



Optimalizace metodiky bodového nanášení rastru pro deformační analýzy

Diplomová práce

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Alfred Ducháč

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.

Katedra materiálu

Konzultant práce:

Ing. Ondřej Seibert

Katedra chemie





Zadání diplomové práce

Optimalizace metodiky bodového nanášení rastru pro deformační analýzy

Jméno a příjmení: **Bc. Alfred Ducháč**
Osobní číslo: S20000210
Studijní program: N0715A270015 Materiály a technologie
Zadávací katedra: Katedra materiálu
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na téma: materiály využívané pro výrobu karoserií osobních automobilů; povrchová ochrana karosářských plechu; deformační analýzy; metody nanášení sítí pro deformační analýzy.
2. Připravte testovací vzorky, realizujte deformační testy a analyzujte výsledky.
3. Vyhodnoťte výsledky a stanovte závěry.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

50-70 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. FRĄCZ, Wiesław, Feliks STACHOWICZ a Tomasz PIEJA. ASPECTS OF VERIFICATION AND OPTIMIZATION OF SHEET METAL NUMERICAL SIMULATIONS PROCESS USING THE PHOTOGRAMMETRIC SYSTEM. *Acta Metallurgica Slovaca* [online]. 2013, 19(1), 51-59. ISSN 1338-1156.
2. STOUDT, M a J HUBBARD. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet. *Acta Materialia* [online]. 2005, 53(16), 4293-4304. ISSN 13596454.
3. EVIN, Emil a Miroslav TOMÁŠ. Comparison of Deformation Properties of Steel Sheets for Car Body Parts. *Procedia Engineering* [online]. 2012, 48, 115-122
4. KOLNEROVÁ, Michaela, Jiří SOBOTKA a Pavel SOLFRONK. Adhesive Bonding Joints of Coating with Zn/Mg Layer on Sheets for Car-Body Panels at Temperature Loading. *Key Engineering Materials* [online]. 2015, 669, 167-175 . ISSN 1662-9795. ISSN 18777058.

Vedoucí práce: Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.
Katedra materiálu

Konzultant práce: Ing. Ondřej Seibert
Katedra chemie

Datum zadání práce: 13. října 2021
Předpokládaný termín odevzdání: 3. února 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

prof. Ing. Petr Louda, CSc.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

19. května 2022

Bc. Alfred Ducháč

Anotace

Vysoká škola: Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra: Katedra materiálů
Vedoucí katedry: doc. Ing. Adam Hotař, Ph.D.

Téma diplomové práce: Optimalizace nanášení bodového rastru pro deformační analýzu
Akademický rok: 2021 / 2022
Autor: Bc. Alfred Ducháč
Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.

Klíčová slova: Deformační analýza, Žárově pozinkované plechy, Nanášení bodového rastru, Analýza mikrostruktury.

Abstrakt:

Deformační analýza plechových výlisků pomáhá zmapovat rozložení deformačních zón při lisování v problematických oblastech karoserie. To pomáhá řešit výrobní problémy v lisovně a předcházet jim. Tato práce je zaměřena na optimalizaci procesu bodového nanášení rastru na žárově pozinkované plechy pro deformační analýzy. Získaná data jsou vyhodnocena pomocí systému GOM Argus. Jsou porovnávány dvě technologie nanášení rastru, a to elektrochemická a laserová. Realizované deformační analýzy prokázaly závislost naměřených hodnot na metodě nanášení bodového rastru. Analýza mikrostruktury pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu ukazuje, že vliv nastavení laseru na materiál je ve srovnání s elektrochemickým leptáním výrazně vyšší. Při depozici rastru pomocí laseru se projevuje tepelné ovlivnění základního materiálu a vznik povrchových trhlin, které při následném tváření působí jakožto koncentrátoři napětí a negativně tak ovlivňují deformační charakteristiky materiálu. Obě technologie depozice a různá nastavení zvolených parametrů laseru jsou metalograficky porovnány s využitím světelné optické mikroskopie, rastrovací elektronové mikroskopie, energeticko-disperzní analýzy a difrakce zpětně odražených elektronů.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 69
Počet obrázků: 52
Počet tabulek: 16
Počet grafů: 2

Annotation

University: Technical University in Liberec
Faculty of Mechanical Engineering
Department: Department of Material
Head of the Department: doc. Ing. Adam Hotař, Ph.D.

Theme of work: Optimization of point grid deposition for
deformation analysis
Academic year: 2021 / 2022
Author: Bc. Alfred Ducháč
Supervisor: Ing. Pavel Kejzlar, Ph.D.

Keywords: Deformation analyses,
Hot-dip galvanized metal sheets,
Point pattern deposition, Microstructure analysis.

Abstract:

Deformation analysis of sheet metal parts helps to map the distribution of deformation zones during pressing in problematic areas of the car structure. This helps to solve and prevent manufacturing problems at the press shop. This work is focused on optimizing the process of point raster deposition on hot dip galvanized sheet metal for deformation analysis. The data obtained are evaluated by using the GOM Argus system. Two raster deposition technologies, namely electrochemical and laser, are compared. The deformation analyses performed have shown the dependence of the measured values on the point grid deposition method. The microstructure analysis using a scanning electron microscope shows that the effect of the laser setting on the material is significantly higher compared to electrochemical etching. During the deposition of the raster by laser, the thermal effect on the base material and the formation of surface cracks, which act as stress concentrators during subsequent forming, negatively affect the deformation characteristics of the material. The two deposition technologies and the different settings of the selected laser parameters are metallographically compared using light optical microscopy, scanning electron microscopy, energy-dispersive spectroscopy and backscattered electron diffraction.

Volume of work:

Number of pages: 69
Number of pictures: 52
Number of tables: 16
Number of graphs: 2

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Pavlu Kejzlarovi, Ph.D za odborné vedení této práce, trpělivost a cenné připomínky při jejím řešení. Dále bych rád poděkoval pánům Ing. Vojtěchovi Lichorobiecovi, Ing. Milanu Dvořákovi a celému oddělení Technického servisu lisoven a svařoven za cenné rady a připomínky z praxe.

Poděkování také patří mé rodině za jejich podporu a poskytnuté zázemí, které mi věnovali po dobu mého studia.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1. Úvod	11
2. Teoretická část	12
2.1. Materiály používané v automobilovém průmyslu	12
2.1.1. IF oceli (Interstitial free steel)	13
2.1.2. Žárově pozinkované plechy	13
2.1.3. Elektrolyticky pozinkované plechy	14
2.2. Technologie tváření plechových dílů	15
2.3. Metody hodnocení plechů	15
2.3.1. Argus	16
2.3.2. Měrné sítě	16
2.4. Metody depozice rastru	19
2.4.1. Základy laserového nanášení rastru	19
2.4.2. Základy elektrochemického leptání	20
3. Popis experimentu	21
3.1. Volba materiálu	21
3.2. Ladění parametrů laseru pro fotogrammetrické vyhodnocování deformace.	22
3.3. Výběr parametrů	23
3.3.1. Elektrochemické leptání	23
3.3.2. Laser	23
3.4. Značení vzorků	24
3.5. Příprava na metalografii	35
3.6. Zařízení na hodnocení	36
4. Výsledky	37

4.1.	Deformační analýza GOM Argus	37
4.2.	Hodnocení morfologie rastru	43
4.2.1.	Vizuální hodnocení rastru	43
4.3.	Vizuální hodnocení vzorků pro metalografii	43
4.4.	Hodnocení morfologie povrchu	48
4.5.	Metalografické hodnocení výbrusu	53
4.6.	Tribologické hodnocení materiálu	58
5.	Diskuse	59
6.	Závěr	62
7.	Bibliografie	63
8.	Seznam obrázků	67
9.	Seznam tabulek	69
10.	Seznam grafů	69

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam EN	Význam CZE	Jednotky
ML	Marking Voltage	Napětí značení	[V]
MZ	Marking time	Čas značení	[s]
HDG	Hot-dip galvanization	Žárové zinkování	[-]
EG	Electro Galvanization	Elektrické zinkování	[-]
Wt%	Weight percent	Hmotnostní procenta	[%]
At%	Atomic percent	Atomové procenta	[%]
SEM	Scanning electron microscope	Skenovací elektronový mikroskop	[-]
SE	Secondary electron	Sekundární elektrony	[-]
BSE	Backscattered electron	Zpětně odražené elektrony	[-]
EHT	Electron high tension	Urychlovací napětí	[V]
WD	Work distance	Pracovní vzdálenost	[mm]
Mag.	Magnification	Zvětšení	[x]
EDS	Energy-dispersive spectroscopy	Energiově-disperzní spektroskopie	[-]
EBSD	Electron backscatter diffraction	Difrakce zpětně odražených elektronů	[-]

1. Úvod

Automobily se staly prostředkem každodenní potřeby. Vzhledem k masovému využívání se zde střetávají vysoké legislativní nároky na snížení ekologické zátěže a současně zvýšení bezpečnosti posádky, i chodců. Jsou využívány nové pevnější a tvárnější materiály. Úspora hmotnosti je z mnoha možností vedoucím k úspoře paliva. Pokročilé výpočetní programy umožňují přesnější navrhování všech součástí, díly jsou navrhovány tak aby byla lépe využita jejich pevnost. Stálé snižování tloušťky materiálu při současných požadavcích na design vede k technologickým problémům při lisování.

Při analyzování problémů ve výrobě se používá od standardních normovaných mechanických zkoušek, přes metalografii, až po nedestruktivní optické 3D měřicí systémy. Jedním z těchto 3D optických měřicích systémů je GOM Argus od firmy Zeiss, který se používá pro deformační analýzu plechových výlisků po procesu tváření. Pomocí sledování bodového rastru, který je nanesen na nástřihu, lze analyzovat jednotlivé operace samotného procesu tváření materiálu.

Se vzrůstajícími nároky jak na výrobu, materiál, tak na ochranu nejen zaměstnance, ale i životního prostředí. Jsem se začal zabývat myšlenkou nahrazení starší technologie depozice rastru pomocí elektrochemického leptání deformačních sítí za Laserovou technologii. Nahrazením staré technologie za technologii v této oblasti zatím nepoužívanou (depozice laserem) se eliminuje respirace výparů vznikajících při elektrochemického leptání, sníží se potřebný čas na nanesení deformačních sítí a částečně se automatizuje celý tento proces. Tím vším se sníží náklady jak za spotřebním materiál, tak i výdaje za samotné negativy sítí které se postupným používáním propalují a jinak degradují [1-2].

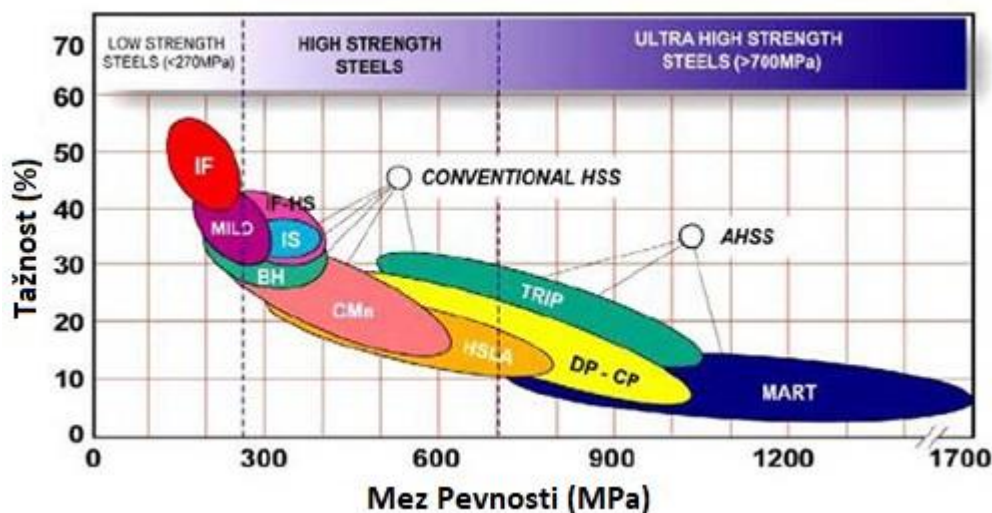
Cílem této diplomové práce je najít vhodné parametry nastavení laseru pro nahrazení starší technologie elektrochemického leptání, ověřit správnost výsledků a prohloubit znalosti jak požadavků na laserovaný rastr ze strany optického měřicího systému, tak i souvislostí s ovlivněním samotného materiálu vlivem nové technologie.

2. Teoretická část

2.1. Materiály používané v automobilovém průmyslu

Na materiál používaný v automobilovém průmyslu je vyvíjen stále větší tlak. Stoupají nároky na strukturální tuhost karoserie, ekologii, hmotnost automobilů klade důraz na jakost materiálu a tím i na mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů používaných při stavbě automobilu.

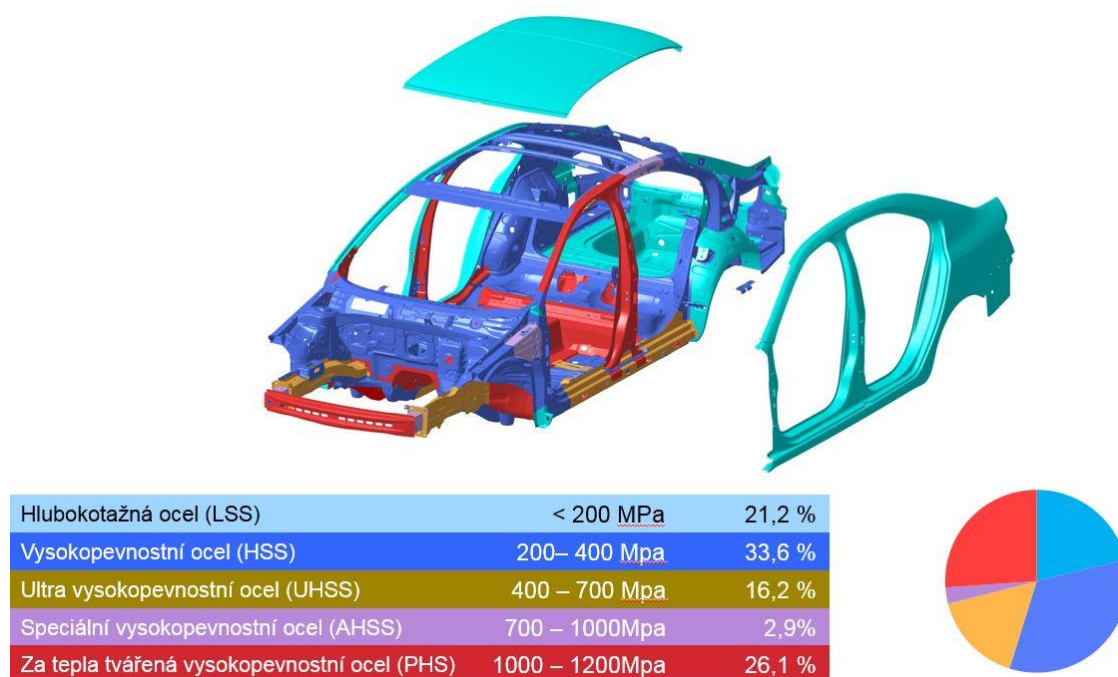
Ještě v 90. letech 20. století se v automobilovém průmyslu ve velké míře používaly plechy válcované za studena z hlubokotažné oceli (CR – Cold Rolled) v Čechách známé spíše jako černý plech. Z důvodu větší tloušťky se používají plechy válcované za tepla (HR – Hot Rolled). Od 21. století se v Evropě začaly používat hlubokotažné oceli s antikorozií upravou na bázi zinku, a to žárově nanesený zinek, nebo elektrochemicky nanesený zinek. Se vzrůstajícími požadavky na materiál se v dnešní době používají převážně progresivní materiály. Progresivní materiály můžeme rozdělit do dvou základních skupin. První skupina jsou měkké oceli s řízenou mezí kluzu. Do této skupiny patří: IF (Interstitial Free), IF HSS (Interstitial Free High Strength Steel) a BH (Bake Hardenability) oceli. Druhou skupinou jsou vysokopevnostní materiály, a to jmenovitě TRIP (Transformation Induced Plasticity), DP (Dual Phase), CP (Complex Phase) oceli. V této práci se budu zabývat jen IF ocelmi. [2-4, 6]



Obr. 1: Rozdělení ocelí dle mechanických vlastností [5]

2.1.1. IF oceli (Interstitial free steel)

IF oceli známé též jako hlubokotažné oceli (LSS) jsou nízkouhlíkové oceli mikrolegované titanem (Ti) nebo niobem (Nb). Tyto oceli jsou typické svým velmi nízkým obsahem intersticiálně rozpuštěného uhlíku (c) a dusíku (N). Pro úplné vyčištění feritu od těchto prvků se používají karbonitridační stabilizátory. Snížení obsahu uhlíku (C) a dusíku (N) v tuhém roztoku vede ke zvýšení hlubokotažných vlastností materiálu a zároveň ke vzniku karbidů, nitridů či karbonitridů $Ti(C,N)$ nebo $Nb(C,N)$. Tvorba karbonitridů zvyšuje pevnost a zachovává dobrou plastičnost. [1-5, 7-8]



Obr. 2: Grafické znázornění aplikace moderních materiálu na automobilové karoserii [9]

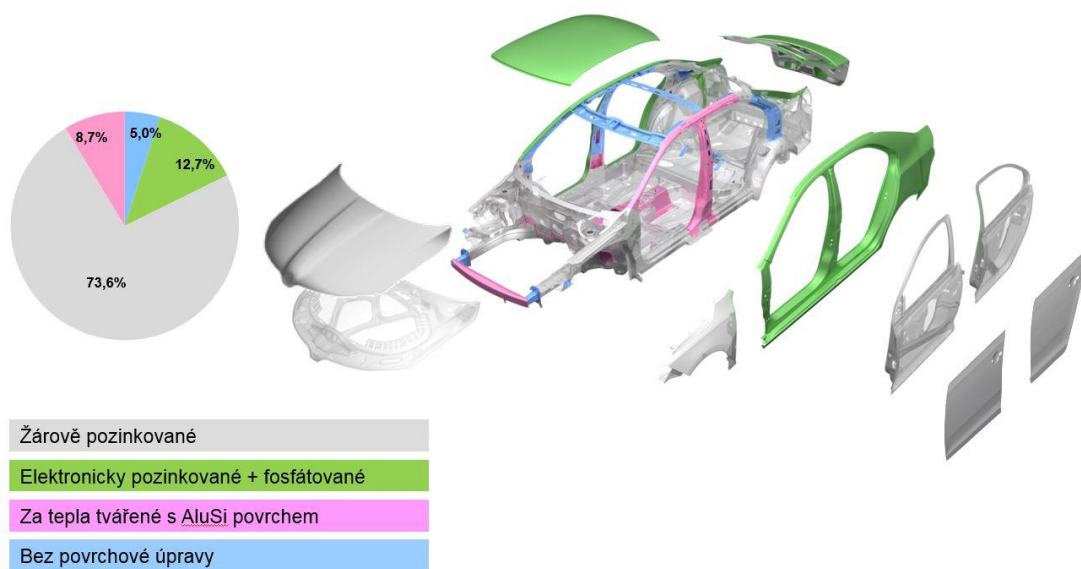
2.1.2. Žárově pozinkované plechy

Žárově pozinkované plechy (HDG) se řídí normou ČSN EN 10346 [16]. Jedná se o plechy válcované za studena s naneseným žárovým zinkem. Žárově zinkované plechy mají potlačený zinkový květ s důrazem na vysokou kvalitu povrchu z důvodu pohledových nároků [1, 10]

Příklad značení HDG ocelí: DX57D+Z100-M-B-O

Symbol	Význam
DX / HX	Nízkokouhlíková / vysokopevnostní ocel
51–57	Klasifikace oceli dle normy
D	Určený k žárovému zinkování
Z	Žárově zinkováno
100	množství vyloučeného zinku na povrchu plechu v $g \cdot m^{-2}$
M	Minimalizace zinkového květu
B	Střední jakost povrchu
O	Konzervace olejem

Tab. 1: Značení HDG ocelí dle normy DIN EN 10346 [11]



Obr. 3: Používané povrchové úpravy na automobilu [9]

2.1.3. Elektrolyticky pozinkované plechy

Elektrolyticky pozinkované plechy (EG) se řídí normou ČSN EN 10152 [12]. Jedná se o plechy válcované za studena elektrolyticky pozinkovaný s fosfátovou vrstvou pro zakonzervování a zvýšení odolnosti zinkové vrstvy.[1]

Symbol	Význam
DC	Ocel za studena válcovaná
01–06	Klasifikace oceli dle normy
ZE	Elektrolyticky nanesený zinek
50/50	Tloušťka naneseného zinku na obou stranách plechu (5 µm)
B	Nejvyšší kvalita povrchu
P	Fosfátování
O	Konzervace olejem

Tab. 2: Značení EG ocelí dle normy DIN EN 10152 [12]

2.2. Technologie tváření plechových dílů

Lisování plechu je v dnešní době jedna z nejpoužívanějších technologií pro výrobu kovových součástí. Základem technologie tváření jsou velké plastické deformace vyvolané působením vnějších sil tvářecího stroje a nástroje. Jedná se o trvalou změnu tvaru a rozměru tělesa, způsobenou pohybem dislokací nejčastěji skluzem, odehrávající se pod rekrystalizační teplotou materiálu. Technologickou tvařitelnost materiálu ovlivňují: chemické složení materiálu, vnitřní struktura materiálu, rychlost deformace, teplota, napěťové stavy, geometrie výlisku a v poslední řadě vlivy vnějšího prostředí. Stejně jako u ostatních výrobních technologií a materiálů rostou i nároky na samotné lisování. Je snaha zrychlit a zefektivnit výrobu se zachováním kvalitativních a kvantitativních požadavků. To vše společně s designem zvyšuje zmetkovitost a finanční náročnost pro podnik. Z těchto důvodů se ve značné míře investuje do měřících a stimulačních prostředků. [1, 13-16]

2.3. Metody hodnocení plechů

Pro lepší pochopení problémů během lisování slouží v první řadě normované zkoušky předepsané normou DIN EN 10152 [12] a DIN EN 10346 [11]. Jedná se primárně o mechanické zkoušky jednoosým tahem dle ČSN EN ISO 6892-1 [17] a analýzy chemického složení. Tyto normou předepsané zkoušky neposkytují komplexní představu o materiálu a jeho vlastnostech, natož chování během lisování. Říkají nám pouze informaci, zda dodávaný materiál splňuje daná specifika a zda lze reklamovat. Jednou z možností prohloubení znalostí chování materiálu při lisování jsou optické měřící systémy GOM od firmy ZEISS [18].

