

# NÁVRH NÁHRADY ĽUDSKEJ RUKY A JEJ EXPERIMENTÁLNE TESTOVANIE POD VPLYVOM NIČIVÝCH ÚČINKOV VYSOKO- DYNAMICKÝCH DEJOV

## THE DESIGN OF A HUMAN HAND REPLACEMENT AND ITS EXPERIMENTAL TESTING UNDER THE INFLUENCE OF THE DESTRUCTIVE EFFECTS OF HIGH-DYNAMIC EVENTS

**Ing. Veronika Adamová, PhD.**

*Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva*

*Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina*

*Kontakt: veronika.adamova@uniza.sk*

**Ing. Nikola Dejóv**

*Svrčinovec 371, 023 12 Svrčinovec*

*Kontakt: dejovanikola18@gmail.com*

**doc. Ing. Eduard Kolla, PhD.**

*Žilinská univerzita v Žiline, Ústav znaleckého výskumu a vzdelávania*

*Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina*

*Kontakt: kolla@uniza.sk*

### ABSTRAKT

Vývoj testovacej figuríny alebo jej segmentov je kľúčové v mnohých odvetviach, ako je bezpečnosť, zdravotníctvo, technológia, a iné, a teda aj motivácia ich vývoja môže byť rôznorodá. Predložený článok sa zaoberá návrhom a fyzickou realizáciou náhrady segmentu ľudskej ruky pre účely neskoršieho experimentálneho testovania pod vplyvom ničivých účinkov vysoko-dynamických dejov (napr. účinky pyrotechniky, nástražných výbušných systémov alebo aj dopravných nehôd, pracovných úrazov a pod.). Predmetný problém je vo svojej podstate riešený aplikáciou viacerých prístupov, ako je reverzné inžinierstvo, 3D skenovanie, 3D modelovanie, 3D tlač a odlievanie. Výsledkom práce je vývoj biomechanického modelu ľudskej ruky vo fáze prototypu a zhodnotenie funkčnosti a vhodnosti navrhnutého modelu ruky, taktiež následný návrh a realizácia experimentálneho testovania modelu ruky pod vplyvom účinkov zábavnej pyrotechniky za účelom zistenia kvalitatívneho popísania rozsahu poškodení na testovanom objekte.

**Kľúčové slová:** 3D model, 3D tlač, figurína, model ruky, modelovanie.

## ABSTRACT

The development of test dummies or segments of test dummies is crucial in many industries such as security, healthcare, technology, and others, and hence the motivations for their development can be diverse. The present paper deals with the design and physical realization of a human hand segment substitute for later experimental testing purposes under the influence of destructive effects of highly dynamic events (e.g., effects of pyrotechnics, explosive ordnance systems, or even traffic accidents, occupational injuries, etc.). The present problem is inherently addressed by the application of several approaches such as reverse engineering, 3D scanning, 3D modelling, 3D printing and casting. The work results in the development of a biomechanical model of the human hand at the prototype stage and the evaluation of the functionality and suitability of the proposed hand model, also the subsequent design and implementation of experimental testing of the hand model under the influence of the effects of fireworks in order to establish a qualitative description of the extent of damage to the test object.

**Key words:** 3D model, 3D printing, test dummy, human hand, modelling.

## 1 ÚVOD

Vývoj testovacích figurín a ich jednotlivých segmentov má svoje uplatnenie vo viacerých sférach nášho života, najmä v takých, kde je nevyhnutné simulovať správanie „ľudského tela“ pri rôznych podmienkach alebo testovať rôzne produkty a technológie z pohľadu bezpečnosti, funkčnosti či ergonómie. Je možné identifikovať niekoľko oblastí, kde majú testovacie figuríny svoje významné miesto:

- **Automobilový priemysel:** Využitie pri nárazových testoch na hodnotenie pasívnej bezpečnosti vozidiel, forenzných analýzach (napr. simulácia zranení chodcov) a testovaní detských autosedačiek.
- **Zdravotníctvo a medicína:** Testovanie zdravotníckych pomôcok (protézy, ortézy, invalidné vozíky), simuláciu medicínskych zákrokov (chirurgia, resuscitácia) a biomechanický výskum.
- **Armáda a bezpečnosť:** Použitie v balistických testoch na simuláciu zranení spôsobených projektilmi a výbuchmi, pri cvičeniach núdzových situácií a testovaní ochranných materiálov (nepriestrelné vesty, protichemické obleky).

- **Záchrané a hasičské služby:** Využitie pri simuláciách zásahov, tréningu hasičov a záchranárov, ako aj pri testovaní vybavenia a výstroja.
- **Športový priemysel:** Overovanie kvality a bezpečnosti športového vybavenia, ako sú prilby, chrániče či funkčné materiály.
- **Ostatné odvetvia:** Využitie v leteckom a vesmírnom priemysle, stavebníctve, architektúre, zábavnom či textilnom priemysle a ďalšie.

V predložennom článku je pozornosť zameraná na návrh a fyzické vytvorenie biomechanicky vernej náhrady ľudskej ruky vo fáze prototypu pre bezpečnostné účely, konkrétne pre potreby skúmania ničivých účinkov vysoko-dynamických dejov vyvolaných nevhodnou manipuláciou so zábavnou pyrotechnikou. Motiváciou riešiť predmetný problém sú nasledujúce aspekty:

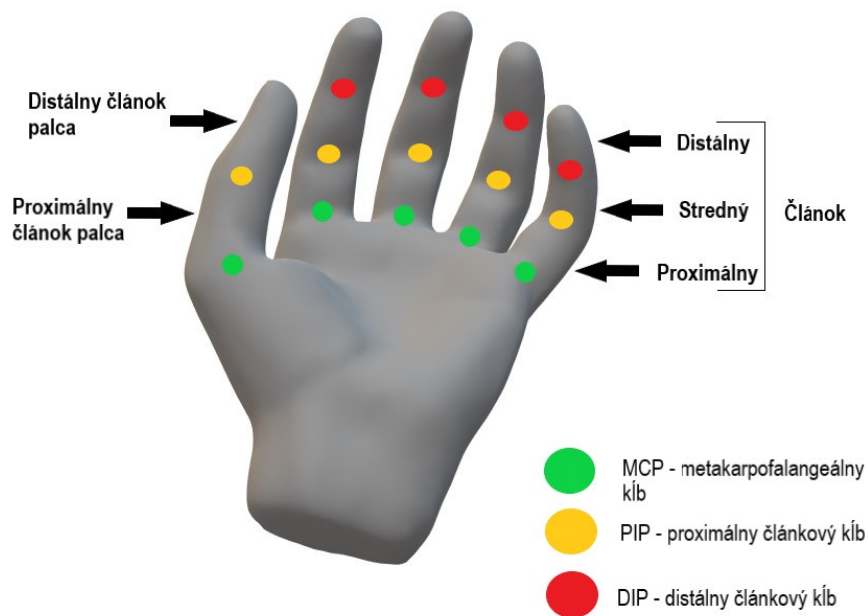
- Zábavná pyrotechnika predstavuje každoročne, zvyčajne pred Silvestrom významné riziko zranenia spôsobené neodbornou manipuláciou alebo použitím nelegálne vyrobenej pyrotechniky. Medzi časté úrazy patria tržné rany a popáleniny na horných končatinách, poranenia zraku v dôsledku svetelných efektov či poškodenie sluchu spôsobené nadmerným hlukom. Neodborné používanie pyrotechniky navyše zvyšuje riziko vzniku požiarov a majetkových škôd. [1, 2, 3]
- V oblasti zranení spôsobených zábavnou pyrotechnikou absentuje, resp. nebol doposiaľ zistený výskumný rámec, ktorý by kvantifikoval jej vplyv na ľudskú ruku alebo na anatomicky a biomechanicky presný fyzický simulant ruky, t.j. neexistuje rámec zraňujúcich kritérií (tzv. „injury criteria“), ktorý by pojednával o vzťahu medzi účinkami vybranej zábavnej pyrotechniky a potenciálnymi zraneniami na vybranom segmente ľudského tela – ruke.

