

Very good agreement was achieved between the results obtained by the three independent approaches for determining the coefficient of restitution. The analytically calculated value is $e = 0.844$, the experimentally determined value is $e = 0.85$, and the result of the numerical analysis is $e = 0.84$. The closeness between these values indicates consistency of the approaches and confirms the applicability of the combined analytical-experimental-numerical method for validating free-fall tests and for assessing the behavior of the object upon impact.

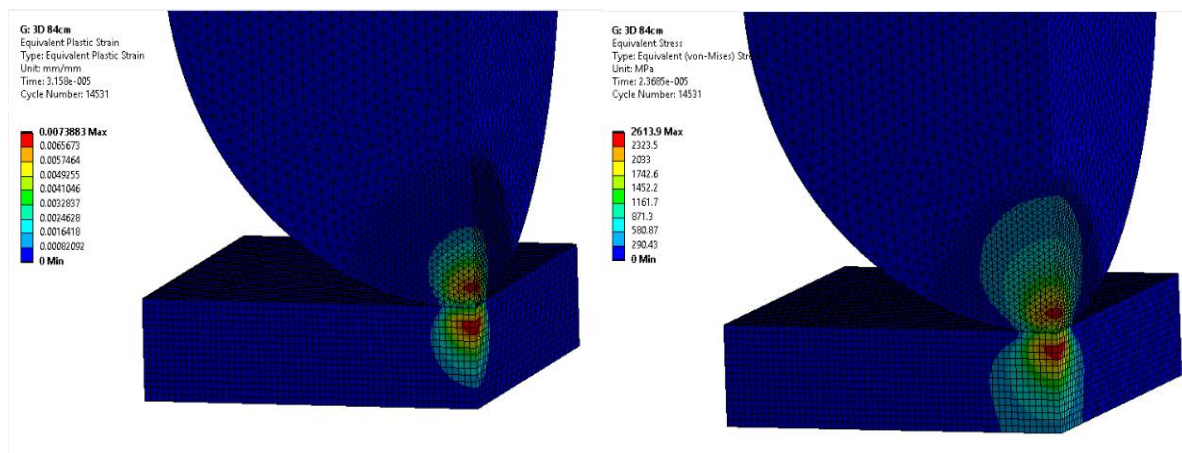


Figure 4-11: Representation of stresses and strains

Validated virtual prototype as a basis for extended numerical studies

Once validated, the simulation model can be used as a reliable basis for extended numerical studies that go beyond the scope and limitations of physical experiments. This allows for effective use of the model as an engineering tool in later stages of product development.

The main areas of application of the validated virtual prototype include:

- investigating scenarios outside the experimental scope, such as higher drop heights, different contact surfaces, or combined loads;
- analysis of unfavorable and difficult-to-implement experimental cases, including asymmetric impacts and boundary orientations;
- using the model for parametric studies, structural optimization and risk assessment under impact loads.

An additional advantage of the validated virtual prototype in the context of a black-white box is the possibility of detailed access to internal quantities that cannot be directly measured experimentally, such as stress distributions, local plastic deformations, strain rates and energy components during impact. In this way, the validated virtual prototype is not limited to reproducing the experimental results, but becomes an extension of the experimental study, allowing for in-depth analysis of the physical processes and supporting the making of justified engineering decisions in high-speed dynamic impacts. Another major advantage is the possibility of using the already validated virtual prototype to expand the scope of research.

Conclusions from Chapter 5

A consistent approach for validation of virtual prototypes in high-speed dynamic processes has been developed and implemented, which integrates analytical, experimental and numerical approaches into a single logical framework. The remaining conclusions are summarized in the following points:

- The reviewed studies concerning the validation of dynamic simulation analyses have been systematized.
- Based on the reviewed studies, the methods for validation of virtual dynamic analyses were analyzed and compared;
- The comparative analysis of validation methods performed shows that combining different experimental and analytical approaches leads to a higher level of confidence compared to using a single method.
- The comparative analysis of validation methods performed shows that combining different experimental and analytical approaches leads to a higher level of confidence compared to using a single method.
- A hybrid validation approach was implemented, in which the recovery coefficient was used as a global and robust indicator of the energy behavior of the system upon impact.
- The developed approach was applied, and very good correspondence was observed between the results of the testing of the studied methodologies for building computational models of virtual prototypes and conducting experimental research, as well as validation through analytical calculations.
- The developed approach works successfully in the context of a simple example of dynamic simulation analysis.

6. ASSESSMENT OF THE ADEQUACY AND APPLICABILITY OF THE CREATED APPROACH THROUGH APPROVAL ON A HIGH-SPEED DYNAMIC FREE FALL PROCESS

The practical application of the developed system approach for modeling high-speed dynamic processes using virtual prototyping tools is considered. The focus is on building a computational model of a virtual prototype and conducting an explicit numerical analysis of a free-fall scenario, with the process structured to ensure traceability between input assumptions, numerical setup, and measurable output indicators. In this way, a basis is created for model verification (consistency of setup) and validation against experimental results (correspondence with physical behavior).

As an example, a battery module for an electric vehicle, part of a modular ribbed structure, is considered, in which individual functional components are integrated into an assembly unit and a supporting system. Such structures are realistically exposed to mechanical impacts during production, assembly and service operations, therefore the assessment of the behavior when falling from a limited height is a relevant and practically significant scenario. The choice of this object is motivated by the fact that mechanical impacts can occur not only during operation, but also during transportation, assembly and service, and in certain cases they can pose a safety risk. Within the framework of the dissertation work, dynamic impacts of acceleration and free fall, defined in the applicable standards ISO 16750-3 and UN/ECE-R100,

which define minimum requirements for such tests, have been considered, but within the framework of the current work they have been expanded by considering additional adverse scenarios for scientific purposes.

Building a computational model and conducting a free fall analysis

As mentioned in the conceptual chapter, for the purposes of validating the developed methodology, a simulation analysis of a free-fall impact load was built and subsequent validation was carried out through experimental tests. The studied object is a modular structure containing electric batteries as components, used in an electric vehicle, which is part of a modular structure according to the so-called. concept - cells combined into a base module, an assembled unit and integration into the vehicle's supporting structure. Such a configuration implies the possibility of mechanical impacts during production, assembly and service activities, which necessitates the study of the behavior when falling from a limited height. The initial CAD model of the battery module was developed outside the scope of this dissertation work and reflects the main structural, functional and technological requirements for the product. The design took into account the internal structure of the base module (electric battery components, control electronics and wiring), the external interfaces with the other subsystems, as well as limitations related to thermal behavior, production technology and recycling capabilities. After the physical prototype was built and the design concept was approved, this geometry was used as the starting point for the virtual prototype in this study. For the purposes of the numerical analysis and validation phase, the geometry was simplified in accordance with the adopted methodology, removing components that did not significantly contribute to the strength characteristics and dynamic behavior of the structure under impact loading. The functional battery cells were replaced with lightweight mock-ups, which retained the geometry and load-bearing capacity of the cell housing, but significantly reduced the mass.