2.3.1. Argus

Argus je bezkontaktní optický měřicí systém, určený pro 3D měření a analýzu deformací plechových výlisků po procesu plošného tváření. Jedná se o jeden z nejlepších a nejmodernějších nástrojů pro deformační analýzu. Měření probíhá na základě fotogrammetrické metody, kdy pomocí certifikované ruční kamery s vysokým rozlišením jsou nasnímány 2D souřadnice všech bodů a následně matematicky přepočítány na 3D souřadnice. Výsledkem je 3D mračno bodů, které reprezentuje povrch plechové součásti. Vyhodnocením relativní vzdálenosti mezi body měrné sítě s výpočtem lokálního rovinného napětí se určí deformace na celém povrchu součásti.

Výsledkem měření jsou komplexní informace o hlavní a vedlejší deformaci, směru deformace, ztenčení materiálu, tvorba FLD diagramů, ověření tvařitelnosti a ověření a optimalizaci numerických simulací. [18-19]

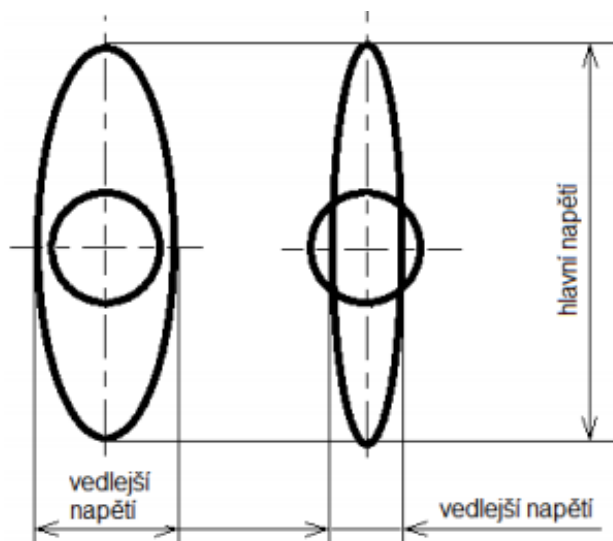


Obr. 4: Ilustrace měření výlisku ruční kamerou [18]

2.3.2. Měrné sítě

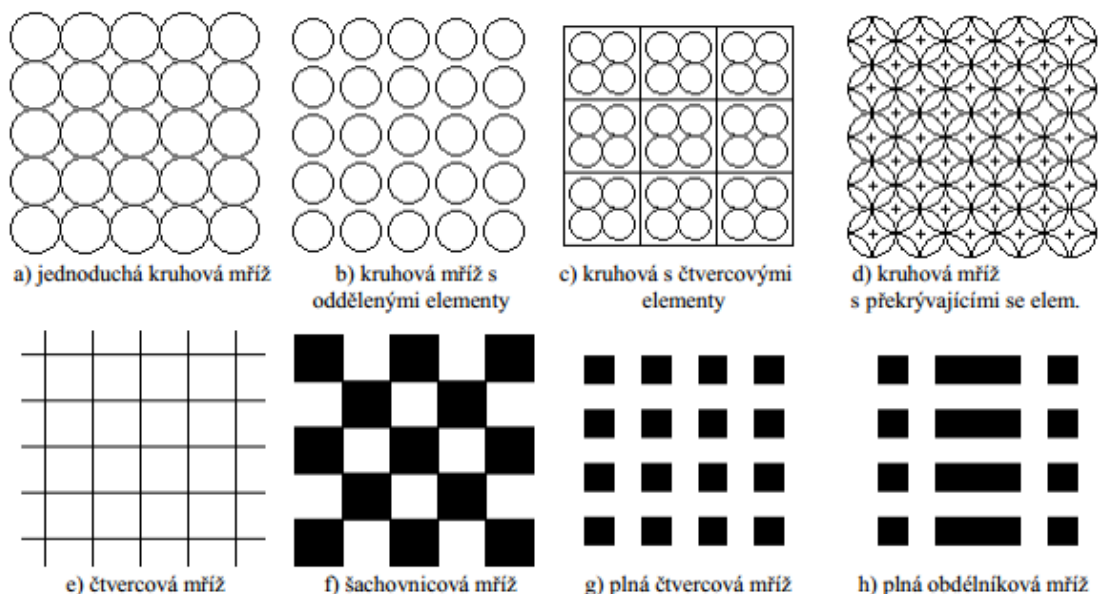
Deformační sítě se používají pro určování plastických deformací výlisků. Kde vyhodnotí velikost a směru deformace výlisku při plošném tváření. Na nástřih se nanese měrná síť a následně je materiál zdeformován lisováním podroben deformaci způsobenou lisováním. V průběhu lisování vzniká víceosá napjatost, která se rozkládá na hlavní napětí (větší) a vedlejší napětí (menší). [20, 21]

Hlavní napětí je z většiny případů tahového původu, a je způsobeno tečením materiálu v raznici. Tvar bodu vedlejšího napětí pak určuje, zda se jedná o tlakové nebo tahové. Pokud změna šířky bodu je větší, než průměr bodu před deformací tak se jedná o vedlejší tahové napětí, ale pokud je užší tak se jedná o tlakové napětí viz obrázek 5. [21]

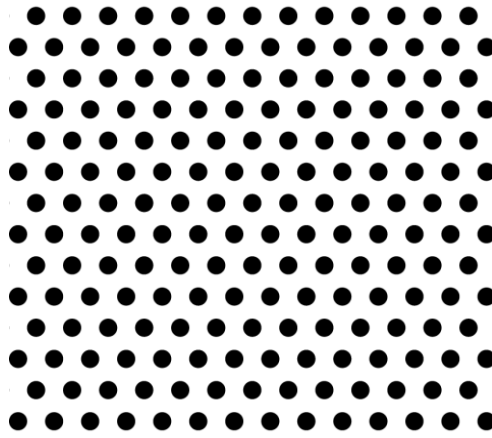


Obr. 5: Ilustrace změny kruhových bodů v závislosti na deformaci [21]

Existuje mnoho různých deformačních sítí od kruhových až po obdélníkovou (Obrázek 6). Parametry sítě (průměr a hustota bodů) se liší podle velikosti součásti, přesnosti nebo použité technologie nanášení. Systém GOM Argus používá šestiúhelníkovou bodovou mříž s oddělenými elementy (obrázek 7), proto pozornost bude věnována této síti. [22-23]



Obr. 6: Příklad používaných deformačních sítí [21]



Obr. 7: Deformační síť používaná systémem GOM Argus

Nároky na deformační síť: [22, 24]

1. Co nejmenší ovlivnění třecích podmínek mezi materiálem a nástrojem.
2. Nesmí narušit základní materiál do takové míry, aby se projevil vrubový účinek, aby neovlivňoval výsledek měření.
3. Schopnost snášet velké plastické deformace bez porušení a ovlivnění výsledků.
4. Odolnost proti otěru
5. Odolnost proti procesním kapalinám
6. Rozměrová a tvarová přesnost na základě volby parametrů
7. Jednoduchá aplikace, malá pracnost a opakovatelnost.
8. Univerzálnost – Široká škála použitelnosti.

Metody nanášení rastru: [22, 25]

1. Sítotisk
2. Elektrochemické leptání
3. Fotochemické leptání
4. Laserování
5. Ofsetový tisk
6. Gumostereotypie
7. Ryté
8. Vyjiskřování

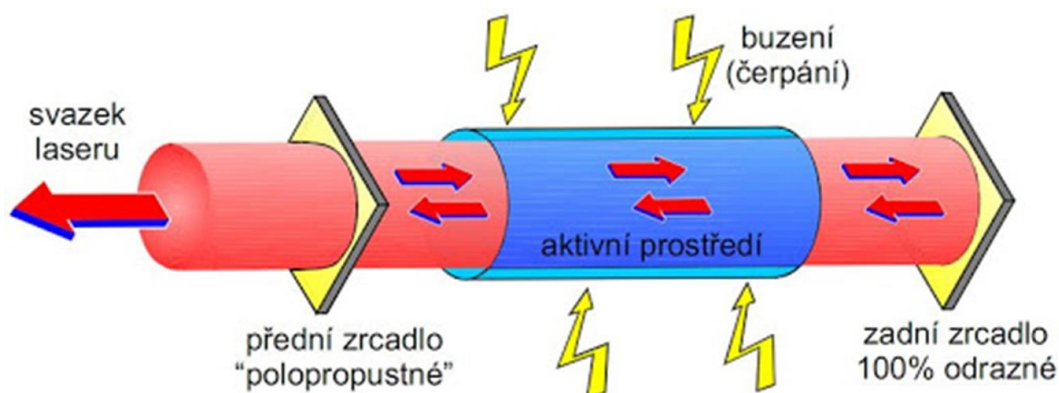
Ani jedna metoda, kterou zvolíme pro depozici deformačních sítí, není univerzální a některé technologie jsou dokonce i zastaralé a nepoužívají se. Každá z výše zmíněných metod nám lépe či hůře splňuje požadavky na deformační sítě. Proto volba metody depozice musí být vždy navržena s ohledem na danou aplikaci. V této diplomové práci se zaměříme na elektrochemické leptání a nanášení rastru laserem. [21-22, 24]

2.4. Metody depozice rastru

2.4.1. Základy laserového nanášení rastru

Laser neboli (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je zdroj vysoce uspořádaného elektromagnetického záření nejčastěji ve viditelné, ultrafialové nebo infračervené oblasti barevného spektra, která vzniká díky stimulované emisi záření aktivních částic (atomů, molekul, iontů, elektronů) buzených vnějším zdrojem energie.

Je založen na principu vynucené emise záření. Zdrojem energie aktivního prostředí nejprve vybudíme elektrony na horní energetickou hladinu, kde se však dlouho neudrží a přeskočí zpět na nižší hladinu, jelikož je pro elektron energeticky výhodnější. Díky tomuto přeskočení dojde k vyzáření energie ve formě fotonu. Tyto vyzářené fotony reagují s dalšími fotony a v důsledku toho vzniká stimulovaná emise fotonů. Tato stimulovaná emise se odráží od polopropustných zrcadel do té doby, dokud celková intenzita světla překročí určitou mez. Jakmile překročí onu mez, pronikne polopropustným zrcadlem a uvolní tak světelný impuls tzv. laserový paprsek. Vyzářený laserový paprsek je monochromatické záření. [26–27]



Obr. 8: Základní princip laseru [28]

Lasery se dělí do čtyř základních skupin, a to podle vlnové délky, aktivního prostředí, počtu hladin, druhu excitací nebo podle časového režimu. Do skupiny podle vlnové délky spadá: infračervené, v oblasti viditelného světla, ultrafialové, rentgenové lasery. Do skupiny podle aktivního prostředí: pevnolátkové, polovodičové, plynové, kapalinové, plazmové a s volnými elektrony. Dále podle počtu hladin řadíme: dvou hladinové, tři hladinové nebo více hladinové. Podle druhu excitace lasery dělíme na excitované: optickým zářením, elektrickým polem, elektronovým svazkem a chemickou reakcí. A do posledního dělení podle časového režimu patří: kontinuální, pulzní a kvazikontinuální. [26, 28]

V této diplomové práci byl využit tříosý hybridní popisovací laser Keyence MD-X1520C. Jedná se o pevnolátkový Nd:YVO₄ laser s jmenovitým výkonem 25 W, vlnovou délkou 1064 nm, průměru svazku 80 μm a popisovacím polem 330 × 330 mm. [29]

2.4.2. Základy elektrochemického leptání

Elektrochemické leptání je dnes jedna z nejpoužívanějších metod, funguje na bázi elektrolyzy, při kterém dochází k rozkladu roztoku elektrolytu procházejícím stejnosměrným nebo střídavým elektrickým proudem. Proud je do roztoku zaváděn pomocí dvojice elektrod. Při průchodu proudu na elektrodách dochází k oxidačně redukčním neboli redoxním reakcím. Na anodě dochází k oxidaci, zatímco na katodě dochází k redukci. V roztoku elektrolytu v důsledku přitažlivosti opačných elektrických nábojů putují ke katodě oxidované kationty, k anodě redukované anionty.[30]

Pro elektrochemické leptání pozinkovaných plechů se používá katodické leptání, kde je vzorek připojen do obvodu střídavého proudu. Střídavý proud se používá pro materiály s vysokou korozní odolností. V závislosti na leptaném materiálu volíme napětí a elektrolyt. Pro zinkové povlaky dle výrobce volíme proud kolem 8 V a elektrolyt na bázi 5% fosforečnanu sodného (Na₃PO₄) [31, 32]. Pro vytvoření měrné sítě má přikládáný negativ proměnlivou tloušťku průřezu z důvodu, aby docházelo k řízenému leptání díky snížení proudové hustoty ve slabších místech průřezu sítě. [33]



Obr. 9: Ilustrační obrázek nanášení elektrochemicky leptané sítě. [18]

3. Popis experimentu

Praktická část diplomové práce je zaměřena na optimalizaci parametrů laserového nanášení rastru na žárově zinkovaný materiál, kde jednotlivé parametry nastavení, konkrétně rychlost posuvu a frekvenci pulzu, jsou porovnávány s elektrochemickou depozicí. V jednotlivých kapitolách se budeme věnovat do hloubky jednotlivým testům, od výběru materiálu přes hledání parametrů nastavení laseru pro fotogrammetrii až po metalografii a hodnocení povrchu, kde budu zkoumat, jak ovlivňují jednotlivé technologie nanášení rastru povrchovou vrstvou zinkového povlaku, popřípadě tepelné ovlivnění základního materiálu a změny v jeho struktuře.

3.1. Volba materiálu

Pro jednotlivé testy v praktické části diplomové práce jsem zvolil vysokopevnostní hlubokotažný materiál s žárově pozinkovaným povrchem. Dle normy DIN EN 10346 [11] se jedná o materiál s označením HX180YD+Z100-M-B-O.

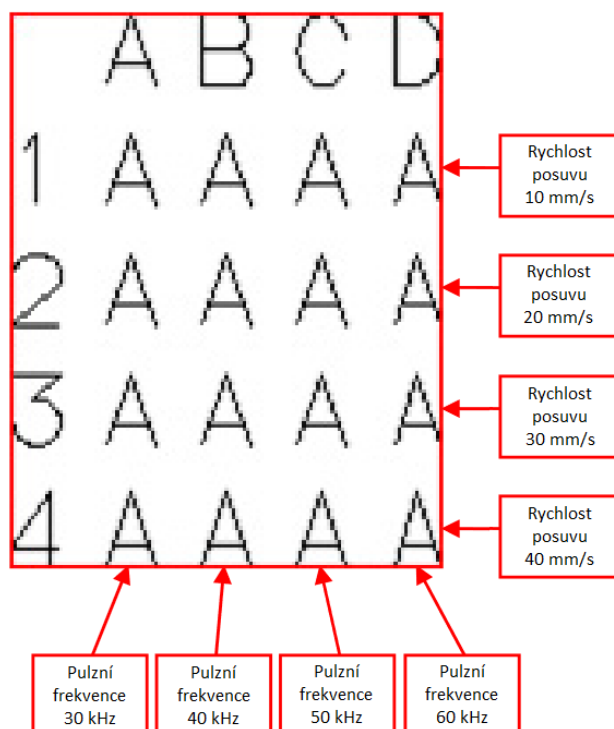
Povlak z čistého žárového zinku je jeden z nejpoužívanějších v automobilovém průmyslu a zároveň u tohoto typu povlaku je problematictější odladit parametry nastavení laseru než u zbylých povlaků používaných ve výrobě. Z důvodu poměrně vysokého lesku povrchu materiálu, který funguje jako zrcadlo, povlaky z žárového zinku nepříznivě ovlivňují samotné laserování rastru pro deformační analýzu systému GOM Argus. Oproti

materiálům, jako je takzvaný černý plech nebo elektrolyticky pozinkovaný plech, dochází k výrazně vyššímu odražení laserového paprsku, a to má za následek snížení celkové energie paprsku a obecně ke snížení celkového výkonu laseru na dopadovou plochu.

Vybraný materiál bylo nutné zmenšit na rozměry 335×430 mm z důvodu maximálních dovolených rozměrů nástřihu pro raznici zkušebního lisu, pro simulaci reálných podmínek v průběhu hlubokého tažení.

3.2.Ladění parametrů laseru pro fotogrammetrické vyhodnocování deformace.

Při optimalizaci parametrů nastavení laseru jsem vycházel z klasické porovnávací metody, kdy jsem srovnával obě technologie mezi sebou. První porovnávání probíhalo vizuální formou tak, aby barva jednotlivých bodů byla co nejbližší elektrochemickému leptání. Z tohoto důvodu jsem si udělal testovací matice 10×10 (viz obrázek 10) s různými hodnotami nastavení laseru tak, aby pokryly celý pracovní rozsah laseru. Z jednotlivých matic jsem následně hledal optimální kontrast bodu odpovídající elektrochemicky leptané síti. Pro strojové rozpoznávání bodů je třeba docílit vysokého kontrastu bodu vůči okolí, v našem případě tmavé body na světlém pozadí. Po porovnání matic a výběru vhodných odstínů jsem si zaznamenal rozsahy nastavení pro následné testování.