## 2 TEORETICKÝ ZÁKLAD

### 2.1 Anatómia ruky

Návrh modelu ľudskej ruky vychádza z poznania jej anatómie a pohybových možností. Pri tvorbe je nevyhnutné zohľadniť rozsah pohybu palca a prstov a vlastnosti kĺbov spájajúcich jednotlivé články. Ruka pozostáva z ôsmich zápästných kostí, ktoré sa spájajú s piatimi záprstnými kosťami, tromi článkami na každom prste a dvoma článkami na palci. Prsty sú usporiadané do piatich „lúčov“ – palca, ukazováka, prostredníka, prstenníka a

malíčka. Články prstov sú rozdelené na proximálny, stredný a distálny článok, pričom palec obsahuje iba proximálny a distálny článok (Obr. 1).



Obrázok 1 Články a kĺby prstov a palca [4]

Záprstná kosť sa spája s prstami a palcom cez metakarpofalangeálny (MCP) kĺb. Kosti prstov, nazývané falangy, sú spojené dvoma kĺbmi (proximálnym interfalangeálnym, tzv. PIP kĺbom a distálnym interfalangeálnym, tzv. DIP kĺbom), zatiaľ čo palec má iba jeden interfalangeálny kĺb (Obr. 1). Zápästie umožňuje flexiu, extenziu, zatváranie a otváranie ruky, ako aj pronáciu a supináciu predlaktia (Obr. 2). Flexia a extenzia sú hlavnými pohybmi prstov, zatiaľ čo abdukcia a addukcia sa vykonávajú v MCP kĺboch. Palec, ako jediný, umožňuje opozíciu a reopozíciu, ktoré sú kľúčové pre uchopovanie predmetov. Interfalangeálne kĺby umožňujú flexiu do 90°, pričom väčší rozsah je medzi proximálnym a stredným článkom. [5]



Obrázok 2 Pohyby prstov a palca, zľava doprava: flexia a extenzia – palec, flexia a extenzia - prsty, cirkumdukcia, opozícia, abdukcia a addukcia, radiálna abdukcia [4]

## 2.2 Aktuálny stav riešenia

Relatívne obmedzujúcou podmienkou pri analýze aktuálnych biomechanických modelov ľudských rúk pre účely skúmania ničivých účinkov bola ich slabšia dostupnosť. No i napriek uvedenej skutočnosti bolo identifikovaných niekoľko zdrojov, ktoré sa však vo väčšine prípadov zameriavali na návrhy protetických náhrad končatín pre deti a dospelých [napr. 6, 7, 8, 9]. Články pojednávajúce o skúmaní zraňujúcich účinkov pyrotechniky na ruku vychádzali vo väčšine prípadov z reálnych incidentov, kedy ako podklady na preskúmanie účinkov výbuchu slúžila lekárska správa a fotodokumentácia. Príkladom môže byť štúdia [1], v ktorej autori uvádzajú, že najčastejšie poranenia spôsobené pyrotechnikou sa vyskytovali na zápästí, rukách a prstoch, nasledovalo oko a tvár. Typickými zraneniami boli popáleniny, pomliaždeniny, povrchové rany a otvorené poranenia. Často sa objavili aj cudzie telesá v oku a poškodenie ucha. Nedostatok klinických údajov však komplikovalo analýzu vzťahu medzi druhom pyrotechniky, mechanizmom poranenia a jeho následkami (napr. slepota). Autori v článku [2], taktiež vychádzali z reálnych prípadov, a teda využili retrospektívny súbor prípadov od roku 2005 do 2015 v počte 295, ktoré poukazovali na zranenia pri používaní zábavnej pyrotechniky. Obdobný problém bol riešený aj v [3], kde sa autori zamerali na hlavné príčiny úrazov, ktorými môže byť nesprávne použitie zábavnej pyrotechniky, napr. držanie zábavnej pyrotechniky v ruke počas zapáľovania, upravovanie zábavnej pyrotechniky, nedodržanie odstupu od zábavnej pyrotechniky, nesprávne odpálenie zábavnej pyrotechniky, ale aj porucha a tzv. nepredvídateľnosť výbušného zariadenia. Časťou problematiky skúmania ničivých účinkov zábavnej pyrotechniky sa zaoberal aj autor [10]. V experimente použil pyrotechniku kategórií F2 a F3 [11], ktorú pripevnil na model ruky z pracovnej rukavice naplnenej plastelínou. Pyrotechniku kategórie F2 upevnil na ukazovák, pričom zistené zranenia pripomínali popáleniny a otvorené tržné rany. Pri teste kategórie F3 bola pyrotechnika umiestnená do stredu rukavice, simulujúcu zovretú ruku. Autor však upozornil, že tento model nepresne napodobňuje zovretie skutočnej ruky kvôli odlišnej konzistencii materiálu.

## 3. METODICKÝ POSTUP A VÝSLEDKY PRÁCE

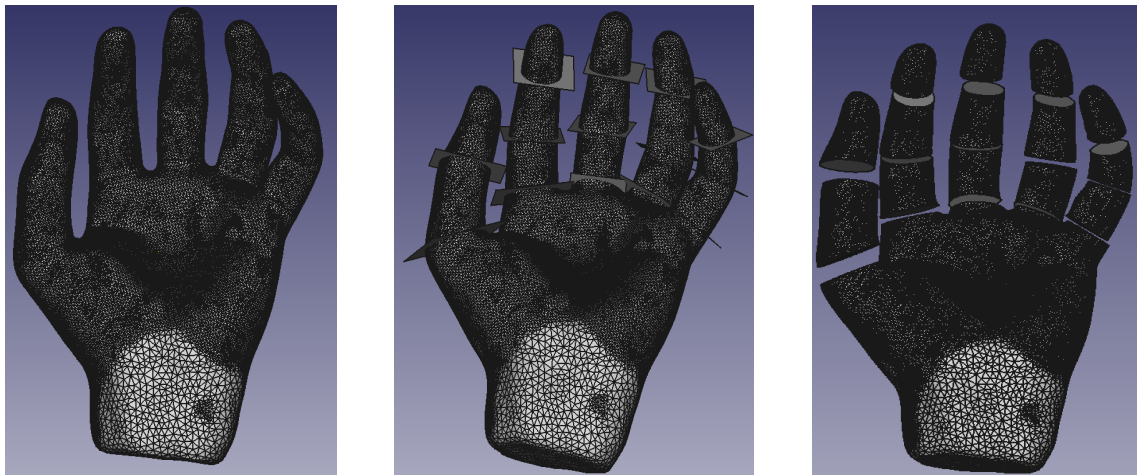
Vývoj modelu ľudskej ruky pozostával z niekoľkých krokov, ktoré možno zhrnúť do 3 významných bodov a to: navrhnutie anatomicky vernej vonkajšej (tkanivovej) časti modelu ruky, navrhnutie biomechanicky vernej kostrovej časti modelu ruky a spojenie týchto dvoch častí dokopy.

### 3.1 Návrh anatomicky vernej vonkajšej časti modelu ruky

Na získanie vonkajšej geometrie ruky bol použitý validovaný model figuríny Hybrid III štandardne používaný v automobilovom priemysle na testy čelných nárazov. Táto figurína, vybavená meracou technikou, je dostupná v troch veľkostiach: 5-percentilná žena a 50- a 95-percentilný muž. Pre výskum bola použitá ľavá ruka figuríny 50-percentilného muža [12]. Pre účely vytvorenia digitálnej vonkajšej geometrie časti ruky, teda 3D model ruky bol použitý ručný 3D skener VIUscan Handyscan 3D. Ide o prenosný laserový skener s vysokým rozlíšením, ktorý umožňuje snímanie textúr a geometrie objektov a ich vykresľovanie. Celkový postup získania modelu ruky a jeho spracovania, s popisom materiálového a softvérového vybavenia je publikovaný v článku [13].

Na zber dát a spracovanie modelu ruky bolo použitých niekoľko softvérových nástrojov a to: program VElements [14], AutoDesk Meshmixer [15] a program FreeCAD [16].

