



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

**Hodnocení vybraných metod pro posouzení materiálu ovlivněného
svarem**

**Evaluation of selected methods for design of material affected by
welding**

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích 3

Studijní obor: Technologie údržby letadel

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.

Lukáš Zeman

Praha 2022



K618..... Ústav mechaniky a materiálů

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Lukáš Zeman

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – TUL – Technologie údržby letadel

Název tématu (česky): **Hodnocení vybraných metod pro posouzení materiálu ovlivněného svarem**

Název tématu (anglicky): Evaluation of the selected Methods for Design of Material affected by Welding

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Hlavním cílem práce je zhodnotit proveditelnost vybraných experimentálních a analytických metod výzkumu stavu svaru a zhodnotit jejich přínos pro možné zlepšení aluminotermického svařování.
- Experimentální vyšetření napětového stavu ve spojovaném materiálu a jeho vývoje v čase od začátku procesu až k ochlazení svaru na teplotu okolí
- Využití optické metody (například skenovací laserové triangulace) ke zjištění výškového dotvarování svaru zabroušeného při zvýšené teplotě po zchlazení na teplotu okolí
- Mikrotvrdoměrným zařízením zjistit rozdělení tvrdosti v místě svaru i v tepelně ovlivněné oblasti
- Provést extrakci vzorku v podobě pásku v místě svaru, pásek vyleštit, metalograficky upravit a pomocí skenovacího elektronového mikroskopu s EDS sondou studovat morfologii polykrystalické struktury a její prvkové složení



Rozsah grafických prací: - není stanoven -

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

Seznam odborné literatury: Sharma, I.G & Majumdar, Sanjib & Chakraborty, S.P & Suri, A.K.. (2003). Aluminothermic preparation of Hf-Ta and Nb-10Hf-1Ti alloys and their characterization. Journal of Alloys and Compounds. 350. 184-190. 10.1016/S0925-8388(02)00999-4. Patricio & Eagar, Thomas. (2001). Welding processes for aeronautics. Advanced Materials and Processes. 159. 39-43.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **16. září 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **8. srpna 2022**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.
vedoucí
Ústavu mechaniky a materiálů



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Lukáš Zeman
jméno a podpis studenta

V Praze dne 12. dubna 2022



Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na hodnocení metod pro posouzení stavu materiálu ovlivněného aluminotermickým svařováním nosných profilů. Vybrané metody jsou uplatněny experimentálně a pro názornost měření také metoda svaření, při níž dochází k obrovskému sdílení tepla mezi spojovanými součástmi, které podmiňuje rozsah tepelně ovlivněné oblasti. Dále tato metoda přináší možnost přípravy titanové slitiny, čímž roste její uplatnění a může být zahrnuta i v letectví, této možnosti je věnována diskuse. Práce poukázala na použitelnost jednotlivých experimentálních metod, jejich možnou úpravu nebo vylepšení a závěrem práce výsledky odhalují výhody aluminotermické reakce.

Klíčová slova: tenzometry, digitální korelace obrazu, profilometrie, tvrdost, skenovací elektronový mikroskop, termografie, aluminotermická reakce



Abstract

The bachelor thesis focuses on the evaluation of methods for the assessment of material condition affected by aluminothermic welding of load-bearing profiles. The selected methods are applied experimentally and also the welding method is used to illustrate the measurements, in which there is a huge heat sharing between the joined components which determines the extent of the heat affected area. Furthermore, this method brings the possibility of preparing titanium alloy thus increasing its application and can be included in aerospace, this possibility is discussed. The thesis pointed out the applicability of the different experimental methods, their possible modification or improvement and finally the thesis results reveal the advantages of aluminothermic reaction.

Keywords: strain gauges, digital image correlation, profilometry, hardness, scanning electron microscope, thermography, aluminothermic reaction



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Jaroslavu Valachovi, Ph.D. za jeho vedení, cenné odborné rady a vstřícný přístup. Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Zlámalovi, Ph.D. za pomoc a nespočetné rady při mých experimentálních začátcích. Mé díky patří také Ing. Nele Krčmářové z Fakulty dopravní ČVUT a Mgr. Veronice Koudelkové z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR v.v.i. za pomoc s přípravou vzorků a jejich SEM analýzou. Dále děkuji firmě Pandrol a.s. za možnost svaření profilů a poskytnutí konzultací, dokumentace a prostorů. V neposlední řadě děkuji svým nejbližším za velikou morální podporu.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci s názvem Hodnocení vybraných metod pro posouzení materiálu ovlivněného svarem vypracoval/a samostatně a použil/a k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

Praze dne 31. července 2022

.....

Podpis



Obsah

LITERÁRNÍ ČÁST	2
1. Vybrané metody experimentální mechaniky	2
1.1. Měření změny tvaru, deformací a napětí	2
1.1.1. Profilometrie	2
1.1.2. Tenzometrické šetření stavu deformace	3
1.1.3. Digitální korelace obrazu (DIC)	4
1.2. Měření pevnosti materiálu	5
1.2.1. Zkouška tvrdosti.....	5
1.3. Mikrostruktura materiálu a její studium	6
1.3.1. Skenovací elektronový mikroskop (SEM).....	6
1.4. Záznam a analýza dějů ovlivňujících mikrostrukturu.....	8
1.4.1. Infračervený teploměr	8
1.4.2. Termografie	9
2. Úvod do problematiky svařování	10
2.1. Procesy svařování.....	12
2.1.1. Vybraný proces svařování pro aplikaci experimentálních metod	12
2.1.2. Metody svařování v letectví.....	15
3. Shrnutí literární části	18
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	19
4. Laboratorní ověření vybraných tenzometrů	19
5. Experimentální měření deformace v průběhu svařování.....	26
6. Digitální korelace obrazu.....	31
7. Termografie.....	35
8. Profilometrie	35
9. Tvrdost.....	37
10. Skenovací elektronový mikroskop	38
PREZENTACE VÝSLEDKŮ.....	41
11. Tenzometrické šetření napěťového stavu v laboratorní peci.....	41
12. Tenzometrické šetření napěťového stavu v průběhu svařování.....	42
13. Profilometrie	44
14. DIC.....	48



15. Tvrdost.....	50
16. SEM.....	51
17. Termografie.....	54
Diskuze výsledků	56
Závěr	59
Seznam použité literatury	60



Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 – Konfigurace laserové hlavy s povrchem	2
Obr. 2 – Schéma laserové triangulace [2].....	3
Obr. 3 – Schéma funkce metody 2D-DIC [5]	5
Obr. 4 – Pohled na vpich v materiálu přes mikroskop tvrdoměru – metodou podle Vickerse (úhlopříčka přibližně 0,68mm)	6
Obr. 5 – Schéma interakce svazku se vzorkem.....	8
Obr. 6 – Schéma funkce IR teploměru [13].....	9
Obr. 7 – schéma funkce termokamery/termálního zobrazovače [15]	10
Obr. 8 – Graf funkcí popisující závislosti mezi tepelnou intenzitou, interakční dobou, rychlosti posunu svářečky a velikostí průměru bodu zdroje tepla (oranžová oblast), zobrazení hranice procesů a doby reakce svářeče. [16]	11
Obr. 9 – Velikost TOO jako funkce intenzity a tepla ze zdroje [16]	11
Obr. 10 – Geometrie modelovaného termitového systému a hlavní parametry modelu: a) celkový pohled na systém s reakční frontou šířící se zleva doprava, b) zvětšený pohled na jednu dvojici částic paliva a oxidu s jejími vícenásobnými rozhraními při šíření reakce	13
Obr. 11 – Schéma propojení tenzometru Kyowa s adaptérem [34].....	20
Obr. 12 - Fóliový tenzometr [35]	20
Obr. 13 – Laboratorní komorová pec LE od firmy LAC	21
Obr. 14 – Polotovár	21
Obr. 15 – Schéma zapojení polovičního Wheatstonova můstku do konektoru RJ45	22
Obr. 16 – Terminál VT810.....	22
Obr. 17 – Blokové schéma ústředny MGCplus s AB22A a modulem AP810	23
Obr. 18 – Zapojený Hardware pro ověření tenzometrů	23
Obr. 19 – Schéma 1. obvodu.....	24
Obr. 20 – Polynomiální závislost teplotní samokompence udaná výrobcem.....	24
Obr. 21 – 2. a 3. obvod ve schématu.....	25
Obr. 22 – Postup lepení: A. Narýsovaná pole, B. Lepení pájecích spojů, C. Zafixované spoje i tenzometry, D. Výsledek lepení.	25
Obr. 23 – Tenzometry připravené pro experiment	26
Obr. 24 – Měření teploty povrchu IR teploměrem (dvě červené tečky na objektu ukazují místo, ve kterém se teplota zjišťuje).....	27
Obr. 25 – Vyrovnání profilů pomocí klínů s přiloženým pravítkem	28



Obr. 26 – Vyleštěné plochy pro SG	29
Obr. 27 – Terčíky pro umístění SG	29
Obr. 28 – Zatížení tenzometrů	30
Obr. 29 – Nalepený SG GE-LM11	30
Obr. 30 – Připájené SG k obvodu	30
Obr. 31 – Schéma zapojení SG	30
Obr. 32 – Vyznačené umístění SG po profilu HEB140	31
Obr. 33 - Kontrastní stochastický vzor vytvořený barvami	31
Obr. 34 –Přehledové rozestavení aparátů pro záznam svařovacího děje	32
Obr. 35 – Umístění aparátů pro DIC i s pohledem na snímanou scénu	32
Obr. 36 – Vybrané oblasti pro DIC, označené jako crop 0X	33
Obr. 37 – Měřítka použité pro přepočítání jednotlivých pixelů na milimetry	33
Obr. 38 – 4 korelační body v oblasti crop 01	33
Obr. 39 – Schématické vyjádření rozměrů a posunutí jednotlivých snímaných polí	34
Obr. 40 – Umístění alobalové clonky v obrazu kamery	35
Obr. 41 – Sestava profilometru s měřeným vzorkem	36
Obr. 42 – Elektronické pravítko EML-T/2003	36
Obr. 43 – označené polohy bodů vpichu	37
Obr. 44 – Ukázka měření tvrdosti	37
Obr. 45 – Tvrdoměr Meopta POLDI 568 01	38
Obr. 46 – Protokol o produktu, část měření tvrdosti v ose svaru	38
Obr. 47 – vyleštěný vzorek pro SEM	39
Obr. 48 – Postup přípravy vzorku, A – leptání vzorku, B – leptaný vzorek – odmaštěný, C – umístění vzorku na stolek SEM	39
Obr. 49 – Průběh deformace měřený tenzometry LY61	41
Obr. 50 – Průběh zvyšování teploty v laboratorní peci	41
Obr. 51 – Průběh deformace tenzometru (GE-LM11) 1 v ose pásnice	42
Obr. 52 – Průběh deformace tenzometrů (GE-LM11) 2 a 3 na horním čele obou stojin	42
Obr. 53 – Srovnání průběhů deformace mezi tenzometry (GE-LM11) 1,2 a 3. Bod A označuje počátek vlivu předehřevu, B počátek vlivu vlitého svařovacího kovu, C největší sdílené teplo a maximální teplota v místech tenzometrů	43



Obr. 54 – Ukázka výsledku svařování při správném provedení	44
Obr. 55 – 2D výškový průběh broušeného svaru stojiny profilu HEB – s boční deformací.....	44
Obr. 56 – Srovnání – profilometrie pomocí elektronického pravítka EML-T/2003 profilu HEB	45
Obr. 57 – 3D výškový průběh svaru profilu HEB – s boční deformací (výhodou 3D zobrazení je, že ukazuje kompletnější informaci o výsledném tvaru, ze které lze vyčíst i přítomnost zkroucení).....	46
Obr. 58 – 3D ukázka výškového průběhu výsledku svařování při správném provedení.....	47
Obr. 59 – Vykreslení posunu jednotlivých polí v čase při procesu svařování ve směru x.....	48
Obr. 60 - Vykreslení posunu jednotlivých polí v čase při procesu svařování ve směru y	48
Obr. 61 – Vykreslené výsledky výpočtu teplotní dilatace mezi oblastmi ve směru x a y.....	49
Obr. 62 – Vypočtený průběh přírůstku teploty ve snímaném poli.....	49
Obr. 63 – Závislost tvrdosti na vzdálenosti od svaru profilu HEB	50
Obr. 64 – Snímky leptaného vzorku ze SEM JSM-IT200 za použití detektoru BSE pro a), c) a detektoru SE pro b), d). 51	
Obr. 65 – Snímky leptaného vzorku ze SEM JSM-IT200 za použití detektoru BSE pro a) a detektoru SE pro b).....	52
Obr. 66 – Snímky vzorku ze SEM MIRA II LMU za použití detektoru SE pro a) a b)	52
Obr. 67 – Snímky vzorku ze SEM MIRA II LMU za použití detektoru BSE pro a) a b)	53
Obr. 68 – Snímky vzorku ze SEM MIRA II LMU za použití detektoru BSE	53
Obr. 69 – Teplotní pole v průběhu ochlazování	54
Obr. 70 – Vývoj teploty vybraných míst na svařovaném profilu v čase	55
Tabulka 1 – Vypočtené hodnoty v čase ukončení procesu svaření 50	
Tabulka 2 – Vstupní a výstupní hodnoty zkoušky tvrdosti.....	50



Seznam symbolů a zkratk

α	Koeficient lineární tepelné roztažnosti
Δx	Teplotní dilatace
Δt	Přírůstek teploty
ε_t	Teplotní deformace
%TMD	Teoretické maximální procento hustoty
1D	Jednorozměrné zobrazení
2D	Dvourozměrné zobrazení
3D	Třírozměrné zobrazení
ASCII	Textový soubor
BSE	Zpětně odražené elektrony (Back Scattered Electrons)
DFW	Difuzní svařování (Diffusion Welding)
DIC	Digitální korelace obrazu (Digital Image Correlation)
EBW	Svařování elektronovým svazkem (Electron Beam Welding)
EDS	Energiově disperzní spektrometrie (Energy-Dispersive Spectroscopy)
FSW	Sváření třecím smícháním (Friction Stir Welding)
FRW	Svařování třením (Friction Welding)
FW	Svařování elektrickým odporem (Flash Welding)
GMAW	Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře (Gas Metal Arc Welding, MIG/ MAG)
GTAW	Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (Gas Metal Arc Welding, TIG/ WIG)
HB	Tvrdost podle Brinella
hm.%	Hmotnostní procento
HV	Tvrdost podle Vickerse
IR	Infračervené záření
LBW	Svařování laserovým paprskem (Laser Beam Welding)
PAW	Svařování plazmou (Plasma Arc Welding)
RTG	Rentgenové záření
SE	Sekundární elektrony (Secondary Electrons)
SEM	Skenovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope)
SG	Tenzometr (Strain Gauge)
TOO	Tepelně Ovlivněná Oblast
WDS	Vlnově disperzní spektrometrie (Wavelength-Dispersive Spectroscopy)



Úvod

Výsledné vlastnosti materiálu závisí na technologickém procesu jeho výroby. To je obecná výchozí situace společná mechanice konstrukcí, ať je tou konstrukcí myšlen drak letadla či kolejnice – podmínky výroby/vzniku a provozu určují životnost a tempo degradace. Přímým důsledkem této skutečnosti je pochopení, že chceme-li konstrukci bezpečně provozovat, je nutné mít kontrolu nad jejími mechanickými parametry, které zase souvisí s materiálovými vlastnostmi.