Obr. 10: Ukázka rozložení testovacího rastru [34]

Dalším krokem bylo porovnání výlisků s jednotlivými nastaveními pomocí programu GOM Argus 2020. Hodnotícím kritériem byla strojová čitelnost laserovaných bodů, dále pak naměřená hodnota ztenčení materiálu po deformaci.

Posledním krokem bylo studium materiálového ovlivnění souvisejícího s jednotlivými technologiemi pomocí skenovacího elektronového mikroskopu s mikroanalýzou.

3.3. Výběr parametrů

3.3.1. Elektrochemické leptání

Jako referenční vzorek byl zvolen rastr deponovaný stávajícími technologiemi elektrochemického leptání. Zvolil jsem si běžně používané a odzkoušené nastavení, a to napětí značení (ML) = 12,0 Voltů a čas značení (MZ) = 5,0 sekund [32] s elektrolytem na bázi 5% fosforečnanu sodného (Na_3PO_4) [31]. Rastr jsem nanasl na materiál odmaštěný pomocí přípravku “Technosol” [35] po dobu 10 minut tak, aby bylo viditelné “černé zbarvení” bodů.

3.3.2. Laser

Pro laserem nanášený rastr jsem se rozhodl udělat menší rozstup mezi jednotlivými nastaveními laseru tak, aby lépe pokrylo celý rozsah nastavení popsany v kap. 3.2. Do samotného nastavení procesu laserového značení vstupuje velké množství proměnných. U použitého laseru od společnosti Keyence je to až 24 parametrů, od samotného výkonu, přes rychlost posuvu, frekvenci pulzu, až po nastavení kvality a počtu přejetí. V této práci se primárně zaměřím na změnu pouze dvou parametrů, rychlosti posuvu a pulzní frekvence. Dle mého zjištění se tyto parametry ukázaly jako veličiny významně ovlivňující celkový čas laserového nanášení rastru.

3.4.Značení vzorků

Z důvodu velkého počtu vzorků jsem jednotlivé vzorky začal značit jako *LAXX/YY*, kde *XX* značí rychlost posuvu a *YY* pulzní frekvenci. Obě tyto hodnoty jsou děleny 10 z důvodu snazší orientace. Pro představu uvedu příklad LA40/3: LA = laserovaný rastr, rychlost posuvu laseru 400 mm/s a frekvence pulzu 30 kHz. Pracovní rozsah pro jednotlivé varianty jsem si stanovil: rychlost posuvu od 400 mm/s do 1400 mm/s; frekvence pulzů od 30 kHz do 130 kHz. Kompletní přehled nastavení je uveden v tabulkách 3-7.

Nové značení	LA40 /3	LA50 /3	LA60 /3	LA70 /3	LA80 /3	LA90 /3	LA10 0/3	LA11 0/3	LA12 0/3	LA13 0/3	LA14 0/3
Značení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Marking parameters											
Laser power (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Scan Speed (mm/s)	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Pulse Frequency (kHz)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Spot Variable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Repetition	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fill											
Type	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill
Pattern	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant
Direction	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L
Fill Angel (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fill interval	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Nudge Marking Quality											
Quality Level	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Jump Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Time											

Real Time 300x300 (s)	948,80	782,67	668,86	591,41	530,43	485,95	450,45	420,07	396,97	376,31	362,11
Time 300x300 (min)	16	13	11	10	9	8	8	7	7	6	6
Plech Hodnocení											
Ztenčení materiálu	4,25 %	3,50 %	3,75 %	4,13 %	3,75 %	4,13 %	3,50 %	3,25 %	4,25 %	4,13 %	3,75 %

Tab. 3: Přehled nastavení vzorků od 1 do 11.

Nové značení	LA40 /5	LA50 /5	LA60 /5	LA70 /5	LA80 /5	LA90 /5	LA10 0/5	LA11 0/5	LA12 0/5	LA13 0/5	LA14 0/5
Značení	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Marking parameters											
Laser power (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Scan Speed (mm/s)	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Pulse Frequency (kHz)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Spot Variable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Repetition	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fill											
Type	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill
Pattern	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant
Direction	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L
Fill Angel (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fill interval	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Nudge Marking Quality											
Quality Level	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Jump Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Time											

Real Time 300x300 (s)	948,80	782,66	668,84	591,42	530,43	485,95	450,45	420,07	396,98	376,31	362,13
Time 300x300 (min)	16	13	11	10	9	8	8	7	7	6	6
Plech Hodnocení											
Ztenčení materiálu	4,25 %	4,25 %	4,25 %	4,25 %	5,00 %	4,63 %	4,00 %	3,75 %	4,25 %	4,33 %	4,00 %

Tab. 4: Přehled nastavení vzorků od 12 do 22

Nové značení	LA40 /7	LA50 /7	LA60 /7	LA70 /7	LA80 /7	LA90 /7	LA10 0/7	LA11 0/7	LA12 0/7	LA13 0/7	LA14 0/7
Značení	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Marking parameters											
Laser power (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Scan Speed (mm/s)	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Pulse Frequency (kHz)	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Spot Variable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Repetition	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fill											
Type	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill
Pattern	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant
Direction	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L
Fill Angel (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fill interval	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Nudge Marking Quality											
Quality Level	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Jump Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Time											

Real Time 300x300 (s)	948,79	782,66	668,84	591,42	530,43	485,95	450,45	420,07	396,98	376,32	362,17
Time 300x300 (min)	16	13	11	10	9	8	8	7	7	6	6
Plech Hodnocení											
Ztenčení materiálu	3,75 %	3,75 %	4,00 %	4,13 %	3,75 %	3,75 %	4,00 %	3,75 %	4,83 %	4,00 %	5,13 %

Tab. 5: Přehled nastavení vzorků od 23 do 33

Nové značení	LA40 /10	LA50 /10	LA60 /10	LA70 /10	LA80 /10	LA90 /10	LA10 0/10	LA11 0/10	LA12 0/10	LA13 0/10	LA14 0/10
Značení	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Marking parameters											
Laser power (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Scan Speed (mm/s)	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Pulse Frequency (kHz)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Spot Variable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Repetition	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fill											
Type	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill
Pattern	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant
Direction	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L
Fill Angel (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fill interval	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Nudge Marking Quality											
Quality Level	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Jump Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Time											

Real Time 300x300 (s)	948,8 0	782,6 7	668,8 6	591,4 1	530,4 4	485,9 6	450,45	420,08	396,99	376,33	362,13
Time 300x300 (min)	16	13	11	10	9	8	8	7	7	6	6
Plech Hodno cení											
Ztenče ní materiá lu	3,75 %	3,50 %	4,25 %	4,83 %	4,25 %	3,75 %	3,75 %	3,25 %	3,50 %	2,50 %	2,88 %

Tab. 6: Přehled nastavení vzorků od 34 do 44

Nové značení	LA40 /13	LA50 /13	LA60 /13	LA70 /13	LA80 /13	LA90 /13	LA10 0/13	LA11 0/13	LA12 0/13	LA13 0/13	LA14 0/13
Značení	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
Marking parameters											
Laser power (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Scan Speed (mm/s)	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Pulse Frequency (kHz)	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
Spot Variable	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Repetition	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fill											
Type	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill	Fill
Pattern	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant	Slant
Direction	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L	L-R, R-L
Fill Angel (°)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fill interval	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Nudge Marking Quality											
Quality Level	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Jump Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed	High Speed
Time											

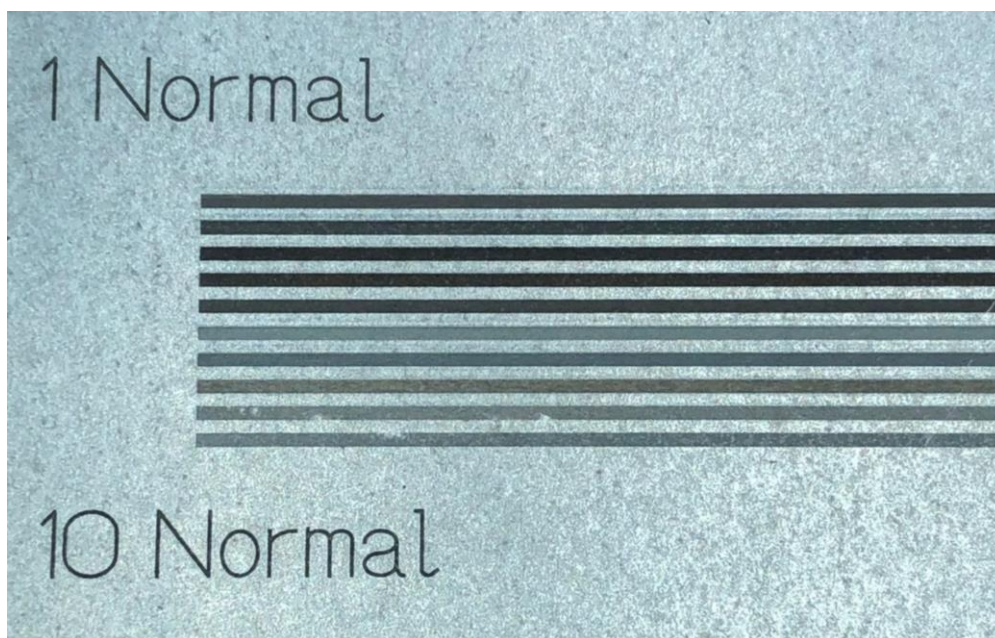
Real Time 300x300 (s)	948,7 9	782,6 8	668,8 5	591,4 2	530,4 5	485,9 6	450,46	420,08	396,99	376,33	362,14
Time 300x300 (min)	16	13	11	10	9	8	8	7	7	6	6
Plech Hodno cení											
Ztenče ní materiá lu	Nelze vyhodnotit										

Tab. 7: Přehled nastavení vzorků od 45 do 55

3.5. Příprava na metalografii

Pro metalografickou analýzu byly zvoleny parametry nastavení z předešlého testu. Jedná se o průřez nejlepších a nejhorších možných nastavení vycházejících z deformačních analýz, kde se mění pouze frekvence pulzu a rychlost laserování zůstává konstantní. Nejlépe strojově čitelnou variantou pro systém GOM Argus bylo nastavení LA40/10. Naopak, varianta vytvořená při nastavení LA130/13 byla pro systém téměř neidentifikovatelná.

Vzorky pro metalografii byly laserovány v pruzích o šířce 1 mm (viz obr. 11) s frekvencemi pulzu 30, 50, 70, 100 a 130 kHz pro rychlosti 400 mm/s a 1300 mm/s ve třech možných stavech povrchu plechu, se kterými se můžeme setkat při tvorbě rastru v pracovním prostředí s naolejovaným materiálem, odmaštěním materiálem se zbytky odmašťovačla a odmaštěným materiálem bez zbytků odmašťovače.



Obr. 11: Vzorek N1 – N10 pro metalografii

Pro porovnání byly dále připraveny dva vzorky elektrochemickým leptáním. Jeden vzorek je standardní elektrochemický leptaný rastr a druhý vzorek je leptaný přímo na žárový zinek bez přiložení deformační sítě.

Všechny vzorky pro metalografickou analýzu byly zafixovány do zalévací hmoty PolyFast od firmy Struers. Jedná se o elektricky vodivou pryskyřici s uhlíkovým plnivem. Používá se pro zalisování za tepla za podmínek:

Průměr vzorku	Pryskyřice		Ohřívání			Chlazení	
	Type	Množství	čas	Teplota	Tlak	Čas	Průtok
30 mm		[ml]	[min]	[°C]	[bar]	[min]	
	PolyFast	20	4,0	180	250	2,0	vysoký

Tab. 8: Technologický postup zalévání

Dále pak byly vzorky broušeny a leštěny s mezioperačním oplachem v destilované vodě za podmínek viz tabulka:

Operace	Brusný papír / leštící suspenze	Čas [min]	Přítlak [N] / otáčky [ot/min]	směr otáčení	Smáčedlo
Broušení	P240	3,0	25 / 300	Souběžně	Voda
Broušení	P1200	3,0	25 / 300	Souběžně	Voda
Broušení	P4000	3,0	20 / 300	Souběžně	Voda
Leštění	MD-DAC + 3 μ m	4,0	15 / 150	Souběžně	Smáčedlo
Leštění	MD-MOL + 1 μ m	5,0	10 / 150	Souběžně	Smáčedlo
Leštění	MD-CHEM + OP-AN	8,0	10 / 150	Protiběžně	Voda

Tab. 9: Technologický postup broušení a leštění.

3.6. Zařízení na hodnocení

Metalografické hodnocení byla realizováno na mikroskopech: Zeiss Axio Imager.M2, Keyence VHX-7000 a skenovací elektronový mikroskop Zeiss Ultra Plus.

Analytická část byla prováděna na skenovacím elektronovém mikroskopu Zeiss Ultra plus s detektory od firmy Oxford Instruments X-Max 20 pro EDS a Nordlys nano pro EBSD.

Teplota při elektrochemickém leptání byla měřena pomocí termokamery Fluke Ti400 a kontaktním teploměrem Ahlborn Therm 2420.

Pro laserování rastru byl použit laser Keyence MD-X 1520C o jmenovitém výkonu 25 W s velikostí popisovacího pole 330 × 330 mm. [29]

Pro elektrochemické leptání byla použita řídicí jednotka pro značení ÖSTLING EU Digital 300 [32], 5% elektrolyt Na₃PO₄ [31] a šestiúhelníkový bodový rastr se startovacími body o rozměrech 390 × 270 mm s velikostí bodu 1 mm a roztečí bodů 2 mm od středu kružnic.



Obr. 12: Šestiúhelníková síť pro elektrochemické leptání.

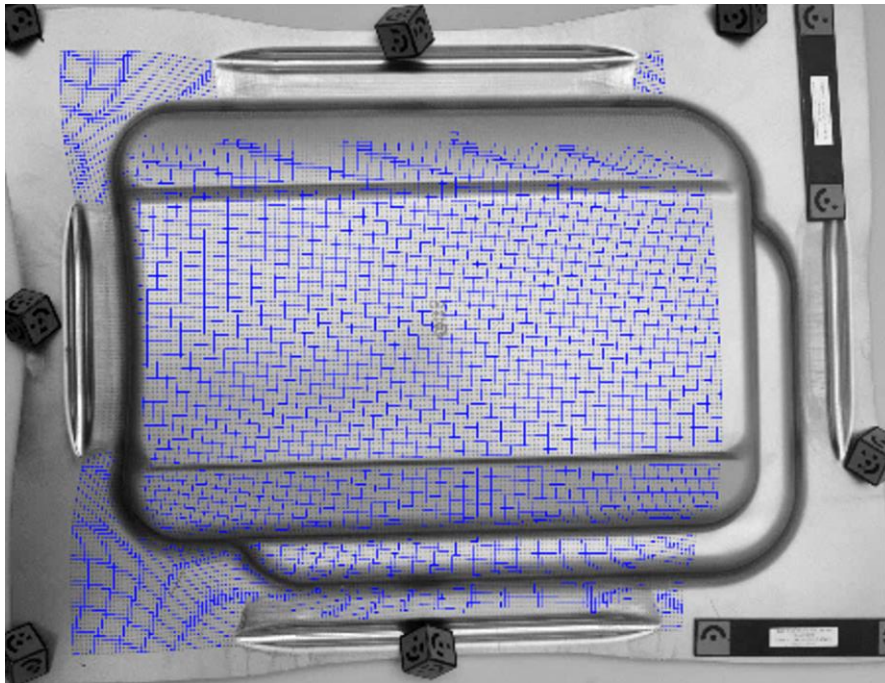
Lisování vzorků se provádělo na hydraulickém lisu Sick za lisovacího tlaku 295 barů s přídržovači nastavené na 2 bary. Maximální dovolené rozměr nástřihu 335×430 mm.

4. Výsledky

4.1. Deformační analýza GOM Argus

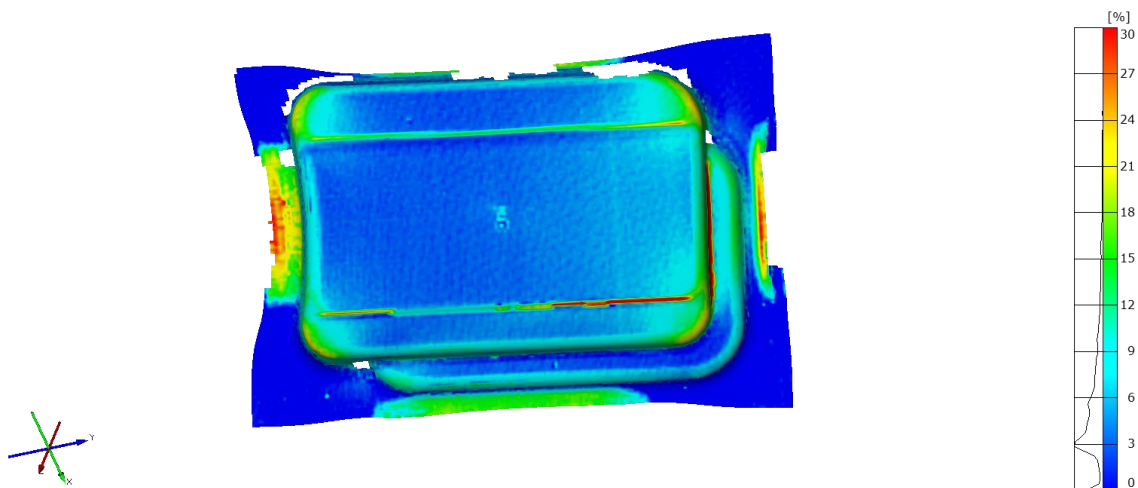
Hodnocení probíhalo za standardních podmínek za použití směrového blesku tak, aby bylo docíleno co nejlepšího kontrastu. Při focení jednotlivých snímků bylo odhaleno, že směr stopy laseru a směr snímání má vliv na čitelnost bodů. Pokud fotka byla snímána v ose totožné se směrem laserování, pak se bod jevil jako bílý, zatímco pokud fotka byla snímána kolmo na směr laserování, pak se bod jevil černý nebo šedý.

Toto chování má za následek menší schopnost strojového rozpoznání jednotlivých bodů, jelikož hodnotící software při prvotním nastavení vyžaduje určit typ kontrastu, zda se jedná o černé body na bílém pozadí nebo naopak. Jednotlivé kontrasty nelze vzájemně kombinovat, což je ilustrováno na obrázku 13, kde na horní hraně můžeme vidět body, které se jeví bílé, zatímco ostatní černé.



Obr. 13: Ukázka hodnocení vzorků.

Při hodnocení deformační analýzy systémem GOM Argus bylo hodnoceno ztenčení materiálu. U elektrochemicky nanesené sítě vykazuje průměrná hodnota ztenčení $3,0 \% \pm 0,2 \%$.

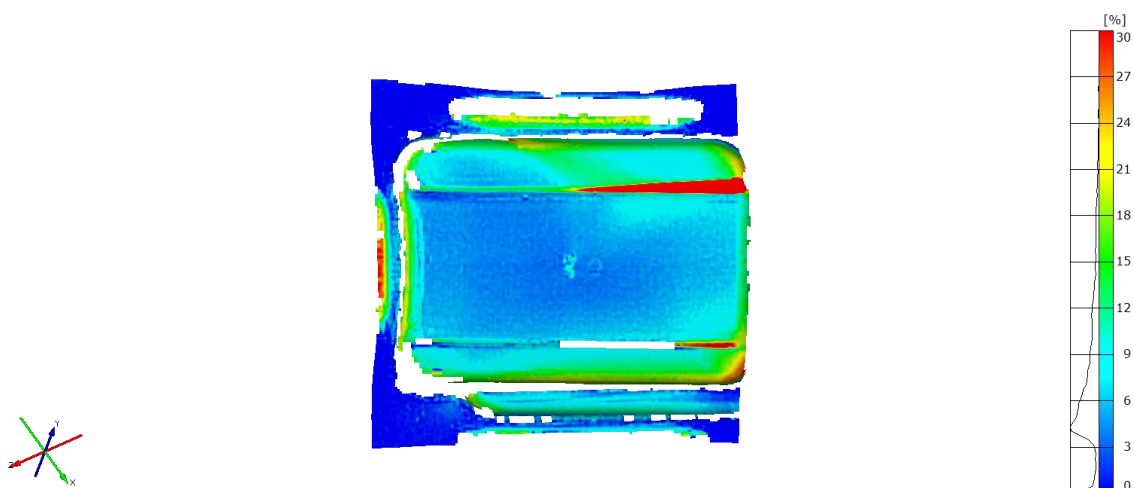


Obr. 14: Výsledné vyhodnocení ztenčení elektrochemicky leptané sítě. Vzorek Lept 3.