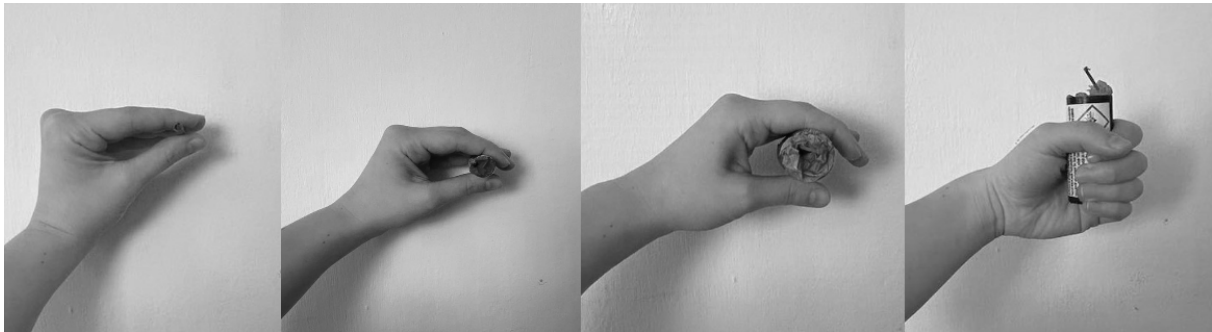
Ďalším krokom bola segmentácia modelu ruky, v rámci ktorej bol každý prst rozdelený na 3 časti - proximálny, stredný a distálny článok a palec na proximálny a distálny článok (Obr. 3). Segmentácia modelu ruky bola vykonaná pomocou programu FreeCAD.



*Obrázok 3 Segmentácia 3D modelu ruky na články, zľava doprava: základný východiskový model ruky, model ruky s rovinami rezu, rozsegmentované prsty a palec [4]*

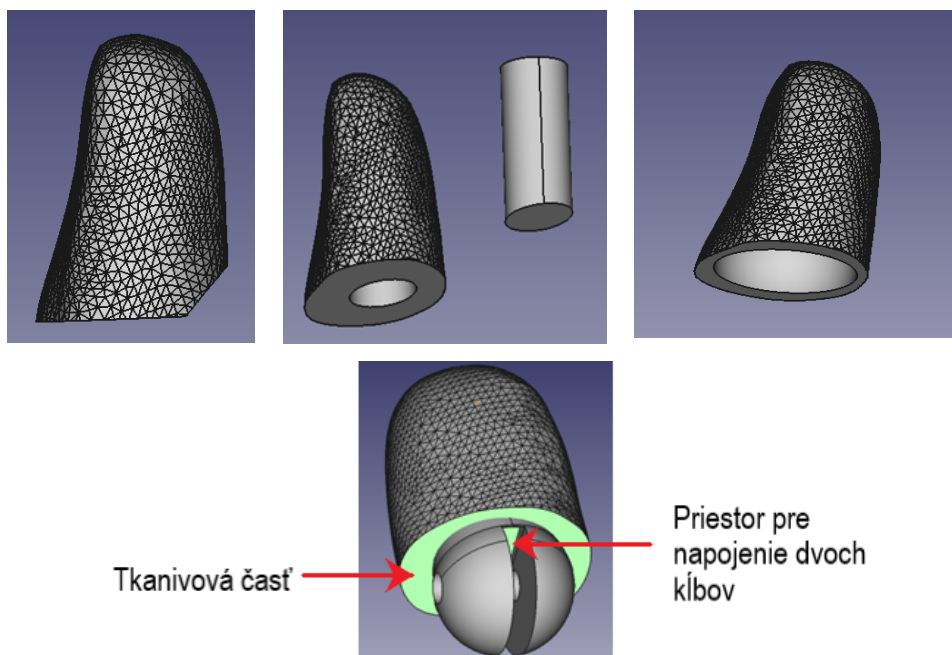
V tomto bode bolo nutné sa vysporiadať s niekoľkými faktami. Teoretické východiská, časť 3.1 Anatómia ruky, poukazujú na funkcie resp. pohybové módy článkov ako je abdukcia, addukcia, flexia, extenzia, cirkumdukcia a pod. Z tohto dôvodu bolo nutné stanoviť pohybové módy navrhnutého modelu ruky. Z kontextu riešeného problému vyplýva,

že pohybové módy, ktoré model ruky má zohľadňovať sú najmä flexia a extenzia. Hlavne z dôvodu, že úchop predmetov (resp. pyrotechnických výrobkov) a zovretie dlane značne zabezpečujú pohybové módy extenzia a flexia prstov a palca. Požadované ručné úchopy sú znázornené na nasledujúcom Obr. 4.



*Obrázok 4 Požadované úchopy modelu ľudskej ruky [4]*

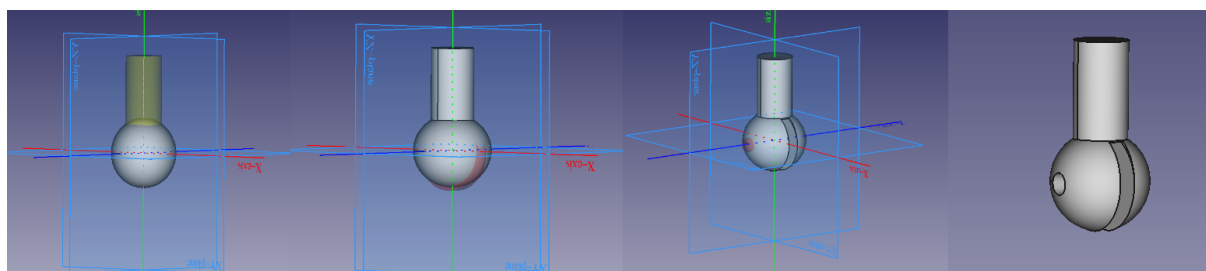
Aby tkanivová časť bola pripravená na biomechanický pohyb, použili sa ďalšie rezy v predpripravených článkoch. Ďalej boli jednotlivé články upravené tak, aby v nich vznikol priestor na vloženie kostrovej časti, ktorá bude bližšie popísaná v podkapitole 3.2 (Obr. 5).



*Obrázok 5 Príklad úpravy článku a vytváranie priestoru v článku pre kostrovú časť ruky [4]*

### **3.2 Návrh biomechanicky vernej kostrovej časti modelu ruky**

Návrh a modelovanie kostrovej časti vychádza z vytvárania aditívnych geometrických tvarov (guľa a valec) v softvérovom nástroji FreeCAD (Obr. 6). Návrh kostrovej časti zohľadňoval a vychádzal z údajov uvedených v Tab. 1.



Obrázok 6 Základ pre tvorbu kostrovej časti prstov a palca pomocou aditívnych a subtraktívnych útvarov v softvérovom nástroji FreeCAD [4]

Po spracovaní predbežných dĺžok a širok článkov bolo potrebné vytvoriť spojivo - kĺb, ktorý by zabezpečoval biomechanické aspekty – pohybové módy flexia a extenzia. Dizajn spojiva (kĺbu) bol navrhnutý tak, aby nebol obmedzovaný pri pohybe flexie a extenzie do uhla 90°, čo zabezpečí stanovené úchopy predmetov (viď. Obr. 4). Keďže ide o pohyb palca a prstov smerom k a od dlane bol dizajn spojiva navrhnutý v geometrickom tvare gule pomocou aditívneho tvaru v softvérovom nástroji FreeCAD, kde polomer/priemer gule vychádzal z anatomických údajov (Tab. 1). Po spracovaní predbežného dizajnu kostrovej časti článku a kĺbu sa následne pristúpilo k úpravám pomocou subtraktívnych útvarov, ktoré umožnili vytvoriť otvory potrebné na vloženie a spájanie článkov (viď. Obr. 6).