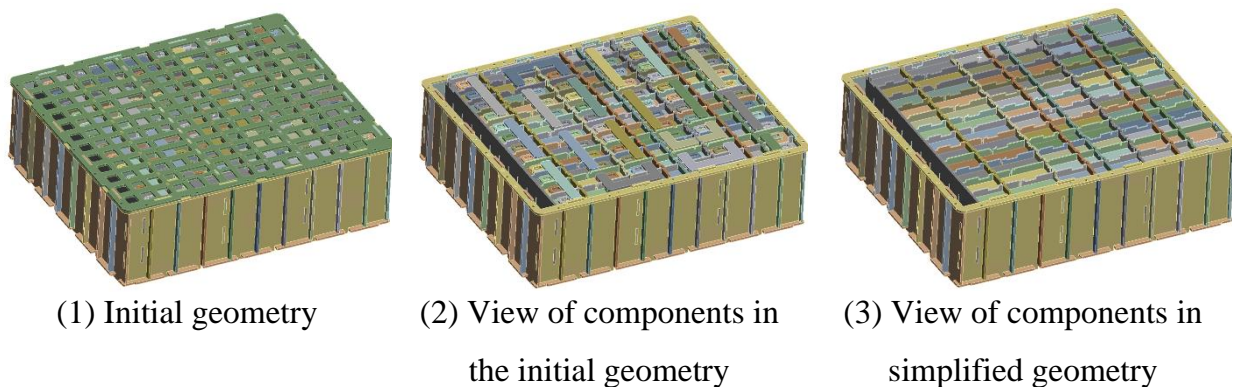


Figure 6-1: *Virtual geometry*

For the numerical analysis, an explicit dynamic setup was configured with specific settings tailored to the nature of the process under consideration. In the initial stage, iterations were carried out with a simplified material description, including only linear-elastic behavior. As a result, it was found that for the correct description of the response to impact loading, it is necessary to introduce realistic material characteristics, including plastic behavior. In order to determine reliable data on the material characteristics, experimental tensile tests were carried out on three identical samples of the production material of the base package housing –

BayBlend® FR3040 EV (polycarbonate–ABS). Based on the results obtained a stress strain diagram has been derived, shown on Figure 6-2.

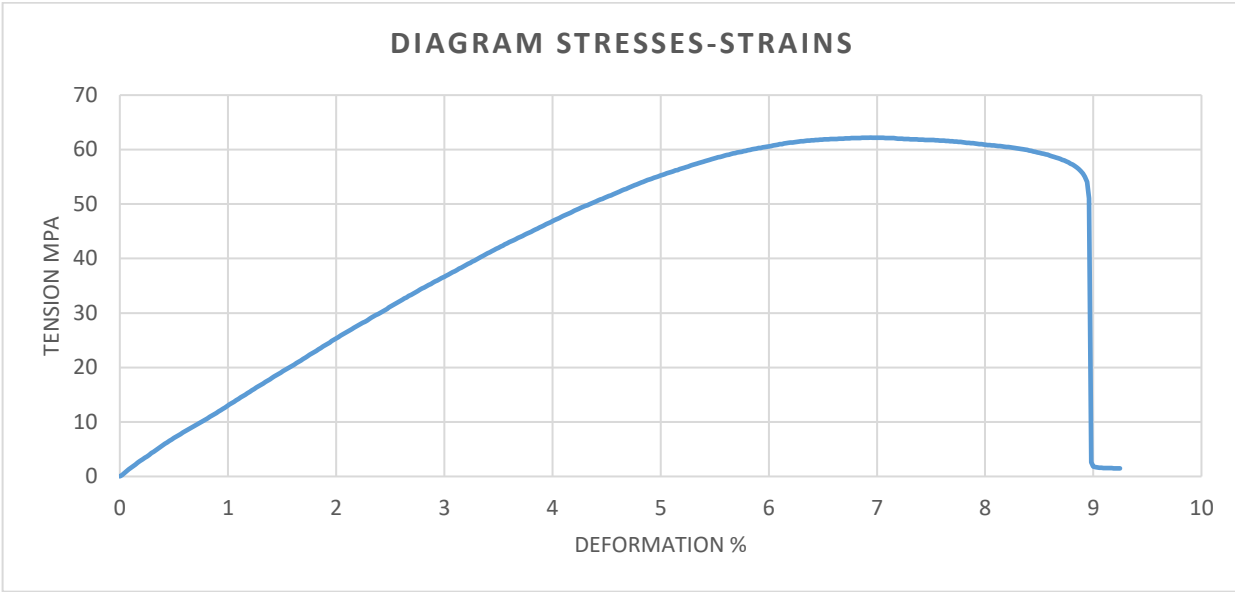


Figure 6-2: BayBlend® FR3040 resulting stress/strain curve

The definition of contact interactions is essential for the correct representation of the virtual prototype, due to the relative displacement of the individual components of the battery module during impact. The use of simplified linear contacts between the battery cells and the housing would lead to an artificial increase in the overall stiffness of the system, which in turn would lead to higher peak accelerations, stresses and a higher rebound velocity, as well as to possible numerical instability of the model. For this reason, nonlinear contact formulations are used in the present analysis.

Frictional contacts are defined between the battery components and the housing, assuming a static friction coefficient of 0.4 and a dynamic friction coefficient of 0.3. These values are in the upper limit for the materials considered and are consistent with the real state of the contact surfaces of the physical prototype, made by laser cutting, where increased edge roughness is observed.

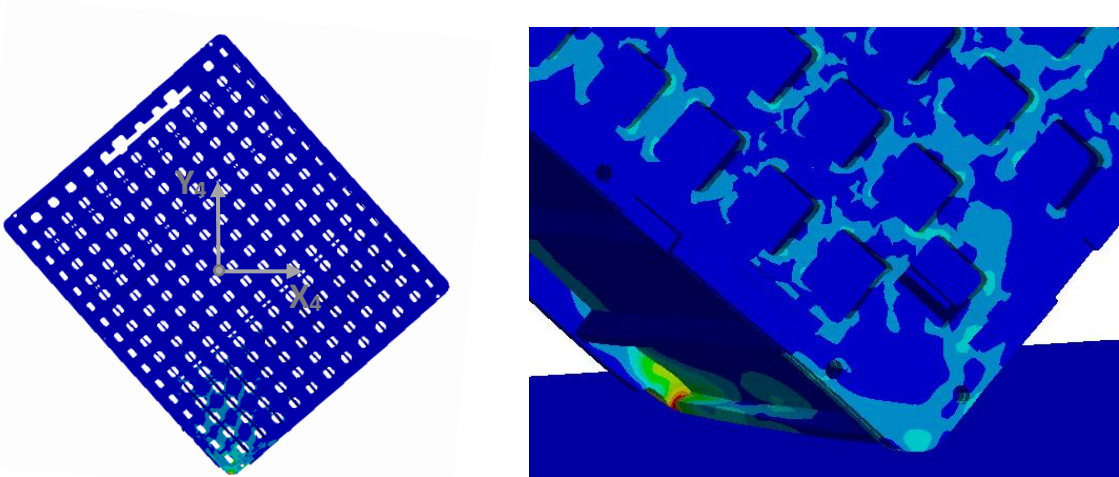


Figure 6-3: Plate contact

An essential stage in the construction of the computational model is the discretization of the volume. Due to the different contact orientations in the considered free fall cases, individual zones of the structure are subjected to significantly higher stress and strain gradients. This necessitates the use of a non-uniform mesh, in which the density of the finite elements is adapted to the expected local load. The critical areas in the contact areas are identified iteratively based on preliminary numerical solutions. In these areas, local mesh compaction is applied by using spheres of influence with a radius of 30 mm. To ensure a smooth transition between the compacted and coarser zones, a transition coefficient of 0.5 and an element size growth factor of 2 are set, which guarantees adequate mesh quality both in the critical volumes and in the transition areas.

After performing the numerical solution, the maximum value of the equivalent stresses in the housing reaches 153 MPa, with the reported plastic deformation being approximately 0.4%. In the battery cells, the maximum stresses do not exceed 3 MPa, with no plastic deformation observed.