U laserované sítě vzrostlo průměrné ztenčení materiálu o 22 až 42 % v závislosti na nastavení laseru. U sady vzorků s pulzní frekvencí 130 kHz (série LAXX/13) byla kvalita vyhodnocení nedostatečná, proto nebyla kvantifikována.

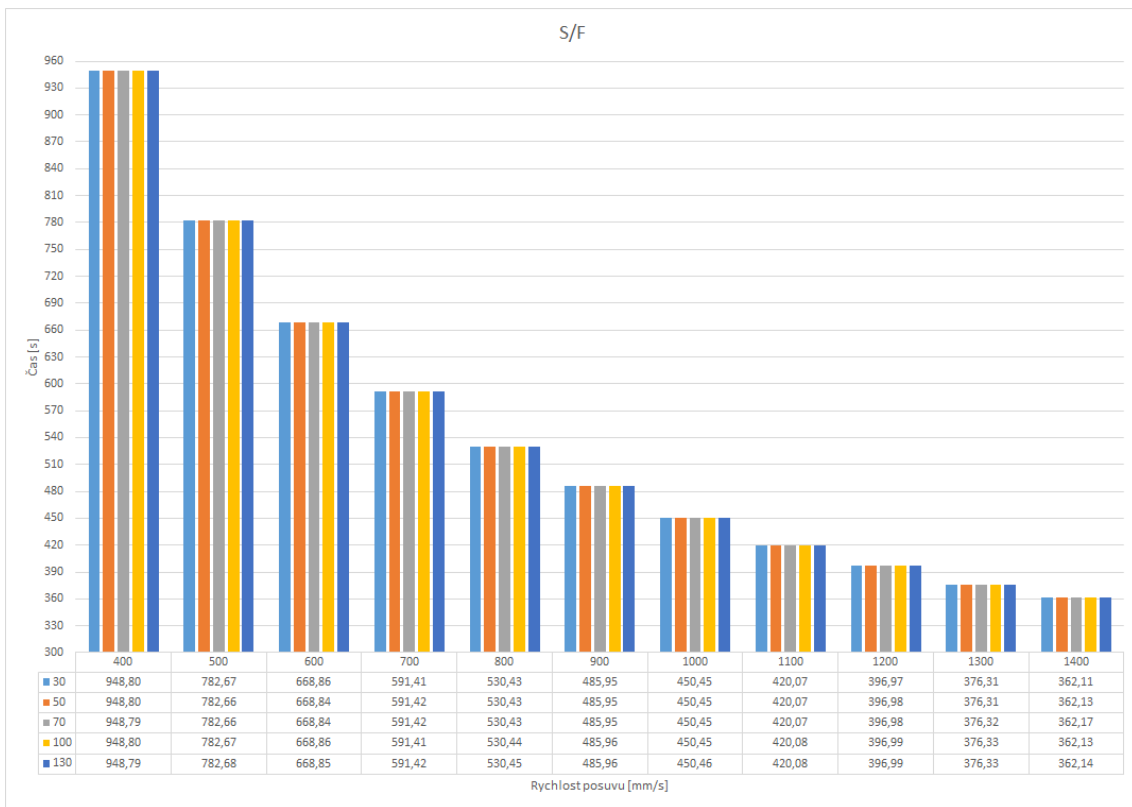
Vzorek	LEPT	LAXX/3	LAXX/5	LAXX/7	LAXX/10	LAXX/13
Průměrná hodnota	3 % ± 0,25 %	3,85 % ± 0,33 %	4,27 % ± 0,31 %	4,08 % ± 0,45 %	3,65 % ± 0,62 %	Nelze hodnotit

Tab. 10: Průměrné hodnoty ztenčení u jednotlivých nastavení:

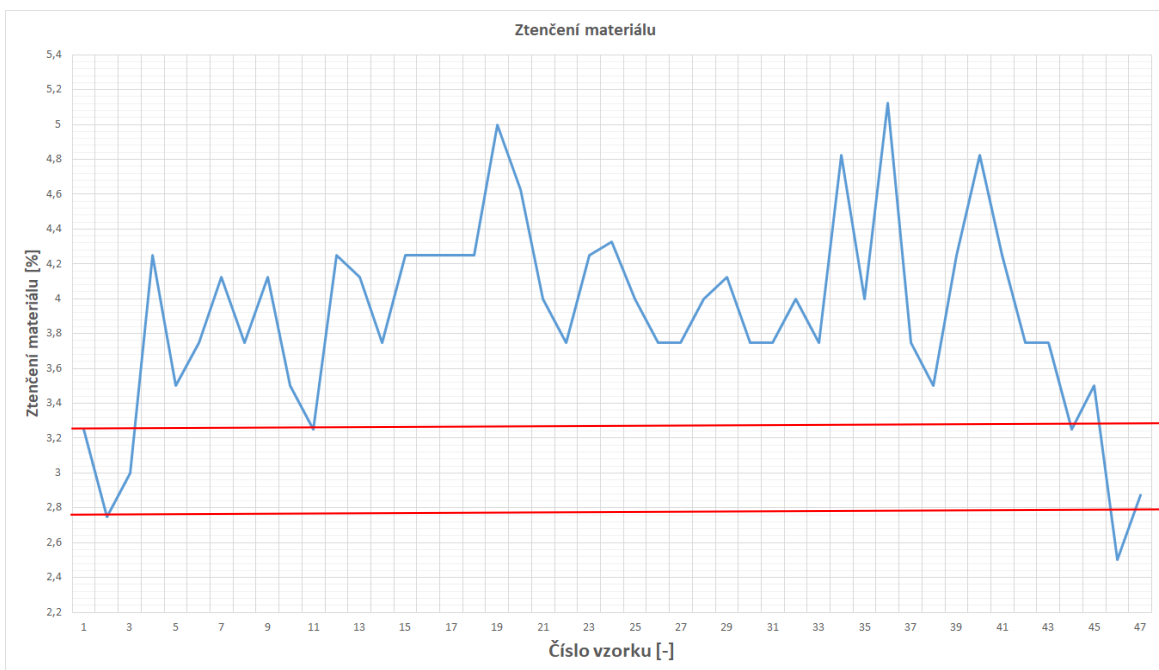


Obr. 15: Výsledek vyhodnocení ztenčení vzorku se sítě deponovanou pomocí laseru. Na vzorku LA60/10 je oproti obrázku 14 výraznější ztenčení materiálu a zároveň nedokonalé strojové rozpoznání jednotlivých bodů.

Z výsledků experimentu je patrné, že se vzrůstající rychlostí posuvu laseru exponenciálně klesá čas potřebný na vytvoření rastru viz graf č.1. Na druhou stranu s rostoucí rychlostí posuvu klesá naměřená hodnota ztenčení materiálu viz graf č.2. To může být zapříčiněno menším teplem vneseným do materiálu a tím snížením či dokonce eliminací natavení základního materiálu. To vede k omezení tvorby mikrovrubů. Této problematice se detailněji věnuje kapitola 4.3.

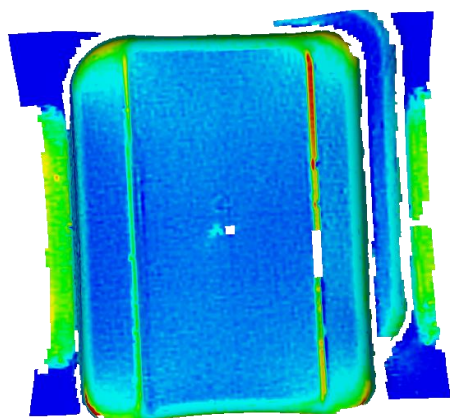
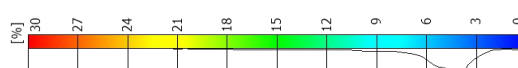
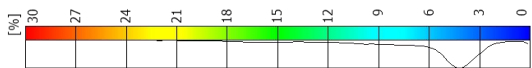


Graf 1: Čas potřebný na tvorbu sítě o rozměrech 300 mm × 300 mm.

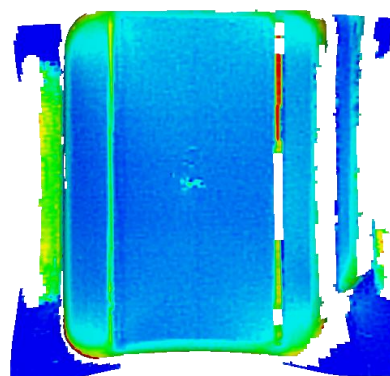


Graf 2: Střední hodnoty míry ztenčení u jednotlivých nastavení s vyznačeným optimálním pásem.

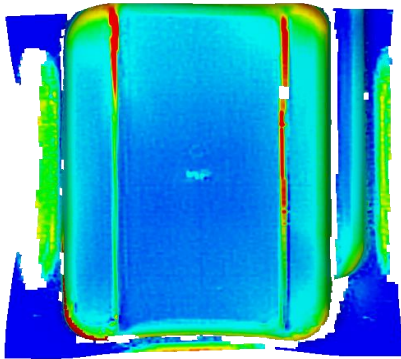
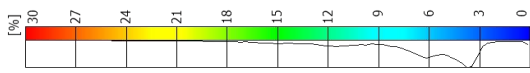
Nejlépe strojově čitelné nastavení z testovaných vzorků bylo vyhodnoceno LA40/3 (Vzorek N1), LA40/5 (Vzorek N2), LA40/7 (Vzorek N3), LA40/10 (vzorek N4), LA50/10, LA60/10. Obecně se dá říct, že vzorky s nižší rychlostí posuvu s nižší frekvencí jsou strojově čitelnější než naopak.



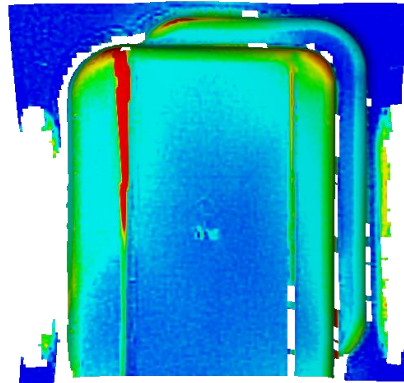
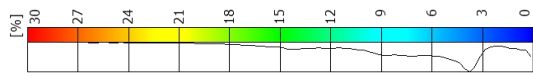
Obr. 16: Vzorek LA40/3.



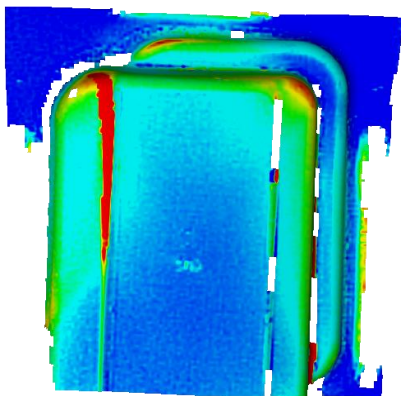
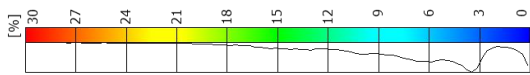
Obr. 17: Vzorek LA40/5.



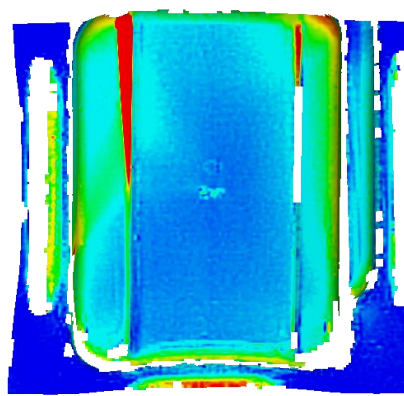
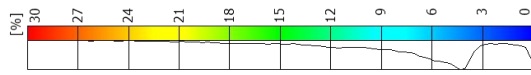
Obr. 18: Vzorek LA40/7



Obr. 19: Vzorek LA40/10



Obr. 20: Vzorek LA50/10

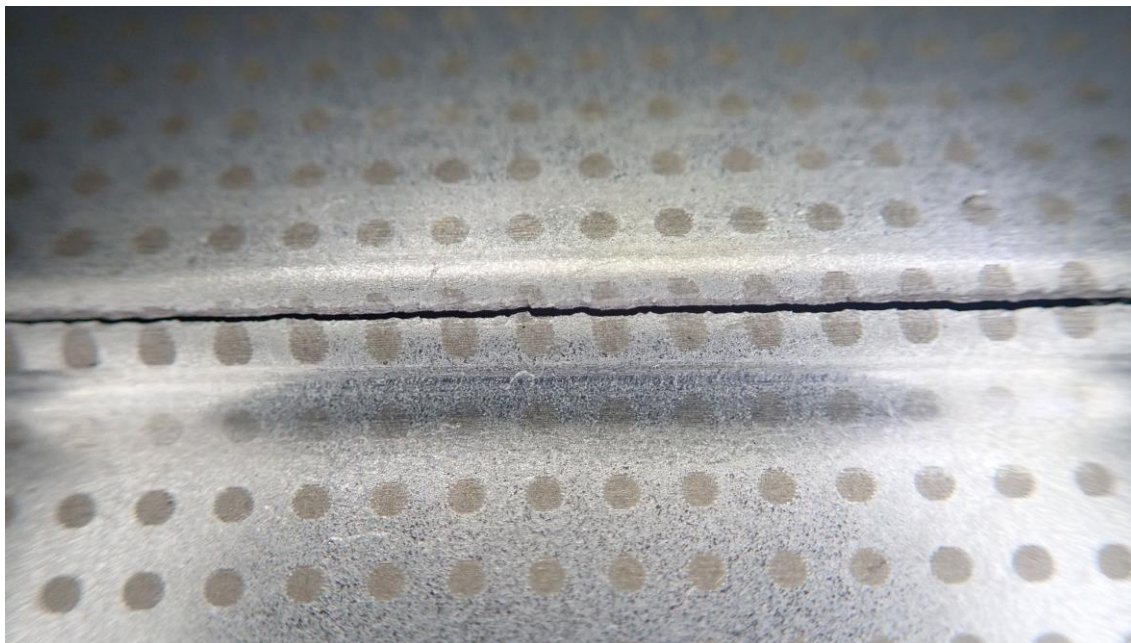


Obr. 21: Vzorek LA60/10

4.2. Hodnocení morfologie rastru

4.2.1. Vizuální hodnocení rastru

Při bližším zkoumání laserově nanášeného rastru na výlisku je na obrázku x patrná linie trhliny procházející přes jednotlivé laserované body. Toto deformační chování je pravděpodobně zapříčiněno tepelným ovlivněním základního materiálu a tím spojenou tvorbou mikrovrubů, které fungují jako koncentrátoři napětí a iniciují vznik trhliny.



Obr. 22: Makrosnímek trhliny na výlisku, ke je patrná trhlina procházející skrz laserované body. Dále si můžeme všimnout deformace bodů zapříčiněné velkou lokální deformací hlubokým tahem.

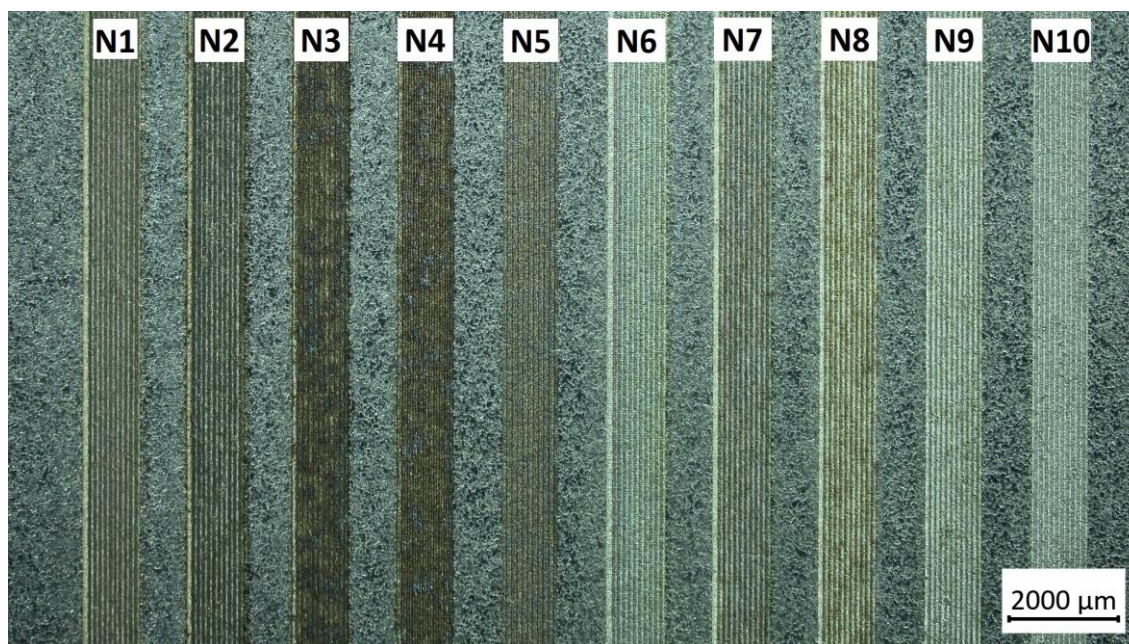
4.3. Vizuální hodnocení vzorků pro metalografii

Pokud porovnáme laserovaný povrch čistě z vizuálního hlediska, tak je patrné ovlivnění jak nastavením laseru, tak i čistotou povrchu. Při porovnání obrázků Obr: 23, 26 a 27 vidíme, že s vyšší rychlostí posuvu a vzrůstající frekvencí povlak “bělá” (přetavuje se a vzniká oxid zinečnatý). Naopak u nižších rychlostí posuvu se vzrůstající frekvencí materiál tmavne a vzniká výraznější reliéf povlaku [36](blíže se tomuto tématu budeme věnovat v kapitole 4.2.3.).

Vliv čistoty povrchu také nemůžeme zanedbat. Při testech zohledňujících různé povrchové úpravy, jako je zanechání konzervačního oleje na nástřihu nebo zanechání zbytků odmašťovacího přípravku, je v některých případech dobře znatelné ovlivnění zbarvení povrchové vrstvy zinku. Olejem ošetřená místa mají tmavší zbarvení. Zbarvení je pravděpodobně zapříčiněno nasycením povrchové vrstvy uhlovodíky obsaženými v minerálních olejích používaných ve výrobě [37]. Podobný efekt, ale v menší míře, můžeme také pozorovat na povrchu ošetřeném čistící směsí. Důvodem slabého zbarvení je menší tloušťka zanechané vrstvy čistící směsi a menší koncentrace uhlovodíků [35]. Tuto skutečnost potvrdila i chemická analýza pomocí energiově-disperzní spektroskopie (EDS), kdy při porovnání vzorků N5, O5 a T5 vykazují rozdílné hodnoty koncentrace uhlíku (C). Dle EDS Vzorek N5 obsahuje $4,2 \pm 0,2$ hm. % C, zatímco vzorek T5: $7,2 \pm 0,2$ hm. % C a vzorek O5: $5,9 \pm 0,4$ hm. % C viz tabulka 11.

Vzorek	Prvek	Line Type	Wt%	Wt% Sigma	At %
N5	C	K series	4.18	0.15	17.01
O5	C	K series	5.92	0.40	22.59
T5	C	K series	7.21	0.16	25.40

Tab. 11: Hodnoty koncentrace uhlíku zjištěné pomocí EDS analýzy.

