

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



**Vývoj inovativních řešení nedestruktivního
zkoušení produktů aditivní výroby pro AČR**

Habilitační práce

Zpracoval: Dipl.-Ing. Alexander ILKSTRÖM KRAVCOV, Ph.D.

PRAHA 2024

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

Výtisk č.: 1

Počet stran: 101

ČVUT v Praze

Czech Technical University in Prague

Fakulta stavební

Faculty of Civil Engineering

Katedra technologie / K-
112

Department of construction technology

Název práce:

Vývoj inovativních řešení nedestruktivního
zkoušení produktů aditivní výroby pro AČR

Název práce (AJ):

Innovative solutions for NDT testing of the
products of additive manufacturing for Czech
Armed Forces

Klíčová slova:

Nedestruktivní zkoušení (NDT), Aditivní
výroba, Kompozitní materiály Širokopásmová
ultrazvuková strukturoskopie, Balistika, Náhradní
díly, Vojenská technika, Vojenská logistika

Klíčová slova (AJ):

Non-destructive testing (NDT), Additive
manufacturing, Composite structures,
Laserultrasonic defectoscopy, Spear parts, Army
supply, Army Readiness & Logistics,

PŘEDMLUVA

Práce je tematicky zaměřena na problematiku analýzy, návrhu a aplikace moderních inovativních metod nedestruktivního zkoušení materiálů a na konstrukci, kterou jsem se v posledních deseti letech intenzivně vědecky zabýval se spolupracovníky jak na pracovišti Katedry technologie staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze, tak s kolegy z Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany v Brně.

První část práce (kapitoly 1 a 2) se věnuje dosaženým výsledkům v oblasti nedestruktivního zkoušení perspektivních materiálů. Zvláštní důraz je kladen na analýzu a popis stávajících metod nedestruktivního zkoušení (NDT) a jejich porovnání s laserovou ultrazvukovou strukturoskopií, zejména při kontrole tenkých kompozitních dílů. Tento přístup je důležitý, zejména když se pracuje s materiály, které mohou mít komplexní struktury, a běžně užívané metody mohou narazit na určité omezení, neboť standardní ultrazvuková zkušební zařízení mají slepé pásmo v důsledku složitého podlouhlého tvaru ultrazvukového pulzu.

Druhá část práce (kapitoly 3, 4, 5 a 6) pak shrnuje výsledky analýzy a aplikace kontaktní laserové ultrazvukové strukturoskopie při zkoumání vnitřní struktury kompozitních materiálů. Tato metoda může poskytnout detailní pohled na vnitřní charakteristiky materiálů, což je klíčové zejména při práci s kompozitními materiály, kde může být důležité identifikovat a analyzovat strukturální vlastnosti.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce by jen velmi těžko vznikla bez neocenitelné podpory řady úžasných lidí.

Nejprve bych chtěl poděkovat mé rodině. A to jak mým rodičům, kteří mi umožnili studium na ČVUT v Praze, tak mé ženě Katerině, která mi poskytla prostor pro tvorbu této práce a tolerovala velké množství času, jež jsem této práci věnoval, často na úkor společně stráveného času.

Předložená práce představuje průřez řadou témat ve vazbě na provádění pokročilého nedestruktivního zkoušení materiálů pomocí laser-ultrazvukové strukturoskopie, na nichž jsem měl možnost v uplynulých 10 letech pracovat. Chtěl bych tak poděkovat spolupracovníkům z ČVUT i kolegům z UNOB za množství hodin strávených podnětnými diskusemi nad výsledky společné práce.

Zapojených lidí do řešení této problematiky je mnoho a není možné je zde všechny zmínit. Nicméně rád bych zejména chtěl poděkovat bývalým kolegům Ing. Michalovi Písaříkovi, Ph.D., z Fyzikálního ústavu AV ČR – Centrum HiLASE a prof. Ing. Vladimírovi Křístkovi, s nimiž jsme toto téma začínali na ČVUT společně řešit. Dále pak mé poděkování patří doc. Ing. Pavlovi Svobodovi, CSc., za jeho neúnavný přístup a obrovské množství společně strávených hodin nad výzkumem v této oblasti. Mé poděkování patří rovněž mým kolegům na Univerzitě obrany v Brně, bez celého týmu lidí, zabývajících se obdobnou problematikou, a bez přátelské atmosféry jak na ČVUT, tak na UO v Brně by nebylo možné toto téma rozvíjet a pravděpodobně by nevznikla ani tato práce.

Děkuji vedoucím pracovníkům Fakulty stavební ČVUT v Praze, kteří do mě vložili důvěru ve vedení řady projektů MV ČR, EDA a EDF, kde byla či je řešena popisovaná problematika, a kolegovi pplk. doc. Zbyňkovi Studenému, Ph.D., se kterým jsem habilitační práci během její tvorby průběžně konzultoval.

OBSAH

ÚVOD.....	5
1 Nasazení inovačních technologií výroby napříč obranným sektorem	9
2 Nedestruktivní zkoušení a certifikace pro aditivní výrobu. Současný stav poznání	15
2.1 Analýza stávajících metod kontroly kvality produktů vyrobených pokročilé výroby	15
2.2 Možnosti nedestruktivní kontroly součásti pomocí širokopásmové ultrazvukové strukturoskopie a zařízení pro jeho provádění	20
2.3 Bezkontaktní ultrazvukové metody	21
2.4 Laserová ultrazvuková defektoskopie.....	22
2.5 Cíle habilitační práce.....	26
3 Určení minimálního počtu defektů u perspektivních materiálů	28
3.1 Měření pórozity u kompozitních materiálů zesílených uhlíkovými vlákny pomocí laserové ultrazvukové strukturoskopie.....	28
3.2 Teoretické pozadí pro použití průchodově-přechodové techniky širokopásmové ultrazvukové spektroskopie pro určení pórozity heterogenních materiálů	29
3.3 Experimentální měření místní pórozity kompozitních materiálů pomocí průchodově-přechodové techniky.....	30
3.4 Měření zbytkových napětí slitin pomocí širokopásmové ultrazvukové strukturoskopie	32
3.5 Metody	32
3.6 Experimentální výsledky měření rychlosti podélných akustických vln generovaných pulzním laserem	33
4 Kontrola vnitřních vlastností spojů vytvořených pomocí vícemateriálového aditivního výrobního procesu	36
4.1 Základy použití laser-optické strukturoskopie	36
4.2 Zkoušení vázaných spojů vytvořených za použití AM procesu multimateriálové FFF technologie	37
5 Nedestruktivní kontrola kompozitních balistických materiálů	50
5.1 Návrh a výroba vzorků	52
5.2 Balistické zkoušky.....	54
5.3 Výsledky testů	55
5.4 Výsledky laserové ultrazvukové strukturoskopie.....	60

6	Příklady použití laser ultrazvukové defektoskopie a kombinované techniky při NDT zkoušení vojenského materiálu.....	63
6.1	Kontrola platforem UAV. Metody a materiály	63
6.2	Nedestruktivní zkoušení svaru vysokopevnostní oceli metodou laser-ultrazvukové strukturoskopie	68
6.3	Vliv procesu třecího svařování FSW pancéřové slitiny AA2519 – T62 a určení kvality spojů slitin laser-ultrazvukovou metodou	72
6.4	Kontrola munice kombinovanou technikou	77
6.4.1	Nedestruktivní kontrola zapalovače PČZ-22A	81
6.4.2	Nedestruktivní kontrola TPH raketových motorů NDSI-2K.....	83
	PŘÍNOSY PRÁCE	285
	ZÁVĚR.....	287
	Bibliografi	89

ÚVOD

K použití náhradních dílů vyrobených za pomoci aditivních (pokročilých) technologií, pro dodávky armádám členských států NATO, je nezbytné zajistit kvalitu a bezpečnost tištěných náhradních dílů, což lze realizovat cestou inteligentní inspekce.

Výhodou je rovněž možnost automatizovat monitorování procesu výroby a kontrolu kvality, což zvyšuje spolehlivost a bezpečnost vytisknutých dílů.

Úkolem inteligentní inspekce, která je předmětem této habilitační práce, je zjistit, zda příslušný náhradní díl nebo systém nemají defekt ve smyslu odchylky od normativních standardů, a pokud se nějaký defekt najde, určit jeho povahu a zjistit, kde se nachází. Právě detekce, identifikace a lokalizace defektů představuje systematizovaný přístup v diagnostice technického stavu testovaného objektu, což bude doloženo v následujících kapitolách.

Navíc umožňuje zvýšit výkonnost logistiky tím, že vojenským jednotkám umožní vyrábět náhradní díly pomocí aditivních výrobních řešení, např. při mnohonárodních operacích.

Primární faktor, který může pomoci racionalizovat procesy i v armádě (resortu MO), a to v celosvětovém měřítku při výrobě a opravě techniky, vidím především v technickém rozvoji, jenž přerostl do vědecko-technické revoluce, dnešními slovy Průmysl 4.0, případně už i 5.0, a přináší obecně zvyšování výkonných parametrů techniky a rozšiřování její typové základny.

To celé má transformační dopad na dnešní ekonomiku a obchodní procesy, a to jak v sektoru informačních systémů, tak mimo něj. Světový průmysl zároveň přechází do nové, automatizované etapy, a to podporuje růst jeho technické složitosti a zkracování inovačních procesů. Rychlejší vývoj technologií umožňuje vojenským silám reagovat na nové hrozby a výzvy s minimálním zpožděním už jen z toho důvodu, že flexibilita a adaptabilita jsou klíčové pro udržení technologické převahy. V ekonomikách mnoha zemí Evropské unie hraje „obrný průmysl“ významnou roli.

Prvním cílem, jenž má být naplněn prostřednictvím AM, je tudíž logistické zabezpečení urychleného používání nástrojů pro 3D tisk pomocí AM při údržbě techniky používané armádami členských států NATO, včetně diagnostiky od vybavení vojáka po leteckou techniku v polních podmínkách. Je třeba zaujmout komplexní přístup počínaje vojenskými standardy, vzděláváním personálu, datovým formátem pro přenos digitálních pasportů tištěných vzorků atd. Tento cíl přinese snížení nároků na čas a sjednocení vzorů a technologií používaných při výrobě produktů prostřednictvím AM se vzory a technologiemi používanými při výrobě pro údržbu techniky.

Vzniká celá řada úkolů pro AM v rámci udržitelnosti, expedice a akvizice; tyto úkoly ukazují širokou škálu možností využití aditivní výroby v různých doménách obranného průmyslu, a to jak samostatně, tak ve spojení s konvenčními výrobními metodami:

1. Výroba dílů standardně vyráběných konvenčními technologiemi. Tento úkol zahrnuje výrobu dílů pomocí tradičních výrobních metod, které nezahrnují aditivní výrobu.
2. AM oprava konvenčně vyráběných dílů. Aditivní výroba může být využita k opravě nebo renovaci konvenčně vyráběných dílů. Tento úkol zahrnuje identifikaci poškozených dílů a jejich opravu pomocí aditivní výroby.

3. Podpora konvenční výroby. AM může být využita k výrobě nástrojů, zařízení nebo dalších komponentů, které podporují konvenční výrobní procesy. To může zahrnovat výrobu speciálních upínacích zařízení, vložek nástrojů nebo jiných pomocných součástí.
4. Prototypování pro rapidní development dílů a systémů. Aditivní výroba umožňuje rychlé prototypování a iterativní vývoj dílů a systémů. Tento úkol zahrnuje využití AM k vytvoření prototypů pro testování a validaci nových designů.
5. Nový artefakt nebo systém navržený pro AM a vyrobený pomocí AM. Tento úkol se zaměřuje na plné využití potenciálu aditivní výroby tím, že nové díly nebo systémy jsou navrženy speciálně pro tento proces a jsou pak vyrobeny pomocí AM. To umožňuje optimalizaci designu pro aditivní výrobu a dosažení optimálních vlastností výrobku.

Za druhé se má jednat o vyhodnocení nejistoty měření produktů vyrobených za využití aditivních technologií. Jelikož k plnění svého poslání využívá nedestruktivní testování různé fyzikální jevy, např. rentgenové záření nebo ultrazvuk, a rozsáhlé výpočetní techniky pro zpracování dat, zaměřovala by se tato část záměru převážně na spolehlivost diagnostického zařízení vnějšího nebo zabudovaného do zařízení AM, což by vedlo k tomu, že hardware bude fungovat podle specifikace OEM prostřednictvím kalibrace, a ke kontinuální kontrole produktů podle českých národních obranných norem.

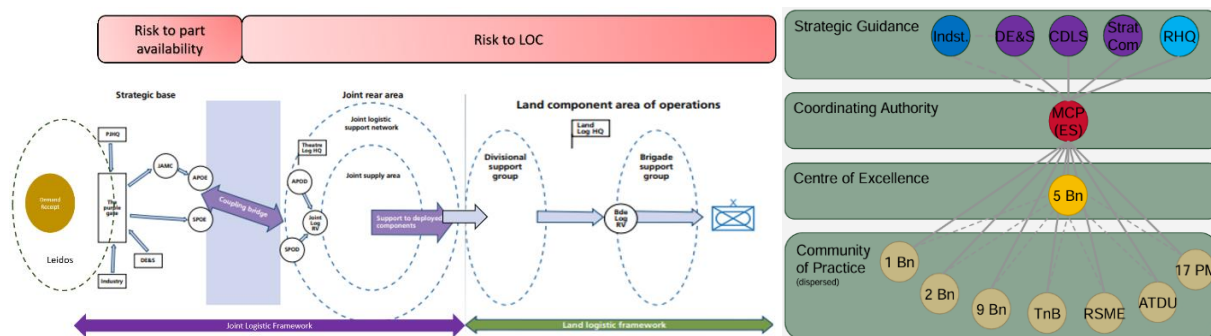
Kalibrace diagnostických zařízení a pravidelné kontroly podle norem jsou kroky, které pomáhají zajistit konzistentnost a spolehlivost měření. Identifikace a testování parametrů měření, včetně testů „in the field“, jsou klíčové pro ověření výkonu zařízení v reálných podmínkách použití, aby se stanovily maximální odchylky. Zkrácení času potřebného k převedení artefaktů do konečného stavu může přinést významné výhody v rychlosti a efektivitě výrobního procesu. Zároveň je důležité zkoumat a minimalizovat odchylky a chyby v měřeních, zejména v prostředí, kde jsou tyto komponenty nasazeny do provozu.

Hlavním přínosem, a to nejen pro průmysl, je zajištění toho, že subsystém TMDE (Test Measurement Diagnostic Equipment) bude jako prvek zařízení AM fungovat tak, jak je stanoveno výrobcem OEM (Original Equipment Manufacturer producer), a mohou být sníženy požadavky na pravidelnou kontrolu při ověřování přesnosti každé součástky. Zvýšení spolehlivosti systémů AM zkrátí dobu produkce od konceptu k výrobním artefaktům převedeným do užívání. Stanovení postupu kalibrace systémů AM může zlepšit výkon a snížit pravděpodobnost chybných tisků.

Jak již bylo zmíněno envisage, cílem nedestruktivního testování je odhad zbytkové životnosti nebo rizika spojeného s dalším využíváním testovaného dílu nebo systému. Přínosem pro AČR je, že vojenské jednotky získají při mnohonárodních operacích možnost používat spolehlivý systém NDT inspekce jako součásti výrobního vybavení pro kritické i nekritické díly. To by mělo následně přinést rychlejší a flexibilnější reakce na neočekávaná poškození, obzvlášť v případě mnohonárodních operací mimo Evropu, kdy se má na LogBase – hlavní základně – řešit operativní zajištění jednotek na předem nastavených pozicích, jak to bylo například poprvé vyzkoušeno americkou armádou v Afganistánu.

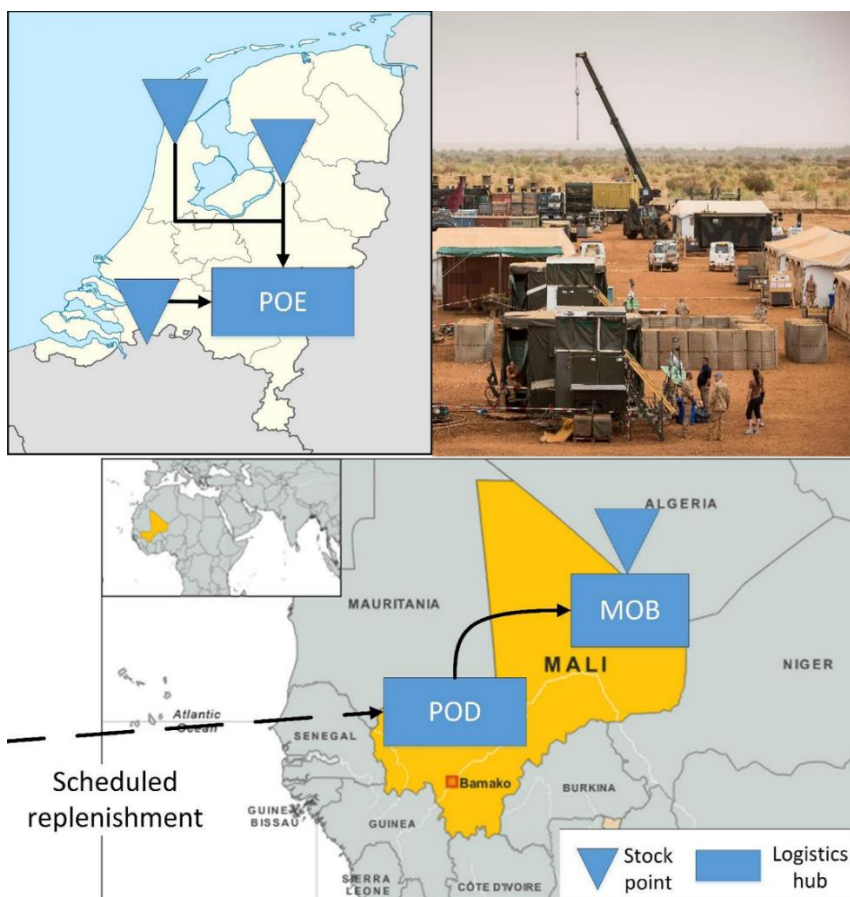
Vytvoření technické základny pro začlenění programu metrologie a kalibrace pro lepší identifikaci a zmírnění rizik spojených s kolísáním komponentů a systému, jelikož zahrnutí programů metrologie a kalibrace do AV projektů je klíčové pro zajištění přesnosti a spolehlivosti vytvořených komponentů. Identifikace a řízení rizik spojených s kolísáním

komponentů a systémů jsou kroky směřující k dosažení lepšího plnění požadavků na řízení kvality. Zvýšení spolehlivosti systémů AM může vést ke zkrácení času při opravě techniky, jelikož spolehlivé systémy pokročilé výroby mohou výrazně zkrátit čas potřebný k opravě techniky.



Obr. 1. Aditivní výroba v Britské armádě. *Futures Directorate. UK Army Headquarters 2023*

Například v Britské armádě (obr. 1) se již řadu let počítá s aditivní výrobou jako součástí kombinovaného přístupu pro zajištění potřeb cestou použití tradičních a inovativních výrobních technologií ke zlepšení produktů, procesů a oprav.



Obr. 2. Umístění 3D výroby v Mali. Z celkového počtu 3 000 dílů u třech typů obrněných vozidel využívaných Královskou nizozemskou armádou bylo pro ověření postupu vybráno 100 kusů. *RNLA Report 2022*

Vytváření náhradních dílů na místě umožňuje rychlou reakci na potřeby na bojišti. Zvýšená spolehlivost a rychlost oprav navíc přispívají k celkové připravenosti jednotek. Velice dobře se

to ukázalo na alternativních nákladech, které implicitně existují v kontextu prostoje dané techniky, jež není provozuschopná, např. během aktivní účasti evropských států pro dosažení operačních cílů v rámci operace Barkhane v Mali (obr. 2). Ve srovnání s pravidelnými zásilkami na vybraných komponentech činily průměrné úspory až 47 %. Z toho se úspory v závislosti na dílu pohybují od 20 % do 61 %. Samotná expedice (pokud využití AM na místě není možné) přináší 9% úsporu, v případě využití AM na místě se dosahovalo až 47% úspor.

1 Nasazení inovačních technologií výroby napříč obranným sektorem

Logistika byla vždy důležitým aspektem válčení (bez zajištění včasného zásobování svých jednotek musel Napoleon opustit Egypt, totéž se výrazně projevilo během Krymské války v letech 1853–1856); postupem času však vývoj válčení, technologie a obchodních praktik od předmoderní éry přes průmyslový a informační věk změnil způsob, jímž je logistika vedena. Pochopení evolučních změn pomáhá formovat vývoj logistických konceptů a poskytuje přehled o tom, jak podporovat spojenecké síly EU (NATO) na misích ve společném nasazení (Battlegroups).

Průmyslová revoluce, která byla zmíněna v předchozím textu, radikálně změnila válčení i logistiku. Industrializace zvýšila rozsah válčení, což je patrné na příkladu obou světových válek, během nichž se musela řešit kvalita vojenské techniky a její údržba zvýšením výroby materiálu a umožněním hromadné branné povinnosti.

Technologický pokrok a masová výroba zvýšily úmrtnost zbraní, zatímco rozvoj dopravy výrazně zvýšil vojenskou mobilitu. V důsledku těchto inovací se vojenské síly zvětšily, poskytly nebývalou palebnou sílu a staly se stále schopnějšími pohybovat se na obrovské vzdálenosti vyšší rychlostí, samozřejmě pod podmínkou zajištění včasné technické podpory.

Průmyslová revoluce také proměnila logistiku z důležitého aspektu války na její nezbytný předpoklad. Schopnost národa využít průmyslové kapacity k rozvoji vojenských schopností byla zásadním faktorem při rozhodování, zda jít do války, nebo ne. Logistické úvahy částečně formovaly další rozhodnutí o tom, kde a kdy zahájit kampaně, jelikož to výrazně záleží na rychlosti a flexibilitě logistiky jako celku. Hlavní operace nemohly být provedeny, dokud logistický systém nezajistil potřebné shromáždění vojáků a zásob. V dnešní armádě schopnost sbírat, ukládat a zpracovávat informace (fenomén BigData – bohužel bez využití AI představuje obrovský problém zpracování velkého množství dat) exponenciálně zvýšila její schopnost pozorovat, orientovat se, rozhodovat a jednat. Pokročilé zbraně, senzory a informační systémy poskytují schopnost lokalizovat nepřítel, soustředit síly a palebnou sílu a zasahovat cíle rychleji a na větší vzdálenosti než kdykoli předtím. Informační systémy postupují tempem, které urychluje plánování a provádění v reálném čase, čímž se zvyšuje poptávka po ještě citlivějším udržování. V tomto prostředí bohatém na data se musíme ujistit, že se nestaneme bohatými na informace a chudými na znalosti.

Nástup nových a revolučních technologií mění paradigma válčení a přispívá ke smazávání hranic mezi fyzickým a digitálním prostředím. Využití těchto technologií se stává klíčovým prvkem obranné schopnosti nejen České republiky, ale i celé NATO. Organizace NATO aktivně podporuje implementaci nových technologií do armád svých členských států prostřednictvím iniciativ, jako je DIANA a NIF.

Emerging and Disruptive Technologies (technologie EDT) představují široké spektrum nových technologií, které zahrnují umělou inteligenci, autonomní systémy, kvantové technologie, biotechnologie, hypersonické systémy, vesmírné technologie, nové materiály a výrobu, energetické a pohonné systémy a komunikační sítě nové generace. Tyto technologie mají

potenciál změnit způsob, jakým jsou vojenské operace prováděny a jakým jsou využívány strategické zdroje.

Je důležité, aby ozbrojené síly byly schopné se na tyto nové technologické výzvy adaptovat a využívat je k posílení své obranyschopnosti a efektivity. Integrace technologií EDT do vojenských operací vyžaduje nejen technologickou zdatnost, ale i strategické plánování a koordinaci mezi spojenci. Jde o proces, který se musí neustále vyvíjet, aby zůstaly zachovány vojenské schopnosti a zabezpečena obranná strategie v rychle se měnícím prostředí mezinárodní bezpečnosti.

Inovační aktivity NATO identifikují devět prioritních technologických oblastí (technologie EDT), za které primárně odpovídá Rada NATO pro inovace (NATO Innovation Board)¹:

1. Umělá inteligence (Artificial Intelligence)
2. Autonomie (Autonomy)
3. Kvantové technologie (Quantum)
4. Biotechnologie a vylepšování člověka (Biotechnologies and Human Enhancement)
5. Hypersonické systémy (Hypersonic Systems)
6. Vesmírné technologie (Space)
7. **Nové materiály a výroba (Novel Materials and Manufacturing)**
8. Energetické a pohonné systémy (Energy and Propulsion)
9. Komunikační sítě nové generace (Next-generation Communications Networks)

Sedmá oblast zahrnuje oblast aditivní výroby, resp. aditivních technologií (AT), tedy v užším pojetí i 3D tisk. O aktuálnosti problematiky nových materiálů a 3D tisku svědčí probíhající projekt Organizace NATO pro vědu a technologie (NATO Science and Technology Organization, STO) „Interoperability of Additive Manufacturing in NATO Operations“, aktivity Agentury NATO pro podporu a pořizování (NATO Support and Procurement Agency, NSPA) a rovněž pravidelné reporty týkající se 3D tisku. Zmíněný projekt „Interoperability of Additive Manufacturing in NATO Operations“ skutečně slouží jako spojovací článek pro Spojené státy americké (USA), Severoatlantickou alianci (NATO) a Evropskou unii (EU) v oblasti aditivní výroby. Na pozadí tohoto projektu hraje klíčovou roli centrum United States Army Combat Capabilities Development Command Armaments Center, které je primárně odpovědné za výzkum a vývoj výzbroje a munice pro americkou armádu. Jeho účast a angažovanost posilují důležitost projektu a jeho schopnost přinášet inovativní přístupy k vojenskému zásobování a výrobě.

Dnes je příkladně vidět ve stále běžícím konfliktu na Ukrajině, že technologie bude i nadále měnit charakter války. Letadla, vozidla a zbraňové systémy budou postupem času stále víc smrtící, ovladatelnější a výkonnější. Lidé všude budou i nadále do způsobů vedení války začleňovat nové technologie a nápady. Bezposádkové (autonomní) platformy, aditivní výroba,

¹ pplk. doc. Ing. Martin VLKOVSKÝ, Ph.D., závěrečná práce v Kurzu Generálního štábu, UO v Brně, Centrum bezpečnostních a vojensko-strategických studií, 2024

vč. 3D tisku, obnovitelné zdroje energie a prediktivní zásobování a údržba mají potenciál zlepšit taktickou distribuci, modernizovat dodavatelský řetězec a zvýšit připravenost zařízení. Tato technologie však neodstraní potřebu poskytovat armádám členských států NATO flexibilnější logistiku.

„Moderní logistika“, která je nadčasová a spojuje staré, nové a vznikající technologie, se nejlépe hodí k podpoře moderních armád Eurasie a transatlantického kulturního prostoru. Moderní logistika poskytuje bohatou nabídku možností podpory, aby vyhovovaly potřebám spojeneckých sil.

V průběhu historie se logistika skládala z různých prostředků, které pokrývaly generace technologií, což je krásně vidět na následujících příkladech.

Prvním příkladem nasazení AM ve velkém měřítku se stala pilotní iniciativa v rámci námořnictva USA „Vytiskněte flotilu“, která byla vedena viceadmirálem Philipem Cullomem a představuje průlomový přístup k využití aditivního tisku v námořním prostředí. Viceadmirál Philippe Cullom zdůraznil zranitelnost a nákladovost logistického řetězce námořnictva a potenciál aditivní výroby k úspoře nákladů, což je obzvláště významné v časech finančních úspor u vojenských výdajů. [1,2]

Experiment „Vytiskněte flotilu“ začal v podobě jakéhosi útvaru pro rychlé inovace velitele námořních operací (Chief of Naval Operations Rapid Innovation Cell – CRIC) a návrhy jsou sdíleny Oddělením pro vzájemnou technologickou výměnu aditivních výrobních technologií námořnictva (Navy Additive Manufacturing Technology Interchange – NAMTI). [3]

Celkově lze konstatovat, že tato iniciativa splnila očekávání, když měla za cíl nejen úsporu nákladů, ale také zvýšení flexibility a schopnosti rychle reagovat na potřeby námořnictva. Aditivní výroba umožňuje rychlé a lokalizované vytváření potřebných dílů, což může zlepšit celkovou efektivitu a dostupnost námořních jednotek.

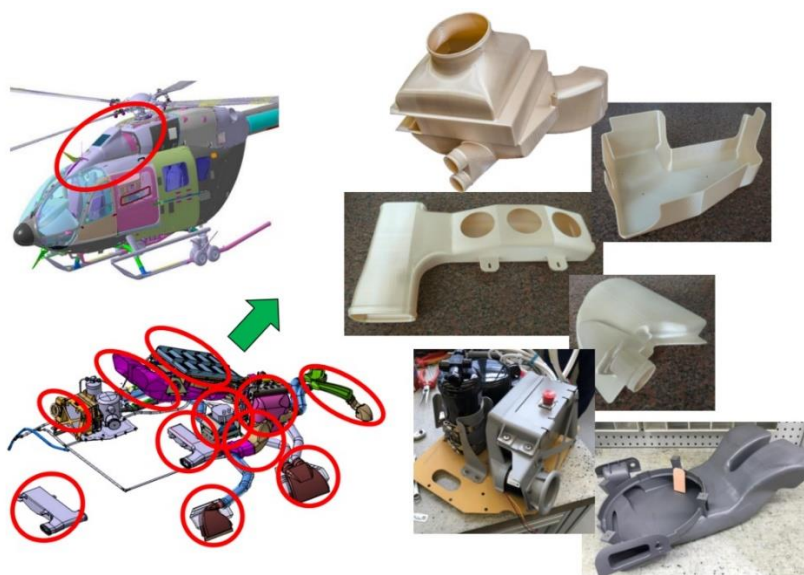


Obr. 1.1. „Gerald R. Ford“ v Norfolk Naval Shipyard. *Megan Eckstein, 2017*

Laboratoř Norfolk Naval Shipyard's Rapid Prototype Lab šetří od roku 2016 armádnímu rozpočtu stovky tisíc dolarů na letadlových lodích třídy Gerald R. Ford (obr. 1.1). Místo tradičních dřevěných nebo kovových modelů úprav lodí, jež napomáhají k ochraně před nákladným přepracováním změn, tiskne laboratoř mnohem levnější modely v řádu několika hodin, a nikoli dní či týdnů. [4]

Podobné příklady ilustrují obrovský význam předmětů vyráběných díky rozsáhlému výzkumu aditivních výrobních procesů, jenž byl zahájen již na konci 80. let. Většina procesů využívajících vyspělé výrobní technologie v pobřežních oblastech i na volném moři je dnes již běžně komerčně k dispozici. [5, 6]

Dalším příkladem je využití AM při adaptaci techniky do jiných klimatických podmínek ve společnosti AIRBUS Helicopters Deutschland GmbH (obr. 1.2) – nový vylepšený systém klimatizace pro H145. Systém ACS: 42 tištěných dílů na ACS, doba tisku 310 hodin na ACS, 29 sad pro dodatečné vybavení, 1 200 tištěných dílů.



Obr. 1.2. Nový vylepšený systém klimatizace pro H145. *Dr. Hans Bartosch, Johannes Siegert, Dr. Frank Weiland Additive Manufacturing – An Industrial Point of View. 2022*

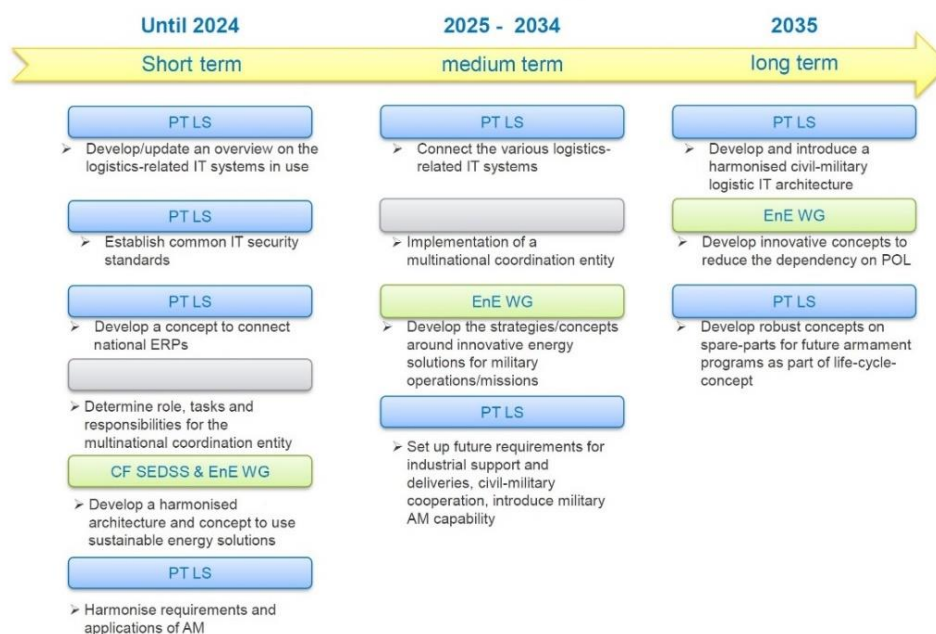
Konflikt na Ukrajině přináší nové inspirační nápady pro aplikace aditivní výroby v obranném průmyslu. Vidíme urychlení používání nástrojů pro 3D tisk pomocí AM, a to nejenom při údržbě techniky používané armádami členských států EU, včetně diagnostiky od vybavení vojáka po opravu bojové techniky v operačních podmínkách (BDR). Například výroba řetězového kola, jak je vidět na obrázku 1.3, zabere pouze 2,5 hodiny času při spotřebě 2,7 kg materiálu.



Obr. 1.3. Výroba řetězového kola na Ukrajině, březen 2023. *UK Army Report 2023*

S tím, jak se technologie AM dále vyvíjí, zvyšuje se během posledního desetiletí důvěra v ni v rámci celého oboru a předpokládá se, že AM bude ve výrobě náhradních dílů hrát stále větší roli.

Dle aktuální strategie počítá Evropská obranná agentura (obr. 1.4) s tím, že se aditivní výroba a 3D tisk stanou široce dostupnými, a pracuje s představou celosvětové sítě vyspělých výrobních dílen obsluhovaných vojenským personálem s příslušnými dovednostmi i školením pro identifikaci problémů a výrobu produktů. Vize vytvoření celosvětové sítě vyspělých výrobních dílen pro vojenské účely zní sice hodně ambiciózně, ale tato síť by umožňovala rychlou a flexibilní výrobu potřebných součástí na místě, což by zvyšovalo autonomii a schopnost rychle reagovat na měnící se potřeby. Vzhledem k tomu, že vytvoření efektivní sítě výrobních dílen vyžaduje odbornost a školení vojenského personálu, může to významně přispět k unifikaci vzdělávacích standardů pro technický personál členských armád. To zahrnuje dovednosti pro identifikaci problémů, efektivní práci s aditivními technologiemi a schopnost rychle reagovat na potřeby v terénu.



Obr. 1.4. Proces harmonizace společného úsilí členských států EU při zavádění AM dle EDA.

Vývoj aditivní výroby (AM) a 3D tisku do budoucna přináší zajímavé příležitosti pro sektor obrany a vojenských operací. Tento vývoj poskytne sektoru obrany možnost nejen udržovat, ale

možná dokonce zvýšit evropskou účast na celosvětové dominanci západní kulturní oikumeny – obzvláště pak v dlouhodobém boji s nízkou intenzitou může aditivní výroba představovat klíčový prvek, jelikož zahrnuje důležitou schopnost rychle reagovat na nové výzvy, vyrobit potřebné součástky a udržovat nebo zvyšovat úroveň vojenské připravenosti.

Celkově je třeba zdůraznit, že 3D tisk a pokročilé výrobní postupy představují do budoucna průlomové technologie pro operace AČR v oblasti údržby a logistiky. Dle mého názoru to je ten primární důvod, proč mají armády členských států EU a NATO o tuto technologii zájem. Tyto technologie přinášejí možnosti nejen technologické inovace, ale také strategické příležitosti v oblasti obrany a bezpečnosti, což může posílit schopnosti evropských vojenských sil a podporovat dlouhodobou globální strategii.

Schopnost rychle reagovat na potřeby oprav a údržby může být klíčovým faktorem v operačním prostředí, což se v posledních dvou letech dramaticky ověřuje během války na Ukrajině. Jak je patrné z výše uvedených příkladů, význam nedestruktivního testování je zvláště velký při zajišťování bezpečnosti provozu vojenské techniky a materiálů, jejichž havárie by byly spojeny s velkými negativními dopady především při nasazení armád členských států EU – NATO v mnohonárodních operacích.

2 Nedestruktivní zkoušení a certifikace pro aditivní výrobu. Současný stav poznání

V kapitole 1 byly popsány současné trendy a výzvy při identifikaci vad při výrobě náhradních dílů z různých materiálů, a to včetně těch vyrobených za použití inovativních technologií aditivní výroby. Dále zde byla vyzdvižena nutnost zajištění kvality zjišťováním změn vlastností součástí, a to jak v nově vyráběných produktech, tak v součástech v provozu. V této kapitole je shrnut současný stav výzkumu a vývoje ve světě v oblasti nedestruktivního testování a certifikaci produktů vyrobených za použití pokročilých technologií, zároveň kapitola nastiňuje řešený problém do větší hloubky.

V této kapitole 2 je uveden autorův shrnující komentář k současnému stavu výzkumu a vývoje v oblasti nedestruktivního zkoušení artefaktů vyrobených za využití pokročilé výroby z inovativních materiálů, včetně těch pro obranný průmysl, které byly předmětem předchozí kapitoly 1, postup a způsob nedestruktivní kontroly pevných materiálů, jakož i pevných vrstvených materiálů a zařízení k jeho provádění pomoci širokopásmové ultrazvukové strukturoskopie. Dále následuje popis a definice hlavních cílů této habilitační práce.

2.1 Analýza stávajících metod kontroly kvality produktů vyrobených pokročilé výroby

Pro formování a zajištění požadovaných vlastností a charakteristik u produktů vyrobených s použitím aditivních technologií je nutné provádět kontrolu nejen technologických parametrů procesu tavení (výkon laseru, teplota tavení, rychlost skenování a krok skenování), ale také nedestruktivní testování vyvíjeného produktu.

Použití destruktivních kontrolních metod umožňuje stanovit s vysokou přesností vnitřní pnutí ve výsledném produktu. Při použití nedestruktivních metod kontroly je navíc možné měřit absolutní hodnotu zbytkových napětí s určitými chybami.

Další významnou nevýhodou destruktivních kontrolních metod může být částečné narušení integrity zkoumaného objektu (vyvrtání otvorů, vyříznutí části kontrolního objektu, nanesení značek atd.). V důsledku destruktivní kontroly dochází ke strukturálním změnám vyvinutého výrobku nebo k jeho úplnému zničení. Jeho další použití je tedy nemožné. Často se pro nepřímé zkoumání produktů (výroba a použití srovnávacích modelových vzorků) používají metody destruktivní kontroly. Použití nedestruktivních zkušebních metod zase umožňuje odhalit přítomnost, původ a vývoj defektů a určit fyzikální a mechanické vlastnosti materiálů jak v hotovém produktu, tak přímo v procesu výroby produktů.

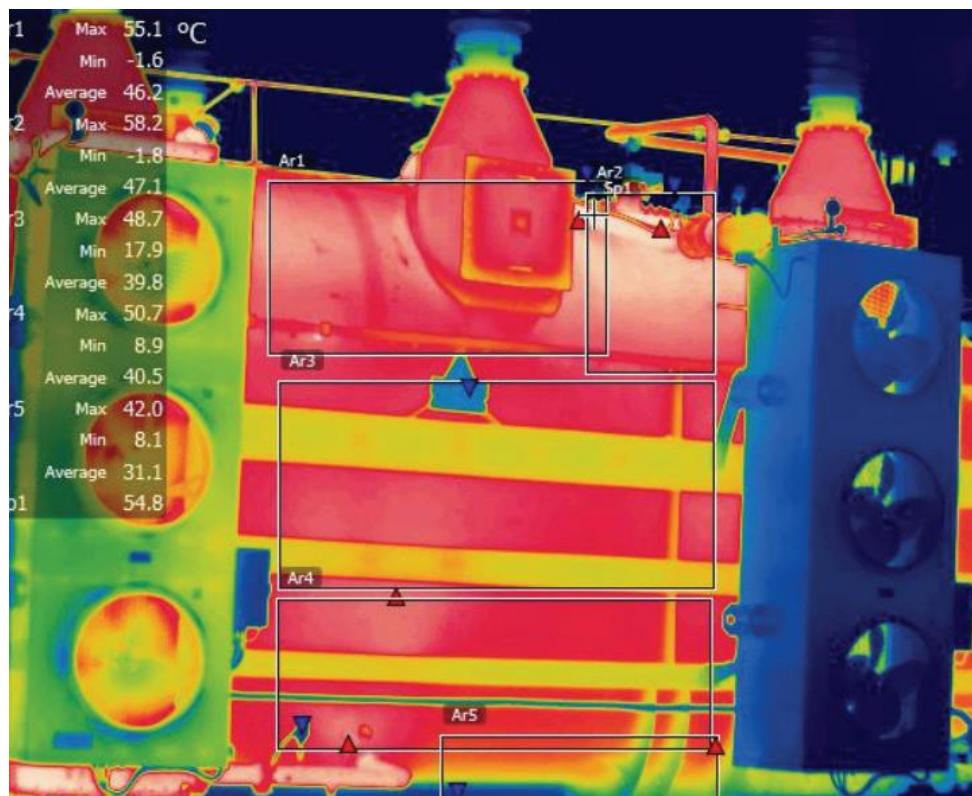
Analýza možností různých metod nedestruktivní kontroly v procesu aditivní výroby umožňuje vyvodit závěry o perspektivách těchto metod pro zajištění kvality výsledných produktů.

Vizuálně-optické metody

Vizuálně-optická metoda je založena na detekci defektů nacházejících se na povrchu kontrolovaného produktu a je jednou z nejpoužívanějších nedestruktivních zkušebních metod. Při vizuální kontrole lze použít optické nástroje, jako je lupa, mikroskop, kamery apod.