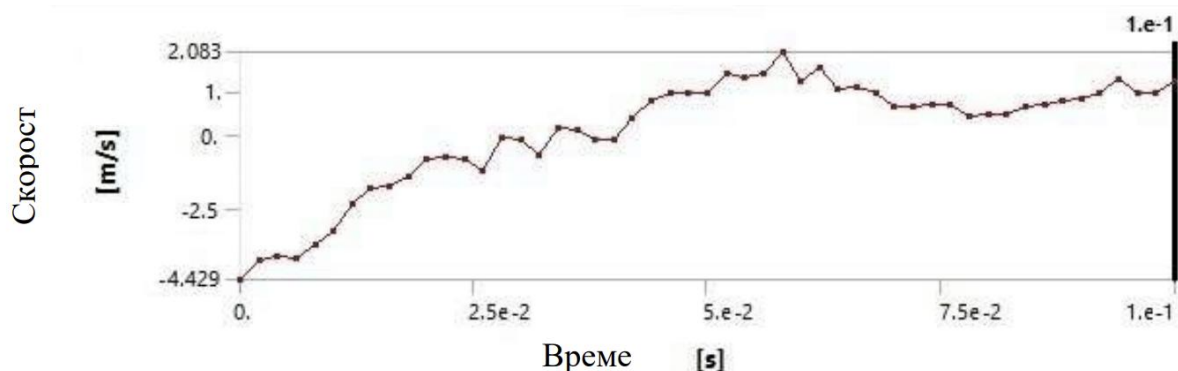


Figure 6-3: *Velocities at the point of impact*

A critical zone in the contact angle region where the initiation of failure is expected is identified, which is consistent with the observed experimental behavior. Figure 6-4 presents the velocity variation as a function of time in the vertical direction for one of the characteristic tracking points, which was subsequently used in the validation by comparison with the experimental data. The initial velocity before impact and the velocity after contact are shown, considering a contact time of the order of 0.1 s. In this interval, a sharp change in velocity is observed, which clearly indicates the moment of impact, after which the motion switches to a mode of damped slow motion.

Experimental studies of dynamic high-speed processes and validation of the presented methodology

The chapter presents the application of the developed experimental methodology for studying the behavior of physical prototypes under high-speed dynamic impacts. The practical implementation of the selected experimental scenarios, measurement approaches and evaluation criteria is demonstrated through free-fall tests.

Figure 6-5 shows the test object and the corresponding contact orientations in the different iterations of the experiment, ordered from LC1-LC4. A single prototype was used for the physical testing – a common practice in the automotive industry, and its condition was monitored and recorded after each experiment, with each contact orientation in the different iterations being unaffected by the previous one.

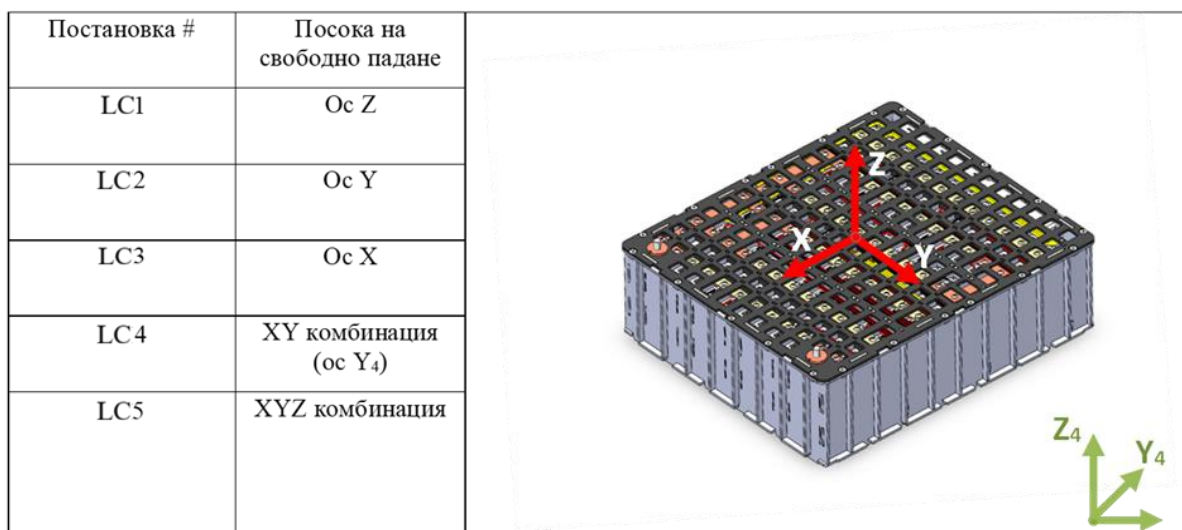


Figure 6-5: Contact orientations in free-fall tests

The physical prototype, shown in Figure 6-6, is built based on the design geometry and is realized using rapid prototyping technologies, in this case laser cutting and chemical bonding. This approach was chosen because in the process of developing new products, design changes are often required, which, using RP technologies, can be realized quickly and at minimal cost, without the need for modification of expensive production equipment.

A specialized free-fall testing machine was used to conduct the experimental tests, with the experimental setup shown in Figure 6-7. The tests were conducted at different orientations of the assembly, with the experiments divided into five separate load cases. According to the requirements of the ISO 16750-3 standard, three orientations are required to be tested,