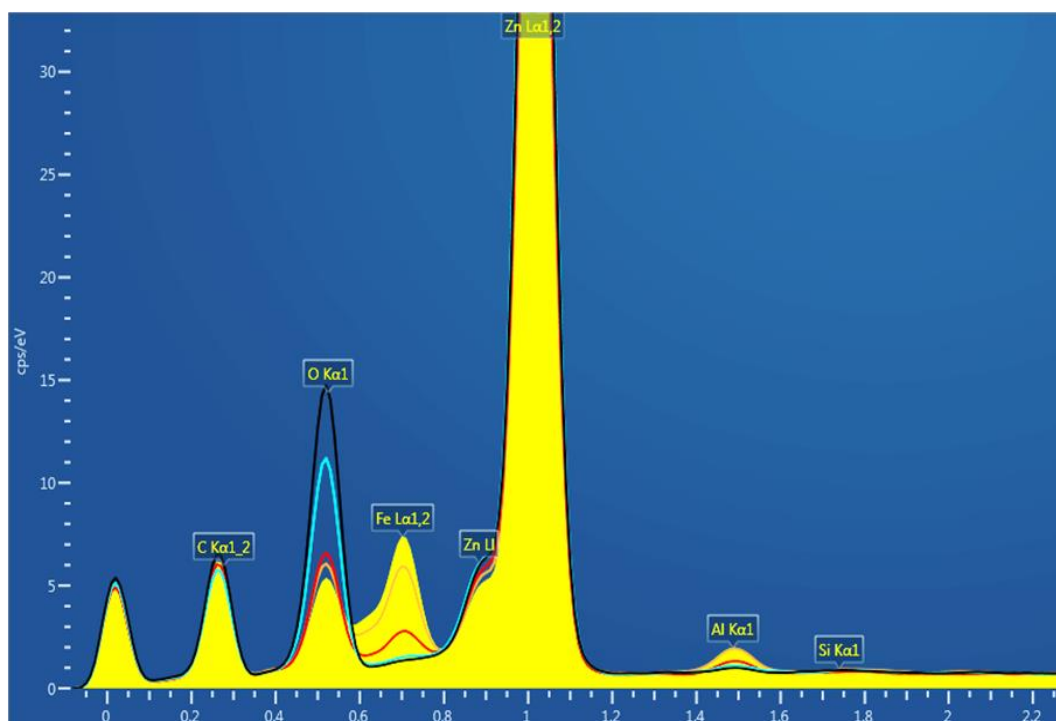


Obr. 23: Standard – Běžným způsobem odmaštěný materiál.

Dále byla provedena na vzorkách N1 až N10 (obrázek 23) EDS mikroanalýza (Tab.12 a 13). Z porovnání jednotlivých spekter chemického složení (Obr. 24 a 25) je patrný určitý trend: S rostoucí pulzní frekvencí se snižuje oxidace povrchu (O), ale zároveň vzrůstá odhalení základního materiálu (Fe).

Vzorek	Barva	C	O	Al	Si	Fe	Zn	Total
N5	Žlutá	27.8	8.5	2.1	0.2	21.5	39.9	100.0
N4	Oranžová	26.0	10.7	2.0	0.1	18.0	43.3	100.0
N3	Červená	30.3	13.4	1.2	0.1	7.3	47.7	100.0
N2	Tyrkysová	26.9	22.7	0.5	0.2	1.6	48.1	100.0
N1	Černá	27.9	27.8	0.4	0.1	1.4	42.5	100.0

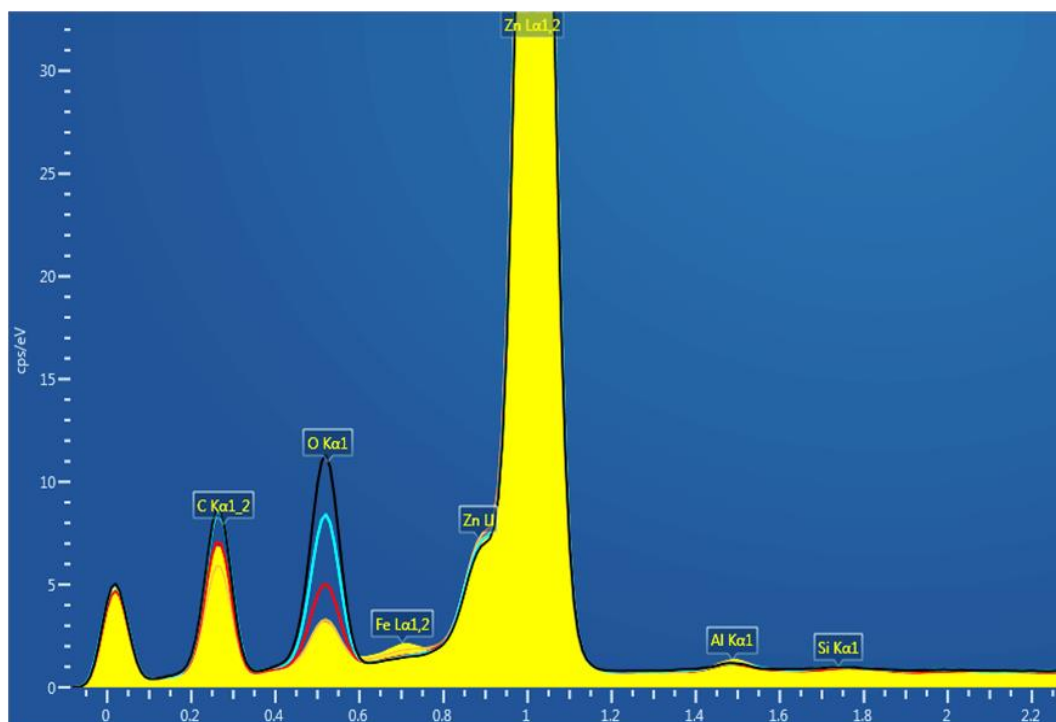
Tab. 12: Chemické složení vzorků N1 až N5 v atomárních procentech.



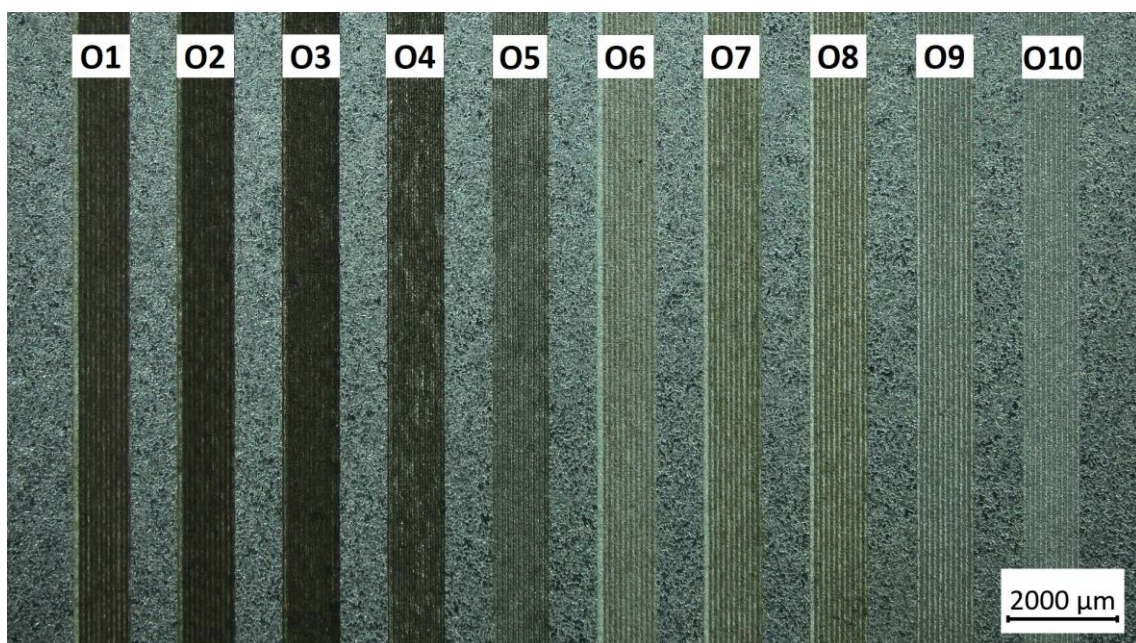
Obr. 24: Porovnání chemických spekter u vzorků N1 až N5

Vzorek	Barva	C	O	Al	Si	Fe	Zn	Total
N10	Žlutá	35.5	4.9	1.1	0.4	2.9	55.2	100.0
N9	Oranžová	32.0	5.5	0.8	0.3	2.4	59.0	100.0
N8	Červená	35.3	9.4	0.6	0.2	1.1	53.5	100.0
N7	Tyrkysová	36.4	14.9	0.5	0.2	1.0	47.0	100.0
N6	Černá	35.0	19.7	0.5	0.2	0.5	44.1	100.0

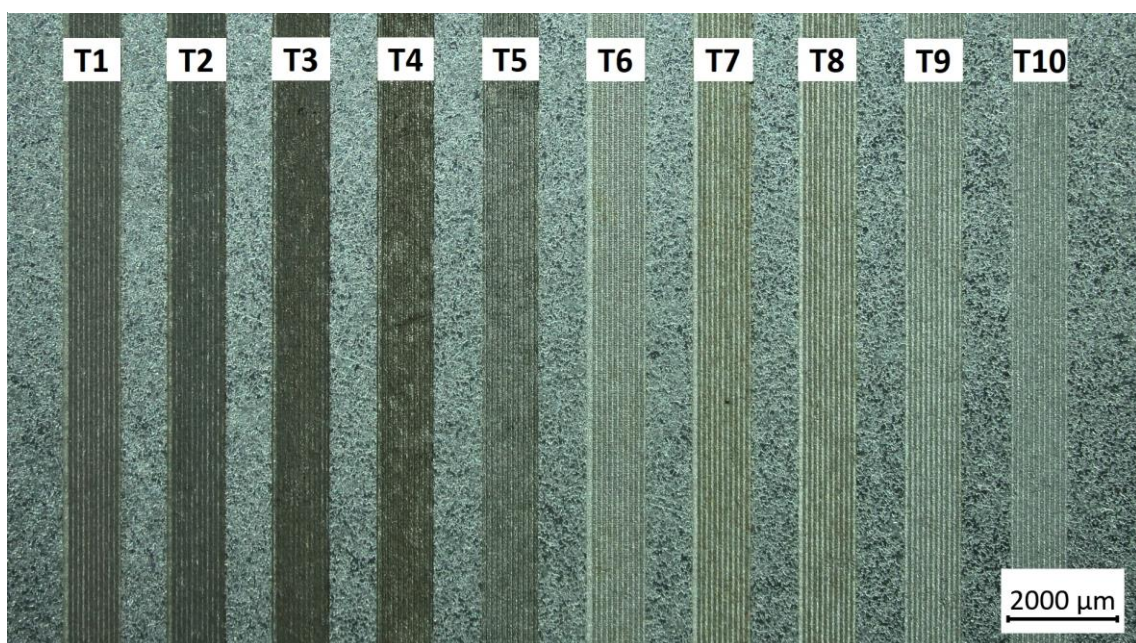
Tab. 13: Chemické složení vzorků N6 až N10 v atomárních procentech.



Obr. 25: Porovnání chemických spekter u vzorků N6 až N10



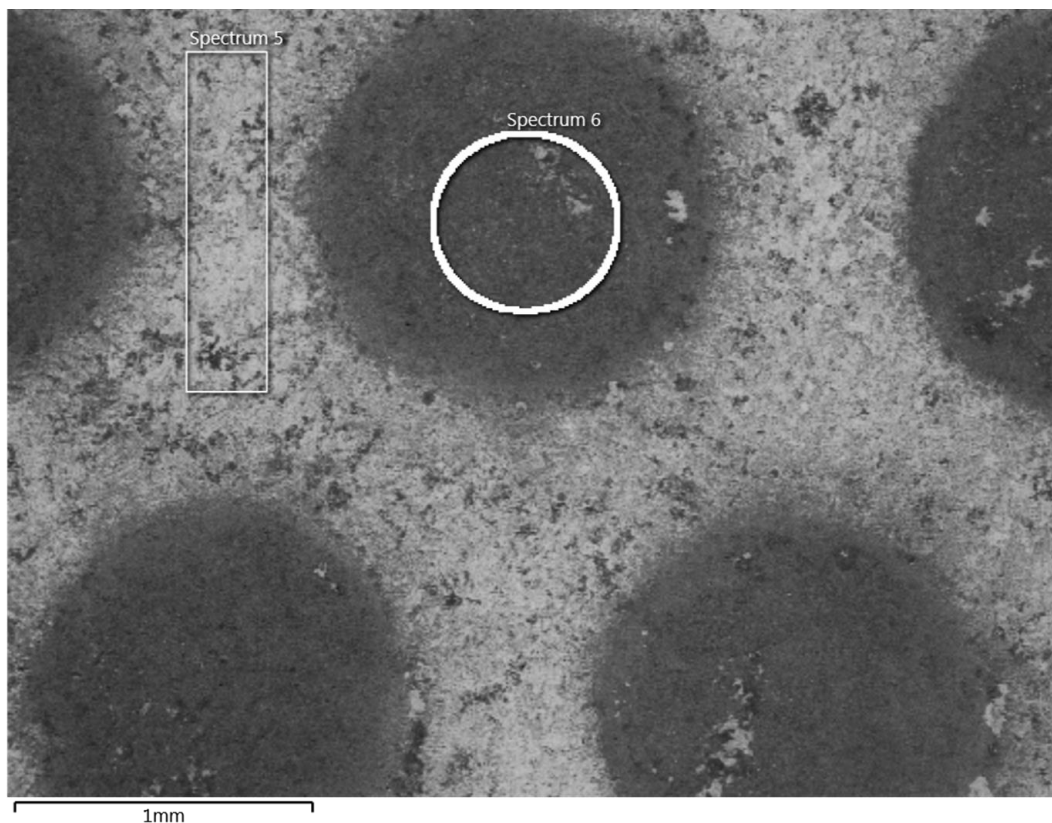
Obr. 26: Olej – Olejem zamaštěný materiál.



Obr. 27: Technosol – Zanechaná rezidua čistící směsi

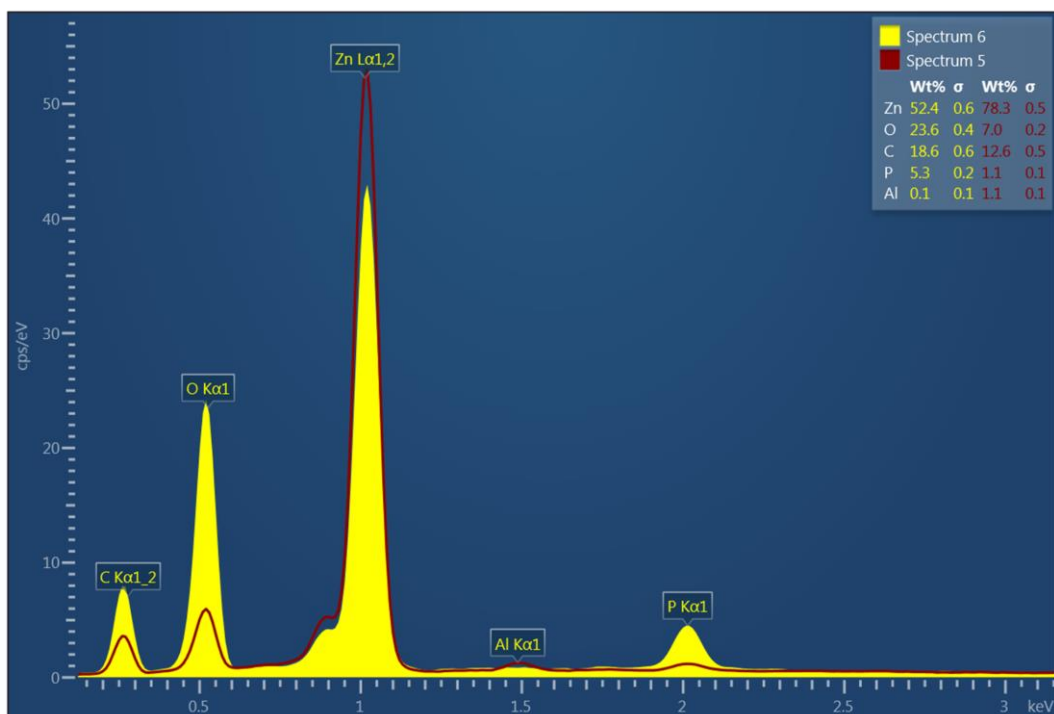
4.4. Hodnocení morfologie povrchu

Pro bližší pochopení dějů elektrochemického leptání byl vzorek Lept 3 podroben chemické analýze pomocí energiově-disperzní spektroskopie neboli EDS. Lokální chemická analýza ukázala oxidaci povrchu materiálu, v tomto případě zinku, viz obrázek 29.



Obr. 28: Oxidace zinku, kde elektrolyticky deponované tmavé body jsou oxidy a světlé okolí je zinkový substrát.

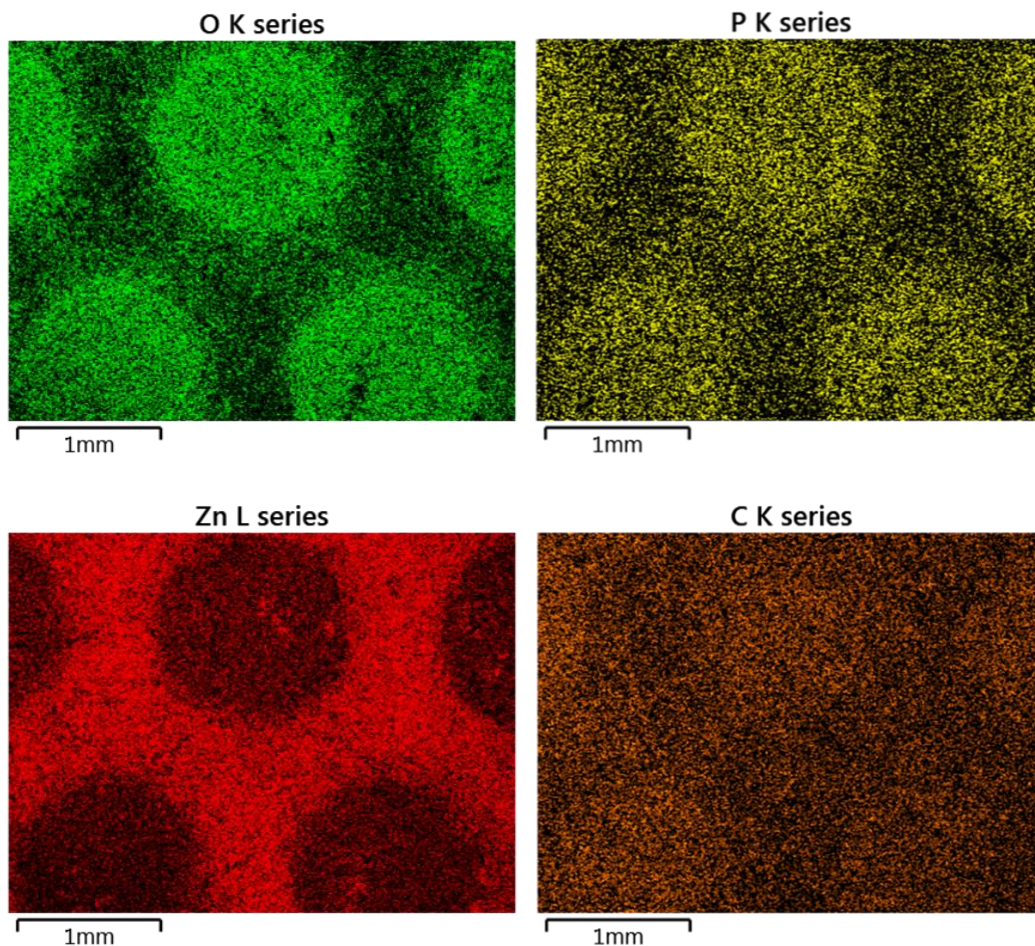
Kromě zvýšené koncentrace kyslíku EDS analýza dále prokázala v místě nanesených bodů zvýšenou koncentraci uhlíku (C) a fosforu (P). Uhlík je zde uvolňován z uhlíkové elektrody a fosfor se dostává do povrchové vrstvy z elektrolytu.