Termografické zkoušení

Při nedestruktivním testování (NDT) měří infračervená termografie teplotní pole povrchu zkoumaného tělesa (Obr. 2.1.). Princip termografie je založen na rozdílu tepelného chování vnitřní konstrukce zkoumaného objektu a jeho poruch. Přítomnost nehomogenit ovlivňuje tepelný tok, a v důsledku toho se dané místo ohřívá nebo ochlazuje rychlostí odlišnou od zbývajícího objemu materiálu. Následkem toho vznikají na povrchu předmětu teplotní rozdíly, které poté vedou ke změnám ve vyzařovaném záření, zachycovaném infračervenou kamerou.



Obr. 2.1. Measurement Automation Monitoring [9]

Infračervenou termografii lze aplikovat dvěma způsoby: pasivním a aktivním. Pasivní přístup kvantifikuje přirozené rozložení tepla po povrchu testovaného materiálu. V aktivní termografii se na testovaný materiál aplikuje indukované zahřívání nebo chlazení, známé také jako vnější síla, a měří se vytvoření teplotního gradientu na jeho povrchu. Povrch testovaného produktu se zahřívá a teplo se šíří objektem ve formě tepelných vln. Protože vnitřní diskontinuity mění rychlost šíření tepelných vln, vzniká na povrchu přímo nad defekty tepelný kontrast.

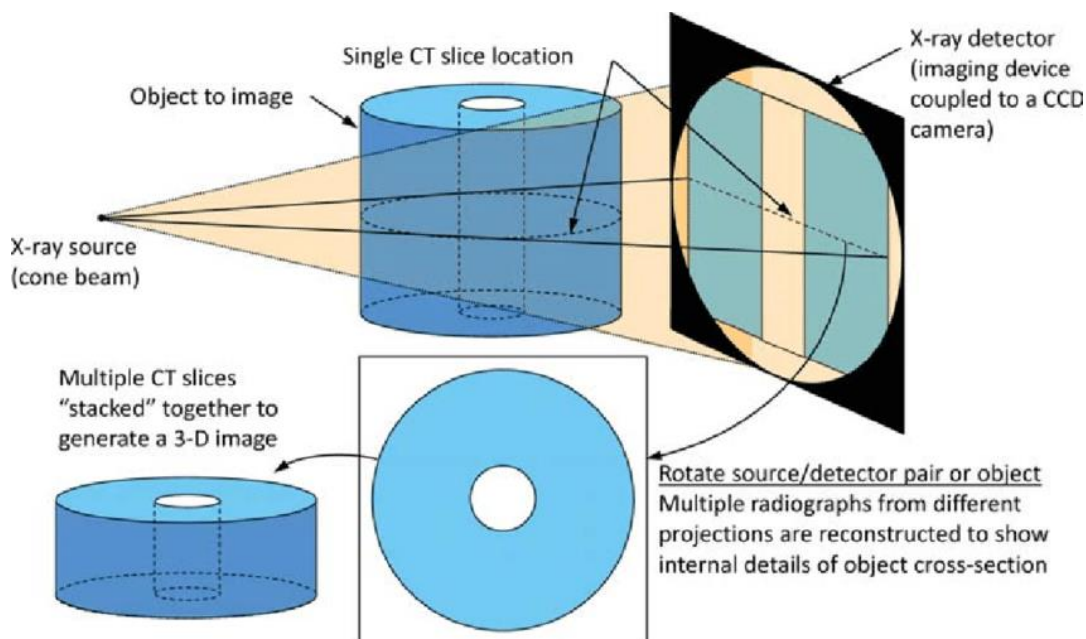
Při nedestruktivním testování produktů vyrobených aditivními technologiemi je termografie ve srovnání s jinými nedestruktivními zkušebními metodami nejméně citlivá na vliv drsnosti povrchu na detekci defektů. Volba zdroje buzení závisí na typu sledovaných defektů. Použití laseru nebo zábleskové lampy jako metody povrchového ohřevu v termografii může odhalit povrchové trhliny o šířce menší než 1 mm s vhodným poměrem stran.

Počítačová tomografie (CT), digitální radiografie (DR) a počítačová radiografie (CR)

Rentgenová počítačová tomografie (Computed Tomography – CT) je nedestruktivní testovací metoda, která umožňuje vizualizovat vnitřní strukturu předmětu s rozlišením až stovek nanometrů. Ionizující záření procházející vzorkem je zeslabeno – pohlceno a rozptýleno,

příčemž míra útlumu závisí na tloušťce a hustotě testovaného objektu a také na intenzitě a energii záření (obr. 2.2.).

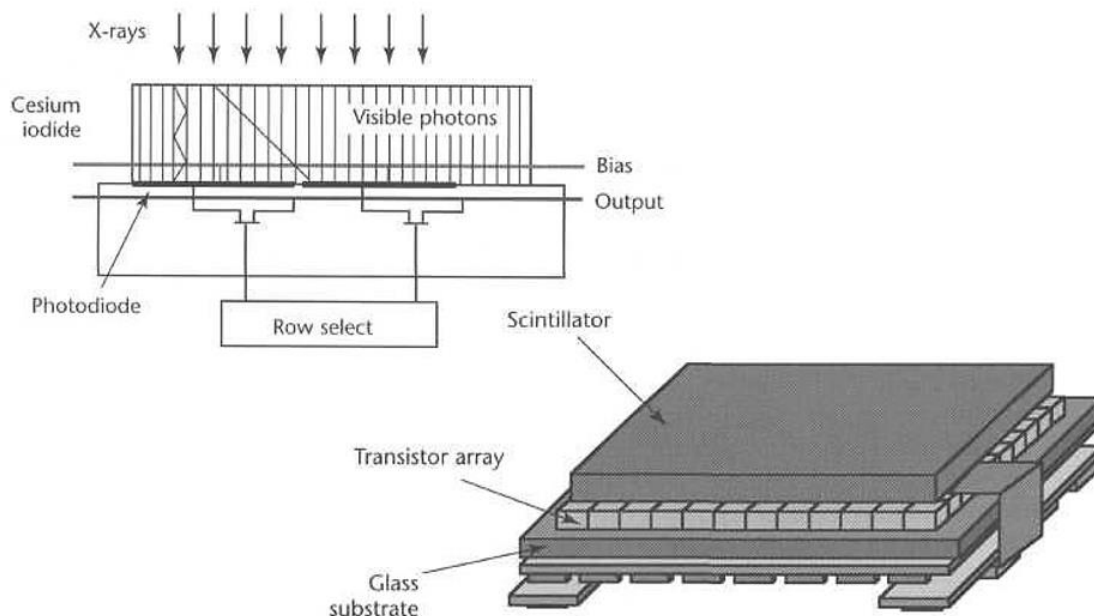
Pomocí sady stínových projekcí, procedury zpětné projekce s filtrací, se provádí – vrstva po vrstvě – obnovování hodnot hustoty rentgenového záření (obnovení původní funkce z integrální odezvy metodou zpětné projekce z filtrace). Při zkoumání produktů pomocí počítačové tomografie lze rozlišit například tyto výhody: nedestruktivní charakter testování, možnost zkoumat produkty v širokém rozsahu hustot (včetně kontroly kompozitů uhlík-uhlík).



Obr. 2.2. Principiální schéma uspořádání zařízení u CT. *A Review of X-Ray Flow Visualization With Applications to Multiphase Flows, Theodore J Heindel. Iowa State University, 2011*

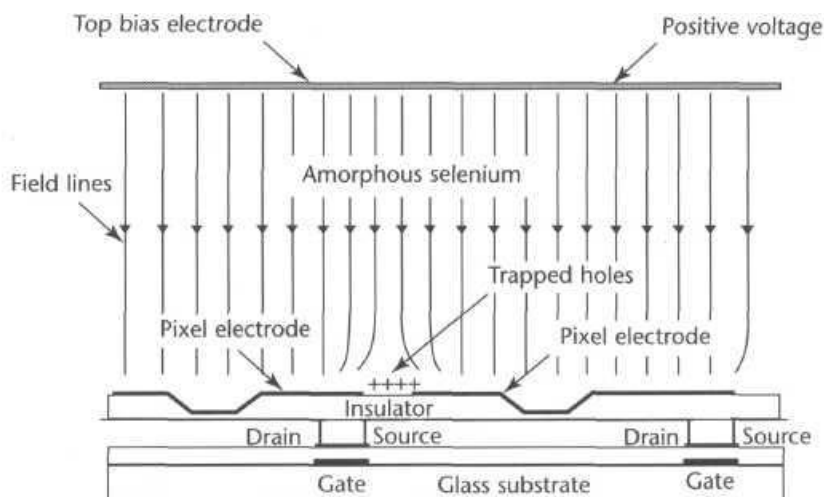
Digitální radiografie (Digital Radiography – DR) využívá k pořízení snímků flat panely, tzv. DDA (Digital Detector Array). Používají se tyto dva typy flat panelů:

Nepřímé flat panely – citlivou vrstvu zde tvoří amorfní křemík. Aby křemík mohl vytvořit elektronový signál, je nezbytné převést ionizující záření nejdříve na viditelné světlo. To se děje pomocí scintilační vrstvy, která je tvořena jodidem cesným (CsI) nebo oxisulfidem gadolinia (Gd_2O_2S). Vytvořené viditelné světlo je poté usměrněno optickými vlákny tak, aby dopadlo přesně na křemíkové plošky nanesené na skleněné desce (obr. 2.3.). Tímto způsobem je vytvořen elektronový signál, který je pomocí elektronických prvků převeden na signál digitální.



Obr. 2.3. Schéma nepřímého flat panelu

Přímé flat panely – přímé panely využívají vlastností amorfního selenu, který převádí ionizující záření přímo na náboj (obr. 2.4.). Odpadá nutnost použití scintilační vrstvy, náboj je poté zachycen potenciálovými jámami a může být vytvořen digitální signál. Touto technologií je dosaženo lepšího rozlišení detektoru, ale za cenu snížení radiační odolnosti.



Obr. 2.4. Schéma přímého flat panelu

Jelikož se obraz dále zpracovává přímo v PC a odpadá skenování/vyvolávání obrazu, jedná se o přímou radiografii. Detektory se dále dělí podle vytváření obrazu na statické a kontinuální (dynamické). Dynamické detektory jsou schopné vytvářet 3D obraz, statické pouze 2D. Pro vytváření kvalitního digitálního obrazu je nutné znát základní prostorové rozlišení detektoru a velikost ohniska zdroje ionizujícího záření.

Počítačová radiografie (Computed Radiography – CR) potřebuje k vytvoření snímků speciální zobrazovací fólii a skener k vyvolání obrazu. Jedná se tedy o nepřímou radiografii, kdy se

latentní obraz zachytí ve fólii a následně je potřeba fólii oskenovat ve speciálním laserovém skeneru, abychom z něj za využití speciálního digitizéru (čtečky) a PC vytvořili digitální obraz. Na rozdíl od flat panelu jsou fólie flexibilní, i když v současné době byl již vyvinut rovněž flexibilní (ohébný) panel, který se dokonce už prodává.

Akustické metody

Akustické metody, založené na jevu akustické elasticity (změna parametrů šíření elastických kmitů v prostředí při působení napětí v daném prostředí), se používají ke studiu fyzikálně-mechanických charakteristik pevných látek a stavu konstrukce.

Jedněmi z nejúčinnějších a nejuniverzálnějších metod nedestruktivního testování a diagnostiky jsou akustické zkušební metody, zejména ultrazvukové testování. Dosud lze tuto metodu testování využít při zkoumání výrobků z různých materiálů (kovové i nekovové materiály, plasty, kompozity). Pomocí akustického testování je rovněž možné vyhodnotit fyzikální a mechanické vlastnosti – konstanty pružnosti, pevnosti, tvrdosti atd.

Pomocí ultrazvukového testování je možné určit elastické a pevnostní vlastnosti materiálu. To je možné měřením závislosti rychlosti šíření ultrazvukové vlny a jejího útlumu ve studovaném materiálu, což je zase dáno složením materiálu, strukturou a orientací zrn. Měřením rychlosti podélných a příčných ultrazvukových vln v polykrystalických materiálech taková měření umožňují měřit konstantu elastické anizotropie. Informace o vnitřní struktuře materiálu (přítomnost strukturních nehomogenit, zrnitost, velikost a typ defektu) lze získat měřením koeficientu útlumu v materiálu.

Mezi významné nevýhody při použití metody akustického testování však patří vysoké požadavky na drsnost povrchu testovaného předmětu a také použití kontaktní kapaliny, která zajišťuje akustický kontakt mezi měničem a povrchem testovaného předmětu. Této nevýhodě se lze vyhnout použitím bezkontaktních elektroakustických měničů, které se v poslední době rozšířily. Použití těchto měničů umožnilo zvýšit spolehlivost určování vnitřních pnutí u hotových výrobků díky řízení příčnými vlnami.

Elektromagnetické metody (ET, RFT, BIAS a MFL). Metoda vířivých proudů

Magnetoelastický jev je základní fyzikální jev využívaný metodami pro určování napětí-ově-deformačního stavu objektu. Tento jev spočívá v procesu kolísání magnetických parametrů předmětu při mechanickém působení na něj. Použití výše uvedených metod implikuje studium například následujících charakteristik: magnetostrikce, zbytková magnetizace, koercitivní síla, magnetická permeabilita atd. Změna těchto parametrů při použití magnetických metod ukazuje na povahu napjatosti povrchových vrstev předmětu.

Mezi nevýhody uvažovaných metod nedestruktivního testování patří skutečnost, že stávající metody kontroly jsou použitelné v konečné fázi výroby produktů aditivní výroby. Každá z těchto metod je také definována svou dostupnou kontrolovatelností. Jak již bylo uvedeno výše, v produktech vyráběných selektivním laserovým tavením vznikají specifické vady (dutiny vyplněné neroztaveným práškem), které nelze uvažovanými nedestruktivními zkušebními metodami detekovat.

2.2 Možnosti nedestruktivní kontroly součásti pomocí širokopásmové ultrazvukové strukturoskopie a zařízení pro jeho provádění

Rozvoj a zlepšení metod nedestruktivního hodnocení pro in-time monitoring procesů selektivního laserového tavení [10, 11] tedy představuje velice aktuální téma. Pro nedestruktivní inspekci součástí v průběhu výrobního procesu se v současnosti používají termografické a vizuální metody monitoringu. Značný počet publikací [12–32] uvádí, že tyto typy diagnostických metod v posledních letech zaznamenaly obrovský pokrok.

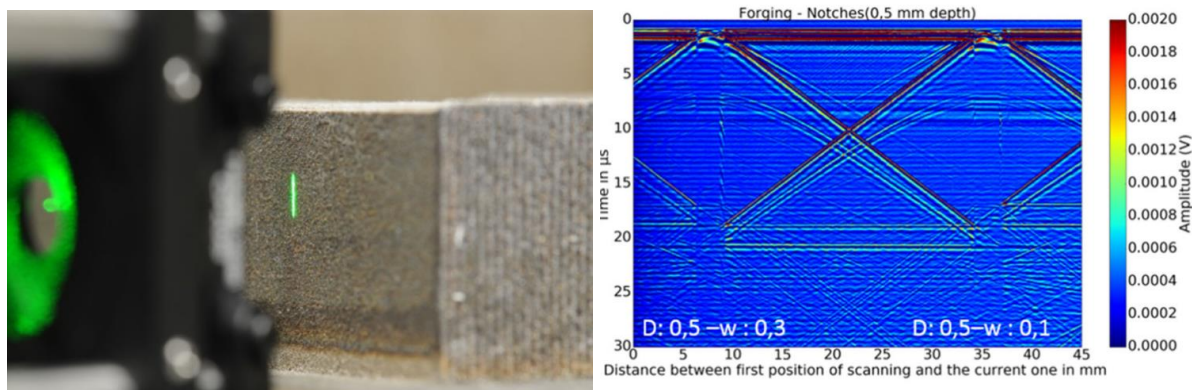
Většina těchto publikací pojednává na téma monitoringu elektromagnetické radiace generované tavnou lázní. Pro monitoring velikosti tavné lázně se používají vysokorychlostní kamery; pro měření teploty tavné lázně nebo teplotních gradientů napříč celým prostorem se používají pyrometry nebo termální zobrazovače. Tepelně stabilizované vysokorychlostní kamery s odpovídajícími spektrálními filtry a systémovým záznamem s potlačením šumu se zpravidla používají pro zachycování energie optického paprsku odraženého z prostoru tavné lázně. To umožňuje nejen vizualizaci prostoru tavné lázně, ale zároveň také vyhodnocení přísunu energie do zahřívání prostoru. Systémy teplotního monitoringu jsou taktéž vybaveny dvěma pyrometry, přičemž jeden z nich pracuje v infračerveném (IR) rozsahu a druhý ve viditelném rozsahu. IR pyrometr/zobrazovač monitoruje povrchovou teplotu objektu; pyrometr pracující v rozsahu 400 až 600 nm signalizuje procesní vady a odpařování povrchové vrstvy. [33–35]

Tyto systémy s vysokorychlostními IR kamerami, spojené s vysokorychlostním zpracováním obrazu, prokázaly při vzorkovací frekvenci 10 kHz až 20 kHz velký potenciál pro kontrolu celé konstrukce, přičemž dochází k hrubému rozlišení tavných lázní, práškového kovu a pórů. Pyrometrické techniky nicméně vykazují také celou řadu nevýhod. Skutečné rozlišení těchto systémů je v řádku 1 mm (nikoli tedy 40 μm , jak vyžaduje specifikace), což není dost pro řízení procesu selektivního laserového tavení; chyba měření emisivity, jež představuje klíčový parametr pro určení skutečné teploty kovu, činí více než 4 %. Bez přesných hodnot emisivity lze obvykle zaznamenávat pouze relativní hodnoty teploty. Aktuálně také neexistují žádné analytické modely popisující dynamiku tavné lázně ve vícevrstvé struktuře a tepelné toky vznikající v důsledku diskontinuit materiálu. Bez tohoto základu taktéž nelze provádět numerickou simulaci.

V této souvislosti byly v průběhu posledních pěti let vyvinuty další metody kontroly procesu selektivního laserového tavení, mimo jiné rentgenová tomografie používaná pro lokalizaci trhlin a pórů [36] a neutronová difrakce [37, 38] pro posuzování zbytkových napětí. U těchto metod nicméně nedošlo, z důvodu značných technických obtíží, k širokému využití. V publikacích [39–41] je diskutována možnost, zda lze akustické emise využít pro detekci trhlin přímo v průběhu výroby součásti. V tomto případě je na vnější stranu platformy umístěn systém akustických piezoelektrických senzorů a dochází k záznamu ultrazvukových signálů odražených trhlinami. U uvedených vícevrstevných materiálů je nicméně pomocí těchto signálů prakticky nemožné lokalizovat trhliny a určit jejich geometrii. V publikacích [42, 43] je navrhováno přilepení 10MHz piezoelektrického měniče pro ultrazvukovou echoskopii k zadní straně platformy pro monitoring procesu stavby jednotlivých vrstev, stavu rozhraní mezi jednotlivými vrstvami a utváření mikrotrhlin a pórů. Práce [42, 43] uvádějí, že je pomocí ultrazvukové echoskopie teoreticky možné monitorovat dynamiku růstu vrstev; póry o průměru zhruba 1 mm byly nicméně detekovány pouze na modelových vzorcích.

2.3 Bezkontaktní ultrazvukové metody

Bezkontaktní ultrazvukové metody mají oproti konvenčním akustickým metodám podstatnou výhodu (obr. 2.5). Tento výzkum je řešen v pracích [44–49], kde je zvláštní pozornost věnována laserové excitaci akustických signálů. V tomto případě jsou ultrazvukové signály excitovány v důsledku absorpce záření pulzního laseru podpovrchovou vrstvou vyráběného produktu. Následné roztažení zahřáté oblasti vede k tvorbě elastických vln. Jak je uvedeno ve výzkumu [50–51] provedeném Mirzade, F. Kh. z Ruské akademie věd, Institutu laserových a informačních technologií, představuje pulzně-periodický Q-spínaný laser emitující 10ns impulzy o energii 100 μJ efektivní prostředek pro tvorbu signálů s amplitudou tlaku do 0,1 MPa a trváním zhruba 70 ns. Amplituda excitovaných tlakových impulzů rozptylovaných heterogenitami tištěné součásti je dostatečně veliká pro bezkontaktní metodu na bázi laserové interferometrie, využívané pro monitoring povrchových oscilací. V publikaci [49] vidíme, že je teoreticky možné použít tuto nedestruktivní metodu testování v aditivní výrobě; experimenty byly nicméně provedeny pouze na modelových vzorcích. Téma matematického modelování termálního chování v případě aditivní výroby se vstříkáváním práškového kovu je rozvíjeno v pracích [50, 51].



Obr. 2.5. Generátor a B-sken [52]

Zobrazováním 3D tisku se zabývá mnoho vědeckých institucí: Singapurské centrum pro 3D tisk (Fakulta strojního inženýrství a letectví, Technická univerzita Nanyang, Singapur), Katedra strojního inženýrství, materiálů a výrobního inženýrství, Univerzita v Nottinghamu, University Park, Nottingham NG72RD, Spojené království, Fraunhoferův institut pro nedestruktivní testování IZFP (Saarbrücken, Německo). Některé z výše uvedených skupin se zaměřují na použití bezkontaktního laserového ultrazvuku, konkrétně u kompozitních materiálů (České vysoké učení technické v Praze). Tato skupina složená z odborníků UO v Brně a ČVUT v Praze pracovala v rámci výzkumu s technologií kontaktních laser-ultrazvukových detektorů vad s unikátním rozlišením 50 mikronů. [53]

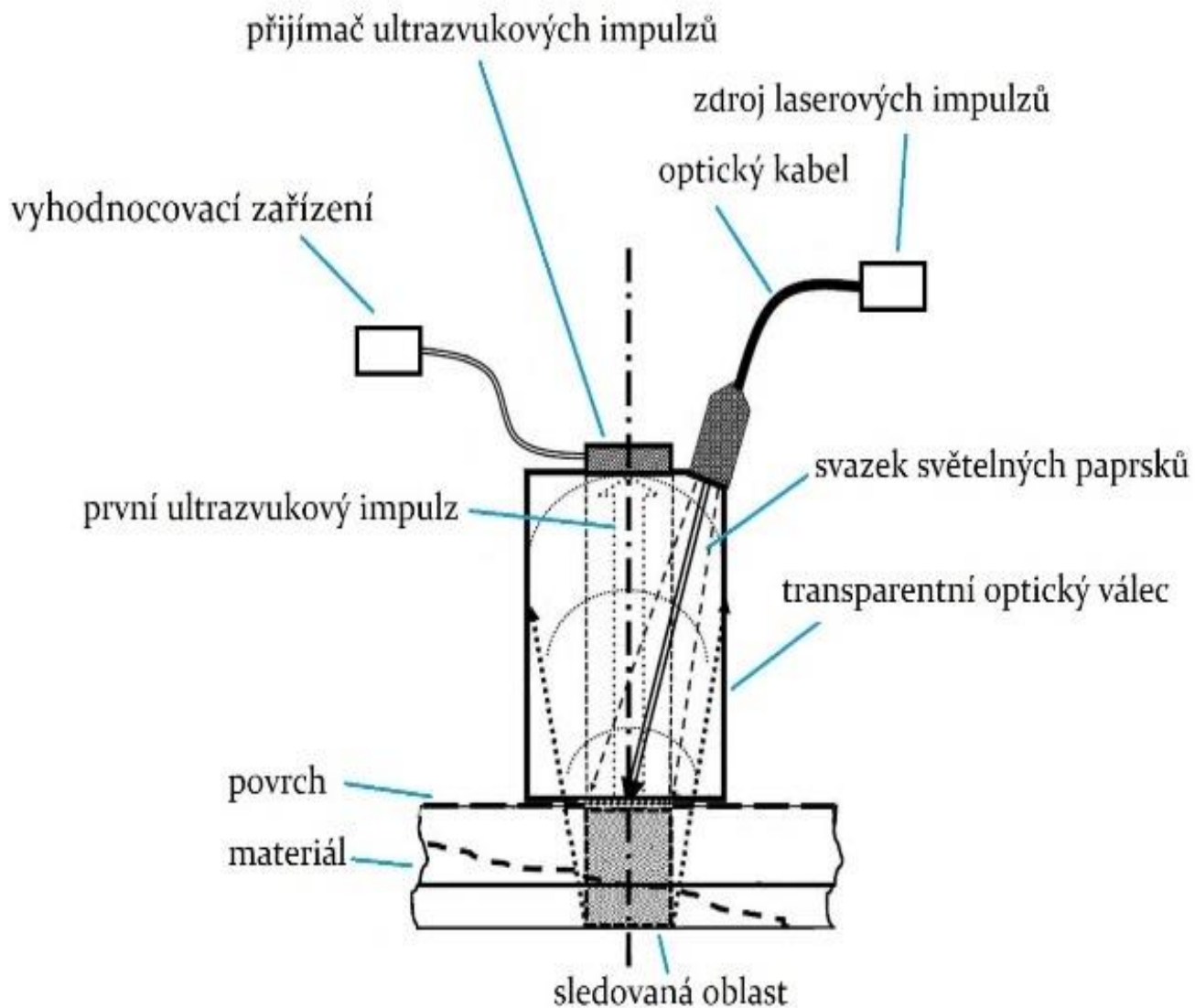
Pro zkoumání nejrůznějších struktur vyráběných pomocí aditivních technologií za odlišných zátěžových podmínek lze efektivně využít analýzu metodou konečných prvků (FEA). [54–58] Pro co nejefektivnější posouzení získaných výsledků jejich využití v reálné praxi musí být nicméně vyvinut správný model konečného prvku (FE) a jeho efektivita závisí na mnoha faktorech, obzvláště pak na znalosti materiálových dat. [59–63] To vyžaduje následující: výrobu zvoleného produktu pomocí SLM s vyhodnocenými procesními parametry, experimentální testování produktu za podmínek odrážejících podmínky v reálném světě a jeho porovnání

s běžným produktem. Na základě experimentů a výsledků FEA by mohly být nastíněny hranice a silné stránky uvedených řešení (SWOT analýza).

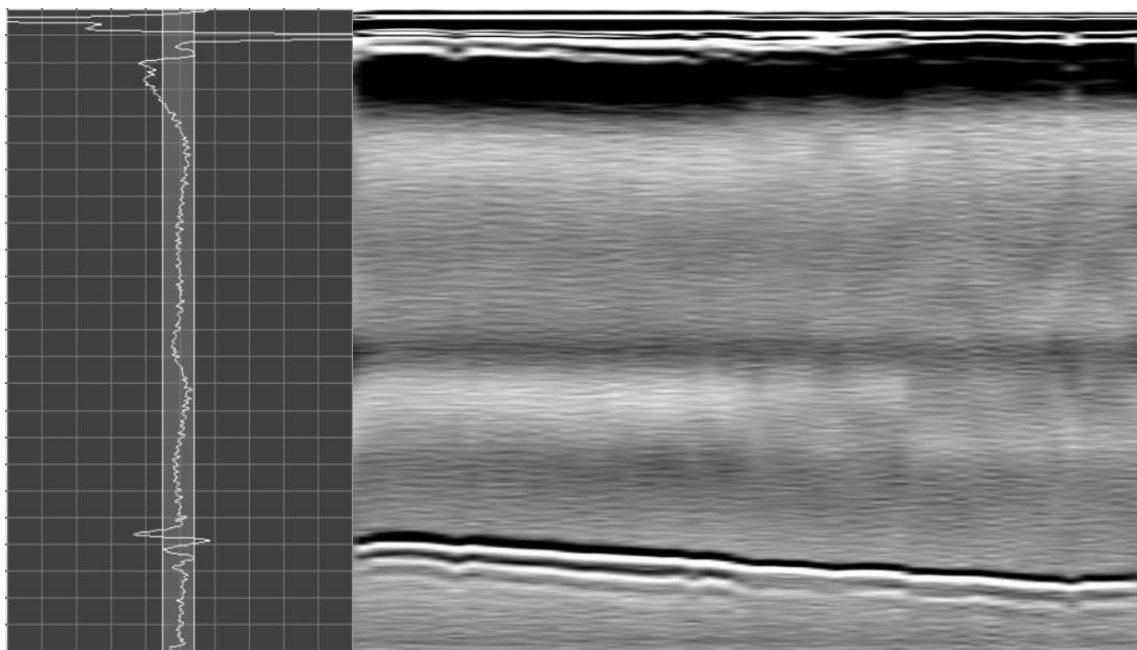
2.4 Laserová ultrazvuková defektoskopie

Pro vizualizaci vnitřní struktury a trhlin vyrobených vzorků je strukturoskop provozován v režimu pulzně-echo laserové ultrazvukové strukturoskopie. Princip nastavení (obr. 2.6.) je založen na termoelastickém efektu: laserové záření je absorbováno ve speciální desce (optoakustický generátor) a lokálně zahřívá materiál; přechodné zahřívání vede k tepelné roztažnosti membrány strukturoskopu a následné generaci ultrazvukových vln. Tyto vlny se přenášejí do kontrolovaného materiálu a odrážejí se od trhlin nebo zadního povrchu vzorku. Odražené vlny se zaznamenávají širokopásmovým piezoelektrickým snímačem. Tvoří série dozvuků, které slouží k následnému výpočtu rychlosti zvuku a k vizualizaci struktury vzorku v podobě A-sken, B-sken a C-sken. Výhodou defektoskopie pomocí laserového ultrazvuku je hladký bipolární tvar pulzu sondy, který má krátké trvání blížící se 100–200 ns se širokopásmovým spektrem. Ve srovnání s běžnými piezoelektrickými generátory ultrazvuku se tak zvyšuje přesnost, která umožňuje lepší interpretaci měření. Nevýhodou laserového ultrazvuku je jeho poměrně malý dynamický rozsah, který omezuje díly vhodné ke kontrole na tenké díly z nedifuzních materiálů. Vyšší akustické amplitudy vyžadují vyšší energie laseru, které jsou omezeny prahem, nad jehož úrovní elektromagnetické paprsky odstraní defektoskopickou membránu.

Laserovým iniciátorem snímače strukturoskopu je Q-spínaný Nd:YAG laser s opakovací frekvencí pulzů 1 kHz, vlnovou délkou záření 1 064 nm a délkou pulzu 10 ns. Když bod Nd:YAG laseru dosáhne povrchu membrány snímače, interakce laseru s hmotou vyvolá náhlé zvýšení vnitřní energie materiálu. Tato interakce probíhá v uzavřeném skle, aby se zvýšila intenzita akustických vln. [36] Snímač má fokusovanou konstrukci, což znamená využití akustické čočky k zaměření impulzu sondy v podpovrchové oblasti vzorku. Průměr ohniska je 0,53 mm a jeho délka činí 28 mm. Odražené ultrazvukové vlny se zaznamenávají a převádějí na elektrické signály pomocí širokopásmového piezoelektrického detektoru (0,1–15 MHz). Tyto signály jsou snímány, průměrovány na snímky, digitalizovány (12 bitů, 100 MHz) a přeneseny do počítače pro další zpracování a vizualizaci dat. Laserový ultrazvukový snímač je umístěn na polohovacím systému s trojicí souřadnic (přesnost – 10 μm), který umožňuje 2D rastrové snímání pro vizualizaci generátoru B- a C-skenů. [37] U kovů přesahuje hloubka měření 100 mm, rozlišení ve směru šíření paprsku je až 50–100 μm a v příčném směru činí až 0,5 mm. [38, 39]



Obr. 2.6. Schéma kontaktního laser-ultrazvukového strukturoskopického systému



Obr. 2.7. Příklad vizuálního výstupu kontaktního laser-ultrazvukového systému

Laserový ultrazvukový strukturoskop může pracovat i v ponorném režimu. Impulz sondy se proto nejprve částečně odrazí od horního povrchu objektu, čímž se na zaznamenaném signálu A-sken vytvoří referenční špička. Část detekčního impulsu prochází vzorkem a je rozptýlována vnitřními nehomogenitami. Tyto odrazy tvoří další špičky na signálu A-sken, které lze použít pro výpočet polohy těchto trhlin za předpokladu rovnoměrného rozložení rychlosti ve vzorku podle vzorce $z = (t_1 - t_0) \cdot c_l / 2$, kde c_l je rychlost podélné vlny, $t_1 - t_0$ je rozdíl mezi časy příchodu impulsu rozptýleného nehomogenitou t_1 a referenčního impulsu t_0 . Lze tak odečíst profil dílu a strukturoskop pak funguje jako profilometr.

Hlavní výhodou konstrukčního řešení zařízení k provádění laser-ultrazvukové strukturoskopie je to, že umožňují jednoduchou kontrolu stavu vnitřní struktury materiálů při současném, vysoce přesném stanovení místa a velikosti nehomogenit, což v podstatě znamená vysoce přesné stanovení míst a velikostí vad materiálů.

V současné době, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, je k dispozici široká škála technologií aditivní výroby. Hlavní rozdíly mezi technologiemi jsou ve způsobu nanášení vrstev a v materiálu použitém na výrobu. Některé z diskutovaných metod jsou založeny na slinování či tavení, případně mezi ně patří selektivní laserové tavení, přímé laserové slinování kovů, tisk nanášecích vrstev a selektivní laserové slinování. Dle mého názoru bude v odvětví obranného průmyslu proto důležité provádění nedestruktivního zkoušení náhradních dílů vyrobených s použitím technologie AM. V tabulce 2.1 je tedy uvedena srovnávací analýza metod NDT a typických vad, které vznikají při použití technologií aditivní výroby.

Tabulka 2.1. Srovnávací analýza metod NDT a typických vad technologií aditivní výroby

Metoda NDT	Mikrostruktura	Trhliny, pórizita	Mechanické charakteristiky	Přesnost geometrického modelu	Drsnost	Zbytkové napětí
Vizuálně-optické metody	-	povrch	-	povrch	povrch	-
Magnetická prášková metoda (MT)*	+	povrch	-	-	-	+
Akustické metody (UT)	+	+	+	+/-	+	+
Počítačová radiografie (CR)	+	+	-	+	+	-
Termografické zkoušení	-	povrch	-	-	-	-

* Jsou zjišťovány povrchové a podpovrchové vady typu trhlin, prasklin, pórů, vměstků apod. feromagnetických materiálů (Fe).

2.5 Cíle habilitační práce

Hlavním cílem této habilitační práce je rozšířit a spojit zkušenosti a odborné znalosti z Fakulty Stavební ČVUT v Praze a Fakulty Vojenských Technologií Univerzity obrany v rámci nedestruktivního testování materiálů, s ohledem na využití moderní laserové ultrazvukové technologie. Práce je systematicky rozdělena do dvou hlavních částí, přičemž každá část si klade za cíl dosáhnout specifických výzkumných a aplikovaných výsledků v tomto technologickém oboru.

První část práce se zaměřuje na rozvoj a optimalizaci metod nedestruktivního zkoušení, s důrazem na analýzu a vylepšení existujících technik a jejich porovnání s nově vyvíjenou laserovou ultrazvukovou strukturoskopií. Konkrétním cílem je navrhnout metodické postupy pro nedestruktivní testování s využitím širokopásmové ultrazvukové defektoskopie, které by umožnily přesnější detekci a rozlišení strukturálních vlastností materiálů, zejména při práci s kompozitními a složitě strukturovanými materiály.

Druhá část práce pak klade důraz na aplikaci a ověření nově vyvinutých technik v praxi, se specifickým zaměřením na vojenskou techniku a materiály používané v obranném průmyslu. Tento segment práce si klade za cíl navrhnout a testovat procedury pro efektivní nedestruktivní kontrolu, která by zahrnovala minimalizaci defektů a zvýšení spolehlivosti materiálů, včetně těch, které jsou vyrobeny kombinovanými nebo novými výrobními technologiemi jako je aditivní výroba.

Přínosy habilitační práce

Vědecké přínosy:

- Přínos práce v oblasti vědy spočívá ve vývoji nové metodologie a technického zařízení pro laserovou ultrazvukovou defektoskopii, která přesahuje standardní ultrazvukové metody schopností vizualizace mikrostruktur. To umožňuje lepší pochopení materiálových vlastností a předpověď jejich chování pod zatížením.
- Práce také přispěla k rozšíření teoretických základů nedestruktivního zkoušení, což otevírá dveře pro další výzkum v této oblasti.

Praktické přínosy:

- Z praktického hlediska práce přináší inovace v metodách kontroly, které byly ověřeny na reálných vzorcích a ve spolupráci s průmyslovými partnery. Tyto metody byly implementovány ve vojenských aplikacích a přispěly k zvýšení efektivity a bezpečnosti vojenské techniky.
- Výsledky práce byly komerčně využity, což vedlo k patentování nových technologií a jejich využití ve spolupráci s obranným průmyslem.

Pedagogické přínosy:

- V pedagogické sféře práce umožnila vývoj nových výukových programů a laboratorních cvičení, které připravují studenty na výzvy současného trhu práce v oblasti materiálového inženýrství a technologií. Práce také poskytuje zdroje a učební materiály, které mohou být využity pro další akademické studium a výzkum v oblasti nedestruktivního testování.

Závěrečné shrnutí

Habilitační práce představuje značný pokrok v oblasti nedestruktivního zkoušení, s důrazem na laserovou ultrazvukovou technologii, která poskytuje mnohem širší a přesnější diagnostické možnosti pro hodnocení a ověřování kvality materiálů. Rozvoj těchto technologií má dalekosáhlý dopad nejen ve vojenském sektoru, ale i v civilním průmyslu, což zvyšuje bezpečnost, spolehlivost a trvanlivost klíčových konstrukčních materiálů.

3 Určení minimálního počtu defektů u perspektivních materiálů

Tato kapitola se věnuje perspektivním metodám pro nedestruktivní zkoušení epoxidových kompozitů s grafitovými vlákny, které nacházejí široké uplatnění v nejrůznějších odvětvích průmyslu – mimo jiné také v obranném průmyslu, kde struktury s vysokou pevností a nízkou hmotností hrají mimořádně důležitou roli. Z důvodu jejich komplexní heterogenní struktury může u kompozitních materiálů při dynamické zátěži nicméně docházet k poškození a vzniku pórů, oddělení jednotlivých vrstev a lokálnímu přetížení jednotlivých vrstev. Vysoká koncentrace těchto mikrodefektů, a to dokonce i když nedochází k výskytu zřetelných strukturálních defektů, může vést k zásadnímu snížení pevnosti materiálu. Na základě informací o struktuře kompozitu a jejích změnách lze posoudit provozní chování jednotlivých složek kompozitního materiálu a jejich zbývající životnost.

Mezi typická poškození a defekty ve struktuře epoxidových kompozitů s grafitovými vlákny patří mikropraskliny a póry v materiálu pojiva, praskliny vláken a oddělení vláken od pojiva, případně další defekty, jako jsou ohyby nebo nespojitosti. Pro detekci těchto nedokonalostí se využívá nejrůznějších metod. Jednoduché povrchové defekty lze snadno detekovat vizuálními technikami s kapilární metodou. Mezi velkoobjemové metody se řadí pulzní termografie a ultrazvuková diagnostika, mezi ty nejsložitější pak patří techniky využívající rentgen nebo počítačovou tomografii.

3.1 Měření pórozy u kompozitních materiálů zesílených uhlíkovými vlákny pomocí laserové ultrazvukové strukturoskopie

Ultrazvuková strukturoskopie je jednou z nejčastěji používaných a relativně levných NDT metod pro posuzování vnitřní struktury kompozitních materiálů, neboť rychlosti elastických vln jsou velmi citlivé na póry, mikropraskliny a další defekty. Základem ultrazvukové strukturoskopie je analýza frekvenčních závislostí činitele útlumu ultrazvuku a fázové rychlosti akustických vln v testovaném materiálu. Tyto závislosti, měřené v širokém spektrálním rozsahu, se používají pro kvantitativní odhad strukturálních heterogenit. Důvodem je skutečnost, že ultrazvukové vlny, jejichž vlnové délky jsou v rozsahu překážek/heterogenity, jsou posledně uvedenými zpětně rozptylovány; v důsledku toho dochází ke zvýšení relativního útlumu ultrazvuku. Podobně může frekvenční závislost koeficientu ultrazvukového útlumu obsahovat informace o změnách ve struktuře kompozitních materiálů, jako například únavových trhlin nebo oddělení vláken od pojiva. Ze změn spektra útlumu ultrazvuku, jež oproti původnímu stavu souvisí s účinky únavy materiálu, lze odhadovat zbytkovou životnost kompozitního materiálu.

Epoxidové kompozity s grafitovými vlákny jsou akusticky heterogenní materiály, neboť vrstvy karbonových vláken a epoxidového pojiva jsou charakterizovány podstatně odlišnými rychlostmi šíření ultrazvukových vln a akustickými impedancemi. Průměr vláken (zhruba 5 μm) je mnohem menší než charakteristická vlnová délka detekční ultrazvukové vlny (zhruba 300 μm při frekvenci 10 MHz) a tloušťka jednotlivých vrstev vláken (100–200 μm) je srovnatelná s jeho vlnovou délkou. Epoxidový kompozit s grafitovými vlákny je ve smyslu šíření ultrazvukových vln makroheterogenním médiem. Rozměry defektů ve struktuře kompozitů se pohybují v rozsahu od několika μm po stovky μm . Pro kvantitativní inspekci a posouzení poškození kompozitní struktury by měl být ultrazvukový útlum analyzován v rámci dostatečně širokého frekvenčního rozsahu: od několika desetin po několik desítek megahertz. V rámci tohoto rozsahu koeficient ultrazvukového útlumu sahá od několika

jednotek po několik desítek m^{-1}); amplituda detekčních ultrazvukových impulzů by tudíž měla být dostatečně velká, aby bylo možno zkoumat i předměty o rozměrech několika centimetrů.

Pro zkoumání struktury vzorků a složek epoxidových kompozitů s grafitovými vlákny pomocí ultrazvukové diagnostiky je nezbytné generovat krátké, silné akustické detekční impulzy v širokém spektrálním rozsahu od několika jednotek po několik desítek megahertz, čehož lze dosáhnout pomocí laseru.

Termooptická excitace ultrazvukových vln v médiu s určitými termofyzikálními a akustickými vlastnostmi při určitých parametrech absorbované laserové radiace (energie a trvání impulzu), vytváří širokopásmové ultrazvukové impulzy (optoakustické signály) se specifickou amplitudou a trváním (nebo frekvenčním spektrem). V tomto případě je absorpčním médiem laser v optoakustickém zdroji nebo laserový zdroj ultrazvuku. V systémech ultrazvukové diagnostiky lze parametry emise laseru a absorpční médium optimalizovat tak, aby produkovaly OA signály s požadovanou amplitudou a spektrální charakteristikou.