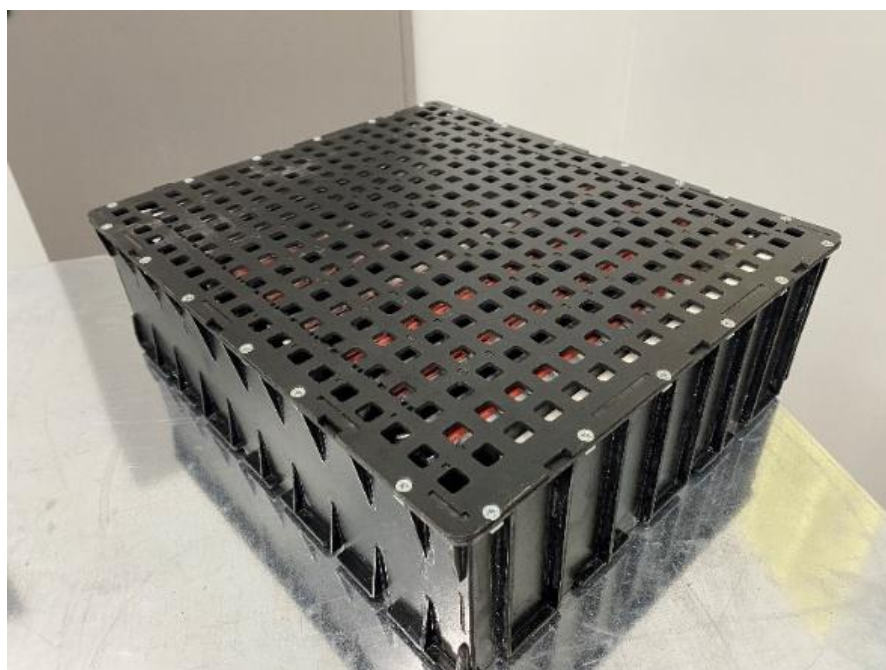
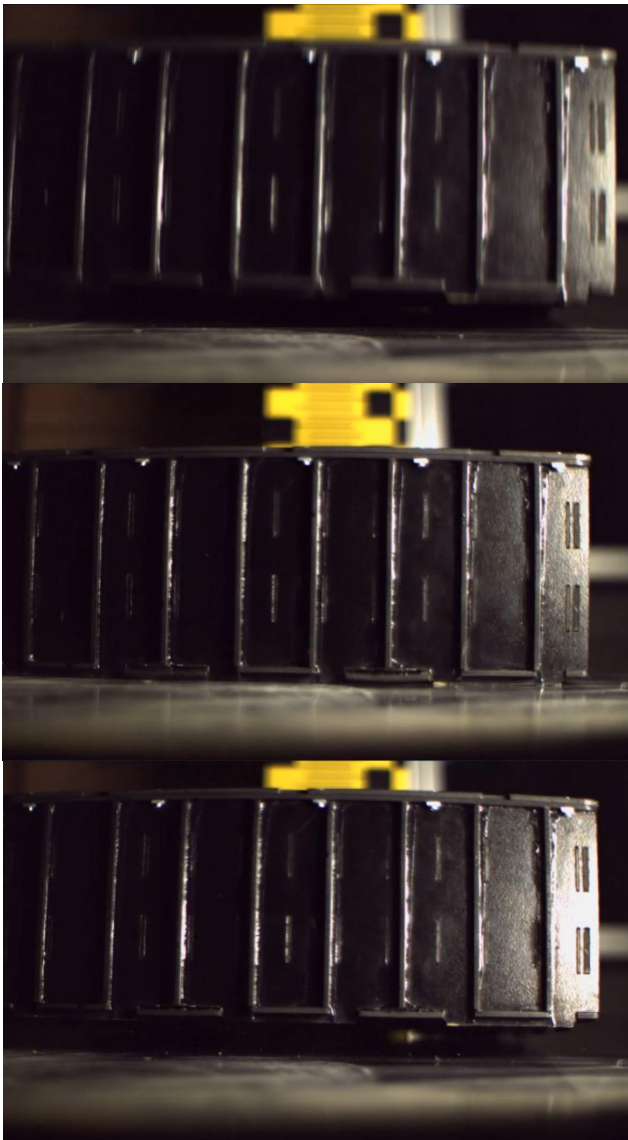
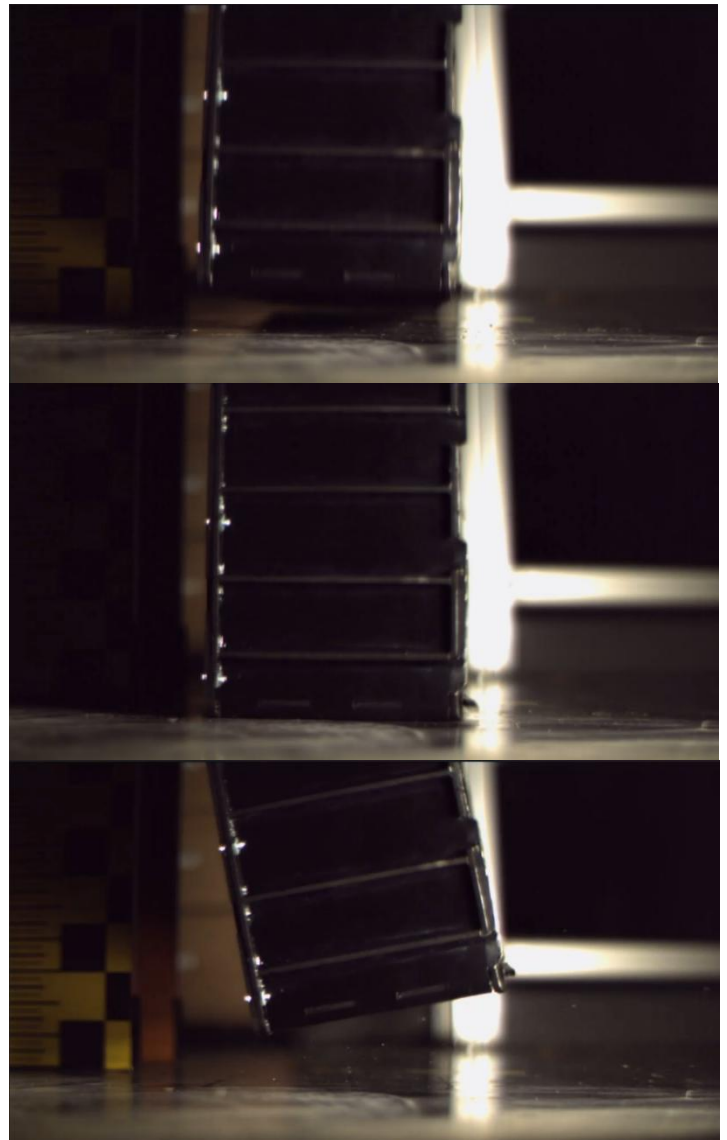


Figure 6-6: Physical Prototype

and within the framework of this study, two more unfavorable orientations have been added in order to obtain additional information about the behavior of the computational model, as described in the introduction. The tests were started from the most favorable load case (LC1 - Load Case) and continued sequentially to the most unfavorable (LC5). After each impact, the prototype was visually inspected for damage and residual deformation, and the orientation for the next test was selected so that the affected areas did not fall into the critical contact areas. A high-speed camera was configured to record at a recording rate of 1000 frames per second.