Obr. 29: Porovnání naneseného bodu s okolím.

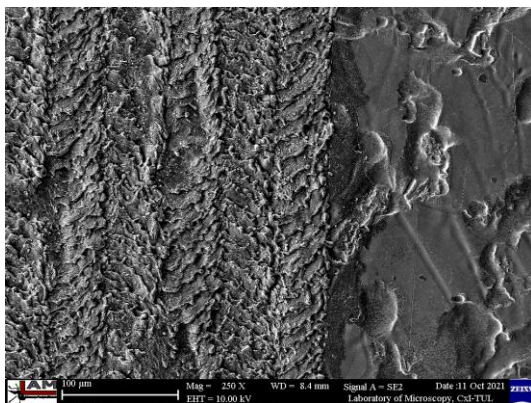
Prvek	Spectrum 6 (BOD)		Spectrum 5 (Okolí)	
	Wt%	Wt% Sigma	Wt%	Wt% Sigma
Zn	52.4	0.6	78.3	0.5
O	23.6	0.4	7.0	0.2
C	18.6	0.6	12.6	0.5
P	5.3	0.2	1.1	0.1
Al	0.1	0.1	1.1	0.63

Tab. 14: Chemické složení povrchu a elektrochemicky leptané sítě.

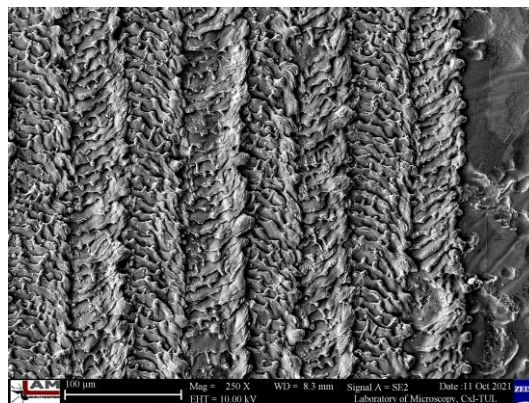


Obr. 30: Mapy ukazující distribuci jednotlivých prvků

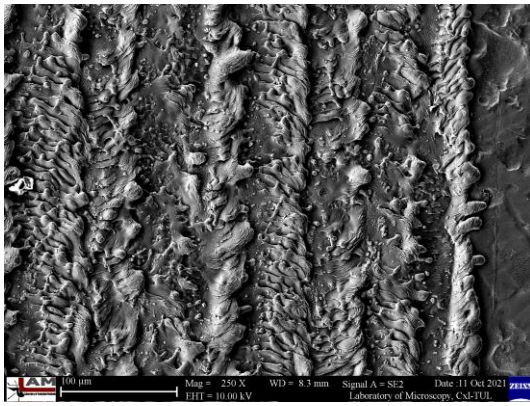
Při porovnání morfologie povrchu laserovaných vzorků na snímcích z elektronového mikroskopu v topografickém kontrastu je už na první pohled patrný trend, kdy se vzrůstající frekvencí pulzu a nízkou rychlostí posuvu (vzorky N1 až N5) dochází k viditelnému přetavení zinkové vrstvy. Nejvíce je to vidět na vzorku N5, kde jsou patrné stopy po laseru.



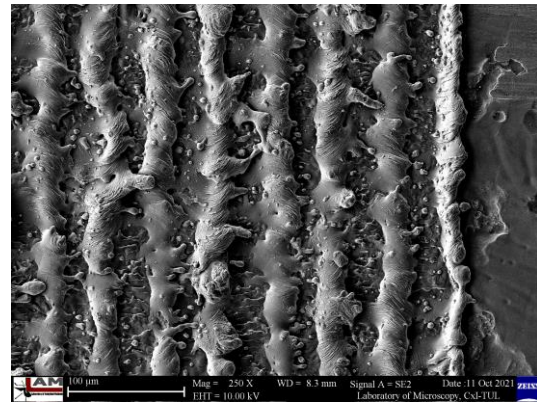
Obr. 31: N1 (LA40/3)



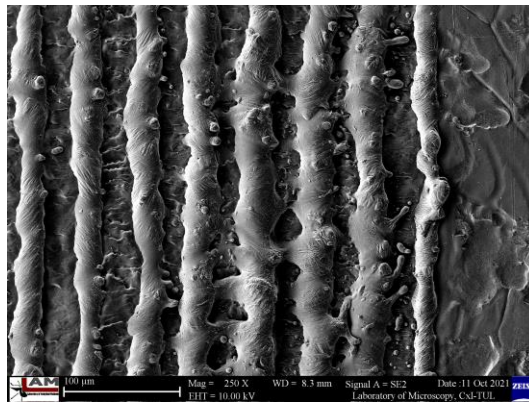
Obr. 32: N2 (LA40/5)



Obr. 33: N3 (LA40/7)

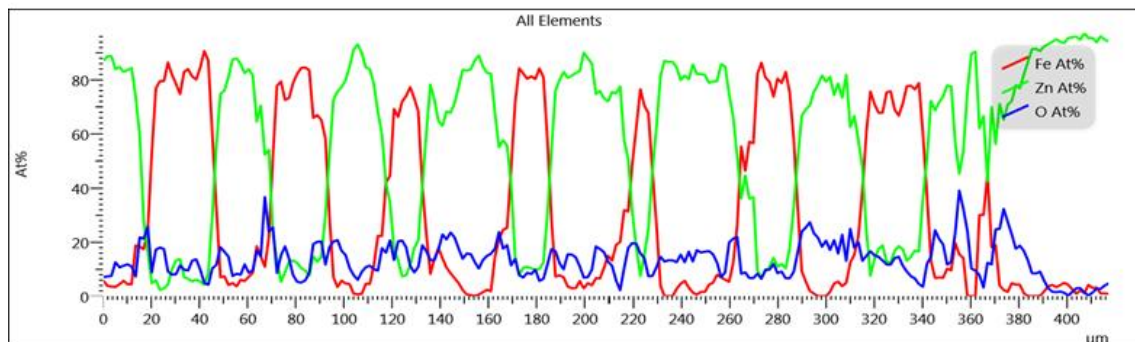
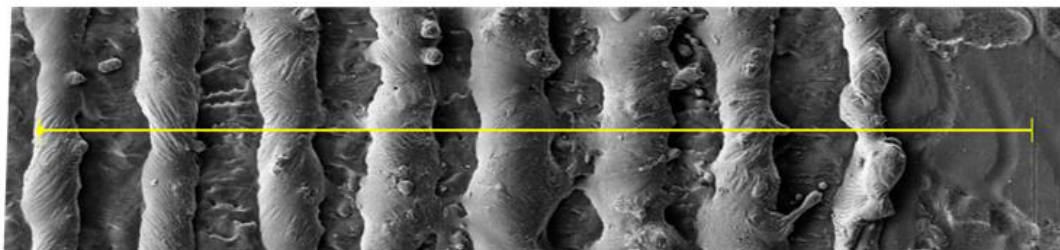


Obr. 34: N4 (LA40/10)



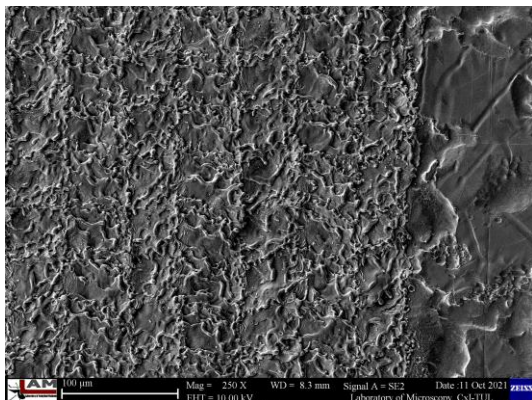
Obr. 35: N5 (LA40/13)

Pomocí Energiově-disperzní spektroskopie (EDS) bylo zjištěno odhalení základního materiálu a rozstříku zinkové vrstvy na kraje viz obrázek 36

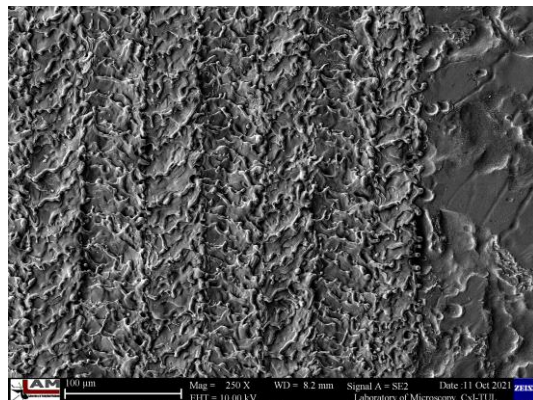


Obr. 36: EDS liniová mapa vzorku N5 (LA40/13) ukázala střídání oblastí bohatých na zinek s oblastmi, kde došlo k obnažení základního materiálu (Fe), to vše doprovázené oxidací.

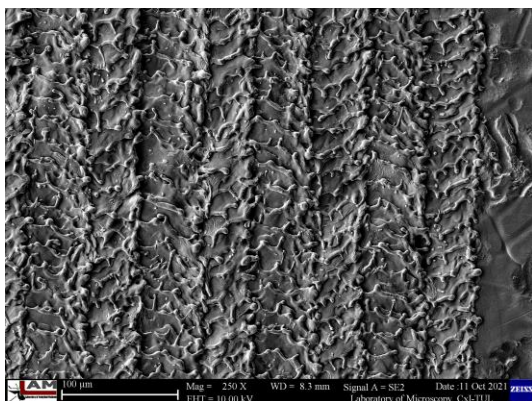
Stejný trend můžeme pozorovat i u vzorků N6 až N10. Kdy vyšší rychlost posuvu se vzrůstající pulzní frekvencí nemá takový markantní dopad na žárový povlak i když deformace povrchu je znatelná viz obrázky 37 až 41.



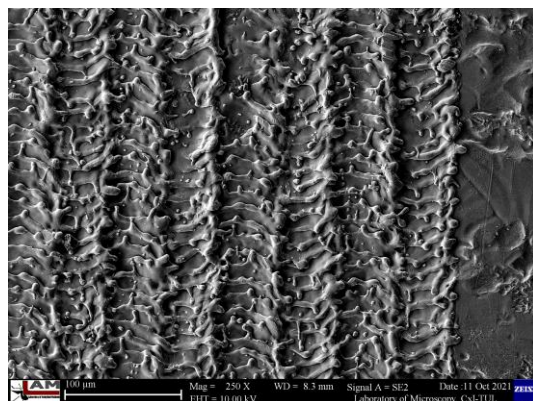
Obr. 37: N6 (LA130/3)



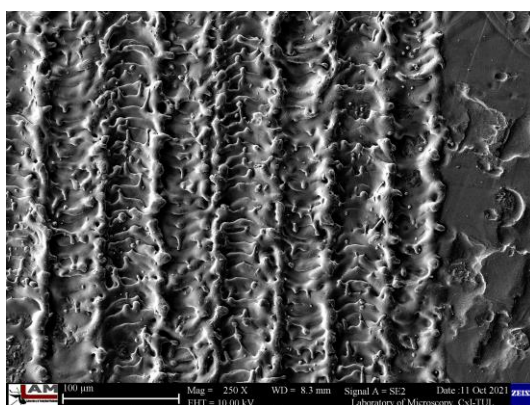
Obr. 38: N7 (LA130/5)



Obr. 39: N8 (LA130/7)

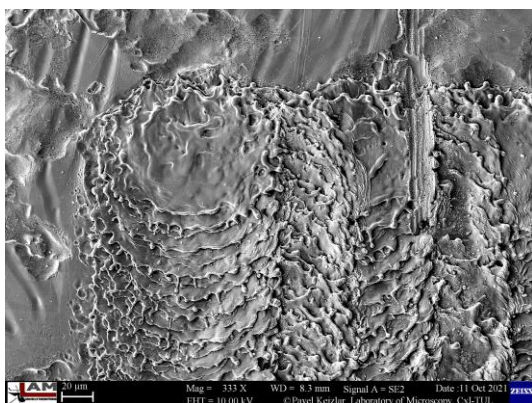


Obr. 40: N9 (LA130/10)

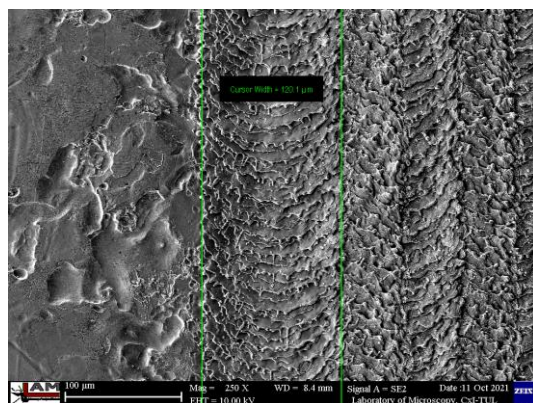


Obr. 41: N10 (LA130/13)

Průměrná šířka stopy na žárovém zinku je 120 μm (Obr 43). Průměr laserového je svazku 80 μm . Z toho vyplývá, že tepelně ovlivněná oblast je o 50 % větší než svazek laseru, přesněji řečeno o 40 μm . Velikost ovlivněné oblasti může být způsobena teplotou místa dopadu laseru, která je vyšší než teplota tání zinku (419,5 $^{\circ}\text{C}$).



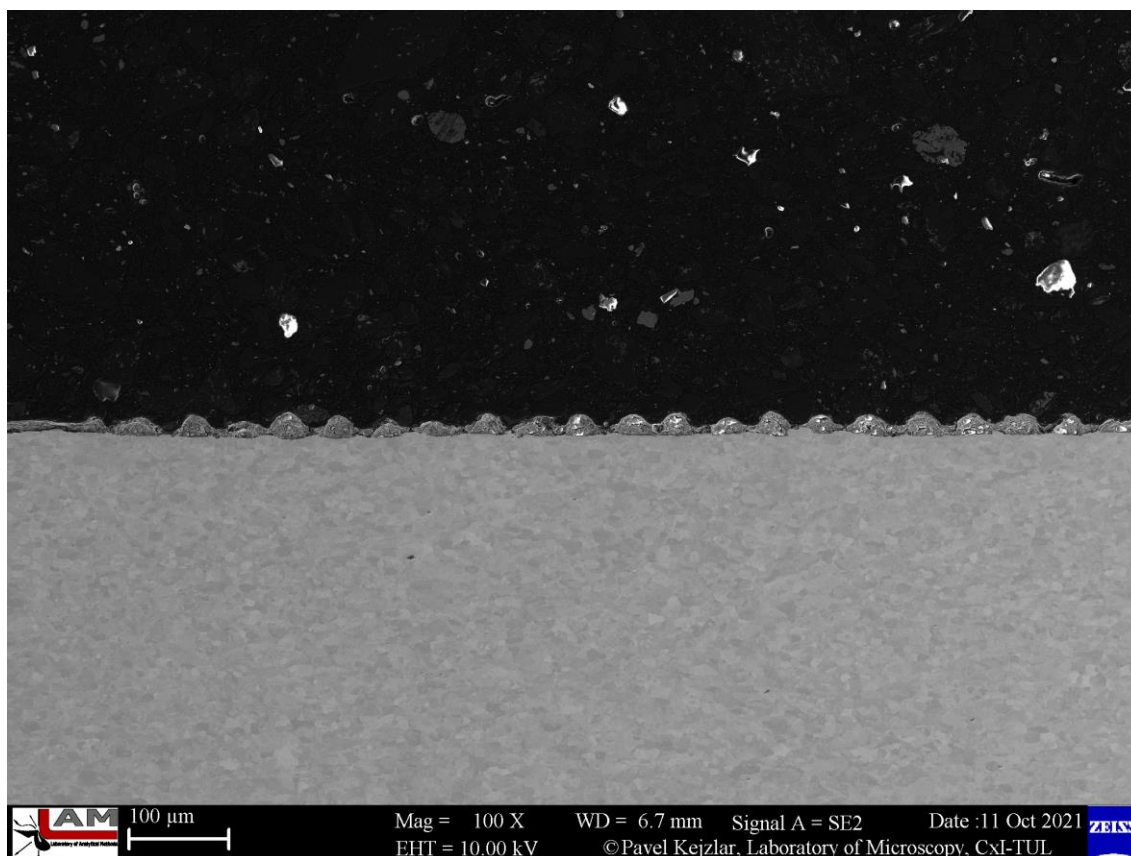
Obr. 42: Poslední stopa laseru.



Obr. 43: Měření stopy laseru.

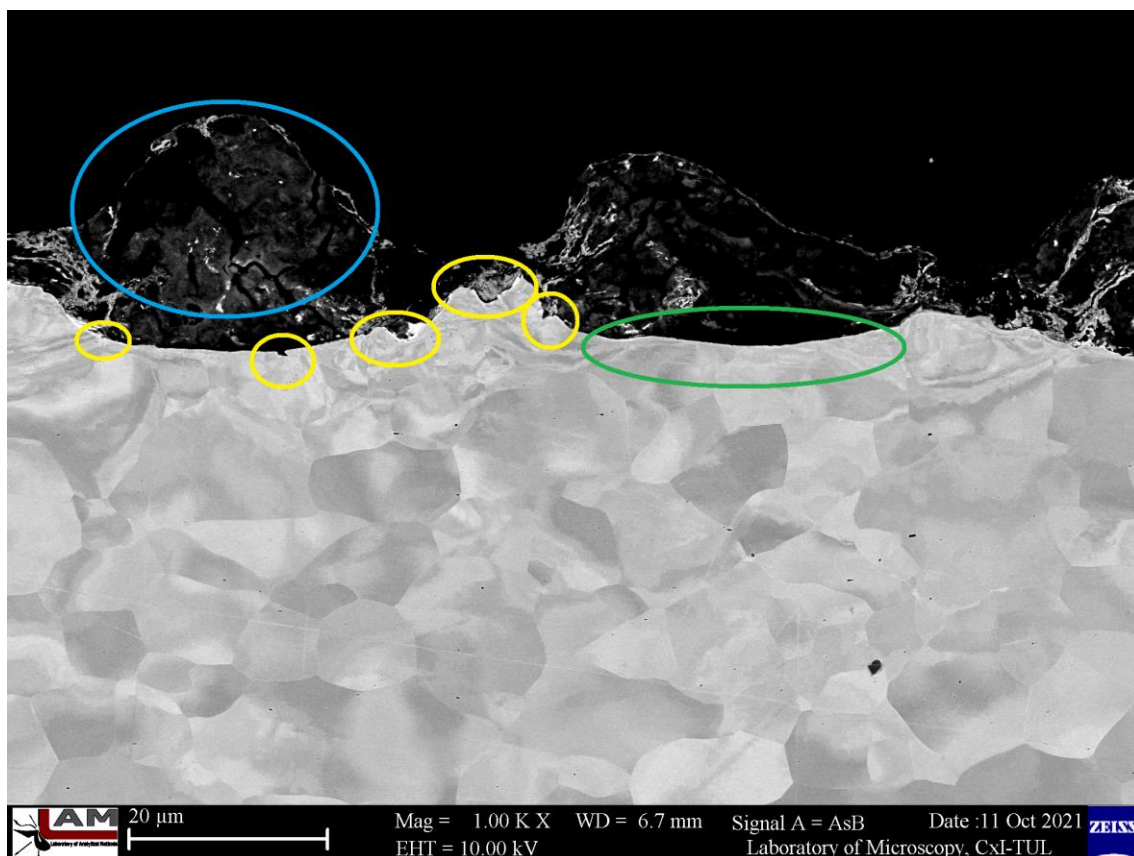
4.5. Metalografické hodnocení výbrusu

Na metalografickém výbrusu jsou rozpoznatelné pouze stopy po laseru u vzorků N4 (O4 a T4) (LA40/10) a N5 (O5 a T5) (LA40/13). Zbylé stopy nebylo možné rozeznat od zinkového povlaku.