Ultrazvuková diagnostika založená na laserové termooptické excitaci zvuku se stala velice rozšířenou v oblasti nejrůznějších technických aplikací, obzvláště pak za účelem detekce vad u kompozitních materiálů, měření modulů elasticity izotropních nebo anizotropních kompozitních materiálů a odhadu obsahu pórozity v kompozitních materiálech.

3.2 Teoretické pozadí pro použití průchodově-přechodové techniky širokopásmové ultrazvukové spektroskopie pro určení pórozity heterogenních materiálů

Pórozita (prázdný obsah dle objemu) kompozitních materiálů se určuje pomocí laserové ultrazvukové metody, která zahrnuje měření fázové rychlosti podélných akustických vln a využívá teoretického modelu v závislosti fázové rychlosti na pórozitě materiálu. Pórozita se v tomto případě počítá jako:

$$P = (1 - \rho/\rho_0) \times 100 \%, \quad (3.1)$$

kde ρ je skutečná (naměřená) hustota vzorku, určená z výsledků hydrostatického měření; ρ_0 je vypočtená hustota tuhé fáze vzorku, určená z hustot základní hmoty a plniva, tedy ρ_M a ρ_F , a objemových koncentrací základní hmoty a plniva, tedy n_M a n_F daného vzorku ($n_M + n_F = 1$):

$$\rho_0 = n_M \rho_M + n_F \rho_F, \quad (3.2)$$

U vzorků s nízkou pórozitou lze fázovou rychlost V_l přibližně odhadnout z výrazu:

$$V_l = V_{l_0} \sqrt{1 - P^{2/3}}, \quad (3.3)$$

kde V_{l_0} je teoreticky vypočtená fázová rychlost podélných akustických vln ve dvoufázovém modelu média:

$$V_{l_0}^2 = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{n_M}{\rho_M V_{lM}^2} + \frac{n_F}{\rho_F V_{lF}^2} \right)^{-1}, \quad (3.4)$$

Zde považujeme fázové rychlosti podélných akustických vln v základní hmotě a plnivu (V_{lM} a V_{lF}) za známé. V tomto případě lze pórozitu definovat jako:

$$P = \left[1 - \left(\frac{V_l}{V_{l_0}} \right)^2 \right]^{3/2}, \quad (3.5)$$

3.3 Experimentální měření místní pórozity kompozitních materiálů pomocí průchodově-přechodové techniky

Pomocí průchodově-přechodové techniky laserové ultrazvukové strukturoskopie byla změřena pórozita vzorků z izotropického kompozitu na bázi slitiny ENAC- AlSi12CuNiMg zesílené různými množstvími částic z karbidu křemíku (SiC) o průměru $14 \mu\text{m}$. Vzorky byly vyrobeny smícháním částic plniva s taveninou základní hmoty a jejich následným ochlazením, bez násilného odstranění plynné fáze.

U stejných vzorků došlo ke kvantitativnímu posouzení vlivu pórozity na modul elasticity. Místní moduly elasticity byly určeny z fázových rychlostí podélných a příčných akustických vln, měřených pomocí laserové akustické průchodově-přechodové techniky. Navrhovaná metoda má příčné rozlišení $1\text{--}2 \text{ mm}$, maximální relativní chyba odhadu Youngova modulu, modulu pružnosti ve smyku a Poissonovy konstanty činí 6% , 5% a 4% .

Hustota plniva $\rho_{\text{SiC}} = 3,2 \times 10 \text{ kg/m}^3$, hustota základního materiálu $\rho_{\text{AK}} = 2,735 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (viz tabulku 3.1).

Teoretické hodnoty Youngova modulu E_0 , modulu pružnosti ve smyku G_0 a Poissonovy konstanty ν_0 se odvozují následovně:

$$E_0 = \rho_0 V_s^2 \left[\frac{3V_{l_0}^2 - 4V_s^2}{V_{l_0}^2 - V_s^2} \right], \quad (3.6)$$

$$G_0 = \rho_0 V_s^2, \quad (3.7)$$

$$\nu_0 = \left[\frac{V_{l_0}^2 - 2V_s^2}{2V_{l_0}^2 - 2V_s^2} \right], \quad (3.8)$$

kde ρ_0 je vypočtená hodnota hustoty, V_{l_0} je teoretickou hodnotou fázové rychlosti podélných akustických vln a V_s je naměřenou rychlostí příčné akustické vlny ve vzorku. Výpočet elastického modulu se zakládá na V_s , neboť přítomnost vzduchových dutin nemá vliv na pevnost vzorku ve smyku; snížení V_s v důsledku rozptýlení příčných vln póry není zohledněno.

Tabulka 3.1. Parametry vzorků

Číslo vzorku	Tloušťka H , mm	Objemová koncentrace v součástech n		Vypočtená hustota $\rho_0, \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Naměřená hustota $\rho, \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Porozita P , %
		AlSi12CuNiMg	SiC			
1	10,70	1,0	0,0	2,735	2,714	0,80
2	10,18	0,967	0,033	2,750	2,710	1,45
3	10,98	0,933	0,067	2,766	2,665	3,65
4	4,72	0,864	0,136	2,798	2,660	4,90

Výsledky měření a teoretických kalkulací jsou uvedeny na obr. 3.1. Teoretické hodnoty modulu elasticity zjevně narůstají se zvyšující se koncentrací SiC, nicméně se také zvyšuje porozita materiálu, což naopak vede ke snížení modulu elasticity. Objemová porozita kompozitních materiálů na bázi slitiny AK12M2MgN zesílené částicemi z karbidu křemíku (SiC) by tudíž pro podstatné zvýšení modulu elasticity neměla překročit 2–2,5 %.

Průchodově-přechodová technika laserové ultrazvukové strukturoskopie umožňuje nedestruktivní posouzení elastických vlastností a porozity kompozitních vzorků. Této diagnostické metody je zapotřebí při vývoji nových materiálů a v případech, kdy je zapotřebí identifikovat „slabá místa“ u obrobků vyráběných z kompozitních materiálů.

Průchodově-přechodová technika má ovšem svá závažná omezení: je nutný přístup z obou stran vzorku, s tím že by vzorek měl mít tvar desky s rovnoběžnými stěnami, což je ve vztahu ke značným rozměrům součástí v experimentální a velkoobjemové výrobě v podstatě nemožné.

3.4 Měření zbytkových napětí slitin pomocí širokopásmové ultrazvukové strukturoskopie

Širokopásmová ultrazvuková strukturoskopie se používá pro měření napětí u vzorků z vysokoteplotních slitin. Ukazuje se, že akusticko-elastickou metodu a laserovou ultrazvukovou defektoskopii lze použít pro určení hloubkové distribuce zbytkového napětí. Měření byla prováděna na testovacích vzorcích ze žáruvzdorné niklové a titanové slitiny se specifickou distribucí zbytkového napětí po vakuovém tepelném zpracování, vibračním odlehčení nebo balotínování. Výsledky byly porovnávány se zbytkovými napětími určenými na základě změn v deformacích po odstranění vrstev ze vzorku pomocí elektrochemického leptání.

Zbytková napětí se vyskytují u mnoha vyráběných struktur a součástí. Zbytková napětí významně ovlivňují mnoho technických vlastností materiálů a strukturálních součástí, zejména pak únavovou životnost, deformaci, deformaci rozměrové stability, rozměrovou stabilitu, odolnost vůči korozi a křehký lom. [14] Veškeré metody testování zbytkového napětí jsou klasifikovány buď jako destruktivní, polodestruktivní, nebo nedestruktivní. [15] Segmentování [16], tvarové obrábění [17, 18] a odvrtávání [16] představují destruktivní metody. U těchto metod se provádí měření výsledné deformace způsobené redistribucí zbytkového napětí. Mezi nedestruktivní metody patří rentgenová [19] nebo neutronová difrakce [19, 20], ultrazvukové [21] a magnetické metody [22].

Jedním ze slibných směrů vývoje nedestruktivních technik měření zbytkového napětí je uplatnění ultrazvuku. Techniky ultrazvukového měření napětí jsou založeny na akustoelastickém efektu, dle něhož rychlost šíření elastické vlny v pevných látkách závisí na mechanickém napětí. Mechanická napětí způsobují místní změny v rychlosti ultrazvuku a hustotě média. Médium se stává akusticky heterogenním. V důsledku toho dochází následkem nárůstu heterogenit k rozptylu ultrazvukových vln. Rozptýlené vlny nesou informaci o magnitudě a distribuci mechanických napětí.

V této studii jsme použili širokopásmovou optoakustickou strukturoskopii pro měření napětí u vzorků z vysokoteplotních slitin; výsledky byly porovnávány se zbytkovými napětími určenými na základě změn v deformacích po odstranění vrstev ze vzorku pomocí elektrochemického leptání.

3.5 Metody

Vztah mezi koeficientem odrazu ultrazvuku a hloubkovou distribucí zbytkového napětí lze najít za využití vrstveného modelu média, jehož akustická impedance Z se z jedné vrstvy na druhou plynule mění: ($Z = \rho V$), kde ρ je hustota materiálu a V je rychlost podélných akustických vln.

Za předpokladu, že hustota média je konstantní, závislost rychlosti podélných ultrazvukových vln na hloubce x lze zapsat následovně:

$$V(x) = V_0(1 + \alpha(x)) \quad \Leftrightarrow \quad \alpha(x) = \frac{V(x) - V_0}{V_0}, \quad (3.12)$$

kde $\alpha(x) \ll 1$.

Tloušťka vrstev musí být dostatečně malá, aby bylo možno pominout změny rychlosti $V(x)$ a $\alpha(x)$ v rámci jednotlivých vrstev. Také je zapotřebí zohlednit pouze jednotlivé odrazy od přechodů mezi vrstvami. To je přiměřené, neboť změny v akustické impedanci nepřesahují (1–2) % a podíl opakovaných odrazů je nízký (mimo přesnost měření).

Koeficient akustického odrazu pro i -tou vrstvu je popsán vzorcem:

$$R(x_i) = \frac{\rho V^i - \rho V^{i-1}}{\rho V^i + \rho V^{i-1}} \approx \frac{V^i - V^{i-1}}{2V_0} = \frac{1}{2}(\alpha(x_i) - \alpha(x_{i-1})). \quad (3.13)$$

Tudíž

$$\sum_{i=1}^k R(x_i) = \frac{V^k - V_0}{2V_0} = \frac{\alpha(x_k)}{2} \quad \Leftrightarrow \quad \alpha(x_k) = 2 \sum_{i=1}^k R(x_k). \quad (3.14)$$

V extrémním případě nekonečně tenkých vrstev, pokud přejdeme od součtu k integraci a zohledníme akustoelastické vztahy, získáme pro hlavní napětí následující výraz:

$$\begin{cases} \sigma_{33}(x_1) = A_1 \times \int_0^{x_1} R(x) dx \\ \sigma_{11}(x_1) + \sigma_{22}(x_1) = B_1 \times \int_0^{x_1} R(x) dx \end{cases} \quad (3.15)$$

Pro určení hloubkového profilu zbytkového napětí je zapotřebí změřit a integrovat koeficient rozptylu ultrazvuku. V průběhu kalibrační procedury se určují konstanty A_1 a B_1 .

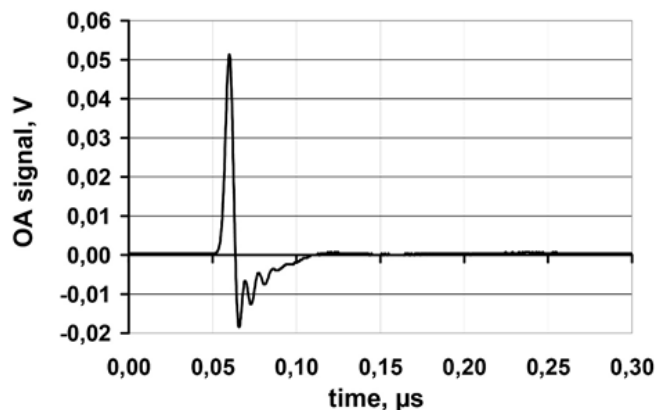
3.6 Experimentální výsledky měření rychlosti podélných akustických vln generovaných pulzním laserem

V rámci této studie byla pomocí přesného nástroje změřena rychlost podélných akustických vln generovaných pulzním laserem; to výrazně zlepšilo přesnost měření doby průletu pro rychlost zvuku a následně zbytkového napětí. Laserový opticko-akustický měnič excitoval krátké, silné ultrazvukové impulzy s amplitudou tlaku až 0,1 MPa a trváním 100 ns a přijal akustické signály rozptýlené heterogenitami uvnitř vzorků. Akustické signály byly přeměněny na elektrické signály, následně směřované do digitálního osciloskopu a PC k dalšímu zpracování.

Měnič přijal optoakustické signály odražené od povrchu vzorku, rozptýlené heterogenitami způsobenými zbytkovými napětími; jsou to právě rozptýlené signály, jež poskytují informace o distribuci akustické impedance, a tudíž také o zbytkových napětích. Typický časový průběh vlny je zobrazen na obr. 3.5. Oscilační část záznamu nese informaci o distribuci zbytkového napětí.

Úplný záznam časového průběhu vlny znázorněný na obr. 3.5 je konvolucí časově omezeného tvaru intenzity pulzního laseru s funkcí přenosu měniče a funkcí odezvy heterogenity média. Pro izolaci požadovaného normalizovaného signálu, tj. funkce reakce média, byl dekonvolován celý časový průběh vlny ve vztahu k signálu získanému ze vzorku bez zbytkového napětí. Tudíž byla určena distribuce akustické impedance Z s hloubkou x . Převod

časové hodnoty na hloubku byl proveden následovně: čas byl vynásoben polovinou rychlosti ultrazvuku v médiu, neboť doba, za kterou signál dorazí od dané vrstvy, odpovídá době, kterou vyžaduje přenos signálu k vrstvě a zpět.

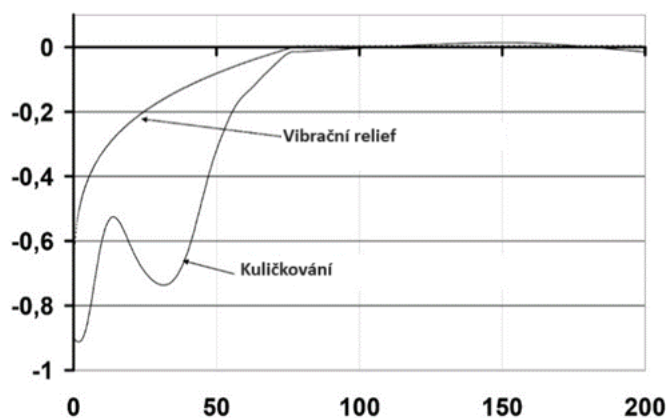


Obr. 3.5. Typický časový průběh vlny detekovaného ultrazvukového signálu

Měření byla prováděna na nejméně 10 bodech povrchu vzorků; všechny záznamy byly zpracovány výše uvedeným způsobem. Měření akustické impedance byla pro každý hloubkový bod zprůměrována. Změny v průměrných hodnotách akustické impedance byly po kalibrační proceduře převedeny na absolutní hodnoty napětí.

Měření byla prováděna na testovacích vzorcích ze žáruvzdorné niklové slitiny se specifickou distribucí zbytkového napětí po vakuovém tepelném zpracování, vibračním odlehčení nebo balotínování.

Při provádění měření akusticko-elastickou metodou byl nejprve zaznamenán normalizovaný signál z povrchu testovaného vzorku po tepelném zpracování; vzorek měl v minimálních hloubkách minimum zbytkových napětí. Tento signál byl zvolen jako referenční. Měření na ostatních testovacích vzorcích byla pomocí výše popsaného postupu porovnána s referenční úrovní. Výsledky měření relativních odchylek akustické impedance v závislosti na hloubce po jednotlivých typech úprav jsou uvedeny na obr. 3.6.



Obr. 3.6. Vzorky žáruvzdorných slitin: relativní odchylka akustické impedance oproti hloubkovým křivkám (akusticko-elastická metoda)

Výsledky akusticko-elastické metody byly porovnány s výsledky absolutní destruktivní metody pro určení zbytkových napětí. V jejím případě byla zbytková napětí určována na základě změn

v deformacích po odstranění jednotlivých vrstev pomocí elektrochemického leptání. Následně se řešila zbytková napětí u vzorků ze žáruvzdorné niklové slitiny, kde došlo k odstranění vrstev o tloušťce 1 μm . Z obrázku 3.6 je zjevné, že výsledky porovnání akustické impedance a hloubkových křivek jsou podobné výsledkům porovnání zbytkových povrchových napětí a hloubkových křivek.

Kalibrační faktor byl určen jako poměr hodnoty zbytkového napětí a akustické impedance v bodech o referenční hloubce. Výpočet byl založen na 80 měřicích bodech (od 20 μm do 100 μm), neboť měření pomocí destruktivní metody probíhala s krokem o velikosti 1 μm . Průměrná hodnota byla převzata jako kalibrační faktor a odpovídá 580 MPa. Tímto způsobem lze získat kalibrační faktor jakékoli slitiny.

4 Kontrola vnitřních vlastností spojů vytvořených pomocí vícemateriálového aditivního výrobního procesu

V předchozí kapitole 3 byl popsán vývoj metod pro nedestruktivní zkoušení epoxidových kompozitů s grafitovými vlákny, které nacházejí široké uplatnění v nejrůznějších odvětvích průmyslu. Tyto metody jsou důležité, protože epoxidové kompozity mají komplexní heterogenní strukturu, v níž může při dynamické zátěži docházet k poškození a vzniku pórů, oddělení jednotlivých vrstev (delaminace) a lokálnímu přetížení jednotlivých vrstev. Vysoká koncentrace těchto mikrodefektů, a to dokonce i když nedochází k výskytu zřetelných strukturálních defektů, může vést k zásadnímu snížení pevnosti materiálu. Jelikož mikrodefekty jsou jedněmi z nejdůležitějších vad kompozitních struktur, které ovlivňují vlastnosti konstrukce a její zbytkovou únavovou životnost, jsou na trhu vítány nedestruktivní technologie schopné detekovat přeměny vnitřní struktury materiálů vytvořených pomocí vícemateriálového aditivního výrobního procesu. V této kapitole je diskutována možnost posoudit zbytkovou životnost artefaktů kompozitu u struktury s kritickým významem pomocí laser-optické strukturoskopie.

4.1 Základy použití laser-optické strukturoskopie

Schéma laser-ultrazvukového strukturoskopického systému je popsáno v kapitole 2. Kontaktní laser-optická strukturoskopie je ultrazvukový prostředek pro testování, využívající laserovou excitaci detekčního ultrazvukového impulsu a extra širokopásmový piezoelektrický detektor zapojený do jednoho zařízení – laser-ultrazvukového měniče. Laserový impuls, generovaný Q-spínanou diodou a Nd:YAG opticky pumpovaným laserem, je pomocí optického vlákna přiváděn do laser-ultrazvukového měniče. Detekční ultrazvukový impuls je excitován v průběhu absorpce laserového impulsu. Rozdělí se na dva impulsy šířící se opačným směrem k piezoelektrickému detektoru a vzorku, spojenému s měničem pomocí kapky tekutiny. Elektrický signál celkové ultrazvukové stopy je převeden na digitální data a následně je on-line zpracován v PC (obr. 2.6 na str. 22).

Systém pro ruční obsluhu využívající princip laser-optické strukturoskopie, představený na obr. 2.6, se skládá z optoelektronické jednotky, laser-ultrazvukového měniče s přípojovacími kabely a on-line PC s optoelektronickou jednotkou. Systém je schopen pracovat s několika typy ultrazvukových měničů a využívat jich pro odlišné aplikace. Na obrázku je uveden laser-ultrazvukový měnič pro všeobecné použití. Jeho detekční impuls má hladký tvar bez zákmitů a při polovině maximálního výkonu se šířkou 70 ns, frekvence činí 1 ksps. Krátká doba trvání impulsu a jeho hladký tvar zajišťují hloubkové rozlišení 0,1 mm u kovů a 0,05 mm u CFRC. Rozlišení laseru se odvíjí od průměru ultrazvukového paprsku a činí ~3 mm. Ultrazvuková stopa se zobrazuje na obrazovce PC. Prvním impulzem je detekční impuls, jenž se šíří směrem k piezoelektrickému měniči, následující impuls, jenž je mimo fázi s detekčním impulzem, je odrazem detekčního impulsu od volného povrchu měniče. Časové zpoždění mezi těmito dvěma impulzy odpovídá dvojnásobku doby přenosu ultrazvukové vlny v optoakustickém generátoru měniče. V důsledku volného prostoru se odraz uskutečňuje mimo fázi, v případě pevných materiálů k odrazu dochází ve fázi.

4.2 Zkoušení vázaných spojů vytvořených za použití AM procesu multimateriálové FFF technologie

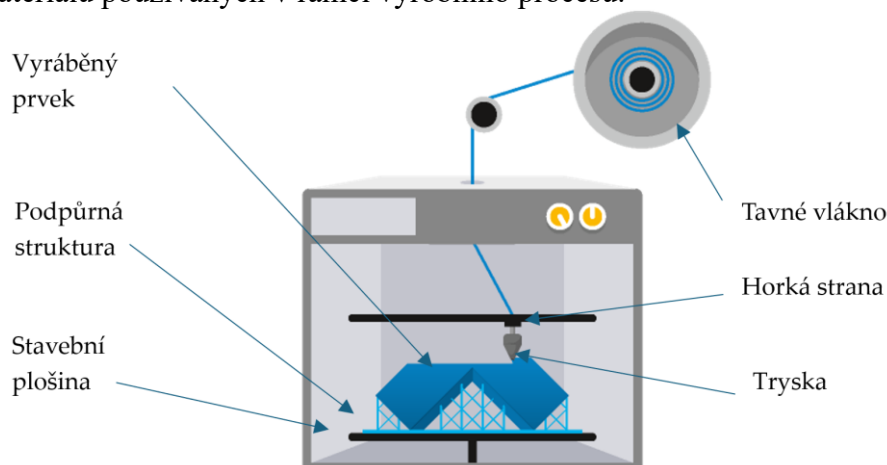
Díky skutečnosti, že kyselina polyléčná (PLA) je s ohledem na svůj přírodní původ šetrná k životnímu prostředí stal se tento materiál jedním z nejoblíbenějších biopolymerů. PLA má zároveň silné stránky, jako je dobrá pevnost, tuhost a odolnost vůči působení tuků a olejů. Na druhou stranu PLA také trpí výraznými nevýhodami, jež omezují její použití v rámci nejrůznějších aplikací: nízká rázová odolnost, nízké prodloužení a nízká tepelná odolnost. Napětí při přetržení je obvykle méně než 10 % a rázová pevnost je nižší než 2,5 kJ/m². Mezi zpevňujícími polymery, vhodnými pro eliminaci nevýhod PLA, patří akrylonitrilbutadienstyren (ABS), a to díky svému dobrému prodloužení při zatížení tahem, dobré odolnosti a snadné extruzi i formování. Další výhodou aditivně vyráběných součástí z materiálů na bázi styrenu je možnost provádění numerické simulace, která je možná i pro PLA. PLA a ABS nelze principiálně směšovat, a jejich kombinace tak vede k vytvoření hybridního materiálu, jehož důsledkem mohou být slabé mechanické vlastnosti a nestabilní morfologie. Uvedené materiály mají také svá omezení. PLA je charakterizována velmi nízkou teplotou skelného přechodu s nedostatečnou UV a hygroskopickou odolností. ABS taktéž vykazuje nízkou hygroskopickou odolnost, a navíc u něj v rámci řešení 3D tisku dochází k výrazné kontrakci, což činí jeho použití obtížným – na vyráběných dílech se vyskytují praskliny a delaminace. Ve vztahu k výše uvedeným omezením je nezbytné zajistit nejlepší možnou technologii aditivní výroby a vybrat vhodné materiály s ohledem na podmínky použití.

Jednou z možností spojování 3D tištěných polymerů pro dosažení lepších mechanických vlastností navržených spojů je vytvořit materiálový spoj pomocí multiextruzního 3D tisku pomocí FDM (Fused Deposition Modelling), což spadá do FFF (Fused Filament Fabrication) technologie. Speciálně upravené zařízení pro 3D tisk se může použít pro vytvoření prvků složených z dvou typů termoplastických materiálů, jež byly vyrobeny přímo, v rámci jediného procesu bez dodatečného zpracování. Hlavním problémem takto vytvářených spojů byly typicky jejich omezené mechanické vlastnosti.

V této části kapitoly se řeší efektivita a kvalita spojů vytvářených za využití dvojice materiálů. Za účelem dosažení velmi dobrých vlastností spoje došlo k navržení odpovídajícího aditivního výrobního procesu s technologií FFF a speciální geometrií spojů. Vytvořené spoje byly testovány za využití nedestruktivní, laserem buzené ultrazvukové metody, doplněné mikroskopickými pozorováními spojů před provedením zkoušek pevnosti v tahu a po jejich provedení. Výzkum umožnil získávání takových vlastností smíšených materiálů, jež by bylo možno využívat v mnoha rozličných průmyslových aplikacích. Zkoumaná technologie spojování polymerů je navíc reálnou alternativou ke konvenčním spojovacím metodám (lepené spoje, šroubované spoje apod.). Výsledky výzkumu umožňují prohlásit, že vyvíjená geometrie spojů společně s výrobní technologií mohou napomoci k dosažení polymerových spojů, charakterizovaných dobrými mechanickými vlastnostmi.

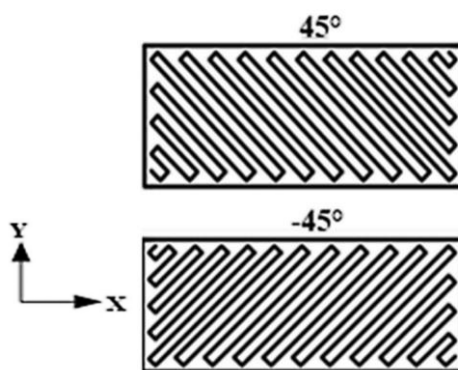
Experimentální část

Technologie *Fused Filament Fabrication* (FFF) (obr. 4.1.) představuje jednu z nejpobulárnějších aditivních technologií výroby, a to zejména z důvodu nízké ceny výrobních zařízení i materiálů používaných v rámci výrobního procesu.



Obr. 4.1. Schéma aditivního výrobního procesu pomocí technologie FFF²

FFF technologie 3D tisku umožňuje výrobu prvků s velice složitou geometrií. Geometrie vyráběných prvků pracuje s daty získávanými z 3D CAD softwaru. Tento typ dat eliminuje potřebu využití 2D výkresů při přípravě výrobního procesu. V průběhu procesu dochází k roztavení plastového vlákna v zahřáté trysce. Po vytlačení z trysky je plastifikovaný materiál přenášen na stavební základnu, kde postupně dochází ke konečné konstrukci požadovaného tvaru. Po dokončení každé z vrstev materiálu se stavební základna sníží, aby bylo umožněno vytvoření další vrstvy materiálu (coreXY). Proces se opakuje, dokud není dosaženo konečného tvaru vytvářeného prvku. Tiskové trasy byly pro každou z vrstev navrženy s rastry o úhlu $+45^\circ/-45^\circ$, jak je znázorněno na obrázku 4.2.



Obr. 4.2. Ukládání vrstev s odlišnými úhly rastry

Pro zkoušku byly použity materiály PLA Tough™ a ABS Smart™, poskytnuté společností Spectrum Filaments Ltd. Materiál PLA Tough™ je speciální směs PLA (kyseliny polymléčné), díky čemuž tento materiál vykazuje zlepšenou tepelnou odolnost i zlepšené mechanické vlastnosti. Chemické složení použitých materiálů dle údajů výrobce je uvedeno v tabulce 4.1.

² <https://www.materialise.com/sites/default/files/image-uploads/pages/Manufacturing/Technologies/FDM/FDM-3-compressor.png>

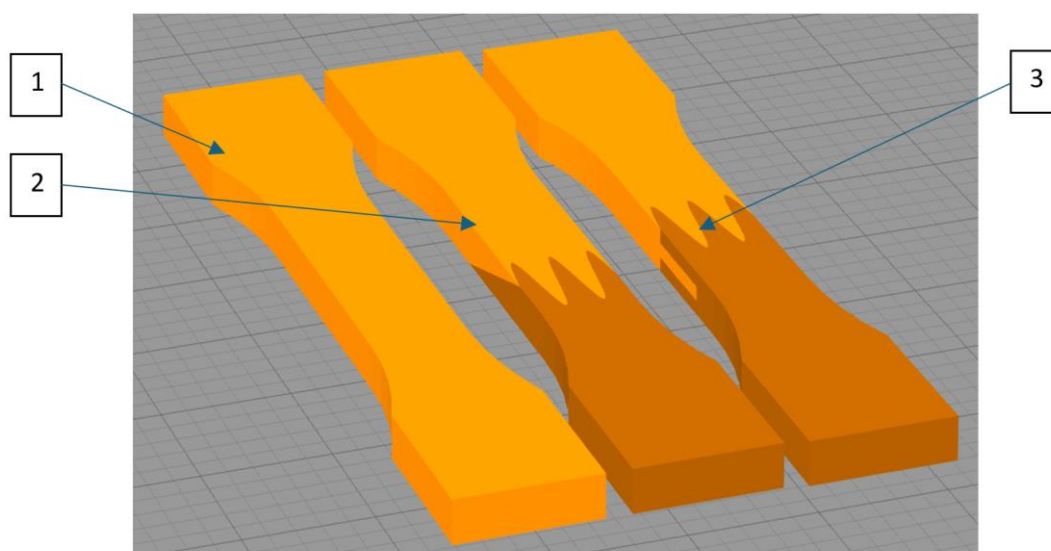
Tabulka 4. 1. Základní chemické složení použitých materiálů

Materiál %	Hmotnost PLA	Materiál %	Hmotnost ABS
Kyselina polymlečná	> 75	Akrylonitril	15–35
Křemičitan hořečnatý	< 25	Butadien	5–30
Další směsi	≈ 3	Styren	40–60

Pro dosažení požadovaných vlastností prvků byly navrženy následující parametry procesu:

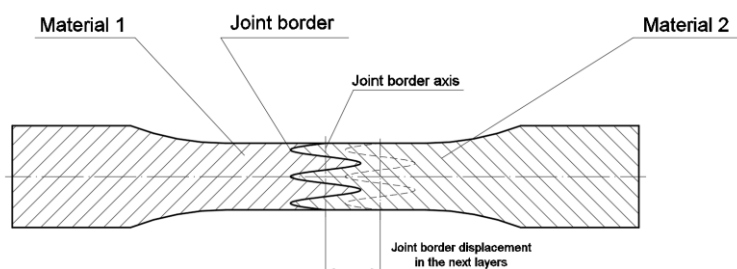
- Teplota horkého konce (pro oba materiály): 255 °C
- Teplota vyhřívané podložky 75 °C
- Tloušťka vrstvy: 0,2 mm
- Výplň: 100 %
- Rychlost tisku: 50 mm/s
- Průměr trysky: 0,4 mm
- Vzdálenost mezi extrudovanými drahami: 0,36 mm

Pro posouzení mechanických vlastností byly pomocí FFF aditivní technologie vyrobeny díly ve tvaru psí kosti dle normy „ASTM D638: *Standardní zkušební metoda pro mechanické vlastnosti plastů*“. Pro každou zkoušku bylo připraveno pět shodných vzorků, aby byla zajištěna spolehlivost takto získaných hodnot navržených spojů. Geometrie navržených vzorků s dvojicí odlišných spojů s referenčním monolitickým vzorkem je znázorněna na obrázku 4.3.



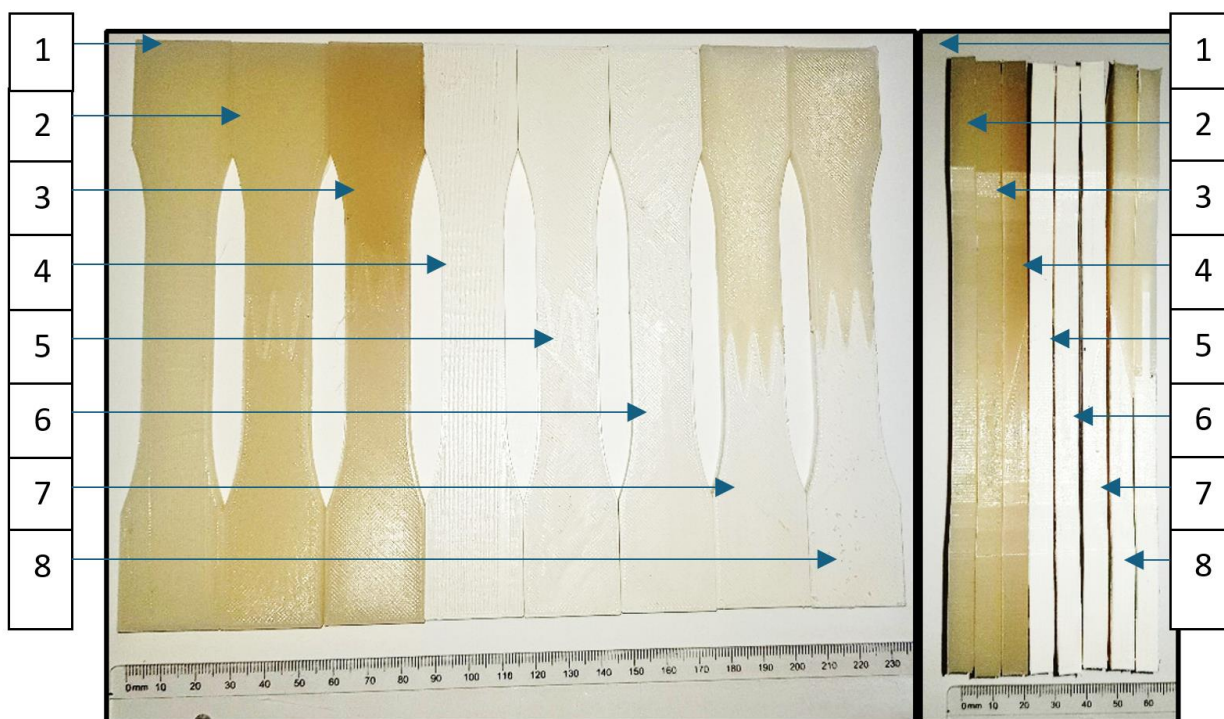
Obr. 4.3. Navržené vzorky: 1 – monolitický referenční vzorek; 2 – překrývaný spoj, 3 – skládaný spoj

Pro získání řádných vetknutých spojů byl v průběhu procesu použit plynulý přechod materiálů. Pro každou vrstvu spojovaných vzorků byly použity oba materiály na základě postupu znázorněného na obrázku 4.4.



Obr. 4.4. Postup výroby spoje pro každou vrstvu

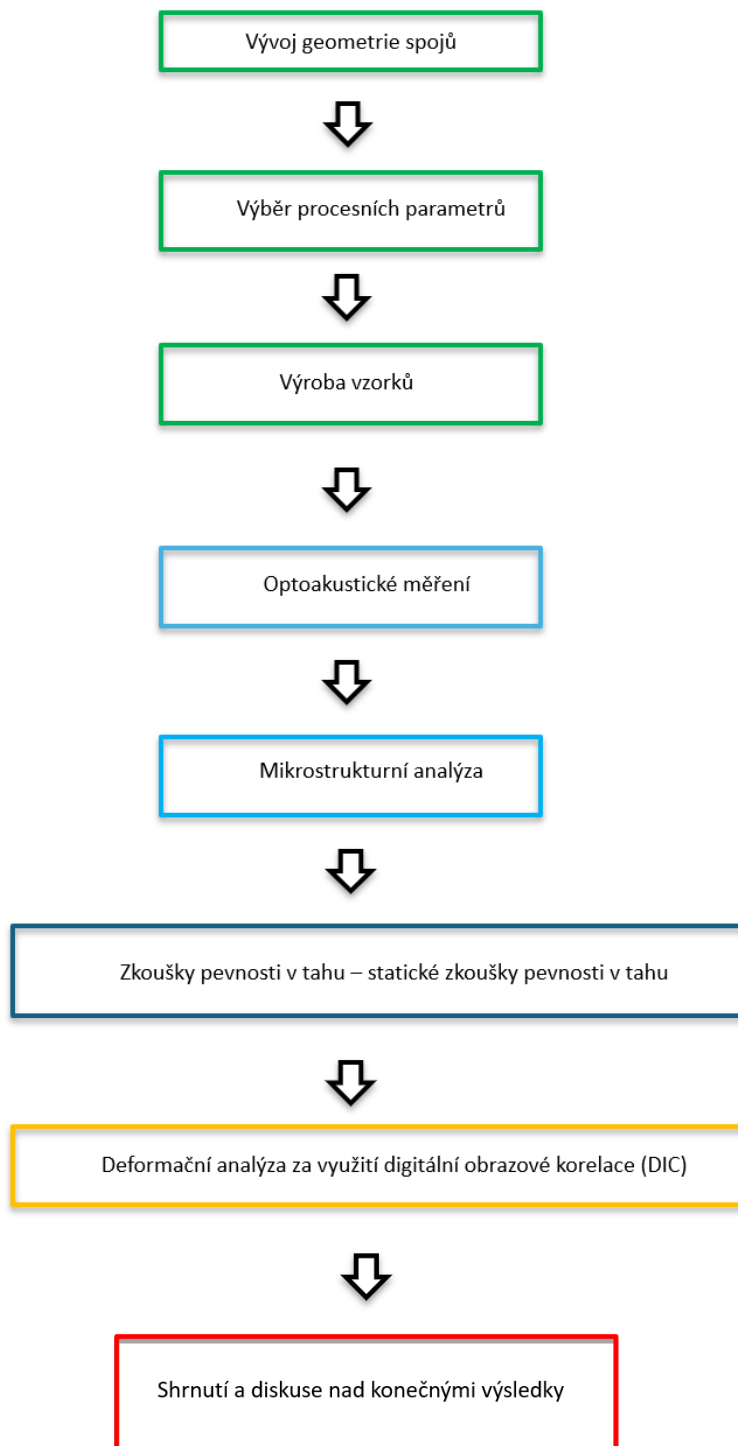
Pro získání spoje mezi dvěma materiály bylo v tiskárně Prusa Original MK2 použito čtyřcestné připojovací zařízení s Multi-Material Unit 1.0, což umožnilo extruzi dvojice odlišných materiálů, jež byly v průběhu procesu plynule měněny. Použití pouze jediné trysky vyžadovalo použití shodné teploty horkého konce.



Obr. 4.5. Aditivně vyráběné vzorky: 1 – monolitický, PLA (PT); 2 – skládaný spoj, PLA (PTZ); 3 – překrývaný spoj, PLA (PTN); 4 – monolitický, ABS (ABS); 5 – skládaný spoj, ABS (ABSZ); 6 – překrývaný spoj, ABS (ABSN), 7 – překrývaný spoj, PLA/ABS (PTABSZ); 8 – skládaný spoj, PLA/ABS (PTABSN)

Za účelem analýzy byly připraveny dva typy geometrie vetknutých spojů – překrývaný spoj (na obrázku 4.3. pod číslem 2) a skládaný spoj (na obrázku 4.3. pod číslem 3), jež byly taktéž zobrazeny a popsány na obrázku 4.5.

V souvislosti s popisovaným experimentem byl výzkum prováděn na základě programu znázorněného na obrázku 4.6.

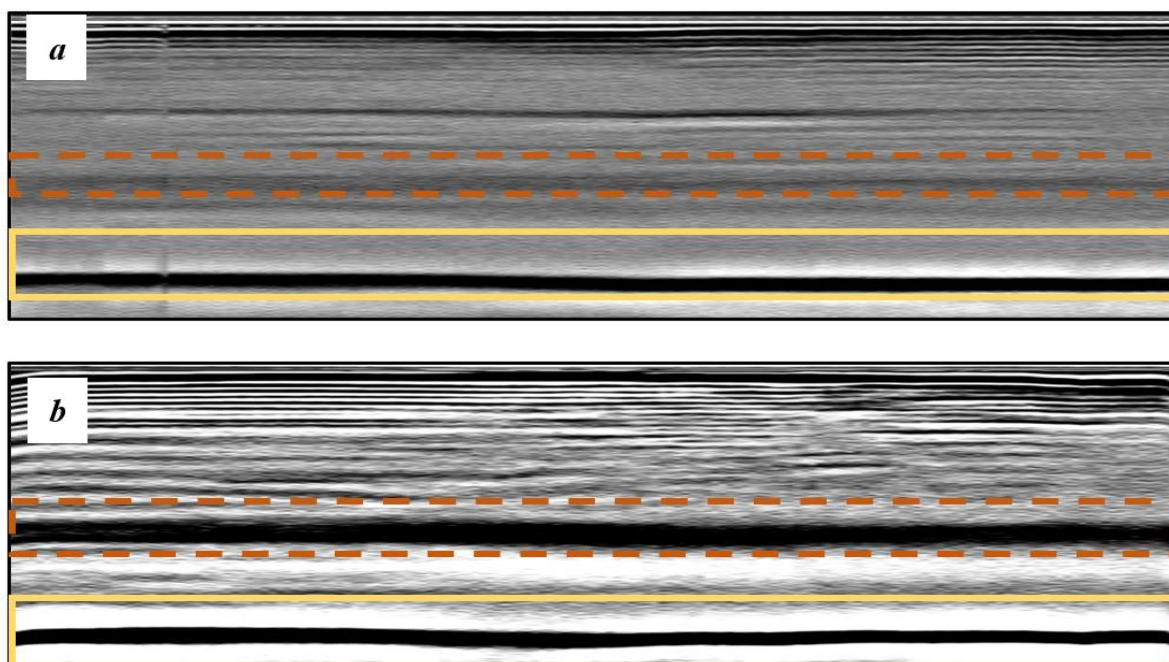


Obr. 4.6. Ilustrace metodiky výzkumu aplikované v rámci této studie

Výsledky měření

Laser-ultrazvuková strukturoskopie byla rozebrána v kapitole 3 a byla provedena u vzorků AP – P1 s „hladkým“ spojem a AP – Z1 s „překrývaným“ spojem. Před laserovými ultrazvukovými zkouškami bylo provedeno měření tloušťky výrobků. Rychlost podélné vlny ve směru kolmém k vrstvám kompozitu byla vypočtena na základě tloušťky vzorku a časovém rozdílu v příchodu signálů odražených od zadní strany objektu do rozhraní generátoru–objektu. Získané rychlosti šíření elastických vln pro vzorky činily: rychlost zvuku v ABS 2 165 m/s, rychlost zvuku v PLA 2 305 m/s. Ve vzorcích je jasně patrných více než 10 prvních vrstev polymeru, což umožňuje kontrolu výrobní technologie produktů z ABS a PLA. Kvalita vrstev polymeru byla posouzena na základě snímků vnitřní struktury vzorků.