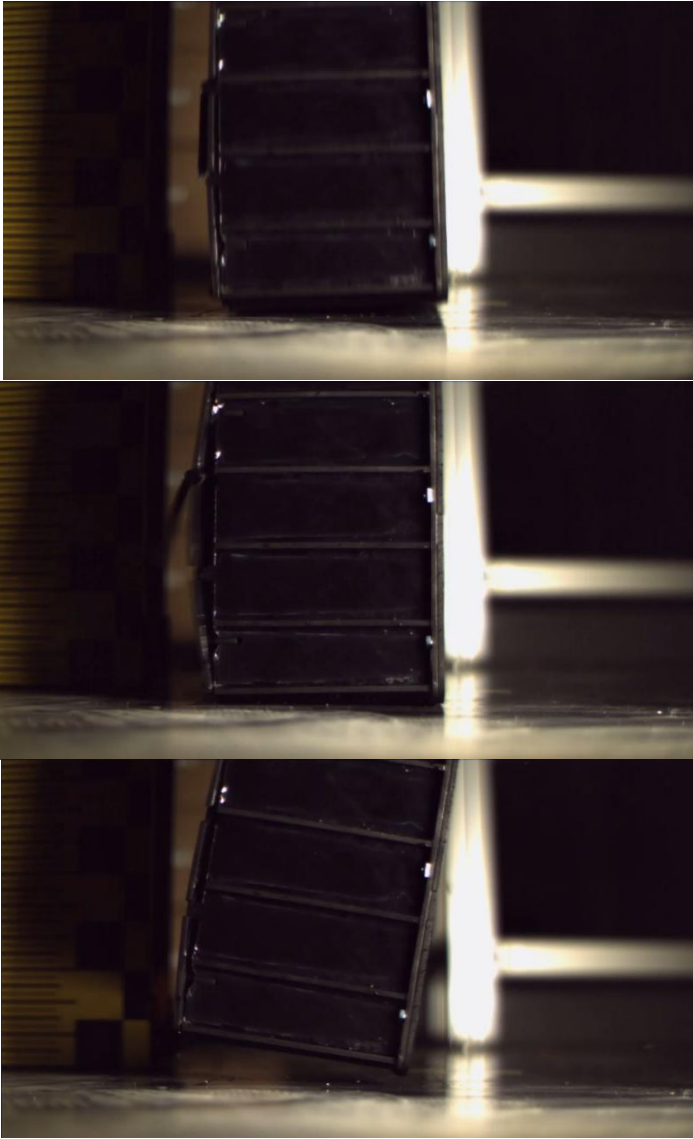
a) LC1



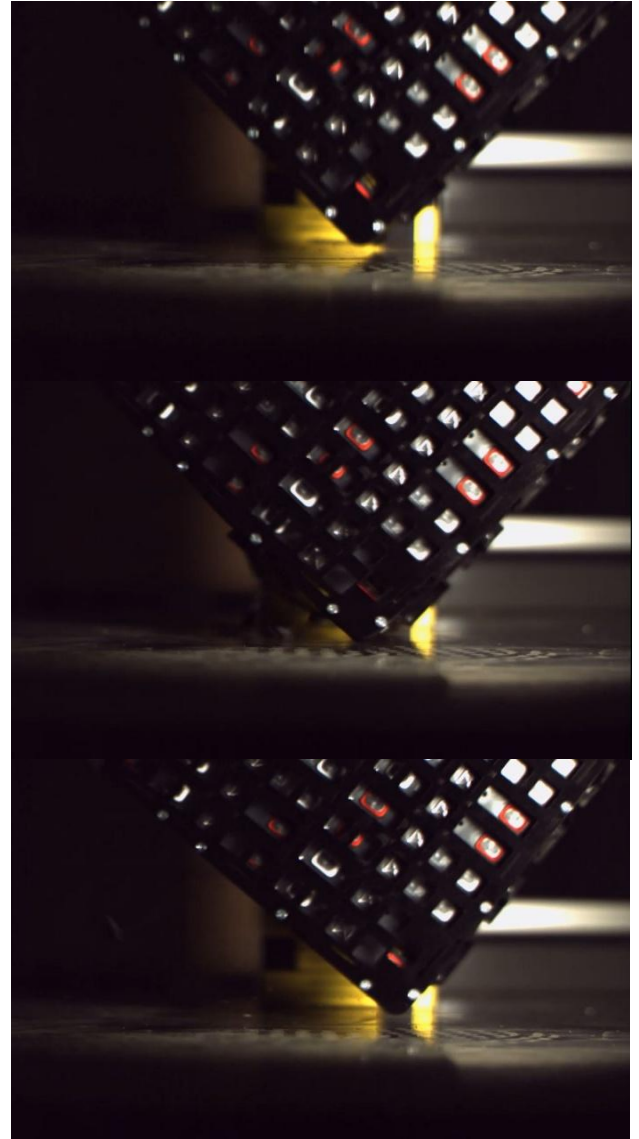
b) LC2

Figure 6-8: Before, during and after contact shots of the experimental study

Some of the high-speed camera frames in Figure 6-8 are shown, used to measure the rebound velocity using DIC methods at selected points, and then used for the purposes of validation of the virtual prototype. It is important to note, however, that the selected points should be easily traceable from a part of the hull without significant elastic deformations, i.e. tracking the global behavior of the system. Additionally, the nature of the elastic deformation at other points can be observed to complement the validation capabilities. Figure 6-9 shows frames from Setups No. 3 and No. 4, with No. 3 showing a high level of hull fragmentation, making the experiment inapplicable for the purposes of virtual validation. Although No. 4 is less favorable, an elastic damping response is observed, modelable in a virtual environment. No footage from LC5 is shown because due to the massive destruction they are also not suitable for validation purposes, but instead the results of this iteration are shown in Figure 6-11.



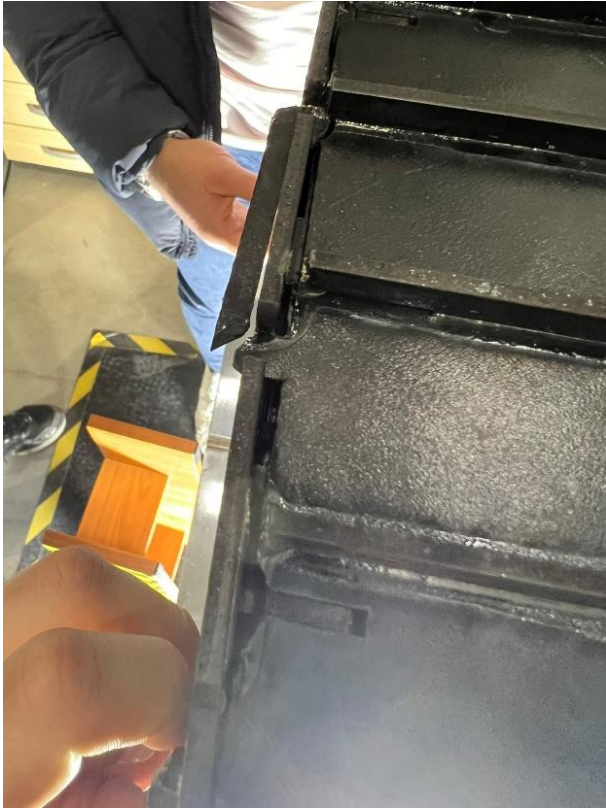
a) LC3



b) LC4

Figure 6-9: Before, during and after contact shots of the experimental study

The following figures show some of the damage that occurred as a result of the experimental testing. A summary of the more significant damage has been made, since copying the test protocol from the study is not the subject of this work. Fractures and cracks were observed on the battery module housing, but after examination, no violation of the integrity of the electrical elements was found. In the more favorable orientations, local fracture zones were observed, and it was assessed that they were caused by defects in the production of the physical prototype. In the less favorable settings - falling on the edge and top, destruction zones were observed due to the high concentration of energy in them, but this effect was sought in the design, since it allows for shock damping and preservation of the internal components. After the tests were completed, the records and experimental documentation were analyzed, with the load cases from LC3 and LC5 being excluded from further processing due to the observed massive destruction and separation of fragments. Such phenomena are difficult to reproduce through virtual prototyping and do not allow for reliable quantitative comparison with the virtual prototype.

