ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Kristýna Řepová

ANTROPOMORFNÍ TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ - JEHO VLASTNOSTI A VÝROBA

Bakalářská práce

2019

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta dopravní
děkan
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K622..... Ústav soudního znalectví v dopravě

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Kristýna Řepová

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Antropomorfní testovací zařízení - jeho vlastnosti a výroba**

Název tématu (anglicky): Anthropomorphic Test Device - Its Atributes and Manufacturing

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Historie testování bezpečnosti posádky osobního automobilu
- Typy zkoušek bezpečnosti osobních vozidel
- Používané vybavení pro zkoušky bepečnosti
- Antropomorfní testovací zařízení - typy, modely, materiál instrumentace
- Praktická část - Výroba antropomorfního testovacího zařízení

Rozsah grafických prací: dle zadání vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: FIRST, Jiří. Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry. Praha: S&T CZ, 2008. ISBN 978-80-254-1850-5.

Nahum, Alan M.; Melvin, John W. Accidental Injury. New York, NY: Springer, 2002. ISBN 978-1-4419-3168-9.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Nouzovský**
Ing. Zdeněk Svatý

Datum zadání bakalářské práce: **25. října 2018**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **26. srpna 2019**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

L. S.

doc. Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu soudního znalectví v dopravě

doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Kristýna Řepová
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 25. října 2018

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této bakalářské práce. Zvláště pak děkuji Ing. Luboši Nouzovskému, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady při zpracovávání a pracovníkům Ústavu soudního znalectví v dopravě za zajištění materiálních podkladů k praktické části. V neposlední řadě rovněž děkuji Veronice Kostěncové, Tereze Ptáčkové a Adamu Ptákovi s jejichž pomocí byla figurína P6 odlita.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 26.8.2019 .....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

ANTROPOMORFNÍ TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ - JEHO VLASTNOSTI A VÝROBA

bakalářská práce

Srpen 2019

Kristýna Řepová

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce „Antropomorfní testovací zařízení – jeho vlastnosti a výroba“ je seznámení s testovacími figurínami jako takovými, jejich historií a použitím. Toto pojednání je doplněno o legislativu, vztahující se na oblast bezpečnosti, a to konkrétně se zaměřením na homologaci nových prototypů vozidel, dále pak na měřicí zařízení nebo biomechanická kritéria hodnocená u konkrétních typů nárazu. Cílem praktické části bylo znovuodlití testovací figuríny z materiálů řady Lukopren N za použití odlišného poměru směsi vzhledem k prvnímu pokusu odlitku. Spolu s tím byly představeny i další typy materiálů, které by bylo možné k tvorbě výrobku použít.

KLÍČOVÁ SLOVA

Antropomorfní testovací zařízení, automobilová bezpečnost, biomechanika

ABSTRACT

The subject of bachelor's thesis "Anthropomorphic Test Devices – Its Atributes and Manufacturing" is the acquaintance with the Crash test dummies as such, their history and use. This treatise is supplemented by legislation related to the area of safety, specifically focusing on the homologation of new vehicle prototypes, as well as measuring equipment or the biomechanical criteria evaluated for the specific types of impact. The aim of the practical part was to re-cast Crash test dummy from the materials of the Lukopren N series using a different mixture ratio due to the first attempted of the casting. Along with this were presented and other types of materials that could be used for the formation of product use. In addition, other types of materials that could be used to create the product were introduced.

KEYWORDS

Crash test dummy, ATD, automotive safety, biomechanics

Obsah

Obsah 5

Seznam použitých zkratek 7

Úvod 9

1 Legislativa v oblasti bezpečnosti a souhrnné homologační zkoušky vozidel 10

1.1 Předpis EHK/OSN č. 94 10

1.2 Předpis EHK/OSN č. 95 12

1.3 Euro NCAP 14

2 Úvod do testovacích zařízení 16

2.1 Biomechanická kritéria poranění 17

2.1.1 Kritéria poranění hlavy 18

2.1.2 Kritéria poranění krku 20

2.1.3 Kritéria poranění hrudníku 21

2.1.4 Kritéria poranění dolních končetin a pánve 23

2.1.5 Kritérium poranění břicha 24

2.2 Měřicí zařízení a senzorika 24

2.2.1 Akcelerometr 25

2.2.2 Gyroskop 25

2.2.3 Tenzometr 26

2.2.4 Siloměr 26

2.2.5 Potenciometr 27

2.2.6 Pomocná senzorika 27

3 Antropomorfní testovací zařízení 28

3.1 Historie testovacích figurín 29

3.2 Dělení testovacích figurín 37

3.2.1 Čelní nárazové figuríny 38

3.2.2 Boční nárazové figuríny 38

3.2.3 Zadní nárazové figuríny 39

3.2.4 Děti 39
3.2.5 Chodci....39
4 Výroba testovacího zařízení 41
4.1 Materiály vhodné k výrobě....41
4.1.1 Stanovení mechanických vlastností svalu 41
4.1.2 Balistická želatina....45
4.1.3 Agar 49
4.1.4 Lukopren N 50
4.1.5 Polymerní materiály 51
4.2 Použitý materiál....51
4.3 Vlastní odlévání....51
4.3.1 Formy....52
4.3.2 Postup odlévání 53
4.3.3 Tuhnutí....56
4.3.4 Problémy při odlévání....58
5 Závěr....61
Seznam použitých zdrojů 62
Seznam obrázků 68
Seznam tabulek....70

Seznam použitých zkratek

AIS	Abbreviated Injury Scale
APF	Abdominal Peak Force
APROD	Association Peugeot/Renault Omni-directional Dummy
ARL	Alderson Research Laboratories
ASTC	Applied Safety Technologies Corporation
ATD	Anthroporphic Test Device
BMI	Body Muscle Index
CAC	Channel Amplitude Class
CAMI	Civil Aeronautical Medical Institute
CFC	Channel Frequency Class
CRABI	Child Restraint/Air Bag Interaction
CTI	Combined Thoracic Index
DAS	Data acquisition systems
EAP	Elektroaktivní polymery
EEC	European Economic Community
EHK/OSN	Evropská hospodářská komise Organizace spojených národů
EHS/ES	Evropské hospodářské společenství
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
FFC	Femur Force Criterion
FIA	Fédération Internationale de l'Automobile
Flex-PLI	Flexible Pedestrian Legform Impactor
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards
FTSS	First Technology Safety Systems
GM	General Motors
HIC	Head Injury Criterion
HPC	Head Performance Criterion
ISO	International Organization for Standardization
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
NIC	Neck Injury Criterion

NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
ORSP	Occupant Safety Research Partnership
PMHS	Post Mortem Human Subjects
PSPF	Pubic Symphysis Peak Force
RID	Rear Impact Dummy
RDC	Rib Deflection Criterion
SAE	Society of Automotive Engineers
SE	Sierra Engineering
SID	Side Impact Dummy
TCFC	Tibia Compressive Force Criterion
ThCC	Thorax Compression Criterion
THOR	Test device for Human Occupant Restraint
ThPC	Thorax Performance Criterion
TI	Tibia Index
TNO	Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
UMTRI	University of Michigan Transport Research Institute
USAF	United States Air Force
VC	Viscous Criterion
WSTC	Wayne State Tolerance Curve

Úvod

Ať už mechanické modely, crash test dummies či v názvu práce užitá varianta - antropomorfní testovací zařízení, pod všemi těmito názvy najdeme testovací figuríny zhotovované s cílem simulovat fyzické vlastnosti lidského jedince.

Myšlenkou této práce bylo mimo jiné i upozornit na možnost výroby vlastního testovacího zařízení (respektive na možnosti náhrady měkké tkáně). Současně s tím jsou představeny různé typy materiálů, z nichž je možno tělo figuríny odlít. V dnešní době je zásadním problémem především cena tohoto testovacího zařízení, která neustále roste a pohybuje se v řádech milionů korun. Z tohoto důvodu vznikl nápad na vytvoření dostupnější varianty figuríny, kterážto se bude svými vlastnostmi podobat originálu vytvořenému standardizovaným výrobcem.

Možnosti testování bezpečnosti jsou široké. Vedle testovacích figurín bývají mimo jiné používána neživá těla, zvířata ve stavu amnézie, matematické modely či dokonce dobrovolníci. Nicméně každý z těchto jmenovaných subjektů má svá omezení, jako například to, že dobrovolníci mohou být testováni pouze do působení relativně malých sil anebo, že nově vytvořené matematické modely musejí být nejprve fyzicky otestovány právě prostřednictvím testovacích figurín.

Tato práce představuje rešerši testovacích zařízení se zaměřením především na antropomorfní testovací zařízení tvořící v dnešní době zcela standardní prostředek pro testování bezpečnosti automobilů. Během jejich vývoje i v důsledku samotného jejich používání došlo k výraznému snížení počtu mrtvých následkem silničních nehod, nýbrž i nehod v oblasti armády a letectva.

Celkem byly Ústavem soudního znalectví v dopravě vyrobeny dvě šestileté figuríny série P s označením P6. Obě figuríny dostaly pracovní název Pamela, kdy první pokus odlití z roku 2017 je označen jako Pamela v.1 a současně vytvořený odlitek jako Pamela v.2. Při výrobě druhého odlitku figuríny, jenž je popisován v této práci, byl brán ohled především na to, aby na rozdíl od poměru směsi materiálů použitém při prvním pokusu, byla nová směs totožných materiálů odolnější vůči nárazu, a tudíž aby u figuríny nedocházelo k takovému poškození, respektive trhlinám ve struktuře jako u předchozí verze.

Využití takto vyrobených figurín je ve skrze určeno pouze pro účely testování Ústavem soudního znalectví v dopravě na ČVUT v Praze, nicméně předcházející verze figuríny už byla mimo jiné i použita jako „zátěž“ při testování automobilkou ŠKODA Auto.

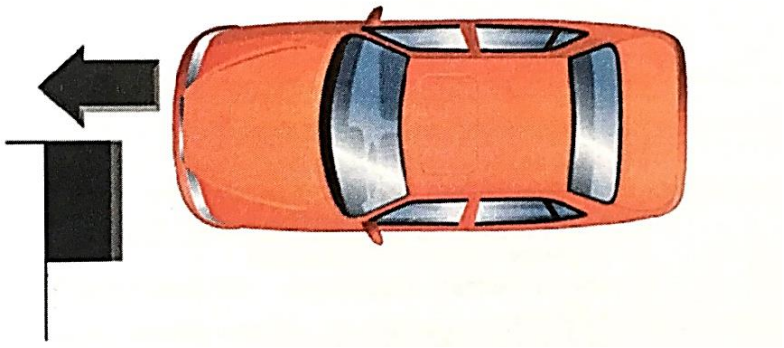
1 Legislativa v oblasti bezpečnosti a souhrnné homologační zkoušky vozidel

Evropská legislativa působící v oblasti bezpečnosti v dopravě je tvořena souborem předpisů EHK/OSN, směrnic EHS/ES a ISO norem. Jejich splnění je pro výrobce vozidel takřka nezbytné. Dříve, nežli je vozidlo uvedeno na trh, musí být u každého nového modelu prokázáno, že účinnost prvků pasivní bezpečnosti je dostačující v tom smyslu, že jsou splněna požadovaná kritéria odpovídající platné legislativě, jež jsou prokazována skrze homologační zkoušky vozidel. Skutečnost, že výsledky homologačních testů nejsou volně přístupné a že podmínky testování se napříč kontinenty mohou lišit, zapříčinila vznik jednotného systému hodnocení testů vedeného sdružením spotřebitelů Euro NCAP, působící v Evropských zemích spolu s dceřinými organizacemi rozšířenými po celém světě. Vyjma nároků kladených na vozidla a prvky pasivní bezpečnosti, vymezuje legislativa požadavky mimo jiné i na způsob provádění testů a jejich vyhodnocení, ale i na použitou měřicí a vyhodnocovací techniku, kterážto bude zmíněna v samostatné kapitole. [1] [2]

Z pohledu pasivní bezpečnosti podléhá homologace osobních automobilů předpisům Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů – EHK/OSN č. 94 a EKH/OSN č. 95. Jde o takzvané dynamické zkoušky celého vozidla, přičemž pojmem dynamické zkoušky rozumíme zkoušky, jež jsou realizovány formou nárazového testu, při kterých se vozidlo nebo jeho komponenty pohybují, popřípadě veličiny, které na vozidlo působí. [1] [3]

1.1 Předpis EHK/OSN č. 94

Působnost předpisu se vztahuje na vozidla kategorie M_1 – motorová vozidla, která mají nejméně čtyři kola, vyrobená a konstruovaná pro dopravu osob s nejvýše osmi sedadly vyjma sedadla řidiče nebo vozidla víceúčelová. Jedná se o takzvanou zkoušku vyoseným nárazem na deformovatelnou bariéru, kdy na pevnou bariéru tvořenou železobetonovým blokem o minimální hmotnosti 70 t s šířkou 3 m a výškou nejméně 1,5 m, je umístěn deformační blok, na kterém probíhá překryv kolidujícího vozidla. Vozidlo naráží do kolmé bariéry stranou řidiče tak, aby překrytí, jež určuje procento šířky vozidla, které je přímo před čelem bariéry, činilo 40 % z šířky vozidla $\pm$ 20 mm, viz Obrázek 1. Čelo bariéry je pokryto překližkou o minimální tloušťce 20 mm. Nárazová rychlost je stanovena na $56\ -0/+1\ km{\cdot}h^{-1}$. Jestliže by byla zkouška realizována při vyšší nárazové rychlosti a všechna kritéria by byla splněna, zkouška klasifikována jako vyhovující. V okamžiku nárazu už na vozidlo nesmí působit žádné přídavné řídicí ani hnací zařízení. [1] [3] [4] [5] [6]



Obrázek 1 - Čelní vyosený náraz s překrytím [1]

Zkušební prostor musí být natolik velký, aby v něm mohlo být provedeno urychlení vozidla a aby se na něj vměstnala rozjezdová dráha, bariéra a technická zařízení nezbytná ke zkoušce. Vozidlo je poháněno buď za pomoci svého vlastního motoru, nebo jiného hnacího zařízení. Alespoň 5 m před bariérou musí být povrch dráhy vodorovný, rovný a hladký. Figurína předepsaná pro čelní náraz – muž padesátého percentilu Hybrid III, více viz kapitola Antropomorfní testovací zařízení, je instalován na každé přední krajní sedadlo, za využití zádržných systémů. [3] [4]

Testované vozidlo reprezentuje vozidlo sériové výroby a jeho výbava musí obsahovat veškerá zařízení, jimiž je obvykle vybaveno, která jsou v běžném provozním stavu. Zádržné systémy, jako např. pásy nebo airbagy, jsou aktivní. [1] [3] [4]

Měření na figurínách sloužící ke stanovení biomechanických kritérií je realizováno za pomoci měřicích systémů, kdy jednotlivé měřené veličiny jsou zaznamenávány skrze nezávislé datové kanály s předepsanou hodnotou CFC neboli Channel Frequency Class určující kmitočtovou třídu kanálu definovanou předpisem EHK/OSN č. 94, viz Tabulka 1. Pro zjednodušenou zkoušku je nutné určit přesný průběh zpomalení nosné konstrukce, jenž je stanoven z hodnot akcelerometrů v patě sloupku „B“ v podélném směru ze strany nárazu vozidla za použití datových kanálů a CFC 180. Časový průběh rychlosti je získán rovněž z akcelerometrů ze sloupku „B“ v podélném směru z nárazové strany vozidla. [1] [4]

Tabulka 1 - Veličiny měřené na figuríně při čelním vyoseném nárazu [1] [4]

Část figuríny	**Měřené veličiny, umístění snímače**	**CFC** [Hz]
Hlava	Zrychlení z tříosých složek v těžišti hlavy	1000
Krk	Axiální tahová síla a smyková síla působící zepředu dozadu na rozhraní mezi krkem a hlavou	1000
	Ohybový moment kolem příčné osy y na rozhraní mezi krkem a hlavou	600
Hrudník	Průhyb hrudníku mezi hrudní kostí a páteří	180
Stehenní a holenní kosti	Axiální tlaková síla a ohybové momenty	600
	Posun holenní kosti vůči stehenní v kolenním kloubu	180

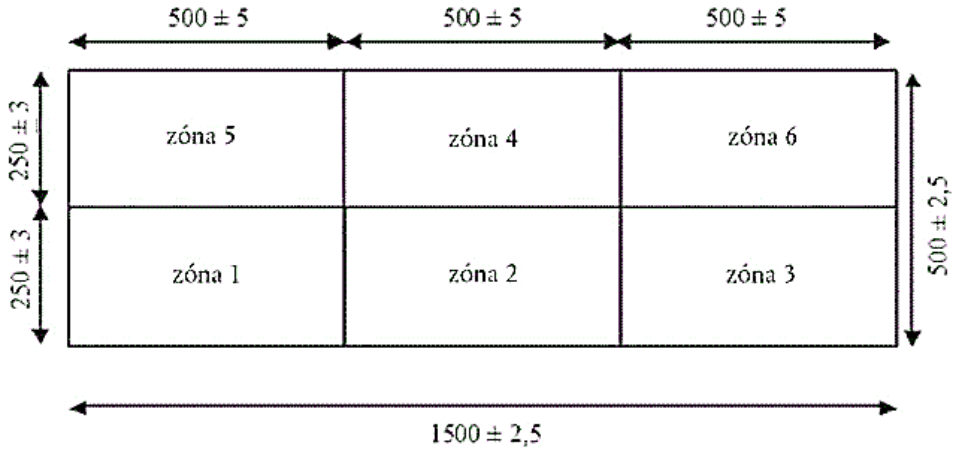
Vozidla pak musí vyhovět v hodnocení následujících biomechanických kritérií, o kterých podrobněji pojednává kapitola Biomechanická kritéria poranění. Jsou jimi kritérium poranění hlavy HPC, kritérium poranění krku NIC, kritérium stlačení hrudníku ThCC, kritérium měkkých tkání V*C, kritérium síly působící na stehenní kost FFC, kritérium tlakové síly působící na holenní kost TCFC a index holenní kosti TI. Zároveň ohybový moment na rozhraní mezi hlavou a krkem působící kolem osy *y* nesmí přesáhnout 57 Nm a pohyb klouzajících kolenních kloubů nesmí překročit hodnotu 15 mm. Navíc musejí být splněny další požadavky, jež jsou specifikovány v EHK/OSN č. 94. [3] [4]

1.2 Předpis EHK/OSN č. 95

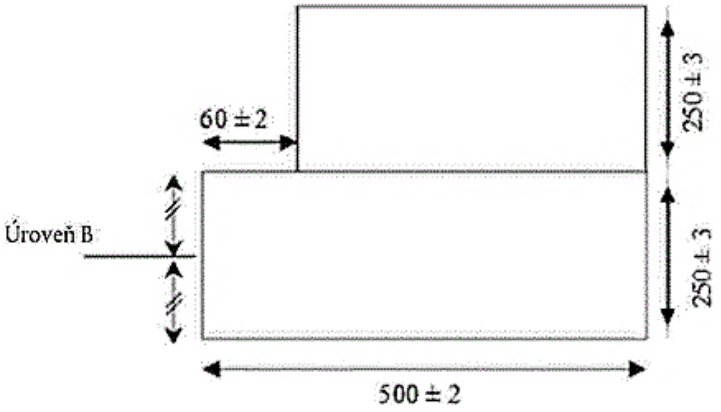
Působnost tohoto předpisu se vztahuje na chování nosné konstrukce prostoru pro cestující, jaké vykazují vozidla kategorie M_1 a N_1 při bočním nárazu. Neboli jde o motorová vozidla, která mají nejméně čtyři kola, vyrobená a konstruovaná pro dopravu osob s nejvýše osmi sedadly vyjma sedadla řidiče nebo vozidla víceúčelová a motorová vozidla, která mají nejméně čtyři kola, vyrobená a konstruovaná pro dopravu nákladu s maximální technicky přípustnou hmotností naloženého vozidla 3500 kg. Podmínkou pro tato vozidla je, že se R-bod nejnižšího sedadla nesmí nacházet více jak 700 mm nad povrchem země. R-bod, definující vztažný bod místa k sezení, je určen souřadnicemi ve vztahu k nosné konstrukci vozidla a stanovuje teoretickou polohu bodu rotace trupu/stehna, odpovídající H-bodu. Testované vozidlo musí odpovídat s přesností $\pm$ 1 % své referenční hmotnosti, jakou je myšlena pohotovostní hmotnost vozidla, jež je zvýšena o 100 kg, přičemž toto navýšení odpovídá hmotnosti testovací figuríny včetně měřicího zařízení. [5] [6] [7]