Obr. 44: Metalografický výbrus vzorku N5 zobrazený pomocí rastrovacím elektronovým mikroskopu v topografickém kontrastu.

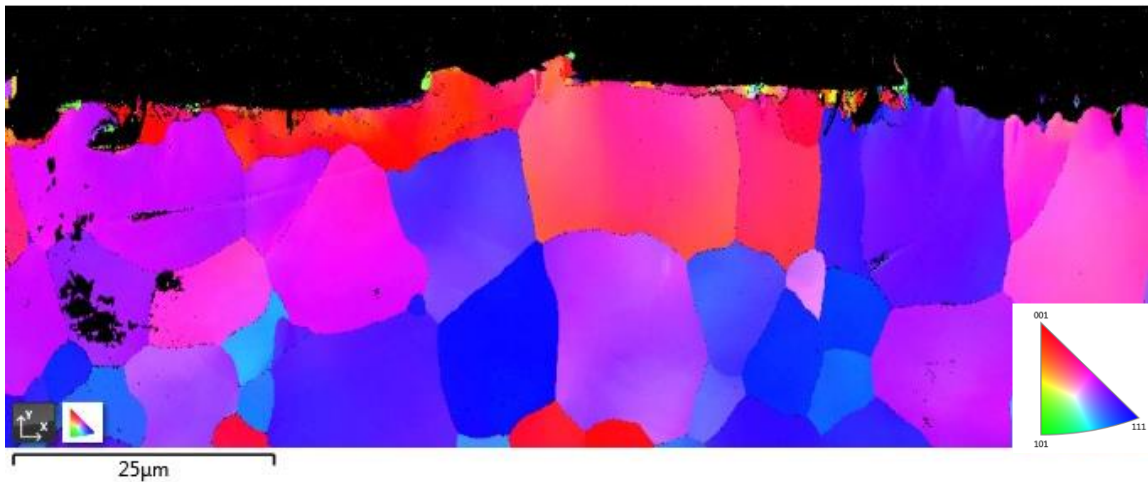
Na detailnějším Obrázku 45 jsou patrné stopy po laseru a je i patrné tepelné ovlivnění základního materiálu až do hloubky přibližně 10 mikrometrů. Tepelné ovlivnění je způsobeno malou rychlostí posuvu a vysokou pulzní frekvencí, která v materiálu generuje teplo a natavuje základní materiál, proto předpokládaná teplota povrchu při laserování je vyšší než 1539 °C.



Obr. 45: Detail metalografického výbrusu vzorku N5 zobrazený pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu v orientační kontrastu.

Při hlubším zkoumání obr. 45 můžeme na detailu vidět mikro vruby (žlutý kruh). Tyto vruby se vytvořily rychlým natavením a zchlazením základního materiálu. Jelikož laser sám o sobě měl velkou dopadovou energii, můžeme si všimnout částečných prohlubní, jak laser natlačil roztavený základní materiál do stran (zelený kruh). Dále stojí za povšimnutí val přetaveného zinku (modrý kruh).

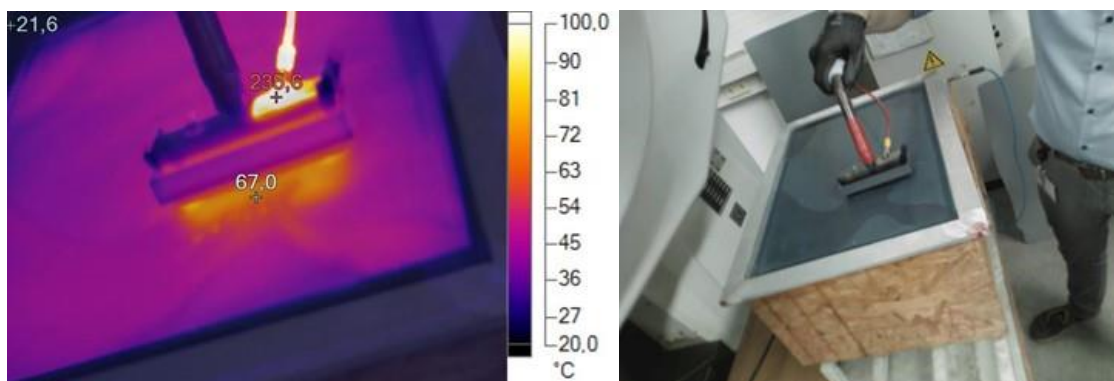
Pomocí difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD) byla potvrzena výše zmíněná zjištění. Dochází k jednoznačnému natavení základního materiálu a došlo k tvorbě nových zrn viz obrázek 46.



Obr. 46: EBSD IPF-Y mapa. Jednotlivé barvy znázorňují konkrétní orientace krystalové mřížky vztaženou k normálové směru vzorku.

4.6. Tepelné ovlivnění základního materiálu

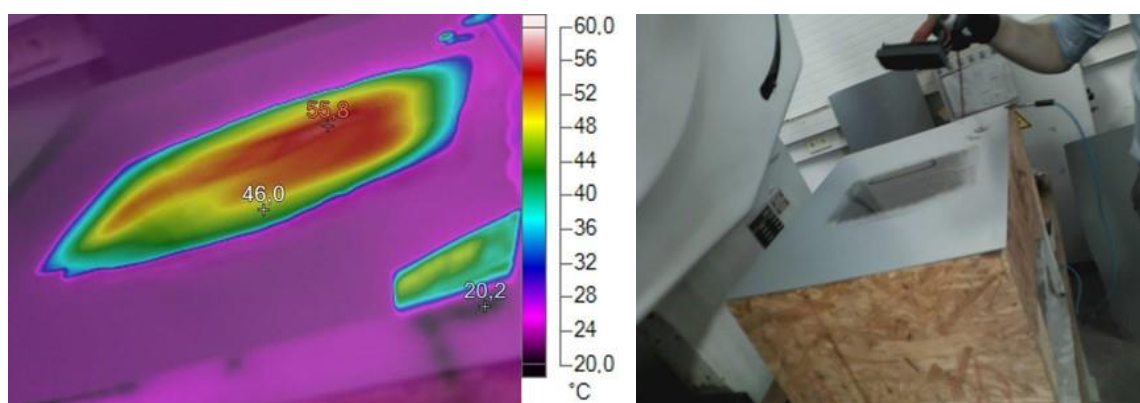
Z předešlé kapitoly jsme zjistili, že na vzorku N5, O5 a T5 dochází k natavení základního materiálu z důvodu překročení teploty tavení oceli (1539 °C). Z tohoto důvodu byla srovnávána technologie elektrochemického leptání. Měření ukázalo, že teplota povrchu dosahuje v maximu přibližně 67 °C, což na rozdíl od laserové technologie, nezpůsobí tepelné ovlivnění základního materiálu.



Obr. 47: Měření teploty termokamerou za normálních podmínek.

Teplota pozadí:	22,0 °C
Emisivita:	0,96
Průměrná teplota:	38,8 °C
Rozsah obrázku:	21,6 °C až 235,6 °C
Model kamery:	Ti400
Velikost IR senzoru:	320 x 240 mm
Vzdálenost k cíli:	0,71 m

Tab. 15: Výsledky z protokolu měření teploty termokamerou obrázku 47.



Obr. 48: Měření teploty termokamerou bez negativu sítě.

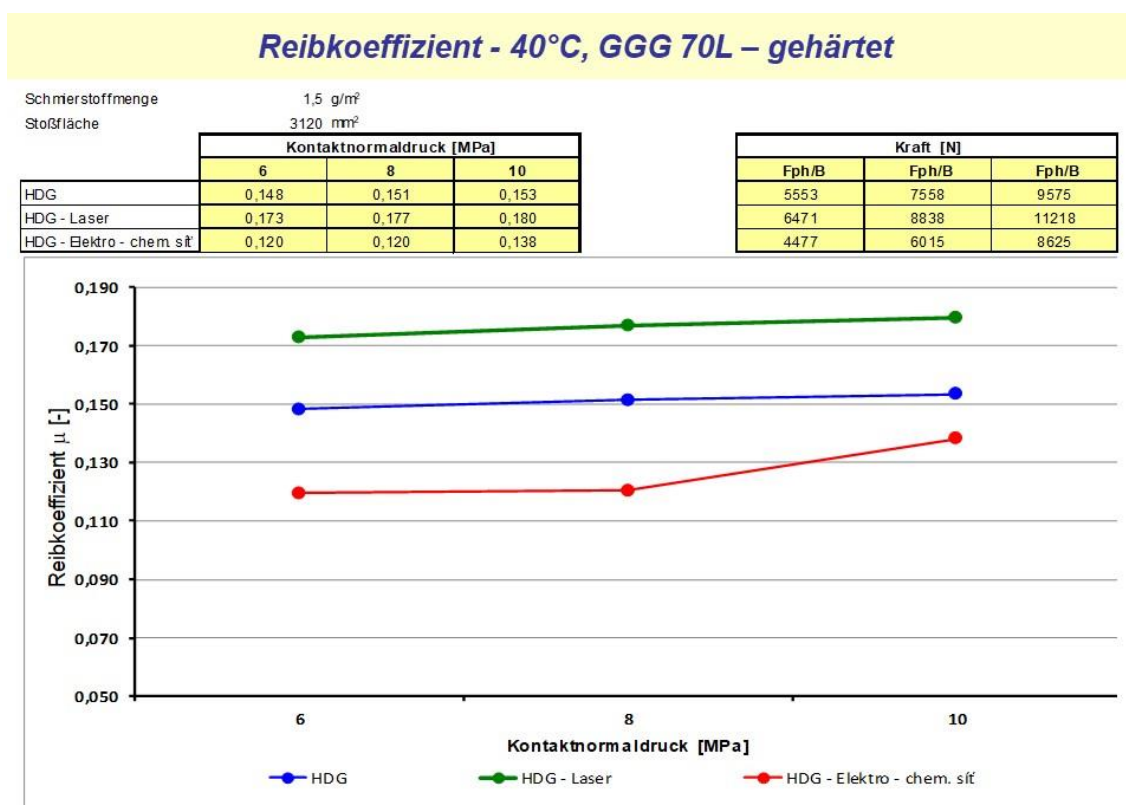
Teplota pozadí:	22,0 °C
Emisivita:	0,96
Průměrná teplota:	28,4 °C
Rozsah obrázku:	20,2 °C až 55,8 °C
Model kamery:	Ti400
Velikost IR senzoru:	320 x 240 mm
Vzdálenost k cíli:	0,58 m

Tab. 16: Výsledky z protokolu měření teploty termokamerou 48.

4.7. Tribologické hodnocení materiálu

Při porovnání tribologických zkoušek mezi plechem bez sítí (HDG), elektrochemicky leptanou sítí (HDG - El. Chem. sít') a laserovanou sítí (HDG – Laser) můžeme říct, že pokud budeme brát plech bez sítě (HDG) jako nominální hodnotu pak laserovaná sít' má o 17 % vyšší koeficient tření. V porovnání tomu elektrochemicky leptaná sít' vykazuje o 16 % nižší koeficient tření viz. obrázek 49. Rozdíl koeficientu tření mezi maximální a minimální hodnotou je 33 %.

Nižší koeficient tření u elektrochemického leptání je důsledkem vyloučení fosfátové vrstvy z elektrolytu. Tato vrstva zde funguje jako lubrikant. Oproti tomu u laserované sítě narůstá lokálně drsnost povrchu v místě bodů z důvodu zanechání stop po laseru.



Obr. 49: Závislost koeficientu tření na kontaktním tlaku.[38]

5. Diskuse

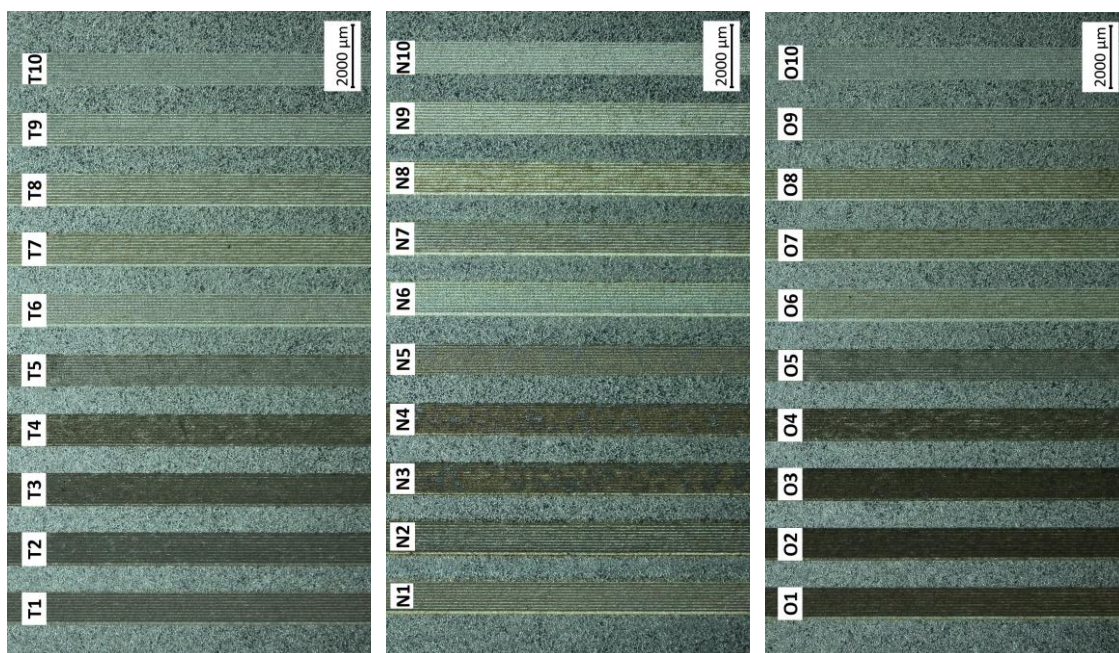
Úvodní myšlenkou, z níž tato diplomová práce vznikla, byla možnost substituce stávající technologie elektrolytické depozice bodového rastru pro sledování deformací karosářských plechů při tváření. Elektrolytická depozice neumožňuje sériové zavedení na stávající výrobní stroje, není ergonomicky a ekologicky přijatelná, operátor dýchá výpary z elektrolytu a finančně náročná na spotřební materiál. Z výše uvedených důvodů se jevila atraktivní možnost využití laseru. Depozice rastru pomocí laseru je rychlá, čistá, ekologická, umožňuje automatizaci, jednodušší obsluhu a nevyžaduje spotřební materiál. Cílem diplomové práce byla optimalizace nastavení parametrů laseru tak, aby nanesený rastr byl strojově identifikovatelný a aby nedocházelo k ovlivnění výsledků deformačních testů procesem depozice rastru.

Prvním problémem depozice rastru, se kterým jsem se hned na začátku práce setkal, bylo prvotní nastavení laseru na žárový zinek. Laser pro fokusaci využívá měření průměru svazku navigačního laseru. Z důvodu vysoké odrazivosti zinkového povlaku docházelo k rozptylu laseru a tím ke špatnému měření průměru laseru. Tento problém byl vyřešen snížením jasů a kontrastu fokusační kamery.

Použitý laser KEYENCE MD-X 1520C umožňuje nastavení široké škály parametrů. Z důvodu kapacitních limitů této práce jsem zvolil dva parametry – pulzní frekvenci a rychlost posuvu. Variací výše zmíněných parametrů byly připraveny testovací rastry; prvotní hledání vhodných parametrů pak vycházelo z přímého porovnávání kontrastu laserovaných bodů s body získanými pomocí elektrochemického leptání. Na připravených laserovaných testovacích rastroch jsem využil celý nastavitelný pracovní rozsah. Po nalezení optimálních nastavení jsem přešel na laserování vzorků v plné velikosti 300×300 a následnému lisování vzorků.

Dalším podnětem vyžadujícím experimentální ověření je samotná fotogrammetrická analýza GOM Argus. Způsob a směr nasvícení vzorku vykazuje velký vliv na nasnímaná data. Při snímání jsem používal jeden směrový blesk s rozptylkou. V případě použití homogenního všesměrového osvětlení by pravděpodobně byla úspěšnost vyhodnocení vyšší.

Jak je patrné z výsledků uvedených v kapitole “Morfologie povrchu”, jednou z možností zvýšení kontrastu bodů je aplikace aditiv na povrch plechu před laserováním. Přímé porovnání vycházející ze stavu znečištění povrchu před laserováním je uvedeno na obr. 50.



Obr. 50: Porovnání vlivu znečištění povrchu plechu před laserováním na kontrast laserované stopy. Vlevo je povrch očištěný se zbytky Technosolu; uprostřed je vzorek odmaštěný; vpravo vzorek s konzervačním olejem. Jak je dobře patrné, u vzorku s olejem (O) bylo možné docílit vysokého kontrastu srovnatelného či lepšího než u ostatních stavů povrchu (T, N) již při 30 kHz a 400 mm/s (viz. O1).

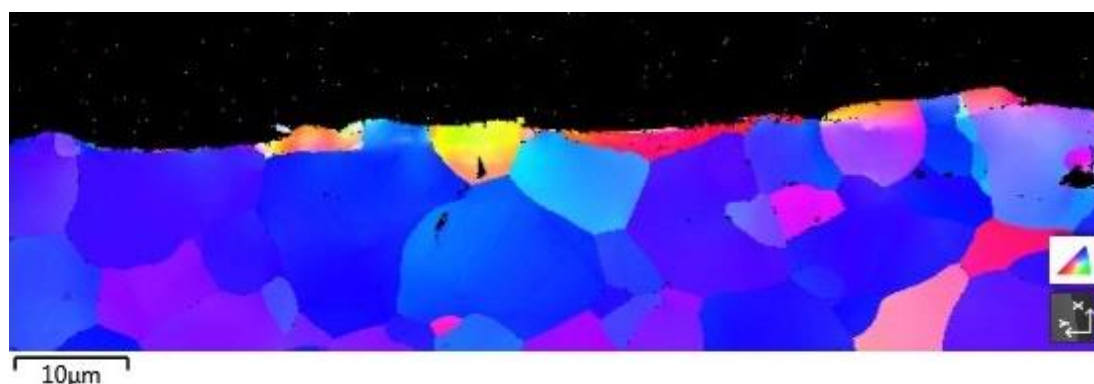
Možnost využití reziduí oleje běžně se vyskytujícího přímo v technologickém procesu poskytuje lákavou ekonomicky přijatelnou možnost navýšení kontrastu při současném snížení množství vneseného tepla (použití nižších pulzních frekvencí a rychlejších posuvů) vedoucích k menšímu ovlivnění povrchu a substrátu. Zajímavou alternativou by také mohly poskytnout například termocitlivé pigmenty, jež by umožnily další snížení vnesené energie potřebné pro docílení požadovaného kontrastu. V případě cíleného využití těchto přístupů by bylo opět nutné nejprve ověřit vliv na tvařitelnost, jelikož nauhličená vrstva by mohla mít vyšší tvrdost a tím i vyšší náchylnost k praskání.