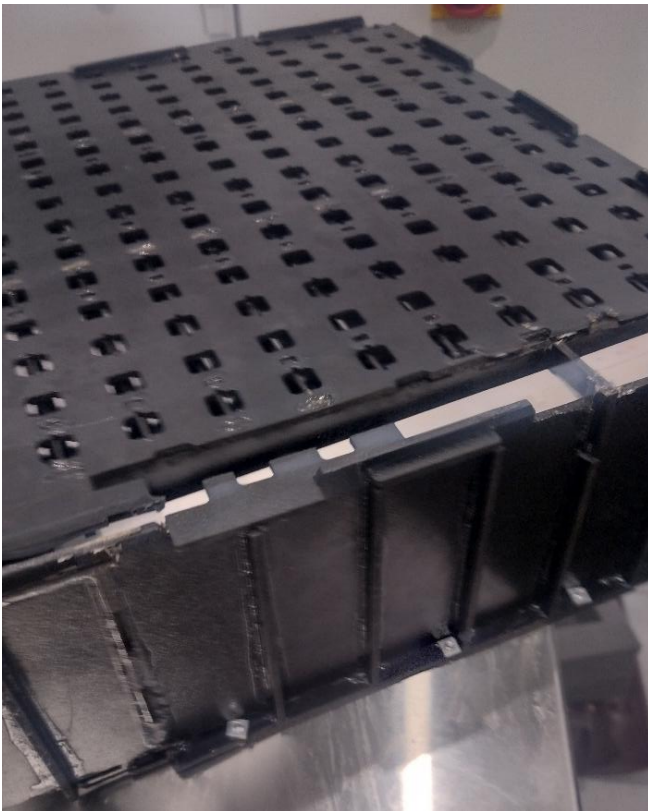


a) Damage after LC1

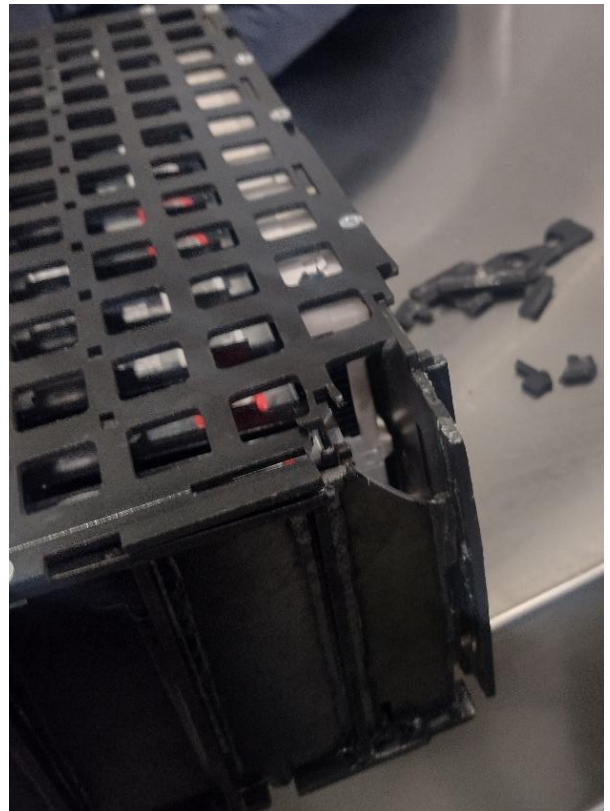


b) Damage after LC2

Figure 6-10: Physical prototype test results



a) Damage after LC3



b) Damage after LC5

Figure 6-11: Physical prototype test results

The values of the rebound velocity and elastic deformations for several characteristic points A, B, C, D of the prototype at different orientations were extracted using a motion analysis software package.

These parameters were used in the validation process of the virtual prototype. Particular attention was paid to LC4, as Figure 6-12 and 6-13 present the experimental velocity profiles of the points along the X

and Y axes of the global coordinate system (Figure 6-5). LC4 was chosen for presentation due to the good visual traceability of the deformation process, and the remaining loading cases were analyzed in a similar manner, thus the indicated points are marked in Figure 6-13 in the experimental prototype:

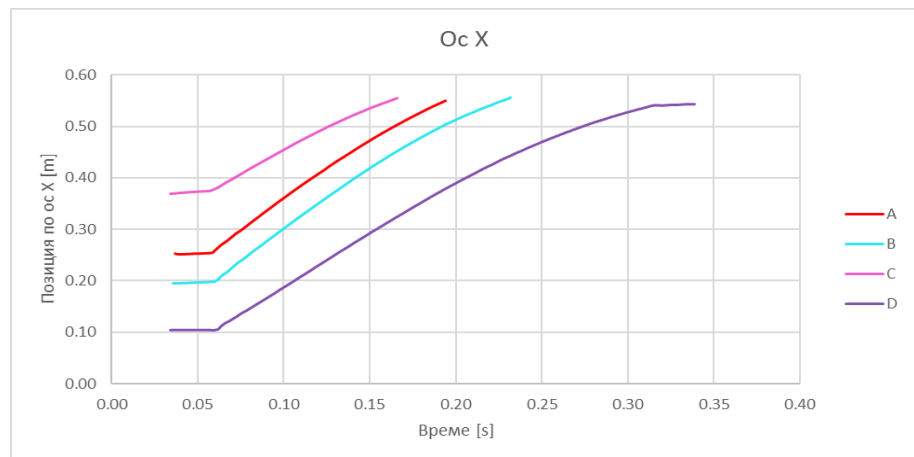


Figure 6-12: Movement of the defined points along the X axis

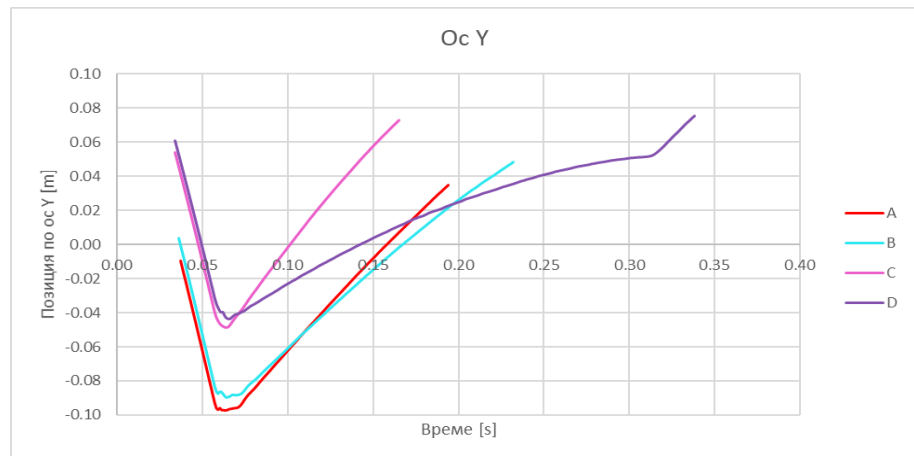


Figure 6-13: Movement of the defined points along the Y axis

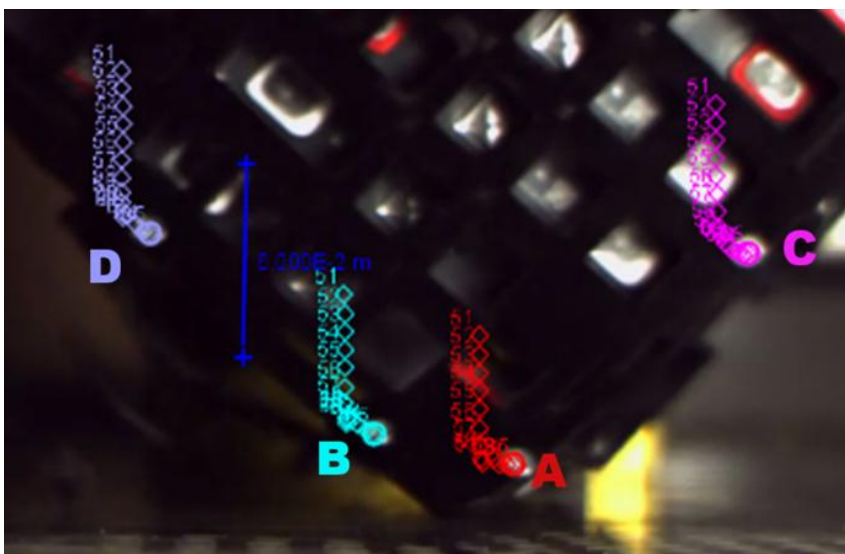


Figure 6-14: Defining the survey points

For validation purposes, contact time was used as the main parameter instead of contact force, as it is more suitable for comparison between the numerical and experimental model. The moment of impact is clearly identified by a sharp change in direction and velocity value.