Zkouška je prováděna nárazem mobilní deformovatelné bariéry kolmo do boku stojícího vozidla ze strany řidiče, kdy bariéra je vybavena takovým zařízením, aby nemohlo dojít k druhotnému nárazu. Konstrukce bariéry je tvořena z nárazového tělesa a zkušebního vozíku spojených za pomoci šroubů a její celková hmotnost činí 950 $\pm$ 20 kg. Vozík je definován

rozchodem kol, jehož hodnota je 1500 ± 10 mm a rozvorem, jenž činí 3000 ± 10 mm. Nárazové těleso – beranidlo, tvořené hliníkovou voštinovou konstrukcí, sestává ze šesti spojených bloků označovaných pomocí zón, jejichž deformovatelnost se liší. Čelní i zadní strana beranidla je navíc pokryta přední a zadní hliníkovou deskou. Délka jedno bloku činí 250 ± 3 mm a šířka 500 ± 5 mm, jak je patrné z Obrázku 2. Dále můžeme nárazové těleso z pohledu shora rozdělit do dvou částí, a to na spodní, která je 500 ± 2 mm hluboká a horní, jejíž hloubka je o 60 ± 2 mm menší, viz Obrázek 3. [1] [3] [7]



Obrázek 2 - Čelní pohled na konstrukci nárazového tělesa [7]



Obrázek 3 - Pohled na bok nárazového tělesa seshora [7]

Mobilní deformovatelná bariéra je urychlena takovým způsobem, aby její rychlost byla alespoň 0,5 m před nárazem konstantní. Nárazová rychlost bariéry činí 50 ± 1 km·h^{-1}. Opět platí stejná zásada, jestliže by byla rychlost vyšší a všechna kritéria by byla splněna, není to považováno za chybu. Příslušný druh zkušební figuríny – muž padesátého percentilu EuroSID 1 bez obou předloktí je umístěn na přední sedadlo ze strany nárazu za použití zádržných systémů. Během zkoušky musí být teplota figuríny stabilní, a to v rozmezí 22 ± 4 °C. Zkušební prostor musí být stejně jako u zkoušky čelním nárazem dostatečně velký, aby zde bylo možné umístit pohon pohyblivé bariéry a instalovat zkušební zařízení a byl zde umožněn následný pohyb vozidla po nárazu. Místo, kde je uskutečněn náraz a kam je vozidlo následně odmrštěno musí být

vodorovné, ploché a neznečištěné a jeho úkolem je představovat suchý, neznečištěný povrch komunikace. Platí zde stejné pravidlo, a to že testované vozidlo musí odpovídat vozům sériové výroby v běžném provozním stavu, obsahující veškerá zařízení, kterými je vozidlo obvykle vybaveno. Některé součástky mohou být vyjmuty nebo nahrazeny něčím, co bude hmotnostně odpovídat danému prvku, nebude-li výsledek zkoušky ovlivněn. Ostatní provozní kapaliny, např. brzdová nebo chladící, mohou být odstraněny. Jejich hmotnost však musí být kompenzována. [1] [3] [7]

Jak již bylo řečeno k předpisu EHK/OSN č. 94, tak i zde platí, že ke stanovení biomechanických kritérií jsou údaje měřeny a zaznamenávány skrze nezávislé datové kanály s hodnotou CFC, definovanou již výše, která se pro sledovaná místa liší, jak je patrné z Tabulka 2. Navíc je zde k jednotlivým částem těla uveden parametr CAC (Channel Amplitude Class) určující amplitudovou třídu kanálu – hodnotu, jež udává horní mez měřicího rozsahu. [1] [7]

Tabulka 2 – Veličiny měřené na figuríně při bočním nárazu [1] [7]

Část figuríny	**Měřené veličiny, umístění snímače**	**CFC** [Hz]	**CAC**
Hlava	Zrychlení z tříosých složek v těžišti hlavy	1000	150 g
Hrudník	Průhyb žeber	1000	60 mm
Pánev	Síly působící na stydkou kost pánve	1000	15 kN
Břicho	Síly působící na břicho	1000	5 kN

Pro boční náraz platí následná biomechanická kritéria, která musí být splněna. Mezi nimi je kritérium poranění hlavy HPC, kritérium průhybu žeber RDC, kritérium měkkých tkání VC, maximální zatížení stydké kosti PSPF a maximální síla působící na břicho APF. Navíc musejí být splněny další požadavky, jež jsou specifikovány v EHK/OSN č. 95. [3] [7]

1.3 Euro NCAP

Zkoušky nárazem bývají realizovány i mimo rozsah legislativních metod. To se ovšem projevuje skutečností, že postrádají právní závaznost. Takovým příkladem jsou zkoušky vykonávané dle metodiky Euro NCAP – nezávislé organizace, jež provádí zkoušky, které legislativa v rámci homologace neboli procesu schválení nevyžaduje. [3]

Metodika Euro NCAP spočívá v testování bezpečnosti vozidel uvedených již na trh s cílem nezávislého ohodnocení jejich aktivní a pasivní bezpečnosti. Historie této mezinárodní organizace sahá do 90. let 20. století, konkrétně do prosince roku 1996, kdy byla založena za spolupráce několika institucí – ministerstva dopravy Velké Británie, správy silničního provozu

Švédska a Mezinárodní automobilové federace FIA. Zkratka názvu vychází z anglického European New Car Assessment Programme, což do češtiny může být volně přeloženo jako Evropský program hodnocení nových vozidel. Cílem této metodiky není zpochybňovat výsledky homologace, nýbrž posoudit vlastnosti výrobku nad rámec povinných požadavků, než je potřeba k jeho schválení, neboť homologace určuje pouze jakýsi minimální stupeň bezpečnosti, jaký musí vozidla vykázat. S tím je spjato i hodnocení, které Euro NCAP využívá. Spotřebitelům poskytuje veřejně přístupné výsledky testů, kde uvádí počet hvězdiček, jenž testované vozidlo obdrží, pohybující se na stupnici 0-5, přičemž 0 hvězd označuje vozidlo jako nevyhovující a naopak 5 hvězd jako bezpečné. Není zde tedy jako při homologaci stanoveno, pouze jestli vozidlo vyhovuje nebo ne, ale je využito mnohem jemnější škály hodnocení. Význam uděleného počtu hvězdiček je vysvětlen v Tabulce 3. [2] [8] [9]

Tabulka 3 - Stupeň bezpečnosti vyjádřený počtem hvězdiček [8]

Počet hvězdiček	Význam
5	Celkově dobré provedení v oblasti ochrany proti nárazu. Dobré vybavení robustní technologií pro zabránění srážky.
4	Celkově dobré provedení v oblasti ochrany proti nárazu; chybí přítomnost doplňkové technologie pro zabránění srážky.
3	Průměrnost v ochraně posádky, nicméně nedostatečná technologie pro zabránění srážky.
2	Minimální ochrana proti nárazu
1	Pouze okrajová ochrana proti nárazu

Podle nové zásady platné od roku 2009 jsou vozy procentuálně ohodnoceny ve čtyřech samostatných kategoriích, jakými jsou ochrana dospělé posádky, ochrana dětské posádky, zranitelnost ostatních účastníků provozu – zejména chodců a asistenční systémy. Ty se pak svým výsledkem podílí na celkovém zhodnocení, opět provedeném formou přidělených hvězdiček. Podmínkou ovšem je, že vozidlo v žádné kategorii nesmí úplně selhat. [2] [8]

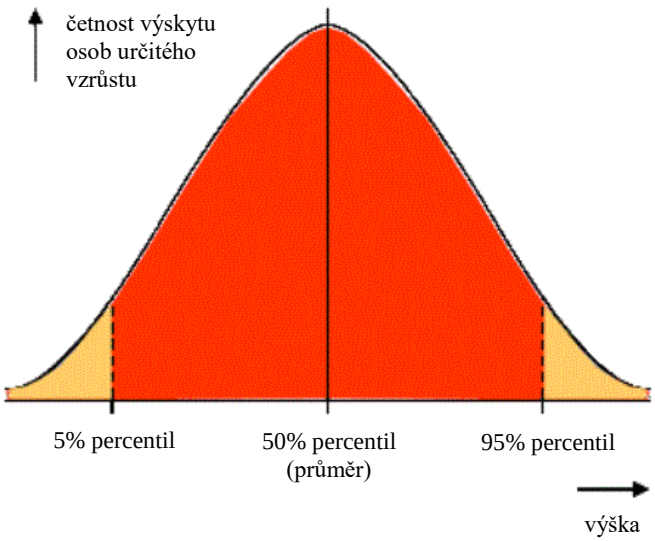
Test je založen na principu anonymní koupě vozidla autorizovanou zkušebnou, což zaručí náhodný výběr vozu a eliminuje ovlivnění ze strany výrobce. Zástupci dané značky jsou přizváni k asistenci při přípravách testu, nicméně zkoušky jako takové se zúčastní jen jako pozorovatelé. Test je uskutečněn vždy pouze jedním pokusem. [2]

Mezi zásadní počin, o který se tato organizace zasloužila, je, že donutila výrobce, aby bezpečnost posádky a vnějších účastníků provozu považovali za jeden z nejdůležitějších aspektů při vývoji nových vozidel. [9]

2 Úvod do testovacích zařízení

Mezi nejčastěji používané objekty sloužící k přesnému popisu mechanismů poranění u obětí havárií můžeme zařadit neživá těla, zvířata ve stavu amnézie, mechanické i matematické modely a rovněž také dobrovolníky. Nevýhodou neživých těl, někdy také uváděných jako Post Mortem Human Subjects (PMHS), je absence svalových či fyziologických reakcí. Co se týče zvířat, použitých ve stavu amnézie, mohou tato měření s neživými těly doplnit, a to o fyziologické reakce napodobující chování lidského těla. [1]

Pod pojmem mechanické modely si můžeme představit nárazové testovací figuríny, které v literaturách obvykle nenajdeme pod jiným názvem než crash test dummies. Jejich úkolem není pouze simulovat fyzické vlastnosti lidského jedince, měly by též splňovat kritéria vyžadovaná legislativními požadavky. Mezi tato kritéria patří antropometrické hledisko, jež se zaměřuje na měření, popis a rozbor tělesných znaků charakterizujících růst a stavbu lidského těla, dále pak opakovatelnost a možnost rekonstrukce celého měření. Rozměry a hmotnosti figurín by měly vždy odpovídat určité části populace. Rozdělení velikosti populace symbolizuje obecné Gaussovo rozdělení, jež je vidět na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**. Mezi základní velikosti patří 50% muž (50 % mužské populace bude je menší než 1,751 m a lehčí než 78,2 kg), dále 5% žena (5 % ženské populace je menší než 1,510 m a lehčí než 46,82 kg) a 95% muž (95 % mužské populace je menší než 1,873 m a lehčí než 102,73 kg). Rozlišujeme několik druhů figurín podle typu nárazu. [1] [10]



Obrázek 4 - Gaussovo rozdělení velikosti populace [11]

Matematické modely jsou využívány v numerických simulacích, avšak tvorba takovýchto modelů je nejenom složitá, nákladná, ale i časově náročná, pokud se chceme co nejvíce

přiblížit reálnému modelu. Jejich výhodou je bezpochyby škálovatelnost neboli to, že mohou snadněji modelovat jedince různých tělesných dispozic, a tím demonstrovat každého člověka zcela na míru, ať už se jedná o dospělého člověka nebo dítě. Lze tak přesně nastavit parametry, jako je váha, výška, věk nebo pohlaví testovaného objektu. Výsledkem numerických analýz jsou mapy obvykle reprezentované barevnou škálou v závislosti na riziku poranění oné části těla. Vyvíjeny jsou i modely, které jsou schopny simulovat porušení vnitřních orgánů. Výhodou virtuálních modelů je, že rovněž mohou nasimulovat mnohem více scénářů nárazu, jako například nárazy ze všech stran, což u testovacích figurín uskutečnit nelze, jelikož jsou vždy nastaveny pouze pro náraz z jedné určité strany. Mezi další výhody patří skutečnost, že po určitém počtu nárazů zde odpadá nutnost pravidelného servisu a kalibrování jako je tomu u testovacích figurín. Možnost, že by matematické modely v budoucnu zcela nahradily testovací figuríny je spíše nepravděpodobná z důvodu, že význam matematických modelů spočívá především ve virtuální přípravě produktů ve fázi vývoje a toho, že bude vždy nutné nově vzniklý počítačový model otestovat. [1] [12] [13] [14]

Poslední skupina – dobrovolníci bývají testováni pouze do relativně malého působení zátěžových sil. V této oblasti došlo k významnému poznání, jež učinil americký plukovník John Paul Stapp (1910-1999), a totiž skutečnosti, že člověk je odolný i vůči zatížení doprovázející nárazy vysokou rychlostí. Za své zásluhy, jakožto průkopník v oblasti zátěžového testování, byl oceněn za stanovení míry tolerance lidského těla při nárazu. Mezi jeho životní počin patří test na raketových saních uskutečněný na letecké základně v Hollomanu v Novém Mexiku (USA) z roku 1954, kterého se dobrovolně zúčastnil, když se podrobil zrychlení přesahujícího hodnot více jak 40 g, působícího během zastavení vozidla z rychlosti přibližně 1000 $km \cdot h^{-1}$ během 1,4 s. Pro představu, při nárazu vozidla rychlostí 50 $km \cdot h^{-1}$ působí na člověka zrychlení o velikosti 25 g po dobu 0,1 s a mnohdy už můžeme mluvit o kritické situaci. Výsledky tohoto testu představují i v dnešní době zatím stále nejlepší základy pro kvantifikaci lidské tolerance vůči zrychlení. Navíc, mimo jeho vlastní dobrovolnické činnosti, řídil nespočet dalších bezpečnostních výzkumných programů využívajících jak lidské dobrovolníky, zvířata, tak i mrtvoly. Zařízení a vývoj techniky pod jeho vedením se staly standardem v této výzkumné oblasti a přispěly tak k významnému pokroku bezpečnosti. V USA působí dodnes na jeho počest Stappova konference studující otázku biomechaniky poranění. [1] [15]

2.1 Biomechanická kritéria poranění

Na začátku 90. let 20. století se bezpečnost stala jakousi soutěžní položkou napříč výrobci automobilů. Byla vyvinuta vědní disciplína biomechaniky, která se stala významnou v souvislosti s vývojem vozidel a chápáním mechanismu vzniku úrazů. Ačkoliv je biomechanika relativně novým, rozvíjejícím se oborem, její historii můžeme datovat

k 15. století, kdy Leonardo da Vinci (1452-1519) zaznamenal význam mechaniky při studiích biologie. Obecně se biomechanika zabývá aplikací klasické mechaniky a mechanických principů na biologické systémy neboli popisem dějů souvisejících s následky působení mechanického zatížení na lidské tělo jak v klidu, tak v pohybu. Jedná se o multidisciplinární vědu, jež kombinuje strojní inženýrství s oblastí biologie a fyziologie. [1] [15] [16]

Výsledky biomechanických výzkumů jsou rovněž nástrojem pro popis biomechanických limitů lidského těla. Vedly ke stanovení zátěžových limitů, k jejichž překročení by nemělo dojít. Limity poranění, které jsou popisovány pomocí zlomenin, poranění orgánů aj., bývají klasifikovány skrze stupnici AIS z angl. Abbreviated Injury Scale, což je jakýsi celosvětově uznávaný princip hodnotící závažnost poranění sledované části těla na stupnici 0–6, jak můžeme vidět v Tabulce 4. Ojediněle, v případech, kdy není možné určit závažnost, je případ klasifikován stupněm 9. [1] [15]

Tabulka 4 - Stupnice AIS [1]

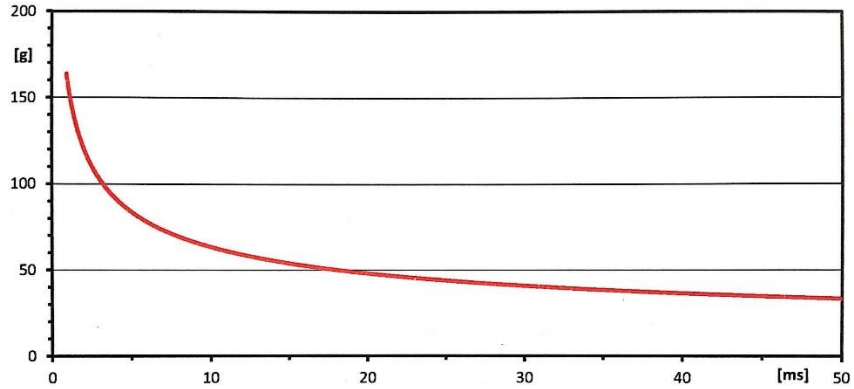
Stupeň AIS	Závažnost poranění
0	žádné poranění
1	lehké poranění
2	středně těžké poranění
3	vážné poranění
4	těžké poranění
5	kritické poranění
6	smrtelné poranění
9	neznámé poranění

Limity poranění přitom záleží na věku, pohlaví, antropometrii, hmotnosti a jejím rozložení a specifických podmínkách. To je důvod, proč je relativně komplikované pokrýt celou škálu účastníků dopravních nehod během simulačních testů od posádky automobilu, skrze cyklisty až k chodcům. Proto lze pozorovat, že v posledních letech bývá mnohem více využito testovacích zařízení, a to jak testovacích figurín, tak počítačových modelů. [15]

2.1.1 Kritéria poranění hlavy

U antropomorfních testovacích zařízení je skupina kritérií určující rozsah poranění hlavy relativně úzká a toto kritérium je standardně zjišťováno pouze na základě účinků zrychlení působícího v těžišti hlavy. Pouze nejnovější typ testovací figuríny THOR je současně schopen měřit i silové reakce probíhající v obličejové části lebky. (Jednotlivé druhy figurín budou rozebrány v kapitole Antropomorfní testovací zařízení.) V souvislosti s rozsáhlými experimenty zaměřenými na hodnocení účinků zrychlení působícího v hlavě došlo k odvození Wayne State Tolerance Curve (WSTC) (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) neboli křivky, udávající vztah

mezi dobou trvání a průměrnou velikostí předozadního translačního zrychlení. Oblast nad křivkou předpokládá překročení míry tolerance, a tedy způsobení závažného poškození mozku. Naopak, oblast pod křivkou udává oblast, kde může dojít k poranění reverzibilního charakteru, tedy schopného vratného procesu. [1]



Obrázek 5 - Wayne State Tolerance Curve (WSTC) [1]

Mezi nejčastěji aplikované kritérium pro hodnocení poranění hlavy při nárazových zkouškách vozidel patří Head Performance Criterion, zkráceně HPC. To je posuzováno jak při metodě zkoušky čelním, tak bočním nárazem. Můžeme se setkat i s pojmem HIC – Head Injury Criterion, kritériem používaným v minulosti, které udává identické hodnoty jako kritérium HPC. Pro výpočet HPC je zapotřebí výsledného zrychlení působícího v těžišti hlavy figuríny, jež je měřeno za pomoci tříosého akcelerometru. Hodnota kritéria je určena z časového intervalu, kdy časové okamžiky t_1 a t_2 stanovují dva libovolné časy mezi prvním a posledním kontaktem hlavy, pro který dosahuje HPC maximálních hodnot. Zde rozlišujeme rozsah intervalu, který buďto činí 36 ms (HPC_{36}) v případě, že v průběhu nárazu nedojde k sekundárnímu kontaktu hlavy s pevnou částí interiéru vozidla, nebo 15 ms (HPC_{15}) v případě, dojde-li k sekundárnímu kontaktu s pevnou částí interiéru vozidla. Nedojde-li v průběhu zkoušky ke kontaktu hlavy s žádnou součástí vozidla, považuje se kritérium HPC_{36} za splněné. Výsledná hodnota kritéria HPC_{36}, potažmo HPC_{15}, by jak dle EHK/OSN č. 94 tak 95 neměla překročit limitní stanovenou hodnotu 1000, která je určena bezrozměrně. [1] [3] [4]

$$HPC = \left\{(t_2 - t_1)\left[\frac{1}{(t_2 - t_1)}\int_{t_1}^{t_2} a(t)dt\right]^{2,5}\right\}_{max} [-] \quad (1)$$

$$a = \sqrt{{a_x}^2 + {a_y}^2 + {a_z}^2}\ [g] \quad (2)$$

kde: a výsledné zrychlení [g]

t_1 počátek sledovaného děje [s]

t_2 konec sledovaného děje [s]