Hlavním cílem práce je tedy osvojení vybraných základních metod experimentální mechaniky k ověření výsledků technologického procesu.

Pro osvojení těchto experimentálních metod byl vybrán proces aluminotermického svařování. Během něj se dramaticky pozmění stav materiálu, čímž jsou ovlivněny jeho mechanické vlastnosti.

Práce se proto zaměřuje na popis samotného procesu a soustředí se na možné důsledky pro stav spojovaného materiálu. Ten se může změnit jak vlivem změny struktury, tak i průběhem samotného děje. U zkoumaného materiálu budou analyzovány např. deformace materiálu, rovinatost, tvrdost, SEM analýza, atd ... Předpovězené změny budou svého druhu fyzikálními hypotézami a použité metody experimentální mechaniky aparátem jejich testování. Závěrem bude spíše než návrh vylepšení svařování doporučení, které metody jsou nosné pro dosažení hledaných veličin a které ne.

LITERÁRNÍ ČÁST

1. Vybrané metody experimentální mechaniky

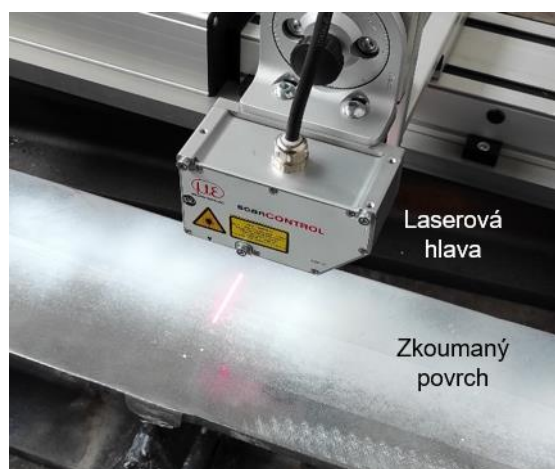
Pro správné vyšetření materiálu, který je ovlivněn svarem, je kladen důraz na precizní přípravu jednotlivých metod a povrchu zkoumaných svařenců, dodržení technologického postupu svařování a jednotlivých kroků experimentálního měření. Při práci materiálu je důležité sledovat změny tvaru, nárůst deformací a napětí, kontrakce, vliv teploty a její rozložení po profilu, výsledné změny struktury a tvrdost povrchu svařenců. Vybrané optické metody jsou nekontaktní a tudíž neinvazivní, proto je lze zařadit do skupiny metod nedestruktivního zkoušení. Oproti tomu použití tenzometrů, provedení zkoušky tvrdosti nebo vyjmutí vzorku pro mikroskop zkoumaný objekt poškozuje.

1.1. Měření změny tvaru, deformací a napětí

Zkoumané parametry jsou odrazem momentálního stavu materiálu, které jsou sledovány v reálném čase od počátku přípravy procesu svaření až po vychladnutí svarového kovu. Nakonec celého procesu je vyhodnoceno i výškové dotvarování povrchů svařenců a průběh tvrdosti.

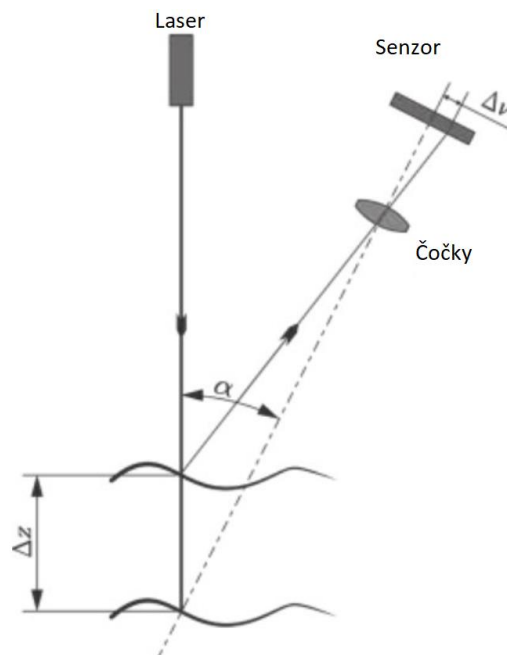
1.1.1. Profilometrie

Profilometrie je měřicí disciplína, při které se využívá optické metody měření vzdálenosti od zařízení (snímače) na povrch statického nebo pohybujícího se objektu (Obr. 1). Laserová triangulace využívá konfigurace, ve které laserový paprsek svisle promítaný od měřicí hlavy k předmětu v místě dopadu na předmět vytvoří světelnou stopu. Obraz této stopy se přes čočku promítne na snímač, přičemž poloha na snímači je určena vzdáleností mezi hlavou a předmětem. Výsledkem je soubor dat, které lze graficky zobrazit, například jako povrch vymodelovaný pomocí barevných škal.



Obr. 1 – Konfigurace laserové hlavy s povrchem

Schéma měření laserových snímačů je zobrazen na Obr. 2. Princip vychází z odražení paprsku od detekovaného předmětu pod konstantním úhlem, vzdálenost dopadu odraženého paprsku na čelo senzoru je stejná jako vzdálenost detekovaného předmětu od čela senzoru. Nevýhodnocuje se tak intenzita dopadajícího paprsku nebo čas vrácení paprsku, ale místo, kam zpětně odražený paprsek dopadl. Detekce je tak výrazně spolehlivější a odolnější proti rušení. Detekovatelnost je dána schopností optického přijímače zaznamenat dopad odraženého paprsku, s jakoukoliv intenzitou větší než minimální detekovatelnou. [1]



Obr. 2 – Schéma laserové triangulace [2]

1.1.2. Tenzometrické šetření stavu deformace

Tenzometrické šetření stavu deformace je důležitou a složitou měřicí operací, při které lze monitorovat vznikající, zanikající deformace nebo zbytkové napětí v materiálech vlivem jeho přizpůsobování se okolním podmínkám, a to v reálném čase po celou dobu procesu.

Tenzometry (Strain Gauge, SG) jsou založeny na odporových vlastnostech kovu. Při natažení kovový materiál ztrácí nebo zvyšuje svůj elektrický odpor. Tenzometrická fólie se nalepí na materiál, který se bude zkoušet, pomocí speciálně upraveného lepidla pro tenzometry. Díky správnému přilnutí ke zkoumanému materiálu se tenzometr roztahuje stejným způsobem jako zkoušený materiál, takže reprodukuje napětí. [3]

Tenzometry jsou elektronické součástky pro měření únavy a testování materiálů pro lepší a bezpečnější výroby. Ať už se jedná o testování odolnosti konstrukce, monitorování stavu konstrukce nebo o výrobu snímačů. Používají se především k měření různých tlakových sil,



tahových sil a jakýchkoli napětí materiálů. Jsou hlavním prvkem automatických systémů, pokud jde o měření hmotnosti, např. vah, nádrží, zásobníků. Správně nastavené tenzometry umožňují měření hmotnosti, měření množství dávkovaného produktu apod. [3]

Pro správný výběr typu tenzometru je třeba znát pracovní podmínky, typ zátěže, teplotu, při které bude pracovat, a požadavky, které musí mít, aby vydržel v daném systému. V současné době převzaly většinu trhu odporové tenzometry, které se nejčastěji volí pro maloobchodní a laboratorní měření. [3]

Přední výhody tenzometrů jsou především citlivost a přesnost měření, práce při vysokých teplotách a vysokém tlaku, flexibilita použití. [3]

Vyhodnocení měření změny odporu v důsledku působícího zatížení lze využít pro měření řady dalších veličin, jako je tlak, posunutí, zrychlení atd. Pro tyto veličiny se k měření obvykle připojují mechanické převodníky (např. měchy). [3]

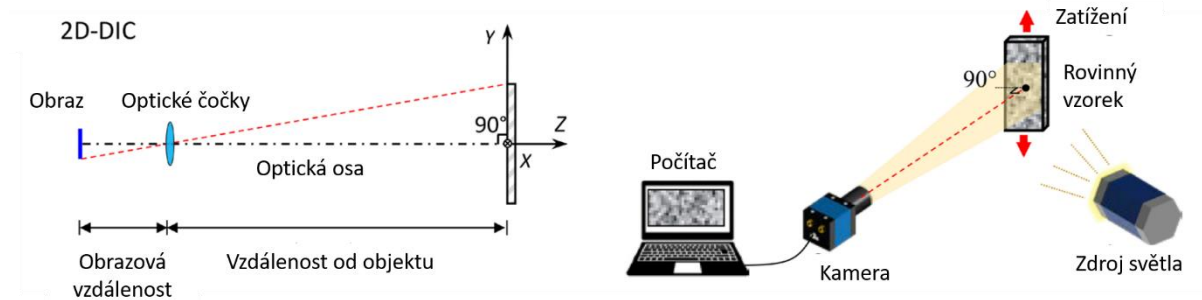
1.1.3. Digitální korelace obrazu (DIC)

Digitální korelace obrazu (DIC) je optická metoda využívaná pro vyhodnocení deformace zkoumaného povrchu při mechanickém zatěžování. Podstata metody spočívá v hledání podobností, v ideálním případě totožností v obraze. Opticky zaznamenává změnu struktury povrchu objektu. Podskupiny deformovaných obrazů jsou numericky korelovány s referenčními obrazy jako míra posunutí povrchu. Na základě posunutí lze posuzovat deformaci či napětí na vzorku. [4]

Snímací aparát/zařízení (například kamera nebo fotoaparát) musí být umístěn/o kolmo vůči zkoumané ploše, která na svém povrchu nese kontrastní stochastický vzor neboli vzor s náhodným rozdělením skvrn, tento vzor je nositelem informace o deformaci zatěžovaného materiálu. Pokud není možné dosáhnout kolmého rozložení prvků, je možné chybu nepřesnosti zmírnit telecentrickým objektivem (objektivem snímající odražené paprsky rovnoběžné s osou). Po dobu snímání vzorku je nezbytné zafixovat polohu aparátu.

DIC je možné využít ve dvou hlavních variantách. První, dvourozměrná metoda 2D-DIC (Obr. 3), která využívá jeden pevný aparát a je limitována snímáním deformací rovinných povrchů. Pro měření oblých nebo nerovinných povrchu se využívá metoda trojrozměrná, tzv. 3D-DIC nebo stereo-DIC, která využívá dvě synchronizované kamery, čímž je možné měřit deformace v celém povrchu. Tato metoda je nejpraktičtější v reálných aplikacích, např. pro snímání deformací při namáhání konstrukce letadel (např. při lámání zkoušce křidel). Kromě

těchto variant existuje také metoda mimoosového snímání pomocí jedné kamery, kde výsledkem mohou být výškové výchylky povrchu objektu, čímž jsou snímány průhyby větších konstrukcí. [5]



Obr. 3 – Schéma funkce metody 2D-DIC [5]

1.2. Měření pevnosti materiálu

Měření pevnosti materiálů je základní vědomostí pro analytické stanovení mechanických vlastností daných materiálů. Počátek stanovení vlastností tkví v provedení materiálových destruktivních zkoušek, statických a dynamických. Mezi statické zkoušky patří zkoušky tahem, tlakem, ohybem, smyk-střih a krutem. Dynamické zkoušky jsou cyklické nebo rázové, dále k nim patří zvláštní technické zkoušky, např. za vysokých či nízkých teplot. Z takovýchto zkoušek se stanovují meze kluzu a pevnosti, tažnost a kontrakce, dále také moduly pružnosti v tahu a ohybu, z mezí únavy se zkonstruuje Wöhlerova křivka únavy.

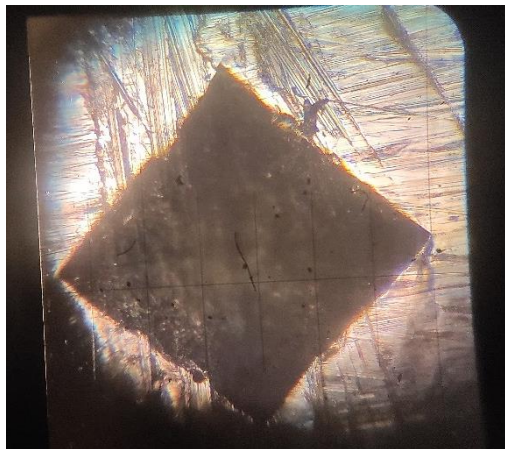
K nedestruktivním zkouškám řadíme kapilární metody, elektromagnetické a elektroinduktivní metody, ultrazvuk, rentgenoskopické, vizuální a frekvenční metody. Mezi nedestruktivní zkoušky patří zkoušky tvrdosti neboli odporu, který klade materiál vůči vniknutí indentoru tvrdoměru. Všechny tyto metody jsou používány pro odhalení stavu materiálu, indikaci trhlin a koroze na povrchu i v objemu zkoumaného materiálu.