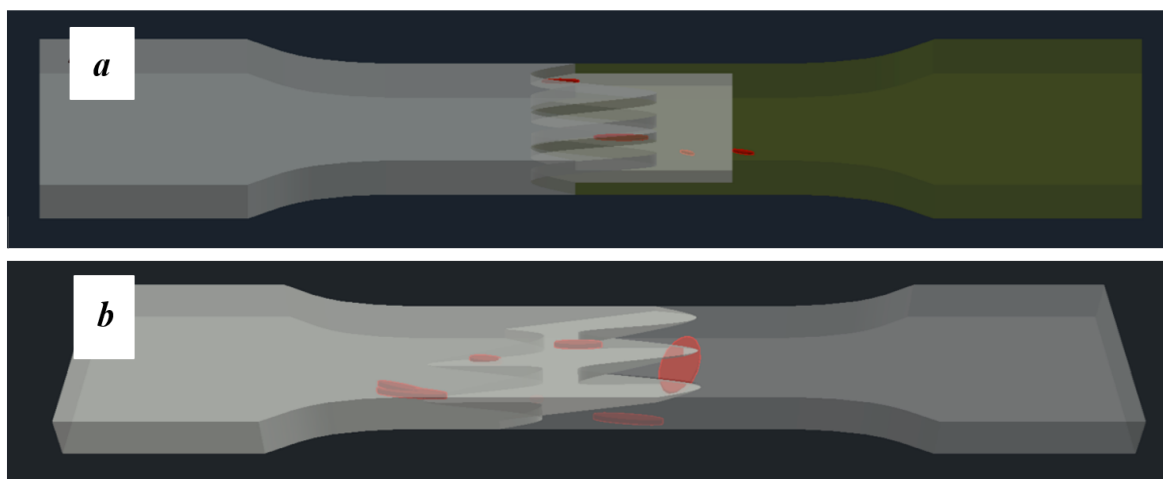
Obrázek 4.7. zobrazuje jeden ze získaných B snímků vnitřní struktury vzorků. Červená oblast představuje rušení technologického signálu, způsobené strukturou samotného senzoru: rozdíl v akustické impedanci opticko-akustického generátoru a vlnovodového prismatu.



Obr. 4.7. Vnitřní struktura vzorků: a) skládaný spoj, PLA Though™ a ABS; b) překrývaný spoj, PLA Though™ a ABS

Na obr. 4.7.a a 4.7.b žlutá oblast představuje zadní stranu objektu. Zobrazená nerovnost na zadní straně, jež je ve skutečnosti rovným povrchem, indikuje, že pojivo je heterogenní a vyskytují se zde místa s nižší hustotou materiálu. Změna v rychlosti šíření elastické vlny je přímo úměrná změně elastických vlastností. Rozdíl v průměrné hodnotě dosahoval až 100 m/s. Nerovnoměrnost může být taktéž způsobena defekty ve vnitřní struktuře nebo porézností.

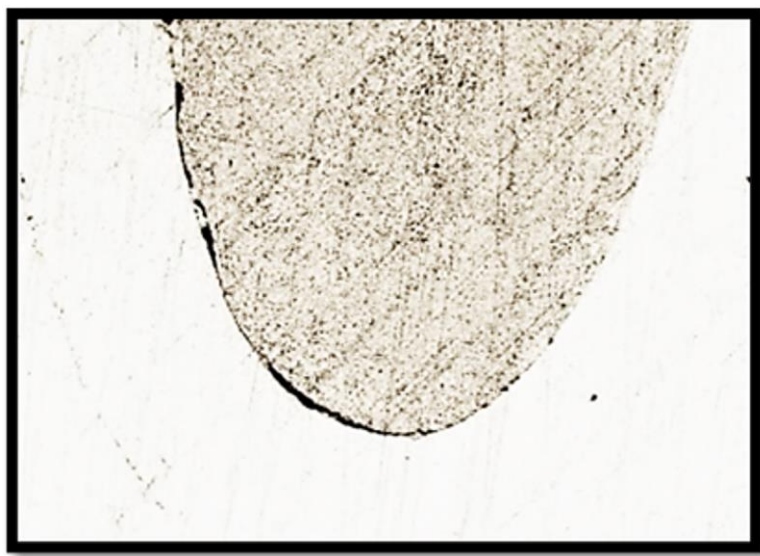
V průběhu studie byly zjištěny defekty v podobě delaminace, pórů i oblastí s narušenou geometrií prokládání materiálu. Za účelem lepšího vizuálního znázornění jsou nejvýraznější defekty na 3D modelech zobrazeny červenou barvou, jak je znázorněno na obrázcích 4.8.



Obr. 4.8. 3D model vzorků s označením oblastí defektů: a) skládaný spoj, PLA Though™ a ABS; b) překrývaný spoj, PLA Though™ a ABS.

Porovnaní s mikrostrukturální analýzou – výsledky

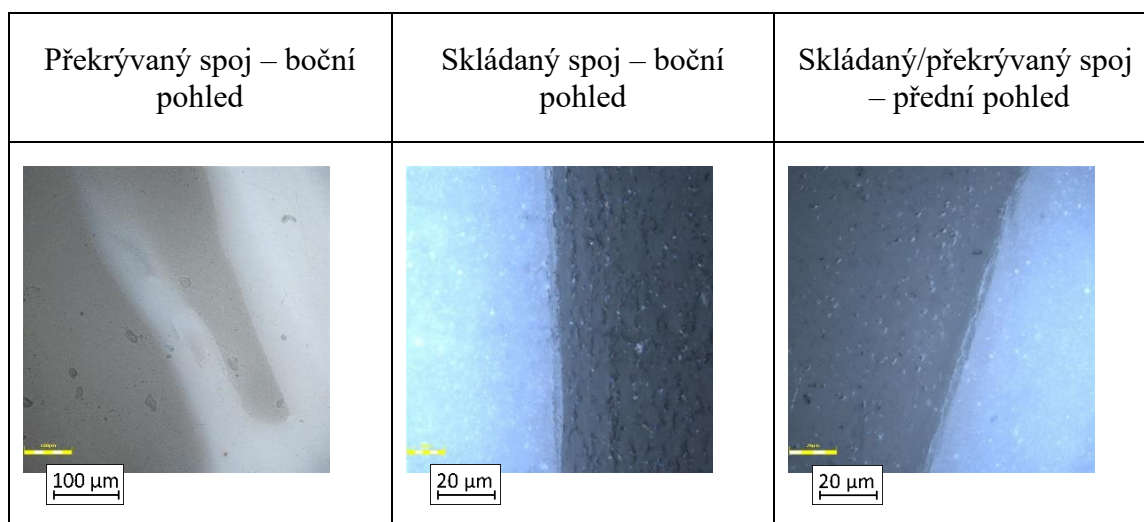
Z důvodu nedokonalostí spojů odhalených při nedestruktivní laser ultrazvukové strukturoskopii byly vzorky připraveny na mikroskopické pozorování oddělením části vzorku v místě spje a obroušením pomocí brusného papíru (gradace: 80, 120, 320, 500, 800, 1 000, 1 500, 2 000) a následně vyleštěny pomocí 1 μ m diamantové pasty. Mikroskopická pozorování byla provedena pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT 4100. Mikroskopická analýza zohlednila také oblasti s nedokonalostmi, jak je znázorněno na obrázku 4.9.



Obr. 4.9. Nedokonalosti (černé oblasti) na konci zvlněné hranice spoje

Nedokonalosti zjištěné při nedestruktivní laser ultrazvukové strukturoskopii byly spojeny s porézností a delaminacemi na boční části obou spojů. Počet nedokonalostí v celé pozorované oblasti byl podobný v celém objemu spoje (zobrazeno na obr. 4.8). Mikrostruktura spojů ve vyšším zvětšení, získaná pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT 4100 u jednotlivých stran vzorků je zobrazena v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2. Mikrostruktura navržených spojů



Jak je uvedeno v tabulce 2, hranice každého ze spojů v mikroskopickém měřítku nevykazuje žádnou významnou nedokonalost. Výjimku představují určité větší nedokonalosti (zobrazeny na obrázku 9), jež byly přítomny pouze u malé části celého prostoru spoje. Pouze jeden snímek pohledu zepředu pro oba typy spoje souvisí se stejným použitým vlnitým tvarem a stejnými typy snímku. Jak je viditelné z bočního pohledu na překrývaný spoj, materiál PLA (tmavá barva) prostoupil do roztřepené struktury materiálu ABS. Tento jev měl výrazný dopad na vlastnosti spojovaného materiálu. Na bočním pohledu na skládaný spoj vidíme oblast průniku obou materiálů, kde jeden materiál prostoupil do povrchových nepravidlostí druhého materiálu. Na posledním snímku – předním pohledu na oba navržené spoje vidíme překryv obou materiálů v důsledku snížení vzdálenosti mezi extruzními drahami.

Zkoušky pevnosti v tahu

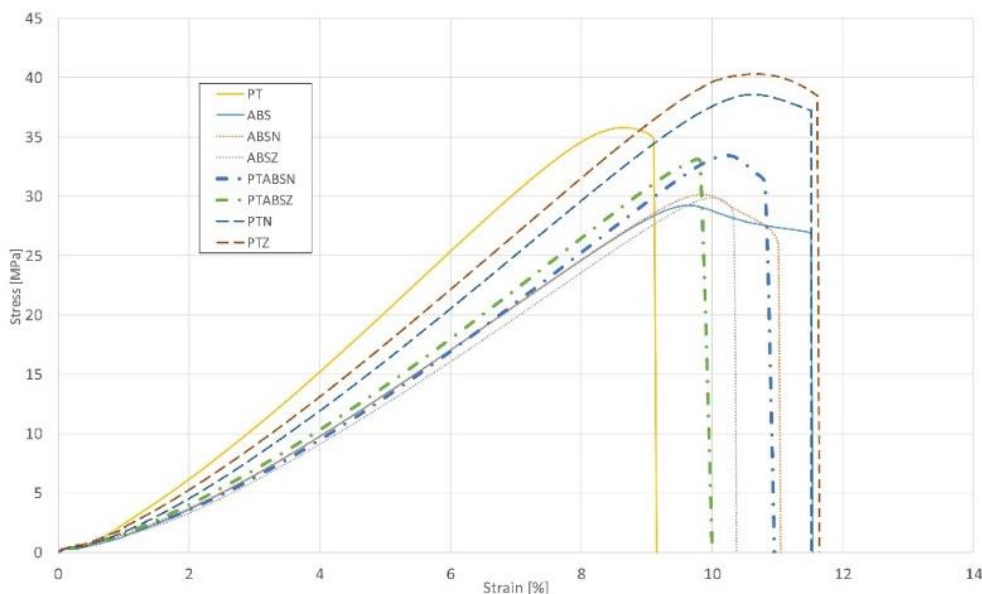
Zkoušky pevnosti v tahu byly prováděny v souladu s normou ASTM D638. Všechny zkoušky pevnosti v tahu byly prováděny za pokojové teploty a za využití univerzálního testovacího stroje Instron 8802 s kvazistatickou zátěží (5 mm/min). Další mikroskopická pozorování byla provedena za využití konfokálního mikroskopu Olympus LEXT 4100. Získané vlastnosti materiálů, mimo jiné pevnost v tahu a prodloužení při přetržení, jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 4.3. Mechanické vlastnosti zkoušených vzorků

	PT	ABS	PTN	PTZ	ABSN	ABSZ	PTABSZ	PTABSN
Mezní napětí	35,8	29,4	38,6	41,3	30,8	29,9	32,7	33,4
Deformace při přetržení (%)	9,15	11,5	11,5	11,6	11,01	10,34	10,1	11,0

Monolitický materiál PLA Tough™ vykazoval o 18 % vyšší pevnost v tahu než ABS a o 21 % nižší protažení při přetržení, což bylo teoreticky prokázáno také v dostupné literatuře. Prvním charakteristickým aspektem, souvisejícím s použitými spoji, je, že použitím daného typu spoje lze zlepšit mechanické vlastnosti vytvářeného prvku. Pozorovali jsme, že překrývaný spoj mezi oběma díly z materiálu PLA zvýšil pevnost v tahu daného vzorku o 2,3 % a současně zvýšil deformaci při přetržení o 21 %. Použití skládaného spoje mezi oběma díly z materiálu

PLA (PTZ) umožnilo zvýšení pevnosti v tahu o 14 % a zvýšení prodloužení materiálu o 22 %. Odlišné projevy byly pozorovány u spojů mezi prvky vytvářenými spojením dvou dílů z ABS. U spojovaných prvků došlo ke zvýšení pevnosti v tahu (5 % v případě překrývaného spoje – ABSN a 2 % v případě skládaného spoje – ABSZ). U obou typů spojů u spojovaných prvků z ABS bylo viditelné snížení prodloužení při přetržení (4 % v případě překrývaného spoje – ABSN a 11 % v případě skládaného spoje – ABSZ). Nejdůležitější byly výsledky pro prvky vytvářené pomocí navržených spojů z dvojice odlišných materiálů. Výsledky zkoušek pevnosti v tahu pro vzorky s použitými spoji z dvojice odlišných materiálů jsou v grafu na obrázku 4.10. znázorněny pomocí čerchované čáry.

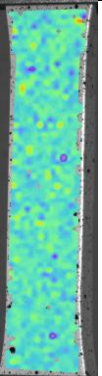
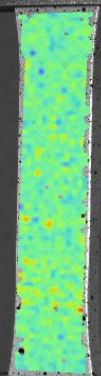
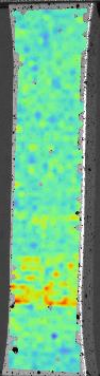
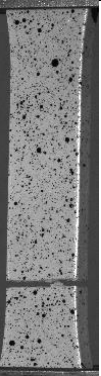

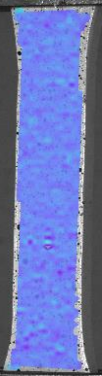
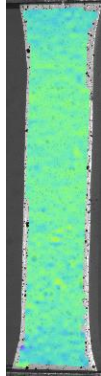
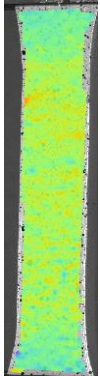
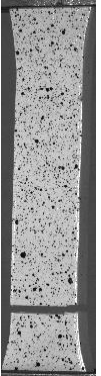

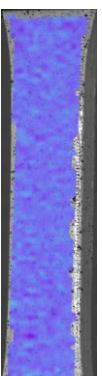
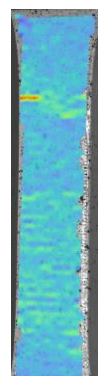

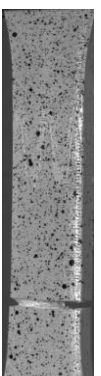
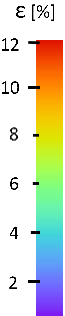
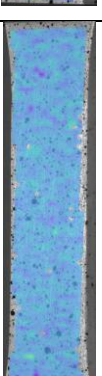
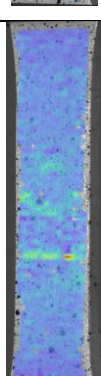
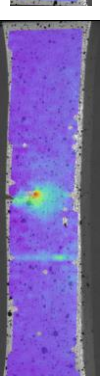
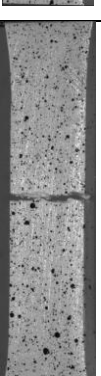
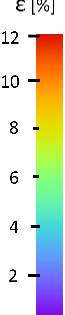


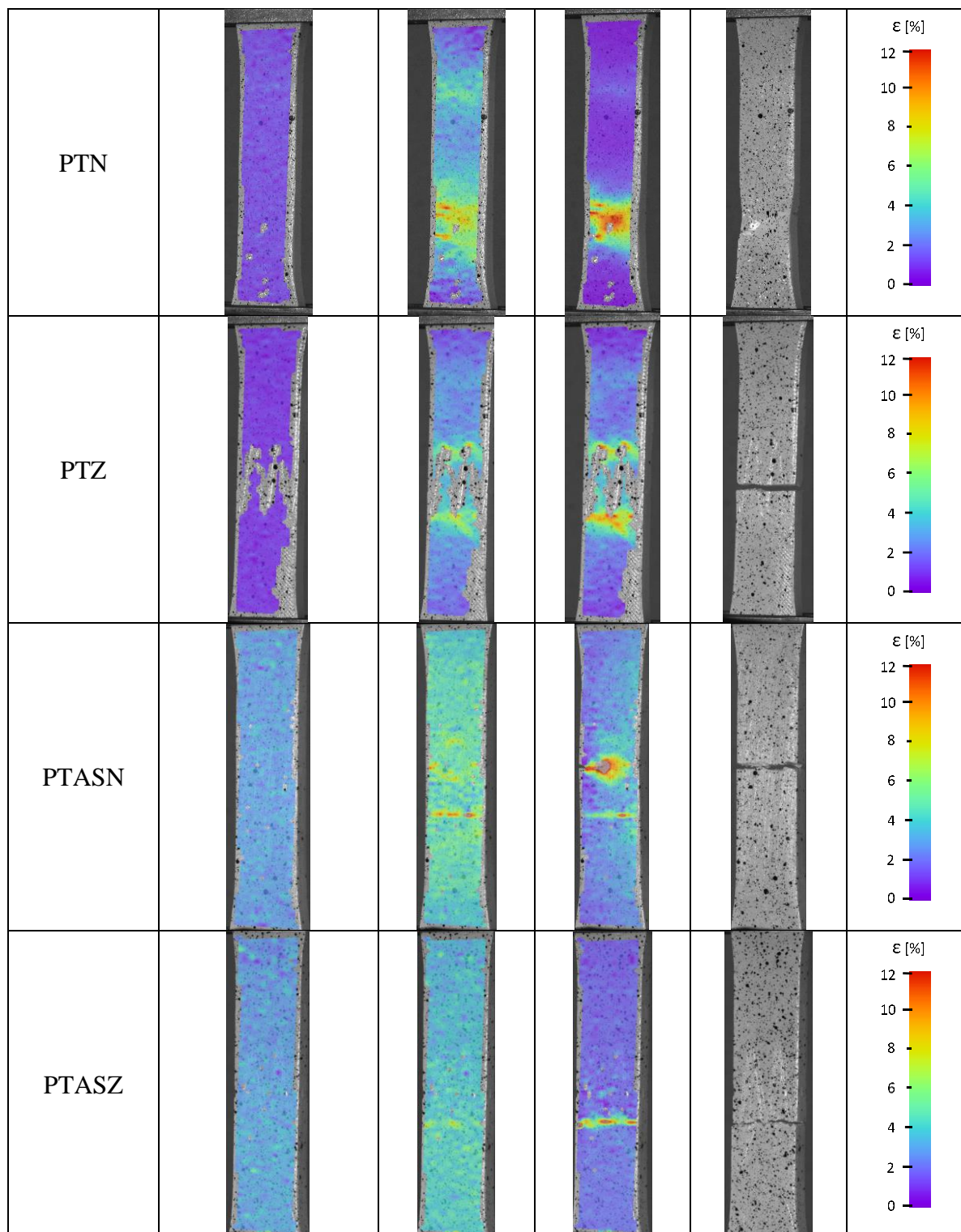
Obr. 4.10. Porovnání křivek napětí–deformace pro všechny typy testovaných vzorků

Oba prvky s použitým spojem vykazovaly lepší pevnost v tahu než monolitické prvky vyrobené z ABS a vyšší deformaci při přetržení než monolitické prvky vyrobené z materiálu PLA Tough™. Na základě těchto výsledků lze prohlásit, že existuje možnost spojovat polymery, jež nelze vzájemně mísit, při zachování výhod obou spojovaných součástí. Navržené typy spojů dále umožňují zvýšení pevnosti spojovaných materiálů. Tento jev souvisí s adhezními vlastnostmi navržených spojů, jež měly kladný vliv na pevnostní vlastnosti daného prvku (obzvláště v případě vytváření z materiálu PLA Tough™).

Vliv dodatečných adhezivních vlastností bylo možno pozorovat na výsledcích analýzy digitální obrazové korelace (DIC) deformací prvků v průběhu zkoušek pevnosti v tahu – tabulka 3. Pomocí digitální obrazové korelace (DIC) za využití systému Dantec Q-400 byla získána místní deformační pole. Před provedením zkoušek byly vzorky za účelem získání deformačních dat pomocí metody DIC připraveny nanášením náhodného černého vzorce na povrchu, jenž byl předtím natřen bílou matnou barvou. Na základě výsledků DIC došlo k získání řady snímků deformačních polí, jež odhalují rozvoj deformací v rámci daného spoje. Pro každý ze vzorků byly pomocí softwaru Dantec Istra 4D vytvořeny mapy posunu deformací. Bylo patrné, že prvky vytvářené z materiálu PLA mají mnohem výraznější šíření deformací ve srovnání s prvky vyráběnými z materiálu ABS, kde se materiál deformuje pouze těsně před přetržením. Z analýzy spojů je patrné, že u překrývaných spojů dochází v měřené oblasti k výrazně vyššímu šíření deformací. Lze si povšimnout, že se spoj deformuje po obou stranách hranice spoje podobně.

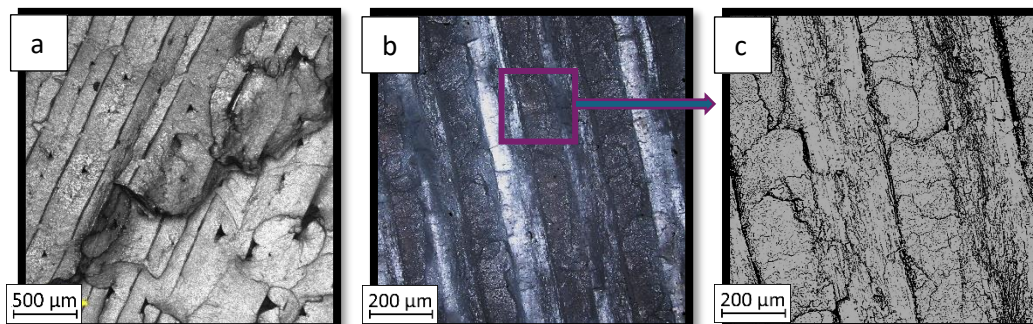
Tabulka 4.4. DIC mapy šíření deformací vzorků v průběhu zkoušek pevnosti v tahu (Digital image correlation of the elements deformation during tensile tests).

Popis vzorku	Deformace při prodloužení o 0,2 %	Deformace při R_m	Deformace při R_u	Deformace při přetržení	Měřítka
ABS					ϵ [%] 
PT					ϵ [%] 
ASN					ϵ [%] 
ASZ					ϵ [%] 



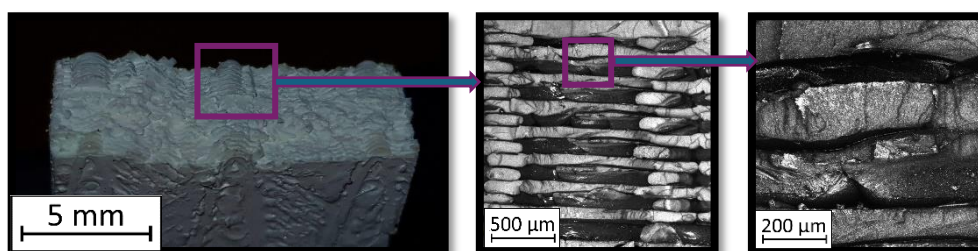
Jak je viditelné z grafu (obr. 4.10), vzorky s překrývaným spojem vykazovaly lepší pevnostní vlastnosti než vzorky se skládanými spoji (o 2 % vyšší pevnost v tahu a o 8 % vyšší prodloužení při přetržení). Tento jev souvisí s charakteristikou spoje. Na obrázku 4.13 je vyobrazeno přetržení vzorku s překrývaným spojem, kde vidíme poškození vzorku bezprostředně za částí vyrobenou z materiálu PLA. Prvky vyráběné za využití překrývaného spoje z materiálů PLA + ABS jsou dále charakteristické šířením deformací v průběhu zátěže, kde spoj „pracuje“ v rámci celého svého objemu. U prvků s tímto typem spoje docházelo k prasknutí na straně ABS materiálu, přičemž oblast lomu vykazuje lomivé charakteristiky

s určitými oblastmi houževnatého lomu (obr. 4.11a). Při porovnání spoje ABS a PLA docházelo k výskytu odlišného typu mechanismu prasknutí než u prvků z materiálu ABS. Lom překrývaného spoje PLA–ABS je zobrazen na obrázku č. 4.11a. Lom materiálu PLA byl charakterizován typickým křehkým lomem (obr. 4.11b) za přítomnosti mnoha podélných prasklin (obr. 4.11c).



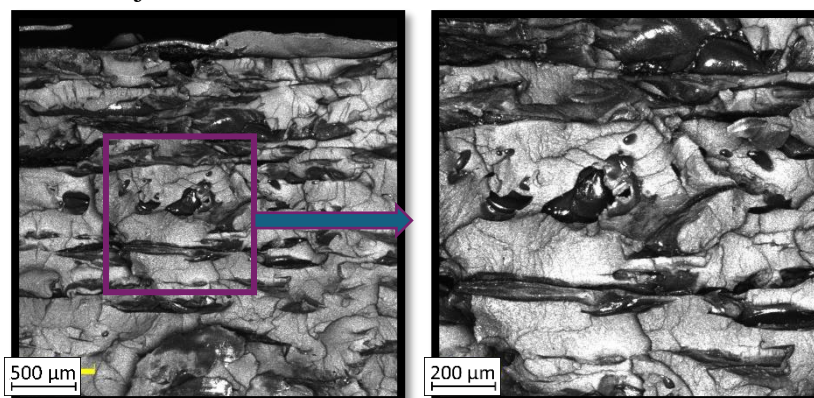
Obr. 4.11. Snímky lomů ABS (a) a PLA Tough™ (b, c)

V průběhu analýzy lomů prvků vyrobených z materiálů PLA a ABS skládaným spojem, byla pozorována delaminace spoje na pomezí materiálů PLA–ABS a charakteristika křehkého houževnatého lomu ve zbytku spoje, jak je znázorněno na obrázku 4.12.



Obr. 4.12. Snímky zlomů skládaného spoje z materiálů PLA–ABS

Na základě analýzy lomů jsou viditelné dva typy delaminace materiálu. První typ souvisel s pevností v tahu materiálu ABS, druhý souvisel s adhezivním spojem mezi oběma materiály. Stejná duální povaha lomu byla pozorována u překrývaných spojů, kde docházelo ke zlomení spoje na hranici spoje. Lepší tahové vlastnosti překrývaného spoje mohou být způsobeny součtem obou typů sil spoje – síly materiálu a síly adhezivního spoje. Zlom materiálu ABS s částicemi materiálu PLA je zobrazen na obrázku 4.13.



Obr. 4.13. Snímky zlomů překrývaného spoje z materiálů PLA–ABS

Jak bylo uvedeno ve výsledcích výzkumu, použití těchto typů spojů umožňuje zvýšení pevnostních vlastností daného prvku. Uvedený jev bylo možno pozorovat v rámci analýzy lomů. Lze tudíž dojít k závěru, že navržené typy spojů umožňují zlepšení pevnostních vlastností spojovaných materiálů, přičemž současně lze vytvářet prvky s odlišnými charakteristikami na každé ze stran daného spoje.

Závěry

V souladu s normami ASTM D-638 byly vytvořeny vzorky z akrylonitrilbutadienstyrenu (ABS) a kyseliny polymléčné (PLA) za účelem ověření pevnosti dvojice navrhovaných spojů mezi těmito materiály. Na základě výsledků výzkumu byly formulovány následující závěry:

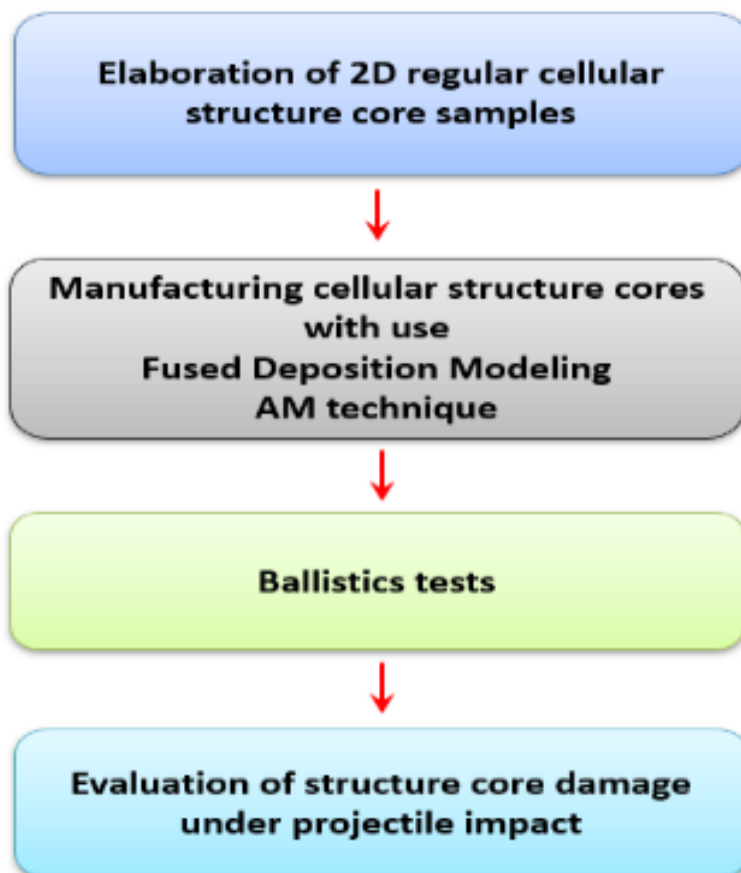
1. Studie odhalila, že vzorky s „překrývaným“ spojem mají vyšší pevnost než vzorky s „hladkým“ spojem. Důvodem je větší styčná plocha než u kolmé geometrie spoje a zdvojená povaha tloušťky materiálu na okrajích spojů. Použití „tvarovaných adhezivních“ spojů umožňuje v závislosti na použitých materiálech vytvářet prvky s odlišnými vlastnostmi. U obou typů spoje z ABS dílů došlo ke zvýšení pevnosti v tahu (o 5 % v případě překrývaného spoje – ABSN a o 2 % v případě skládaného spoje – ABSZ). Současně došlo ke snížení prodloužení při přetržení (o 4 % v případě překrývaného spoje – ABSN a o 11 % v případě skládaného spoje – ABSZ).
2. Kontaktní laserovou ultrazvukovou strukturoskopii lze použít pro vizualizaci interní struktury kompozitních materiálů. Je také možné kontrolovat kvalitu speciálních spojů a detekovat vnitřní defekty pro posouzení počtu a tloušťky vrstev plastů typu PLA a ABS.

5 Nedestruktivní kontrola kompozitních balistických materiálů

Současný pokrok v oblasti materiálových věd a rostoucí potenciál aditivní výroby přitahují stále větší zájem o materiály s pravidelnou buněčnou strukturou. [64–66] Spojení vysoké mechanické pevnosti a nízké střední hustoty umožňuje použití tohoto druhu materiálů v různých odvětvích průmyslu, mimo jiné v letectví, stavebnictví, železničním a automobilovém průmyslu. Kromě toho se tyto buněčné struktury vyvíjejí jako multifunkční materiály pro nové vojenské pasivní ochranné systémy. Aditivně vyráběné materiály s buněčnou strukturou jsou navrhovány jako přídatná jádra pro snížení účinku rázového zatížení. To je možné díky jejich plastické deformaci při nárazu. V poslední době bylo v této oblasti provedeno velké množství studií [67–71], které využívaly různé formy přístupu k problému: analytický [72–74], numerický [75–79] a experimentální [80–84] v podmínkách statického a dynamického zatížení. Hodnocení průběhu deformace buněčného jádra za podmínek statického zatížení vychází z údajů získaných z jednoosých tahových zkoušek prováděných ve směrech zatížení mimo rovinu a v rovině [5, 85–87]. Hodnocení chování konstrukce při dynamickém zatížení je složité a vyžaduje komplexnější přístupy. Tento typ zkoušek se běžně provádí pomocí dělené Hopkinsonovy tlakové tyče nebo může vycházet z výsledků balistických zkoušek [88, 89]. Tlaková tyč umožňuje určit mechanickou odezvu materiálu měřenou jako posun v závislosti na síle, výsledkem balistických zkoušek je pak hloubka a geometrie průniku střely. [90] Dalším přístupem je rozřezání poškozeného vzorku pro vizuální pozorování. Řezání je však často nepřesné a závislé na lidské interakci, což vede k deformaci struktury řezaného vzorku ve srovnání s původním vzorkem. Výše uvedené metody jsou destruktivní, což v mnoha případech představuje významné omezení. Na základě přehledu literatury na téma analýzy odezvy konstrukce na vysokorychlostní náraz byly použity různé způsoby nedestruktivní diagnostiky hliníkových sendvičových konstrukcí. Rentgenová tomografie je časově i datově náročná, a proto se o této technice neuvažovalo. Štoller a kol. se ve své práci [91, 92] zabývají využitím ultrazvukových metod pro diagnostiku prvků ochranných konstrukcí po zatížení kontaktním výbuchem. Použili konvenční ultrazvuk na bázi piezoelektrických snímačů/přijímačů. Jejich metoda narazila na určitý limit při detekci úzkých trhlin, případně ji nelze aplikovat na tenké, submilimetrové desky kvůli příliš nízké frekvenci konvenčních ultrazvuků (< 10 MHz).

V rámci výzkumu bylo vyzkoušeno několik vyvinutých technik na bázi laserového ultrazvuku. Tyto techniky umožňují generovat a detekovat šíření ultrazvuku s vysokou opakovací frekvencí a bezkontaktně pomocí interferometrie. Definované metody a laserové interferometry jsou přizpůsobené pro kontrolu kompozitních materiálů a hřebenových struktur. Na trhu jsou také k dispozici interferometry s širokým pásmem (> 100 MHz) pro detekci mikrotrhlin a mikrodelaaminace, jako jsou například „kissing bond“ defekty – pro tento výraz není český ekvivalent, nicméně se jedná o trhliny ve svarech. Laserové ultrazvuky generované krátkým pulzním laserem (délka pulzu 10 ns) a nízkým optickým tokem (několik mJ/cm²) však silně podléhají hydrodynamickému rozpadu ultrazvukového pulzu, což omezuje kontrolu na poměrně tenké materiály (tloušťka několik mm). Proto bylo navrženo použití vyššího optického toku (J/cm²) ve spojení s širokopásmovým laserovým dopplerovským interferometrem pro kontrolu mikrotrhlin a delaminace, jako jsou například kissing bonds v silných materiálech. Tento přístup metodou B-scan byl pro lepší pochopení procesu šíření vln spojen s numerickou simulací pomocí konečných prvků, ale tyto metody přinesly výsledky, které z nákladových

a technických důvodů zůstávají dostupné pouze pro průmysl technologií s vysokou přidanou hodnotou. Kromě toho nelze stávající verze této techniky v reálných podmínkách považovat za přenosné. Alternativní řešení spočívá v generování ultrazvuku pomocí pulzního laseru v omezené skleněné geometrii a snímání odražených vln pomocí piezoelektrického senzoru spojeného s širokopásmovým zesilovačem náboje. [93] Tato technika přinesla perspektivní výsledky u kompozitních materiálů [94], kde se využívá pro kontrolu vnitřních defektů – neboli defektoskopii. Tato kapitola je zaměřena na vyhodnocení této procesní kontroly ve strukturním měřítku na silnějších sestavách, a to ve své tzv. strukturoskopické verzi.



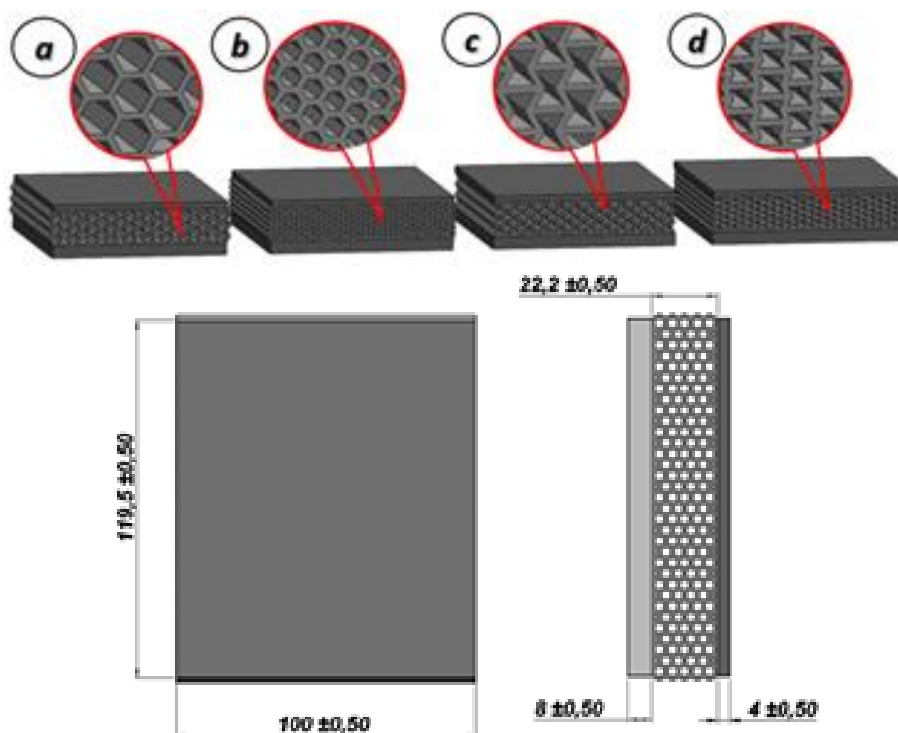
Obr. 5.1. Fáze studie

Zkoumanou strukturou je 3D tištěná polymerní hřebenová struktura, vložená mezi dvě asymetrické desky z hliníkové slitiny 5754. Celková tloušťka vytvořené struktury přesahuje 4 cm. Vzorky byly vystaveny vysokorychlostním nárazům, aby se posoudila jejich schopnost absorbovat energii způsobenou balistickým nárazem. Pro hodnocení poškození v cíli byla využita strukturoskopie, přičemž byly sledovány hlavní aspekty, kterými jsou průkaznost trhlin, tvorba kráterů a deformace volného povrchu. Hlavním cílem této kapitoly je představit novou nedestruktivní metodiku založenou na laserově-ultrazvukové kontrole a vyhodnocení této metody a jejích možnostech, které byly provedené na materiálu jádra konstrukce, jenž byl vystaven extrémnímu zatížení při nárazu střely. Hlavní myšlenka použité metodiky je uvedena na obrázku 5.1. Po krátkém úvodu je druhý odstavec věnován fyzickému popisu defektoskopu.

Třetí odstavec se zabývá koncepcí a výrobou vzorků. Čtvrtý odstavec představuje dopadové experimenty za využití plynové pistole, která urychluje balistické střely. V pátém odstavci jsou uvedeny a diskutovány výsledky. Je uveden celkový závěr, včetně výhledů.

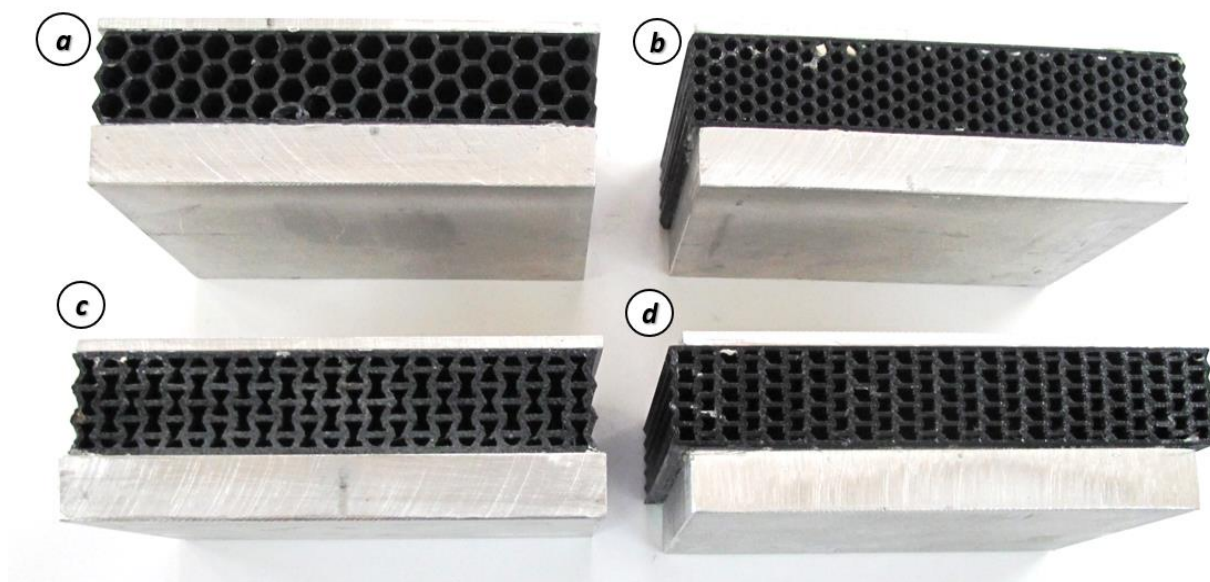
5.1 Návrh a výroba vzorků

První fáze prováděného šetření byla spojena s procesem návrhu konstrukčních jader v jednom z komerčních CAD systémů (obr. 5.2). Hlavní předpoklad uplatněný během tohoto úkolu se týká rozměrů konstrukčních jader. Ta byla navržena jako krychle o rozměrech $100 \times 120 \times 22,2$ mm a tloušťce stěny 1,2 mm. Velikost vzorků konstrukčních jader byla určena počtem buněk a technologickými možnostmi použitého systému aditivní výroby. Obrázek 3 představuje pohled na původně vyvinuté topologie jader. Jsou založeny na hřebenovém vzoru (obr. 5.2 a, b) – s úhlopříčkou 6,2 mm a 3,1 mm na šestiúhelníkovém podkladu, označeném jako vzorek A a B. Vzorek A má dvojče, které nebylo vystaveno účinku kinetické střely a je uchováno jako referenční vzorek označený REFA. Byly také připraveny vzorky se strukturou ve tvaru přesýpacích hodin (re-entrant honeycomb) – s jednotkovou buňkou s auxetickým chováním (obr. 5.2 c, d), rozměry s výškou 5,8 a 3 mm a základnou 4,5 a 3,5 mm v případě příslušných vzorků označených C a D. Vzorek C má rovněž dvojče, které nebylo vystaveno účinku kinetické střely a je uchováno jako referenční vzorek označený REFC. Hliníková sestava bez ABSplus jádra, označená E, je připravena k prokázání výhod implementovaného ABS jádra v pancéřovém řešení. Všechny rozměry byly měřeny posuvným měřítkem s přesností ± 25 μm . Hlavním rozdílem mezi strukturami vzorků je hodnota relativní hustoty.