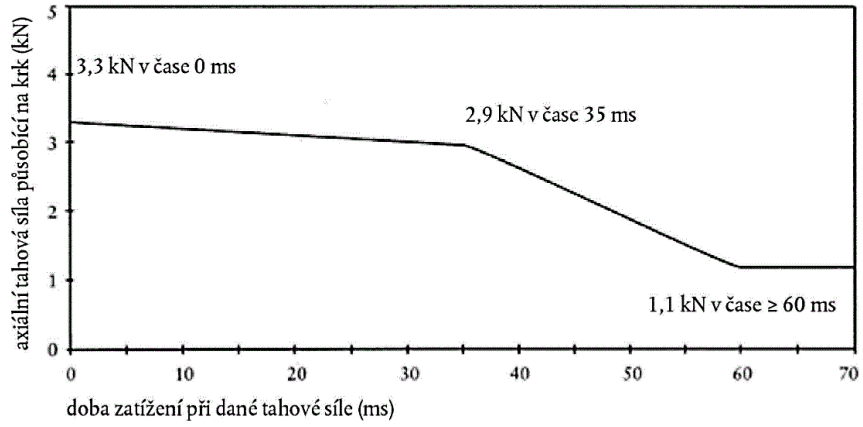
Zrychlení, jež je měřeno v jednotkách $m \cdot s^{-2}$, je vyděleno hodnotou 9,81 a vyjádřeno v jednotkách g, kdy 1 g = 9,81 $m \cdot s^{-2}$. [7]

Za nejjednodušší kritérium považujeme kritérium tří milisekund (3 ms), jež vychází pouze z jedné měřené veličiny a říká, že výsledné zrychlení hlavy naměřené při zkoušce, nesmí překročit hodnotu 80 g trvající déle než 3 ms. [1] [4]

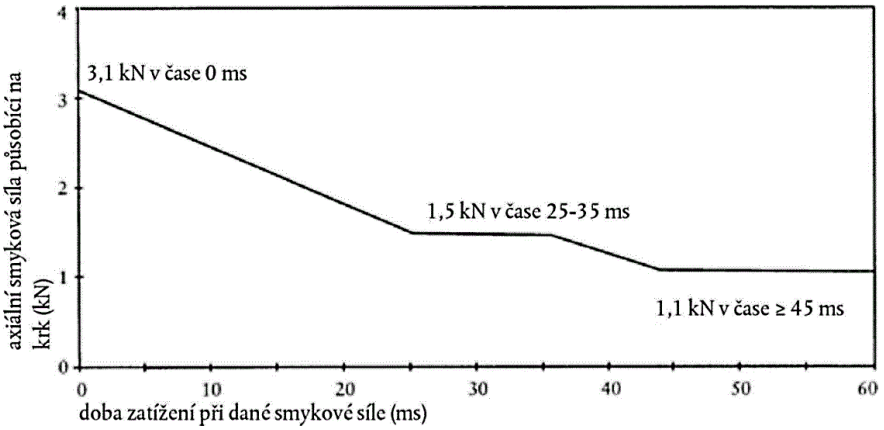
2.1.2 Kritéria poranění krku

Existuje hned několik kritérií, která posuzují příčiny poranění krku a páteře. Může se tak jednat o kritéria stanovující mezní přípustné hodnoty zatížení nebo kritéria složitější, sloužící k hodnocení whiplash poranění neboli poranění vznikajících při rychlém pohybu připomínajícím šlehnutí bičem. Použití jednotlivých kritérií je voleno v souladu s typem nárazu, při kterém jsou poranění hodnocena. Ten může být buď čelní, nebo zadní. [1]

Neck Injury Criterion (NIC) je používáno při nárazových zkouškách prováděných podle předpisů EHK/OSN č. 94. Určuje se na základě maximálních hodnot axiální tahové a tlakové síly a maximální smykové síly (v kN) působící zepředu dozadu v oblasti krční páteře, přičemž doba působících sil je vyjádřena v jednotkách ms, jak je patrné z Obrázku 6 a 7. [1] [4]



Obrázek 6 - Kritérium namáhání krku v tahu [4]



Obrázek 7 - Kritérium namáhání krku ve smyku [4]

NIC kritérium a totiž pro zadní náraz určuje velikost relativního zrychlení a relativní rychlosti působící na oblast krční páteře. Toto kritérium vypočteme dle vztahu 3. [1]

$$NIC = a_{rel} \cdot 0{,}2 + v^2{}_{rel}\ [-] \tag{3}$$

kde: $a_{rel} = a_x{}^{T1} - a_x{}^{Head}$

$v_{rel} = \int a_{rel}(t)dt$

$a_x{}^{T1}$ zrychlení na prvním hrudním obratli působící ve směru osy *x* $[\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}]$

$a_x{}^{Head}$ zrychlení působící ve směru osy *x* v těžišti hlavy $[\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}]$

2.1.3 Kritéria poranění hrudníku

Odolnost hrudníku vůči bočnímu zatěžování je v porovnání se zatížením čelním nižší. Bylo prokázáno, že významný vliv na výsledek zkoušky má i poloha paže testovaného objektu. Pokud se celá paže včetně ramena nachází mezi narážejícím objektem a hrudníkem, disponuje ochrannou funkcí. [1]

V souladu nejen s předpisy EHK/OSN č. 94 a 95, nýbrž i s metodikou Euro NCAP, stanovujeme jak při čelních, tak bočních nárazových zkouškách kritérium zvané Viscous Criterion (VC), v češtině známé jako kritérium měkkých tkání. Jeho značení je rozlišeno dle způsobu použití, jedná-li se o výpočet v souladu s předpisem EHK/OSN č. 94 nebo 95. Při výpočtu kritéria řízeném předpisem č. 94 používáme značení V*C, naopak při stanovování hodnoty dle předpisu č. 95 ho značíme pouze písmeny VC. Hodnota V*C, určená součinem tlakové síly neboli stlačení působícího na hrudní kost a rychlosti průhybu hrudní kosti, je pro výpočet získána z měření průhybu hrudní kosti. VC je definováno okamžitou hodnotou součinu stlačení a rychlosti průhybu žebra, přičemž obě hodnoty jsou získávány z měření průhybu libovolného žebra. Obě kritéria tak určují velikost maximální rychlosti deformace hrudníku, kdy maximální přípustná hodnota je definována v obou předpisech hodnotou 1 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Pro stanovení výsledné hodnoty kritéria je nejprve nutné spočítat hodnotu stlačení v čase t $\left(C_{(t)}\right)$ a rychlost průhybu hrudní kosti v čase t $\left(V_{(t)}\right)$. Dílčí části výpočtu se v závislosti na předpisu odlišují. [1] [4] [7]

Stlačení v čase t dle EHK/OSN č. 94: [4]

$$C_{(t)} = \frac{D_{(t)}}{0{,}229}\ [\mathrm{m}] \tag{4}$$

kde: $D_{(t)}$ průhyb v čase t [m]

Uvedený výpočet je platný pro použití figuríny 50% muže Hybrid III, jak je stanoveno v předpisu EHK/OSN č. 94. Při použití jiných figurín, než jsou řízeny zásadami pro homologaci, je potřeba využít odlišných konstant.

Stlačení v čase t dle EHK/OSN č. 95: [7]

$$C_{(t)} = \frac{D_{(t)}}{0{,}14}\ [\mathrm{m}] \tag{5}$$

kde: $D_{(t)}$ průhyb v čase t [m]

Ve výše uvedeném vzorci je stlačení neboli též průhyb hrudníku vztažen na jeho polovinu, kdy standardní šířka poloviny hrudního koše, jež je měřena na kovových žebrech, je definována hodnotou 0,14 m. Uvedený výpočet se vztahuje na použití figuríny EuroSID 1. [7]

Rychlost průhybu hrudní kosti (EHK/OSN č. 94), popř. žebra (EHK/OSN č. 95) v čase t: [4] [7]

$$V_{(t)} = \frac{8\left(D_{(t+1)} - D_{(t-1)}\right) - \left(D_{(t+2)} - D_{(t-2)}\right)}{12\partial t}\ [\mathrm{m \cdot s^{-1}}] \tag{6}$$

kde: ∂t časový interval mezi jednotlivými měřeními průhybu, jehož maximální hodnota je $1{,}25 \cdot 10^{-4}$ s [s]

Kritérium měkkých tkání v čase t dle EHK/OSN č. 94: [4]

$$(V^*C)_{(t)} = 1{,}3\left(V_{(t)} \cdot C_{(t)}\right)\ [\mathrm{m \cdot s^{-1}}] \tag{7}$$

Kritérium měkkých tkání v čase t dle EHK/OSN č. 95: [7]

$$(VC)_{(t)} = V_{(t)} \cdot C_{(t)}\ [\mathrm{m \cdot s^{-1}}] \tag{8}$$

Stanovení maximální hodnoty $\mathrm{V^*C}$: [4]

$$(V^*C)_{max} = max\left[(V^*C)_{(t)}\right]\ [\mathrm{m \cdot s^{-1}}] \tag{9}$$

Stanovení maximální hodnoty VC: [7]

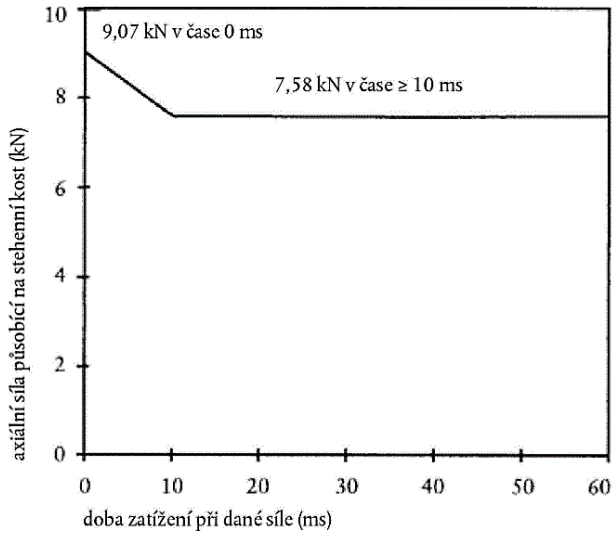
$$(VC)_{max} = max\left[(VC)_{(t)}\right]\ [\mathrm{m \cdot s^{-1}}] \tag{10}$$

S hodnocením poranění hrudníku je spjato i Thorax Compression Criterion (ThCC) neboli kritérium stlačení hrudníku mezi hrudní kostí a páteří. Využívá se při čelním nárazu a je definováno absolutní hodnotou komprese hrudníku (v mm), jež nesmí překročit hodnotu 42 mm. [1] [4]

Thorax Performace Criterion (ThPC) se využívá při zkouškách bočního nárazu, kdy toto kritérium vzniká z kombinace Rib Deflection Criterion (RDC) – kritéria průhybu žeber, jehož podmínkou je, že jeho výsledná hodnota nesmí přesáhnout 42 mm a kritéria VC, jež bylo zmíněno výše. [1] [7]

2.1.4 Kritéria poranění dolních končetin a pánve

Femur Force Criterion (FFC) je dle předpisu EHK/OSN č. 94 stanovováno při čelních nárazových zkouškách a klasifikuje mezní tlakové zatížení (v kN) působící na stehenní kost. Graf udává závislost působení axiální síly na každou stehenní kost figuríny na době zatížení danou silou vyjádřené v ms, viz Obrázek 8. [1] [4]



Obrázek 8 - Kritérium síly působící na stehenní kost [4]

Další kritérium - kritérium tlakové síly působící na holenní kost z anglického Tibia Compressive Force Criterion (TCFC) je stanoveno na základě axiálního tlakového zatížení F_z (v kN) působícího na obě holenní kosti zkušební figuríny, jež nesmí přesáhnout hodnotu 8 kN. [4]

Velikost tlakové síly F_Z působící v podélném osovém směru a velikost ohybových momentů M_x a M_y působících během nárazu na holenní kost posuzuje kritérium Tibia Index (TI) v češtině známé jako index holenní kosti. Ten je při čelním nárazu měřen jak na horním, tak dolním konci obou holenních kostí, přičemž tlaková síla může být změřena v jakémkoliv z těchto dvou míst, avšak ohybové momenty jsou měřeny v obou místech zvlášť. Maximální přípustná hodnota TI by neměla přesáhnout hodnotu 1,3. [1] [4]

$$TI = \left|\frac{M_R}{(M_C)_R}\right| + \left|\frac{F_Z}{(F_C)_Z}\right| \; [-] \tag{11}$$

$$M_R = \sqrt{(M_x)^2 + (M_y)^2} \; [Nm] \tag{12}$$

kde: M_x ohybový moment vztažený k ose *x* [Nm]

M_y ohybový moment vztažený k ose *y* [Nm]

$(M_C)_R$ kritický ohybový moment, jenž je stanoven hodnotou 225 Nm

F_Z tlakové napětí působící v ose *z* (podélná osa holenní kosti) [kN]

$(F_C)_Z$ kritická tlaková síla působící v ose *z*, definovaná hodnotou 35,9 kN

Kritický ohybový moment a kritická tlaková síla působící v ose *z* jsou vyjádřeny pomocí konstant stanovených v souladu s použitým typem zkušební figuríny. [1]

Jako poslední kritérium bude zmíněno Pubic Symphysis Peak Force (PSPF) stanovené předpisem EHK/OSN č. 95, jež udává nejvyšší přípustnou hodnotu síly působící na stydkou kost, která činí 6 kN. [1] [7]

2.1.5 Kritérium poranění břicha

Kritérium Abdominal Peak Force (APF), měřené při bočním nárazu, určuje maximální hodnotu součtu tří sil působících na přední, střední a zadní část břišní oblasti, které jsou měřeny 39 mm pod povrchem testovací figuríny ze strany působícího nárazu. Výsledná hodnota zatížení vnitřní silou musí být menší nebo rovna 2,5 kN, což odpovídá hodnotě vnější působící síly o velikosti 4,5 kN. [1] [7]

$$APF = max \left|F_{y\,Front} + F_{y\,Middle} + F_{y\,Rear}\right| \; [kN] \tag{13}$$

kde: $F_{y\,Front}$ síla působící na přední část břišní oblasti [N]

$F_{y\,Middle}$ síla působící na střední část břišní oblasti [N]

$F_{y\,Rear}$ síla působící na zadní část břišní oblasti [N]

2.2 Měřicí zařízení a senzorika

Zvyšování bezpečnosti, zlepšování odolnosti dopravních prostředků a ochrana posádky při nárazu je závislá na sběru dat, jenž na antropomorfním testovacím zařízení během crashtestů probíhá. Pro výpočet biomechanických kritérií poranění jsou nezbytná data získaná z testovacích figurín, jež obsahují měřicí zařízení pro zaznamenávání fyzikálních veličin, jako například zrychlení, průhybu, sil nebo silových momentů, kteréžto byly zmíněny výše. Měřicí

přístroje musí vyhovovat specifikacím stanoveným v normě ISO 6487:2015. V závislosti na druhu testu rozlišujeme instrumentaci, jíž je figurína vybavena a segmenty těla, na něž je aplikována. Zde budou uvedena měřicí zařízení, jež jsou při provádění nárazových testů využívána.

2.2.1 Akcelerometr

Akcelerometry patří mezi nejpoužívanější nástroje sloužící k měření dynamického zrychlení, jež je dáno změnou rychlosti pohybujícího se předmětu, jak ukazuje vztah 14. To je využíváno u mnoha biomechanických kritérií, která jsou na jeho hodnotách založena. Jednotkou zrychlení je $m \cdot s^{-2}$, ale v oblasti crashtestů je tato hodnota častěji vyjadřována prostřednictvím násobku jednotky gravitačního zrychlení g, jež odpovídá hodnotě 9,81 $m \cdot s^{-2}$. Akcelerometry mohou být jednoosé či víceosé, kdy v případě víceosých se principiálně skládají ze 2-3 jednoosých systémů natočených do příslušných směrů tvořící pravoúhlý systém. Mezi nejčastěji používané typy patří akcelerometry piezoelektrické, piezorezistivní, kapacitní či tepelné. [17] [18]

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ [g]} \tag{14}$$

kde F síla [N]
m hmotnost [m]
Δv rozdíl rychlostí [$m \cdot s^{-1}$]
Δt rozdíl časů [s]

2.2.2 Gyroskop

Gyroskop představuje zařízení, jehož úlohou je určení prostorové orientace nebo její změny vůči referenčnímu systému neboli osám *x, y* a *z.* Mezi nejrozšířenější patří gyroskopy elektronické, kdy za nejvýznamnější můžeme považovat MEMS gyroskopy (z anglického Micro-Electro-Mechanical Systems) založené na technologii mikro-součástek, které jsou využívány pro nárazové testy nebo i testy jízdní dynamiky. Jejich princip spočívá v měření Coriolisovy síly, jež působí na předměty pohybující se nenulovou rychlostí v rotující vztažné soustavě. Její velikost je úměrná úhlové rychlosti otáčení [$rad \cdot s^{-1}$], která odpovídá změně kapacity gyroskopu. [18]

$$F_C = -2m\omega v sin\theta \text{ [N]} \tag{15}$$

kde: m hmotnost objektu [kg]
ω velikost rychlosti rotující soustavy [$rad \cdot s^{-1}$]

v rychlost pohybu objektu [m·s^{-1}]

θ úhel sevřený mezi vektorem úhlové rychlosti a vektorem rychlosti [rad]

2.2.3 Tenzometr

Tenzometry rozumíme odporové senzory, jimiž je měřeno přetvoření neboli deformace, kterážto vzniká na povrchu pevných objektů vlivem zatížení. Ta je vyjádřena pomocí relativního prodloužení ε [–]. Základem této metody je aplikace Hookeova zákona platná v oblasti elastických deformací materiálu, jenž odpovídá vztahu 16. Ten lze přepsat do tvaru vyjádřeného rovnicí 17. [17] [18]

$$\sigma = E\varepsilon \ [\mathrm{Pa}] \tag{16}$$

kde: σ Normálové napětí [Pa]

E Youngův modul pružnosti [Pa]

$$\frac{F}{S} = E\frac{\Delta l}{l_o} \tag{17}$$

kde: F Působící síla [N]

S Obsah příčného průřezu [m^2]

Δl Relativní prodloužení [m]

l_o Počáteční délka tělesa [m]

Relativní prodloužení je stanoveno prostřednictvím relativní změny elektrického odporu tenzometru, jež vzniká důsledkem jeho deformace, neboť dojde-li v místě upevnění tenzometru ke změně délky z původní délky l na délku $l + \Delta l$, mění se tím i odpor tenzometru z R na $R + \Delta R$. Vztah 18 vyjadřuje základní tenzometrickou rovnici pro kovové tenzometry. [17] [18]

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \tag{18}$$

kde: ΔR Elektrický odpor tenzometru [Ω]

R Změna elektrického odporu tenzometru [Ω]

k Součinitel deformační citlivosti vyjadřující vlastnost tenzometru [–]

2.2.4 Siloměr

Tenzometry se rovněž využívají ke konstrukci siloměrů. Siloměry určené k záznamu dynamických sil, jež na tělo figuríny během nárazu působí, jsou rovněž hojně používány

v oblasti automobilových nárazových testů. Síla totiž vstupuje do výpočtu řady kritérií. Její jednotkou je newton [N]. Nejobvyklejší snímač síly je tenzometrický, využívající vhodně tvarovanou pružnou část polepenou tenzometry. Jiné typy sílu měřicích snímačů jsou založeny podobně jako piezoelektrické či piezorezistivní akcelerometry na změně elektrických veličin při působícím zatížení. [19]