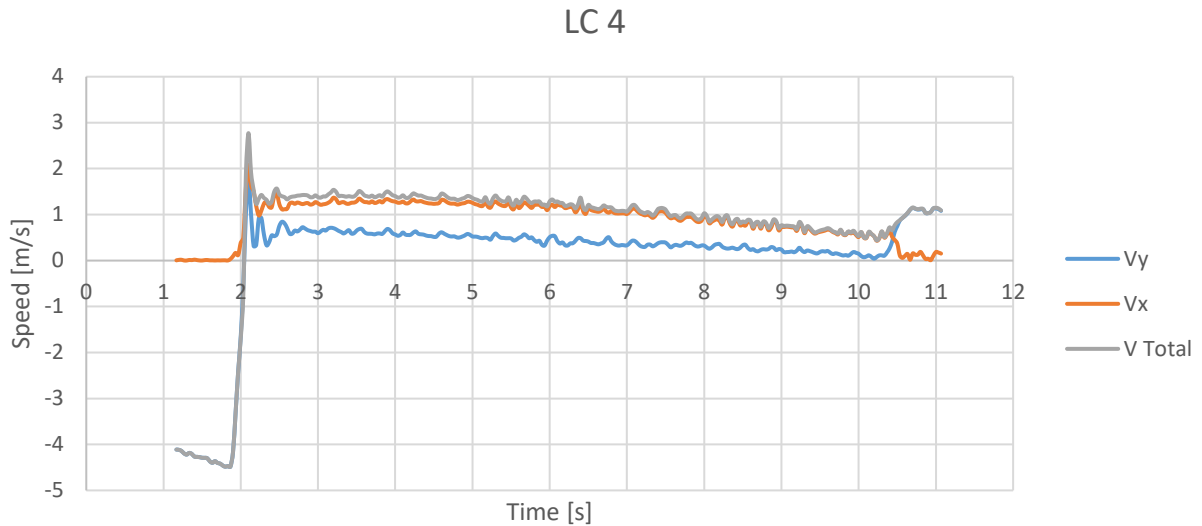


Figure 6-15: Velocity profile from the LC4 experiment

From Figure 6-15, a contact time of the order of 0.23 s is found, as well as a rebound velocity of approximately 1.86 m/s. It should be noted that compared to the numerical model, the experimental data have a lower time resolution, which may lead to small deviations in the determination of the maximum values and contact time. This effect has been taken into account in advance and it is assumed that a sampling rate of 1000 fps provides sufficient discretization accuracy for the purposes of this study.

Validation of simulation analysis of a high-speed dynamic process

The chapter presents the validation of a simulation analysis of a high-speed dynamic process by comparing it with results from experimental free-fall tests. The validation was performed on the basis of the developed experiment and aims to assess how well the numerical model reproduces the real physical behavior of the studied object under impact loading.

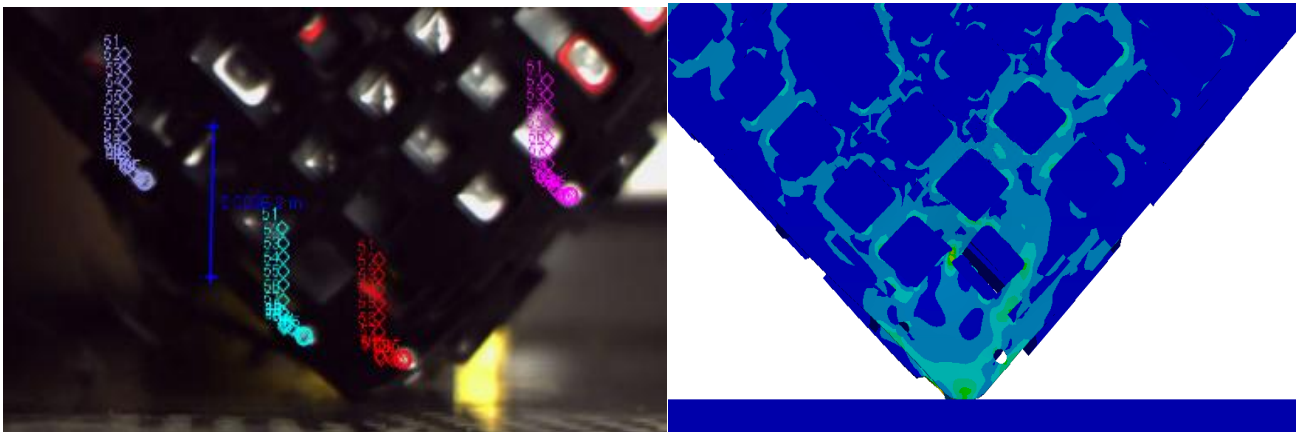


Figure 6-16: Visualization from the comparative analysis between the virtual model and the physical experiment with tracking specific points

The results obtained show a very good correspondence between the physical and virtual prototype for LC4. For LC1 and LC2 even smaller deviations were reported, while for LC5 the validation is limited to deformation behavior due to the complex contact kinematics and rotations that make the use of COR inapplicable.

It should be emphasized that the virtual and physical prototypes are not expected to behave identically, and a consistent deviation in the expected direction is considered a sufficient

condition for validation. A complete match with a prototype made using RP technologies would mean a mismatch with the behavior of the final product manufactured using the target technology.

On this basis, it can be concluded that the developed virtual model adequately reproduces the physical mechanisms of the high-speed dynamic process and is validated for the purposes of this study, as all numerical analyses for the different load cases were conducted under identical settings.

Validation of simulation analysis of a high-speed dynamic process

For the simulations of the final validated virtual prototype, corrections have been made to the previously validated numerical model, with the masses of the batteries being set to their real values, and the connections between the batteries and the interface elements being added. In some of the considered load cases, the battery connections have a significant impact on the behavior of the module during impact, since due to the requirements for high currents, their cross-section is significant. Due to the complexity of the analysis, it was calculated only for the LC4 contact orientation, determined as the most unfavorable validated orientation.

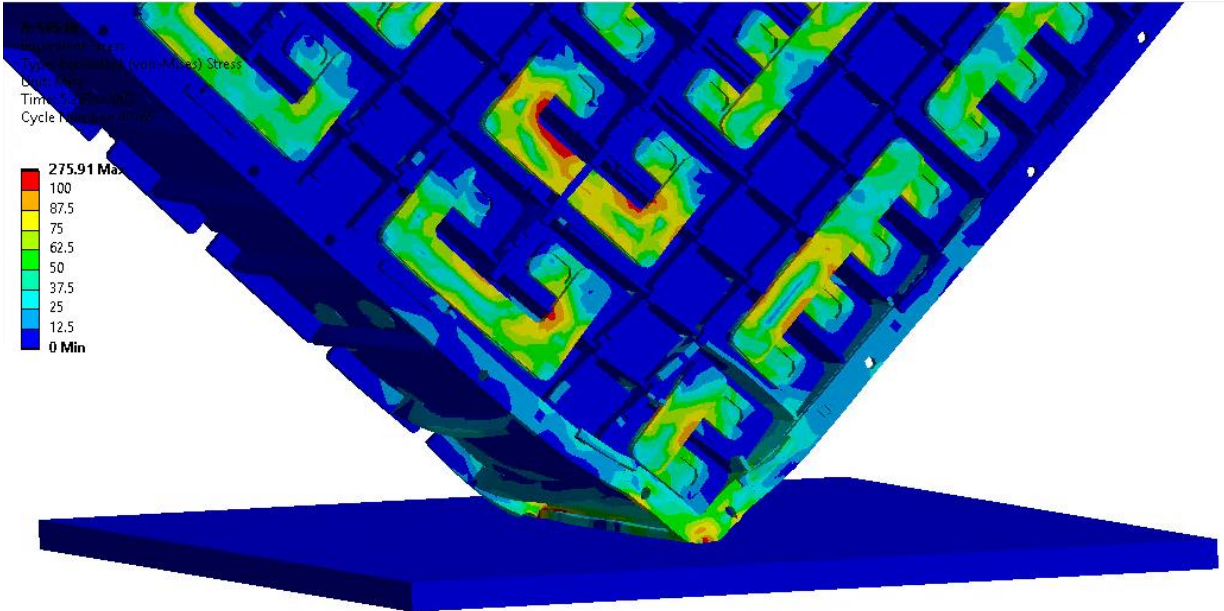


Figure 6-17 - the impact zone for LC4 in the final virtual model.