Obr. 5.2. Nahore: hlavní pohled na vyvinuté sendviče s 3D tištěnými pravidelnými buněčnými jádry; pohled na topologii struktur. Dole: hlavní rozměry vzorků

Následující fáze související s výrobním procesem konstrukčního jádra byla provedena pomocí 3D tiskárny FDM (Fused Deposition Modelling). Metoda FDM byla uvedena na veřejný trh počátkem 90. let 20. století. [98, 99] Umožňuje výrobu trojrozměrných objektů vytlačováním termoplastického vlákna z trysky na základní stůl řízenou rychlostí. Tato technologie umožňuje vytvářet navržené 3D modely, vrstvu po vrstvě, směrem zdola nahoru, dokud není celý díl dokončen. Výrobní proces začíná stanovením vhodných technologických parametrů, jako jsou: tloušťka vrstvy, typ výplně modelu a podpurných materiálů a orientace modelu na základním stole. Poté se 3D model rozřeže, aby se určil kód potřebný k provedení výrobního procesu. V technologickém procesu se používají jak modelační, tak podpurné materiály. Hlavním úkolem přídatného podpurného materiálu je vyplnit všechny druhy otvorů, výřezů a lešení, které se ve vyrobeném modelu vyskytují. Podpurný model se v konečné fázi výrobního procesu mechanicky odstraní nebo rozpustí. Tato metoda má mnoho výhod. Především je časově i finančně efektivní a umožňuje použití široké škály komerčně dostupných materiálů. Technika FDM navíc umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti vyráběných objektů. Při tomto procesu byl použit materiál ABSplus (akrylonitrilbutadienstyren). Jeho objemová hmotnost je přibližně $1\,045\text{ kg/m}^3$. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou všeobecně známé a prezentované v mnoha vědeckých pracích. [97, 99] Obrázek 5.3 představuje vzorky buněčných struktur vyrobených metodou FDM. Je třeba poznamenat, že doba tisku jednoho dílu byla přibližně 20 hodin. Spleny byly přední a zadní deskou, které jsou vyrobeny z hliníkové slitiny Al 5754 o tloušťkách 3,2 mm, resp. $14,3\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ a hmotnostech $97,5\text{ g} \pm 1\text{ g}$, resp. $453\text{ g} \pm 1\text{ g}$. Tloušťka vrstvy lepidla byla změřena na základě rozdílu tlouštěk pomocí měřítka a činí přibližně $200\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ mm}$. Hlavním účelem lepidla bylo udržet pohromadě různé vrstvy sestav. Z tohoto důvodu bylo použito univerzální, komerčně dostupné lepidlo. Jeho role v mechanismu poškození však není neutrální. Tento aspekt nebyl v této fázi studie zohledněn. Postup montáže byl následující: Hliníkové desky byly nejprve očištěny acetonem a po natření komerčním univerzálním lepidlem byly desky upevněny do svěráku s přtlakem na dobu 2 hodin při teplotě okolí. Tabulka 5.1 uvádí přehled různých konstrukcí cílů.



Obr. 5.3. Hlavní pohled na kompozitní panely s 3D tištěnými pravidelnými buněčnými jádry s různou topologií

Tabulka 5.1. Charakteristiky sestav 3D tištěných FDM jader s deskami ze slitiny Al 5754, připravených pro balistické nárazové zkoušky

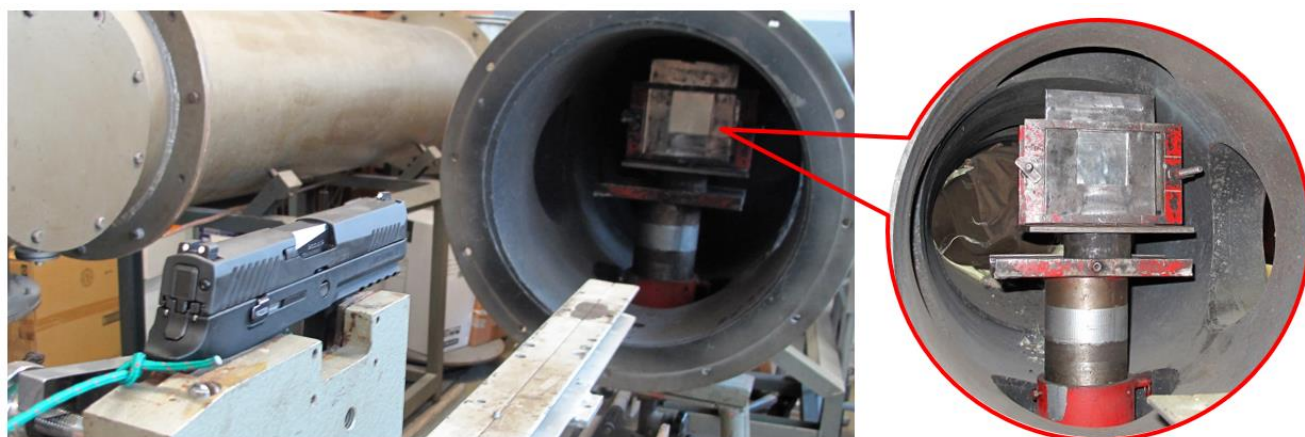
Označení vzorku	Vzdušná hustota materiálu ABSplus kg/m ³	Vzor*
A		Hřeben 6,2 mm*
REF A		Hřeben 6,2 mm*
B		Hřeben 3,1 mm*
C		Přesýpací hodiny 5,8 x 4,5 mm**
REF C		Přesýpací hodiny 5,8 x 4,5 mm**
D		Přesýpací hodiny 3 x 3,5 mm**
E		žádný

* rozměr úhlopříčky šestiúhelníku

** rozměr výšky × šířky vzoru přesýpacích hodin

5.2 Balistické zkoušky

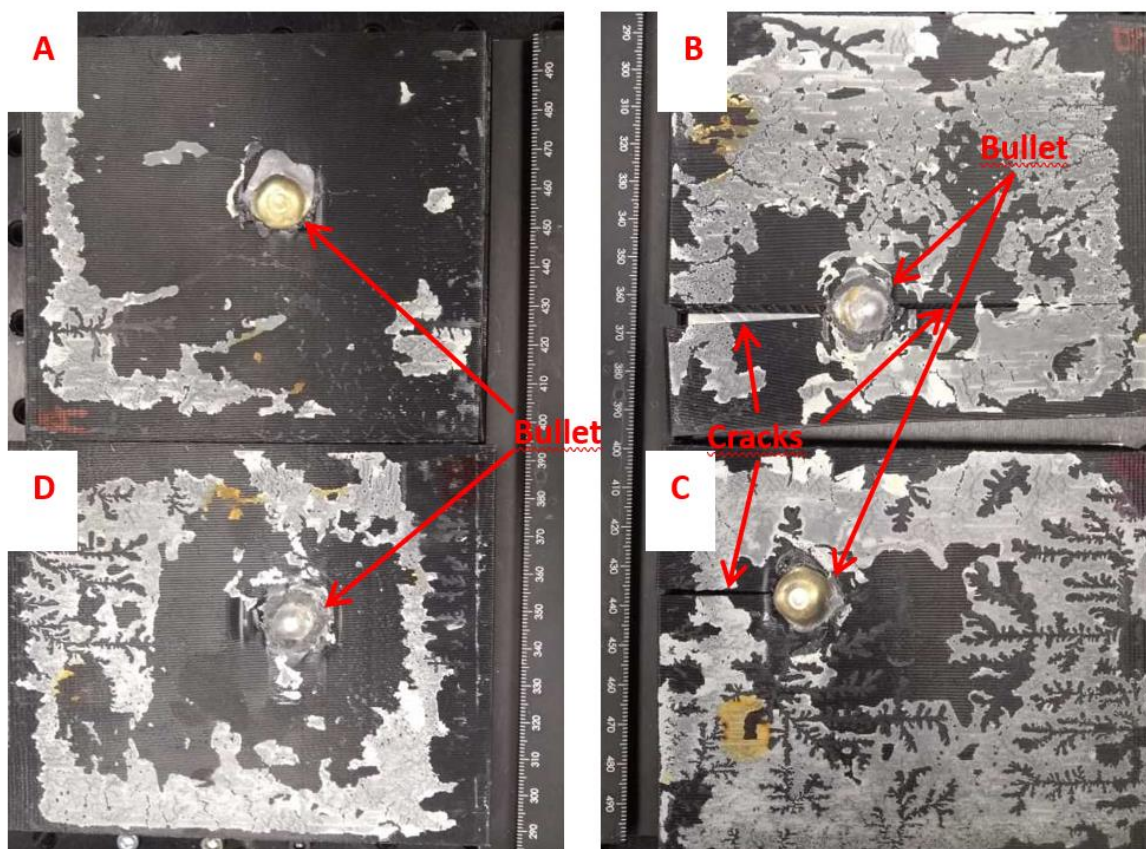
Předpověď vlivu pravidelných buněčných jader na vlastnosti v oblasti pohlcování energie byla provedena na základě balistických zkoušek. Byly provedeny s použitím kompozitních panelů uvedených na obrázku 4 a také s použitím dvou lepených desek ze slitiny Al 5754 uvedených v části 3. Zkoumané panely byly umístěny ve speciálním držáku ve vzdálenosti 1,5 m od ústí hlavně tak, aby osa hlavně, resp. nositelka vektoru dopadové rychlosti byla kolmá na povrch vzorku (obr. 5.4). Zbraň je pistole značky Sig Sauer[®], model P320 umístěná ve vzdáleném spouštěcím zařízení, upevněném na pevné liště, která umožňuje zaměření cíle pomocí laserového značkovače. Při střeleckých zkouškách byly použity celoplášťové střely 9 × 19 mm Parabellum, vyráběné českou společností Sellier & Bellot[®] pod označením V310492. Jedná se o standardizovanou střelu o hmotnosti 8 g, monoogiválního tvaru o délce 14,9 mm s olověným jádrem a mosazným (tombakovým) pláštěm, přičemž nominální počáteční rychlost střely továrního náboje je podle údajů výrobce 360 m/s (v případě hlavně o délce 150 mm, reálné rozpětí počátečních rychlostí může být ±5 m/s) a její dopadová rychlost je cca 358 ± 5 m/s v případě cíle ve vzdálenosti 1,5 m od ústí. [100] Dopadová kinetická energie je tedy 498,4–527,1 J. Střelba byla vedena na tenčí stranu hliníkové desky.



Obr. 5.4. Hlavní pohled na laboratorní zařízení používané k provádění balistických zkoušek

5.3 Výsledky testů

Cíle jsou po výstřelech vyjmuty pro makroskopická optická pozorování a defektoskopickou analýzu. Nejprve je prováděno pozorování integrity cílů. Žádný z cílů nebyl střelou zcela penetrován. Všechny varianty jádra ABSplus byly perforovány. Ve všech případech byla střela zastavena silnější hliníkovou deskou. Všechny první hliníkové desky o tloušťce 3,2 mm byly zcela perforované. U vzorků A, B, C a D střely perforovaly první desku a vytvořily otvor o průměru $10,5 \pm 0,2$ mm se vstupními hranami (hrany, které pronikají podkladovým jádrem). Všechna geometrická měření byla provedena pomocí měřky s přesností ± 50 μm .



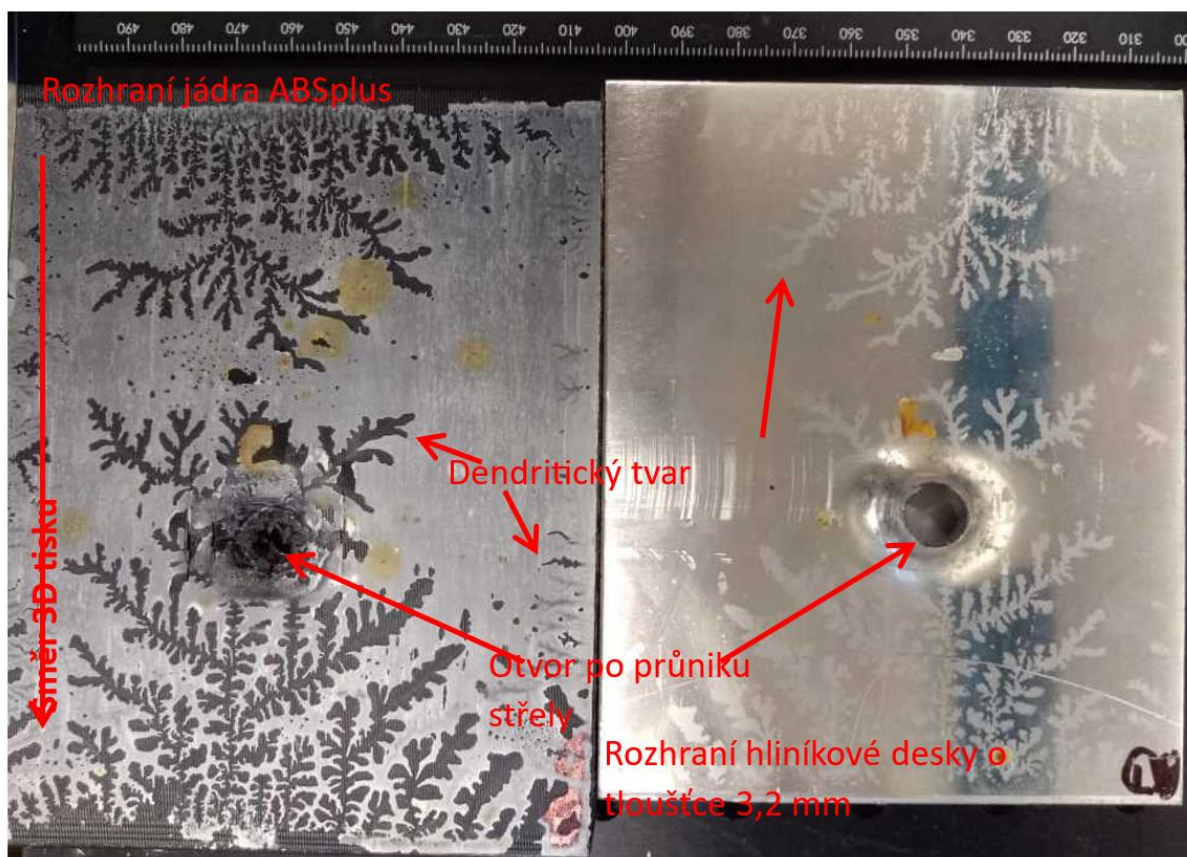
Obr. 5.5. Zadní rozhraní vzorků z jádra ABS po zásahu 9mm střelou a odstranění zadní hliníkové desky. Světle šedá plocha je lepidlo nalepené na jádru.

Všechny vzorky byly zcela rozpojeny na obou rozhraních tenkých i silných desek. Rozpojování adhezivních sestav nárazem projektilu bylo studováno na tenkých sestavách o tloušťce několika milimetrů. [101] Proces rozpadu je ve skutečnosti způsoben odrazem rázové vlny vzniklé při nárazu a šířící se na opačnou stranu cíle. Tento náraz se odráží jako uvolňovací vlna a vrací se zpět směrem k nárazové ploše. Na své cestě se protne s uvolňovací vlnou vzniklou při vybití střely. Tato situace vede ke vzniku vysoké dynamické tahové vlny, která se šíří do terče a pravděpodobně způsobí prasknutí nejslabších částí cílové sestavy, včetně jejích rozhraní. V případě vzorků A a B (tvar hřebene) byl průnik do hliníkové desky v jádře z materiálu ABSplus dostatečně hluboký, aby udržel přední desku a jádro pohromadě, ale rozhraní bylo zcela popraskané. U vzorků B a C (vzor přesýpacích hodin) nebyl průnik do hliníkové desky tak hluboký jako u vzorků A a B a přední hliníková deska (tloušťka 3,2 mm) byla zcela oddělena od jádra ABSplus. Všechna rozhraní vykazují adhezni trhliny. Je patrné, že na předním

rozhraní se trhlinka objevila mezi tenčí hliníkovou deskou a lepidlem, protože velká většina lepidla zůstala přilepená na jádře. To lze vysvětlit lepším mechanickým ukotvením, které nabízí vyšší drsnost na dílu jádra v důsledku špatného rozlišení 3D tiskového stroje. Na zadním rozhraní mezi silnější hliníkovou deskou a jádrem je trhlinka mezi povrchy částečně adhezivní. Část lepidla nadále ulpívá na jádře a další část zůstává na zadní hliníkové desce (obr. 5.5). V oblasti nárazu bylo lepidlo z obou rozhraní odstraněno, pravděpodobně v důsledku třecích účinků a zvýšení teploty, ke kterému došlo během nárazu a deformace.

Další skutečností, která podporuje tento předpoklad, je, že na rozhraní vzorku E (obr. 5.9), vzorku bez jádra, a tedy bez mikrokanálek, nejsou patrné téměř žádné dendritické tvary, takže se zde vyskytuje menší možnost průniku znečišťujících látek (vody, kyslíku) do rozhraní. Na (předchozím) obrázku je dokonce patrné, že v místě dendritu jsou na jádru ABSplus vzorku C v okolí místa nárazu a na vzorku D v blízkosti pravého okraje stále nalepeny zbytky lepidla.

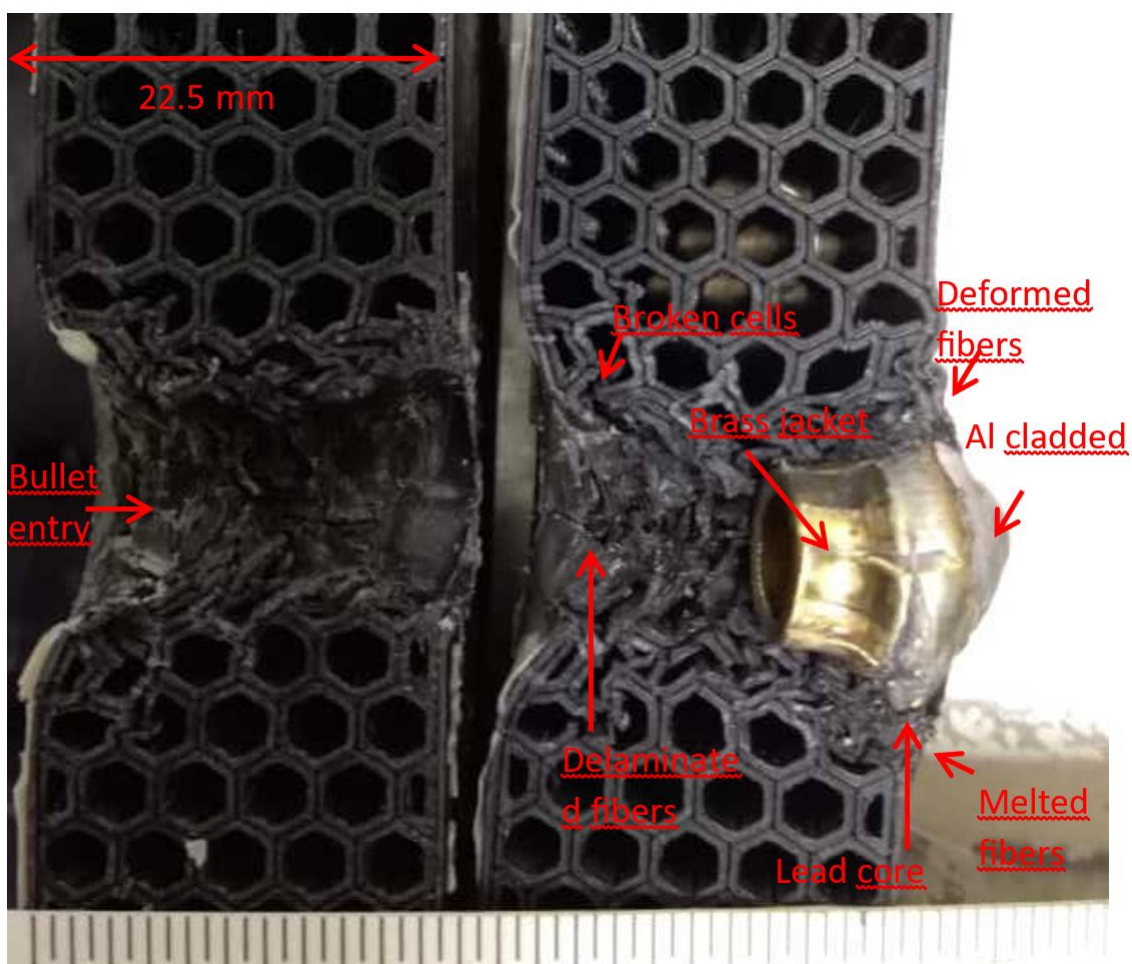
Toto pozorování podporuje myšlenku kohezní mezifázové trhliny v místech dendritů a odhaluje jakési soupeření mezi mechanickým ukotvením a difuzí druhů v procesu adheze. Téměř na všech rozhráních jsou také patrné hnědé stopy, a to včetně vzorku E. Další zkoumání této vlastnosti bude provedeno pomocí rozptylového elektronového mikroskopu.



Obr. 5.6. Hliníková deska oddělená od jádra ABSplus na vzorku D. Rozhraní vykazuje adhezní trhlinku, na které jsou patrné velké dendrity vycházející z vnějších okrajů. Tyto vzorce jsou větší, pokud vycházejí z okraje kolmého ke směru nanášení materiálu.

U vzorků B (malý hřeben) a C (velké přesýpací hodiny) došlo k popraskání jádra ABSplus při perforaci projektilem (obr. 5.5). Trhlinka sleduje linie nanášení při 3D tisku. Bohužel tento výskyt trhlin nelze korelovat ani s velikostí, ani s tvarem vzoru. Jediným racionálním

vysvětlením je, že se trhliny vyskytovaly, když vzdálenost od středu nárazu k nejbližšímu okraji byla menší než 50 mm, resp. 2,7 a 3,3 mm u vzorků B a C. Trhlina šířící se v jádře vzorku B se dostala poměrně daleko k protilehlému okraji, takže jsme přistoupili k úplnému oddělení, které bylo možné pouze ručním otevřením (v režimu otevření I, čistý tah). Výsledný průřez je vidět na obrázku 8. Tento průřez zejména ukazuje, že na mosazném plášti střely ulpěla hliníková čepička v důsledku stejných mechanismů, které se vyskytují při výbušném svařování, a zahrnují tedy tření, nárazový tlak a zvýšení teploty. Mosazný plášť zůstal na olověném jádru střely a vykazuje několik trhlin podél podélných linií na povrchu střely. Špička střely nabyla „hřibovitého“ tvaru v důsledku deformace olověného jádra při nárazu. Počáteční délka střely byla 14,47 mm o průměru 9 mm. Po dopadu je celková délka střely 12,35 mm a její průměr činí přibližně 16 mm. Na obrázku 5.7 jsou dále patrné porušené buňky hřebenové struktury, delaminace 3D tištěných vláken ABSplus, deformovaná vlákna, prasklá vlákna a roztavená vlákna, zejména pak na přední straně projektilu. Jak bylo pozorováno na polyetylenu s velmi vysokou molekulovou hmotností (UHMWPE) [104], tyto mechanismy jsou energeticky náročné, takže nějakým způsobem přispívají ke zmírnění účinků střely. Ovšem z toho, co bylo pozorováno, nejde celkový příspěvek každého z jednotlivých mechanismů vyhodnotit.

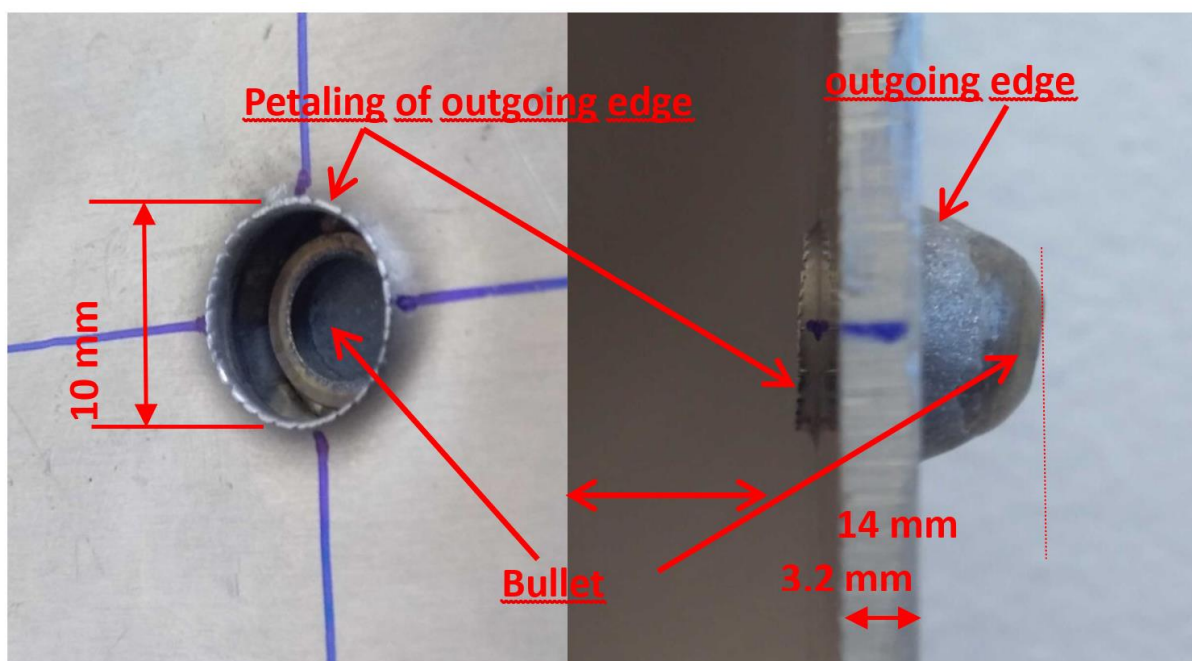


Obr. 5.7. Příčný řez jádrem ABSplus na vzorku B. Jádro bylo odděleno; obě části jsou vedle sebe tak, že vstup střely se u obou nachází vlevo.

Referenční vzorky REFA a REFC nebyly vystaveny dopadům střel, avšak hliníková deska REFC o tloušťce 3,2 mm se při manipulaci během přepravy oddělila, pravděpodobně

v důsledku nárazu. U všech oddělených vzorků je na rozhraních patrné přetržení lepidla, které se nachází mezi hliníkovou deskou a lepidlem. Přílnavost lepidla k jádru byla mnohem lepší, což lze vysvětlit přinejmenším lepším mechanickým ukotvením. Hlubší chemická analýza by také mohla odhalit lepší difúzi specií v obou složkách lepidla a jádra, nebyla však provedena.

Vzorek E (bez 3D tištěného jádra) byl rovněž oddělen. V tomto případě měl otvor průměr $10 \pm 0,2$ mm s vystupujícími okraji. Tyto vystupující okraje vykazují plátky o výšce 1 mm až 1,5 mm, vzdálené od sebe 1 mm až 1,5 mm (obr. 5.8). Střelu zastavila hliníková deska o tloušťce 14,3 mm, přičemž střela v této desce vytvořila kráter o hloubce 11,2 mm a zdánlivém průměru 14 mm. Je však pozoruhodné, jak se střela „hřibovitě“ zdeformovala a zůstala zachycena v první perforované desce, takže se na obou jejích stranách v podstatě vyskytují výstupní okraje. Tvoří kopulovitý tvar o výšce 14 mm. Toto pozorování ilustruje proces poškození, ke kterému došlo na první desce. Kolem kráteru v silnější desce jsou na listech kráteru patrné čtyři příčně symetrické výstupky (obr. 5.9). Při normálním balistickém nárazu na objemové hliníkové slitiny zaznamenali Boyce et al [105] tvorbu listů. Fenomén je znám také z procesu indentace, který se v kontaktní mechanice nazývá hloubka vtisku – když tvrdé těleso proniká měkkým materiálem. [106]

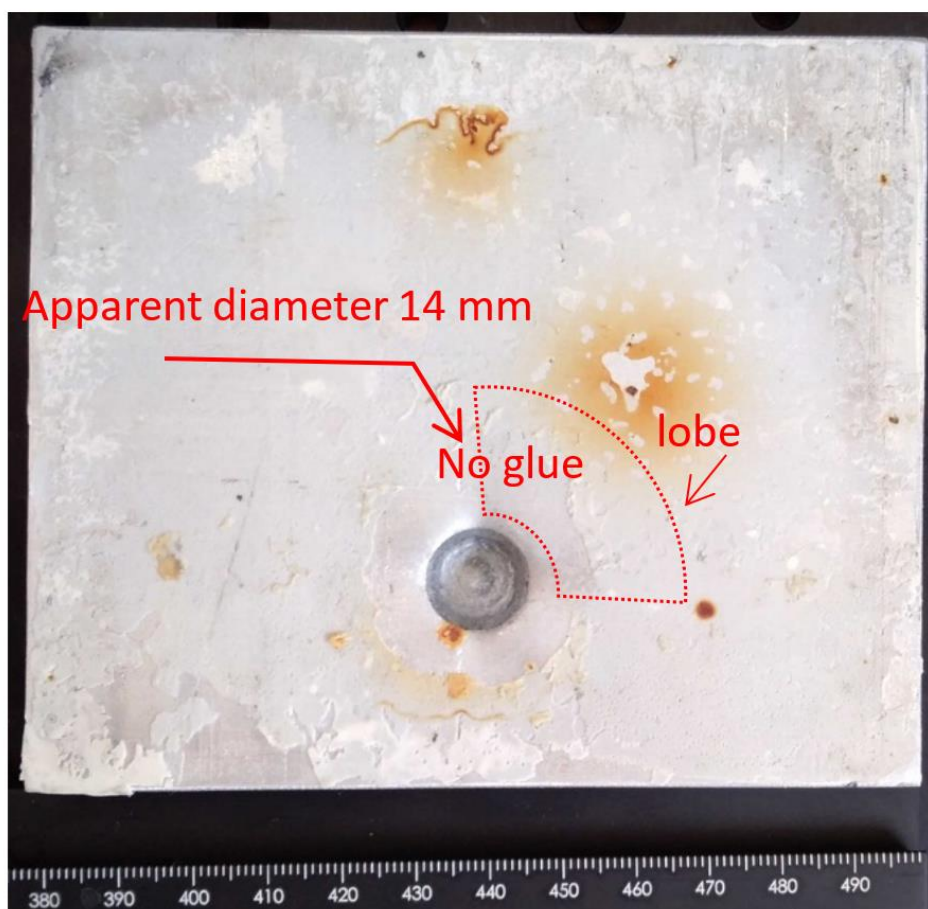


Obr. 5.8. Popis průstřelu v lepené sestavě ze slitiny Al 5754, složené z přední a zadní desky o tloušťkách 3,2 mm a 14,3 mm, s vrstvou lepidla o tloušťce 200 μ m mezi oběma deskami

V těchto situacích působí vnější napětí osově symetrickými tělesy – například koule – na izotropní materiál. Jedná se tak v podstatě o případ přední desky z hliníku. V takové situaci jsou výstupky vytvořené hloubkou vtisku rovněž osově symetrické. Jádro z materiálu ABSplus však představuje ortotropní médium, které podporuje šíření vln podél preferenčních směrů. Deformace se tedy budou řídit také těmito směry. To vysvětluje, proč se průřez střely při pohledu ze zadní strany jádra změnil na hranatý (obr. 5.5). V důsledku toho úder přenesený čtvercovou střelou na rozhraní silnější hliníkové desky znamenal materiál rovněž tak, že na úhlopříčce čtvercového průřezu střely dochází ke stlačení a tahu podél čtvercových okrajů. [107] V prezentovaných balistických experimentech je zatížení poněkud odlišné od zatížení v procesu vtisku, kde je zatížení řízené, kvazistatické a po určité hloubce vniku zaniká. Proto

pro odhad zbytkové deformace na této konfiguraci nebyl pokus tyto indentační vztahy aplikovat. Kolem kráteru se objevuje kruhová oblast o velikosti asi 30 mm, kde se lepidlo odlouplo na obou rozhraních vlivem tahových vln v důsledku procesu štěpení a smykových sil vznikajících při tvorbě laloků. Téměř všechno lepidlo zůstalo přilepené na silnější desce. Lze se tedy domnívat, že na rozhraní lepidla a tenké desky došlo při nárazu k iniciaci tažné adhezní trhliny, která se rychle šířila až k okrajům vzorku. Zadní strana silné desky je rovněž vypouklá; její celková tloušťka dosahuje 17,2 mm, to znamená, že deformace dosáhla hodnoty 2,9 mm.

V balistické ochraně bojovníka je škodlivý zejména efekt zadního čela (BFS – back-face signature) [108]: když střela narazí do ochranného pancíře, zadní plocha tohoto pancíře je urychlena rázovou vlnou a dále zasáhne bojovníka. V závislosti na zasažené oblasti může způsobit vážné poranění.



Obr. 5.9. Zadní deska vzorku E po dopadu. Pohled shora na kráter se čtyřmi laloky a meziprostorem s adhezní trhlinou o průměru asi 30 mm

Za účelem vyhodnocení účinnosti ochrany připravených vzorků byla u všech testovaných vzorků změřena hloubka kráteru a průhyb zadní plochy silnější hliníkové desky, které jsou uvedeny v tabulce 5.2. Zdá se, že nejúčinnějším jádrem pro omezení efektu zadního čela je vzorek D: malé buňky ve tvaru přesýpacích hodin. Malé hřebenové buňky také zajišťují dobré snížení průhybu. Jednoduchým vysvětlením by mohlo být to, že v případě terčů s nejmenšími buňkami je počet dílčích struktur, které je třeba porušit, důležitější, takže proces poškození, tj. deformace vláken, delaminace a tavení, absorbuje více energie.

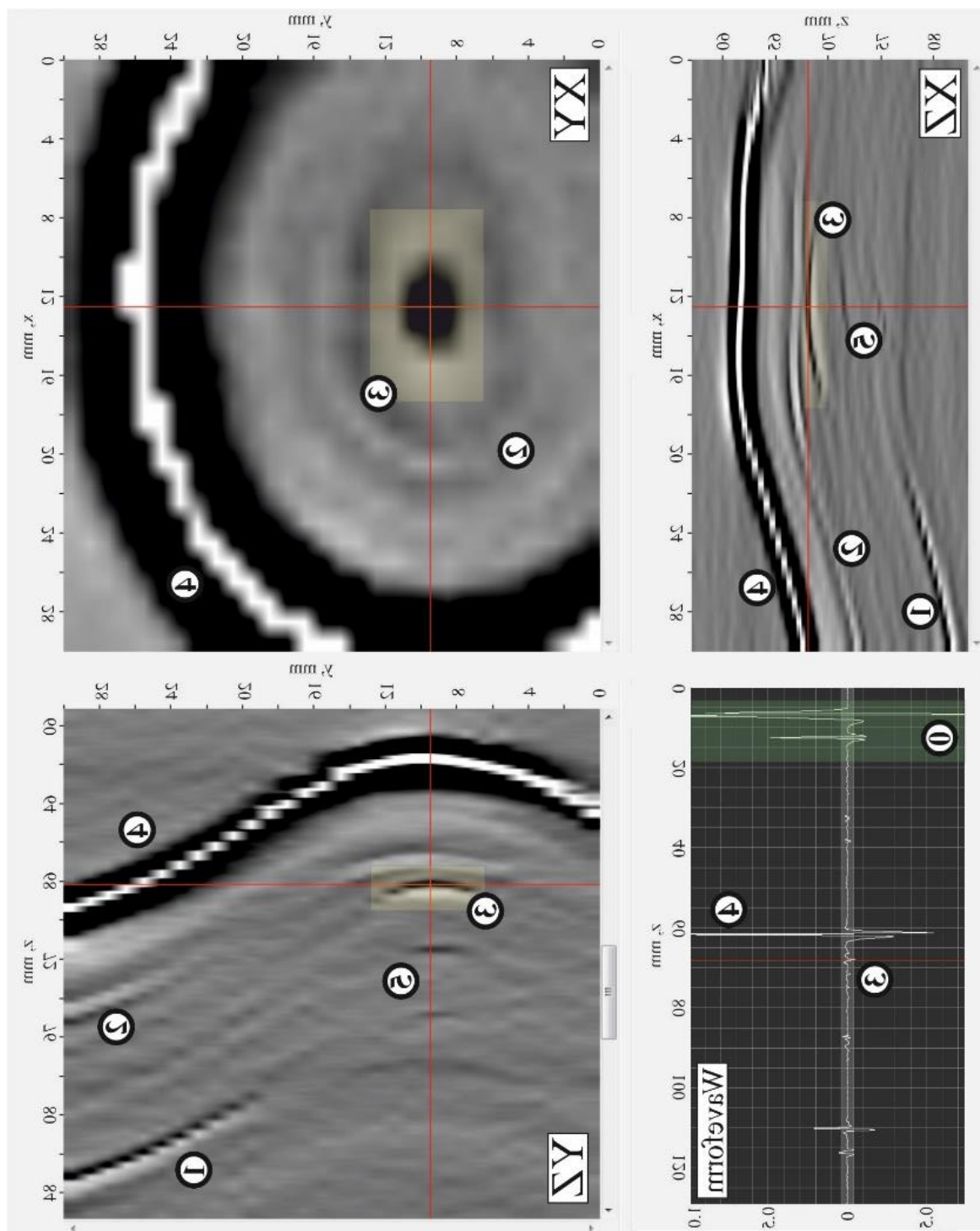
Tabulka 5.2. Hloubka kráteru a průhyb zadní plochy po nárazu

Vzorek	Hloubka kráteru (mm)	Průhyb volného povrchu (mm)	% snížení
A	3,9	1	-71 %
B	3,7	0,6	-83 %
C	4,3	2,7	-23 %
D	3,1	0,5	-86 %
E	7,8	3,5	0 %

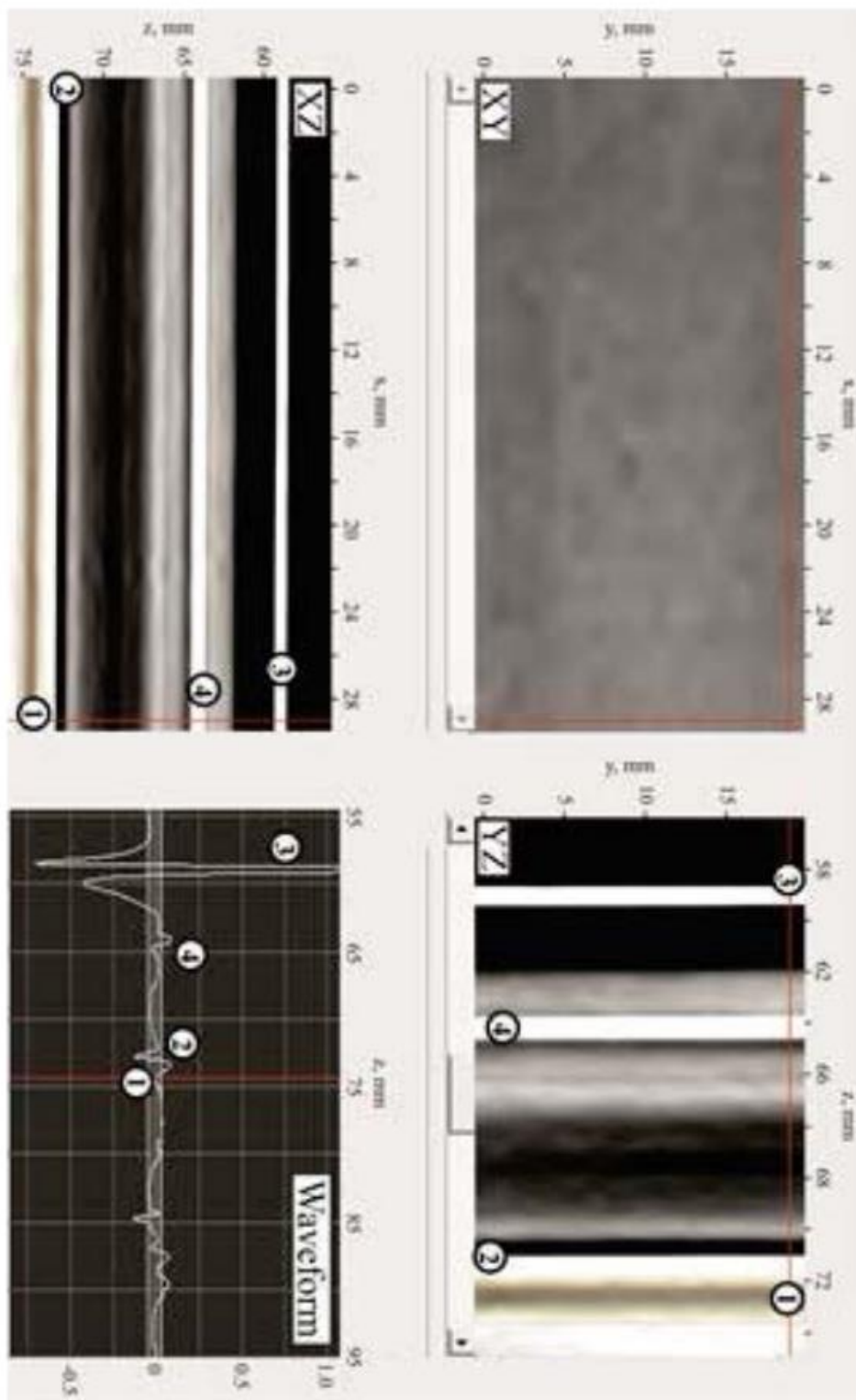
5.4 Výsledky laserové ultrazvukové strukturoskopie

Pro vizualizaci vnitřní struktury vzorku po dopadu byl použit laserový ultrazvukový strukturoskop, popsáný v kapitole 2. Obrázek 5.10 uvádí B-skeny (XZ, YZ) a C-skeny (XY) zadní desky vzorku A (obr. 5.9). Polohu průřezů 3D laserových ultrazvukových dat nastavuje uživatel pomocí červených čar. Bílé pruhy indikují kladný akustický tlak zaznamenaný detektorem, černé pruhy pak negativní akustický tlak. Tloušťka odchozí hrany, měřená pomocí laserového ultrazvuku, činí 6,91 mm, což odpovídá hodnotě naměřené standardním měřítkem. I přes vysokou citlivost laserového ultrazvuku při detekci trhlin nebylo zjištěno žádné poškození materiálu vnitřní struktury odchozí hrany. To odpovídá vizuálnímu pozorování příčného řezu vzorku A provedeného po rozřezání vzorku.