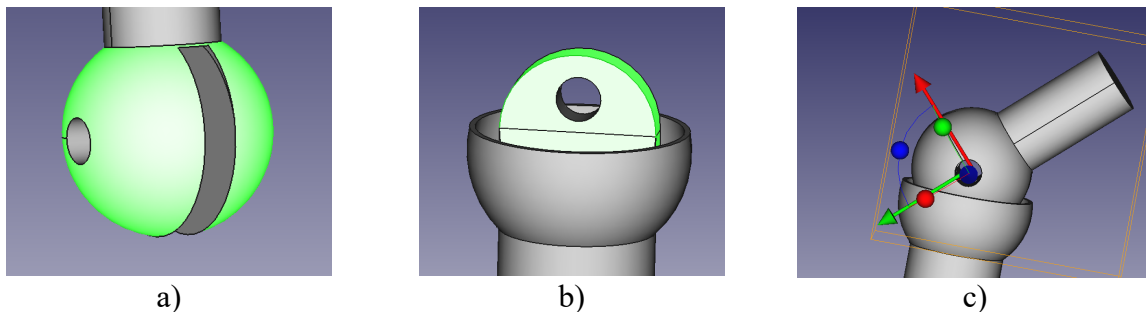
Tabuľka 1 Rozmery tkanivovej časti modelu ruky [4]

	<i>DISTÁLNY ČLÁNOK</i>	<i>STREDNÝ ČLÁNOK</i>	<i>PROXIMALNÝ ČLÁNOK</i>
<i>PALEC</i>	Šírka: 24,3 mm Výška: 31,7 mm	-	Šírka: 24,3 mm Výška: 29,1 mm
<i>UKAZOVÁK</i>	Šírka: 17,7 mm Výška: 23,1 mm	Šírka: 20,95 mm Výška: 28,9 mm	Šírka: 22,38 mm Výška: 26,6 mm
<i>PROSTREDNÍK</i>	Šírka: 16,4 mm Výška: 23,2 mm	Šírka: 19,75 mm Výška: 26,76 mm	Šírka: 18,97 mm Výška: 29,1 mm
<i>PRSTENNÍK</i>	Šírka: 15,67 mm Výška: 22,2 mm	Šírka: 16 mm Výška: 24,25 mm	Šírka: 19 mm Výška: 26,08 mm
<i>MALÍČEK</i>	Šírka: 14,57 mm Výška: 18,7 mm	Šírka: 14,81 mm Výška: 21,6 mm	Šírka: 17,7 mm Výška: 22,7 mm

Spojivo (kĺb) bolo vytvorené z dvoch dielov, ktoré sú zobrazené na Obr. 7. Obrázok 7 a) prezentuje prvý diel – časť distálneho kĺbu v distálnom článku prsta, do ktorého je následne vložený druhý diel – časť stredného kĺbu v strednom článku prsta. Prvý diel mal tvar gule,

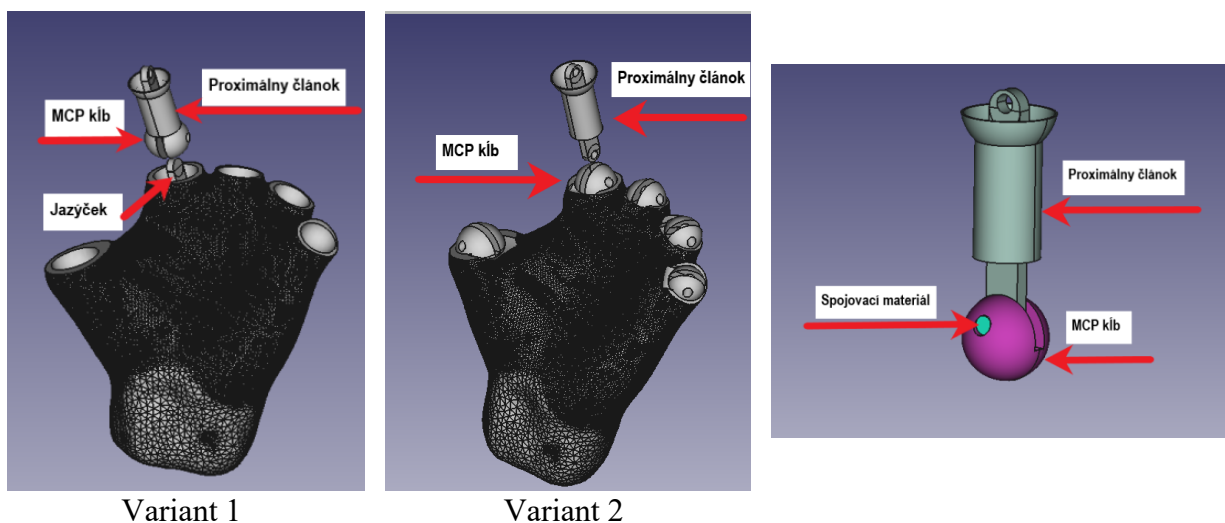


ktorá má otvor pre vloženie druhého dielu. Druhý diel sa skladá z dvoch častí – kváder a polkruh – tzv. jazýček (Obr. 7 b)). Po ich vzájomnom a vhodnom spojení (napr. skrutkou prechádzajúcou cez vytvorené otvory), dokážu dva diely vytvoriť pohyby flexia a extenzia (Obr. 7 c)).



Obrázok 7 a) kĺbová časť distálneho článku, b) kĺbová časť stredného článku, c) vzájomné spojenie a) a b) [4]

Nasledujúca časť je venovaná dlani ruky. Dľaň obsahuje len anatomicky vernú náhradu modelu ľudskej ruky. Model dlane v tomto prípade neobsahuje kostrovú časť, resp. zápästné a záprstné kosti. Čo však bolo vytvorené ako časť kostry, je napájanie MCP kĺbov do dlane a taktiež otvor pre čap, aby zápästie bolo aspoň z časti biomechanicky verné. Čap z časti nahrádzal zápästné kosti, a tým sa vytvoril pohyb ulnárnej a radiálnej dukcie, a cirkumdukcia. Na nasledujúcom obrázku (Obr. 8) sú uvedené dva varianty napojenia článkov na dľaň ruky. Prvý variant je navrhnutý tak, že dľaň neobsahuje MCP kĺb, teda nie je jej súčasťou, pričom druhý variant obsahuje MCP kĺb, do ktorého je vkladaný tzv. jazýček s proximálnym článkom.

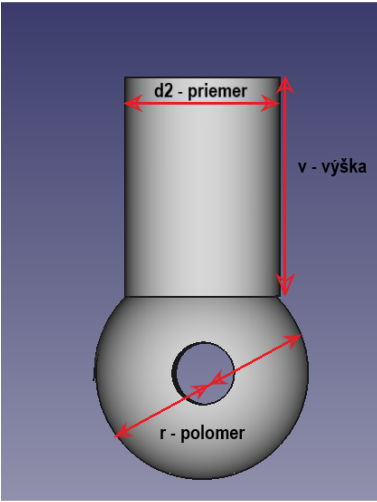


Obrázok 8 Varianty dizajnu dlane modelu ľudskej ruky a detail kosti s kĺbu [4]

V nasledujúcich tabuľkách (Tab. 2 až Tab. 5) sú uvedené parametre a vizuálne zobrazenie jednotlivých článkov.

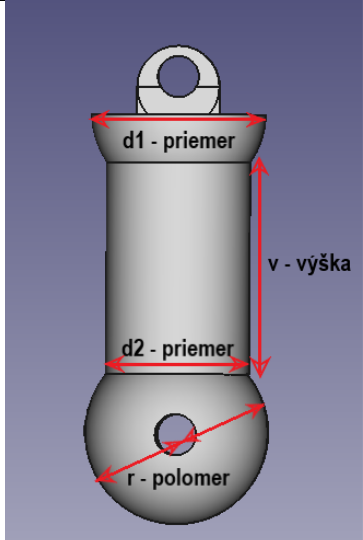
Legenda: **r** – polomer, **d1** – priemer telesa 1, **d2** – priemer telesa 2, **š** – šírka, **p** – proximálny, **v** – výška, **v2** – výška, **D** – distálny článok, **S** -stredný článok, **P** – proximálny článok, **1** – palec, **2** – ukazovák, **3** – prostredník, **4** – prstenník, **5** – malíček.