1.2.1. Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti se provádí pro posouzení tvrdosti materiálu vůči deformaci. Principem je vtlačení vnikajícího tělesa (indentoru) do zkoumaného materiálu určitou silou. Vyhodnocení se provádí přeměřením vtisku, stanovením daných rozměrů podle geometrie otisku typu indentoru a následné numerické přepočtení k příslušné jednotce. Typ indentoru určuje, zda jde o měřítko makroskopického nebo mikroskopického charakteru, dále také o jakou jde metodu, např. podle p. Brinella, Rockwella nebo Vickerse. Zkouška tvrdosti podle p. Brinella používá jako indentor kuličku, detailní způsoby použití jsou popsány normou ČSN EN ISO 6506-1 (420359) [6]. Dále zkouška tvrdosti podle p. Rockwella je rozšířena na 3 typy, první a druhý je

diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° zatížen buď silou 588 N nebo 1471 N, ve třetím případě jde o kalenou kuličku o průměru kolem 1,6 mm zatíženou silou 980 N. Detailní provedení je podle normy ČSN EN ISO 6508-1 (420360) [7].

V této práci jsem aplikoval zkoušku tvrdosti podle p. Vickerse, která využívá diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° s provedením podle normy ČSN EN ISO 6507-1 (420374) [8]. Postup zkoušky spočívá ve vniknutí indentoru, změření délky úhlopříček vytvořených jehlanem (Obr. 4), a jejich průměr poté vyjadřuje hodnotu tvrdosti podle tabulek. Výhoda této zkoušky u homogenního materiálu spočívá v nezávislosti na velikosti zatěžovací síly, používá se však zatížení okolo 0,5 až 1 kg pro mikrotvrdost a pro makrotvrdost do zatížení 50 kg.



Obr. 4 – Pohled na vpich v materiálu přes mikroskop tvrdoměru – metodou podle Vickerse (úhlopříčka přibližně 0,68mm)

1.3. Mikrostruktura materiálu a její studium

Mikrostruktura je vlastnost polykrystalického materiálu. Velikost zrn v mikrostruktuře kolísá od mikroskopických rozměrů, až k zrnům dobře viditelným pouhým okem. Uspořádání zrn v mikrostruktuře je statisticky náhodné. Tzv. deformační textura vzniká při deformaci materiálu, např. při tažení nebo válcování, kdy se zrna natáčí podle směru deformace. Mikrostruktura může být tvořena i póry, pórovitost je charakteristikou, která ovlivňuje mechanické vlastnosti. Oblast mezi zrny, hranice zrn, je stavem s vyšší vnitřní energií při krystalizaci taveniny. [9]

1.3.1. Skenovací elektronový mikroskop (SEM)

Skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop (SEM) je podobně jako klasický mikroskop optický přístroj. Na rozdíl od běžných světelných mikroskopů využívá jako zdroj záření elektrony namísto fotonů a elektromagnetických čoček namísto čoček skleněných. Celý vnitřní



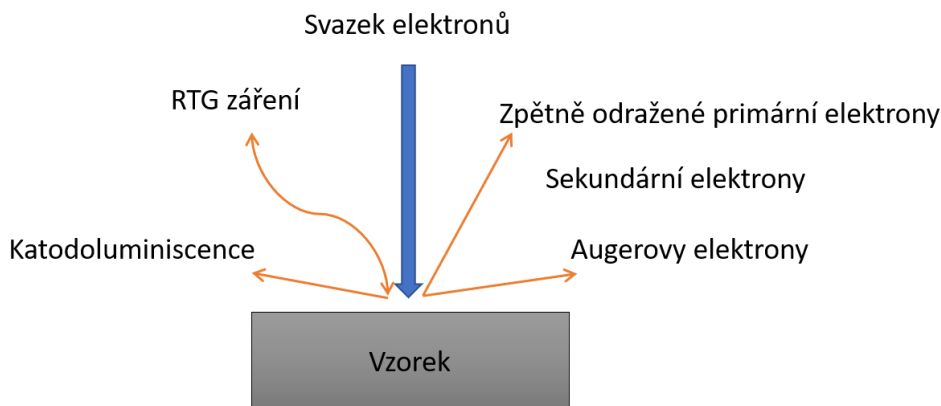
prostor mikroskopu, jak samotný elektronový svazek, tak i vzorek, jsou ve vakuu, aby nedocházelo k interakci elektronů s vnější atmosférou. Pro studium či analýzu povrchu využíváme interakce elektronového svazku se vzorkem (viz Obr. 5), čímž získáváme celou řadu informací, ať už mikrostrukturu, krystalografické uspořádání či chemické složení materiálu. Pro jejich získání musí být mikroskop opatřen detektory, které tyto informace sbírají. [10]

Sekundární elektrony (Secondary electrons, SE) jsou elektrony generované přímo z místa dopadu svazku primárních elektronů do hloubky maximálně několika desítek nanometrů. Jsou nositeli informace o topografii, tvaru povrchu vzorku. Používají se pro analýzu povrchů a struktur. [10]

Zpětně odražené elektrony (Back scattered electrons, BSE) pochází na rozdíl od sekundárních elektronů z větší hloubky interakčního objemu materiálů (desítky až stovky nanometrů) a nesou tak informaci nejenom topografickou, ale i materiálovou. BSE poskytuje informace o krystalografii materiálu, orientaci mřížky, mřížkových parametrech a složení vzorku. [10]

Dalším ze signálů, který dopadem svazku primárních elektronů získáváme, je charakteristické rentgenové (RTG) záření. Podává kvalitativní a kvantitativní informace o chemickém složení materiálu, tzv. prvková spektra. K detekci charakteristického RTG záření lze použít detektory EDS (energie disperzní spektrometrie) či WDS (vlnově disperzní spektrometrie). Rozdíl mezi těmito detektory je značný. Zatímco pomocí WDS analyzujeme prvek po prvku na základě charakteristické vlnové délky RTG záření, pomocí EDS analyzujeme celé vyzářené spektrum. [10]

Speciálními signály jsou Augerovy elektrony a katodoluminiscence. Augerovy elektrony jsou elektrony, které vznikly při přechodu z vyšších energetických hladin do vakance a uvolňují přitom kvanta energie, tyto elektrony umožňují prvkovou analýzu materiálu. Katodoluminiscence umožňuje pozorování reálného obrazu, jde o světlo vzniklé interakcí primárního svazku se vzorkem. [10]



Obr. 5 – Schéma interakce svazku se vzorkem

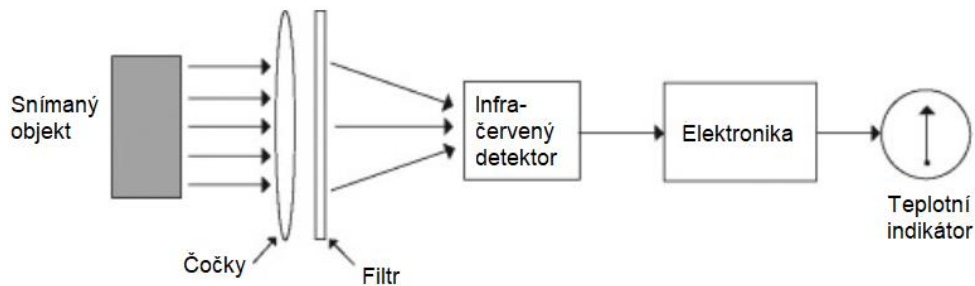
1.4. Záznam a analýza dějů ovlivňujících mikrostrukturu

Pro chápání dějů ovlivňujících mikrostrukturu, a tím vlastnosti materiálů, je potřebné získat záznam a data průběhu zatěžování k analýze a následně vyhodnocení. K tomu nám pomáhají přístroje moderní technologie jako jsou např. termokamery pro zpracovávání informací o průběhu teplot měřené oblasti.

1.4.1. Infračervený teploměr

Infračervený teploměr (známý také jako pyrometr) určuje teplotu z části tepelného záření, někdy nazývaného záření černého tělesa, které vyzařuje měřený objekt. Na základě znalosti množství infračervené energie vyzařované objektem a jeho emisivity lze často určit teplotu objektu v určitém rozmezí jeho skutečné teploty. Konstrukce se v podstatě skládá z čočky, která infračervené tepelné záření soustředí na detektor, jenž zářivý výkon převádí na elektrický signál, který lze po kompenzaci okolní teploty zobrazit v jednotkách teploty (Obr. 6). Infračervený teploměr je bezkontaktní a může měřit pouze vnější teplotu. Je určen k použití na dálku. Vzhledem k tomu, že infračervený teploměr zaznamenává pouze povrchové teploty, může jeho přesnost ovlivnit řada faktorů, například okolní teplota, prach, pára, kouř nebo mráz. [11]

Většina novějších modelů IR teploměrů má poměr vzdálenosti k bodu 12:1, znamená to, že teploměr snímá průměr kruhové plochy o rozměru 1 palec ve vzdálenosti 12 palců. S každými dalšími 12 palci vzdálenosti od cíle se zvětšuje i bod; například ve vzdálenosti 24 palců se průměr zvětší na 2 palce. [12]



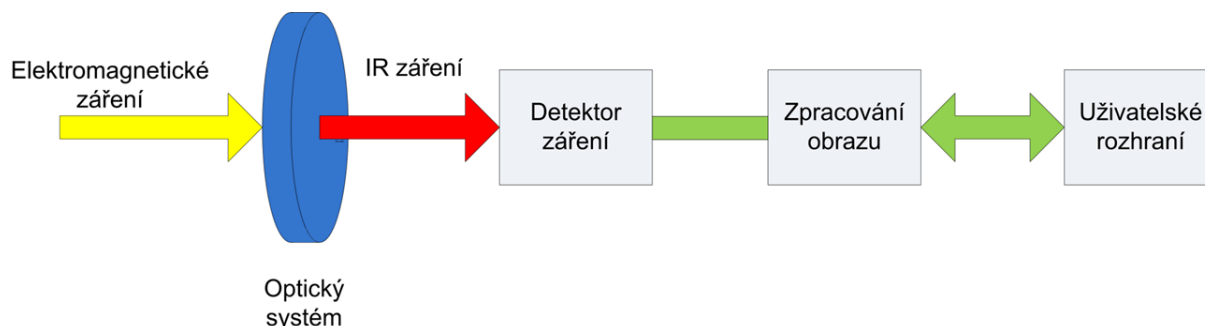
Obr. 6 – Schéma funkce IR teploměru [13]

1.4.2. Termografie

Termální zobrazovače pracují na principu infračervené termografie. Termální zobrazovač se používá jako účinný prostředek ke zkoumání vad, údržbě a inspekci elektrických systémů, mechanických systémů a plášťů budov. Infračervená termografie je věda využívající elektrooptických systémů k detekci a měření tepelné radiace a jejího „převodu“ na teplotu povrchu. Radiace je přenos tepla, který nastává vyzařováním elektromagnetických vln neboli vyzařováním tepelné energie do prostoru bez žádného přímého média k jejímu přenosu. do prostoru bez žádného přímého média k jejímu přenosu. Moderní infračervená termografie využívá elektrooptických zařízení k detekci a měření radiace a jejího převodu na teplotu povrchu budov a měřených objektů. [14]

Infračervené záření je soustřeďováno optikou termálního zobrazovače na detektor, který reaguje změnou napětí nebo odporu, kterou zaznamenává elektronika v termálním zobrazovači. Signál, který dává termální zobrazovač, je převeden na elektronický obraz (termogram) na displeji. Termogram je obraz cíle elektronicky zpracovaný tak, že na displeji jednotlivé barevné odstíny odpovídají různým vlnovým délkám infračerveného záření povrchu předmětu. [15]

Typický termální zobrazovač obsahuje optický systém, respektive objektiv, který nepropouští viditelné záření, včetně čočky a krytu čočky. Další součásti jsou displej, detektor, zpracovací elektronika, ovládání, zařízení pro ukládání dat a software ke zpracování a vytváření informačních zpráv (Obr. 7). [15]



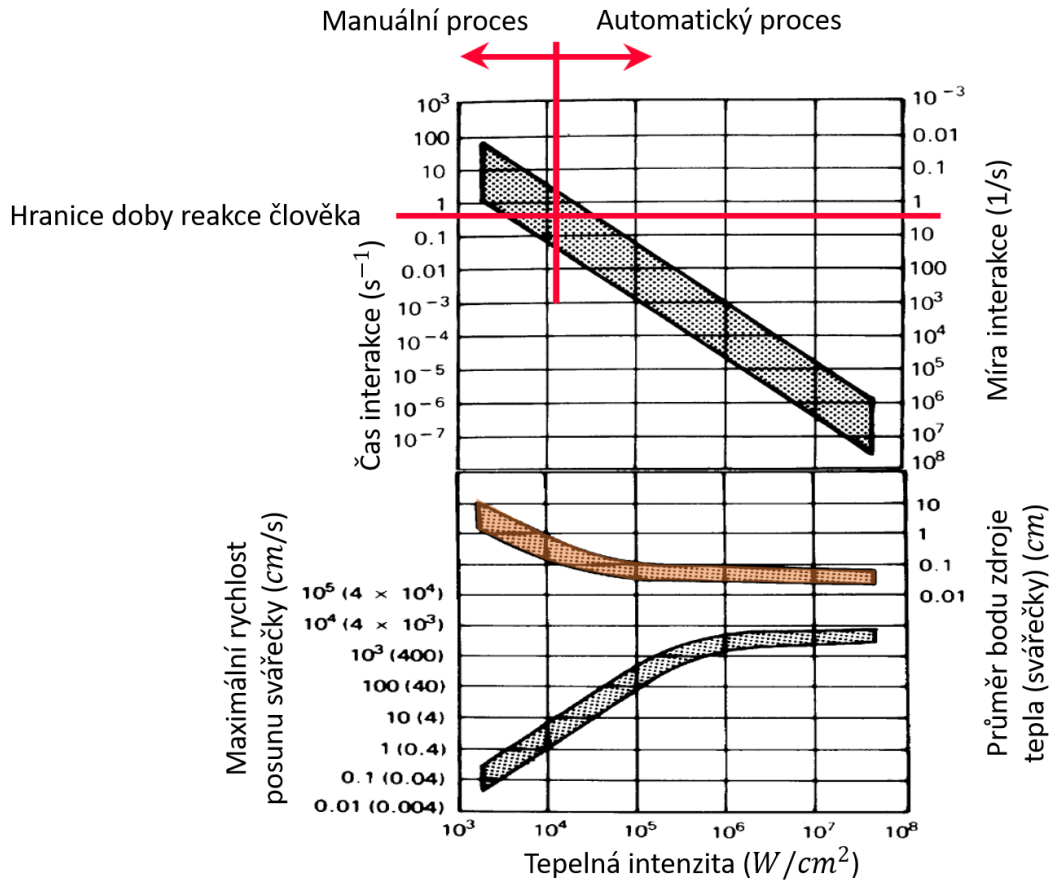
Obr. 7 – schéma funkce termokamery/termálního zobrazovače [15]