2.2.5 Potenciometr

Potenciometry sloužící nejenom ke snímání natočení či vzdálenosti, ale i průhybu jsou v principu rezistory s proměnným nastavitelným odporem, jenž slouží k regulaci elektrického proudu nebo napětí. Změna velikosti odporu vzniká změnou délky odporové dráhy, jež je nastavitelná skrze pohyblivý jezdec, který je součástí zařízení. Odpor vodiče v závislosti na jeho délce a jiných jeho vlastnostech je definován rovnicí 19. Potenciometry jsou dostupné ve dvou základních provedeních. Jedním typem jsou potenciometry tahové, kdy jezdec se posunuje lineárním směrem po dráze a druhým jsou potenciometry otočné, kdy se jezdec pohybuje otáčivým směrem. [18] [19]

$$R = \rho \frac{l}{S} \ [\Omega] \tag{19}$$

kde: R Elektrický odpor vodiče [Ω]

ρ Měrný elektrický odpor vodiče [Ω·m]

l Délka odporové dráhy [m]

S Obsah příčného průřezu [m^2]

2.2.6 Pomocná senzorika

Prostřednictvím dalšího zařízení, a to konkrétně Hallova senzoru, měříme rychlost vycházející z rychlosti otáčení nápravy vozidla. Zde je uplatňován princip Hallova jevu, který vzniká při působení magnetického pole na objekt, jímž prochází elektrický proud, což je doprovázeno vznikem Hallova napětí. Výsledkem průběhu velikosti indukovaného napětí, jež je snímáno, je záznam frekvence změny Hallova napětí. Na základě znalosti velikosti ozubeného kola, jež je upevněno na hřídeli a neměnné vzdálenosti mezi zuby je stanovena rychlost otáčení. [18] [19]

Snímač průhybu známý pod zkratkou LVDT (Linear Variable Differential Transformer) slouží k měření průhybu (deformace) některých částí karoserie vozidla během nárazového testu. Princip jeho fungování spočívá v přeměně lineárního posunu na elektrické veličiny, konkrétně na elektrické napětí. [18]

3 Antropomorfní testovací zařízení

Antropomorfní testovací zařízení, běžně označovaná jako figuríny, jsou mechanickými náhradami člověka, které se v automobilovém průmyslu používají k hodnocení ochrany cestujících pomocí různých typů zádržných systémů při simulovaných kolizích nových konstrukcí vozidel. Jedná se o kalibrovaný zkušební přístroj používaný pro měření možnosti poranění člověka při dopravních nehodách. Úkolem takovýchto figurín je demonstrovat lidské tělo a simulovat jeho odezvy na uměle vytvořené nárazy. Součástí figurín je i měřicí technika určená k zaznamenávání zrychlení, sil, silových momentů nebo průhybů, z nich je následně stanoveno zatížení různých částí těla. Analýzy těchto měření se pak používají například k posouzení účinnosti návrhů zádržných systémů, a proto můžeme říci, že primárním cílem vývoje takovéhoto zařízení je zlepšení stavu bezpečnosti v dopravě, především za pomoci inovativního vývoje dopravních prostředků a bezpečnostních zařízení – dětských autosedaček, bezpečnostních pásů aj. [20] [21]

Současné figuríny byly navrženy tak, aby byly biofidelické. To znamená, že by měly napodobovat příslušné lidské fyzikální vlastnosti, jakými jsou velikost, tvar, hmotnost, tuhost nebo absorpce a rozptyl energie. S tím souvisí i to, že jejich mechanické reakce by měly simulovat odpovídající lidské reakce vyjádřené trajektorií, rychlostí, zrychlením a deformací. Avšak vzhledem k tomu, že figurína pro nárazový test musí být použita mnohokrát, musí být opakovatelná a nerozbitná, vede k rozporu s lidskou bytostí. To, že dokonce ani nové figuríny jako WorldSID nebo THOR nejsou tak biofidelické jako lidské modely je dáno tím, že u nich nikdy nenalezneme aktivní a napjaté svaly před nárazem, nebo se nesetkáme s tím, aby například vytvořily výhybné manévry. Všechny figuríny se stále potýkají s problémem a to tím, že jsou takzvaně jednoosé. Jejich omezená biofedelita má za následek to, že jsou v podstatě směrové, což znamená, že konkrétní figurínu pro nárazové testy lze použít pouze v jednom typu nárazu. [20] [22]

Tempo zlepšování figurín je poměrně pomalé a přijetí nové figuríny je velmi dlouhý a obtížný proces. Většina vývoje vylepšuje stávající figuríny především na základě přidání možností měření, zejména sledování a předpovídání dalších typů zranění. Americká společnost Humanetics Innovative Solutions je v současné době předním výrobcem testovacích figurín dodávající své produkty do celého světa, která vznikla v roce 2010 spojením firem Denton ATD a First Technology Safety Systems (FTSS). Na komplementaci zařízení pak Humanetics spolupracuje spolu s firmou Kistler – Measurement Systems and Sensors, která osazuje jednotlivé figuríny měřicí technikou. [22] [23]

3.1 Historie testovacích figurín

V této práci nebude sledována evoluce figurín uplatňujících se v oblasti testování vzdušného a kosmického prostoru, jejíž využití je aplikováno například na testování vojenských padáků, katapultovacích sedadel nebo protiopatření vůči balistickým střelám. Uveden zde bude pouze vývoj figurín specializujících se na testování bezpečnosti v oblasti silniční dopravy.

První figurína pro nárazové zkoušky, používaná do 60. let 20. století, byla Sierra Sam vytvořená v roce 1949. Tato nárazová figurína 95percentilního muže byla vyvinuta společností Sierra Engineering (SE) na základě žádosti vzdušných sil Spojených států amerických – United States Air Force (USAF) o vytvoření figuríny pro hodnocení katapultovacích sedadel letadel při testech na raketových saních. Během roku 1952 došlo k vytvoření další 95percentilní figuríny muže s názvem Mark I Samem Aldersonem a společností Alderson Research Laboratories (ARL). To odstartovalo éru masivního používání a obchodování s figurínami. [23] [24]

Během 60. let vědci z General Motors (GM) vytvořili figurínu Hybrid I sloučením nejlepších vlastností ze třech různých dostupných figurín. Jednalo se o figuríny GARD (1960) výrobce ARL, Sierra 292 (1965) společnosti SE a figurínu VIP-50A (1966) z angl. Very Important People rovněž od výrobce ARL. Prvotní figuríny určené pro nárazové zkoušky byly jen velmi hrubě navrženy a měly jednoduchý účel – pomáhat technikům a výzkumným pracovníkům ověřovat účinnost zádržných systémů nebo bezpečnostních pásů. Figurína VIP-50A vyrobená pro GM a Ford byla vůbec první figurínou vyrobenou speciálně pro automobilový průmysl. O rok později v roce 1967 představila společnost SE soutěžní model – muže 50. percentilu Sierra Stan. To bylo impulsem pro inženýry z GM, kteří vytvořili vlastní figurínu kombinací vybraných vlastností výše zmíněných figurín, což dalo modelu název Hybrid. Ten byl zaveden v roce 1971, ve stejném roce jako byly standardizovány figuríny 50percentilního muže společnosti ALR a SE. Předtím, než byl v roce 1968 vyvinut Hybrid I, neměli výrobci figurín žádné pevné metody pro výrobu zařízení. Hybrid I byl odolnější a produkoval více opakovatelných výsledků než jeho předchůdci. Mimo to v roce 1970 vyrobila SE svou první dětskou figurínu pro testování čelního a bočního nárazu. SE se rovněž podařilo vytvořit Sierra Susie – 5percentilní figurínu ženy, jež byla plně oblečená, s realistických detaily tváře, které zahrnovaly například make-up nebo paruku. Ta se stala jednou z posledních figurín vyrobených designéry právě z SE. Posledním produktem tohoto roku byla figurína TNO-10 Nizozemské organizace pro aplikovaný vědecký výzkum (TNO), jež byla vytvořena pro vyhodnocení bezpečnostních pásů. Tato figurína neměla žádné obličejové rysy ani předloktí a nápadná byla hlavně skrze dolní končetinu tvořenou od kolene směrem dolů pouze jednou nohou. [23] [24] [25]

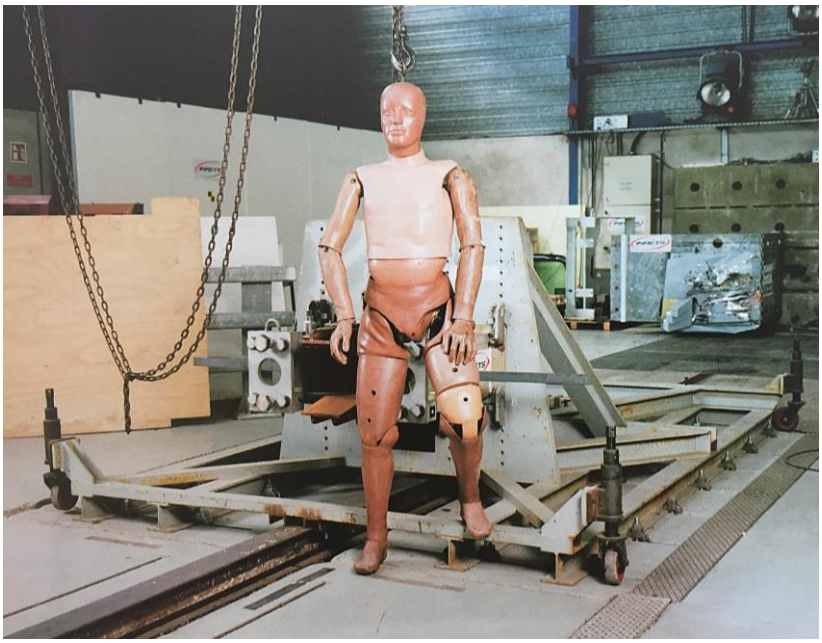
Vyvinutím Hybrid I práce neskončily. Na základě vládních nařízení, která si vyžádala modernizaci figurín, GM vylepšila figurínu Hybrid I a nově vyvinutá figurína GM Hybrid II pro nárazové zkoušky se v roce 1973 se stala novým standardem pro čelní nárazové testování trvajícím až do roku 1997. Ta obsahovala vylepšená ramena, páteř a kolena a nabízela lepší dokumentaci než Hybrid I. Z Obrázků 9 a 10 si můžeme všimnout, že figurína Hybrid II měla dokonce oproti později navržené figuríně Hybrid III realističtější rysy v obličeji. V roce 1972, kdy GM sdílel figurínu Hybrid II s průmyslem, začal pro experty z výzkumu GM nový úkol, a to vyvinout figurínu, která by přesněji odrážela biomechaniku lidského těla při nárazu vozidla, jež by měla nést název Hybrid III. Při té příležitosti GM prováděla testy, které výrazně překračovaly vládní požadavky a normy jiných domácích výrobců s cílem vyvinout figurínu třetí generace, podobnou člověku, jejíž odezvy na náraz by se více blížily biomechanickým datům než u figuríny Hybrid II. To vedlo k experimentům s používanými materiály a úvahám o přidání vnitřních prvků, kdy studie se zaměřila například i na způsob držení těla řidičů a cestujících ve vozidlech. [23] [24] [25]

Obrázek 9 - Hybrid II [26]

Obrázek 10 - Hybrid III [26]

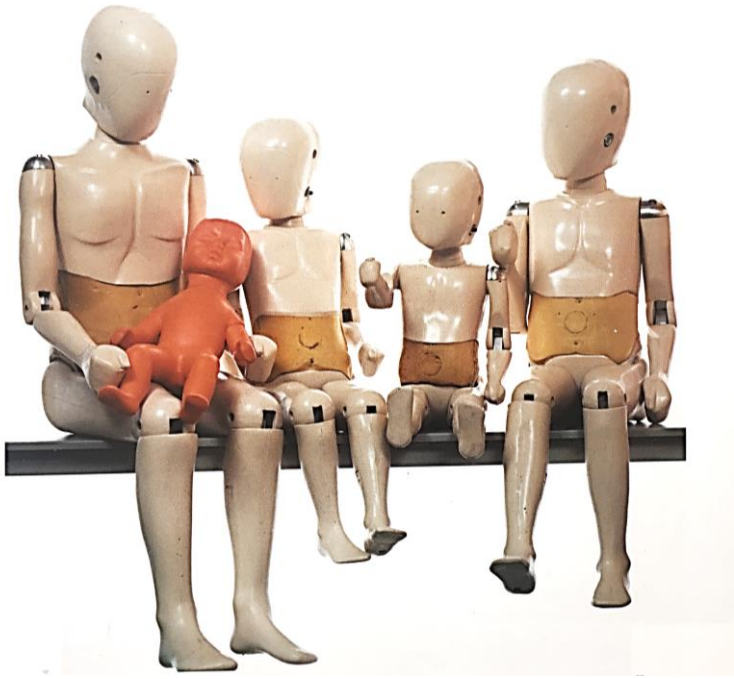
Pouze rok po zahájení výzkumu Hybrid III reagovala GM novou figurínou. V roce 1973 vytvořila figurínu GM-ATD 502 s vylepšenou hlavou, krkem a žebry spolu s lepšími charakteristikami kloubů. Téhož roku došlo prostřednictvím ARL k vyvinutí 5percentilní ženy Hybrid. Dále byla také představena figurína CAMI reprezentující 18měsíční dítě pro účely hodnocení dětských zádržných systémů vyrobená Civil Aeronautical Medical Institute (CAMI) – odkud vznikl název figuríny. Práce na vylepšení figuríny 502 začaly téměř okamžitě. Nový krk, levnější konstrukce a jinak stejný výkon při testech, jaký byl zaznamenán u GM-ATD 502, vedl k vytvoření nové série Hybrid III. Jako první byl vytvořen muž 50. percentilu Hybrid III, který byl dokončen v roce 1974 a připraven k výrobě o tři roky později – v roce 1976. Nicméně v roce 1974 GM rozpustila

skupinu věnující se návrhu figurín poté, co byl prototyp dokončen. Téhož roku vznikl model chodce založený na figuríně Hybrid II určený k simulaci střetu vozidla s chodcem, jenž byl zhotoven firmou Humanoid Systems. Ten obsahoval některé pozměněné díly, kdy například trubky dolních končetin byly vyměnitelné, aby se náklady na opravu po zkoušce minimalizovaly na co nejméně. Kolena byla zjednodušena tak, aby umožnila fixaci kloubu v plně protažené pozici nohy. Kotníky měly přidaný třetí čep, který umožňoval stabilitu figuríny i ve stoje. Pánev byla přepracována přidáním oddělených hýždí, aby bylo možné nohy uvést do stojící polohy a bederní část tak, aby umožňovala vzpřímené držení těla. To vše celkově umožnilo, aby figurína samostatně stála s 80 % své hmotnosti na jedné noze, což byl požadavek zákazníka. Tato figurína je vyobrazena na Obrázku 11. [23] [24] [27]



Obrázek 11 - Figurína chodce Hybrid II čekající na crashtest [23]

Roku 1975 byla společností Humanetics vytvořena figurína 6letého dítěte pro vyhodnocení zádržných systému vůči malým pasažérům. Za podobným účelem vyvinula i CAMI novou figurínu 6měsíčního dítěte, která měla hodnotit dětské zádržné systémy. Figuríny byly tvořeny ocelovými a hliníkovými bloky, jež byly připevněny ke kožené kostře zabalené do vrstev pěnového polstrování a vrchní vrstvy z prošívané látky. Výroba figurín CAMI ovšem později přešla pod vedení Humanetics, která v roce 1977 představila další figurínu dítěte, a to konkrétně tříletou. Paralelní vývoj dětských figurín v Evropě znamenal o dva roky později – v roce 1979 vyvinutí série dětských figurín s označením P (Obrázek 12), na jejichž vzniku se podílela nizozemská společnost TNO ve spolupráci s United Nations child experts. Ty byly určeny pro testování dětských zádržných systémů v Evropě a těžily z dříve vyrobeného modelu dětské figuríny Pinocchio. Zaplnily tak zásadní mezeru na trhu a staly se předchůdci dnešních dětských figurín řady Q. [23] [28]



Obrázek 12 - Dětské figuríny řady P [23]

Rok 1979 přináší hned první tři figuríny určené pro boční nárazové testy. Ve spolupráci NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) a University of Michigan Transport Research Institute (UMTRI) byla vyvinuta figurína SID z anglického Side Impact Dummy, jež měla testovat účinky nárazu na boční stanu vozidel. Rovněž spolupráce francouzských automobilek Peugeot a Renault přináší novou figurínu s názvem APROD neboli Association Peugeot/Renault Omni-directional Dummy. Poslední vytvořenou je figurína ONSER. [23]

Začátek 80. let, a to konkrétně rok 1980, s sebou nese vytvoření 3leté figuríny GM03XA vyvinuté GM a Humanetics. Smyslem jejího vývoje bylo řešit obavy z interakce dětí s airbagy. Ve stejném roce přidává evropská společnost TNO do své řady P figuríny P3, P6 a P10, kdy jednotlivá čísla určují stáří dítěte v letech. V roce 1984 TNO vyvíjí další figurínu, jíž je EuroSID, s cílem vyhovět novým požadavkům automobilového průmyslu pro boční nárazy. Tato figurína byla první verzí použitou v předpisech EHK/OSN č. 95 a série EuroSID jako taková se stala vůbec první ze sérií, jejíž výroba probíhá dodnes. Roku 1986 je Hybrid III poprvé ustanoven v nařízení americké vlády. Anglická společnost First Securities (s pozdějším názvem First Technology PLC) v roce 1987 kupuje originální společnost Humanetics, přičemž zájem o vytváření produktů zlepšujících bezpečnost přetrvává. Toho roku GM nově představuje 5percentilní ženu a 95percentilního muže řady Hybrid III. First Securities nyní už s názvem First Technology PLC skupuje v roce 1988 i ARL a slučuje ji spolu s Humanetics, kdy dochází opět k jejímu přejmenování, a to na First Technology Safety Systems (FTSS). Roku 1988 vyvíjí FTSS spolu s GM a Society of Automotive Engineers (SAE) novou figurínu, a to BIOSID. O rok později zdokonaluje TNO figurínu EuroSID z roku 1984 vytvořením EuroSID 1. [23] [29]

Počátky 90. let se nesou především ve znamení dětských figurín. Roku 1990 přichází NHTSA a FTSS s novou figurínou CAMI 0 (Obrázek 13) představující novorozeně určené k testování zádržných systémů pro kojence. Jedná se o vůbec nejmenší typ figuríny, který byl kdy vytvořen, ovšem tato figurína jako jediná nedisponuje žádným měřicím zařízením. O dva roky později – v roce 1992 zavádí FTSS 6měsíční figurínu CRABI, jejíž název pochází ze zkratky Child Restraint/Air Bag Interaction a 3letou figurínu řady Hybrid III. V příštích dvou letech jsou představeny ještě 12měsíční a 18měsíční figuríny CRABI a k nim v roce 1993 přibývá navíc 6letá figurína Hybrid III. FTSS navíc přichází s maketou hlavy neboli impaktorem určeným pro testování interiéru vozu. [23]

Obrázek 13 - Figurína novorozeně CAMI 0 [30]