Tabuľka 2 Rozmery pre distálny článok [4]

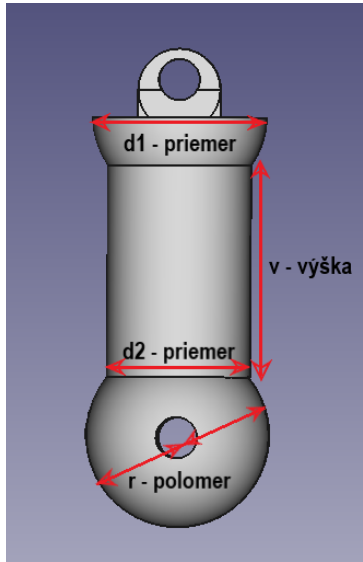
OBRÁZOK/DIZAJN ČLÁNKU	OZNAČENIE ČLÁNKU	ROZMERY TELIES	
		GULA (distálny kĺb - DIP) <i>r</i> [mm]	VALEC (distálny článok) <i>š/v</i> [mm]
	<b>D1</b>	9	š – 10
			v – 18
	<b>D2</b>	7	š – 10
			v – 19
	<b>D3</b>	7	š – 10
			v – 20
	<b>D4</b>	6	š – 10
			v – 21
	<b>D5</b>	6	š – 10
			v – 17

Tabuľka 3 Rozmery pre stredný článok [4]

OBRÁZOK/DIZAJN STREDNÉHO ČLÁNKU	OZNAČENIE ČLÁNKU	ROZMERY TELIES		ROZMERY OTVOROV
		GULA (stredný kĺb - PIP) <i>r</i> [mm]	VALEC (stredný článok) <i>d2/v</i> [mm]	GULA (otvor pre distálny kĺb - DIP) <i>d1</i> [mm]
	<b>S1</b>	r - 8	d2 – 6	d – 7,5
			v - 28	
	<b>S2</b>	r - 8	d2 – 6	d1 – 7,5
			v – 24	
	<b>S3</b>	r - 7,5	d2 – 6	d1 – 6,5
			v – 29	
	<b>S4</b>	r - 7	d2 – 6	d1 – 6,5

			v – 22	
---	--	--	--------	--

Tabuľka 4 Rozmery pre proximálny článok (Variant 1) [4]

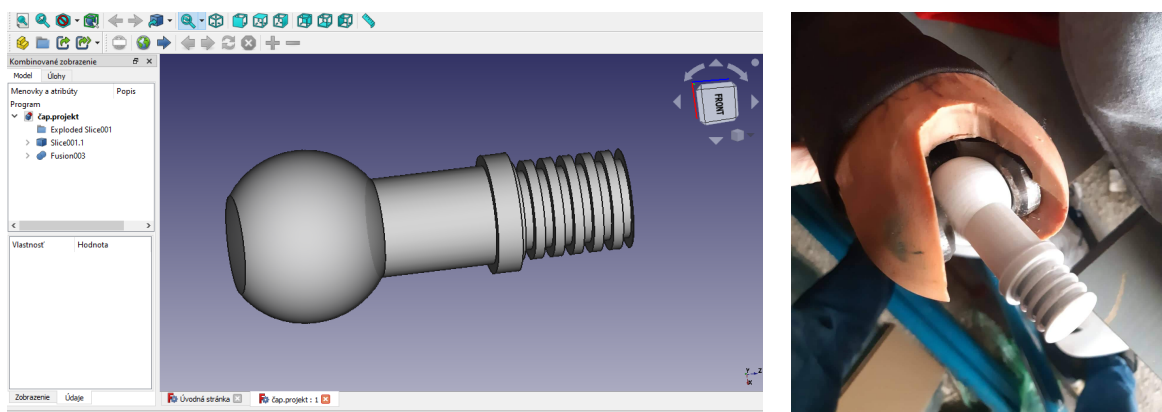
<p>OBRÁZOK/DIZAJN PROXIMÁLNEHO ČLÁNKU</p> 	<p>OZNAČENIE ČLÁNKU</p>	<p>ROZMERY TELIES</p>		<p>ROZMERY OTVOROV</p>
		<p>GULA (MCP kĺb) r [mm]</p>	<p>VALEC (proximálny článok) d2/v [mm]</p>	<p>GULA (otvor pre stredný kĺb – PIP) d1 [mm]</p>
	<b>P1</b>	r – 10	d2 – 7	d1 – 10
	<b>P2</b>	r – 9	v – 25	d1 – 8,5
	<b>P3</b>	r – 8,5	d2 – 7	d1 – 8,5
	<b>P4</b>	r – 8	v – 27	d1 – 8
	<b>P5</b>	r – 8	d2 – 7	d1 – 7,5
			v – 26	
			v – 22	

Tabuľka 5 Rozmery pre proximálny článok (Variant 2) [4]

<p>OBRÁZOK/DIZAJN PROXIMÁLNEHO</p>	<p>OZNAČENIE ČLÁNKU</p>	<p>ROZMERY TELIES</p>	<p>ROZMERY OTVOROV</p>
------------------------------------	-----------------------------	---------------------------	----------------------------

ČLÁNKU			
		VALEC (proximálny článok) $d2/v$ [mm]	GULA (otvor pre stredný kĺb – PIP) $d1$ [mm]
		P1	$d2 - 7$ $v - 15$
P2	$d2 - 7$ $v - 19$	$d1 - 8,5$	
P3	$d2 - 7$ $v - 19$	$d1 - 8,5$	
P4	$d2 - 7$ $v - 11$	$d1 - 8$	
P5	$d2 - 7$	$d1 - 7,5$	

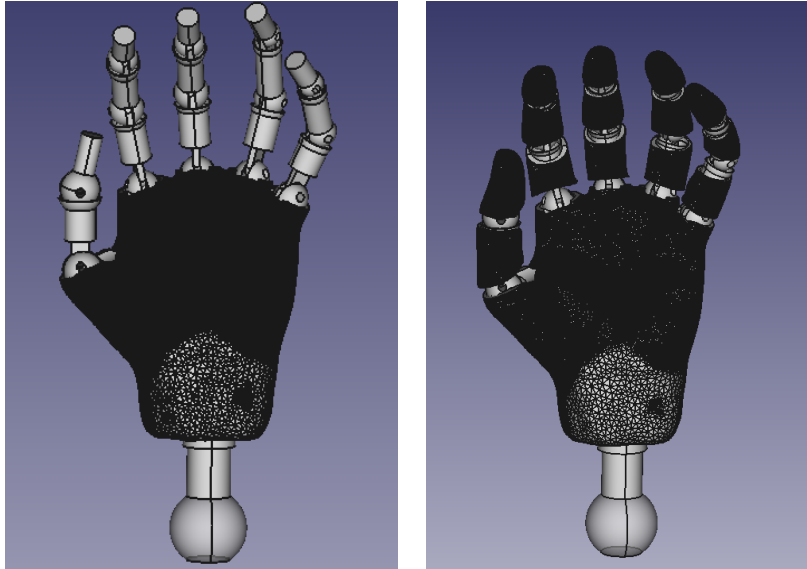
Pre účely spojenia navrhutej ruky s predlaktím, bol reverzným inžinierstvom navrhnutý a na 3D tlačiarňi vytvorený čap, ktorý predstavuje v zjednodušenej verzii zápästný kĺb. Návrh modelu čapu, vytlačenie modelu na 3D tlačiarňi a otestovanie jeho funkčnosti v kĺbe existujúcej figuríny je zobrazené na Obr. 9.



Obrázok 9 Návrh modelu čapu, vytlačenie modelu na 3D tlačiarňi a otestovanie jeho funkčnosti v kĺbe existujúcej figuríny

### 3.3 Výsledný model ruky

Na nasledujúcom Obr. 10 je zobrazený výsledný 3D model nahrnutej ruky, vytvorený spojením tkanivovej časti ruky prezentovanej v podkapitole 3.1 a kostrovej časti ruky prezentovanej v podkapitole 3.2.