2. Úvod do problematiky svařování

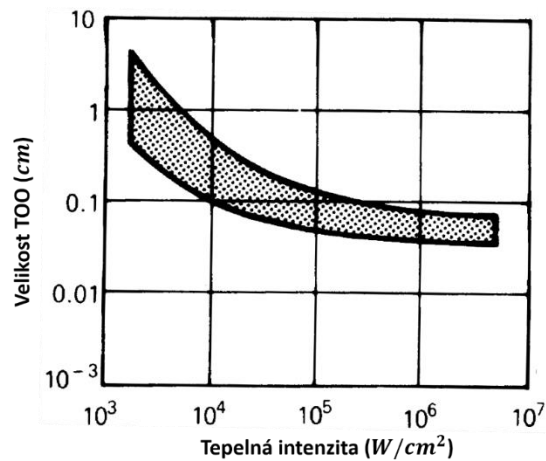
Svařování je tepelný proces, ve kterém dochází k vysokému nárůstu teplot, rychlé změně teplot a vysokého teplotního gradientu. V průběhu tohoto sdílení tepla vznikají dvě hlavní teplotní pole. Tavná oblast představující oblast, ve které se svarový kov spojil s původním materiálem, a tepelně ovlivněná oblast (TOO), která je v průběhu svařování nestacionární. V TOO dochází k fázovým přeměnám v závislosti na teplotě, ovlivnění TOO materiálu je výsledkem celkového vneseného tepla a doby expozice. Fázové přeměny ovlivňují zbytkové napětí v materiálu vlastní kontrakcí nebo expanzí závislou na teplotě, a to až do několika set MPa. TOO je rozsáhlou problematikou, která je řešená individuálně v závislosti na použité metodě svaření. Její vliv může být zmírněn postupy chlazení s temperací zóny, předehřevem materiálu před procesem nebo znovu zahřátím spoje na teploty rekrystalizačního charakteru.

Minimální doba zdržení, kterou lze ještě ručně řídit, odpovídá obloukovému svařování (přibližně 0,3 sekundy). Jiné zdroje tepla intenzivnější, než elektrický oblouk mají kratší dobu zdržení, proto je lze použít pouze automaticky. Svařovací procesy s koncentrovanějším zdrojem tepla vytvářejí menší tepelně ovlivněnou oblast a nižší deformace po svařování, jak je uvedeno na Obr. 9 a Obr. 8. Výhody, které přináší koncentrovanější zdroj tepla, jsou kompenzovány svou cenou: investiční náklady na zařízení jsou zhruba přímo úměrné intenzitě zdroje tepla. [16]

Svařování v leteckém průmyslu se vyznačuje nízkou jednotkovou výrobou, vysokými jednotkovými náklady, extrémní spolehlivostí a náročnými provozními podmínkami. Tyto charakteristiky ukazují na dražší a koncentrovanější zdroje tepla, jako je plazmový oblouk, laserový paprsek a svařování elektronovým svazkem, jako na procesy volby pro svařování kritických součástí. [16]



Obr. 8 – Graf funkcí popisující závislosti mezi tepelnou intenzitou, interakční dobou, rychlostí posunu svářečky a velikostí průměru bodu zdroje tepla (oranžová oblast), zobrazení hranice procesů a doby reakce svářeče. [16]



Obr. 9 – Velikost TOO jako funkce intenzity a tepla ze zdroje [16]

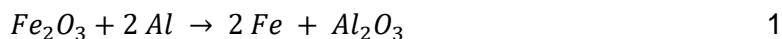


2.1. Procesy svařování

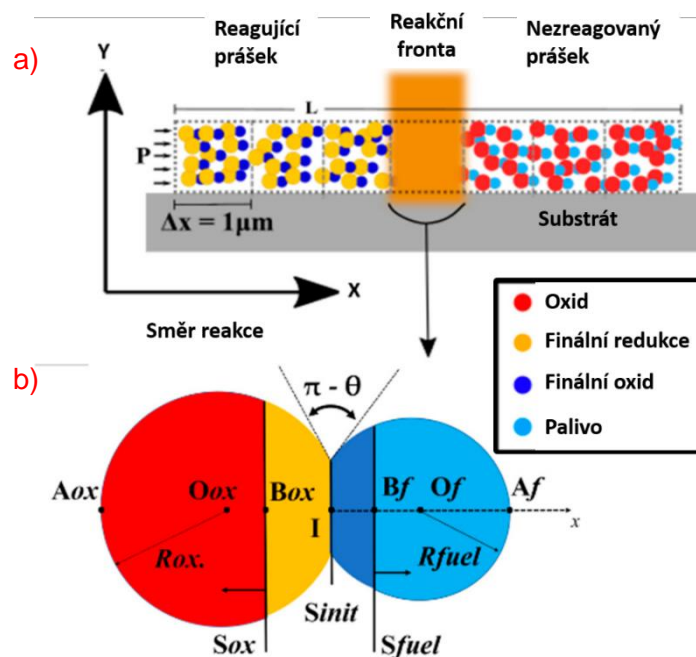
2.1.1. Vybraný proces svařování pro aplikaci experimentálních metod

Pro aplikaci experimentálních metod bylo nutné vybrat takový proces svařování, aby se jevil jako nejvíce invazivní, pro zřetelnost sledovaných veličin, zároveň proveditelný a nejlépe nekonvenční, pro jeho možné vylepšení a například i implementaci do letectví. Proto jsem vybral svařovací proces aluminotermické reakce, o kterou jsem se již dříve zajímal z technologického hlediska.

Tento proces patří do skupiny práškové metalurgie. Jedná se o složení hořlavé dávky oxidu kovu (s legurami cílené slitiny) a hliníku, kde hliník je využit jako redukční činidlo. Protože výsledná entalpie produktu je vyšší než entalpie soustavy na začátku, je celková reakční entalpie záporná, tzn. že se při hoření uvolňuje vysoké množství tepla, a tím se řadí proces mezi exotermické reakce. Při hoření kromě tepla dochází k přeměně oxidu kovu na čistý kov, na hliník se vážou molekuly kyslíku a vzniká oxid hlinitý, což je krystalická sloučenina v přírodě vyskytující se jako velmi tvrdý nerost známý jako korund. Korund je lehčí než svarový kov, v našem případě jde o železo, respektive o konstrukční ocel třídy 11.373, proto se společně se struskou odděluje od svarového kovu a zůstává na hladině. Základní feritickou exotermickou reakci jsem vyjádřil rovnicí 1.



Difuzní-reakční model procesu je otevřený systém jednorozměrného (1D) diskrétního řetězce identických buněk, kde je každá elementární buňka zaplněna podle teoretického maximálního procenta hustoty (%TMD) jednotlivými páry palivo-kyslík (Obr. 10). %TMD je poměr mezi objemem částic a celkovým objemem buňky. Iniciale se dosáhne aplikací hustoty výkonu na první buňku na levém konci 1D systému [17]. Reakce se šíří z levé strany na pravou stranu systému znázorněného na Obr. 10. [18]



Obr. 10 – Geometrie modelovaného termitového systému a hlavní parametry modelu: a) celkový pohled na systém s reakční frontou šířící se zleva doprava, b) zvětšený pohled na jednu dvojici částic paliva a oxidu s jejich vícenásobnými rozhraními při šíření reakce

Kontaktní úhel θ stanovený na 135° (viz Obr. 10, spodní schéma) je zvolen tak, aby představoval stupeň koalescence (spékání) dvou sousedních sférických nanočástic paliva a oksylichovadla před zahájením hoření. Tato hodnota byla stanovena pro obvyklé experimentální podmínky prášků Al/CuO . V nanoměřítku je termitová reakce simulována pomocí difuzně-reakčního schématu, které umožňuje výpočet kinetiky hoření. Hlavním předpokladem je, že chemie řídící hoření termitu se omezuje na čistě kondenzovaný fázový proces, v němž se jako migrující druh uvažuje pouze kyslík. [17] [18]

Kyslík difunduje přes rostoucí vrstvou oxidu (tj. produktem reakce) a po dosažení paliva spontánně reaguje. Předpokládá se, že výchozí reaktanty a reakční produkty jsou v pevném stavu a vykazují tepelnou homogenitu. Jak je znázorněno na Obr. 10, po difuzi kyslíku z oksylichovadla a další reakci při interakci rostoucího oxidu (tj. produktu oxidové reakce) s palivem se počáteční vrstva rozhraní mezi palivem a oksylichovadlem (S_{init} , Obr. 10) šíří v celém objemu částice paliva (S_{fuel} , Obr. 10). Podobně se fronta redukce šíří do oblasti oxidačního činidla (označeno Sox , Obr. 10). [19]

Technologie svaření spočívá v zapálení směsi v keramickém kelímku, čímž dojde k výše popsané reakci. V momentě, kdy proběhne reakce, se protaví tavná zátka dna kelímku a svarový kov se vylíje do připravené formy. Tvar formy udávají rozměry spojovaných profilů

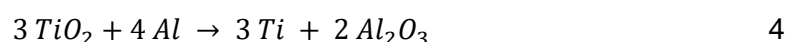
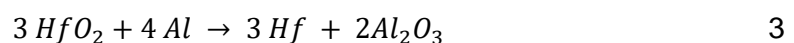
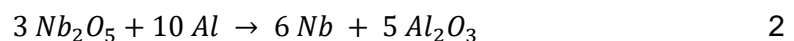


tak, aby struska a již zmíněný korund byli nad hladinou výšky svařovaných profilů, aby se dokázali odlít přepadem mimo formu do připravené misky. Detailně děj popisuje Sarah Brotman a spol. z University of Toulouse v článku *A Benchmark Study of Burning Rate of Selected Thermites through an Original Gasless Theoretical Model* [19], a dále technologický postup vydaný výrobcem a dodavatelem termických dávek, Francouzskou firmou Pandrol s.r.o. Ve spolupráci s touto firmou mi bylo umožněno svaření dvou kusů „H“ profilů a provedení experimentálních šetření v jejich výcvikovém středisku v Kralupech nad Vltavou.

Svaření spojovaných součástí se provádí v neutrální teplotě, tato teplota je pro každý stát, region nebo oblast rozdílná vlivem klimatu dané oblasti. Pro Českou republiku je tato teplota dána státní organizací Správa Železnic v předpisu S3/2 a to v rozmezí 17-23 °C [20]. Tento předpis nařizuje dodržení dilatací podle momentálního počasí a naměřené teploty tak, aby bylo dodrženo nulové podélné, svislé i příčné napětí spojovaných součástí před procesem. Napětí zmíněná předpisem by negativně ovlivnila nejen kvalitu svaru, ale i jeho pevnost a pružnost v celé konstrukci, například vybočením, ztrátou stability, snížením celkové únosnosti a především životností.

Pomocí aluminotermické reakce lze připravit slitinu Nb-10Hf-1Ti, 8. experimentem zreagovalo 10 hm.% Al, 100 hm.% TiO_2 , 10 hm.% CaO a 10 hm.% $KClO_3$ hmotnostního procenta, kde výsledkem byla 95 % vydatnost slitiny. Autoři projektu I.G. Sharma, S. Majumdar, S.P. Chakraborty a A.K. Suri ji označili za optimální [21]. Důvodem, proč slitina vyšla jen 95 %, je nízká hodnota ΔG_R^0 , která udává podmínky chemické rovnováhy a vyjadřuje tzv. Gibbsovu volnou energii v termodynamickém systému reakce $TiO_2 + Al$. Dále pak lze připsat důvod vzniku intermetalické sloučeniny mezi Nb a Al. Přidáním 10 % chlorečnanu draselného postačilo pro dobrou konsolidaci a účinnou separaci strusky a kovu, podobně k separaci strusky a chovu přispěl oxid vápenatý [21].

V experimentu použili reakce popsané rovnicemi:





2.1.2. Metody svařování v letectví

Svařování třením (Friction Welding, FRW) vytváří celoplošné spoje tlačáním rotujícího obrobku k druhému, tím vzniká teplo mezi povrchy obrobků a výsledkem je plastická deformace. Protože se spojovaný materiál netaví, nejsou u vzniku spoje jevy tání a tuhnutí, se kterými souvisí vznik vad. Metodu využily společnosti General Electric a Pratt & Whitney jako alternativu pro výrobu a opravy vysokoteplotních slitinových blisků pro proudové motory [22]. Metodou vzniká typický výronek, příčinou jeho vzniku je přítlak dílů. Ve finální fázi procesu by měl být tento výronek mechanicky odstraněn.

Sváření třecím smícháním (Friction stir welding, FSW) vynalezla společnost TWI v roce 1991 [16]. Tento proces spojuje materiál pomocí mechanické deformace. Při tomto procesu se otáčí válcový nástroj s profilovanou sondou, který se pomalu zanořuje do linie spoje mezi dvěma kusy plechu nebo desek. Tímto procesem lze svařovat dříve uváděné nesvařitelné hliníkové slitiny, jako jsou řady 2xxx a 7xxx, a titanové slitiny používané v leteckých konstrukcích. Pevnost svaru je o 30 až 50 % vyšší než při obloukovém svařování. Únavová životnost je srovnatelná s životností nýťovaných panelů. Zlepšení vyplývající z absence otvorů je kompenzováno přítomností malé TOO, zbytkových napětí a mikrostrukturních přeměn v zóně svaru. Společnost Boeing použila tuto metodu při svařování přídavných nádrží nosných raket Delta [16].

Svařování elektrickým odporem (Flash welding, FW) je proces tavení a spojování, při kterém se tupý spoj svařuje působením krátkého oblouku a tlaku. Je schopen vytvářet svary stejně pevné jako základní materiál. Tímto postupem lze svařovat hliník a teplotně odolné slitiny bez zvláštní přípravy povrchu nebo ochranného plynu. Lze jím spojovat profily se složitými průřezy a v leteckém průmyslu se používá ke spojování kroužků pro proudové motory z teplotně odolných slitin a lisovaných hliníkových součástí pro podvozky [23].

Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře (Gas metal arc, GMAW/ MIG/ MAG) jedno z nejoblíbenějších svařovacích procesů na světě, v letectví méně využívané pro nevýhodu velkého zdroje tepla (ve srovnání s procesy jako jsou EBW, LW, PAW uvedeny dále). Způsobuje, že svary mají špatné mechanické vlastnosti. Tento proces byl používaným při konstrukci palivových a okysličovacích nádrží pro raketu Saturn V (hliníková slitina 2219 pro první stupeň) [24]. Jednou ze současných aplikací GMAW je automatické svařování lopatek střely Patriot. Tyto lopatky se skládají z rámu odlitého z nerezové oceli 17-4 PH, na který je přivařen plech stejného složení [25].



Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (Gas metal arc, GTAW/ TIG/ WIG) využívá intenzivnější zdroj tepla než GMAW, proto může vytvářet svary s menší deformací při podobných nákladech. Pro většinu kritických konstrukčních aplikací nemůže tento proces konkurovat jiným metodám svařování, jako je EBW, LW nebo PAW. GTAW byl použit společně s GMAW ke svařování hliníkové slitiny 2014 a 2219 v palivových a okysličovacích nádržích rakety Saturn V [24]. Společnost Messerschmitt Bölkow Blohm v Německu používá GMAW pro nástavce trysek z Inconelu 600 v nosných raketách Ariane9. Většina svarů prováděných v letectví se provádí na potrubí a trubkách. Tento postup se používá také u tepelných výměníků a skříní proudových motorů, a to jak komerčních, tak vojenských, z nerezové oceli a Inconelu [26]. Inovaci řízení délky oblouku a zmírnění napětí pomocí chlazení během svařování vyvinula společnost Lockheed Martin pro nosnou raketu Titan IV [24].

Svařování plazmou (Plasma arc, PAW) je metoda svařování obloukem za pomoci netavící se elektrody a ochranné atmosféry inertního plynu. Tento proces se využíval pro svařování pokročilého raketového motoru na tuhé pohonné hmoty, vyrobené společností Lockheed z oceli HP-9-4-30, pro raketoplány [27]. Jednou z novějších variant tohoto procesu je svařování plazmovým obloukem s proměnnou polaritou, které nabízí společnost Hobart Brothers. Tato varianta byla vyvinuta pro svařování silnějších profilů hliníkové slitiny, konkrétně pro vnější palivovou nádrž raketoplánu [28].

Svařování laserovým paprskem (Laser beam, LBW) poskytuje nejkoncentrovanější zdroje tepla pro svařování, přičemž výhodou je vyšší přesnost a kvalita svaru a menší deformace. Proces se používá pro svařování a vrtání součástí proudových motorů vyrobených ze žáruvzdorných slitin, jako je například Hastelloy X. Laserem svařené spalovací komory se používají v proudových motorech Pratt & Whitney JT9D, PW4000, PW2037 a F-100-PW-220 [29]. Svařování laserovým paprskem nahrazuje nýtování při spojování podélníků s potahovou deskou.

Svařování elektronovým svazkem (Electron beam, EBW) využitím vysoké intenzity elektronového svazku vytváří svary s malou TOO a deformací. Tento proces má oproti LBW tu výhodu, že nemá problémy s odrazem paprsku od roztaveného kovu; musí však pracovat ve vakuu. Díky této vlastnosti je tento proces vhodný zejména pro svařování titanových slitin, které nelze svařovat v otevřené atmosféře. Titanové slitiny se hojně používají ve vojenských letadlech díky své nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a výkonnosti při zvýšených teplotách. Použití EBW pro vojenská letadla se neustále rozšiřuje například součástí křidel z materiálu



Ti 6Al-4V pro stíhací letoun F15 od společnosti McDonnell Douglas, která svařuje metodou EBW od poloviny 70. let [30]. Uložení křídel letadel s proměnlivou geometrií (Tornado a F14 "Tomcat"), svařené technologií EBW z materiálu Ti 6Al-4V. Pokrok v řídicích systémech a v zavádění počítačů pro automatizaci významně vylepšil EBW, a tímto způsobem se svařují kritické titanové konstrukční součásti pro letouny Eurofighter (upevnění křídel a kachní plochy k trupu [31]) a Boeing F-22 (zadní část trupu [26]). F-22 je prvním letadlem po 60. letech, které má svařovaný trup. Předchozí trupy byly vyrobeny z nýtovaného hliníku. Pozoruhodnou aplikací EBW je konstrukce kyslíkových a palivových nádrží ruské rakety Energia. Vzhledem k velkým rozměrům nádrží se vakuum vytváří lokálně a utěšňuje se pomocí feroelektrických kapalin [32].

Difúzní svařování (Diffusion welding, DFW) je proces, při kterém vzniká svar působením tlaku při zvýšené teplotě bez makroskopické deformace nebo relativního pohybu kusů. Hlavním uživatelem DFW je letecký průmysl [33]. Tento proces se osvědčil zejména v kombinaci se superplastickým tvářením (SPF) titanových slitin (získání komplikované geometrie v jediném výrobním kroku). Kvalita a nízká cena spoje umožňuje v některých případech nahradit nýtované hliníkové součásti titanovými náhradami SPF/DFW. Použití SPF/DFW zvětšuje poměr mezi původní nýtovanou hliníkovou konstrukcí a titanovou verzí na poměr 5:1 a s celkovou úsporou nákladů 30 %. Například přístupový panel křídla pro Airbus A310 a A320, u kterého se přechodem z nýtovaného hliníku na titan SPF/DFW dosáhlo úspory hmotnosti přesahující 40 %. Základní rozdíl mezi DFW titanu a hliníku spočívá v tom, že titan může rozpouštět své oxidy, zatímco hliník nikoli. Proto zbytkový oxid na rozhraní hliníkového spoje dramaticky snižuje pevnost difúzního svaru. Tento problém brání tomu, aby se SPF/DFW hliníku všeobecně prosadil [16].



3. Shrnutí literární části

Tato kapitola uvedla principy vybraných experimentálních metod pro hodnocení stavu materiálu, který je ovlivněn svarem. Pro hodnocení deformací a napětí je popsána metoda laserové triangulace, kde její princip spočívá v detekci svazku odraženého laserového paprsku. Dále kapitola popisuje funkci tenzometrů, jako generátorů elektromotorického napětí v závislosti na prodloužení vodičů. Je zde popsána podstata a využití metody 2D digitální korelace obrazu. Nedestruktivní zkoušky zastoupeny hlavními metodami zkoušek tvrdosti, tzn. podle Brinella, Rockwella a Vickerse. Pro studium mikrostruktury je v kapitole vysvětlen princip skenovacího elektronového mikroskopu. A jako poslední je uvedena metoda termografie a její aplikace do mobilního zařízení zobrazující teplotu povrchu předmětů či vzorků. Zvolená metoda svaření, tj. svaření pomocí aluminotermické reakce, její ovlivnění materiálu je využito pro měření experimentálními metodami. Dále je popsáno využití aluminotermické reakce v přípravě titanových slitin. Závěr kapitoly je věnován metodám svaření v letectví a problematice svarového spoje.



EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Samotnému experimentu předchází část, během níž je nutné předběžně vypočítat teplotní roztažnost materiálu, od počátku technologického postupu pro svaření součástí aluminotermickou dávkou až po úplné vychladnutí svarového kovu. Vychladnutím svarového kovu je myšleno postupné ochlazování okolním vzduchem na teplotu prostředí. Tato teplota musí být nejen na povrchu, ale i uvnitř spojovaných součástí. Dá se očekávat, že velikost zbytkových napětí bude záviset na velikosti tepelně ovlivněné části, na délce spojovaného profilu, v níž bude deformace rozprostřena, a také teplotě, při které už neprobíhá tečení materiálu.

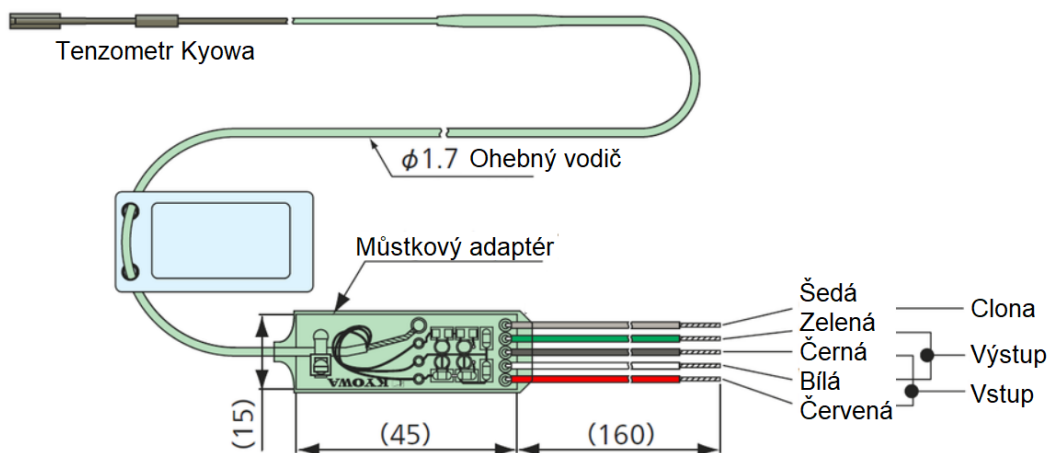
4. Laboratorní ověření vybraných tenzometrů

Následně je řešena problematika vysoké teploty v okolí svaru. Z tohoto důvodu není možné použít klasické foliové tenzometry, nýbrž je zde vyžadováno použití kapslových tenzometrů vyrobených z žáruvzdorných slitin, např.: Inconel. Takové tenzometry např. od firmy Kyowa odolají až 950 °C, pro můj pokus jsem vybral dva typy do 650 °C (tato hodnota je maximální teplotou naměřenou na povrchu materiálu v bezprostřední blízkosti formy svarového spoje).

U svařovaného spoje jsem si stanovil nivelační body pro určení podélného rozměru neboli vzdálenosti od referenční hodnoty. Tuto počáteční hodnotu jsem stanovil od povrchu formy svaru z obou stran.

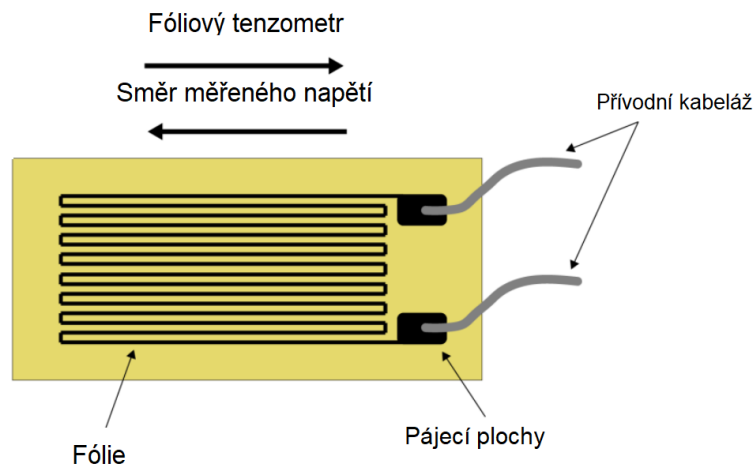
Tenzometr Kyowa: (Obr. 11) typ KHC (do 550 °C při statickém i dynamickém namáhání) jsem vybral pro snímání teplotní roztažnosti ve vzdálenosti 5 cm od referenční hodnoty. A typ KHCM (do 650 °C při statickém i dynamickém namáhání) pro teplotní roztažnost ve vzdálenosti 2 – 3 cm od referenční hodnoty. Typy jsou od výrobce zapojeny s můstkovým adaptérem, který by měl řešit teplotní samokompensaci z důvodu vysokoteplotního namáhání. Adaptér je zapojen v polovičním Wheatstonově můstku, použití je tím limitováno na jeden tenzometr pro jeden měřicí obvod.

Protože tato technologie tenzometrů Kyowa je za cenu dvaceti-šesti tisíc korun Českých za kus, přistoupil jsem k dostupnějším a cenově výrazně levnějším odolným fóliovým tenzometrům od firmy HBM v ceně čtyř až šesti stovek korun Českých za kus.



Obr. 11 – Schéma propojení tenzometru Kyowa s adaptérem [34]

Konkrétně typ (Obr. 12) 6/120-LY61 pro univerzální použití s jednou měřicí mřížkou délky 6 mm, s jmenovitým odporem 120 Ω a teplotní samokompenzací pro feritickou ocel do $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Tento SG jsem využil pro experimentální ověření funkce v laboratorní peci. A typ 6/350GE-LM11 pro vyšší cyklické a tepelné namáhání s jednou měřicí mřížkou délky 6 mm, jmenovitým odporem 350 Ω se stejnou teplotní samokompenzací a s teplotním rozsahem -200 až 300 $^{\circ}\text{C}$. Využitý na ostrém měření procesu svaření „I“ profilů HEB140.



Obr. 12 - Fóliový tenzometr [35]

Zapojení jsem realizoval do polovičních Wheatstoneových můstků, tzn. po jednom kusu tenzometru symetricky naproti sobě po profilu nosníku. Naměřená data jsem vyhodnotil pro ověření průběhů roztažnosti materiálu pro případné odhalení osového vybočení.

Pro ověření funkce tenzometrů v tepelně ovlivněné zóně (TOO) při teplotách 180 až 230 °C v laboratorní komorové peci LE (do 1000 °C) od firmy LAC (Obr. 13) jsem připravil laboratorní pokus. Použil jsem polotovar vyříznutý z „I“ profilu oceli 11 o rozměrech 20x40x90 mm (Obr. 14), protože je ze stejné konstrukční oceli jako profil HEB použitý při procesu svaření.