Následné deformační testy vyhodnocené pomocí systému ARGUS identifikovaly další problém, jelikož se ukázalo, že naměřené hodnoty ztenčení jsou závislé na parametrech depozice, vzorky s vyšším vneseným teplem (vyšší frekvence pulzů + pomalejší rychlost posuvu) se deformovaly nerovnoměrněji. U vzorků síťovaných pomocí laseru také

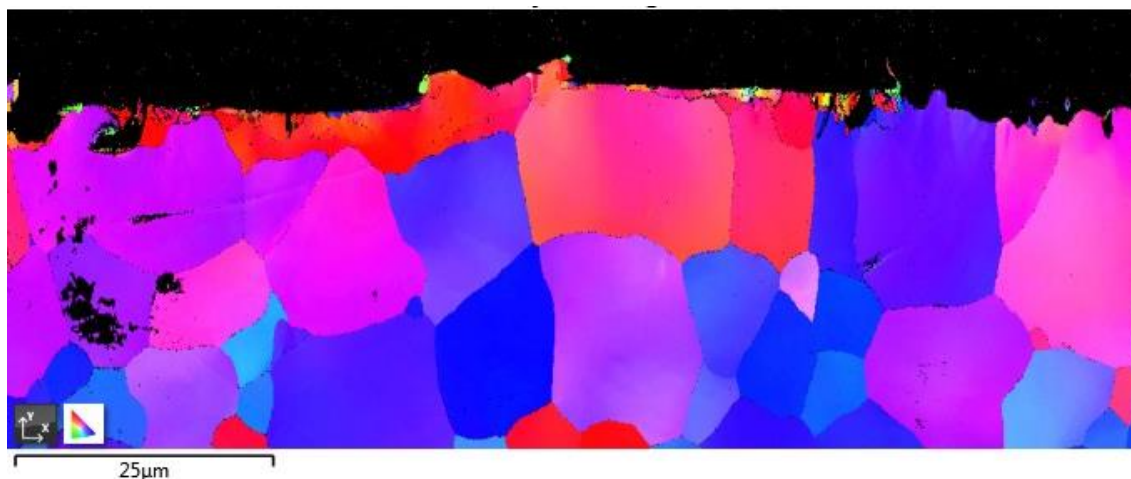
docházelo ke tvorbě trhlin sledujících bodový rastr (viz obr. 22). Následná měření prokázala změnu koeficientu tření. Zatímco elektrolytická depozice rastru vedla k poklesu tření přibližně o 16 % pravděpodobně v důsledku vyloučení fosfátu z elektrolytu, při depozici pomocí laseru koeficient tření vzrostl přibližně o 17 %.

Metalografické analýzy prokázaly příčinnou souvislost vzniku trhlin s laserováním. Důsledkem vneseného tepla a mechanického působení vysokoenergetického laserového svazku docházelo v závislosti na nastavených parametrech ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti a případně i ke tvorbě vrubů.

Při porovnání EBSD IPF-Y map (Obr. 50 a 51) je patrné tepelné ovlivnění materiálu. EBSD IPF mapy využívají barevného RGB kódování pro zobrazení vztahu orientace krystalové mřížky vůči zvolenému směru vzorku. V použité mapě IPF Y červená barva značí $\langle 100 \rangle \parallel \text{ND}$; zelená $\langle 110 \rangle \parallel \text{ND}$ a modrá $\langle 111 \rangle \parallel \text{ND}$, kde ND je normálový směr kolmý k rovině plechu. Dominantní modrá barva v IPF-Y mapě na obr. X značí orientaci krystalové mřížky, kdy je tělesová úhlopříčka paralelní s ND, což je zapříčiněno tlakovými deformacemi vyvolanými válci při drezírování hlubokotažných plechů. Červená barva pozorovaná na obr. X+1 značí orientaci, kdy je hrana BCC krystalové mřížky rovnoběžná s normálovým směrem, který zde odpovídá směru disipace tepla uvolněného při tuhnutí laserem nataveného základního materiálu a umožňuje nám tak snadno identifikovat hloubku natavení substrátu.



Obr. 51: EBSD IPF-Y mapa povrchu vzorku ve výchozím stavu – bez tepelného ovlivnění.



Obr. 52: EBSD IPF-Y mapa laserovaného povrchu vzorku N5.

6. Závěr

Tato diplomová práce je věnována optimalizaci procesních parametrů nanášení bodových rastrů pro deformační analýzy na žárově zinkovaný IF plech používaný pro výrobu dílů karoserií.

Pomocí dostupných metod zde byly testovány různé variace nastavení rychlosti a pulzní frekvence laseru a jejich vliv na strojovou čitelnost, deformační chování a strukturu materiálu.

Jako nejlepší variantu nastavení laseru pro hodnocení deformace bych vyhodnotil vzorky: LA40/3 (Vzorek N1), LA40/5 (Vzorek N2), LA40/7 (Vzorek N3), LA40/10 (vzorek N4), LA50/10, LA60/10, jelikož tato nastavení vytváří nejlepší možný strojově čitelný rastr. U vzorků LA40/3 (Vzorek N1), LA40/5 (Vzorek N2), LA40/7 (Vzorek N3) současně nedochází k přílišnému tepelnému ovlivnění vzorku. U těchto třech parametrů se dá pozitivně ovlivnit i kontrast přidáním olejové vrstvy, jak je možné vidět na obrázku 50.

Proto navrhuji vyzkoušet výše uvedené parametry v běžné produkční praxi, jelikož je zde potenciál pro strojové nanášení rastru bez vedlejších účinků na základní materiál.

Domnívám se, že aplikace rastru laserovým paprskem by mohla mít jak ekonomický (odpadá nákup spotřebního materiálu) tak i efekt ekologický, případně i dopad do oblasti bezpečnosti práce, kdy při laserovém nanášení rastru nevznikají chemické výpary, před kterými je nutné zaměstnance chránit.

7. Bibliografie

- [1] DUCHÁČ, Alfred. *Analýza tvařitelnosti uhlíkových ocelí* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/72999/F2-BP-2017-Duchac-Alfred-Bakalarska_prace_Alfred_Duchac_2017.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jakub Horník, Ph.D
- [2] TAKAHASHI, Manabu. Sheet Steel Technology for the Last 100 Years: Progress in sheet steels in hand with the automotive industry. *Tetsu-to-Hagane* [online]. 2014, **100**(1), 82-93 [cit. 2022-05-13]. ISSN 0021-1575. Dostupné z: doi:10.2355/tetsutohagane.100.82
- [3] LICHOROBIEC, Vojtěch. *Vliv vodíku na pevnost a svařitelnost vysokopevných martenzitických ocelí pro automobilové aplikace* [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/37122/Lichorob;jsessionid=4FEEF7E4CFEDC82F72BE9D92F6C0E480?sequence=1>. Bakalářská práce. Univerzita pardubice. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.
- [4] JANOVEC, Jiří, CEJP, Jiří a STEIDL, Josef. Perspektivní materiály: revue littéraire mensuelle. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [5] Dual Phase Steel: Part One. Total Materia [online]. Swiss: Metals, 2020 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=IT&NM=561>
- [6] EVIN, Emil a Miroslav TOMÁŠ. Comparison of Deformation Properties of Steel Sheets for Car Body Parts. *Procedia Engineering* [online]. 2012, 48, 115-122 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: DOI:10.1016/j.proeng.2012.09.493
- [7] JÍRA, Tomáš. Využití optického systému ARGUS 4M pro analýzu deformace v kritických oblastech výlisku [online]. Liberec, 2007 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/3228>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Pavel Solfronk Ph.D.

- [8] SARKAR, B., Anjana DEVA, Debasis MUKERJEE, A. S. MATHUR a S. Mukhopadhyay B. K. JHA. *Processing and application of interstitial free(IF) grade steel: Prospects in SAIL* [online]. Jamshedpur, India, 2010 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268226160_Processing_and_application_of_interstitial_freeIF_grade_steel_Prospects_in_SAIL. Conference: International Conference on Interstitial Free Steels: Manufacturing and Applications IFSTEEL 2010.
- [9] DVOŘÁK, Milan a PILVOUSEK, Tomáš. *Materiály používané pro stavbu karoserie: Přednáška VUT v Brně. Mladá boleslav, 2014.*
- [10] KOLNEROVÁ, Michaela, Jiří SOBOTKA a Pavel SOLFRONK. Adhesive Bonding Joints of Coating with Zn/Mg Layer on Sheets for Car-Body Panels at Temperature Loading. *Key Engineering Materials* [online]. 2015, 669, 167-175 [cit. 2022-05-13]. ISSN 1662-9795. ISSN 18777058.
- [11] DIN EN 10346. Continuously hot-dip coated steel flat products - Technical delivery conditions. 1. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009.
- [12] DIN EN 10152. Electrolytically zinc coated cold rolled steel flat products for cold forming. 1. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009.
- [13] SOLFRONK, Ing. Pavel. Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace při tažení výlisků z plechu [online]. Liberec, 2018 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38720>. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
- [14] PROCHÁZKA, Jiří. *Technologie slévání, tváření a svařování. První.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1982.
- [15] MICHAL, Valeš. Porovnání různých šarží materiálu DC06 na rychlost deformace. *Studentská tvůrčí činnost* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016, **2016**, 4 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://stc.fs.cvut.cz/history/2016/sbornik/papers/pdf/6517.pdf?_=1460314683
- [16] SOLFRONK, P. a J. SOBOTKA. Utilization of Forming Tool with Variable Blankholder Force for Drawing of Al Alloys. *Physics Procedia* [online]. Liberec, 2011, **22**, 233-238 [cit. 2022-05-10]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.11.037
- [17] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty.* 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [18] ARGUS: Optical Solution for Forming Analysis [online]. Braunschweig: GOM Metrology, 2022 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing/argus>
- [19] FRĄCZ, Wiesław, Feliks STACHOWICZ a Tomasz PIEJA. ASPECTS OF VERIFICATION AND OPTIMIZATION OF SHEET METAL NUMERICAL SIMULATIONS PROCESS USING THE PHOTOGRAMMETRIC SYSTEM. *Acta Metallurgica Slovaca* [online]. 2013, 19(1), 51-59. ISSN 1338-1156.
- [20] JELÍNEK, Dan. *3D OPTICKÉ MĚŘICÍ SYSTÉMY VHODNÉ PRO TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148892. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
- [21] MRÁZEK, David. Ověření určování velikosti deformací pomocí systému ARGUS [online]. ČVUT v Praze, 2015 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63611/F2-DP-2015-Mrazek-David-Diplomova%20prace_David_Mrazek.pdf?sequence=-
- [22] GRUFÍK, Lubomír. Deformační sítě a jejich využití v technologii tváření [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2009 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15755
- [23] TSANG, Kwun Sing, William ION, Paul BLACKWELL and Martin ENGLISH. Industrial validation of strain in cold roll forming of UHSS. *Procedia Manufacturing* [online]. UK, 2018, **15**, 788-795 [cit. 2022-05-10]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2018.07.322
- [24] KUČERA, Radek. Význam deformační sítě v oblasti tváření [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2012 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51373
- [25] LAZOV, Lyubomir, Edmunds TEIRUMNIEKS, Tsanko KARADZHOV a Nikolay ANGELOV. *Influence of power density and frequency of the process of laser marking of steel products* [online]. 2021, **116** [cit. 2022-05-09]. ISSN 13504495. Dostupné z: doi:10.1016/j.infrared.2021.103783
- [26] Příspěvatelé WikiSkript, Laser [online], , c2020, Datum poslední revize 19. 06. 2020, 12:48 UTC, [citováno 09. 05. 2022] <<https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Laser&direction=next&oldid=385894>>

- [27] SIEGMAN, Anthony E. *Lasers*. The first edition. California: University Science Books, 1986. ISBN 0-935702-11-3. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=1BZVwUZLTkAC&lpg=PR13&ots=6BdkWU3jNg&dq=lasers&lr&hl=cs&pg=PA2#v=onepage&q=lasers&f=false>
- [28] KOŘÁN, Ing. Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY – ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. *Lasery a Optika* [online]. LAO – průmyslové systémy, 2013, 2013, 1 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [29] *Produktový datový list: MD-X1520C* [online]. Belgium: Keyence international, 2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.keyence.eu/cscz/mykeyence/downloadFromDLList?downloadAssetId=DS_25X152C&downloadZipFlag=0&a=1
- [30] BŘÍŽĎALA, RNDr. Jan. Elektrolýza. *E-ChemBook* [online]. Třebíč: RNDr. Jan Břížďala, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <http://e-chembook.eu/elektrolyza>
- [31] ÖSTLING MARKING SYSTEMS GMBH. Materiálový bezpečnostní list: Elektrolyt E1. Verze 2.0. Solingen, 204n. 1., 7 s.
- [32] ÖSTLING MARKING SYSTEMS GMBH. Operating instructions EU 300 Classic. Eu100-manual-v104. Solingen, 1999, 23 s. Dostupné také z: <http://www.trendmarking.com.au/downloads/etching/eu300classic-manual.pdf>
- [33] KELLER, Vojtěch. Optimalizace metalografických postupů s využitím elektrolytického leštění [online]. Liberec, 2015 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/17494/Hodnocen%C3%AD%2Bvedouc%C3%ADho%2BBP%2B-%2BKeller.pdf?sequence=2>. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Pavel Hanus, Ph.D.
- [34] Laser Marker Setting Software: Marking Builder 3 User's Manual. Japan: KEYENCE CORPORATION, 2018, 168 s. 96M15110-1.
- [35] ABITEC, S.R.O. Bezpečnostní list: Technosol. Verze 5.0. Praha, 2011, 10 s.
- [36] STOUDT, M a J HUBBARD. Analysis of deformation-induced surface morphologies in steel sheet. *Acta Materialia* [online]. 2005, 53(16), 4293-4304 [cit. 2022-05-13]. ISSN 13596454.
- [37] FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE. Bezpečnostní list: Anticorit PL 3802-39 LV. Verze 2.0. Mannheim: Fuchs Europe Schmierstoffe, 2014, 16 s.
- [38] SOLFRONK, PH.D., Ing. Pavel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Tribologie: HGD, HDG – Laser síť, HDG – Elektrochemická síť. Liberec, 2020, 7 s.

8. Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení ocelí dle mechanických vlastností [5].....	12
Obr. 2: Grafické znázornění aplikace moderních materiálu na automobilové karoserii [9].....	13
Obr. 3: Používané povrchové úpravy na automobilu [9].....	14
Obr. 4: Ilustrace měření výlisku ruční kamerou [18]	16
Obr. 5: Ilustrace změny kruhových bodů v závislosti na deformaci [21].....	17
Obr. 6: Příklad používaných deformačních sítí [21]	17
Obr. 7: Deformační síť používaná systémem GOM Argus.....	18
Obr. 8: Základní princip laseru [28]	19
Obr. 9: Ilustrační obrázek nanášení elektrochemicky leptané sítě. [18].....	21
Obr. 10: Ukázka rozložení testovacího rastru [34].....	22
Obr. 11: Vzorek N1 – N10 pro metalografii	35
Obr. 12: Šestiúhelníková síť pro elektrochemické leptání.	37
Obr. 13: Ukázka hodnocení vzorků.....	38
Obr. 14: Výsledné vyhodnocení ztenčení elektrochemicky leptané sítě. Vzorek Lept 3.	38
Obr. 15: Výsledek vyhodnocení ztenčení vzorku se sítí deponovanou pomocí laseru. Na vzorku LA60/10 je oproti obrázku 14 výraznější ztenčení materiálu a zároveň nedokonalé strojové rozpoznání jednotlivých bodů.	39
Obr. 16: Vzorek LA40/3. Obr. 17: Vzorek LA40/5.	41
Obr. 18: Vzorek LA40/7 Obr. 19: Vzorek LA40/10	42
Obr. 20: Vzorek LA50/10 Obr. 21: Vzorek LA60/10	42
Obr. 22: Makrosnímek trhliny na výlisku, ke je patrná trhlina procházející skrz laserované body. Dále si můžeme všimnout deformace bodů zapříčiněné velkou lokální deformací hlubokým tahem.	43
Obr. 23: Standard – Běžným způsobem odmaštěný materiál.....	44
Obr. 24: Porovnání chemických spekter u vzorků N1 až N5	45
Obr. 25: Porovnání chemických spekter u vzorků N6 až N10	46
Obr. 26: Olej – Olejem zamaštěný materiál.	47
Obr. 27: Technosol – Zanechaná rezidua čistící směsi	47
Obr. 28: Oxidace zinku, kde elektrolyticky deponované tmavé body jsou oxidy a světlé okolí je zinkový substrát.....	48
Obr. 29: Porovnání naneseného bodu s okolím.....	49

Obr. 30: Mapy ukazující distribuci jednotlivých prvků	50
Obr. 31: N1 (LA40/3) Obr. 32: N2 (LA40/5).....	50
Obr. 33: N3 (LA40/7) Obr. 34: N4 (LA40/10).....	51
Obr. 35: N5 (LA40/13).....	51
Obr. 36: EDS liniová mapa vzorku N5 (LA40/13) ukázala střídání oblastí bohatých na zinek s oblastmi, kde došlo k obnažení základního materiálu (Fe), to vše doprovázené oxidací.	51
Obr. 37: N6 (LA130/3) Obr. 38: N7 (LA130/5).....	52
Obr. 39: N8 (LA130/7) Obr. 40: N9 (LA130/10).....	52
Obr. 41: N10 (LA130/13).....	52
Obr. 42: Poslední stopa laseru. Obr. 43: Měření stopy laseru.	53
Obr. 44: Metalografický výbrus vzorku N5 zobrazený pomocí rastrovacím elektronovém mikroskopu v topografickém kontrastu.	54
Obr. 45: Detail metalografického výbrusu vzorku N5 zobrazený pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu v orientační kontrastu.....	55
Obr. 46: EBSD IPF-Y mapa. Jednotlivé barvy znázorňují konkrétní orientace krystalové mřížky vztaženou k normálové směru vzorku.	56
Obr. 47: Měření teploty termokamerou za normálních podmínek.	56
Obr. 48: Měření teploty termokamerou bez negativu sítě.	57
Obr. 49: Závislost koeficientu tření na kontaktním tlaku.[38]	58
Obr. 50: Porovnání vlivu znečištění povrchu plechu před laserováním na kontrast laserované stopy. Vlevo je povrch očištěný se zbytky Technosolu; uprostřed je vzorek odmaštěný; vpravo vzorek s konzervačním olejem. Jak je dobře patrné, u vzorku s olejem (O) bylo možné docílit vysokého kontrastu srovnatelného či lepšího než u ostatních stavů povrchu (T, N) již při 30 kHz a 400 mm/s (viz. O1).....	60
Obr. 51: EBSD IPF-Y mapa povrchu vzorku ve výchozím stavu – bez tepelného ovlivnění.	61
Obr. 52: EBSD IPF-Y mapa laserovaného povrchu vzorku N5.....	62

9. Seznam tabulek

Tab. 1: Značení HDG ocelí dle normy DIN EN 10346 [11]	14
Tab. 2: Značení EG ocelí dle normy DIN EN 10152 [12]	15
Tab. 3: Přehled nastavení vzorků od 1 do 11.	26
Tab. 4: Přehled nastavení vzorků od 12 do 22	28
Tab. 5: Přehled nastavení vzorků od 23 do 33	30
Tab. 6: Přehled nastavení vzorků od 34 do 44	32
Tab. 7: Přehled nastavení vzorků od 45 do 55	34
Tab. 8: Technologický postup zalévání	36
Tab. 9: Technologický postup broušení a leštění.	36
Tab. 10: Průměrné hodnoty ztenčení u jednotlivých nastavení:.....	39
Tab. 11: Hodnoty koncentrace uhlíku zjištěné pomocí EDS analýzy.	44
Tab. 12: Chemické složení vzorků N1 až N5 v atomárních procentech.	45
Tab. 13: Chemické složení vzorků N6 až N10 v atomárních procentech.	46
Tab. 14: Chemické složení povrchu a elektrochemicky leptané sítě.....	49
Tab. 15: Výsledky z protokolu měření teploty termokamerou obrázku 47.....	57
Tab. 16: Výsledky z protokolu měření teploty termokamerou 48.....	57

10. Seznam grafů

Graf 1: Čas potřebný na tvorbu sítě o rozměrech 300 mm × 300 mm.	40
Graf 2: Střední hodnoty míry ztenčení u jednotlivých nastavení s vyznačeným optimálním pásem.....	40