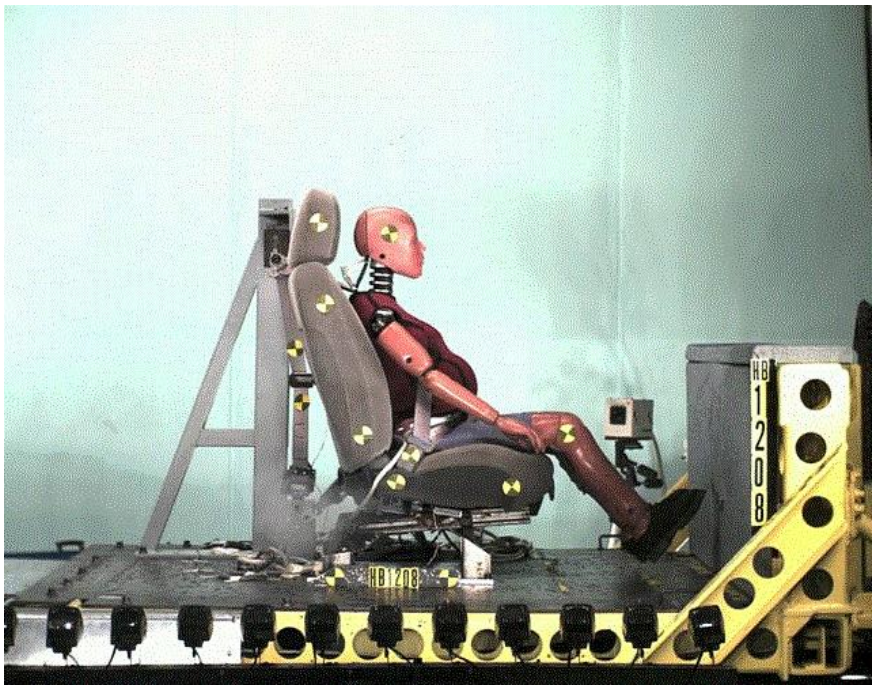
Rok 1994 s sebou nese počátky prací na vytvoření figuríny THOR-Alpha pocházející ze zkratky Test device for Human Occupant Restraint. NHTSA spolupracuje spolu se společností Gesac na vytvoření figuríny, která bude zahrnovat poznatky z posledních 40 let vývoje antropomorfních testovacích zařízení. Mezitím je o 7 let později představena další verze THOR, na jejíž vývoji spolupracovala FTSS s NHTSA a European Economic Community (EEC). V roce 1995 vyvíjí OSRP (Occupant Safety Research Partnership) a FTSS figurínu SID IIs – boční nárazovou figurínu. Chalmers University ve švédském Gothenbergu dokončuje v roce 1997 svůj prototyp figuríny BIORID, určené k vyhodnocení pohybu těla při nárazu zezadu. Jedná se o vůbec první figurínu tohoto typu. Vyznačuje se páteří s oddělenými jinak provázanými obratli odpovídající lidské kostře. Ve stejném roce vychází první model dětské figuríny z řady Q – 3letá dětská figurína Q3 společnosti FTSS. Vyvinuta je také 50percentilní figurína muže WorldSID pod záštitou organizace ISO za spolupráce několika světových firem ve snaze docílit globálních standardů v testování bočních nárazů. Její první prototyp byl pak

sestaven v roce 2000, který je vidět na Obrázku 14. V neposlední řadě je představena 10letá figurína Hybrid III z výroby FTSS a Applied Safety Technologies Corporation (ASTC). Roku 1998 TNO modernizuje svou dříve vytvořenou figurínu a vyvíjí boční nárazovou figurínu ES-2, jež je založena na principu EuroSID 1 uvedené na trh v roce 1989. S tím probíhá i její nové ustanovení v předpisech EHK/OSN pro boční nárazy. V témže roce vytváří japonská automobilka Honda sérii figurín simulující chodce nesoucí název POLAR I založených na modelu Hybrid III. Ty byly vytvořeny za účelem zvýšení bezpečnosti chodců jakožto účastníků dopravních nehod a snížení následných zranění v důsledku kolize s automobily. Část nizozemské společnosti TNO a anglické společnosti Ogle přechází pod vedení FTSS v roce 1999. FTSS představuje systém FAST CRASH vytvořený pro figurínu World SID. Ten poskytuje palubní systém sběru dat DAS (Data acquisition systems), který eliminuje potřebu externí kabeláže během crashtestů. [23] [29] [31]

Obrázek 14 - Figurína 50percentilního muže WorldSID [23]

Na začátku nového tisíciletí je firma ASTC koupena Robertem A. Dentonem a společnost je přejmenována na Denton ATD. Dále je vyvinut nový typ figuríny pro zadní nárazy – konkrétně RID 2 a společnost FTSS představuje figurínu chodce Flex-PLI (Flexible Pedestrian Legform Impactor) simulující maketu dolní končetiny. RID 2 je založen na figuríně typu THOR mající krk umožňující pohyb hlavy v předklonu s následnou rotací, vyplývající ze zkoumání skutečného průběhu nárazu zezadu za použití vysokorychlostního snímkování. Tento typ figuríny spolu s jeho později vyvinutými nástupci může být zasažen buď zepředu nebo zezadu, a to dokonce i mimo osu s odchylkou do přibližně 30°, kdy tak mimo jiné udává i reakce na zatížení čelním nárazem. Další figurína chodce přichází i od Hondy, a to POLAR II – opět založená na Hybridu III, jejíž výrobu později převzala FTSS. Rok 2001 přináší novinku na trhu – figurínu těhotné ženy MAMA2B vyobrazené na Obrázku 15, o jejíž návrh se postarala FTSS

ve spolupráci s UMTRI. Tento model byl založen na verzi 5percentilní ženy Hybrid III. Chalmers University vyvíjí v roce 2002 novou figurínu pro testování zadních nárazů BioRID IIc. Ta je později vyráběna společností Denton ATD. Tentýž rok dochází k vývoji figuríny pro boční nárazy SID-H3. NHTSA ji vyvinula na základě figuríny DOT-SID z roku 1987, kdy originální hlava a krk figuríny Hybrid II byly nahrazeny Hybridem III za účelem zlepšení biofidelity u bočních nárazů. S rokem 2003 přichází 6letá figurína dítěte Hybrid III s přidanou hmotností. [23] [31]



Obrázek 15 - Figurína 5percentilní těhotné ženy MAMA2B [32]

Rozmanitost figurín a jejich použití pokračovalo během 21. století v růstu. FTSS zavedla v roce 2004 nový systém sběru dat – iCrash DAS, který byl flexibilnější než dřívější FAST CRASH a umožňoval spolupráci s více druhy figurín. Zjednodušil také celý proces přípravy figurín před testy, když eliminoval veškeré kabely pro externí sběr dat používaných do té doby. Roku 2004 představila FTSS ve spolupráci s European Research programs CREST1 a CHILD2 novou řadu figurín Q zobrazených na Obrázku 16. Ta se stala nástupcem řady P pro testování dětských zádržných systémů. Nabídla vyšší odolnost, lepší možnosti měření a umožnila navíc testování těchto figurín i při nárazech z boku. Bylo vyrobeno pět věkových kategorií – novorozeně, 12měsíční, 18měsíční, 3leté a 6leté dítě. Jedná se o řadu, jež vyrábí Humanetics do současné doby. [23] [29]

Obrázek 16 - Řada dětských figurín typu Q [28]

S rokem 2005 nabízí FTSS nové variace již vzniklých figurín. Jimi jsou RID 3 a THOR-NT a 5percentilní WorldSID, kdy THOR a WorldSID byly navrženy ve spolupráci s EEC. O rok později NHTSA představuje třetí verzi EuroSID, a to figurínu ES-2re (od slov Rib Extension) založenou na starším modelu ES-2. První prototyp 5percentilní ženy THOR se objevuje v roce 2007, kterýžto vzniká za spolupráce NHTSA a Gesac. Její podoba je patrná z Obrázku 17. Téhož roku FTSS představuje figurínu Q3s. Následující rok navíc přidává ještě figurínu Q6s a v roce 2009 doplňuje řadu o 10letou figurínu Q10. S rokem 2008 přichází Honda s třetí generací figuríny chodce POLAR III nyní už založenou na bázi figuríny THOR. Ta přechází později pod výrobu vedenou Humanetics. V roce 2010 je představen prototyp figuríny ženy, jež by byla určena pro testování zadních nárazů – EvaRID. Na jejím vývoji se podílelo konsorcium zahrnující Chalmers University ve Švédsku a Humanetics v Evropě. Rok 2011 přináší další výsledek spolupráce tohoto uskupení – vývoj figuríny 50percentilní ženy BioRID50F jako část projektu Evropské unie s názvem ADSEAT. Další z řady THOR je v roce 2012 vyvinuta mužská figurína THOR-M, na jejímž zrození se Humanetics podílelo spolu s NHTSA. Tento model můžeme vidět na Obrázku 18. [23]

Obrázek 17 - 5percentilní žena THOR [26]

Obrázek 18 - 50percentilní muž THOR [26]

Jestliže od 50. let 20. století prošly figuríny takovýmto vývojem, nabízí se otázka, co můžeme očekávat v dalších 60 nebo 70 letech. Za posledních téměř 40 let došlo vzhledem k počátkům vývoje figurín ke zvýšení počtu řidiček na silnicích, nicméně předpisy ohledně standardizace ženské 5percentilní figuríny Hybrid III se ve Spojených státech amerických, které jsou považovány za kolébku testovacích figurín, objevily až v roce 1999 (do té doby byla používána figurína VIP 5 z roku 1966). V dnešní době jsou vedeny diskuze ohledně percentilu představujícího výšku a váhu průměrného člověka, jelikož hodnoty, ze kterých se vychází, pocházející z měření průměrného amerického občana a jsou více jak 50 let staré a průměrná výška a váha člověka se od té doby změnila, respektive stoupla. Takovýto detail pak může ovlivnit výsledky měření, neboť síly působící na posádku se mohou dramaticky změnit. Zvyšující se počet starších řidičů s sebou nese novou potřebu testování. Účinek nárazových sil a schopnost bezpečnostních pásů ochránit řidiče této věkové kategorie nicméně zatím nebyl zkoumán. Rozmach osteoporózy vyskytující se u starších žen může mít za následek zranění, která v předchozích testováních nemusela být brána v potaz. Design figurín by proto v budoucnu mohl představit změny, jež by odpovídaly na tyto aktuální otázky. [23]

3.2 Dělení testovacích figurín

Figuríny se rozdělují podle velikosti, věku, pohlaví a směru nárazu. Existují dospělé mužské a ženské figuríny různých velikostí a dětské figuríny, které představují děti různých věkových kategorií. Tyto figuríny se pak používají k posouzení ochrany cestujících při simulaci kolize čelního, bočního a zadního nárazu či převrácení. Středně velká dospělá mužská figurína patří mezi nejpoužívanější velikost při testování automobilových zádržných systémů. Svou velikostí a váhou se přibližuje střední výšce a hmotnosti dospělého muže 50. percentilu. Výška

a hmotnost figurín představujících malé ženy a velké muže jsou přibližně stejné jako 5percentilní ženy a 95percentilního muže. U dospělých figurín se setkáme s označeními jako jsou malý muž, středně velký a velký muž, a to z toho důvodu, aby nedocházelo k diskuzím o tom, zda jsou rozměry v souladu s nejnovějšími publikovanými percentilními klasifikacemi. Dětské figuríny představují průměrné výšky a hmotnosti dětí konkrétních věkových skupin bez ohledu na pohlaví. Jejich název pak nese označení podle věku dítěte, které simulují. [20]

Figuríny dělíme dle typu nárazu, na který byly vytvořeny: [21]

- Figuríny pro čelní náraz
- Figuríny pro boční náraz
- Figuríny pro zadní náraz

Dále pak rozdělujeme figuríny na speciální kategorie: [21]

- Děti
- Chodci
- Figuríny pro letecký průmysl

3.2.1 Čelní nárazové figuríny

Nárazové figuríny určené pro testování čelního nárazu byly vyvinuty především za účelem testování bezpečnostních pásů a předních airbagů jako prevence poranění vznikajících buďto tím, že cestující při nárazu vypadli z vozidla nebo tím, že narazili do něčeho uvnitř vozila při tom, co klouzali směrem kupředu vlivem setrvačnosti. To naznačovalo skutečnost, že část odpovědnosti za smrt a zranění na silnicích způsobovaly krom jednání řidiče také vlastnosti vozidla. Díky tomuto druhu testu bylo zjištěno, že upoutáním lidí k sedadlům by se zabránilo sekundárnímu nárazu lidí do předmětů interiéru vozidla (přičemž primárním nárazem je myšlena srážka s nějakým objektem) a tím i poranění hlavy, hrudníku v důsledku stlačení žeber nebo poranění nohou – nejčastěji zlomení stehenní kosti či vykloubení kyčle. [26]

3.2.2 Boční nárazové figuríny

Úspěch v ochraně před čelními nárazy vedl k touze chránit posádku i při bočním nárazu, neboť při tomto ději netvoří bezpečnostní pásy a čelní airbagy dominantní ochranu. Proto byla vyvinuta zařízení jako boční airbagy a současně došlo k vyztužení bočních dveří vozidla pro dosažení lepší ochrany posádky v oblasti hlavy a horní části těla, kdy mezi nejčastější zranění se řadila poranění hlavy, krku a hrudníku v důsledku náhlého působícího zrychlení a kontaktu s bortícím se interiérem vozidla. [29]

Je možné, že v budoucnu bude vyvinuta figurína kombinující rysy figurín jak čelního, tak bočního nárazu. Vznikla by tak možnost testování šikmých nárazů kombinujících právě čelní a boční náraz. Tento úkol zatím nebyl zahájen kvůli potížím, které jsou shledávány zejména v tom, aby tento typ figurín byl opakovatelný a spolehlivý. [29]

3.2.3 Zadní nárazové figuríny

Tyto figuríny vyvinuté pro nárazové testy znamenají rozšíření škály možností – testování, byť i poměrně malých rychlostí nárazů na zadní stranu vozidla, kdy na první pohled se nejedná o nikterak vážný střet, ale může zde docházet i k poměrně vážným zraněním krku, zejména poranění měkkých tkání, jež vznikají v důsledku prudkého trhnutí hlavou. Tyto testy bývají používány pro zjištění účinnosti opěrek hlavy u sedadel, a totiž jejich snaze zabránit nadměrnému pohybu hlavy a krku. [31]

3.2.4 Děti

Dětské figuríny byly součástí původního vývoje crash test dummies. Cílem této skupiny figurín je zajistit účinnou ochranu proti nárazu i pro ty nejmenší. Tato skupina figurín přispěla k vývoji dětských zádržných systémů ve vozidlech jako dětských nosičů, sedaček a podsedáků, jež jsou testovány takovým způsobem, aby zajistily zadržení dítěte v sedačce a navíc, aby ho nikterak nezranily. [28]

Vývoj těchto figurín se navíc zasloužil o odbourání zlozvyku držet dítě na klíně, popřípadě v náručí, což je bráno jako velice nebezpečné, neboť při nárazu je v důsledku setrvačnosti hmotnost dítěte přibližně stejná jako její desetinásobek (někdy až dvacetinásobek), a je tak zřejmé, že udržet dítě v takovéto situaci je zcela nemožné a neexistuje nic, co by zabránilo tomu, aby se dítě neudeřilo o některou část z interiéru vozidla anebo aby nebylo vymrštěno na silnici a neutrpělo vážné či dokonce smrtelné zranění. V neposlední řadě tato skupina rovněž přispěla k vývoji inteligentních airbagů, které řídí jejich odezvu tak, aby nedošlo k zranění lehčích cestujících. [28]

Některé dětské figuríny byly navíc upraveny tak, aby našly využití i při bočním nárazu nebo v podobě figuríny simulující srážku dětského chodce s automobilem, čímž se tak zasadily o své více-směrové využití. [28]

3.2.5 Chodci

Testovací figuríny chodců, vyvinuty na žádost nezávislých zkušebních laboratoří, zásadně ovlivnily vývoj dnešních moderních motorových vozidel. Testy s těmito figurínami pomohly k určení čelního tvaru vozidla tak, aby negativní účinky nárazu mezi vozidlem a chodcem byly

zmírněny na co nejmenší a aby se tak předešlo následnému zranění nebo smrti chodce například v důsledku zranění způsobených tuhými dekoracemi na kapotě. Mezi nejčastější poranění pak patří zlomeniny nohou vzniklé nárazem do nárazníku a poškození hrudníku nebo poranění hlavy zapříčiněná nárazem na kapotu a čelní sklo. Návrhy na přestavbu přídě vozu vedly nejenom k nízkému sklonu kapoty ale zároveň i čelního skla, což se projevilo nejen na zvýšení bezpečnosti chodce při srážce s automobilem, ale i na vyšším výkonu vozidel. [27]

4 Výroba testovacího zařízení

Cílem praktické části popisované v této kapitole bylo znovuodlití antropomorfního testovacího zařízení – dětské figuríny řady P – P6 Dummy, jelikož originální hmota, jíž byla figurína původně tvořena, se zhruba po deseti letech roztekla a kostru bylo třeba nově potáhnout. Z důvodu finanční úspory, jelikož pořizovací cena figuríny se pohybuje v řádech několika milionů korun, bylo rozhodnuto pro obnovení hmoty imitující svalovou tkáň z běžně dostupného materiálu.

4.1 Materiály vhodné k výrobě

Při výrobě vlastní figuríny nebylo potřeba řešit otázku materiálu, vhodného na výrobu opěrného systému. Kostru nově vyvíjené figuríny tvořila originální kostra testovací figuríny dítěte řady P-Series – P6 Child Dummy vyrobená společností Humanetics Innovative Solutions. Z toho důvodu se následující kapitola zabývá pouze materiály, jež by mohly být vhodné pro náhradu měkké tkáně reprezentující svalstvo.

Mezi materiály, jež jsou doporučeny k výrobě hmoty odpovídající přibližně svalstvu lidského těla z hlediska biofidelity, se řadí balistická želatina, agar, silikonový polymer Lukopren N nebo polymerní materiály. Pojmem biofidelita, jež bývá hodnocena u testovacího zařízení, rozumíme schopnost podobat se chování lidského těla. Ta závisí na účelu analýzy výzkumu takovým způsobem, že pro jeden výzkum může být přijatelná, nicméně pro všeobecné použití ve vývojové a certifikační práci nikoliv. Je známo, že svalová tkáň je zcela unikátní, a proto těžko budeme hledat materiál, který bude zcela odpovídat jejím fyzikálním a materiálovým vlastnostem. Můžeme se však pokusit k jejich hodnotám přiblížit. [15] [33]

4.1.1 Stanovení mechanických vlastností svalu

Charakteristiky tvrdých tkání jsou v literaturách popsány dobře, nicméně u měkkých tkání tomu tak není. Neexistuje tedy jedna přesná hodnota charakterizující danou vlastnost. Výsledky se mohou lišit i v několika řádech v závislosti na použitém vzorku, s nímž je experimentální měření provedeno. Vybrané vlastnosti kosterního svalu savce a jejich typické či maximální hodnoty uvádí Tabulka 5. [34]

Tabulka 5 - Vlastnosti kosterního svalu savce [34]

Vlastnost	Typická hodnota	Maximální hodnota
Deformace [%]	20	>40
Napětí [MPa]	0,1 (udržitelné)	0,35
Hustota práce [kJ·m^{-3}]	8	-
Hustota [kg·m^{-3}]	1037	-
Rychlost deformace [%·s^{-1}]	-	500
Poměr výkonu ku hmotnosti [W· kg^{-1}]	50	200
Účinnost [%]	-	40
Životnost cyklu	-	10^9
Youngův modul pružnosti [MPa]	10-60	-

Úvod této kapitoly proto bude věnován představení některých testů, jež byly publikovány v odborných článcích a periodikách, v nichž dochází ke stanovení parametrů lidského svalu.