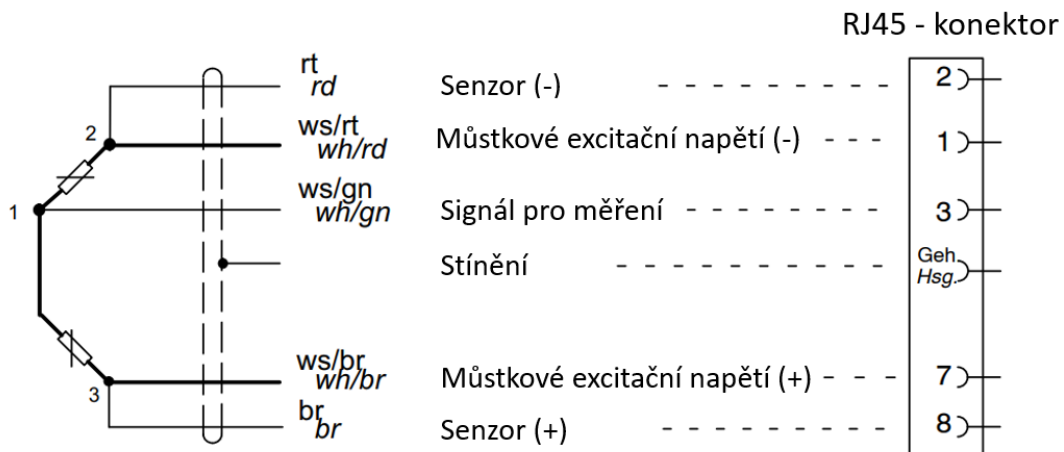
Obr. 13 – Laboratorní komorová pec LE od firmy LAC



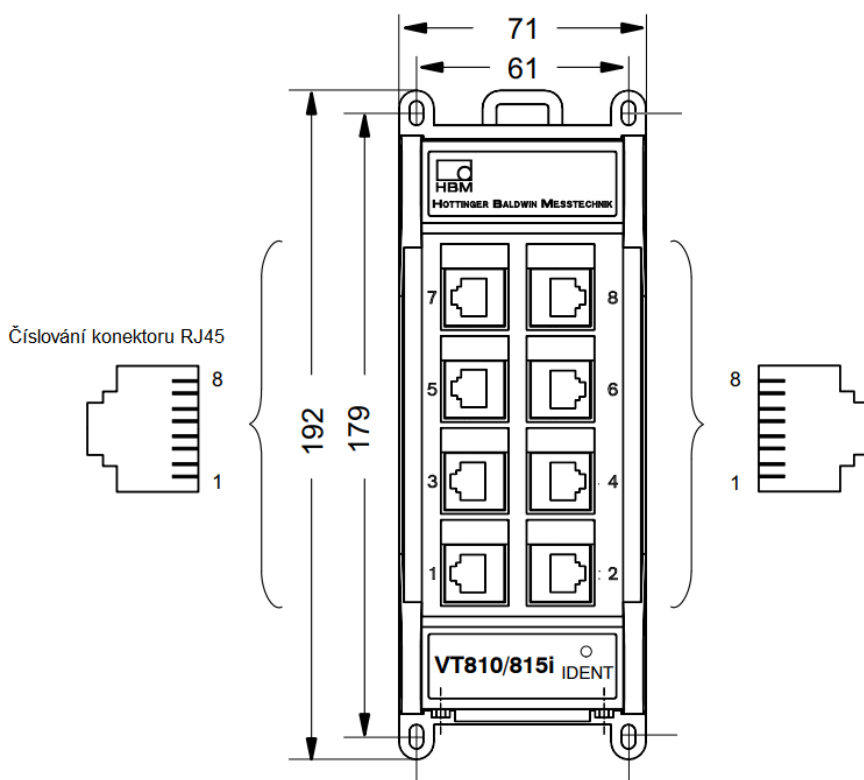
Obr. 14 – Polotovar

Na tento polotovar jsem nalepil dva tenzometry typu 6/120 LY61 pomocí dvousložkového epoxidového lepidla X280 zapojené do dvou polovičních Wheatstoneových můstků (Obr. 15).

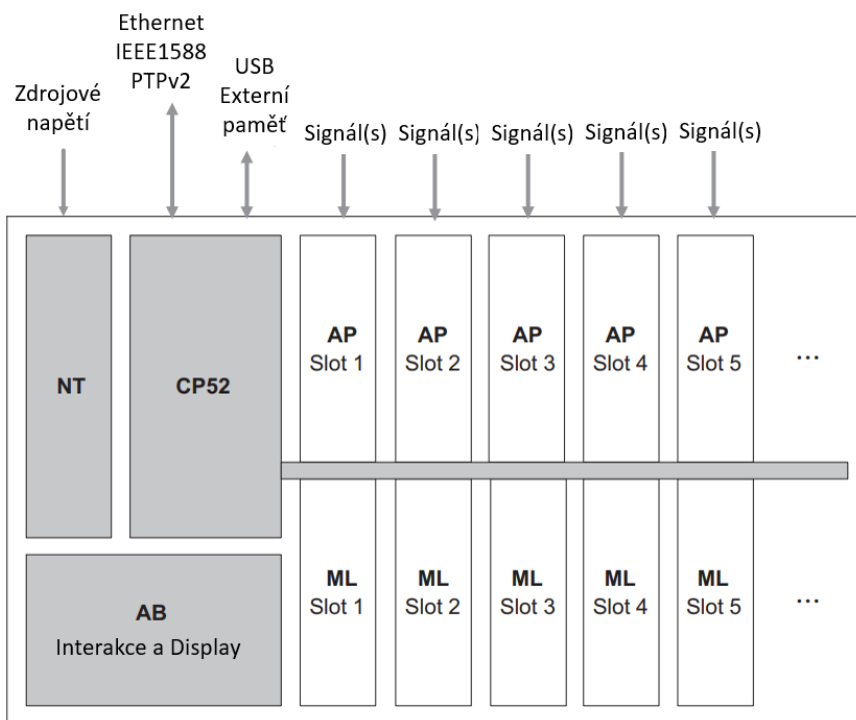
Tenzometry jsou zapojeny do terminálu VT810 (Obr. 16) prostřednictvím konektoru RJ45. Terminál je připojen na ústřednu MGCplus s AB22A displejem přes zabudovaný modul AP810 (Obr. 17 a Obr. 18).



Obr. 15 – Schéma zapojení polovičního Wheatstonova můstku do konektoru RJ45



Obr. 16 – Terminál VT810

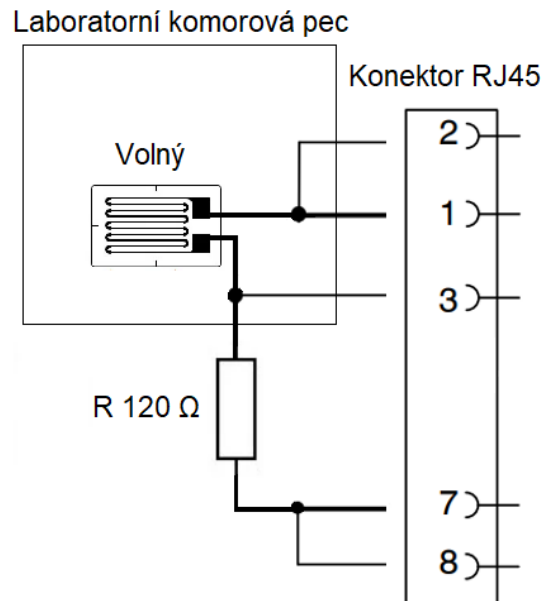


Obr. 17 – Blokové schéma ústředny MGCplus s AB22A a modulem AP810



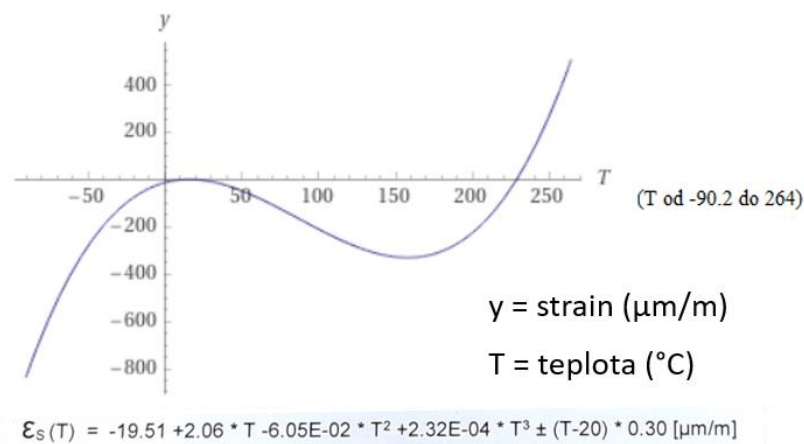
Obr. 18 – Zapojený Hardware pro ověření tenzometrů

První poloviční Wheatstoneův můstek je zapojen pomocí volného tenzometrů a odporu 120Ω (Obr. 19). Toto zapojení má provnat samokompenzační schopnost tenzometru s polynomem závislosti $\varepsilon_s(T)$ udávaným výrobcem (Obr. 20). Volně položený tenzometr generuje elektromotorické napětí vlivem teploty v peci.



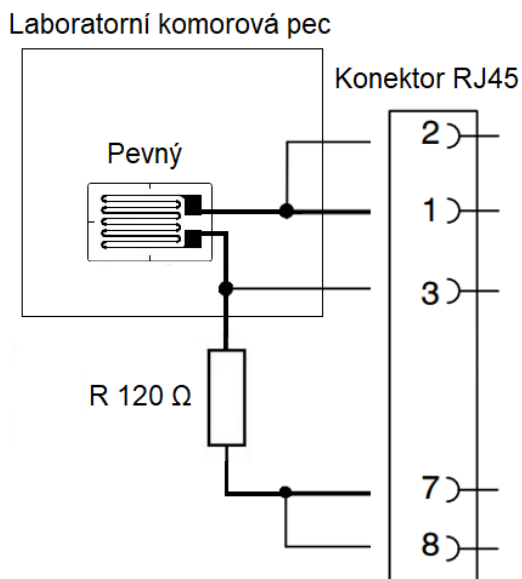
Obr. 19 – Schéma 1. obvodu

Vykreslený polynom teplotní závislosti výrobce SG



Obr. 20 – Polynomiální závislost teplotní samokompensace udaná výrobcem

Druhý i třetí poloviční Wheatstoneův můstek kombinuje zapojení pevného tenzometru s rezistorem o odporu 120 Ω (Obr. 21). Rezistor je zapojen do obvodu mimo pec, tedy není teplotně zatížen.

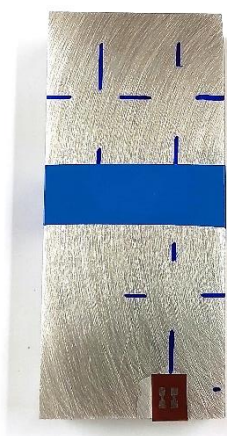


Obr. 21 – 2. a 3. obvod ve schématu

Pro přípravu experimentu jsem na polotovar, který jsem zbrusil hrubým brusným papírem, nalepil pájecí spoje vteřinovým lepidlem a pevné tenzometry pomocí epoxidového lepidla X280 do narýsovaných polí, polepil páskou proti možnému posunutí komponent (Obr. 22) a zatížil závažím o hmotnosti 8 kg. Po vytvrzení lepidla (8 hodin při teplotě 23 °C) jsem připájel dle schématu zapojení obvody (Obr. 23). Oba obvody jsem před pokusem vyrovnal. Počáteční referenční hodnota neboli takzvaná „nula“, indikovala nezatížený stav na počátku.



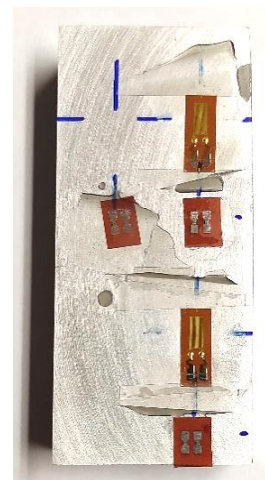
A



B

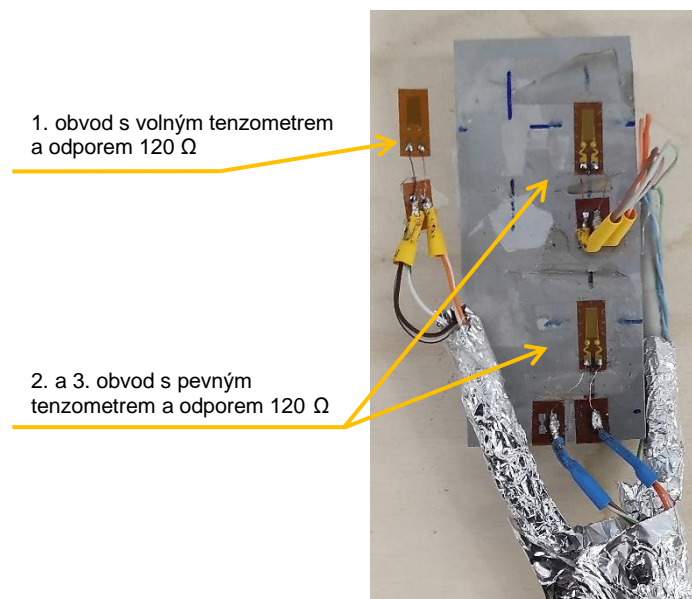


C



D

Obr. 22 – Postup lepení: A. Narýsovaná pole, B. Lepení pájecích spojů, C. Zafixované spoje i tenzometry, D. Výsledek lepení.