Důležitým faktorem ovlivňujícím spolehlivost konstrukce je homogenita lepení jednotlivých částí vzorků. Laserová ultrazvuková strukturoskopie umožňuje kontrolovat lepení pomocí rozdílu akustických impedancí na rozhraní hliník/lepidlo a hliník/vzduch. Obr. 5.11 ukazuje laser-ultrazvukové snímky zadní desky před dopadem. Poloha z červeného ukazatele je nastavena na odraz od vrstvy lepení, takže na obrázku vlevo nahoře je zobrazen C-sken této vrstvy. Obrázek je zrnitý, což je způsobeno malými vadami kontaktu mezi lepicí vrstvou a hliníkovou deskou, jak je patrné z obrázku 5.9. Tento obraz je však navíc tvořen stíny z nehomogenit uvnitř vrstvy hliníku. Toto zrno má ale nepravidelnou strukturu malých skvrn, což svědčí o tom, že je lepení poměrně uspokojivé, ale nelze odhalit vzory pozorované na obrázku 5.6.



Obr. 5.10. Laser-ultrazvukové snímky silné desky z hliníku ze vzorku A po dopadu. 0 – detekční impuls a jeho odraz od hranice akustické čočky; 1 – zobrazení dna vzorku v A-sken; 2 – dozvuk impulsu uvnitř akustické čočky k měnič; 3 – odraz detekčního impulsu od odchozí hrany; 4 – odraz od horního povrchu vzorku; 5 – dozvuk impulsu 3 uvnitř akustické čočky. Průhledný žlutý obdélník zvýrazňuje obraz odchozí hrany.



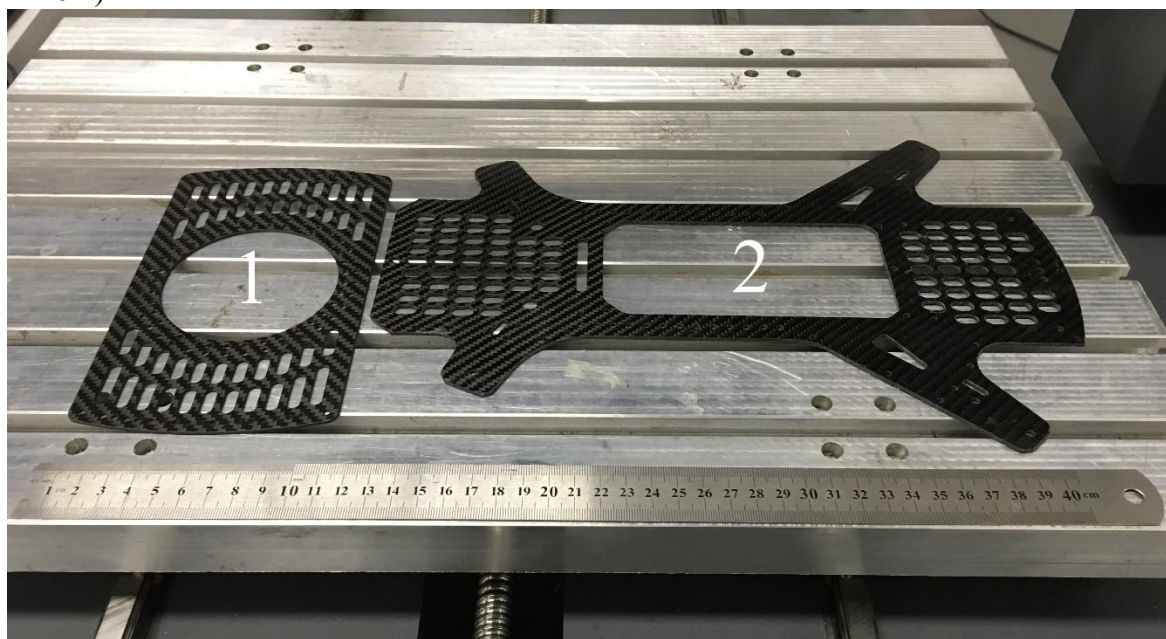
Obr. 5.11. Laser-ultrazvukové snímky silného dílu z hliníku, který nebyl vystaven dopadu střely. 0 – detekční impuls a jeho odraz od hranice akustické čočky; 1 – dno vzorku; 2, 5 – dozvuky podražených paprsků uvnitř akustické dráhy v měniči; 3 – odraz detekčního impulsu od horního povrchu vzorku; 4 – dozvuk impulsu 3 uvnitř akustické čočky. Průhledný žlutý obdélník zvýrazňuje lepenou vrstvu mezi vrstvou hliníku a hřebenovým jádrem ABS+.

6 Příklady použití laser ultrazvukové defektoskopie a kombinované techniky při NDT zkoušení vojenského materiálu

V závěrečné kapitole jsou popsány příklady, jak je metodika popsaná v této práci aplikována a začleněna jako vhodná součást expertní činnosti pro resort MO, resp. AČR v kontextu realizace expertních posudků reálného stavu či porušení dílců vojenské techniky v poli. Navíc metoda nedestruktivní laser-ultrazvukové defektoskopie doplní chybějící segment NDT zkoušení v oblasti materiálů a výrobních technologií.

6.1 Kontrola platform UAS Metody a materiály

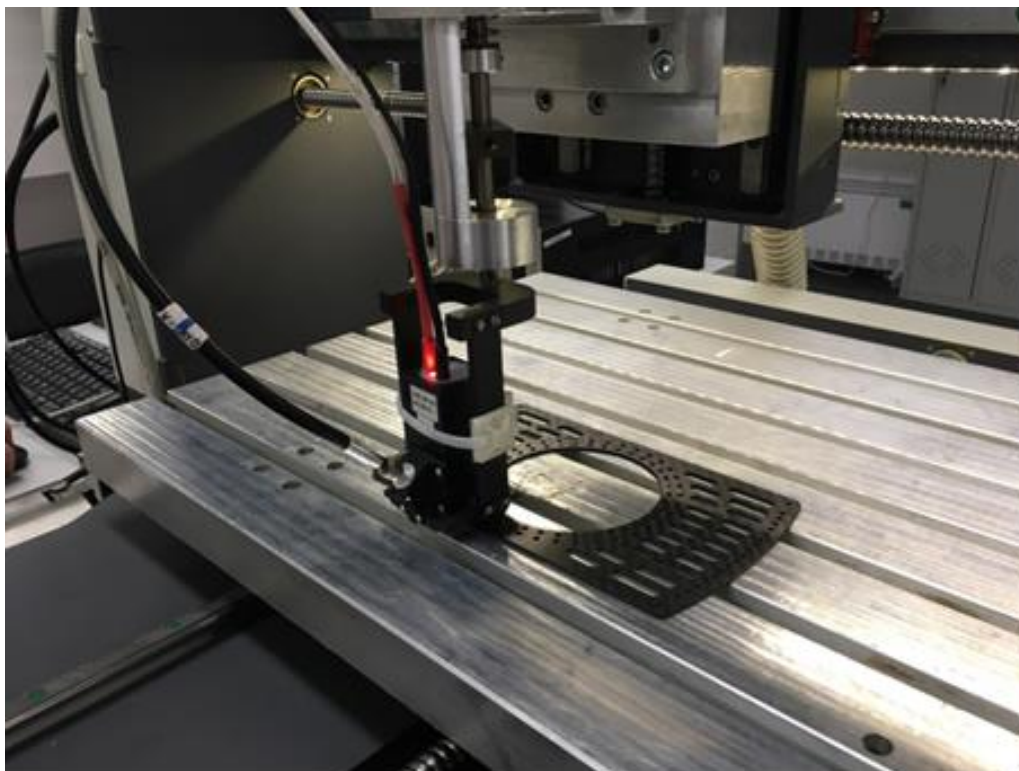
Při provádění kontroly platform UAS bylo hlavním cílem zjistit, jaké kompozitní materiály používané při výrobě dronů a kvadrokoptér vykazují nejnižší množství vad. Zkoumané byly konstrukční součásti automatických letounů, jež se staví z kompozitů vyráběných různými technologiemi. Součásti poskytli dva výrobci. Tyto díly jsou vyrobeny z polymerových kompozitů složených z protkávaných uhlíkových vláken usazených v matrici (pojivu) z epoxidové pryskyřice. Průměrná tloušťka dílu č. 1 je 1,65 mm a dílu č. 2 pak 2,05 mm (obr. 6.1).



Obr. 6.1. Fotografie dvou zkoumaných součástí – dílu č. 1 (1) a dílu č. 2 (2)

Vnitřní struktura dílů byla zkoumána prostřednictvím laser-ultrazvukové strukturoskopie. Strukturoskop je vybaven Nd:YAG laserem vytvářejícím nanosekundový pulz, který absorbuje optoakustický generátor, jenž excituje submikrosekundový ultrazvukový pulz o délce trvání okolo 70 ns s amplitudou tlaku 0,1 MPA (obr. 6.2). Ultrazvukový pulz se přenáší na zkoumaný předmět. Signály odražené od rozhraní optoakustického generátoru a předmětem a od zadní strany předmětu, jakož i signály rozptýlené vnitřními heterogenitami zaznamenává širokopásmový piezoelektrický sensor spřažený s optoakustickým generátorem (obr. 6.2). Právě tyto signály nesou informace o vnitřní struktuře předmětu. Informace získávané při snímání předmětu se patřičným způsobem zpracovávají do podoby 2D obrazů.

Shora popsané zařízení u širokého spektra kompozitů zaručuje hloubku zkoumání až 50–60 mm, přesnost měření je 30–70 μm podél ultrazvukového paprsku a 400 μm v příčném směru. Slepé pásmo je ve vzdálenosti 50 μm .



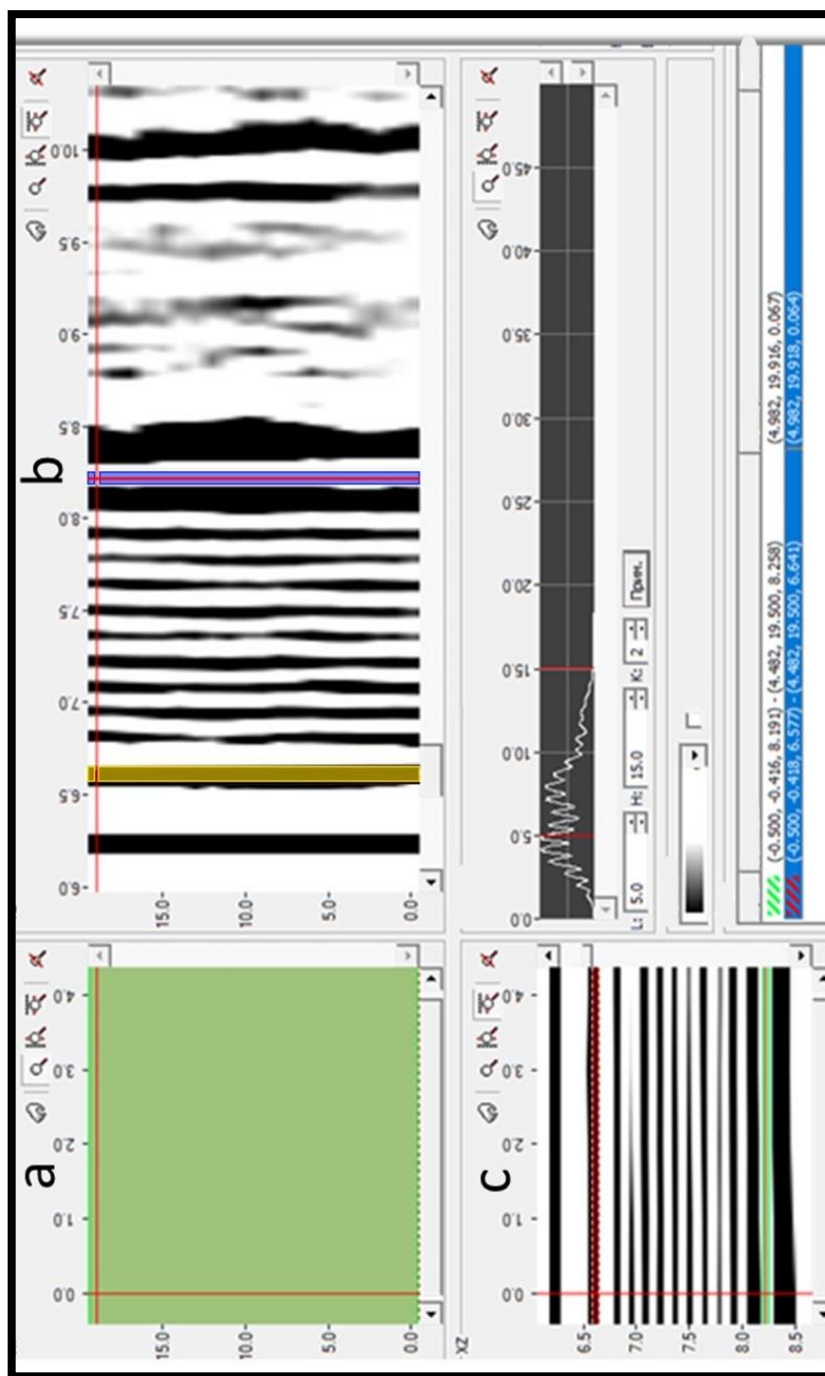
Obr. 6.2. Fotografie části zařízení s širokopásmovým optoakustickým převodníkem

Před ultrazvukovým zkoumáním byla změřena tloušťka dílů. Podélná rychlost vln ve směru kolmém na vrstvy kompozitu byla vypočítána z tloušťky a z rozdílu mezi dobami příchodu signálů odražených od zadní strany předmětu a od rozhraní generátor–předmět. Průměrné rychlosti zvuku u dílu č. 1 byly $c_1 = 3\,045\text{ m/s}$ a u dílu č. 2 $c_2 = 2\,965\text{ m/s}$.

Z vyobrazení vnitřní struktury dílů byl vyhodnocen počet vrstev polymeru. Z rychlostí elastických vln měřených odděleně v materiálu uhlíkových vláken a v epoxidové pryskyřici byla odhadnuta tloušťka jednotlivých vrstev vláken a pojiva. Zkoumané kompozity mají nízkou pórovitost, což vysvětluje zanedbatelné zeslabování ultrazvuku o vysokých frekvencích. Díky tomu bylo možné zobrazit poměrně drobné prvky.

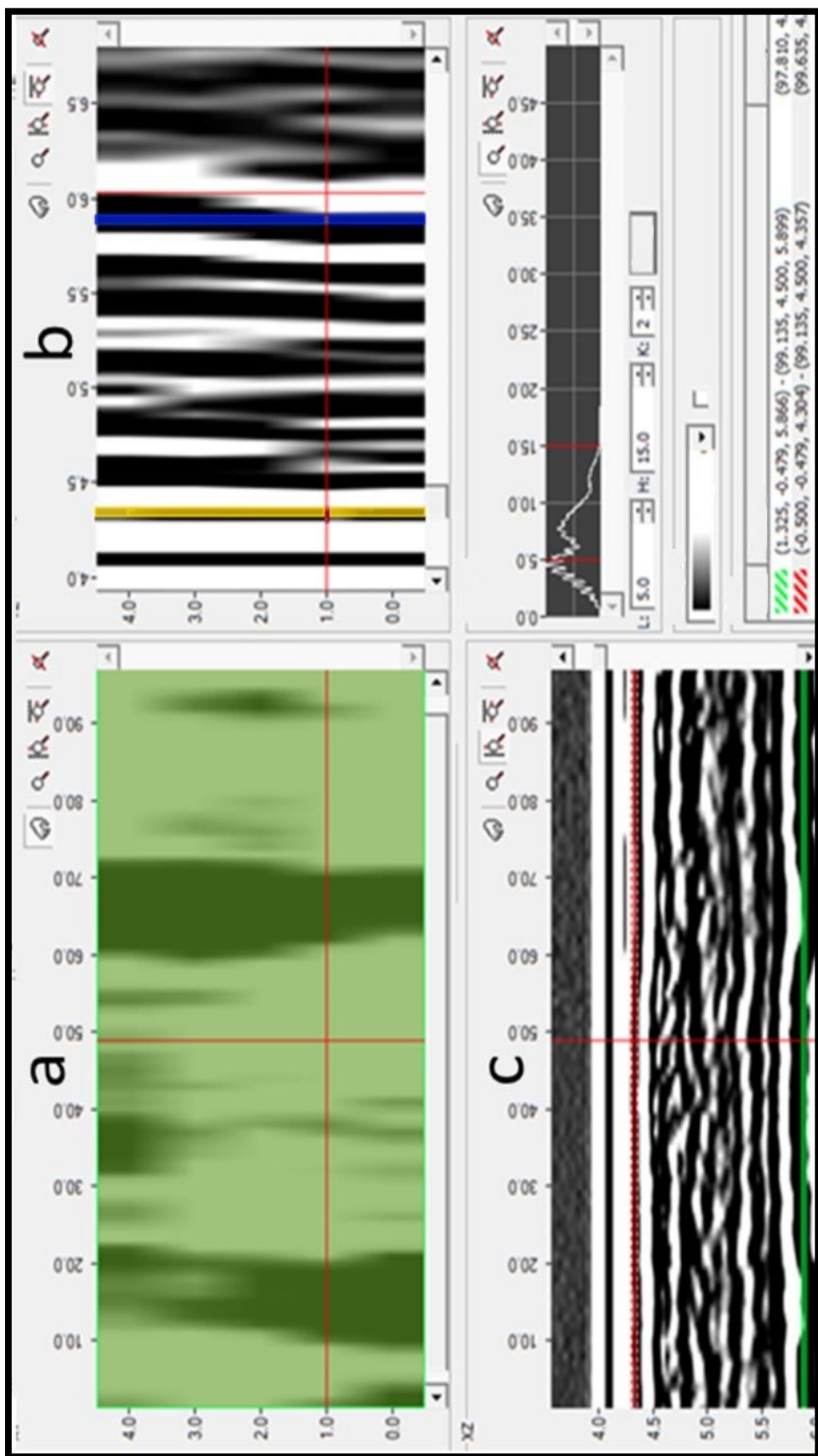
Na obrázku 6.3 jsou zachyceny tři řezy dílem č. 1. V pravém horním rohu každého řezu je uvedeno označení roviny řezu: XY (obr. 6.3a) představuje vodorovnou rovinu, YZ (obr. 6.3b) a XZ (obr. 6.3c) představují svislé roviny (kolmé na vrstvy). Délkové jednotky použité na obr. 6.3 jsou milimetry (mm). Jednotvářná zelená barva v rovině XY (obr. 6.3a) značí, že tento řez se nachází zcela v epoxidové pryskyřici, jež je docela homogenním materiálem. Zkoumaná oblast na povrchu dílu č. 1 byla $5 \times 16\text{ mm}$ (obr. 6.3a). Vodorovná červená čára v rovině XY představuje polohu roviny řezu YZ vyobrazenou na obr. 6.3b a svislá červená čára představuje řez XZ vyobrazený na obr. 6.3c. Horní strana dílu je vyznačena žlutě a zadní strana modře.

Řez YZ za značkou 8,5 mm vykazuje druhotné odrazy uvnitř kompozitu a vnitřní šum převodníku (značka 9,8 mm), který se vysvětluje jeho konstrukcí.



Obr. 6.3. Vnitřní struktura dílu č. 1

Bílé pruhy v rozmezí od 6,5 mm do 8,2 mm na obr. 6.3b a 6.3c představují uhlíková vlákna a černé pruhy jsou pojivo. V kompozitním dílu č. 1 je 10 vrstev uhlíkových vláken o průměrné tloušťce 90 μm a 9 vrstev pojiva o tloušťce 80 μm .

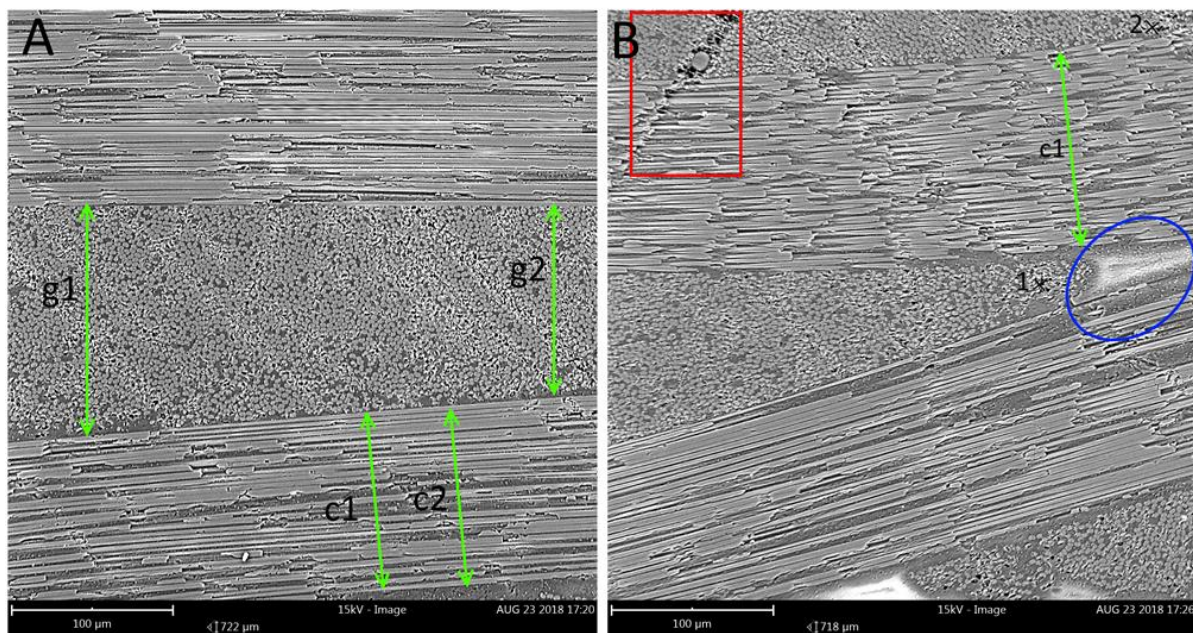


Obr. 6.4. Vnitřní struktura dílu č. 2

Obdobně obr. 6.4 zachycuje tři řezy dílem č. 2. Zkoumaná oblast tohoto dílu byla 5×90 mm (řez XY, obr. 6.4a). Rozdílné stupně intenzity barvy v tomto řezu značí, že pojivo je heterogenní a jsou v něm oblasti materiálu o nižší hustotě (tmavě zelená barva na obr. 5.4a). Na obr. 6.4b a 6.4c představuje žlutá čára horní stranu dílu a nerovná modrá čára představuje jeho zadní stranu. Nerovnost zobrazené zadní strany, která má ve skutečnosti hladký povrch, značí, že uvnitř předmětu se výrazně mění rychlosti elastických vln a v důsledku toho i elastické vlastnosti – od průměrné hodnoty se liší až o 100 m/s, což představuje 3 % při přesnosti měření 0,5 %. Nerovnost může být též důsledkem vad vnitřní struktury nebo pórovitosti. Hranice mezi uhlíkovými vlákny a pojivem na obr. 6.4b a 6.4c (řezy YZ a XZ napříč vrstvami) jsou nezřetelné, což značí, že díl č. 2 je málo kvalitní.

Díly byly za účelem ověření výsledků zkoumání pomocí ultrazvukové strukturoskopie přezkoumány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) Phenom ProX. Zkoumáno bylo několik řezů podél rovin YZ a XZ obou dílů.

Řezy podél rovin YZ a XZ zachycuje obr. 6. Obr. 6a znázorňuje řez dílem č. 1, na němž jsou viditelné vrstvy uhlíkových vláken a pojiva prakticky rovnoběžné s rovinou řezu. Průměrná tloušťka uhlíkových vláken (vrstva c1, c2) je 88 μm a průměrná tloušťka pojiva (vrstva g1, g2) je 82 μm . Na obr. 6b je vyobrazen řez dílem č. 2. Zřetelně zde dochází ke štěpení vrstev uhlíkových vláken, jejichž tloušťka kolísá od 112 μm do 230 μm . Vrstva pojiva je nepravidelná, její tloušťka kolísá od 0 μm do 130 μm a nacházejí se zde i nepokrytá místa (označená modře). Analýza prvků odhalila sloučeniny na bázi hlinitokřemičitanů v bodech 1 a 2.



Obr. 6.5. SEM zobrazení dílů č. 1 a 2 při 300násobném zvětšení

Lze proto konstatovat, že díl č. 1 má homogenní strukturu bez zjevných vad či zlomů uhlíkových vláken, přičemž pojivo je rovnoměrně rozděleno mezi vrstvami uhlíku. Všechny vrstvy v celé zkoumané oblasti dílu č. 1 jsou navzájem rovnoběžné a tento díl má malou pórovitost.

Vizuální kontrola odhalila štěpení vrstev a póry v příčném řezu dílem č. 2. Ze zkoumání metodou laserové ultrazvukové strukturoskopie vyplývá, že díl č. 2 je heterogenní, jsou v něm porušeny vrstvy (uhlíkových vláken) a vrstvy nejsou rovnoběžné s rovinou. Počet uhlíkových vrstev nebylo možno přesně vyhodnotit, což naznačuje horší kvalitu tohoto dílu oproti dílu č. 1.

6.2 Nedestruktivní zkoušení svaru vysokopevnostní oceli metodou laser-ultrazvukové strukturoskopie

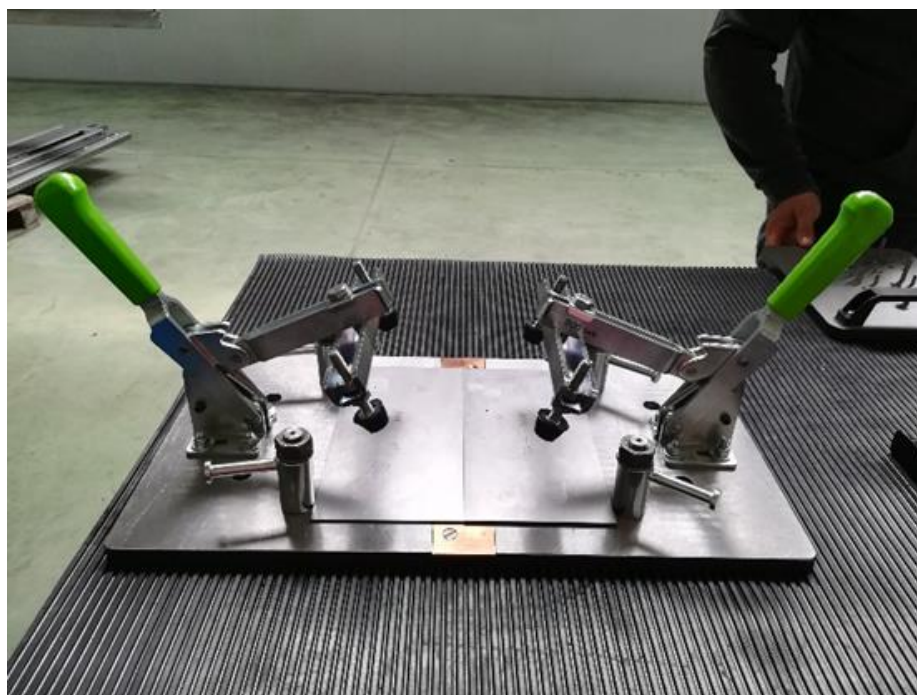
Dalším výzkumem směřovaným do využití technologie laser-ultrazvukové strukturoskopie při nedestruktivním testování bylo zkoušení svaru vysokopevnostní oceli metodou laser-ultrazvukové strukturoskopie při opravě techniky AČR na území České republiky. Byly při tom využity nové poznatky získané při nedestruktivní analýze vnitřní struktury v laserem svařovaném spoji vysokopevnostní oceli. Tato technologie byla zrealizovaná na vojenské polytechnické univerzitě Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego ve Varšavě a je specifická především svou vysokou svařovací rychlostí, vysokou tenkostí a minimálním teplotním ovlivněním okolí svaru. Pro nedestruktivní zkoušení byl aplikantem technologie podnik VOP CZ, s.p., a byla použita opticko-ultrazvuková technika s přímou sondou. Hlavním cílem výzkumu byla kontrola a vyhodnocení distribuce trhlin, pórů a jiných vad ve svařovaném spoji prováděném laserovou technologií.

Proces laserového svařování bez výplňového materiálu je využíván zejména pro svařování dílů, u kterých jsou požadavky zvláště na vysokou svařovací rychlost a přesnost. Výsledkem automatizovaného svařovacího procesu jsou svary bez deformací a nečistot. Samotné svařování předmětných tupých spojů bylo provedeno pomocí svařovací stanice společnosti Bozamet s rychlostí svařování 85 mm/s a velikostí bodu 0,6 mm při výkonu laseru 3 800 W. Svařovací stanice je opatřena 6osým průmyslovým robotem vybaveným laserovou hlavou a polohovačly umožňujícími upevnění svařovacího zařízení. Svařovací hlava a polohovačla jsou zobrazeny na obr. 6.6 a obr. 6.7.



Obr. 6.6. Svařovací hlava průmyslového robota

Při laserovém svařování byly dodrženy normy (laserové svařování podléhá normám) ČSN EN 1011-6 Svařování – doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 6: Laserové svařování a ČSN EN ISO 15609-4 (050312) Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 4: Laserové svařování.



Obr. 6.7. Polohovadla

Analýza vlivu parametrů na kvalitu tupých spojů laserového svařování byla provedena na vzorcích vysokopevnostní oceli DOCOL CR1220Y 1500T-MS s kolmou orientací na směr válcování. Délka řízeného svaru je 210 mm a tloušťka 2,0 mm. Zkoušené vzorky mají minimální pevnost v tahu v závislosti na tloušťce materiálu. Mechanické vlastnosti materiálu z této oceli, zaručené výrobcem, jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1. Vybrané mechanické vlastnosti oceli DOCOL CR1220Y 1500T-MS.

	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Protažení A_{80} [%]
Minimální hodnoty mechanických parametrů deklarované SSAB	1 220 – 1 520	1 500 – 1 750	3

Pro provedení nedestruktivní analýzy byla využita laser-ultrazvuková strukturoskopie založená na laserovém generování elastických vln. Laserová ultrazvuková metoda poskytuje efektivní buzení v širokém spektrálním rozsahu od jednotek po desítky megahertzů. Krátké trvání ultrazvukového impulsu sondy vede ke zvýšení podélného prostorového rozlišení při zachování přiměřené šířky pásma signálu. Malý průměr paprsku sondy umožňuje zvýšit citlivost a periodicitu pulzu sondy zajišťuje praktickou absenci „mrtvé zóny“, která je charakteristická

pro tradiční ultrazvukové metody. To vše umožňuje použít laserovou ultrazvukovou metodu v řadě úkolů nepřístupných tradičním ultrazvukovým skenerům.

Laserová ultrazvuková strukturoskopie je podobná jako u tradičních ultrazvukových systémů pracujících v echo-pulzním režimu. V optoakustickém článku dochází k vytváření ultrazvukových vysoce výkonných ultrazvukových pulzů s přísně kontrolovanou formou založenou na generování ultrazvukových pulzů tepelnou expanzí. Pulz generovaný laserem je přenášen na přední stranu speciálního optoakustického generátoru.

Pulzní energie vstupuje do vzorku a je rozptýlena jeho nehomogenitou a odráží se od zadní strany vzorku. V případě dostatečně silného rozptylu (což naznačuje vysoký stupeň heterogenity) nemusí být pozorován odraz ze zadní strany. Všechny rozptýlené a odražené signály jsou zaznamenávány piezoelektrickým měničem a zpracovávány systémem zpracování.

Pulz střížné vlny je zaznamenán v intervalu mezi prvním a druhým odrazem podélné vlny od zadní strany; zpoždění příchodu smykové vlny lze použít k výpočtu jeho rychlosti. Během skenování jsou stanoveny místní rychlosti. Rychlosti závislé na hustotě jsou spojeny s lokálními moduly pružnosti; lze je tedy vypočítat takto:

$$E = \rho C_t^2 \left[3 - \frac{1}{x^2 - 1} \right] \quad (6.1)$$

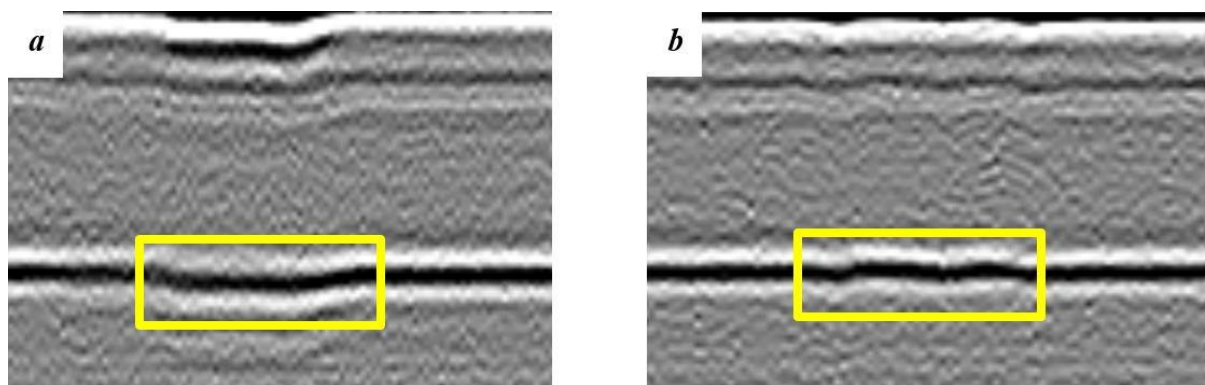
$$\nu = \frac{x^2 - 2}{2(x^2 - 1)} \quad (6.2)$$

$$G = \rho C_t^2 \quad (6.3)$$

kde: E je Youngův modul, G je modul pružnosti ve smyku, ν je Poissonovo číslo, ρ je vypočtená hustota vzorku, C_t je naměřená hodnota smykové rychlosti akustické vlny ze vzorku v m/s, C_l je naměřená hodnota rychlosti podélné akustické vlny ve vzorku v m/s, $x = C_l/C_t$ je poměr rychlostí podélné a smykové vlny.

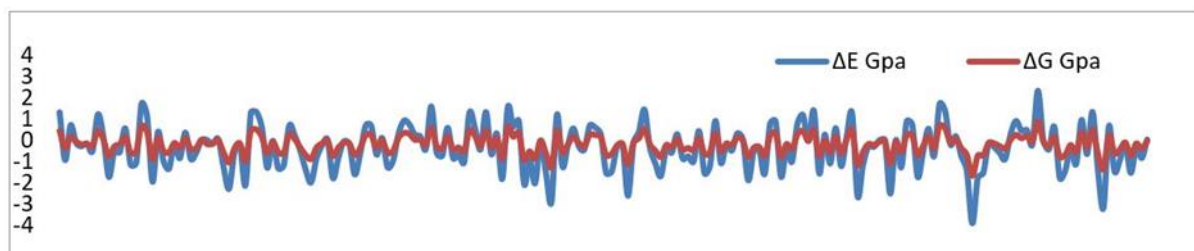
Skenování povrchu vzorku bylo prováděno v krocích po 1 mm. Za předpokladu, že odraz ze zadní strany vzorku je jasně zaznamenán, lze fázovou rychlost podélných ultrazvukových vln odhadnout na základě rozdílu mezi časem příchodu minimálního odrazu ze zadní strany a maximálním odrazem z rozhraní vzorku optoakustického generátoru. V průběhu práce byly získány rychlosti šíření akustických vln a smyková rychlost akustické vlny.

Obr. 6.8a a 6.9b znázorňují získané obrazy vnitřní struktury. Nerovnoměrnost zobrazené zadní strany, která je ve skutečnosti téměř zcela plochým povrchem, naznačuje, že pojivo nemá jednotnou strukturu a vlastnosti. Změna rychlosti elastických vln je přímo spojena se změnou elastických vlastností. Rozdíl v intenzitě šíření podélných vln v hlavním materiálu a v tepelně ovlivněné zóně je až 150 m/s, což představuje 3 % s přesností měření rychlosti podélné vlny 0,5 %. Šířka tepelně ovlivněné zóny je do 2 milimetrů od okraje svaru. Nerovnosti mohou být také způsobeny vadami vnitřní struktury nebo pórozitou.



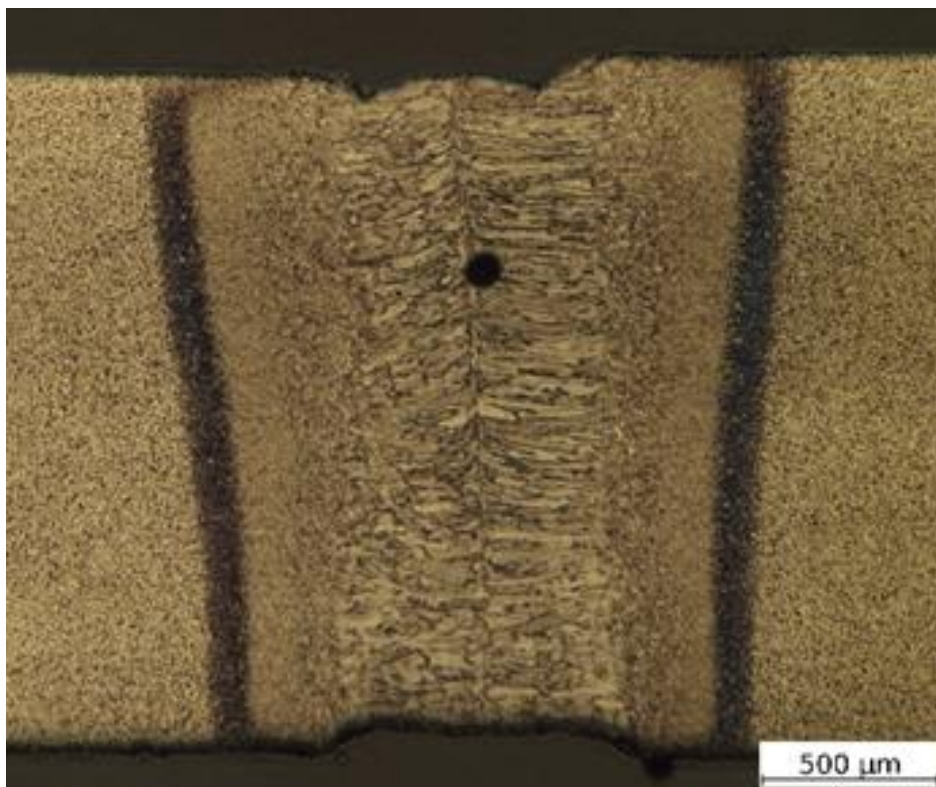
Obr. 6.8. Vnitřní struktura vzorků napříč svarovou zónou: a) zóna poklesu rychlosti šíření podélné vlny; b) zóna pro zvýšení rychlosti šíření podélné vlny

Na základě získaných výsledků byla zkonstruována distribuce elastických modulů zóny ovlivněné teplem. Graf na obr. 6.9 ukazuje, že značná část napětí je ve své podstatě kompresivní. Z toho vyplývá, že mechanické vlastnosti svarové zóny jsou o něco nižší nebo stejné jako mechanické vlastnosti základního materiálu.



Obr. 6.9. Graf

Po nedestruktivním testování byla provedena studie mikrostruktury. Výsledky mikrostrukturální analýzy ukázaly, že spojení je vysoké kvality, avšak v těle svaru jsou přítomny póry až do velikosti 100 μm . Makrostruktura svařovaného spoje je znázorněna na obr. 6.10. Podle výsledků studie lze říci, že v zóně ovlivněné teplem jsou tahová i tlaková napětí. Maximální odchylky vzhledem k jehlicovitému materiálu činily nejvýše 5 %. Důvodem poklesu elastických modulů mohou být defekty vznikající v důsledku prudkých teplotních změn: mikrotrhliny, póry a bainitické fáze v těle svaru.



Obr. 6.10. Makrostruktura laserem provedeného svaru v oceli DOCOL CR1220Y 1500 T-MS

Problém nedestruktivního testování provedených svarů podle jejich skutečného stavu je velmi naléhavý, protože vady a změny ve struktuře materiálu, ke kterým dochází během svařování a při následném používání těchto výrobků, mohou výrazně ovlivnit jejich vlastnosti.

Nedestruktivní zkoušení materiálů využitím laser-ultrazvukové strukturoskopie pro kontrolu místních změn svařovaných spojů, nejen během provádění tohoto procesu, ale také během provozu těchto výrobků má velký vědecký a praktický význam, zejména pro stanovení zbytkové životnosti dílů nebo výrobků.

6.3 Vliv procesu třecího svařování FSW pancéřové slitiny AA2519 – T62 a určení kvality spojů slitin laser-ultrazvukovou metodou

Technologie třecího svařování FSW (Friction Stir Welding) je velice slibnou metodou spojování hliníkových slitin, jež se obtížně svařují pomocí konvenčních metod. [109-112] Tato metoda představuje proces polovodičového svařování, kde je spoj vytvářen plastifikací a smíšením dvojice materiálů za využití nástroje speciálně navrženého právě pro svařování daného materiálu. [109, 113–115] Příkladem konvenčními technikami obtížně svařovatelné hliníkové slitiny může být AA2519 – pancéřová slitina používaná pro lehké vojenské konstrukce. [116, 117] V důsledku relativně vysokého obsahu mědi (více než 5,3 %) představuje tuhnutí této slitiny při tradiční technologii sváření problém kvůli nízké teplotě tavení Al_2Cu (548 °C) s následným vysokým rizikem výskytu tepelných trhlin. [118–120] Ačkoli nízká teplota FSW procesu (400–500 °C) umožňuje tomuto problému zabránit, je stále důležité správně zvolit parametry sváření, jež jsou pro kvalitu takto vytvořeného svaru určující. [121–122]

Je velice důležité určit kvalitu spoje nejen za pomoci destruktivních, ale také nedestruktivních metod pro analýzu spojů ihned po dokončení procesu. V souvislosti se stále se zvyšujícím využíváním FSW technologie je velice důležité určit řádnou metodu kontroly kvality spoje pro zajištění požadovaných vlastností svařovaného materiálu. Metody ultrazvukového testování jsou užitečné pro určení vnitřní kvality materiálu, včetně vnitřních i povrchových vměstků a dalších defektů. [123–126] Tato metoda je taktéž užitečná pro analýzu vlastností materiálu za pomoci měření rychlosti příčných vln. [127] Schopnost použít laser pro zesílení signálu poskytuje možnost analyzovat prvky, jejichž tloušťka přesahuje 10 milimetrů. [125]

Svařovaný obrobek byl vytvořen z extrudovaného materiálu AA2519-T62 o tloušťce 5 mm, jehož chemické složení je uvedeno v tabulce 6.2.