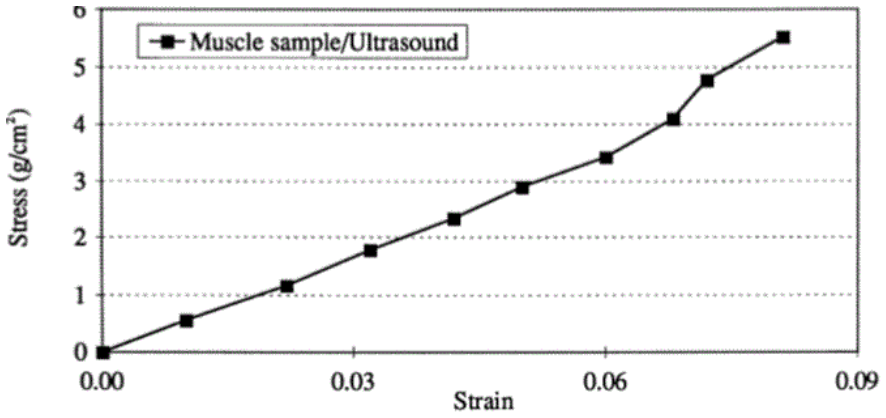
Cílem prvního popisovaného experimentu s názvem Young's Modulus Measurements of Soft Tissues with Application to Elasticity Imaging bylo měření Youngova modulu pružnosti (E) svalu, a to pomocí dvou metod – pomocí ultrazvukové metody a použitím siloměru Instron Load Cell |Device 1122 při pokojové teplotě 22 °C. Pro měření byly v obou případech použity tři vzorky hovězího svalu o délce 4 cm, šířce 4 cm a tloušťce 1-2 cm. Protože orientace svalových vláken může silně ovlivnit měření elasticity, byly vybrány vzorky jejichž vlákna byla šikmo orientována. Pokud je měření uskutečněno na vzorkách, jež mají vlákna orientována kolmo ke směru komprese, je zaznamenán vyšší odpor jak svalové, tak pojivé tkáně, zatímco svalová vlákna orientovaná ve směru komprese odpor snižují. Jelikož vzorky měly šikmou orientaci, měly naměřené hodnoty Youngova modulu pružnosti spadat mezi tyto dva extrémní případy. [35]

Měření elasticity pomocí ultrazvuku bylo prováděno jednoosým axiálním stlačením, kdy jednotlivé komprese byly prováděny snímačem o průměru 3,18 cm v krocích po 0,5 mm, dokud nebylo dosaženo celkové deformace přibližně 7 %. Rychlost stlačení se pohybovala okolo 1 cm·s^{-1}. [35]

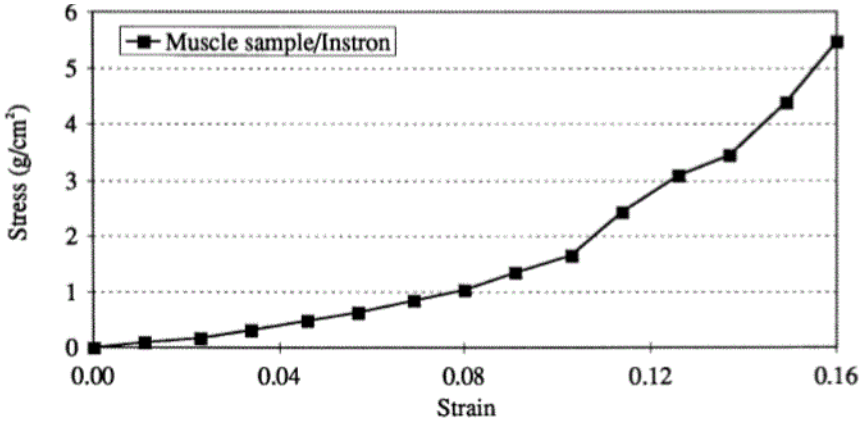
V druhém případě byly pomocí univerzálního zkušebního přístroje Instron vzorky axiálně stlačovány kruhovou křížovou děrovací hlavou o průměru 5,7 cm rychlostí 5 cm·min^{-1} do té doby, než razník dosáhl deformace odpovídající přibližně 15 % celkové tloušťky vzorku. [35]

Z důvodu odlišného průměru razidla použitého u těchto metod bylo nutné u ultrazvukové metody provést numerickou analýzu, která zohlední menší velikost a určí korelační faktor, jež bude ke stanovení výsledných hodnot použit. [35]

Chování materiálu bylo u obou metod popsáno pomocí křivek udávající závislost napětí na deformaci, jak můžeme vidět z Obrázků 19 a 20. Jejich exponenciální tvar je charakteristický pro mnoho materiálů včetně měkkých tkání. Počáteční lineární elastická oblast křivek napětí-deformace tkáně byla pozorována u kmenů do 5% deformace. Pro tkáňové kmeny s hodnotou deformace vyšší než 10% vstupuje deformace do nelineární elastické oblasti. S rostoucím zatížením exponenciální chování křivky napětí-deformace naznačuje účinek zpevnění kmene. Pokud je vzorek stlačen dále a projde elastickou mezí vzorku, tedy nejvyšším možným aplikovaným napětím, po kterém už se materiál nebude chovat elasticky, vstoupí do plastické oblasti křivky, kdy už se vzorek nevrátí do původního tvaru ani po odstranění zátěže. Krom měření Youngova modulu pružnosti byla prokázána shoda mezi těmito dvěma metodami. [35] [36]



Obrázek 19 - Měření Youngova modulu pružnosti metodou ultrazvuku [35]



Obrázek 20 - Měření Youngova modulu pružnosti přístrojem Instron 1122 [35]

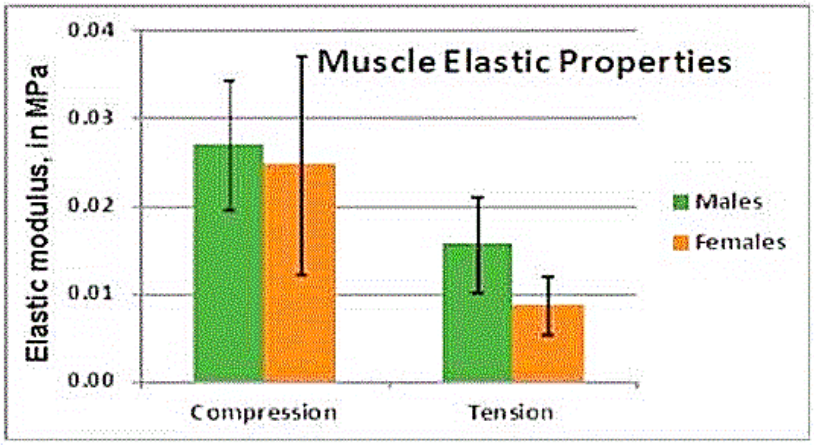
Youngův modul pružnosti byl vypočten ze závislosti napětí na deformaci, a to konkrétně ze sklonu této křivky v její lineární oblasti. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 6. Průměrná hodnota Youngova modulu pružnosti vzorků svalu měřená metodou ultrazvuku činí 2,12 $\pm$ 0,91 kPa a pomocí přístroje Instron 1,53 $\pm$ 0,31 kPa s průměrnou relativní chybou 35%. Otázkou ovšem je, v jakém stavu je sval měřen, tím se výsledky mohou lišit v několika řádech.

K rozdílům v hodnotách Youngova modulu pružnosti může přispět nelineární chování vzorků tkání. Skutečné meze oblastí křivek lineárního napětí a deformace mohou být také ovlivněny geometrií měření a velikostí vzorku. [35]

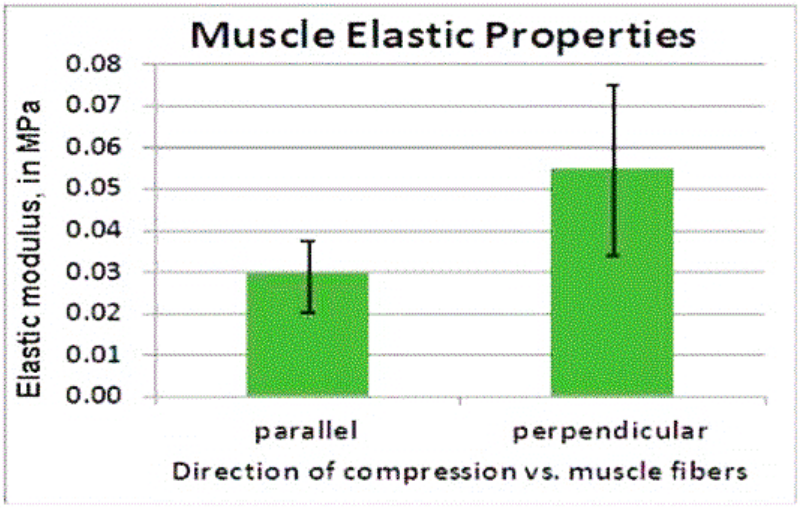
Tabulka 6 - Hodnoty Youngova modulu pružnosti svalu měřené metodou ultrazvuku a přístrojem Instron 1122 [35]

Typ vzorku	Číslo vzorku	Rozsah deformace pro E	E (Ultrazvuk) [kPa]	R^2	E (Instron) [kPa]	R^2	Relativní chyba
Sval	LD-122I	1-5 %	3,15	0,981	1,80	0,986	75 %
Sval	LD-122J	1-5 %	1,74	0,995	1,60	0,985	9 %
Sval	LD-122K	1-5 %	1,46	0,984	1,20	0,994	22 %

Druhý zmíněný experiment byl proveden ve spolupráci expertů z University of Miami a Harvard University, kdy byly mechanicky testovány vzorky svalů v tlaku a střihu s dynamickým zatížením ke zjištění parametrů potřebných pro aplikace metody konečných prvků. Z 13 mužských a 11 ženských mrtvolných těl (konkrétně nohou) bylo odebráno 70 vzorků svalu, kdy se jejich věk pohyboval od 51 do 71 let, BMI od 18 do 33 a tělesná hmotnost od 54,5 do 90,6 kg. Vzorky svalu byly odebrány o velikosti přibližně 2 cm x 2 cm x 2 cm. Trend pro rozdíl svalových vzorků mezi muži a ženami pro kompresi (compression) a napětí (tension) je patrný z Obrázku 21. Další důležitou vlastností pro modelování končetin je směr zatížení. Sval je ortotropní, tudíž se nechová ve všech směrech stejně a vlastnosti měřené při zatížení ve směru rovnoběžném s vlákny (parallel) jsou zcela odlišné od těch měřených ve směru kolmém (perpendicular), viz Obrázek 22. [37]



Obrázek 21 - Vlastnosti svalu v závislosti na působící kompresi či napětí [37]



Obrázek 22 - Ortotropie svalu [37]

Porovnáním těchto dvou experimentů můžeme říci, že hodnota Youngova modulu pružnosti se pohybuje v rozmezí zhruba od 1,5-2 kPa až do hodnot blížících se v průměru k 30 kPa, což je dáno rozdílem testovacích vzorků, zejména jejich velikostí. Dále je patrné, že hodnoty měřené u mužů jsou o něco vyšší než u žen. Z toho lze soudit, že u dítěte by hodnoty vykazovaly klesající tendenci.

4.1.2 Balistická želatina

Balistická želatina bývá široce používána jako testovací náhrada svalové tkáně, neboť vykazuje obdobné vlastnosti ve smyslu hustoty a pružnosti (elasticity). Náhrada biologické tkáně musí mít téměř stejnou hustotu jako má tělesná tkáň (ρ = 1100 kg·m^{-3}). Pro balistické experimenty bývá běžně používána ve formě 10% nebo 20% roztoku. Pro experimentální postřelování bylo stanoveno, že 10% želatinový roztok odpovídá nejlépe vlastnostem vnitřních orgánů, jako například játrům, ledvinám nebo plícím a 20% roztok pak podle svých vlastností svalové tkáni. Takovýto materiál si můžeme sami vyrobit za pomoci běžně dostupné želatiny a vody. Pro zajímavost, mozková tkáň bývá materiálně pro své parametry srovnávána s vodou. Analogickými vlastnosti, jako má balistická želatina, se vyznačuje balistický gel. Ten ovšem na rozdíl od želatiny má tu výhodu, že má neomezenou životnost a jeho recyklace není doprovázena nikterak výraznými změnami v jeho vlastnostech. Výhodou plastických médií je homogenita mechanických a fyzikálních vlastností v rámci celého jejich objemu. To může do jisté míry býti problémem při určování zranění jednotlivých tkání. [38] [39]

Pokud bychom chtěli definovat želatinu, mohli bychom říci, že se jedná o biopolymer na bázi živočišných proteinů, jinými slovy, typ polymeru produkovaný živými organismy. Jelikož jsou biopolymery vyráběny z obnovitelných zdrojů, jsou snadno biologicky rozložitelné, a tak se přirozeně recyklují biologickými procesy. Želatina je lehce stravitelná, ve vodě rozpustná látka,

jež může být vyrobena z mnoha různých zdrojů s vysokým obsahem kolagenu, jako například z kostí skotu, vepřové kůže nebo ryb. Tato látka je nevratné neboli ireverzibilní povahy. Je-li vystavena mechanickému zatížení, dochází k jejímu odvodňování. Pevnost želatinového gelu je podmíněna dvěma veličinami, a to jeho koncentrací a teplotou okolí. Podle balistické praxe dochází spolu se změnou fyzikálních a mechanických vlastností k jejímu biologickému rozpadu, proto je její experimentální použití časově omezené. Z toho důvodu je nezbytné, aby její příprava probíhala bezprostředně před jejím upotřebením, neboť je náchylná k tvorbě plísní působením bakterií (k jejich vytvoření dochází řádově během pár dní), a tudíž její archivace je velmi problematická. Komplikaci vytváří vysoká teplotní závislost želatiny spolu s její biologickou nestabilitou. To se podepisuje na hlavní nevýhodě tohoto materiálu. [38] [40]

Tabulka 6 ukazuje některé fyzikální a mechanické parametry alternativ biologické tkáně včetně 20% a 10% želatiny při různých teplotách, jmenovitě: hustotu (ρ), stlačitelnost (κ), dynamickou (η) a kinematickou (ν) viskozitu a rychlost zvuku (c). [38]

Stlačitelnost udává o kolik se zmenší objemová jednotka kapaliny v závislosti na zvětšení tlaku o 1 Pa. Dynamická viskozita neboli vnitřní tření charakterizuje odpor, který klade tekutina vlastnímu pohybu (toku) nebo jiné vzájemné změně částic. Kinematická viskozita je dána poměrem dynamické viskozity k hustotě kapaliny měřené při stejné teplotě. [41] [42] [43]

Tabulka 7 - Fyzikální a mechanické vlastnosti některých náhrad biologické tkáně [44]

Látka	**T [°C]**	**ρ [kg·m^{-3}]**	**κ [1 Pa^{-1}]**	**η [Pa·s^{-1}]**	**ν [m^2·s^{-1}]**	**c [m·s^{-1}]**
Voda	20 0	998 1000	$4{,}6\cdot10^{-10}$ $5{,}1\cdot10^{-10}$	$1{,}0\cdot10^{-3}$ 1,8	$1{,}00\cdot10^{-6}$ $1{,}79\cdot10^{-3}$	1483 1403
Glycerin	20 0	1260 -	$2{,}2\cdot10^{-10}$ $1{,}2\cdot10^{-10}$	1,48 -	$1{,}17\cdot10^{-3}$ -	1923 -
Ethanol	20 0	789 806	$9{,}3\cdot10^{-10}$ $10{,}2\cdot10^{-10}$	$1{,}20\cdot10^{-3}$ -	$1{,}52\cdot10^{-6}$ -	1170 1100
Glycerinové mýdlo	20	1080	$3{,}4\cdot10^{-10}$	≈ $5{,}0\cdot10^{-3}$ a)	≈ $5{,}0\cdot10^{-6}$	1660
10% želatina	20 4	1030 -	$4{,}2\cdot10^{-10}$ -	≈ 40,0 a) -	≈ 0,04 -	1520 1486
20% želatina	20 0	1060 -	$3{,}8\cdot10^{-10}$ -	≈ $1{,}0\cdot10^{2}$ a) -	≈ 0,1 -	1567 1541
Směs 75 % petrolátu s 25 % parafínu	20	910-640 b)	-	≈ $10{,}4\cdot10^{-3}$	-	-
Plastelína	25	1710 b)	-	≈ $13{,}9\cdot10^{-3}$	-	-
Vzduch	0	1,23	$7{,}4\cdot10^{-61,}$	$1{,}72\cdot10^{-5}$	$1{,}33\cdot10^{-5}$	331

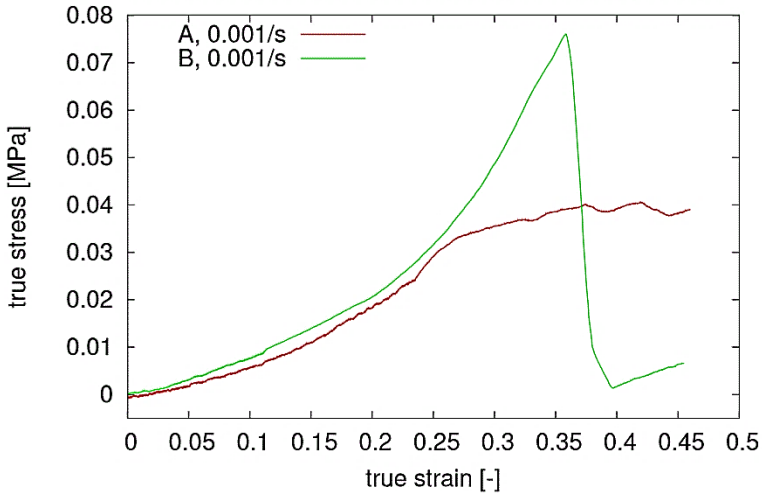
a) Hodnota látek zjištěná při teplotě 30 °C, neboť měření pod touto teplotou není možné z důvodu silně rostoucí dynamické viskozity s klesající teplotou

b) Hodnota změřena v laboratoři K-201 Univerzity obrany v Brně

Společnost Clear Ballistics vytvořila 100% syntetickou želatinu, aby nahradila jakoukoli aplikaci, kde je používána standardní želatina, s výjimkou potravinářských aplikací, kdy je želatina konzumována. Jedná se o testovací médium vědecky korelované s prasečí svalovou tkání, která bývá vlastnostmi srovnatelná s lidskou svalovou tkání. Tato syntetická želatina je zcela průhledná, bez zápachu a stabilní od -23.3 °C do 35 °C. Je netoxická, schopna formování do jakéhokoliv tvaru, neplísní ani nehnije a nevyžaduje speciální skladování. Původní záměr jejího využití byl pouze pro experimentální výzkum zastavovacího efektu střely, nicméně bylo zjištěno, že má řadu dalších aplikací. Výhodou tohoto balistického gelu je jeho opětovná použitelnost. Procesy, kterými želatina prochází, se nazývají tavení a formování. [45] [46]

Při testování balistické želatiny Fakultou dopravní, ČVUT byly pro rázové i kvazi-statické testování použity dva typy materiálů – čistá balistická želatina a otevřená buněčná polymerní síťovina plněná balistickou želatinou. Jako základ byla použita 260 Bloom hovězí želatina (REMI MB, sro, Česká republika). Želatinový prášek byl nalit do ohřáté vody o teplotě 45 °C, ve skupině druhé skupiny byla želatina vyztužena polymerní síťovinou FT-S10FR s otevřenými buňkami (Foam Techniques, Ltd, Velká Británie). Rozpuštěná želatina byla po homogenním promíchání nalita do sítě. Vzorky z obou šarží (čisté i zpevněné) byly vytvrzovány po dobu 24 hodin při pokojové teplotě a následně skladovány po dobu 24 hodin v lednici. Po tomto vytvrzení byly bloky rozřezány na vzorky požadované velikosti. V podmínkách kvazi-statického zatížení byla použita velikost vzorků 25 × 25 × 50 mm a velikost vzorků pro nárazové testování byla přibližně 60 × 50 × 50 mm. Pro lepší zaostření během optického pozorování, byla na každý vzorek rozprášena granitová barva. [47]

Kvazi-statické zkoušky byly prováděny za použití elektromechanického jednoosého zatěžovacího zařízení Instron 6530 (Instron, Inc., USA). Tlakové testy byly řízeny posuvem s rychlostí zatížení 3 $mm \cdot min^{-1}$, což odpovídalo rychlosti deformace 0,001 s^{-1}. Maximální posun byl nastaven na 30 mm. Výsledná křivka závislosti napětí na deformaci při kvazi-statickém testu je znázorněna na Obrázku 23. [47]

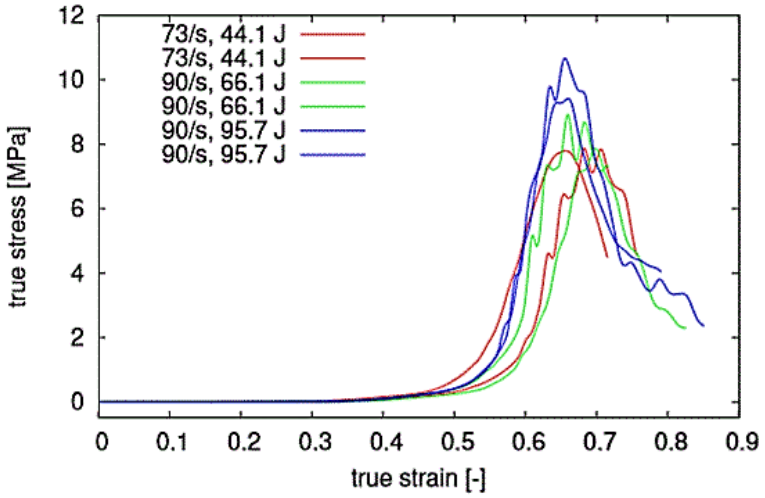


Obrázek 23 - Závislost napětí-deformace při kvazi-statickém testu [47]