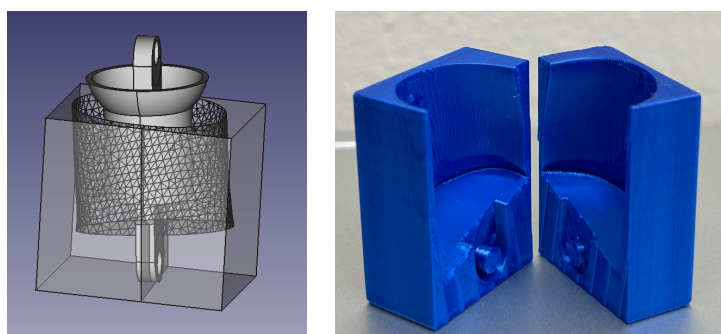
*Obrázok 10 Kostrová časť návrhu náhrady modelu ľudskej ruky (naľavo) a vizuálny pohľad na kompletný model ľudskej ruky (napravo) v programe FreeCAD [4]*

Po vložení kostrovej časti do tkanivovej nasledovala úprava pomocou transformácie, ktorou sa jednotlivé časti do seba vložili podľa potreby a najmä uhla (tak, aby nedošlo v presahu kosti cez tkanivo). Následne sa transformované telesá vhodnou operáciou spojili, čo umožnilo zlúčenie dvoch telies do jedného. Pre účely 3D tlače, prípadne odlievania, ktoré umožnia transformovanie digitálneho modelu ruky do fyzickej podoby, boli vytvorené viaceré varianty segmentov po článkoch – distálne, stredné a proximálne, a najväčšia časť ruky - dlaň. V nadväzných činnostiach bola vyvíjaná snaha o prevedenie modelu ruky do fyzickej podoby, predovšetkým pre potreby zistenia či navrhnutý model, plní funkciu, ktorá bola pôvodne očakávaná. V tomto bode je dôležité podotknúť, že celá problematika ohľadom 3D tlače ruky, prípadne jej odlievania, si vyžaduje pomerne veľkú pozornosť (z pohľadu výberu materiálu, nastavenia tlače, vysporiadania sa s problémami pri tlači, taktiež z pohľadu výberu a navrhnutia vhodného spojovaného mechanizmu medzi kĺbmi), a preto bude predmetom skúmania budúcich výskumných úloh. Na demonštráciu funkčnosti navrhutej ruky bol digitálny model vytlačený na 3D tlačiarni (Prusa MINI [17] a QIDI i FAST [18]) pomocou materiálu PLA (polylactic acid) a materiálu TPU (termoplastický polyuretán) (viď. Obr. 11).



*Obrázok 11 Rôzne prototypy modelu ľudskej ruky vytlačené na 3D tlačiarňi [4]*

Taktiež boli v rámci práce vymodelované odlievacie formy pre jednotlivé segmenty prstov, ktoré umožnia v budúcej j činnosti a pokračovaní v problematike ich odlievania. Príklad jednej formy na odlievanie článku je zobrazený na Obr. 12.



*Obrázok 12 Naľavo: Odlievacia forma navrhnutá v programe FreeCAD, napravo: odlievacia forma vytlačená na 3D tlačiarňi Prusa MINI [4]*

## 4. NÁVRH A REALIZÁCIA EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ

Napriek tomu, že mechanické vlastnosti prototypu modelu ruky sa z časti odlišujú od mechanických vlastností ruky ľudského subjektu, článok predstavuje metodiku skúmania účinkov výbuchu, v tomto prípade zábavnej pyrotechniky, ktorej výbuch predstavuje rýchle uvoľnenie energie, ktoré spôsobuje porušenie okolia sprevádzané prudkým nárastom tlaku a ďalšími efektmi (zvukovými, svetelnými, tepelnými) [19]. Navrhnutá metodika sa zameriava na meranie zrýchlenia, z ktorého sa nepriamo počíta silové pôsobenie na simulant ruky počas výbuchu. Na Obr. 13 a Obr. 14 je znázornený merací systém a situácia na mieste merania.



*Obrázok 13. Situácia na mieste merania s rozloženou meracou technikou a pomôckami: 1 - PCB Piezotronics 3503C2060KG, 2 - Picoscope 4424, 3 - Meggit Endevco 136, 4 – rýchloběžná kamera, 5 – laptop na zber dát [4]*

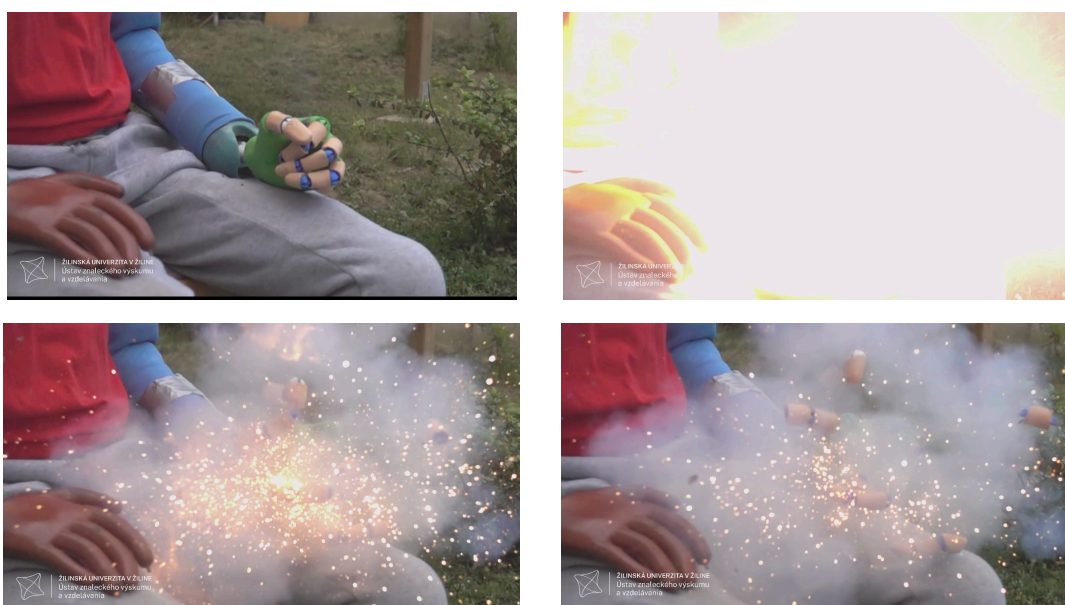
Na simulant ľudskej ruky bol pripojený 3-osí piezorezistívny akcelerometer PCB Piezotronics 3503C2060KG [20] (Obr. 14), ktorý meria zrýchlenie až do 60 000 g. Údaje boli spracované pomocou prístrojov (Picoscope 4424 [21], Meggit Endevco 136 [22]) a pracovného laptopu, kde analógový signál prešiel konverziou na digitálne dáta určené na ďalšie vyhodnotenie.



Obr. 14 Simulant ruky použitý pri testovaní (test č. 1) a detail na umiestnenie senzora zrýchlenia (PCB Piezotronics 3503C2060KG) [4]

#### 4.1 Vykonanie experimentálneho skúmania ničivých účinkov zábavnej pyrotechniky kategórie F3

Do ruky skúšobnej figuríny s dĺžkovými a hmotnostnými parametrami 50%ilného mužského subjektu (Obr. 14), ktorá bola umiestnená na stoličke v sediacej polohe vo výške 0,5 m od zeme, bola vložená zábavná pyrotechnika kategórie F3 s obsahom pyrotechnickej zložky 0,8 g. Ruka bola v prirodzenej polohe vo výške 0,6 m od zeme. Pri teste č. 1 bol použitý model ruky vytlačený na 3D tlačiarňi, pričom dlaň ako aj celá kostrová časť ruky boli vytlačené z materiálu PLA modrej a zelenej farby (Prusament PLA) a tkanivová časť bola vytlačená z materiálu TPU béžovej farby (Recreus Filaflex 60A PRO) (viď. Obr. 14). Pribeh výbuchu pyrotechniky (test č. 1) bol zaznamenaný pomocou rýchlobežnej kamery (Obr. 15).