Plastic deformation is observed in the area of the edge of the housing, as well as increased stresses in some of the battery connections. Due to the plastic nature of the materials, the stresses do not exceed 275 MPa. The plastic deformation in the connections does not exceed 0.02%, which means that no significant geometric changes are expected, according to the shape deviation shown in Figure 6-18. Due to the high plasticity of copper, and the transformation of part of the impact energy into plastic deformation, the aluminum battery terminals are not significantly affected by the impact and no dangerous stress values are observed in them. For the housing, however, the plastic deformation reaches about 0.7%, which would lead to local failure - a phenomenon that is predictable and practically inevitable in this scenario. The stresses in the battery cells do not exceed 30 MPa, which is an acceptable and safe value and does not imply electrolyte leakage. The last criterion considered is the forces in the contact areas between the cells and the terminals, as well as between the terminals

and the battery connections. When laser welding the prototypes (investigated outside the scope of this work), a shear strength of 1 kN and a mechanical connection of 2.5 kN are ensured, as well as tensile strengths of 1 kN and 4 kN, respectively.

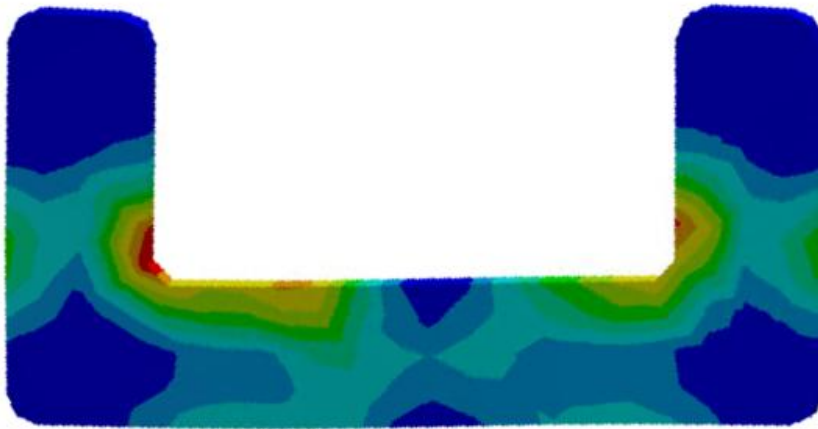


Figure 6-18 - Distribution of plastic deformation in the most stressed battery connection.

In the numerical model, the contact forces do not exceed 110 N, which guarantees a high safety factor for this criterion. In conclusion, the results of the numerical analysis show that for the considered unfavorable LC4, which is not mandatory according to the standards, no dangerous phenomena are expected to occur.

Accordingly, for the remaining load cases defined by the safety standards, no risk is predicted either. The results obtained confirm the adequacy of the initial structural design in the context of impact impact in free-fall testing. The approach demonstrates the possibility of performing a detailed simulation analysis of a product that presents a hazard in physical testing.

Conclusions from Chapter 6

The validation of the approach demonstrates the possibility of performing a detailed simulation analysis of a device that poses a hazard during physical testing. Through the validated virtual prototype, other simulation analyses can be performed with a high level of confidence. The remaining conclusions are summarized in the following points:

- The developed approach has been successfully tested through its practical application for the study of a high-speed dynamic process of free fall type of an electrical element from the automotive industry - a battery module;
- A good level of correspondence between the results of the simulation analysis and the experimental ones has been achieved;
- Benefits have been derived for the detailed development of the product design in the context of its life cycle;
- The costs and time for manufacturing and testing the product have been reduced through simulation modeling methods;
- The influence of all elements in the structure with respect to the studied high-speed dynamic influence was assessed;
- Valuable recommendations were extracted to improve its design in accordance with the black-white box model;
- Conclusions are drawn for future research in the field.

GENERAL CONCLUSIONS

The research conducted, directly related to the topic of the dissertation, allows the following important conclusions to be formulated:

- Recommendations have been formulated for the construction of the computational model at a conceptual level based on the reviewed published studies in the field;
- A concept for modeling and studying high-speed dynamic processes through virtual prototyping has been formulated, which defines the basic principles and criteria for building robust numerical models.
- A consistent methodology has been developed for building a computational model based on a virtual prototype and conducting a numerical analysis of a high-speed dynamic process of free fall type, taking into account the guidelines and stages noted in the conceptual chapter.
- The steps of the methodology are described in detail in the context of building a simulation analysis for free fall testing.
- A methodology has been developed for planning, conducting and analyzing experimental studies under high-speed dynamic impacts,
- A study of the laboratory equipment used for free fall testing was carried out. Undesirable displacements of the falling mass were identified through high-speed recordings.
- Practical guidelines have been formulated to minimize the impact of falling mass displacement
- The methodology is tested with a simple example – the free fall of a metal sphere, in accordance with the previous chapters on conceptualizing and conducting simulation analysis.
- The experiments were successfully conducted, with the bounce height accurately captured for the purposes of validating the simulation model.
- The comparative analysis of validation methods performed shows that combining different experimental and analytical approaches leads to a higher level of confidence compared to using a single method.
- A consistent approach for validation of virtual prototypes in high-speed dynamic processes has been developed, which integrates analytical, experimental and numerical approaches into a single logical framework.
- A hybrid validation approach was implemented, in which the recovery coefficient was used as a global and robust indicator of the energy behavior of the system upon impact.
- The developed approach was applied, and very good correspondence was observed between the results of the testing of the studied methodologies for building a computational model based on a virtual prototype and conducting an experimental study, as well as validation through analytical calculation.
- The developed approach works successfully in the context of a simple example of dynamic simulation analysis.
- The developed approach has been successfully tested through its practical application for the study of a high-speed dynamic process of free fall type of an electrical element from the automotive industry - a battery module;

- A good level of correspondence between the results of the simulation analysis and the experimental ones has been achieved;
- The costs and time for manufacturing and testing the product have been reduced through simulation modeling methods;
- The influence of all elements in the structure with respect to the studied high-speed dynamic influence was assessed;
- Recommendations for improving the design were derived in accordance with the black-white box model;
- Conclusions are drawn for future research in the field.

CONTRIBUTIONS

Scientific and applied contributions

A methodology has been developed for conducting experimental studies to investigate the behavior of physical prototypes in high-speed dynamic processes;

A methodology has been developed for building a computational model for performing engineering analyses of high-speed dynamic processes based on a virtual prototype;

An integrated approach has been developed for the validation and study of high-speed dynamic processes, which combines the methodologies of virtual prototyping and experimental research by further developing the "black - white box" method into a single logical structure.

Applied contributions

The developed methodology has been successfully applied in real experimental free-fall tests, including on simplified reference objects and on a physical prototype of a battery module for an electric vehicle;

Practical guidelines have been prepared for planning and conducting experimental tests under high-speed dynamic impacts, taking into account the limitations associated with the destructive nature of the tests, a limited number of prototypes and the specifics of the measurement technique;

The influence of the experimental technique on the reproducibility of the results was analyzed, and factors influencing the orientation and kinematics of falling bodies were identified, on the basis of which recommendations were formulated for improving the accuracy of free-fall tests;

Through the application of a validated virtual prototype, confirmatory and optimization tests of an innovative product - a battery module for electric vehicles - were carried out;

Benefits have been derived for the detailed development and optimization of the design of the battery module product in accordance with the "black-white box" model.