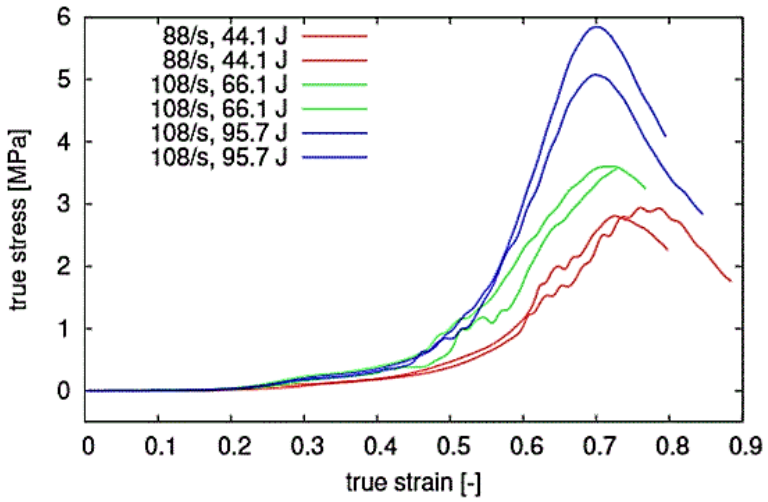
Nárazové zkoušky byly provedeny ve třech uspořádáních s různou počáteční výškou a hmotností nárazového tělesa. V každém uspořádání byla testována dvojice vzorků ze skupiny A (čistá balistická želatina), jakož i ze skupiny B (polymerní pletivo plněné balistickou želatinou). Výsledky jsou patrné z Obrázků 24 a 25. Počáteční výšky a hmotnosti nárazových těles jsou uvedeny v Tabulce 8 s odpovídající nárazovou energií a nárazovou rychlostí. Rychlost nárazu byla vypočtena pomocí počáteční výškové a gravitační konstanty založené na zachování součtu kinetické a potenciální energie. [47]

Tabulka 8 - Parametry vzorků nárazového testu [47]

Vzorek	Počáteční výška [m]	Hmotnost [kg]	Nárazová rychlost [m·s^{-1}]	Nárazová energie [J]
1	1,00	4,495	4,4	44,1
2	1,50	4,495	5,4	66,1
3	1,50	6,504	5,4	95,7



Obrázek 24 - Křivka závislosti napětí na deformaci pro balistickou želatinu [47]



Obrázek 25 - Křivka závislosti napětí na deformaci pro polymerní pletivo plněnou balistickou želatinou [47]

4.1.3 Agar

Dalším z možných řešení se stal agar, který též můžeme najít pod názvem agar – agar, kanten či v potravinářství pod označením E 406, je přírodní polysacharid, který se získává z buněčných stěn ruduch neboli červených řas. Je průhledný, bez chuti a bez zápachu a je k dostání ve formě prášku, vloček, plátků nebo také hranolků, přičemž právě ve formě prášku dosahuje nejlepších výsledků. Jeho výhodou je, že i v malých koncentracích vytváří termostabilní gely stálé i za vyšších teplot, na rozdíl od živočišné želatiny. Agar jako takový má v potravinářství mnoho využití. Používá se jako stabilizátor, tedy udržuje fyzikálně-chemické vlastnosti, dále jako zahušťovadlo, čímž přispívá k zvýšení viskozity, a nakonec jako želírující látka, jejíž gelující schopnosti jsou několikanásobně vyšší oproti klasické živočišné želatině. Zkapalnění nastává po zahřátí na 95-100 °C, želatinace potom po ochlazení na 40 °C. [48] [49] [50] [51] [52]

Bylo provedeno několik koncentračních pokusů s Agarem PTC0901, které vedly k tomu se co nejvíce přiblížit požadovaným, na dotek podobným vlastnostem odpovídajícím lidské svalové hmotě, kdy ideální procento koncentrace agaru ve vodě bylo stanoveno na 1,33 %. Jiné zdroje ovšem uvádí, že na výrobu svalové tkáně je nevhodné používat běžný potravinářský agar, jelikož obsahuje vyšší procento cizí organické hmoty – více jak 10%, které má za následek jeho degradaci. V odkazu na stanovení ideální hodnoty 1,33% koncentrace roztoku, jež byla použita na výrobu dolní končetiny, bylo uvedeno, že byla příliš řídká a měla za následek problémy s tuhnutím. V návaznosti na toto zjištění byl navržen obdobný typ materiálu, a to Agar GRM026, což je prášek používaný v bakteriologických a tkáňových kultivačních médiích, který je svými mechanickými vlastnostmi stejný, ale má tu výhodu, že je cenově přijatelnější. Procento cizí organické hmoty, jež obsahuje, nepřesahuje 10 % a k jeho zkapalnění dochází

při teplotě nad 85 °C a k želatinaci pak v rozmezí zhruba 38-40 °C. Došlo k otestování 2% a 4% roztoku Agaru GRM026 a stanovení závěru, že 4% koncentrace Agaru GRM026 má nejbližší mechanické vlastnosti obdobné lidskému masu. [33] [53]

Při použití ať již agaru PTC0901 nebo agaru GRM026 bylo navrženo, aby vytvořenou svalovou hmotu chránila kůže imitovaná potravinářskou fólií, která jednak přispěje k udržení si vlhkosti samotného agaru a zabrání tak případné ztrátě jeho vlastností a celkově tak, aby nedošlo k znečištění agarové hmoty. Celá figurína by potom byla oblečena do neoprenového obleku, který by zamezil separaci materiálu vlivem nárazu. [33] [53]

4.1.4 Lukopren N

Jako dalším vhodným materiálem se jeví dvousložkové silikonové kaučuky Lukopren N. V technickém listu je uvedeno, že se jedná o formovací a zalévací materiály s nízkou viskozitou vytvrzované za studena, se schopností věrného kopírování detailů a možností probarvení, u nichž je pozorováno pouze malé smrštění. Díky svým vlastnostem jsou vhodné například pro výrobu forem, odlévání plastických hmot nebo tepelně stálých a pružných odlitků. Pro dosažení optimálních parametrů je možné jejich vzájemné mísení, čímž může dojít k upravení jejich zatékavosti nebo tvrdosti. Po smíchání vybraného druhu kaučukové pasty Lukopren N s Lukopren Katalyzátorem N dochází za normální teploty během několika hodin k vulkanizaci napříč celou hmotou a následnému vytvoření silikonové pryže. Tabulka 8 popisuje vlastnosti všech druhů vulkanizátů Lukoprenu N, jež byly měřeny po 48 hodinách vulkanizace při teplotě 23 $\pm$ 2 °C a relativní vlhkosti 50 %. [54]

Tabulka 9 - Fyzikálně-mechanické vlastnosti vulkanizátů Lukoprenu N [54]

Lukopren N	Tvrdost [°Sha]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Lineární smrštění [%]	Tepelná odolnost [°C]
1522	53-55	3,4-3,6	130-140	Max. 0,3	-50/+250
5221	23-25	1,6-1,9	280-300	Max. 0,3	-50/+180
Super	30-32	1,4-1,6	170-190	Max. 0,35	-50/+180
5541	55-57	3,4-3,7	110-130	Max. 0,35	-50/+250 krátce +320
1725	58-60	3,9-4,2	160-170	Max. 0,3	-50/+180
6681	59-63	2,1-2,3	70-80	Max. 0,3	-50/+180
1000	23-26	0,4-0,6	110-120	Max. 0,4	-50/+180

Mezi vybrané vlastnosti, jimiž se výsledný vulkanizát vyznačuje je odolnost vůči trvalému působení vody, povětrnostním vlivům a slunečnímu záření. Dále má dobré separační vlastnosti vůči řadě neporézních materiálů, jakými jsou například kovy, plasty, dřevo, beton,

kůže, keramika, porcelán, kámen, dlažba, sklo nebo laminát. A poslední velice příznivou vlastností je tepelná odolnost napříč širokou teplotní škálou. [54]

4.1.5 Polymerní materiály

Objevily se různé polymery, které vykazují podstatné deformace v reakci na použité napětí. Tyto materiály se reverzibilně stahují a rozšiřují v délce a objemu, což činí jejich primární podobu se svalem. V současné době neexistuje široce používaná technologie, která by nahradila nebo simulovala svalstvo, což je silná motivace pro výzkum a vývoj. Výkon vyvíjejících se polymerních ovladačů v mnoha ohledech převyšuje výkon kvazireakce. V tomto přehledu byly polymerní umělé svaly rozděleny do dvou hlavních skupin. První skupinu tvoří elektronické nebo elektroaktivní polymery (EAP) a druhou třída materiálů, ve kterých je přítomnost a pohyb iontů nezbytný pro možnost ovládání, kdy tato skupina je označována jako iontové EAP. Aby se ionty mohly pohybovat, je zde nezbytná fáze elektrolytu, která je často tekutá, takže tyto ovladače jsou známé také jako mokré EAP. [34]

Materiály, které byly zkoumány, zahrnují konduktivní polymery měnící tvar a materiály využívající změny tvaru řízené světlem. Zajímavým rysem umělých svalů aktivovaných světlem, jakými jsou například azobenzeny, je to, že není nutné kontaktovat akční člen, aby se dodala energie. [34]

Objevuje se celá řada elektronických, iontových a fotoaktivovaných technologií umělých svalů, nicméně žádná technologie umělých svalů dosud neprokázala výjimečnou životnost cyklu a stupeň nevratné deformace během ovládání s vysokým zatížením, což je problémem zejména pro elektrochemické typy umělých svalů. [34]

4.2 Použitý materiál

Materiály, ze kterých byla směs odlita, byly požity dva – Lukopren N 1522 a Lukopren N 5221. Lukopren N 1522, který má jako stoprocentně čistý odstín slonové kosti (nazýván jako „žlutý“), který je oproti Lukoprenu N 5221 tužší, čímž má sklony k trhání a poškození masa. Naopak Lukopren N 5221 krémové barvy (pro nás „bílý“) je měkčí a pružnější, a tedy i odolnější vůči plastickým deformacím během crashtestů, na které jsou tyto figuríny určeny. Jedinou nevýhodou tohoto typu je cena, která je o něco vyšší. Oba materiály se vyznačují vynikající zatékavostí. [54]

4.3 Vlastní odlévání

Ze všeho nejdříve bylo nutné zvolit poměr směsi dvou vybraných materiálů, ze kterých bude figurína odlita. Již při tvorbě první verze figuríny se ukázalo, že nejlépe odpovídající hmota

musí být tvořena ze směsi obou těchto materiálů. To bylo potvrzeno i firmou DEKRA CZ a.s., která fyzikální vlastnosti figuríny otestovala a potvrdila jako vyhovující s velice velkou podobností, nicméně hodnoty získané z tohoto testování nebyly zpřístupněny.

V souvislosti s tím, že v některých místech původní figuríny došlo v průběhu jejího testování k mechanickému poškození, zejména k vytvoření jak větších, tak menších trhlin, bylo rozhodnuto, že směs nové figuríny bude zvolena odlišná od té původní. Rozhodli jsme se pro vytvoření pěti různých poměrových směsí, kdy na základě empiricky nabytých zkušeností byla následně určena směs, z níž bude figurína odlita, viz Tabulka 1010. Vycházeli jsme ze základního poměru směsí 1522:5221 – 50:50, který byl při předchozím odlévání Pamely v.1 v roce 2017 stanoven jako vyhovující. Rozhodli jsme se otestovat poměry látek na obě strany – jak do tvrdší, tak měkčí polohy, a tedy vytvořit směsi bohatší na Lukopren N 1522 a naopak chudší.

Tabulka 10 - Poměry Lukoprenu 1522 ku Lukoprenu 5221

	1522:5221
1.	50:50
2.	40:60
3.	30:70
4.	60:40
5.	70:30

Protože materiál není homologován a není nikde přesně uvedeno, jakou směs pro odlití použít, rozhodli jsme se v rámci odlévání otestovat směs Lukoprenu N 1522 a Lukoprenu 5221 v poměru 30:70, která by měla být dle technického listu odolnější vůči mechanickému poškození, než předchozí verze figuríny odlitá v poměru 50:50.

4.3.1 Formy

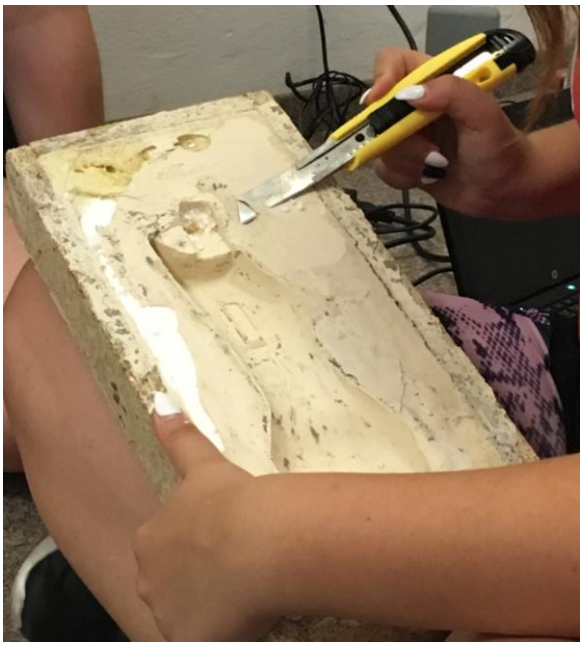
Formy, jež jsme měli k dispozici, byly vytvořeny zaměstnanci Ústavu soudního znalectví v dopravě, kteří je vytvořili na základě zachování tvaru originální figuríny P6 a pro následnou možnost odlití vlastní – první verze figuríny z roku 2017. Formy i po odlévání první verze figuríny byly ve stavu, kdy se z nich až na malé drobnosti – zaschlého materiálu nebo drobných úlomků mohl materiál bez problému znovu odlít.

Formy se skládají ze dvou na sebe přiléhajících částí. Byly vytvořeny takovým způsobem, že kolem kosti s původním masem byla vylita sádra, která se nechala odpočívat, aby v klidu zatvrdla. Rohy horní poloviny formy byly vystlány polystyrenem, aby se snížila spotřeba použitého materiálu. Forma byla poté zalita samospádem Lukoprenem N 1522, který tak vyplnil poslední volné prostory formy. Konstrukci všech forem tvoří dřevotříska. Horní část

formy tvoří Lukopren N 1522 (dle technického listu krémové barvy) a spodní polovinu pak sádra.

4.3.2 Postup odlévání

Před samotným vyléváním bylo nutné nejprve zkontrolovat a případně poupravit povrch forem po posledním použití. Bylo potřeba odstranit přebytečný silikon, aby na sobě formy dobře seděly a přiléhaly, viz Obrázek 26 a také poupravit spodní polovinu formy sádrou, jak je znázorněno na Obrázku 27, jelikož v některých jejích místech občas došlo k drobnému odlomení, když se odlitek vyjímal. V poslední fázi úprav byl vnitřek forem vyluxován a zbaven všech částeček jako úlomků a nečistot, jež by mohly narušit výsledný odlitek. Následně byl vnitřek obou polovin forem v dostatečném předstihu před odléváním směsi vytřen separátorem tak, aby se rozpouštědlo - technický benzin, tvořící jeho část, stihl odpařit a na povrchu forem zůstala pouze vrstvička vosku, která zajistí snazší oddělení odlitku od formy. V závislosti na rozdílných materiálech, z nichž byla horní a dolní polovina forem odlita byly použity dva druhy separátorů. Jeden pro vzájemné oddělení silikonových materiálů, jenž byl použit na vnitřek horních polovin forem a druhý pro oddělení silikonového materiálu od sádry na vnitřek dolních polovin forem. Na vymazání některých forem byl použit namísto originálního separátoru separátor vlastní výroby, vytvořený ze smíchání parafínu a technického benzinu, kterýžto se ukázal jako stejně účinný.



Obrázek 26 - Úprava svrchní části formy

Obrázek 27 - Sádrová rekonstrukce spodní poloviny formy

Dovnitř forem byly umístěny potřebné věci, specifické pro konkrétní části těla, jako například kosti, jež byly následně upevněny pomocí matek na šrouby, viz Obrázek 28 či speciálně

vytvořené předměty tvarů, zajišťujících odlití požadovaných křivek, jako například u hrudníku nebo hlavy, jak lze vidět na Obrázku 29 a 30.

Obrázek 28 - Centrace kosti tvořící předloktí

Obrázek 29 - Příprava formy pro hrudník

Obrázek 30 - Příprava formy pro hlavu

Co se míchání směsi týče, bylo nejprve nutné oba materiály řádně promíchat, neboť jejich skladováním může dojít k vytvoření částečné sedimentace pigmentů a plniv. Poté byl do

dostatečně velké nádoby odvážen příslušný poměr obou látek, jak ukazuje Obrázek 31. Na závěr, po jejich promíchání, bylo ještě přidáno doporučené množství Lukopren Katalyzátoru N.

Dávkování katalyzátoru bylo v technickém listu stanoveno v jednotkách g/100 g. Pro Lukopren N 1522 se jednalo o hodnotu 2,5-3 g/100 g v závislosti na minimální době zpracovatelnosti odlévané hmoty, která s použitým množstvím 2,5 g/100 g činila 55 minut, zatímco pro 3 g/100 g tomu bylo 40 minut. Bylo rozhodnuto pro použití průměrné hodnoty z těchto uvedených hodnot dávkování – tedy na 2,75 g/100 g, a proto i u Lukoprenu N 5221 bylo z uvedených hodnot 2-3 g/100 g opět pro stejné časové použití jako u výše zmíněného Lukoprenu N 1522 vybrána průměrná hodnota – 2,5 g/100 g. Následně byla směs dokonale rozmíchána dřevěnou špachtlí, jak je znázorněno na Obrázku 32. [54]

Obrázek 31 - Navážení jednotlivých poměrů látek

Obrázek 32 - Promíchání směsi

Pro eliminaci vzduchových bublin během plnění byl zvolen způsob lití směsi pod tlakem. Uvnitř dvou na sebe přiléhajících polovin forem, které byly utěsněny pomocí sklenářského tmelu, jak je vidno například u formy stehenní kosti na Obrázku 33, byl vytvořen podtlak pomocí vysavače. Ten byl přidržen u jednoho ze dvou otvorů, jež byly ve víku formy vytvořeny a druhým otvorem byla pomocí tlakové pistole byla směs vtlačována, viz Obrázek 34.

Z počátku byla hmota plněna do tlakové pistole, která bývá používána například pro tmelení. Nicméně ve zbývajících pokusech už proběhlo plnění pomocí cukrářských zdobících pytlíků,

s jejichž manipulací bylo plnění mnohem jednoduší. U tlakové pistole totiž docházelo k velikým ztrátám hmoty oproti jejímu plněnému objemu skrze vrchní a spodní otvor, který ani jeden nebyl originálně nikterak dobře utěsněn, takže větší množství směsi uniklo, nežli bylo naplněno do formy.

Obrázek 33 - Utěsnění forem pomocí sklenářského tmelu

Obrázek 34 - Vtlačování směsi tlakovou pistolí za vytvoření podtlaku vysavačem

4.3.3 Tuhnutí

Aby bylo zajištěno, že se formy v průběhu tuhnutí nikterak nepohnou, bylo použito izolační pásky pro jejich zpevnění, jak je naznačeno na Obrázku 35. Předpokládaná doba tuhnutí dle technického listu materiálu, po které je možno odlitek z formy vyjmout, se pohybuje v rozmezí 12–24 hodin. U silnějších odlitků se doporučuje provést odformování a vyjmutí po delší době, než je uvedeno. My jsme se rozhodli odlitky vyjímat zhruba po dvou dnech. Výsledná podoba figuríny po spojení jednotlivých částí je patrná z Obrázku 36. [54]

Obrázek 35 - Tuhnutí odlitků

Obrázek 36 - Finální podoba figuríny

4.3.4 Problémy při odlévání

Nicméně, i přes použití vysavače, se na povrchu vrchních částí odlitků utvořily vzduchové kapsy, které jsme se rozhodli po odlití všech částí ještě jednou zalít tutéž hmotou. Pro znázornění je Obrázku 37 vidět svrchní strana pažní kosti. Největším problémem během příprav bylo samotné umisťování kostí do forem, jež tyto části obsahovaly, zejména jejich vycentrování. Důvodem bylo, že při předchozím odlévání první verze figuríny zůstal na některých místech ve formách Lukopren, případně některé sádrové části nebo výstupky byly z dolních polovin forem vylomeny a musela proběhnout jejich oprava pomocí sádry. Ta se ukázala jako klíčová, neboť i nepatrné velikostní výchylky opravených částí vůči původnímu tvaru zapříčinily vytvoření zcela nepoužitelného odlitku, jak se tomu stalo při prvním pokusu odlití jednoho z předloktí, jak je patrné na Obrázku 38, kde mimo jiné nebylo použito dostatečné množství materiálu na odlitek, které bylo stanovováno experimentálně.