Obrázok 15. Priebeh výbuchu zábavnej pyrotechniky v zovretej dlani (kategória F3) v časovom kroku 0,025 s (zľava doprava, zhora nadol) [4]

## 4.2 Vykonanie experimentálneho skúmania ničivých účinkov zábavnej pyrotechniky kategórie F2

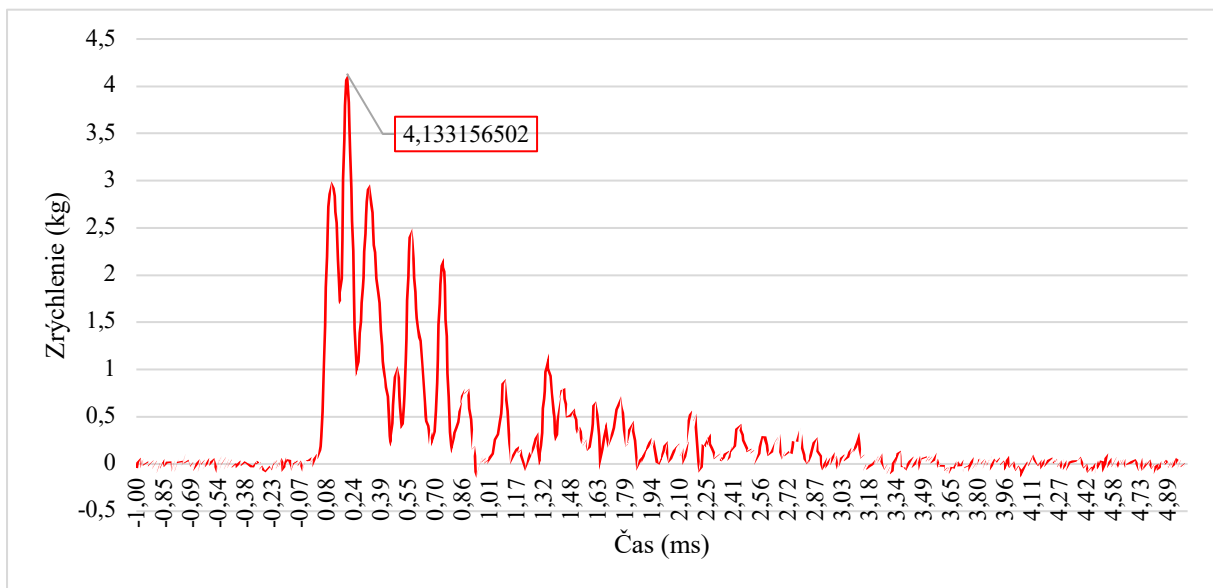
Test č. 2 bol z pohľadu meracej techniky a metodiky merania zrealizovaný obdobne ako test č. 1. Figurína mala v tomto prípade v dlani vloženú pyrotechniku kategórie F2 s obsahom pyrotechnickej zložky 0,5 g. Pri teste č. 2 bol použitý model ruky vytlačený na 3D tlačiarňi, pričom dľaň ako aj celá kostrová časť ruky boli vytlačené z materiálu PLA čiernej a zelenej farby značky (Prusament PLA) a tkanivová časť bola pri niektorých článkoch vytlačená z materiálu PLA čiernej farby (Prusament PLA) a pri niektorých článkoch vytvorená pomocou odlievania bielym silikónom (Shore A 25). Detail modelu ruky je viditeľný na 1. obrázku Obr. 16. Priebeh výbuchu pyrotechniky v zovretej dlani bol zaznamenaný pomocou rýchlobežnej kamery (Obr. 16).



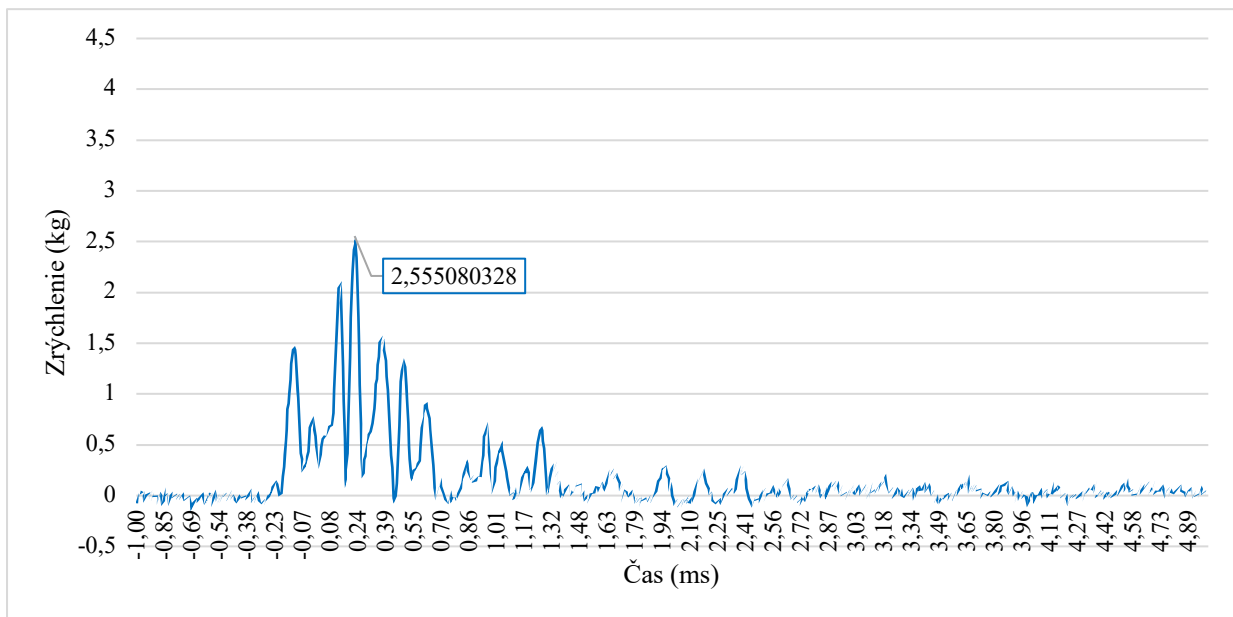
Obrázok 16. Priebek výbuchu zábavnej pyrotechniky v zovretej dlani (kategória F2) v časovom kroku 0,025 s (zľava doprava, zhora nadol) [4]

### 4.3 Zhodnotenie výsledkov merania

Pomocou aplikácie meracieho systému na meranie zrýchlenia bolo zaznamenané a dosiahnuté maximálne zrýchlenie, ktoré zodpovedá hodnote 4 133,2 g pri teste č. 1, čo je približne 40 505 m/s<sup>2</sup> a 2 555,1 g pri teste č. 2, čo je približne 25 040 m/s<sup>2</sup>. Grafické priebehy celkového zrýchlenia pri výbuchu pri testovaniach sú zobrazené na Obr. 17 a Obr. 18. Kvalitatívne zhodnotenie poranení spôsobených zábavnou pyrotechnikou kategórie F3 a F2 je možné prirovnať k popáleninám dlane a k amputácií niektorých článkov prsta a palca.



Obrázok 17 Priebeh výbuchu zábavnej pyrotechniky kategórie F3



Obrázok 18 Priebeh výbuchu zábavnej pyrotechniky kategórie F2

Experimentálne testy, v počte 2 pokusy nebolo možné porovnať, pretože boli použité rôzne nálože na dvoch rozdielnych modeloch rúk z pohľadu použitého materiálu na ich výrobu. Testy však preukázali ničivé účinky zábavnej pyrotechniky. Hoci bol model ruky ľahší o 0,117 g oproti ruke 50%-ilného mužského ľudského subjektu, predpokladá sa, že aj pri ťažšom modeli by výsledok zahŕňal amputáciu prsta alebo palca. Navyše, popáleniny v okolí ruky naznačujú, že nálož F3 ovplyvňuje nielen ruku, ale aj blízke objekty, resp. iné časti tela poškodeného. Zrealizované testy predstavujú prvotný krok kvantifikácie zraňujúcich účinkov zábavnej pyrotechniky na fyzickom simulante ľudskej ruky ako aj odhad využiteľného meracieho rozsahu senzorov zrýchlenia, čo bude v ďalšej práci slúžiť pre optimálne nastavenie meracieho systému.