Obr. 23 – Tenzometry připravené pro experiment

5. Experimentální měření deformace v průběhu svařování

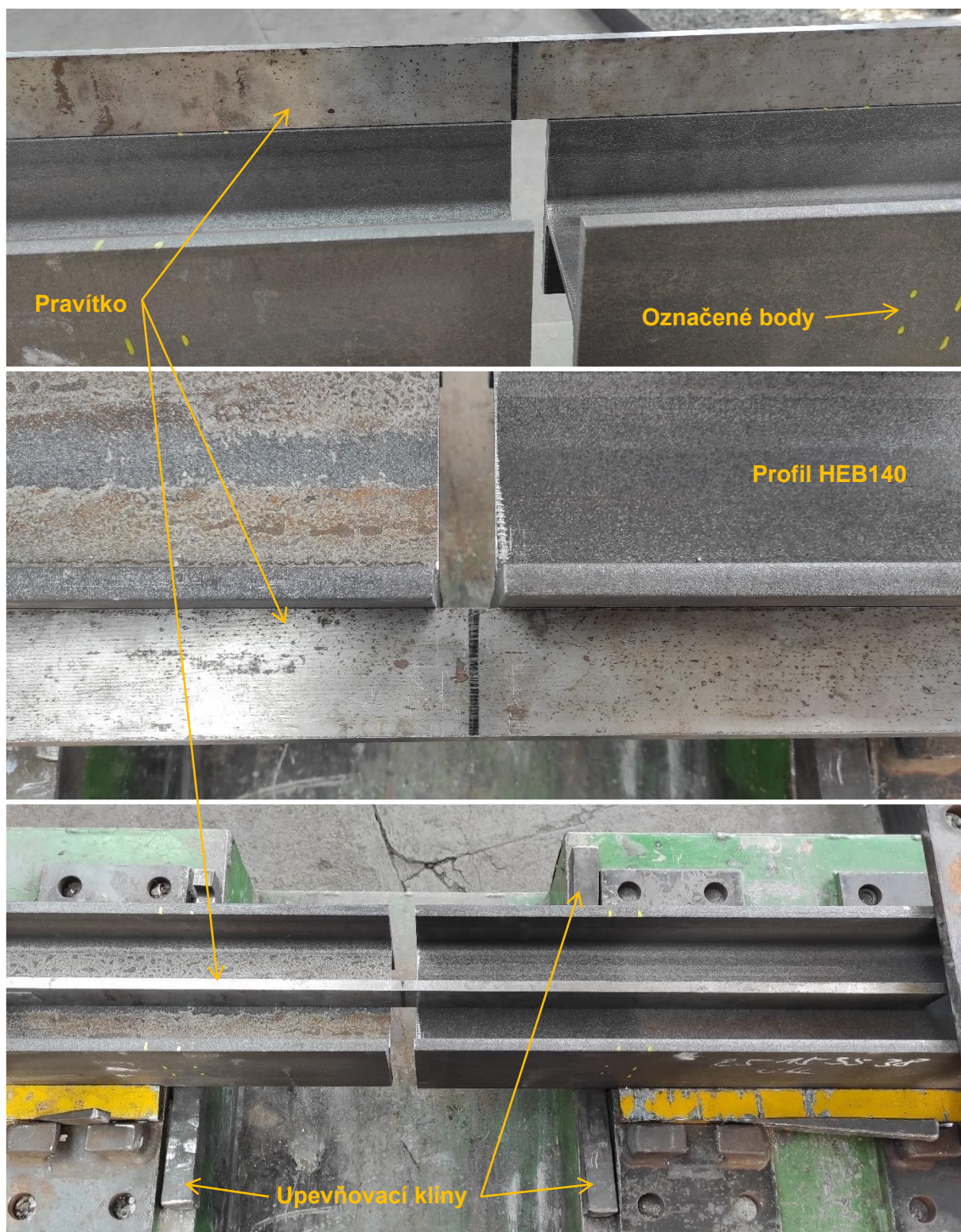
Po laboratorním ověření funkce tenzometrů jsem přešel k přípravě na experiment měření deformace na svařovaných profilech HEB140. Příprava probíhala v prostorách výcvikového střediska firmy Pandrol s.r.o. v Kralupech nad Vltavou pod dozorem garanta svařovací technologie. Nejprve bylo nutné pomocí infračerveného teploměru IR 2200-500 USB od firmy Voltcraft, který je konstruován v rozmezí teplot od -50 do 2200 °C, změřit teploty při svařování na povrchu profilu. Ke každé změřené hodnotě, která se pohybovala v rozmezí od 140 do 200 °C, jsem pomocí měřidla změřil vzdálenost od hrany formy. Na obrázku Obr. 24 je znázorněno měření, vzdálenost **A** byla nebezpečná zóna pro tenzometry, kde teploty vysoce přesahovaly 200 °C, **B** je oblast s teplotou v intervalu od 180 do 200 °C a zóna **C**, ve které se teploty pohybovaly pod 180 °C ($140 - 160$ °C), kterou jsem poté vyhodnotil jako bezpečnou. Tato část byla stěžní pro stanovení vzdálenosti od svaru pro bezpečné teploty povrchu pro funkci tenzometrů a zároveň proto, aby tyto teploty vydrželo epoxidové lepidlo X280 (odolné do 200 °C). Výsledný rozměr jsem stanovil 185 mm od okraje formy. Pro lepší čitelnost displeje teploměru jsem použil sloučení dvou fotek.

Měření teploty probíhalo v průběhu procesu svařování od okamžiku přehřevu formy po vychladnutí svarového kovu. Ukázalo se, že nejvyšší teploty byly naměřeny až při chladnutí svarového kovu. Tím jsem eliminoval chybu neodhalení teplotního maxima.

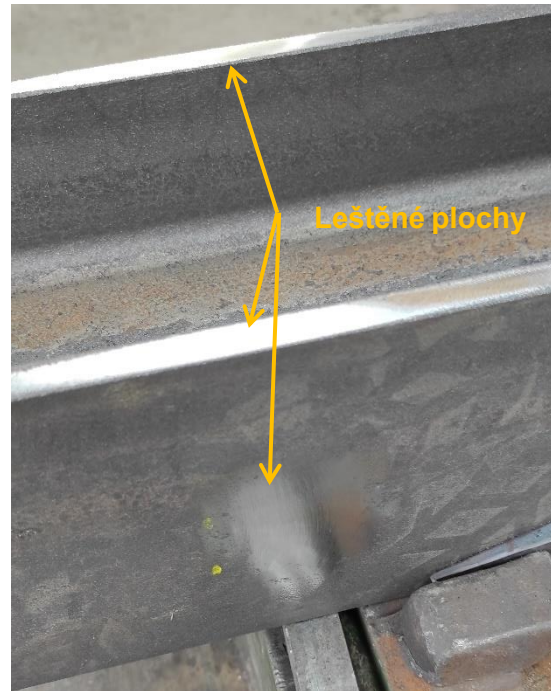
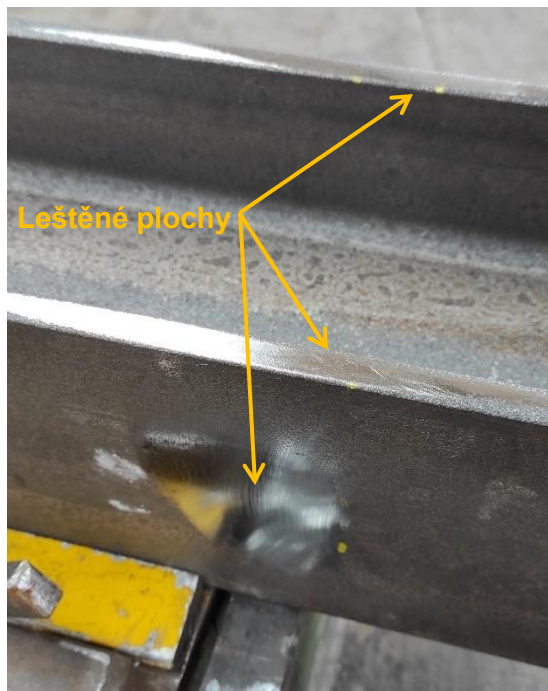


Obr. 24 – Měření teploty povrchu IR teploměrem (dvě červené tečky na objektu ukazují místo, ve kterém se teplota zjišťuje)

Poté jsem přešel k umístění profilů na cvičnou lavici a přitažením upevňovacích šroubů a označil jsem body uchycení tenzometrů. Oba profily bylo třeba vůči sobě vyrovnat příčně, podélně a eliminovat zkroucení válcovaných profilů (Obr. 25). Následně jsem označené body vyleštil (Obr. 26). Proběhla kontrola vyrovnání a kontrola bodů pro nalepení tenzometrů. Znovu jsem označil body žlutými terčiky (Obr. 27) a přešel jsem k postupu pro nalepení tenzometrů. Odmastil jsem povrch pomocí isopropanolu, smíchal jsem složky epoxidového lepidla a nanesl dostatečné množství do terčíku označené plochy, pomocí lepící pásky jsem správně nastavil polohu tenzometru a vtiskl jej do lepidla, přeložil teflonovou folií a měkkou gumovou podložkou. Poté jsem zatěžkal každý tenzometr pomocí svěrky nebo kusy těžkých ocelových výřezků (Obr. 28), tenzometry byli zatěžkané po dobu 3 dnů pro úplné vytvrzení lepidla. Po uvolnění závaží jsem zkontroloval polohu (Obr. 29) a funkci tenzometrů tím, že jsem změřil odpor na pájecích plochách pomocí multimetru. Vybrané tenzometry mají odpor 350 Ω . Dále jsem nalepil pájecí spoj před každý tenzometr, ten realizuje funkci ochrany tenzometru při neúmyslném potažení kabelu. Přešel jsem k části pájení, každý tenzometr jsem zapojil do půl Wheatstoneova mostu s odporem 350 Ω (Obr. 30 a Obr. 31). Ve výsledku jsem po obvodu obou profilů HEB140 rozmístil 8 tenzometrů, 4 kusy symetricky proti sobě v ose pásnice a 4 kusy na horním čele obou stojin (Obr. 32).



Obr. 25 – Vyrovnání profilů pomocí klínů s přiloženým pravítkem



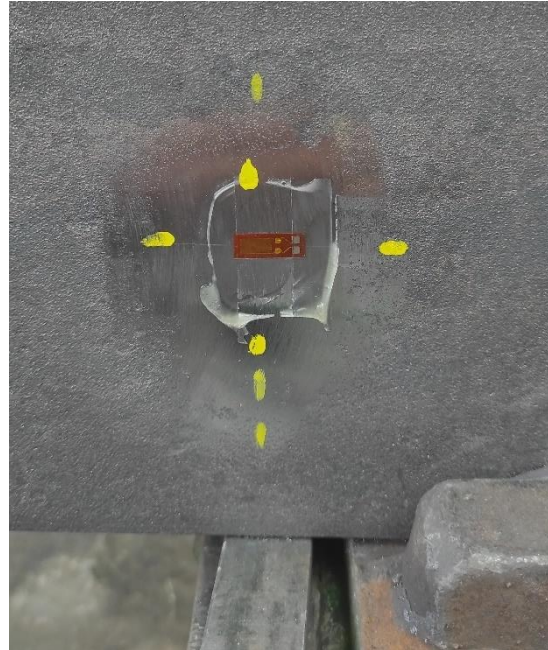
Obr. 26 – Vyleštěné plochy pro SG



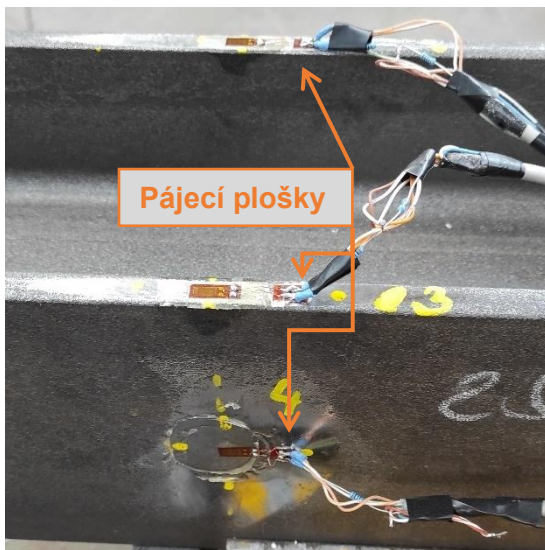
Obr. 27 – Terčičky pro umístění SG



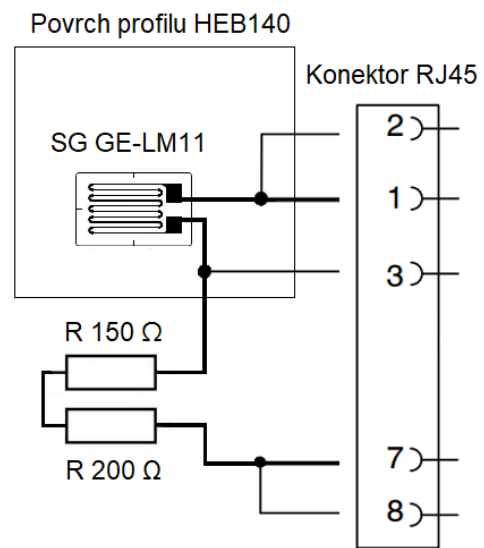
Obr. 28 – Zatížení tenzometrů



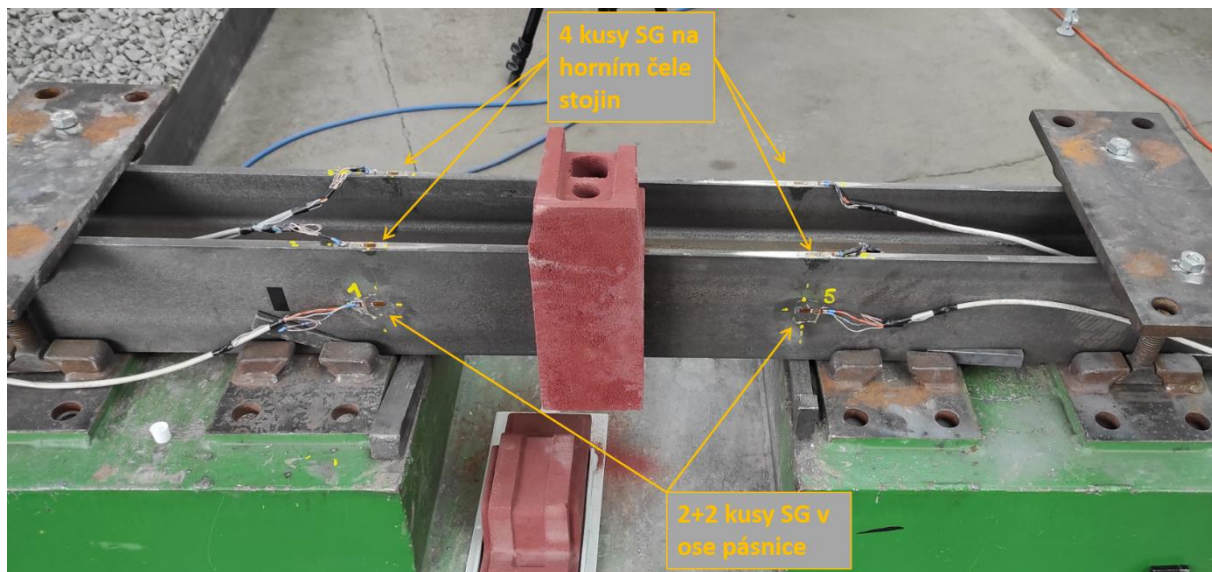
Obr. 29 – Nalepený SG GE-LM11



Obr. 30 – Připájené SG k obvodu



Obr. 31 – Schéma zapojení SG



Obr. 32 – Vyznačené umístění SG po profilu HEB140

Zapojení všech SG je svedeno do konektorů RJ45 spojené s terminály VT810 (Obr. 16). Terminály jsou připojeny na ústřednu MGCplus s AB22A displejem přes zabudovaný modul AP810 (Obr. 17 a Obr. 18). Měření jsem sledoval a záznam uložil přes rozhraní aplikace ústředny MGCplus Assistant. Pro vyhodnocení jsem využil software Matlab.