Tabulka 6.2. Chemické složení extruze AA2519-T62

FFe	SSi	CCu	ZZn	TTi	MMn	MMg	NNi	ZZr	SSc	VV	AAI
00,11	00,08	66,32	00,05	00,08	00,17	00,33	00,02	00,19	00,16	00,10	BBase

Proces třecího svařování byl prováděn za využití zařízení ESAB FSW Legio 4UT s osovou silou ve výši 17 kN a úhlem náklonu nástroje MX Triflute o hodnotě 2°. Použité parametry sváření společně s označením vzorků jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3. Parametry sváření a označení vzorků

Označení vzorku	Rychlost otáčení nástroje [ot./min.]	Rychlost posunu nástroje [mm/min]
T41	400	100
T81	800	100
T82	800	200
T84	800	400

Spoj byl stanoven po celé délce svaru a také kolmo na směr přechodu. Tento typ analýzy byl proveden pomocí optoakustického vybavení a techniky měření na bázi vytváření ultrazvukového signálu s ultrakrátkými, vysokoenergetickými impulzy, zesilovanými pomocí Nd: YAG laseru. [125] Vzorky byly mimo to nařezány kolmo na směr sváření a byly podrobeny metalurgickému zkoumání. Průzkum mikrostruktury byl prováděn za využití digitálního mikroskopu Olympus LEXT OLS 4100. V rámci metalografické přípravy vzorků byly vzorky umístěny do pryskyřice a obroušeny pomocí brusného papíru s gradací 80, 320, 600, 1 200 a 2 400 a následně vyleštěny pomocí diamantových past (gradace 3 a 1 μm). Vzorky byly leptány pomocí Kellera činidla (20 ml H_2O + 5 ml HNO_3 + 2 ml HF + 1 ml HCl), přičemž doba leptání činila 5 s.

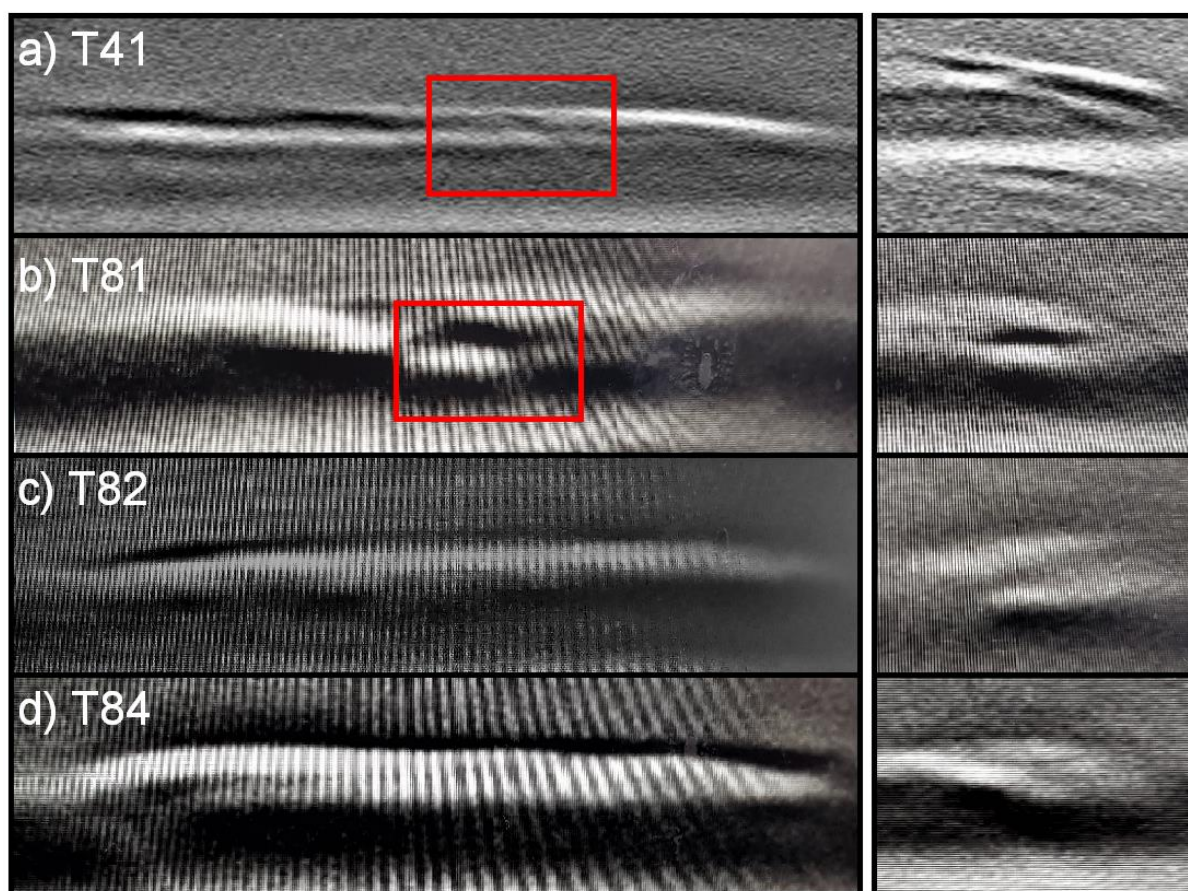
Vnitřní struktura vzorků je uvedena na obrázku 5.9. Oba vzorky, kde byla použita rychlost posuvu 100 mm/min (T41 & T81), vykazovaly pozorovatelné nedokonalosti v podobě odlišně zbarvených struktur a deformace tvaru vln. Tento jev lze spojovat také se změnou hustoty materiálu v důsledku procesu sváření. Jak je viditelné, deformace tvarů vln se vyskytují

u vzorků s nejnižší rychlostí příčného posunu, kde dochází k nejdelší době působení nástroje na svařovaný materiál AA2519-T62.

To vede k takovým jevům, jako je výrazné rozpouštění a zhrubnutí fáze zpevňování i fragmentace zbývajících Al_2Cu sraženin v zóně míšení, což může částečně vysvětlovat deformace vln na obrázku 6.10.

V průběhu skenování dochází k určení místních rychlostí. Rychlosti, závislé na hustotě, souvisejí s místními moduly elasticity; lze je vypočítat dle vzorců uvedených na stránce 64 (6.1 a 6.2), kde E je hodnota Youngova modulu. Pověšimněte si, že impuls S-vlny je zaznamenán v intervalu mezi prvním a druhým odrazem P-vln od zadní strany; časové zpoždění příchodu S-vlny lze použít pro výpočet její rychlosti.

Přední pohled



Obr. 6.10. Pohled na vnitřní strukturu svaru vzorků svářených pomocí FSW: (a) nedokonalost uprostřed spoje T41 (červený rámeček) – změna hustoty materiálu, (b) nedokonalost uprostřed spoje T81 (červený rámeček) – dutiny a změny hustoty materiálu, (c) běžná struktura oblasti míšení spoje T82, (d) běžná struktura oblasti míšení spoje T84.

Hustota byla určena pomocí hydrostatického vážení vzorků v destilované vodě. Střední hustota slitiny AA2519 $\rho = 2\,820\,kg/m^3$. Průměrné získané hodnoty modulu elasticity pro hliníkovou slitinu činily $E = 67,5GPa$ a $G = 28,5GPa$.

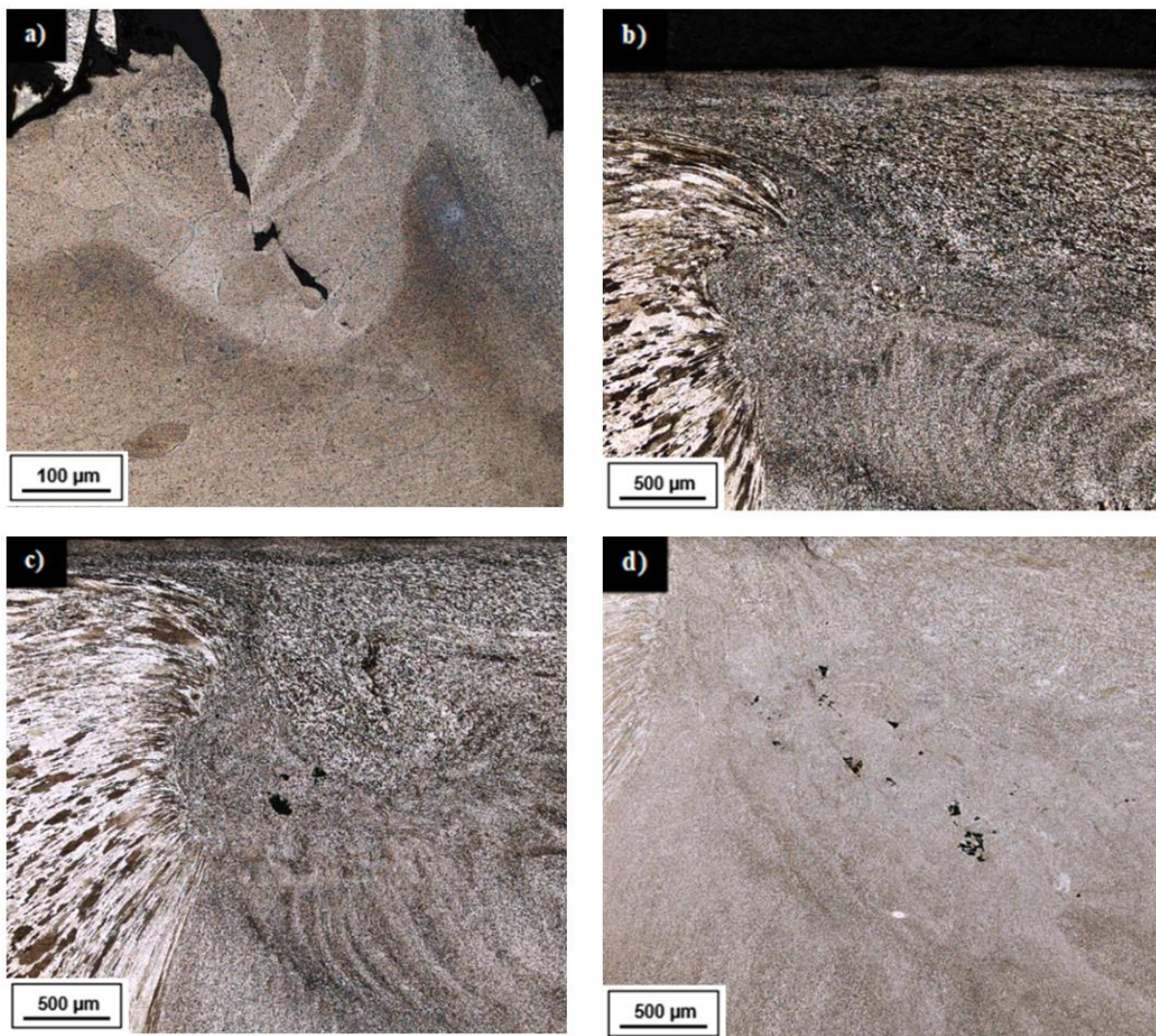
Jsou jasně patrné oblasti rekrytalizace a termomechanického ovlivnění oproti základnímu materiálu. V průběhu snímání bylo zjištěno, že moduly elasticity v termo-mechanicky ovlivněné oblasti a oblasti rekrytalizace jsou oproti základnímu materiálu sníženy o 15 %. Změny v modulech elasticity v těchto oblastech lze vysvětlit dalekosáhlými změnami v mikrostruktuře svářeného materiálu. Mechanické vlastnosti slitiny AA2519 jsou primárně určeny přítomností fáze zpevňování a v průběhu FSW procesu tato fáze prochází nevýhodným vývojem, a to zejména v oblasti rekrytalizace a termo-mechanicky ovlivněné oblasti.

Pro ověření výsledků získaných ultrazvukovou metodou byla provedena pozorování pomocí světelného mikroskopu. Na obrázku 6.11 je uvedena mikrostruktura svaru T81 s ustupující a vystupující stranou po pravé, respektive levé straně. Makrostruktura se skládá z oblastí typických pro FSW proces: dynamicky rekrytalizovaná oblast míšení (SZ), termo-mechanicky ovlivněná oblast (TMAZ), tepelně ovlivněná oblast (HAZ) a základní materiál (BM). Analýza mikrostruktury vzorku T81 neodhalila žádnou nedokonalost spoje.



Obr. 6.11. Makrostruktura spoje T81

U vzorků T41, T82 a T84 světelná mikroskopie současně umožnila identifikaci nedokonalostí, jež jsou uvedeny na obrázku 6.12. V případě vzorku T41 způsobuje nízká hodnota otáčení nástroje (400 ot./min.) utváření nedokonalostí v blízkosti výronku na vystupující straně spoje v důsledku nedokonalé plastifikace materiálu (obr. 6.12a). Průzkum vzorků T82 a T84 odhalil nedokonalosti ve formě dutin nacházejících se v horní části oblasti míšení (obr. 6.12c, d). Počet dutin se zvyšuje přímo úměrně narůstající hodnotě příčné rychlosti posunu nástroje. Jak lze pozorovat, stejná oblast ve vzorku T81 je charakterizována absencí viditelných dutin (obr. 6.12d). Vyšší hodnoty rychlosti příčného posunu mají za následek snižující se čas ovlivnění obrobku třením, což může vést k výskytu nedokonalostí ve spoji. Za povšimnutí stojí skutečnost, že nedokonalosti odhalené v rámci analýzy mikrostruktury se nacházejí na vystupující straně spojů, což odpovídá nižšímu přívodu tepla, než je tomu u ustupující strany. Ačkoli je hlavním důvodem nízké kvality spoje nedostatečný přívod tepla, charakter nedokonalostí se v závislosti na parametrech sváření liší.



Obr. 6.12. Mikrostruktura: (a) nedokonalosti v blízkosti výronku ve spoji T41, (b) horní část oblasti míšení spoje T81 bez výskytu nedokonalostí, (c) dutiny v horní části oblasti míšení spoje T82, (d) dutiny v horní části oblasti míšení spoje T84.

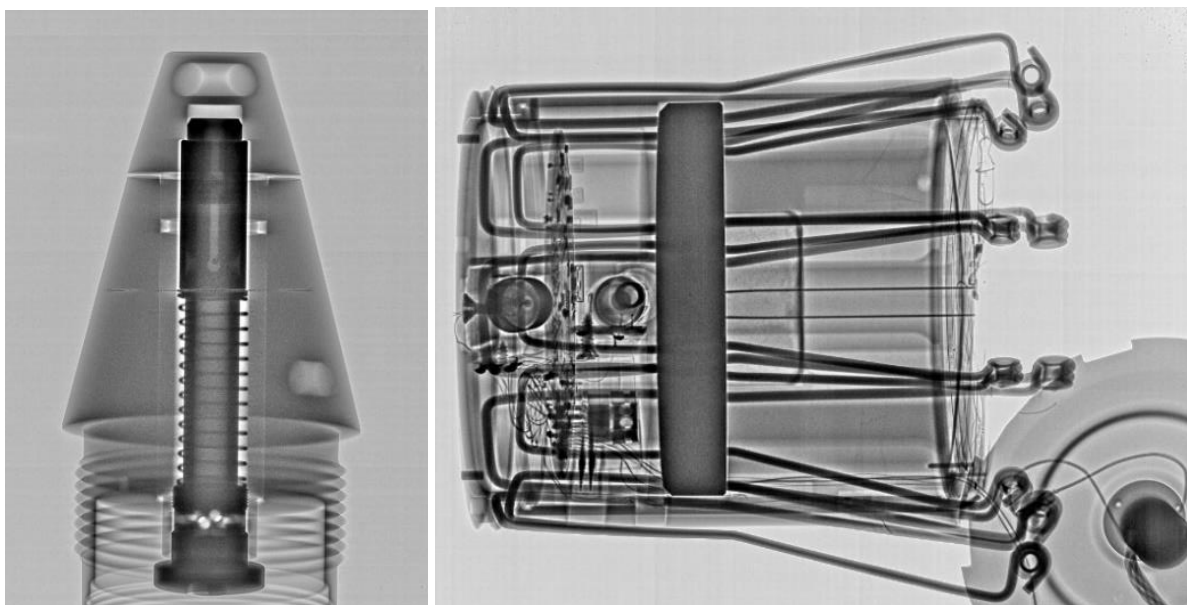
Na základě provedené práce bylo možno diagnostikovat technologii sváření třením za pomoci laserové ultrazvukové strukturoscopie a prozkoumat téma přítomnosti defektů jednolitosti spojů. Tato metoda umožňuje detailní analýzu struktury materiálu a odhalení případných vad nebo nesrovnalostí ve spojích. Je taktéž prezentována metoda pro určení Youngova modulu a modulu pružnosti ve smyku. Snížení hodnoty elastického modulu v oblasti rekrystalizace a v termo-mechanicky ovlivněné oblasti činilo v průměru 15 %. Toto může být důležité pro optimalizaci procesů sváření a zlepšení mechanických vlastností spojů. Analýza mikrostruktury ukázala, že vysoké hodnoty rychlosti příčného posunu vedly k výskytu defektů spoje. Tyto defekty se často nacházely na postupující straně spoje, což může poskytnout cenné informace o vlivu procesních parametrů na kvalitu svarů. Provedená studie poskytuje důležité poznatky o technologii sváření třením a umožňuje identifikaci faktorů ovlivňujících kvalitu spojů.

6.4 Kontrola munice kombinovanou technikou

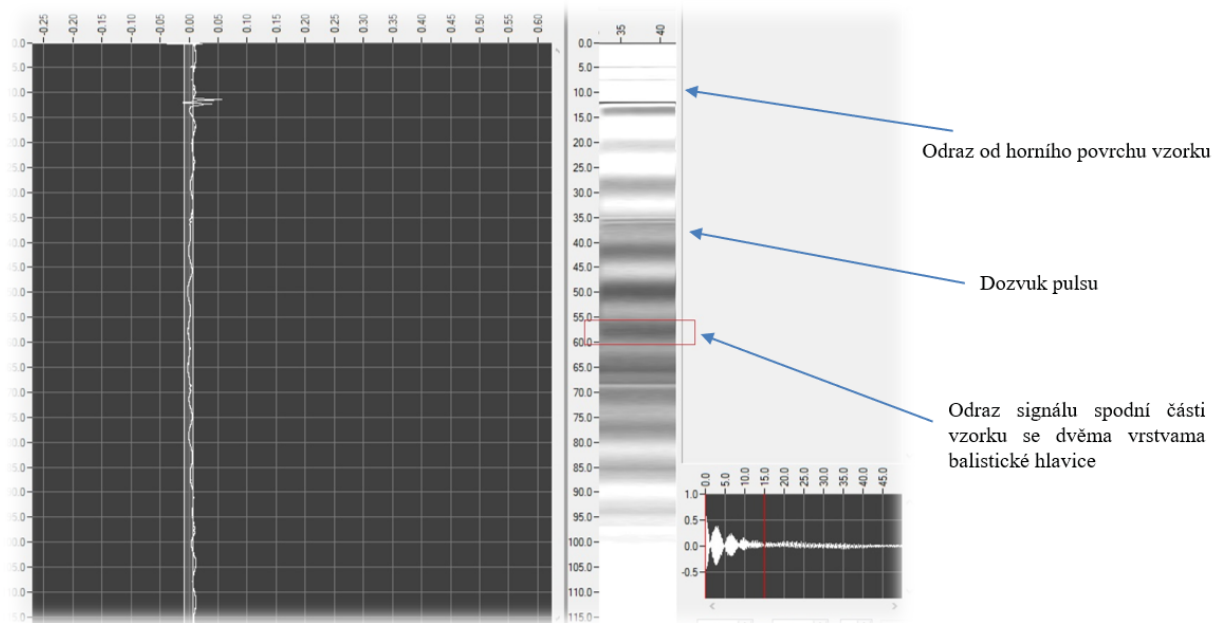
Další oblastí, kde může být využita metodika zmíněná envisage, především pak prostřednictvím kombinace radiografie a laser-ultrazvukové defektoskopie s možností vyhodnocení vad na základě vizuálního obrazu v nejvyšší kvalitě, je z hlediska klíčových aspektů bezpečnosti manipulace s nebezpečným materiálem (např. municí). U nebezpečných materiálů existuje potřeba provádění efektivního nedestruktivního zkoušení jak při výrobě jednotlivých komponentů a následné kontroly správnosti montáže všech dílů včetně energetických materiálů do funkčního celku (zapalovač, rozněcovač), tak dále při skladování, jakož i před jejich použitím.

Na základě testů kompozitů různé struktury a technologií výroby vč. aditivní výroby, kterou zajistila řada partnerských institucí dodávajících produkty spojeneckým armádám v rámci EDA, bylo zjištěno, že vzhledem ke komplexní heterogenní struktuře těchto artefaktů může u kompozitních materiálů při dynamické zátěži docházet k poškození a vzniku pórů, oddělení jednotlivých vrstev a jejich lokálnímu přetížení. Vysoká koncentrace těchto mikrodefektů, a to dokonce i když nedochází k výskytu zřetelných strukturálních defektů, může vést k zásadnímu snížení pevnosti materiálu.

Na základě informací o struktuře kompozitu a jejích změnách lze posoudit provozní chování jednotlivých složek kompozitního materiálu a jejich zbývající životnost. Tyto vlastnosti jsou klíčové, pokud se jedná o zkoušení munice a metodický přístup při používání kombinovaného přístupu k hodnocení stupně poškození vybraných materiálů používaných v rámci VTM, především součástí munice, a to vč. TPH raketových motorů řízených střel a raket. Proto se během počátečních kroků při využití jak rentgenové zkoušky (obr. 6.13A.), tak i širokopásmové laseroptické defektoskopie (obr. 6.13B), jednalo v první řadě o kontrolu neřízených raketových střel ráže 122 mm do minového vrhače a protitankových min pomocí prozařovací rentgenové zkoušky.

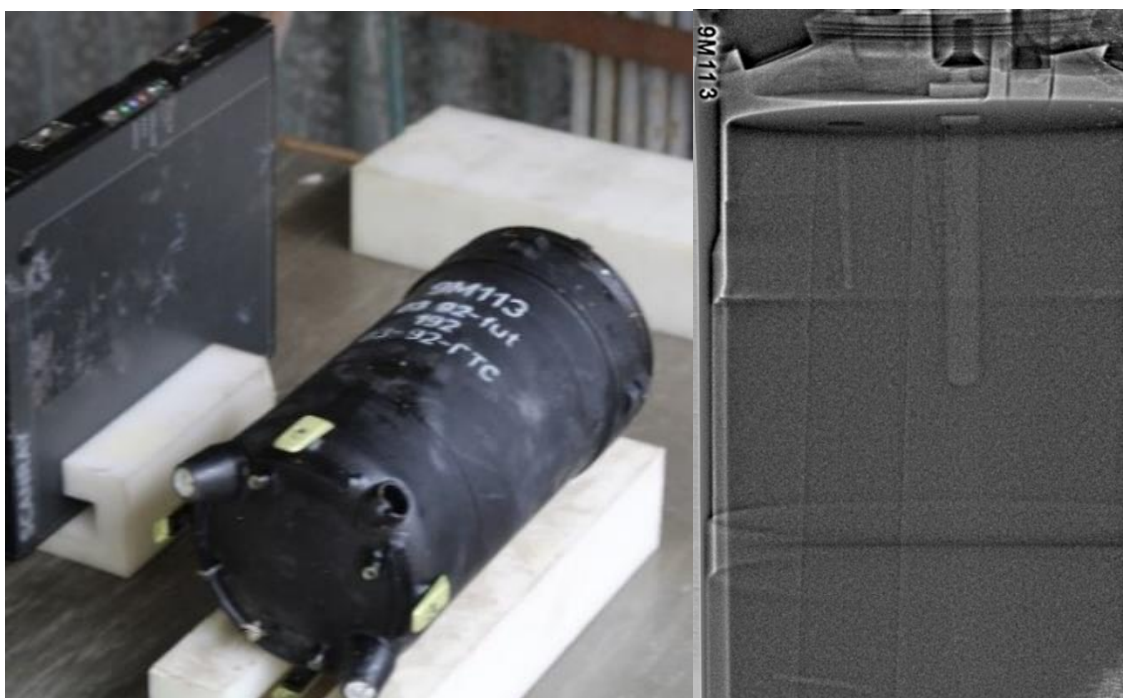


Obr. 6.13A. RTG kontrola neřízených raketových střel ráže 122 mm do minového vrhače a protitankových min pomocí prozařovací rentgenové zkoušky.



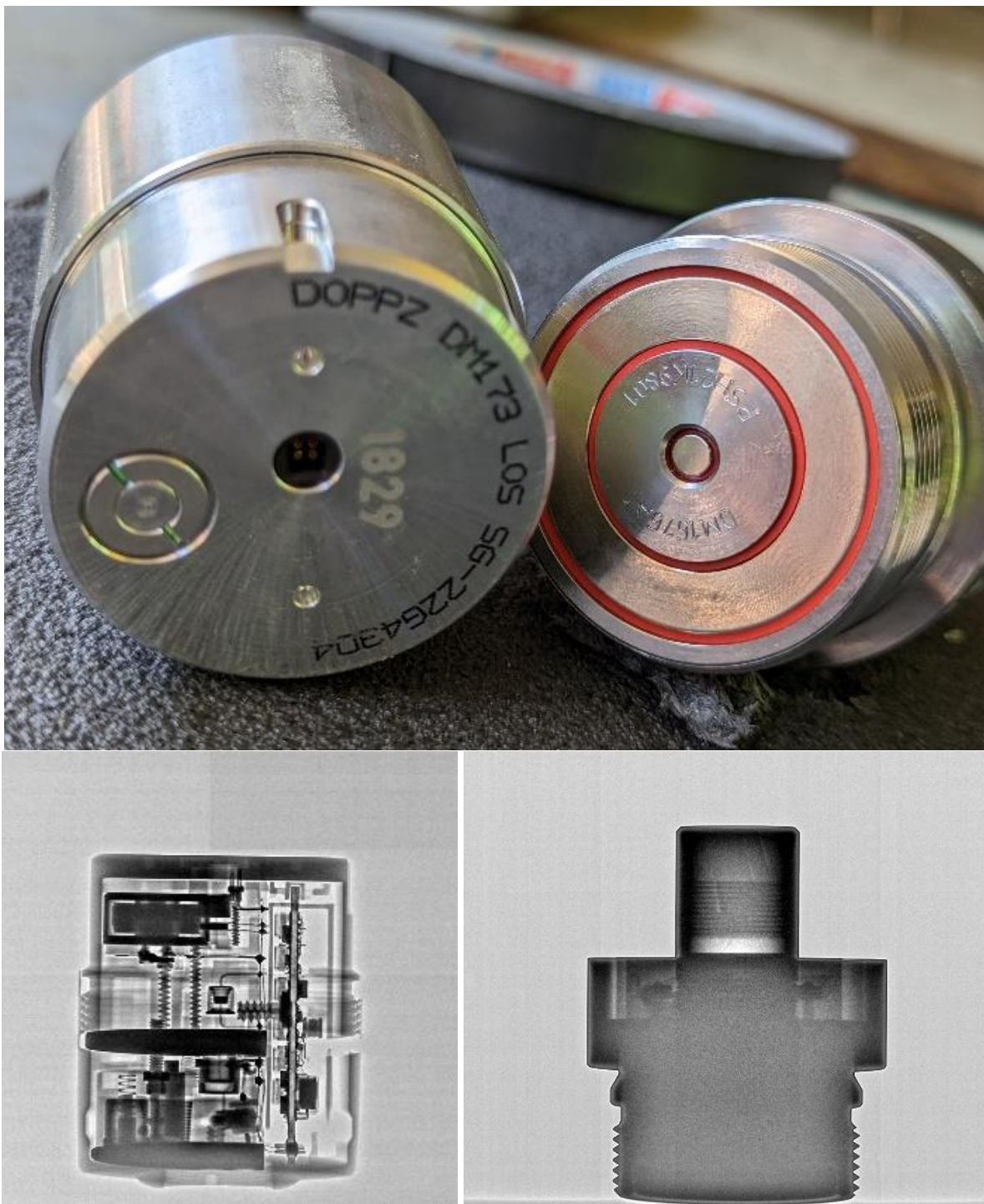
Obr. 6.13B. Nedestruktivní kontrola kumulativní protitankové střely 100 mm HEAT JPSv, provedena pomocí Širokopásmové laseroptické defektoskopie.

Zde se již jedná o komplexní přístup a lze využít metodu NDT, která najde široké uplatnění při kvalitativních přejímkách techniky (munice), kontrole munice po dlouhodobém skladování anebo kontrole stavu munice po „havárii“ – především munice, která je ve výzbroji AČR a u níž může během exploatace dojít k nežádoucím incidentům. Pro potřeby řešení úloh projektu se řešily primárně pohony protitankové řízené střely 9K113 Konkurs (obr. 6.14.).



Obr. 6.14. Výsledky kontroly pohonů protitankové řízené střely 9K113 Konkurs, v kódu NATO AT-5 „Spandrel“

Dalším příkladem může být využití kombinované technologie při identifikaci správné laborace (montáže) u výroby vnitřních elementů muničních zapalovačů, zápalkových šroubů, roznětných systémů, řízených střel a raket bez nutnosti rizikové fyzické delaborace systému pyrotechnikem (obr. 6.15).



Obr. 6.15. Nový zapalovač DOPPZ DM 173 a zápalkový šroub DM 1675A1 z munice 120 mm DM11 (Leopard 2A4)

Velký počet nomenklatury rentgenovaných typů municí, a to vč. TPH, vyžaduje 3D rekonstrukci snímků z důvodu vytvoření katalogu digitálních dvojčat (Digital Twins) za

účelem snadnější identifikace defektů. V rámci postupu se řešil homogenní válec, např. PTRS 9M14M-K Maljutka, s uměle udělanými vadami ve formě vyvrtaných otvorů (z čela i boku) o průměru cca 3 mm. Očividný přínos je v přípravě bezpečné prvotní delaborace (technologického postupu) neznámé munice nebo nové munice bez technické dokumentace z důvodu ověřování její jakosti a prodlužování technické životnosti munice. V neposlední řadě se nabízí provádění nedestruktivní defektoskopie TPH (tuhá pohonná hmota) raketových motorů řízených střel a raket (v současnosti prováděná ultrazvukem).

Provedením vyhodnocení materiálů technikou širokopásmové laseroptické defektoskopie v kombinaci s radiografií se podařila algoritmizace pro 3D rekonstrukci objektů z rentgenových snímků, což umožňuje vznik digitálního dvojčete pro urychlené vyhledávání vad v kritických komponentech VTM.

Na testování metod pro 3D rekonstrukci a sesazování radarových snímků bylo potřeba nejdříve získat testovací data. Bylo využito centrum laser-ultrazvukové defektoskopie a následně dvě rentgenky, včetně automatického natáčení snímání munice pomocí otočné sestavy (obr. 6.17.).



Obr. 6.17. Použitá technika a snímací soustava

Pro rekonstrukci bylo použito několik přístupů. Pomocí širokopásmové laser optické defektoskopie byly vytvořeny referenční profily materiálů, které budou použity při evidenci mechanických částí. Jelikož vytváření 3D rekonstrukce je z hlediska výpočtů náročnější, byla zde použita tzv. radonová transformace, která dokáže rekonstruovat 3D objekt. Pro rekonstrukci 3D tvaru bylo potřeba získat 360 rentgenových snímků při rotaci o jeden stupeň. Uvedené umožnilo získat dostatečné množství relevantních dat pro rekonstrukci. V praxi však není možné získávat při práci v terénu takové množství dat, jedná se pouze o vytvoření digitálního dvojčete, které bude referenční pro vyhodnocení vad po porovnání materiálových profilů. Proto bylo řešení rozšířeno o metodu založenou na práci s obrazy. Byla vytvořena databáze

jednotlivých snímků pro zapalovač. Následně je možné jeden snímek získaný z terénu detekovat v této sadě a poté vyhodnotit možnou rozdílnost. Sesazování jednotlivých snímků je provedeno pomocí metod založených na detekci význačných rysů snímku, tzv. feature. V rámci druhého přístupu byly použity Fourierovy transformace a fázové korelace. Vzorový příklad popisu uvedených metod a výsledků je v následující části kapitoly.

6.4.1 Nedestruktivní kontrola zapalovače PČZ-22A

Série zapalovače 01-21-stv, zapalovač byl demontován (delaborován) z munice:

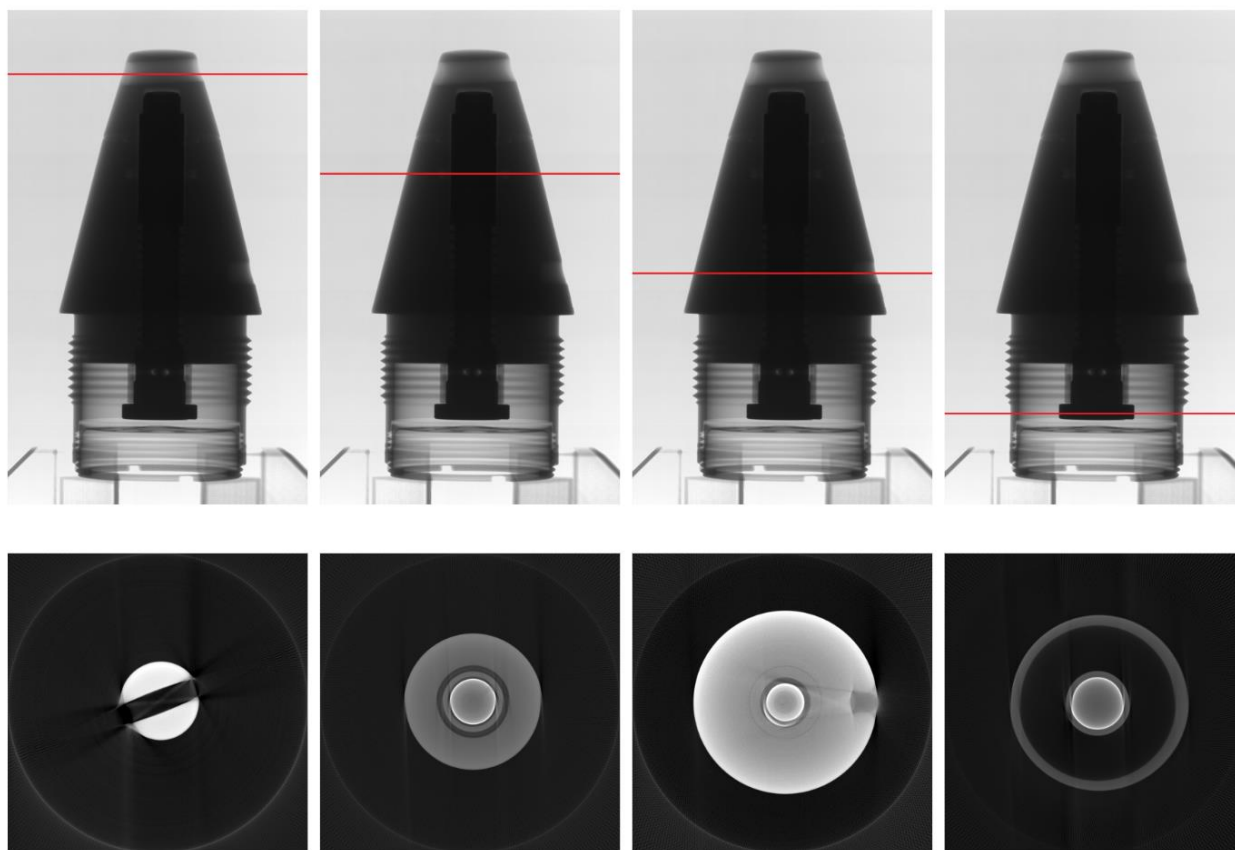
- Střela kontejnerová 122 mm KS PTMI-D1M SIG

Radonová transformace pro 3D rekonstrukci, neboť prostorová rekonstrukce je složena z několika kroků:

1. Flat-field korekce

- flat frames – průměr 9 snímků
- dark frames – průměr 9 snímků

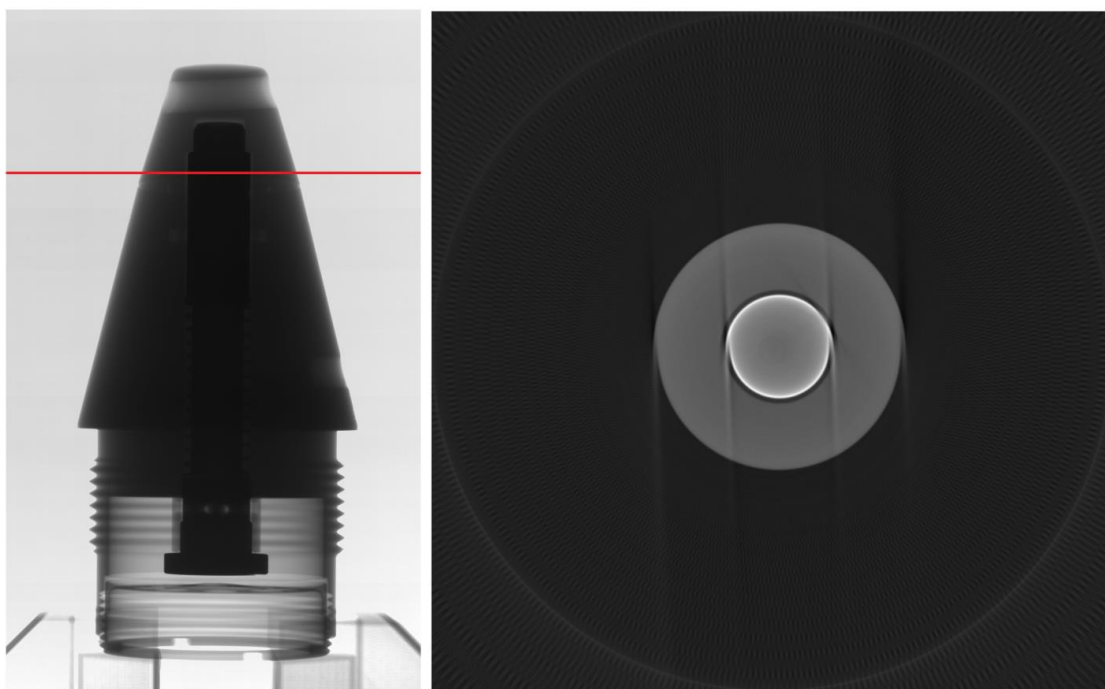
2. Filtrace pomocí mediánového filtru 3×3 (obr. 6.18.)



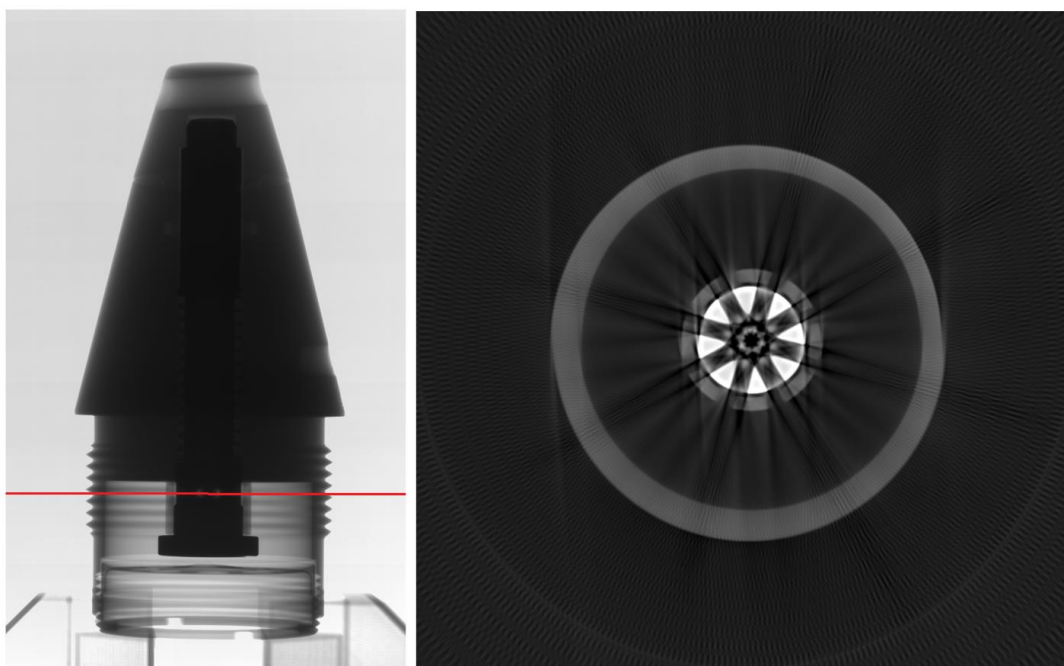
Obr. 6.18. Filtrace – odstranění čar v projekcích způsobených vadou detektoru

3. Zmenšení všech projekcí o polovinu – původní velikost dat nelze načíst do paměti v případě použití softwaru Matlab

4. Rekonstrukce – počet řezů: 1 400 a rozměr řezů: 850 × 850 px



Obr. 6.19. Viditelné artefakty způsobené pohybem objektu



Obr. 6.20. Výrazné artefakty způsobené špatnou geometrií

Bylo provedeno druhé měření, výsledné 3D řezy jsou patrné z obr. 6.18., na dalších obrázcích je vidět rekonstrukce problematických částí, kde docházelo k pohybu objektu (obr. 6.19.) nebo se objevily artefakty vzniklé špatnou geometrií (obr. 6.20.).