## **5 ZÁVER**

Predložený článok mal za cieľ odprezentovať vytvorenie návrhu biomechanicky a anatomicky vernej náhrady ľudskej ruky pre účely skúmania ničivých účinkov výbuchov zábavnej pyrotechniky. Pri dizajne modelu ruky sa pracovalo s viacerými voľne dostupnými softvérovými podporami a dostupným materiálovým vybavením. Navrhnutý prototyp modelu ruky vo svojej aktuálnej podobe predstavuje slušný základ na nadviazanie problematiky a pokračovaní v téme. Konštatuje sa, že cieľ bol naplnený čiastočne a celá problematika si vyžaduje ďalšie skúmanie. Výsledky experimentálnych testov v počte dva pokusy predstavujú prvotný krok kvantifikácie dynamického účinku zábavnej pyrotechniky na ľudskú ruku a navrhnutá metodika testovania a testovací materiál majú do budúcnosti potenciál pri realizácii ďalších meraní na finálnom modeli ruky. Takéto výstupy môžu mať následne významný dopad najmä v oblasti skúmania ničivých účinkov voľne dostupných pyrotechnických výrobkov na simulant ľudskej ruky a význam pri nadviazaní na problém týkajúci sa kvantifikácie zraňujúcich účinkov výbušnín.

## **POĎAKOVANIE**

Tento príspevok bol vyprodukovaný z diplomovej práce: „*Návrh náhrady ľudskej ruky a jej experimentálne testovanie pod vplyvom ničivých účinkov vysoko-dynamických dejov*“ [4] a podporený Agentúrou pre podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0626. Tento príspevok bol vypracovaný v rámci projektu APVV-20-0626: Biomechanicky verná náhrada ľudskeho tela pre zvýšenie objektivity forenznnej analýzy cestných dopravných nehôd.

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] **CANNER, JK. et al. 2014.** *US emergency department visits for fireworks injuries, 2006-2010.* In: The Journal of surgical research [online]. 2014, 190(1), s.305-311. [cit. 25-11-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.03.066>
- [2] **BRINKLEY, K. S. et al. 2017.** *Fireworks type, injury pattern, and permanent impairment following severe fireworks-related injuries.* In: American Journal of Emergency Medicine [online]. 2017, roč. 35, č.10, s. 1469-1473. [cit. 10-10-2023]. ISSN 0735-6757. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2017.04.053>
- [3] **AL-QATTAN, MM. – AL TAMIMI, A.S. 2009.** *Localized hand burns with or without concurrent blast injuries from fireworks.* In: Burns: journal of the International Society for Burn Injuries [online]. 2009, 35(3), s. 425-429. [cit. 25-11-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.burns.2008.06.015>
- [4] **DEJOVÁ, N. 2024.** *Návrh náhrady ľudskej ruky a jej experimentálne testovanie pod vplyvom ničivých účinkov vysoko-dynamických dejov.* [diplomová práca]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, 2021. 91s.
- [5] **ČIHÁK, R.** *Anatomie I.* Tretí, uravené a doplnené vydanie. Praha: Grada Publishing, spol. s.r.o., 2011. 552 s. ISBN 978-80-247-3817-8.
- [6] **e-NABLE. 2024.** *ENABLING THE FUTURE* [online]. Enablingthefuture. [cit. 12-12-2023]. Dostupné na: <https://enablingthefuture.org/>
- [7] **PATEL, A. a et al. 2021.** *Engineering a Functional and Affordable Printed Prosthetic Hand.* In: IEEE Xplore [online]. 2021. [cit. 25-11-2023]. DOI: 10.1109/URTC54388.2021.9701648
- [8] **MOHAMMADI, A. et al. 2020.** *A Paediatric 3D-Printed Soft Robotic Hand Prosthesis for Children with Upper Limb Loss.* In: Annu Int Conf IEEE ENg Med Biol Soc [online]. 2020, [cit. 25-11-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMBC44109.2020.9176848>
- [9] **ALKHATIB, F. et al. 2019.** *Design and analysis of flexible joints for a robust 3D printed prosthetic hand.* In: IEEE int Conf Rehabil Robot [online]. 2019, roč. 16, s. 784-789. [cit. 25-11-2023]. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICORR.2019.8779372>
- [10] **VRBIČAN, J. 2021.** *Zneužitie pyrotechnických výrobkov ako náloží NVS.* [bakalárska práca]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, 2021. 53s.
- [11] **Nariadenie vlády č. 70/2015 Z. z. o sprístupňovaní pyrotechnických výrobkov na trhu.**

- [12] **LIU, Z. – ZHANG, X. – SHI, Y. – HONG, CH.** Notice of Retraction: Prediction of neck deceleration characteristic of Hybrid III 5th Female Dummy based on BP neural network method, In 3. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY 2010*. China: Chengdu, 2010. s. 626-629. [cit. 2022- 10- 26]. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2010.5564123>.
- [13] **ADAMOVÁ, V. – KOLLA, E. 2022.** *Aplikácia reverzného inžinierstva v procese vytvárania testovania figuríny pre účely nárazových skúšok*. In: Svet Dopravy, vedecký – recenzovaný online časopis [online]. [cit. 06-12-2024]. Dostupné na: <https://www.svetdopravy.sk/aplikacia-reverzneho-inzinerstva-v-procese-vytvarania-testovacej-figuriny-pre-ucely-narazovych-skusok/>
- [14] **ENVIRONMENTAL EXPERT. (2022).** VxElements – 3D Acquisition Measurement Software Platform and Application Suite. [cit. 6-12-2024]. Dostupné na: <https://www.environmental-expert.com/software/vxelements-3d-acquisition-measurement-software-platform-and-application-suite-830341>.
- [15] **XYZPRINT. (2024).** MeshMixer tutorial pre začiatočníkov 3D tlače. Časť 2. [cit. cit. 06-12-2024]. Dostupné na internete: <https://xyzprint.eu/aktuality/meshmixer-manual-cast2.html>.
- [16] **SOURCEFORGE. (2024)** FreeCAD. [cit. 06-12-2024]. Dostupné na internete: <https://sourceforge.net/projects/free-cad/>.
- [17] **PRUSA 3D. (2022).** 3D tlačiarne: Original Prusa MINI+. [cit. 06-12-2024]. Dostupné na internete: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/castecne-sestavena-3d-tiskarna-original-prusa-mini-4/>.
- [18] **QIDI. 2024.** QIDI iFAST 3D tlačiareň s duálnym extrúderom pre dvojfarebnú tlač. [online].[cit. 06-12-2024]. Dostupné z : <https://www.melgo.sk/3d-tlaciarne/qidi-i-fast-3d-printer/>
- [19] **JANGL, Š. a kol. 2021.** *Výbušniny a ochrana pred ich deštruktívnymi účinkami II.Časť: Účinky výbuchu na objekty a ochrana pred nimi*. 1.vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2021. 245 s. ISBN 978-80-554-1812-4.
- [20] **PCB Piezotronics 3503C2060KG. 2024.** [online]. PCB PIEZOTRONICS An AMPHENOL COMPANY. [cit. 06-12-2024]. Dostupné na: <https://www.pcb.com/sensors-for-test-measurement/accelerometers/piezoresistive-shock/smt-surface-mount>
- [21] **PicoScope 4424A. 2024.** [online]. PicoTechnology. [cit. 06-12-2024]. Dostupné na: <https://www.picotech.com/oscilloscope/4000/picoscope-4000-series>
- [22] **Endevco 136. 2024.** [online]. Evolution Model 136. [cit. 06-12-2024]. Dostupné na: <https://www.evolutionmeasurement.com/wp-content/uploads/2017/10/136.pdf>