Obrázek 37 - Vzduchové kapsy vytvořené na horní polovině pažní kosti

Obrázek 38 - Nezdařilé odlití jednoho z předloktí

Nepříjemnou věcí bylo také vyjímání odlitků z forem. Obecně z lukoprenové – horní části šly odlitky vždy celkem snadno odloupnout. Problém nastával vždy při vyjímání odlitku z části spodní – sádrové, viz Obrázek 39. Jako nevhodný se ukázal přístup vymazání formy pouze jednou vrstvou separátoru. I přesto že byl použit příslušný separátor oddělující dotyčné materiály, se materiál ze spodní části formy vyjímal poněkud špatně za pomoci velkého úsilí i navzdory tomu, že došlo k opakované aplikaci separátoru, jak bylo doporučeno v technickém listu, kdy se jednotlivé vrstvy nechaly postupně zaschnout tak, aby se vypařila alkoholová část roztoku a na povrchu formy tak zůstal pouze vosk. To zapříčinilo, že některé části musely být odlity opakovaně, jelikož došlo k jejich roztržení, jako například u odlitku předloktí znázorněného na Obrázku 40.

Obrázek 39 - Problematické vyjímání odlitku stehna ze sádrové poloviny formy

Obrázek 40 - Roztržení jednoho z odlitků předloktí při odformování

Problémem se i stalo, že materiál poněkud rychle tuhnul, a tak bylo jeho plnění do forem o něco ztíženo, přičemž v technickém listu se jeho doba zpracování pro dvě různé dávky katalyzátoru – hodnoty v jejichž škále jsme katalyzátor používaly, pohybovala v rozmezí 40-55 minut. Ovšem toto časové rozmezí mezi mícháním směsi a plněním materiálu do forem nikdy překročeno nebylo. [54]

5 Závěr

Z poznatků o historii antropomorfních testovacích zařízení a jejich dřívějších i současných typů a modelů je patrné, že vytvořená škála a možnosti testování jsou v dnešní době natolik široké, že pokrývají nejtypičtější případy. Budoucnost testovacích figurín by se mohla nést ve znamení nových možností, například zohledněním další dosud nepokryté kritické skupiny účastníků silničního provozu, a to především generace starších řidičů, kterých ve srovnání s minulými lety výrazně přibylo.

Náplní předložené práce bylo odlití hmoty reprezentující měkkou tkáň, respektive svalstvo tvořící tělo dětské figuríny s označením P6 reprezentující 6leté dítě. Volba vhodného poměru směsi dvou použitých materiálů řady Lukopren N byla založena na empiricky získaných znalostech a pokusech. Na základě získaných vědomostí z celého procesu výroby bylo zjištěno, že před samotným odléváním je potřeba nejprve provedení materiálových zkoušek a že značnou váhu také mají znalosti o tom, jak s materiály pracovat.

Při výrobě figuríny se stalo klíčovými hned několika aspektů. Jednalo se tak například o způsob plnění směsi do forem, správný odhad jejího namíchaného objemu, způsob aplikace separátoru před samotným odléváním či instalace jednotlivých částí kostry včetně pomůcek pro odlití požadovaných tvarů.

Značným problémem se stalo vyjímání jednotlivých odlitků z forem, respektive ze spodních polovin tvořených sádrou. Proto kdyby bylo v budoucnu uvažováno o vytvoření nových forem, byl by na vnitřek obou forem použit Lukopren N, kterýžto se osvědčil pro svou celkem jednoduchou schopnost separace od odlitku. Jako ne zcela vyhovující se ukázala skutečnost vytvoření vzduchových bublin na povrchu odlitků, jíž jsme se snažili zamezit vytvořením podtlaku uvnitř formy prostřednictvím vysavače. Jestliže bude v budoucnu odléván další prototyp figuríny, bude nutné zvolit jiný způsob vytvoření podtlaku, a to například použitím vývěvy, což podmínky odlévání figuríny ve škole neumožňovaly.

Po tomto způsobu výroby bylo navrženo, že by pro výrobu další verze figuríny mohly být nové formy vytvořeny pomocí 3D tiskárny. Další cestou by mohlo být i odlití testovací figurínu z balistické želatiny, čímž by se nabízelo otestovat, zdali bude vykazovat stejné materiálové a fyzikální vlastnosti jako figurína vytvořená z Lukoprenu N.

Seznam použitých zdrojů

[1] KOVANDA, Jan. *Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, 2016. ISBN 978-80-01-05893-0.

[2] SAJDL, Jan. Euro NCAP. In: *Autolexicon.net* [online]. 2019 [cit. 2019-08-01]. ISSN 1804-2554.

[3] FIRST, Jiří. *Zkoušení automobilů a motocyklů: příručka pro konstruktéry*. Praha, 2008.

[4] Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 94: Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska ochrany cestujících při čelním nárazu [2018/178]. In: *Úřední věstník Evropské unie* [online]. b.r., s. 55 [cit. 2019-07-23].

[5] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/46/ES. In: *Úřední věstník Evropské unie* [online]. b.r., s. 160 [cit. 2019-07-31].

[6] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 56/2001 Sb.: Zákon o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích a o změně zákona č. 168/1999 Sb., o pojištění odpovědnosti za škodu způsobenou provozem vozidla a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o pojištění odpovědnosti z provozu vozidla), ve znění zákona č. 307/1999 Sb. In: *2001*. 2001, 21/2001, číslo 56. Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-56

[7] Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 95: Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska ochrany cestujících v případě bočního nárazu [2015/1093]. In: *Úřední věstník Evropské unie* [online]. b.r., s. 67 [cit. 2019-07-28].

[8] *Euro NCAP: About Euro NCAP* [online]. 2019 [cit. 2019-08-01].

[9] FUGLEVIČ, Daniel. Víte, proč vznikly nárazové testy? A co je třeba k zisku nejlepšího hodnocení?. *Automix.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: https://automix.denik.cz/zivot-ridice/narazove-testy-euro-ncap-probihaji-uz-20-let-vite-kdo-stoji-za-jejich-vznikem-20171230.html

[10] *Velký lékařský slovník* [online]. Maxdorf, c1998-2019 [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: http://lekarske.slovniky.cz/lexikon-pojem/antropometrie

[11] *Ergonomics 4 Schools: Anthropometry* [online]. b.r. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: https://www.ergonomics4schools.com/lzone/anthropometry.htm

[12] *Generace Y: Luděk Hynčík* [online]. 2011 [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: https://www.generacey.cz/poznej-zajimave-lidi-z-oboru/ludek-hyncik

[13] *Český rozhlas Plzeň: Crash testy nebo porod. Pomoct může virtuální model lidského těla z Plzně* [online]. 2016 [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: https://plzen.rozhlas.cz/crash-testy-nebo-porod-pomoct-muze-virtualni-model-lidskeho-tela-z-plzne-6739208

[14] *Konec crash test dummies? V nárazových testech nahrazují figuríny počítače* [online]. 2016 [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: https://ct24.ceskatelevize.cz/domaci/1789373-konec-crash-test-dummies-v-narazovych-testech-nahrazuji-figuriny-pocpocitace?fbclid=IwAR3pcP3eASDsHzfB58tEj6kokf0bgNILGWsHzl1dYDpYGkUxFb7aGsnKNEk

[15] SEIFFERT, Ulrich a Lothar WECH. *Automotive safety handbook*. London, UK: Professional Engineering Pub., 2003. ISBN 07-680-0912-X.

[16] ÖZKAYA, Nihat, Dawn LEGER, David GOLDSHEYDER a Margareta NORDIN. *Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation* [online]. Fourth Edition. Switzerland: Springer, 2017 [cit. 2019-08-02]. ISBN 978-3-319-44738-4. Dostupné z: https://www.academia.edu/37235253/Fundamentals_of_Biomechanics?fbclid=IwAR1ihiyOkmcget5CEnmLUlWAg4Fw6k-3K-5zvwjemLGJQVThk4YrUs4d-gM

[17] LENKOVÁ, Alžběta. *Měřící metody a technika v dopravě: Dynamická měření v dopravě*. Praha, 2014.

[18] *Měřící metody a simulační programy: Učební texty pro prezenční kurz*. 1. Praha, 2015.

[19] NOUZOVSKÝ, Luboš. *Měřící senzorika v automotive: Jízdní a nárazová dynamika*. Praha, 2019.

[20] MERTZ, Harold a Annette IRWIN. Anthropomorphic Test Devices and Injury Risk Assessment. YOGANANDAN, Narayan a A. NAHUM. *Accidental Injury*. Third edition. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-1732-7.

[21] Crash Test Dummies. *Humanetics ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019 [cit. 2019-08-13]. Dostupné z: https://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies

[22] *Automotive Megatrends Magazine: The Freight Efficiency Issue* [online]. 2014, (4) [cit. 2019-07-31]. ISSN 2053 776X. Dostupné z: https://issuu.com/megatrends/docs/automotive_megatrends_magazine_-_q4

[23] HASLAM, David a Tina JONES. *The Humanetics Story: All Illustrated History of the Crash Test Dummy*. United States of America: HMSI Publishing, 2013. ISBN 987-0-9851996-1-6.

[24] BELLIS, Mary. The History of Crash Test Dummies. *ThoughtCo.* [online]. b.r. [cit. 2019-08-08]. Dostupné z: https://www.thoughtco.com/history-of-crash-test-dummies-1992406

[25] History of Crash Test Dummies. *Humanetics ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019 [cit. 2019-08-14]. Dostupné z: https://www.humaneticsatd.com/about-us/dummy-history

[26] Frontal Impact. *Humanetics ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: https://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/frontal-impact

[27] Pedestrian. *Humanetics ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: https://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/pedestrian

[28] Children. *Humanetics ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: https://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/children

[29] Side Impact. *Humanetics ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: https://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/side-impact

[30] CAMI Newborn, 6-Month-Old or 20 lb Infant. In: *AllianTech* [online]. 10317 U.S. Highway 250 North, Milan, Ohio 44846-9570: Denton ATD, 2006 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: http://www.alliantech.com/pdf/mannequins/enfant.pdf

[31] Rear Impact. *Humanetics ATD* [online]. Farmington Hills, MI 48335 USA, 2019 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: https://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/rear-impact

[32] "pregnant" crash-test manekin. In: *YouTube* [online]. 2016 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=PJYO12t2kYU

[33] POKORNÁ, Veronika. *Možnosti použití materiálů pro výrobu testovací figuríny* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148543. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

[34] MIRFAKHRAI, Tissaphern, John MADDEN a Ray BAUGHMAN. Polymer artificial muscles. *Materials Today* [online]. Elsevier Ltd., 2007, **10**(4), 30-38 [cit. 2019-08-04]. DOI: 10.1016/S1369-7021(07)70048-2. ISSN 1369-7021. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702107700482

[35] CHEN, Eric, Jan NOVAKOFSKI, W. JENKINS a Jr., O'BRIEN. Young's Modulus Measurements of Soft Tissues with Application to Elasticity Imaging. *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL* [online]. IEEE, 1996, **43**(1), 191-194 [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: http://brl.illinois.edu/Publications/1996/Chen-UFFC-191-1996.pdf

[36] SILVER, F. *Biological Materials: Structure, Mechanical Properties and Modeling of Soft Tissues*. New York: New York Univ.Press, 1987.

[37] ESCOBAR, Pablo, Stephen WITTLES, Shihab ASFOUR a Loren LATTA. Mechanical Characteristics of Muscle, Skin and Fat-Elastic Moduli for Finite Element Modeling of Limbs. *ORS Annual Meeting* [online]. 2014, (1173), 3 [cit. 2019-08-03]. Dostupné z: http://www.ors.org/Transactions/60/1173.pdf

[38] JUŘÍČEK, Ludvík, Jozef METEŇKO a Olga VOJTĚCHOVSKÁ. *Postřelování balistické želatiny a metoda radiálních trhlin* [online]. b.r., , 11 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: https://docplayer.cz/35845404-Postrelovani-balisticke-zelatiny-a-metoda-radialnich-trhlin.html

[39] KLEIN, Leo a Alexander FERKO. *Principy válečné chirurgie*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0735-7.

[40] YADAV, Preeti, Harsh YADAV, Veena GOWRI SHAH, Gaurav SHAH a Gaurav DHAKA. Biomedical Biopolymers, their Origin and Evolution in Biomedical Sciences: A Systematic Review. *JOURNAL OF CLINICAL AND DIAGNOSTIC RESEARCH* [online]. 2015 [cit. 2019-08-04]. DOI: 10.7860/JCDR/2015/13907.6565. ISSN 2249782X. Dostupné z: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4606363/

[41] *Mechanika tekutin: Úvod do předmětu*. Brno, 2013. Dostupné také z: http://uzpet.af.mendelu.cz/wcd/w-af-uzpet/soubory-ke-stazeni/uvod_mechanik_tekutin.pdf

[42] Definice viskozity. *MesuLab* [online]. 2017 [cit. 2019-08-26]. Dostupné z: http://cz.analysisinstrument.com/news/definition-of-viscosity-9989671.html

[43] *Ekologické aspekty: Viskozita*. b.r. Dostupné také z: http://hgf10.vsb.cz/546/Ekologicke%20aspekty/voda/fyzikalni/viskozita.htm

[44] SELLIER, Karl a Beat KNEUBUEHL. *Wundballistik: und ihre ballistischen Grundlagen*. 2. Berlin: Springer, 2001. ISBN 978-3-662-10978-6.

[45] *Clear Ballistics* [online]. 2017 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: https://www.clearballistics.com/resourcescenter/

[46] *Clear Ballistics* [online]. 2017 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: https://www.clearballistics.com/shop/10-ballistic-gelatin-air-rifle-block/

[47] DOKTOR, Tomáš, Petr ZLÁMAL, Jan ŠLEICHRT a Tomáš FÍLA. IMPACT TESTING OF ORDNANCE GELATINE UNDER MODERATE STRAIN RATE CONDITIONS. In: *Acta Polytechnica CTU Proceedings* [online]. Czech Technical University in Prague, 2018, **18**, s. 44-47 [cit. 2019-08-04]. DOI: 10.14311/APP.2018.18.0044. ISSN 2336-5382. Dostupné z: https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/APP/article/view/5088

[48] *Poklady přírody* [online]. b.r. [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: http://www.pokladyprirody.cz/248-agar-prirodni-zelatina-20g

[49] *Anamneza* [online]. c2003-2017 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: http://www.anamneza.cz/E-406-Agar/ecko/813

[50] *AkcniCeny.cz* [online]. Praha, c2000-2019 [cit. 2019-07-16]. Dostupné z: https://www.akcniceny.cz/ecka-v-potravinach/e406-agar

[51] *BIOOO.CZ* [online]. c2007-2019 [cit. 2019-07-16]. Dostupné z: https://encyklopedie.biooo.cz/vyhledat-slozeni/zelatina-gelatin/

[52] *Protetická technologie* [online]. Hradec Králové, b.r. [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: https://ptc.zshk.cz/vyuka/agarove.aspx

[53] MARŠÁLEK, Petr. *Návrh dolní končetiny testovací figuríny pro nárazové zkoušky* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=137743. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

[54] *Technický list: Lukopren N dvousložkové silikonové kaučuky*. Kolín, 2018. Dostupné také z: https://www.lucebni.cz/index.php?controller=downloads

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Čelní vyosený náraz s překrytím [1] 11
Obrázek 2 - Čelní pohled na konstrukci nárazového tělesa [7] 13
Obrázek 3 - Pohled na bok nárazového tělesa seshora [7] 13
Obrázek 4 - Gaussovo rozdělení velikosti populace [11] 16
Obrázek 5 - Wayne State Tolerance Curve (WSTC) [1] 19
Obrázek 6 - Kritérium namáhání krku v tahu [4] 20
Obrázek 7 - Kritérium namáhání krku ve smyku [4] 20
Obrázek 8 - Kritérium síly působící na stehenní kost [4] 23
Obrázek 9 - Hybrid II [26] 30
Obrázek 10 - Hybrid III [26] 30
Obrázek 11 - Figurína chodce Hybrid II čekající na crashtest [23] 31
Obrázek 12 - Dětské figuríny řady P [23] 32
Obrázek 13 - Figurína novorozeně CAMI 0 [30] 33
Obrázek 14 - Figurína 50percentilního muže WorldSID [23] 34
Obrázek 15 - Figurína 5percentilní těhotné ženy MAMA2B [32] 35
Obrázek 16 - Řada dětských figurín typu Q [28] 36
Obrázek 17 - 5percentilní žena THOR [26] 37
Obrázek 18 - 50percentilní muž THOR [26] 37
Obrázek 19 - Měření Youngova modulu pružnosti metodou ultrazvuku [35] 43
Obrázek 20 - Měření Youngova modulu pružnosti přístrojem Instron 1122 [35] 43
Obrázek 21 - Vlastnosti svalu v závislosti na působící kompresi či napětí [37] 44
Obrázek 22 - Ortotropie svalu [37] 45
Obrázek 23 - Závislost napětí-deformace při kvazi-statickém testu [47] 48
Obrázek 24 - Křivka závislosti napětí na deformaci pro balistickou želatinu [47] 48
Obrázek 25 - Křivka závislosti napětí na deformaci pro polymerní pletivo plněnou balistickou želatinou [47] 49
Obrázek 26 - Úprava svrchní části formy 53
Obrázek 27 - Sádrová rekonstrukce spodní poloviny formy 53
Obrázek 28 - Centrace kosti tvořící předloktí 54
Obrázek 29 - Příprava formy pro hrudník 54
Obrázek 30 - Příprava formy pro hlavu 54
Obrázek 31 - Navážení jednotlivých poměrů látek 55
Obrázek 32 - Promíchání směsi 55
Obrázek 33 - Utěsnění forem pomocí sklenářského tmelu 56

Obrázek 34 - Vtlačování směsi tlakovou pistolí za vytvoření podtlaku vysavačem.....56
Obrázek 35 - Tuhnutí odlitků 57
Obrázek 36 - Finální podoba figuríny.....57
Obrázek 37 - Vzduchové kapsy vytvořené na horní polovině pažní kosti.....58
Obrázek 38 - Nezdařilé odlití jednoho z předloktí 59
Obrázek 39 - Problematické vyjímání odlitku stehna ze sádrové poloviny formy 59
Obrázek 40 - Roztržení jednoho z odlitků předloktí při odformování.....60

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Veličiny měřené na figuríně při čelním vyoseném nárazu [1] [4].....12
Tabulka 2 – Veličiny měřené na figuríně při bočním nárazu [1] [7].....14
Tabulka 3 - Stupeň bezpečnosti vyjádřený počtem hvězdiček [8].....15
Tabulka 4 - Stupnice AIS [1].....18
Tabulka 5 - Vlastnosti kosterního svalu savce [34].....42
Tabulka 6 - Hodnoty Youngova modulu pružnosti svalu měřené metodou ultrazvuku a přístrojem Instron 1122 [35].....44
Tabulka 7 - Fyzikální a mechanické vlastnosti některých náhrad biologické tkáně [44].....46
Tabulka 8 - Parametry vzorků nárazového testu [47].....48
Tabulka 9 - Fyzikálně-mechanické vlastnosti vulkanizátů Lukoprenu N [53].....50
Tabulka 10 - Poměry Lukoprenu 1522 ku Lukoprenu 5221 52