6.4.2 Nedestruktivní kontrola TPH raketových motorů NDSI-2K

Při realizaci kontroly kvality (neporušenosti) stavu degradace tuhé pohonné hmoty (TPH) u raketových motorů bez podmínky jejich demontáže se především řešilo využití nedestruktivních testovacích metod spojením rentgenového záření s laserem a ultrazvukem.

V průběhu dlouhodobého skladování munice (neřízených raket s TPH) může dojít k degradaci raketového pohonu tvořeného jedním nebo vícero (prachovými) zrny. Degradace je buď mechanická, anebo chemická. Tyto degradace materiálu TPH mají vliv na funkci pohonu rakety anebo přímo vedou k jejímu selhání. Proto se v současné době hledají možnosti využití dlouhodobě skladovaných, tzv. nedotknutelných zásob i u munice (neřízených raket), jelikož doba skladování může přesahovat i 15 let v nepříznivých podmínkách pro skladování munice v rozporu s doporučením od výrobce.

Mezi mechanické defekty, na které se soustředíme a vyhledáváme je metodou NDT testů, patří:

- Tvar prachového zrna, například sousost, délka, průměr
- Delaminace jednotlivých vrstev, zda nedochází k rozpadu zrna (odlupování se z povrchu různě velikých částí)
- Praskliny v zrně jak axiální, tak radiální, které by při zážehu motoru vedly k okamžitému rozpadu TPH a havárii celého motoru

Dále mezi chemické degradace, které hledáme, patří:

- Různé anomálie v prostoru TPH – různé kapaliny, plyny („vypocený tritol“)

Pro účely tohoto testování byla zvolena tuhá pohonná hmota NDSI-2K (obr. 6.21.), série 8/1989, která byla demontována (delaborována) z munice: náboj PG-9-IU (KČM 0019999047039), série 1/2008. Jak již bylo zmíněno envisage v současné době hledáme spolehlivou a bezpečnou NDT metodu ke zjištění degradace TPH u raket, vč. ráže 122 mm, která by dokázala odhalit degradaci materiálu a výskyt anomálií v prachovém zrně (tuhé pohonné hmotě = prachové zrno / prachová zrna).



Obr. 6.21. Kontrola stupně degradace TPH u raketových motorů

Jde o praskliny jak radiální, tak axiální, které se nerovnoměrně vyskytují v prachovém zrně. Tyto praskliny/defekty mají za následek nerovnoměrné hoření motoru, popřípadě i havárii celého systému.

Spolehlivá NDT metodika kontroly stavu TPH bez nutnosti rozebrat raketu by umožnila provádět přejímku a kontrolu munice bez ohledu na původ, stáří a podmínky skladování, proto kombinace laser-ultrazvukové defektoskopie a radiografie, která pomáhá již teď řešit vizualizace raketového motoru na tuhou pohonnou hmotu neřízených raketových střel ráže 122 mm, TPH NDSI 2k, kdy se řeší homogenita materiálů, může být optimalizována (customization / upravena dle přání zákazníka) na jiné produkty a systémy komponent vojenských produktů dle jejich kritičnosti (složitost a funkčnost).

Na tomto místě je třeba podotknout, že ozbrojené síly obvykle skladují značné množství munice. Během delšího skladování v různých podmínkách dochází k přirozenému stárnutí munice, což může podstatně ovlivnit její výkon. Kontrola vybraných parametrů je proto klíčovým úkolem při posuzování bezpečnosti a spolehlivosti chování munice po dlouhodobém skladování. Výsledky diagnostických testů slouží jako základ pro určení vhodnosti daného střeliva pro další použití.

Moderní muniční systémy používané po celém světě obsahují jak konvenční kovové součásti (zapalovače a nábojnice, používané v tancích a dělostřelecké munici, dnes nahrazované spalitelnými nábojnicemi, které přinášejí řadu výhod), tak tuhé pohonné hmoty. V případě nábojnic je do hnacího systému zbraně dodávána dodatečná energie, která pohání střelu a zároveň snižuje hmotnost náboje.

SN se obvykle skládají z celulózy, nitrocelulózových vláken a pojiv. Spalitelný materiál není vysoce zhuštěný a má porézní strukturu. Rychlost hoření spalitelného materiálu je dostatečně vysoká, aby během výstřelu došlo k úplnému spálení. Důležitým faktorem při určování pevnostních parametrů je pojivo, především polyuretany, vinylové, akrylové a styren-butadienové polymery. Metody výroby SN zahrnují plstění, navíjení a impregnaci plstěných spalitelných materiálů pryskyřicí.

Výše uvedené vlastnosti, zejména chemická stabilita, musejí být zachovány po celou dobu životnosti munice v různých podmínkách okolního prostředí. Je prokázáno, že při provedení dynamických zkoušek po kondicionování při teplotě 55 °C byla pozorována geometrická deformace, která nepříznivě ovlivnila nabíjení nábojů do komory zbraně. Tento jev byl přičítán kombinovanému vlivu měknutí pryskyřice a hmotnosti střely na nábojnici během kondicionování v horizontální poloze. Dalším problémem je v tomto případě pórovitost. Při delším skladování a přepravě může dojít k opotřebení vnějšího obalu, což způsobí rychlou absorpci vlhkosti stěnou pouzdra. Pokud je pouzdro vlhké, rychlost spalování klesá, což může vést k tomu, že v komoře zůstanou zbytky nedokonalého spalování. To zvyšuje odporovou sílu pohybu střely a může vést k nehodě. Vzhledem k citlivosti střeliva na různé typy okolních podmínek je proto nezbytné, aby byla geometrie střeliva řádně kontrolována, a to jak ve fázi jeho výroby, tak během jeho životnosti.

PŘÍNOSY PRÁCE

Tato habilitační práce je věnována problematice ověření klasických metod NDT a přínosu používání nové technologie diagnostiky struktury a vlastností moderních konstrukčních materiálů používaných ve vojenské technice při zajištění jejího provozu, které je založeno na kombinaci RT zářičů a kontaktní laserové a ultrazvukové strukturoskopie. Tato technologie se ukazuje být velmi perspektivní.

Standardní ultrazvukové metody nedokážou, na rozdíl od laserové ultrazvukové strukturoskopie, zkoumat tenké kompozitní díly, neboť ultrazvuková zkušební zařízení mají slepé pásmo v důsledku složitého podlouhlého tvaru ultrazvukového pulzu.

Je možné konstatovat, že předložená habilitační práce má přínosy ve třech oblastech:

Ve vědecké oblasti

- Byla navržena a sestavena nová platforma širokopásmového laser-ultrazvuku, která dokáže účinně vizualizovat rozptylovače o velikosti od desítek mikrometrů do několika milimetrů uvnitř předmětu.
- Experimentálně jsem ověřil funkčnost celého systému a automatické laserové ultrazvukové zobrazovací systémy vytvářejí a ukládají 3D obrazy předmětů a mapy vad v digitální podobě.
To lze využít jako základ pro modelování chování předmětů (změn jejich charakteristik) za podmínek působení mechanického zatížení a jiných externích sil.
- Jednoznačně jsem prokázal, že kontaktní laser-ultrazvukovou defektoskopii lze využít k vizualizaci vnitřní struktury kompozitních materiálů. Lze rovněž konstatovat, že v této počáteční fázi aplikace aditivních výrobních technologií je mimořádně důležité začít s vývojem celé řady procesů. Tyto procesy budou zaměřené na testování a schopnosti technologií AM a možnosti jejich nasazení ve formě samostatných kapacit. Dále se tato řešení budou testovat v bojovém prostředí pro výrobu celé palety předmětů z nejrůznějších materiálů, a to přímo na místě.

V praktické oblasti

- Byly získány cenné zkušenosti a ověřené postupy při provádění strukturoskopie, což je zcela nezbytná součást posuzování vlastností strojních součástí. Dva patenty, jeden registrovaný v Česku a druhý u EPO, byly přímo komerčně využity řadou společností (VOP CZ, Tensylon Dupont a XERION). Popsané a experimentálně ověřené metody kontaktní laser-ultrazvukové defektoskopie se využívají při realizaci oprav techniky u specializovaných složek MO ČR, jako je VOP CZ, s.p., a útvarů AČR (LABA) anebo v rámci programu Bezpečnostního výzkumu MV ČR.

V pedagogické oblasti

- Vytvořil jsem metodiku a postavil jsem přístrojovou základnu na laser-akustické nedestruktivní testování materiálů k detekci strukturních nehomogenit ve zkoumaných objektech, vč. softwarového řešení. Tato základna umožní studentům, aby se prakticky

seznámili s podstatou nové NDT metodiky pro vyhodnocování vad materiálů a aby si funkci různých technik NDT mohli ověřit přímo v praxi.

- Během deseti let jsem vedl několik doktorských prací, které se zabývaly problémy nových metod NDT při využití perspektivních materiálů při nasazení inovativních technologií aditivní výroby.
- Jelikož vliv nedestruktivního zkoušení materiálů používaných ve vojenské technice nelze přeceňovat, je možné konstatovat, že je nutné zpřísnění požadavků na bezpečnost v různých oblastech. To výrazně zvýší nároky na ukazatele fyzikálně-mechanických vlastností a na trvanlivost používaných konstrukčních materiálů. Jako správná cesta při rozšíření nomenklatury NDT metod se ukazuje využití nové perspektivní technologie kontaktní laser-ultrazvukové defektoskopie při zkoušení vojenské techniky.

V současné době jsou NDT zařízení, fungující na obdobném principu, určená pro kontrolu vad v nových a unikátních materiálech, komerčně dostupná od několika výrobců (například od výzkumného centra v Rakousku – Research Center for Materials Characterization and Non-Destructive Testing, RECENDT GmbH, které je financováno z prostředků společnosti Upper Austrian Research GmbH). V mnoha zemích se pak počítá s nasazením těchto zařízení při kontrole vad nejenom ve strategickém sektoru, jako jsou jaderné elektrárny (například Tecaton ve Španělsku, který rozvíjí celý sektor NDT primárně pro odvětví jaderné energetiky), v pozemní technice BVP, ale i v letecké a kosmické technice během výrobních procesů nebo za reálných provozních podmínek.

V budoucnu lze v USA, EU a pravděpodobně i v dalších zemích očekávat další vývoj a využití kontrolních přístrojů jako jedné z metod vyhodnocování vad v pokročilých materiálech pro účely zamezení technických incidentů, pro vývojové a provozní zkoušky náhradních dílů techniky, určené jak pro vojenské, tak dvojité využití, a zároveň pro vědecké a výzkumné účely. Zejména pokud hovoříme o systému terénního monitoringu pro využití AČR, mohou výše uvedené zkoušky pomoci posoudit tyto nové technologie v izolovaném a měnícím se bojovém prostředí. Tento systém, vybavený systémem termálního zobrazování na bázi vysokorychlostních fotodiód a bezkontaktním laser-ultrazvukovým systémem monitoringu, umožní procesní monitoring vzniku defektů (např. v náhradních dílech vyrobených za pomoci aditivní výroby), jako jsou póry, mikrotrhliny a delaminace.

ZÁVĚR

Na základě experimentů s reálnými technikami NDT, jako jsou UT a RT, konstatují, že neexistuje univerzální metoda, která by dokázala stoprocentně posoudit vady v materiálech, obzvláště pokud se jedná o strukturoskopii materiálů vyráběných perspektivní a postupně široce zaváděnou technologií 3D tisku, kde není známa odlišnost mechanických vlastností vzhledem k původním materiálům vyráběným konvenčními technologiemi.

Na základě provedeného výzkumu lze prohlásit, že vliv nedestruktivní diagnostiky při vyhodnocení vad náhradních dílů vyrobených inovativními technologiemi AM pro zajištění provozu vojenské techniky moderních evropských armád nelze přeceňovat.

Metoda laser-ultrazvukové strukturoskopie byla ověřena na řadě reálných svarů artefaktů vyrobených za pomoci jak konvenčních technologií, tak v kombinaci s aditivní výrobou, a to při dlouhodobém zatěžování strojů širokým spektrem pracovních režimů. Z této velké řady realizovaných aplikací na různých vzorcích, vč. balistického materiálu ochrany jednotlivců, a o různých velikostech byly v této práci vybrány jen některé případy – kompozity používané pro výrobu ultralehkých letadel a dronů (kap. 4.1 a kap. 6.1), svary vysokopevnostních ocelí (kap. 6.2), balistické kompozity (kap. 5) a různé typy munice (kap. 6.4 a 6.5). Postupně je zde ukázáno rozšiřování nomenklatury artefaktů, vč. těch vyrobených za pomoci AM.

I v případě NDT kontroly velmi složitého kompozitu vyrobeného za použití AM a Tensilonu bylo možné dosáhnout kvalitních výsledků a významného zlepšení vizuálního vyhodnocení vad vzniklých po balistickém testu (viz kap. 5). Popis přístroje a techniky vyhodnocení tak představuje obecný postup, který lze aplikovat na různé typy balistických ochrany a který je možné v případě jiných materiálů, vč. izolantu, či z nedostatku času na realizaci kalibračních testů před zahájením provádění zkoušení příslušně redukovat.

Hlavním přínosem této práce je vývoj robustního a zobecnitelného přístupu k provádění nedestruktivního zkoušení materiálů pomocí nové inovační techniky strukturoskopie na principu laser-ultrazvuku, přičemž tato technika je funkční v širokém pásmu pracovních podmínek. Metoda využívá princip superpozice vnitřních a vnějších zdrojů a propadů tepla. Byla ukázána aplikovatelnost metody na různé artefakty vyrobených z různých materiálů za pomoci různých druhů výrobních technik (kap. 3, 4, 5 a 6), včetně epoxidových kompozitních materiálů zesílených uhlíkovými vlákny.

V neposlední řadě byly diskutovány různé možnosti průmyslové implementace univerzálního řešení pomocí techniky laser-ultrazvukové strukturoskopie do široké nomenklatury artefaktů vyrobených z různých materiálů (kap. 6). Bez tohoto důležitého posledního kroku je realizace metody v praxi složitá, ne-li nemožná. Celý výzkum a vývoj by bez tohoto kroku pak pozbýval smyslu. A proto je třeba se věnovat také této oblasti, včetně intenzivní komunikace s výrobcí moderní vojenské techniky.

Významným přínosem této habilitační práce je také to, že bylo vytvořeno souborné dílo, které může posloužit pro seznámení odborné veřejnosti s novými možnostmi NDT kontroly artefaktů pomocí laser-ultrazvukové strukturoskopie.

Dá se předpokládat, že po systémově vyváženém zavedení NDT technik bude pravděpodobně možné identifikovat většinu vad vzniklých při aditivní výrobě náhradních dílů moderní vojenský techniky.

Reálné vady u 3D tištěných artefaktů je tedy třeba klasifikovat několika metodami současně a na základě shody výsledků dvou a více metod rozhodnout o správnosti posouzené vady. Na příkladu konfliktu na Ukrajině je dost kritické posoudit artefakty technikami NDT, pokud se jedná o využití AM při realizaci oprav vojenské techniky v režimu Battle Damage Repair.

Bibliografie

1. 2nd Fleet, NATO Joint Force Command Norfolk Seek Further Integration of Allied Navies, Megan Eckstein, In: U.S. Naval Institute's, February 5, 2020
2. Yasmin Tadjdeh, Navy beefs up 3D printing efforts with new 'Print the Fleet' program, National Defense Magazine, October 2014
3. Ramon Knulst, 3D printing of marine spare, a case study on the acceptance in the maritime industry. Open University, Nederland, June 2016
4. Additive Manufacturing feasibility study & technology demonstration. European Defence Agency Strategic Report, June 2018
5. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Additive Manufacturing Technologies. Springer New York, 2015.
6. King W. E., Anderson A. T., Ferencz R. M., Hodge N. E., Kamath C., Khairallah, S. A., Rubenchik A. M., Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges, Applied Physics Reviews 2, 2015.
7. Jun H.T., Wai Leong Eugene Wong, Kenneth W.D., An overview of powder granulometry on feedstock and part performance in the selective laser melting process, Additive Manufacturing, Vol. 18, pp. 228-255, December 2017.
8. Bamberg J., Dusel, K., Satzger, W., Overview of Additive Manufacturing Activities at MTU Aero Engines, AIP Conference Proceedings, Vol.1650, Issue 1, pp. 156-163, 2015.
9. Measurement Automation Monitoring, Apr. 2017, no. 04, vol. 63, ISSN 2450-2855, Agnieszka LISOWSKA-LIS, STATE HIGHER VOCATIONAL SCHOOL IN TARNOW, 8 Mickiewicza St., 33-100 Tarnow, Poland
10. Mercelis P., Kruth J.P., Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyp. J., Vol. 12, Issue 5, pp. 254-265, 2006.
11. Zhong Y.C., Il A.L., Seung K.M., Process Monitoring and Inspection Systems in Metal Additive Manufacturing: Status and Applications, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 4, Issue 2, pp. 235-245, 2017.
12. Craeghs, S. Clijsters, Kruth J.P., Bechmann F., Ebert M.C., Detection of process failures in layerwise laser melting with optical process monitoring, Phys. Procedia, vol. 39, Issue 1, pp 753-759, 2012.
13. Furumoto T., Alkahari M.R., Ueda T., Aziz M.S.A., Hosokawa A., Monitoring of laser consolidation process of metal powder with high speed video camera, Phys. Procedia, Vol. 39, Issue 1, pp 760–766, 2012.
14. Furumoto T. Ueda, M.R. Alkahari, A. Hosokawa, Investigation of laser consolidation process for metal powder by two-color pyrometer and high-speed video camera, CIRP Ann. Manuf. Technol., Vol. 62, Issue 1, pp. 223–226, 2013.
15. Furumoto T., Ueda T., Kobayashi N., Yassin A., Hosokawa A., Abe S., Study on laser consolidation of metal powder with Yb: fiber laser—evaluation of line consolidation structure, J. Mater. Process. Technol., Vol. 209, Issue 18–19, pp. 5973–5980, 2009.
16. Pavlov M., Doubenskaia M., Smurov I., Pyrometric analysis of thermal processes in SLM technology, Phys. Procedia, Vol. 5, Issue B, pp.523–531, 2010.

17. Doubenskaia M, Pavlov M, Chivel Y., Optical system for on-line monitoring and temperature control in selective laser melting technology, *Key Eng. Mater.*, Vol. 437, pp.458–461, 2010.
18. Islam M, Purtonen T., Piili H., Salminen A., Nyhnilä O., Temperature profile and imaging analysis of laser additive manufacturing of stainless steel, *Phys. Procedia*, Vol. 41, pp. 835–842, 2013.
19. Krauss H., Eschey C., Zaeh M.F., Thermography for monitoring the selective laser melting process, 23rd International Solid Freeform Fabrication Symposium; Austin, TX, 2012.
20. Rodriguez E., Mireles J., A. C.T., Espalin D., Wicker R., Approximation of absolute surface temperature measurements of powder bed fusion additive manufacturing technology using in situ infrared, *Thermography Additive Manufacturing*, Vol. 5, pp. 31-39, 2015. Emmanuel Rodriguez, Jorge Mireles, Cesar A. Terrazas, David Espalin, Ryan B. Wicker
21. Khanzadeh M., Chowdhury S., Bian L., Tschopp M.A., A methodology for predicting porosity from thermal imaging of melt pools in additive manufacturing thin wall sections, ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, pp. V002T01A044-V002T01A044, 2017.
22. Mani M., Lane B.M., Donmez M.A., Feng S.C., Moylan S.P., A review on measurement science needs for real-time control of additive manufacturing metal powder bed fusion processes, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 55, Issue 5, pp. 1400-1418, 2017.
23. Khanzadeh M., Tian W., Yadollahi A., Doude H., Bian L., Dual process monitoring of metal-based additive manufacturing using tensor decomposition of thermal image streams, *Additive Manufacturing*, Vol. 23, Pages 443-456, 2018.
24. Khanzadeh M., Chowdhury S., Marufuzzaman M., Tschopp M.A., Bian L., Porosity prediction: supervised learning of thermal history for direct laser deposition, *J. Manuf. Syst.*, Vol. 47, pp. 69-82, 2018.
25. Process Monitoring of Additive Manufacturing by Using Optical Tomography Conference Paper, Conference: Conference: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, At Boise, Idaho, USA, 2014.
26. Karnati S., Matta N., Sparks T., Liou F., Vision-based process monitoring for laser metal deposition processes, 24th International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2013.
27. Tang L., Landers R.G., Melt pool temperature control for laser metal deposition processes: part I: online temperature control, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 132, Issue 1, 2010).
28. Song, Mazumder J., Real time Cr measurement using optical emission spectroscopy during direct metal deposition process, *IEEE Sensors J.*, Vol. 12, Issue 5, pp. 958–964, 2012.

29. Everton S.K., Hirsch M., Stravroulakis P., Leach R.K., Clare A.T., Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing, *Materials and Design*, Vol.95, pp.431–445, 2016.
30. Tang L., Landers R.G., Melt pool temperature control for laser metal deposition processes: part I: online temperature control, *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 132, Issue 1, 2010.
31. Barua S., Liou F., Newkirk J., Sparks T, Vision-based defect detection in laser metal deposition process, *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 20, Issue 1, pp. 77–85, 2014.
32. Rodriguez E., Mireles J., Terrazas C. A., Espalin D., Perez M. A., Approximation of Absolute Surface Temperature Measurements of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Technology Using in Situ Infrared Thermography, *Additive Manufacturing*, Vol. 5, pp. 31-39, 2015.
33. Schomer J. J., Hehr A. J., and Dapino M. J., Characterization of Embedded Fiber Optic Strain Sensors into Metallic Structures Via Ultrasonic Additive Manufacturing, *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, Paper No. 980320, 2016.
34. Dunbar A. J., Denlinger E. R., Heigel J., and Simpson T. W., Experimental in Situ Distortion and Temperature Measurements during the Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process Part 1: Development of Experimental Method, *Additive Manufacturing*, 2016. DOI: 10.1016/j.addma.2016.04.007
35. Chua¹ Z.Y., Ahn¹ I.H., and Moon S.K., Process Monitoring and Inspection Systems in Metal Additive Manufacturing: Status and Applications, *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, Vol. 4, Issue 2, pp. 235-245. DOI: 10.1007/s40684-017-0029-7
36. Du Plessis A., le Roux S. G., Booysen G., Els J., Directionality of Cavities and Porosity Formation in Powder-Bed Laser Additive Manufacturing of Metal Components Investigated Using X-Ray Tomography, *3D Printing and Additive Manufacturing*, Vol. 3, Issue 1, pp. 48-55, 2016.
37. Watkins T, Bilheux H., Ke A., Payzant A., Dehoff R., Duty C.E., Neutron characterization for additive manufacturing, *Adv. Mater. Process.*, Vol. 171, Issue 3, pp. 23–27, 2013.
38. Tremsin A.S., McPhate J.B., Steuwer A., Kockelmann W., Paradowska M., Kelleher A., JF High-resolution strain mapping through time-of-flight neutron transmission diffraction with a microchannel plate neutron counting detector, Vol. 48, Issue 4, pp. 296–305, 2012.
39. Wang F., Mao H., Zhang D., Zhao X, Shen Y., Online study of cracks during laser cladding process based on acoustic emission technique and finite element analysis, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 255, Issue 5, Part 2, pp. 3267–3275, 2008.
40. Wu H., Yu Z., Wang Y., A new approach for online monitoring of additive manufacturing based on acoustic emission ASME 2016 11th International Manufacturing Science and

Engineering Conference, paper No. MSEC2016-8551, pp. V003T08A013, 2016. DOI: 10.1115/MSEC2016-8551

41. Shevchik S.A., Kenel C., Leinenbach C., Wasmer K., Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks *Additive Manufacturing*, Vol. 21, pp. 598-604, May 2018.
42. Rieder H., Dillhöfer A., Spies M., Bamberg J., Hess T., Ultrasonic Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Based on Selective Laser Melting, in *AIP Conference Proceedings 1650*, edited by D.E. Chimenti and L.J. Bond (American Institute of Physics, Melville, NY), pp. 184–191, 2015.
43. Rieder H., Spies M., Bamberg J., Henkel B., On- and Offline Ultrasonic Characterization of Components Build by SLM Additive Manufacturing, *AIP Conference Proceedings 1706*, 130002, 2016, doi: 10.1063/1.4940605
44. Edwards R.S., Dutton B., Clough A.R., Rosli M.H., Scanning laser source and scanning laser detection techniques for different surface crack geometries, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*; Burlington, VT: AIP Conference Proceedings, pp. 251–258, 2012.
45. Cerniglia D., Scafidi M., Pantano A., Lopatka R., Laser ultrasonic technique for laser powder deposition inspection, *Laser*, Vol. 6, Issue 150, p. 13, 2013.
46. Dong F., Wang X., Yang Q., Yin A., Xu X., Directional dependence of aluminum grain size measurement by laser-ultrasonic technique. *Mater. Charact*, Vol. 129, pp. 114–120, 2017
47. Ruipeng G, Haitao W, Jianyan Z, Non-contact detection of low carbon steel using laser generated ultrasound at high temperature. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt*, Vol. 136, 536–542, 2017.
48. Mi B, Ume C., Real-time weld penetration depth monitoring with laser ultrasonic sensing system. *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 128, Issue 1, p. 280, 2006.
49. Millon C., Vanhoye A., Obaton A., Penot J., Development of laser ultrasonics inspection for online monitoring of additive manufacturing *Welding in the World*, Vol. 62, pp. 653–661, 2018. <https://doi.org/10.1007/s4194-018-0567-9>
50. Dubrov A.V., Mirzade F. Kh, Dubrov V.D. Mathematical modeling of thermal behavior for additive manufacturing with metal powder injection (2017) *Procedia Engineering*, 201, p. 478-488
51. Dubrov A.V., Mirzade F. Kh, Dubrov V.D., Panchenko V.Ya. Heat Transfer and Thermocapillary Convection during the Laser Deposition of Metal Powders Implemented in Additive Technologies (2018) *Surface Investigation X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 12(1), p. 54-63.
52. Millon C., Vanhoye A., Obaton A., Penot J., Development of laser ultrasonics inspection for online monitoring of additive manufacturing *Welding in the World*, Vol. 62, pp. 653–661, 2018. <https://doi.org/10.1007/s4019-018-0567-9>

53. Kravcov, A., Svoboda, P., Konvalinka, A., Cherepetskaya, E.B., Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiber-reinforced plastics, Volume 722 KEM, 2017, Pages 267-272, 13th International Conference on Special Concrete and Composite, SkalskyDvur, Czech Republic, 2016
54. Kucewicz M., Baranowski P., Małachowski J., Popławski A., Płatek P., Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures, *Mater. Des.* 142 (2018). doi:10.1016/j.matdes.2018.01.028.
55. Dziewit P., Płatek P., Janiszewski J., Sarzyński M., Grażka M., Paszkowski R., Mechanical Response of Additive Manufactured Regular Cellular Structures in Quasi-Static Loading Conditions - Part I Experimental Investigations, in: S. Gomes, S.A. Meguid (Eds.), *Proc. 7th Int. Conf. Mech. Mater. Des.*, Albufeira, 2017: pp. 1061–1074.
56. Ozdemir Z., Tyas A., Goodall R., Askes H., Energy absorption in lattice structures in dynamics: Nonlinear FE simulations, *Int. J. Impact Eng.* 102 (2017) 1–15. doi:10.1016/j.ijimpeng.2016.11.016.
57. Zhang X., An L., Ding H., Dynamic crushing behavior and energy absorption of honeycombs with density gradient, *J. Sandw. Struct. Mater.* 16 (2014) 125–147. doi:10.1177/1099636213509099.
58. Zhang Y., Xu X., Wang J., Chen T., Wang C.H., Crushing analysis for novel bio-inspired hierarchical circular structures subjected to axial load, *Int. J. Mech. Sci.* 140 (2018) 407–431. doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.03.015.
59. Mayer P., Pyka D., Jamroziak K., Pach J., Bocian M., Experimental and Numerical Studies on Ballistic Laminates on the Polyethylene and Polypropylene Matrix, *J. Mech.* (2017) 1–11. doi:10.1017/jmech.2017.103.
60. Kedzierski P., Gieleta R., Morka A., Niezgoda T., Surma Z., Experimental study of hybrid soft ballistic structures, *Compos. Struct.* 153 (2016) 204–211. doi:10.1016/j.compstruct.2016.06.006.
61. Mazurkiewicz L., Małachowski J., Baranowski P., Blast loading influence on load carrying capacity of I-column, *Eng. Struct.* 104 (2015) 107–115. doi:10.1016/j.engstruct.2015.09.025.
62. Baranowski P., Małachowski J., Płatek P., Szafrńska A., LENS Ti-6Al-4V alloy material properties determination for LS-Dyna package, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2078, paper no.20058, 2019, doi: 10.1063/1.5092061
63. Płatek P., Baranowski P., Cieplak K., Sarzyński M., Sienkiewicz J., Janiszewski J., Małachowski J., Investigation on deformation process of cellular structures with gradient topology manufactured additively, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2078, paper no. 20108, 2019, doi: 10.1063/1.5092111
64. N. Gaspar, X.J. Ren, C.W. Smith, J.N. Grima, K.E. Evans, Novel honeycombs with auxetic behaviour, *Acta Materialia*. 53 (2005) 2439–2445.

65. L. Yang, O. Harrysson, H. West, D. Cormier, Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing, *International Journal of Solids and Structures*. 69–70 (2014) 475–490.
66. X. Jin, Z. Wang, J. Ning, G. Xiao, E. Liu, X. Shu, Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading, *Composites Part B: Engineering*. 106 (2016) 206–217.
67. M. Kucewicz, P. Baranowski, J. Małachowski, A. Popławski, P. Płatek, Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures, *Materials and Design*. 142 (2018) 177–189.
68. P. Dziewit, P. Płatek, J. Janiszewski, M. Sarzyński, M. Grązka, R. Paszkowski, Mechanical Response of Additive Manufactured Regular Cellular Structures in Quasi-Static Loading Conditions - Part I Experimental Investigations, w: S. Gomes, S.A. Meguid (Red.), *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, Albufeira, 2017: ss. 1061–1074.
69. Q. Zhang, X. Yang, P. Li, G. Huang, S. Feng, C. Shen, B. Han, X. Zhang, F. Jin, F. Xu, T.J. Lu, Bioinspired engineering of honeycomb structure - Using nature to inspire human innovation, *Progress in Materials Science*. (2015).
70. N. Tanlak, D.F. De Lange, W. Van Paepegem, Numerical prediction of the printable density range of lattice structures for additive manufacturing, *Materials and Design*. 133 (2017) 549–558.
71. W. Liu, N. Wang, T. Luo, Z. Lin, In-plane dynamic crushing of re-entrant auxetic cellular structure, *Materials & Design*. 100 (2016) 84–91.
72. A. Mahmoodi, M.H. Shojaeefard, H. Saeidi Gogarchin, Theoretical development, and numerical investigation on energy absorption behavior of tapered multi-cell tubes, *Thin-Walled Structures*. 102 (2016) 98–110.
73. S. Banerjee, On the mechanical properties of hierarchical lattices, *Mechanics of Materials*. 72 (2014) 19–32.
74. S. Del Broccolo, S. Laurenzi, F. Scarpa, AUXHEX – A Kirigami inspired zero Poisson's ratio cellular structure, *Composite Structures*. 176 (2017)
75. X. James Ren, V. V. Silberschmidt, Numerical modelling of low-density cellular materials, *Computational Materials Science*. 43 (2008) 65–74.
76. L. Boldrin, S. Hummel, F. Scarpa, D. Di Maio, C. Lira, M. Ruzzene, C.D.L. Remillat, T.C. Lim, R. Rajasekaran, S. Patsias, Dynamic behaviour of auxetic gradient composite hexagonal honeycombs, *Composite Structures*. 149 (2016) 114–124.
77. N. Biswas, J.L. Ding, Numerical study of the deformation and fracture behavior of porous Ti6Al4V alloy under static and dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*. 82 (2015) 89–102.
78. Z. Ozdemir, A. Tyas, R. Goodall, H. Askes, Energy absorption in lattice structures in dynamics: Nonlinear FE simulations, *International Journal of Impact Engineering*. 102 (2017).

79. M. Kuczewicz, P. Baranowski, J. Małachowski, A. Popławski, P. Płatek, Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures, *Materials and Design*. 142 (2018).
80. S. Lee, F. Barthelat, J.W. Hutchinson, H.D. Espinosa, Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials - Experiments and modeling, *International Journal of Plasticity*. 22 (2006) 2118–2145.
81. C. Yang, H.D. Vora, Y. Chang, Behavior of auxetic structures under compression and impact forces, *Smart Materials and Structures*. 27 (2018).
82. S. Li, H. Hassanin, M.M. Attallah, N.J.E. Adkins, K. Essa, The development of TiNi-based negative Poisson's ratio structure using selective laser melting, *Acta Materialia*. 105 (2016) 75–83.
83. P. Hanzl, M. Zetek, T. Bakša, T. Kroupa, The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts, *Procedia Engineering*. 100 (2015) 1405–1413.
84. O.L. Rodriguez, P.G. Allison, W.R. Whittington, H. El Kadiri, O.G. Rivera, M.E. Barkey, Strain rate effect on the tension and compression stress-state asymmetry for electron beam additive manufactured Ti6Al4V, *Materials Science and Engineering A*. 713 (2018) 125–133.
85. F. Sun, C. Lai, H. Fan, In-plane compression behavior and energy absorption of hierarchical triangular lattice structures, *Materials & Design*. 100 (2016) 280–290.
86. J. Huang, Q. Zhang, F. Scarpa, Y. Liu, J. Leng, In-plane elasticity of a novel auxetic honeycomb design, *Composites Part B: Engineering*. 110 (2017) 72–82.
87. D. Restrepo, N.D. Mankame, P.D. Zavattieri, Programmable materials based on periodic cellular solids. Part I: Experiments, *International Journal of Solids and Structures*. 100–101 (2016) 485–504.
88. L. Xiao, W. Song, C. Wang, H. Tang, Q. Fan, N. Liu, J. Wang, Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron titanium alloy lattice structure manufactured using electron beam melting under dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*. 100 (2017) 75–89.
89. T. Tancogne-Dejean, A.B. Spierings, D. Mohr, Additively manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading, *Acta Materialia*. 116 (2016) 14–28.
90. P. Mayer, D. Pyka, K. Jamroziak, J. Pach, M. Bocian, Experimental and Numerical Studies on Ballistic Laminates on the Polyethylene and Polypropylene Matrix, *Journal of Mechanics*. (2017) 1–11.
91. Štoller J, Dvorak P, Ultrasound Diagnosis of Protective Structures after Contact Explosion. In: *Transport Means 2014*. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, Lithuania, 2014, p. 264-267. ISSN 2351-4604
92. Zezulová E, Štoller J, Non-destructive Testing of Materials Used for Protective Structures Built from High Performance Fibre Reinforced Concrete after the Contact Explosion Loading. In: *11th European Conference on Non-Destructive Testing*

- (ECNDT 2014). Brno: Brno University of Technology FME, 2014, p. 1-12. ISBN 978-80-214-5018-9
93. Podymova, N., Karabutov, A., Cherepetskaya, E.: Laser optoacoustic method for quantitative nondestructive evaluation of the subsurface damage depth in ground silicon wafers. *Laser Physics*, Vol. 24, Issue 8, 2014.
94. Kravcov, A., Svoboda, P., Konvalinka, A., Cherepetskaya, E., Morozov, D., Shibaev, I.: Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiber-reinforced plastics. *Key Engineering Materials*, Vol. 722, pp. 267-272, 2017.
95. Devaux, D., Fabbro, R., Tollier, L., & Bartnicki, E. (1993). Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry. *Journal of Applied Physics*, 74(4), 2268-2273.
96. Karabutov, A., Podymova, N., Cherepetskaya, E.: Measuring the dependence of the local Young's modulus on the porosity of isotropic composite materials by a pulsed acoustic method using a laser source of ultrasound. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 54, Issue 3, pp. 500-507, 2013.
97. T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*. 143 (2018) 172–196. doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
98. N. Labonnote, A. Ronnquist, B. Manum, P. Rüther, Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities, *Automation in Construction*. 72 (2016) 347–366. doi:10.1016/j.autcon.2016.08.026.
99. M. Dawoud, I. Taha, S.J. Ebeid, Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques, *Journal of Manufacturing Processes*. 21 (2016) 39–45. doi:10.1016/j.jmapro.2015.11.002.
100. <https://www.sellier-bellot.cz/en/products/pistol-and-revolver-ammunition/pistol-and-revolver-cartridges/detail/289/>
101. Zhang, K., He, L., Peng, Q., Wu, C., & Chen, G. (2013). Adhesion behavior of thermal barrier coating on nickel alloy in the bullet shock testing. *Physics Procedia*, 50, 139-144.
102. Feldstein, M. M., Dormidontova, E. E., & Khokhlov, A. R. (2015). Pressure sensitive adhesives based on interpolymer complexes. *Progress in Polymer Science*, 42, 79-153.
103. Cognard, J., Some recent progress in adhesion technology and science. *Comptes Rendus Chimie*, 2006
104. Kadela M., Kluczyński J., Łasica W., Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Fibre-Reinforced Cement–Glass Composite. *Materials* 2021, 14(3), 637
105. Boyce, B. L., Chen, X., Hutinson, J. W., & Ritchie, R. O. The residual stress state due to a spherical hard-body impact. *Mechanics of Materials*, 33(8), 2001, 441-454.

106. Johnson, K. L., & Johnson, K. L. (1987). *Contact mechanics*. Cambridge university press.
107. Rouxel, T. (2015). Driving force for indentation cracking in glass: composition, pressure and temperature dependence. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373(2038), 20140140.
108. Hetherington, J., & Smith, P. (2014). *Blast and ballistic loading of structures*. CRC Press.
109. Mishra, R.S.; Mahoney, M.W., *Friction Stir Welding and Processing*; ASM International: Materials Park, OH, USA, 2007; ISBN 978-0-87170-840-3.
110. Rao, C.V., Reddy, G.M., Rao, K.S., Microstructure and pitting corrosion resistance of AA2219 Al-Cu alloy friction stir welds - Effect of tool profile. *Def. Technol.* 2015, 11, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2014.10.003>
111. Babu, S.; Elangovan, K.; Balasubramanian, V., Optimizing friction stir welding parameters to maximize tensile strength of AA2219 aluminium alloy joints. *Met. Mater. Int.* 2009, 15, 321-330. <https://doi.org/10.1007/s12540-009-0321-3>
112. Sabari, S.S.; Malarvizhi, S.; Balasubramanian, V., Characteristics of FSW and UWFSW joints of AA2519-T87 aluminium alloy: Effect of tool rotation speed. *J. Manuf. Process.* 2016, 22, 278-289. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.03.014>
113. Zhang, Z.; Xiao, B.L.; Ma, Z.Y., Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2219Al-T6 joints. *J. Mater. Sci.* 2012, 47, 4075-4086. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6261-1>
114. Liang, X.P.; Li, H.Z.; Li, Z.; Hong, T.; Ma, B.; Liu, S.D.; Liu, Y., Study on the microstructure in a friction stir welded 2519-T87 Al alloy. *Mater. Des.* 2012, 35, 603-608. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.009>
115. Fisher, J., James, J., Aluminum alloy 2519 in military vehicles. *Mater. Sci. Forum* 2002, 160, 43-46.
116. Wu, Y.P., Ye, L.Y., Jia, Y., Liu, L., Zhang, X.M., Precipitation kinetics of 2519A aluminum alloy based on aging curves and DSC analysis. *Trans. Nonferrous Metal. Soc. China* 2014, 24, 3076-3083. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63445-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63445-2)
117. Schaer, G.B., Sercombe, T.B., Lumley, R.N., Liquid phase sintering of aluminium alloys. *Mater. Chem. Phys.* 2001, 67, 85-91. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00424-7](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00424-7)
118. Stoichev, N.V., Yaneva, S.B., Regel, L.L., Videnskiy, I.V., Eutectic solidification of Al-Cu alloys influenced by convection. *Adv. Space Res.* 1998, 8, 171-174. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(88\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0273-1177(88)90020-8)
119. Gündüz, M.; Çadirli, E., Directional solidification of aluminium-copper alloys. *Mater. Sci. Eng. A Struct.* 2002, 327, 167-185. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01649-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01649-5)
120. Xu, W.F.; Liu, J.H.; Chen, D.L.; Luan, G.H., Low-cycle fatigue of a friction stir welded 2219-T62 aluminium alloy at different welding parameters and cooling

- conditions. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, 74, 209-218.
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5988-z>
121. Kosturek, R.; Śnieżek, L.; Wachowski, M.; Torzewski, J., The Influence of Post-Weld Heat Treatment on the Microstructure and Fatigue Properties of Sc-Modified AA2519 Friction Stir-Welded Joint. *Materials* 2019, 12, 583.
<https://doi.org/10.3390/ma12040583>
122. Kosturek, R.; Śnieżek, L.; Wachowski, M.; Torzewski, J., Research on the Friction Stir Welding of Sc-Modified AA2519 Extrusion. *Metals* 2019, 9, 1024.
<https://doi.org/10.3390/met9101024>
123. Stoller, J., Zezulova, E., Use of ultrasound-The ultrasonic pulse velocity method for the diagnosis of protective structures after the load of TNT explosion, pp. 230-235 in *ICMT 2017 - 6th International Conference on Military Technologies*.
<https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2017.7988761>
124. Svoboda, P., Kravcov, A., Pospichal, V., Morozov, N., Zezulova, E., Quality assessment of bored pile foundations by a set of non-destructive testing methods, *ICMT 2019 - International Conference on Military Technologies 2019*. Brno
<https://doi.org/10.1109/MILTECHS.2019.8870062>
125. J. Kluczyński, L. Śnieżek, A. Kravcov, K. Grzelak, P. Svoboda, I. Szachogluchowicz, O. Franek, N. Morozov, J. Torzewski, P. Kubeček, The Examination of Restrained Joints Created in the Process of Multi-Material FFF Additive Manufacturing Technology, *Materials* 2020, 13(4), 903;
<https://doi.org/10.3390/ma13040903>
126. Štoller J., Dvorak P., Ultrasound Diagnosis of Protective Structures after Contact Explosion. In: *Transport Means 2014*. Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, Lithuania, 2014, p. 264-267. ISSN 2351-4604
127. Quintero R., Simonetti F., Sellinger A., Noncontact laser ultrasonic inspection of Ceramic Matrix Composites (CMCs), *NDT & E International* 88, 8-16, 2017
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.02.008>