6. Digitální korelace obrazu

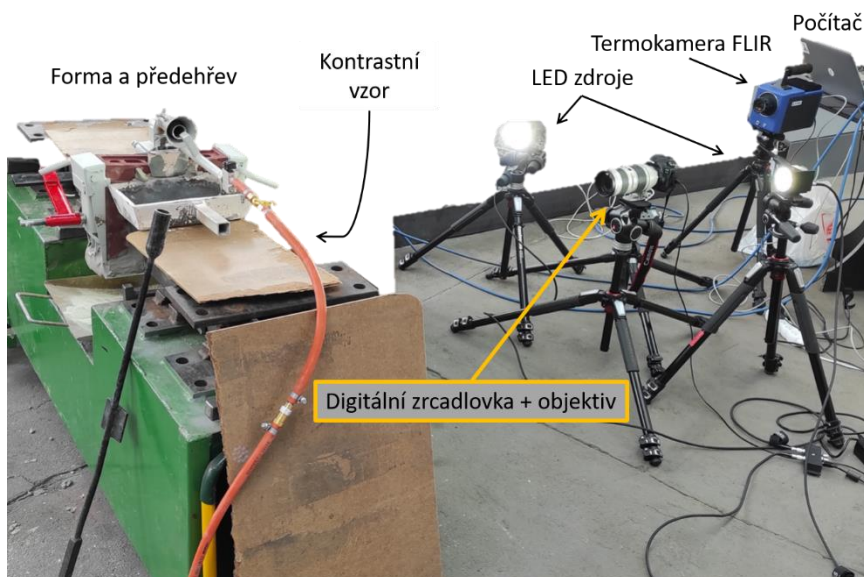
Pro proveditelnost a přesnost této metody bylo stěženi vytvořit kontrastní stochastický vzor na povrchu profilu, tak aby odolal vysokým teplotám a zároveň splňoval podmínku kontrastu pro optické snímání. Maximální teplota v těsné blízkosti svaru dosahuje 550 – 750 °C, pro takovéto teploty nelze využít jiné metody než nanesení žáruvzdorné barvy, které se používají na výfukové potrubí a odolají teplotám až 1000°C. Konkrétně nejvíce kontrastní rozptyl, a to bílou matnou a černou matnou barvu. Nanesl jsem 3 vrstvy matné černé barvy vždy po 20 minutách při teplotě 25 °C a poté jsem rozstříkem nanasíl bílou barvu, aby se vytvořil výše zmíněný vzor (viz Obr. 33).



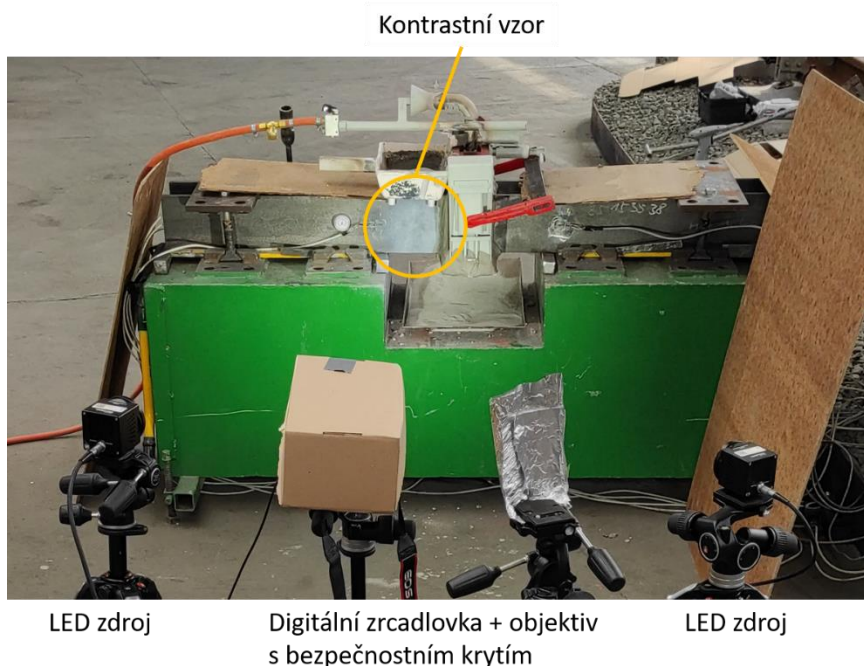
Obr. 33 - Kontrastní stochastický vzor vytvořený barvami

Pro osvětlení celé scény, tak aby byla dostatečně a konzistentně osvětlena, jsem na profilu využil dva výkonné LED zdroje Veritas Constellation 60 po stranách. Snímání povrchu zajistila

digitální zrcadlovka Canon EOS 80D a objektiv Canon EF 70-200 mm f/2.8L umístěná kolmo a v bezpečné vzdálenosti od svaru, aby se předešlo expozici s vysokou teplotou (Obr. 34), k ochraně před jiskrami jsem aparát přikryl krytkou (Obr. 35).



Obr. 34 – Přehledové rozestavení aparátů pro záznam svařovacího děje



Obr. 35 – Umístění aparátů pro DIC i s pohledem na snímanou scénu

Pro snímání obrazových dat svařovacího procesu pomocí digitální zrcadlovky byl zvolen formát CR2. Jedná se o nekomprimovaný formát RAW produkovaný fotoaparáty Canon. Z podstaty metody DIC je nutné zachovat obrazový formát v bezztrátové formě. Z důvodu lepší

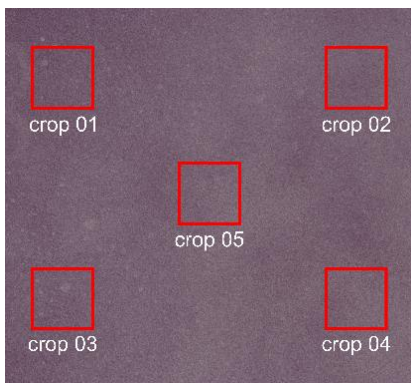
manipulace s obrazovými daty byl formát CR2 převeden do běžnějšího formátu PNG (využívající kompresi, ale v bezztrátové formě).

Pro vyhodnocení bylo ze snímku vybráno 5 oblastí o velikosti 600 x 600 px (Obr. 36), v každé oblasti byli vytvořeny 4 korelační body pro větší statistickou relevantnost. Parametry algoritmu DIC pro každý korelovaný bod byly nastaveny totožně: velikost referenčního (korelačního) okna 200 x 200 px, velikost vyhledávacího okna 40 x 40 px Obr. 38.

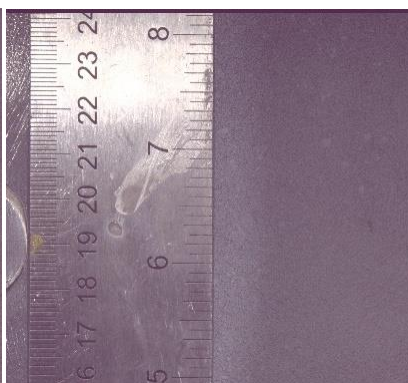
Sekvence snímku pořízena v průběhu svařovacího děje byla zpracovaná DIC algoritmem (DIC algoritmus vyvíjen v rámci disertační práce Ing. Václava Rady). Výstupem z algoritmu je matice obsahující x a y posuny jednotlivých korelovaných bodu skrze sekvenci snímků. V rámci následné analýzy dat došlo ke zpracování matic (spárování posunu s časem pořízení snímků, průměrování pomocí hodnot z jednotlivých bodu v daném výřezu atd.) do formátu vhodného (ASCII textový soubor) pro zhodnocení a prezentaci výsledků. Součástí zapsání dat je i přepočítání pixelů na milimetry podle přiložené měřky nasnímané při stejném rozlišení jako snímky svařovacího procesu (Obr. 37).

Výsledné textové soubory pro každý výřez obsahují: pořadí snímku, časovou značku (relativní), posuny x,y jednotlivých bodu v mm i px a zprůměrované posuny x,y v mm i px přes všechny 4 korelované body.

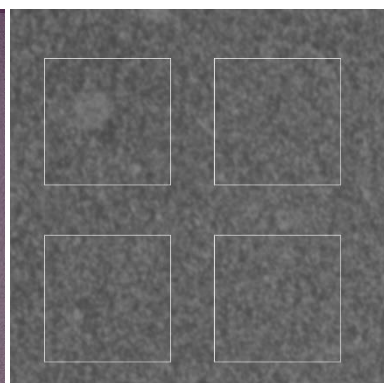
Textové soubory dat byly použity pro vykreslení grafů posunutí materiálu viz Obr. 59 a Obr. 60 v kapitole DIC.



Obr. 36 – Vybrané oblasti pro DIC, označené jako crop 0X

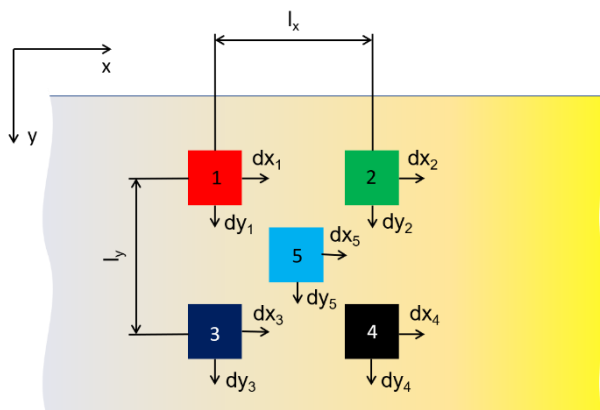


Obr. 37 – Měřítko použité pro přepočítání jednotlivých pixelů na milimetry



Obr. 38 – 4 korelační body v oblasti crop 01

Z hodnot posunu obrazu (dx a dy) všech oblastí (viz Obr. 39) jsem stanovil teplotní dilataci.



Obr. 39 – Schématické vyjádření rozměrů a posunutí jednotlivých snímaných polí

Teplotní dilatace (Δx) je dána rozdílem přírůstků posunu, konkrétně ji lze vyjádřit ve směru x :

$$\Delta x_{21} = dx_1 - dx_2 \quad 5$$

kde dx_1 je deformace prvního pole ve směru x a dx_2 je deformace druhého pole ve směru x . Tímto způsobem jsem spočetl i dilatace mezi oblastmi ve směru y . Z vypočtených hodnot jsem dále stanovil teplotní deformaci ε_t a přírůstek teploty Δt ve snímané oblasti. Výpočet teplotní deformace je dán vztahem:

$$\varepsilon_{t12} = \frac{dx_1 - dx_2}{l_1} \quad 6$$

kde l_1 je vzdálenost mezi oblastmi.

Vztah pro přírůstek teploty vyplývá z rovnice teplotní roztažnosti,

$$\varepsilon_t = \alpha \cdot \Delta t \quad 7$$

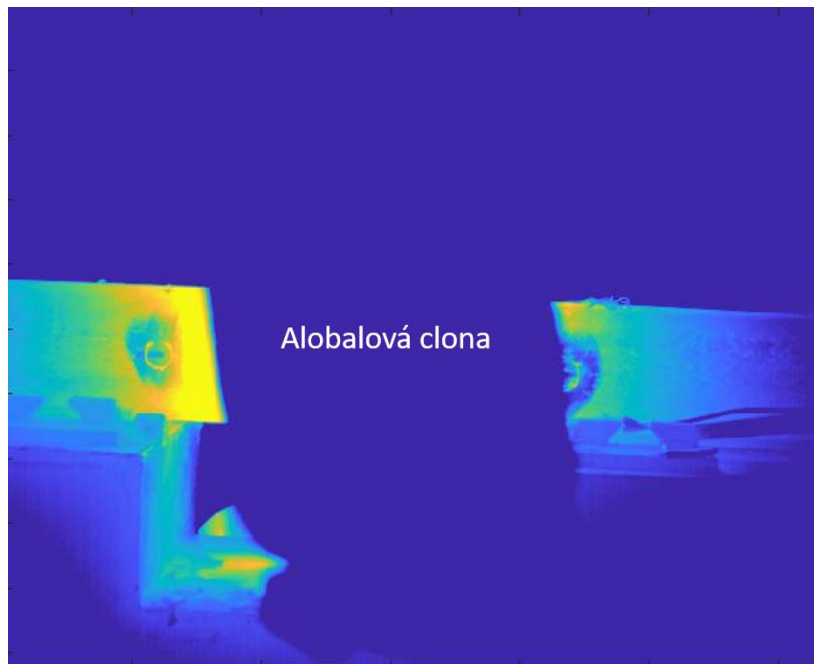
přepsáním rovnice do tvaru pro získání Δt dostaneme vztah:

$$\Delta t = \frac{\varepsilon_t}{\alpha} \quad 8$$

ve kterém α představuje koeficient teplotní roztažnosti materiálu. Výsledek jsem poté srovnal s měřením IR teploměru.

7. Termografie

Pro záznam a analýzu dějů ovlivňujících mikrostrukturu jsem umístil termokameru FLIR SC7600, s rozlišením 640x512 pixelů a citlivostí 0.02 °C. Avšak tato kamera je určena pouze do teplot nepřesahující 300 °C, proto do jejího obrazu byla umístěna alobalová clonka tak, aby zakryla oblast s vyšší teplotou povrchu. Tím je její použití limitováno, avšak na konci procesu, kdy teploty klesly pod 300 °C, jsem clonku odstranil a kamera tak mohla snímat celé teplotní pole. Umístění kamery je ukázáno na Obr. 34, umístění clony pak na Obr. 40.



Obr. 40 – Umístění alobalové clonky v obrazu kamery

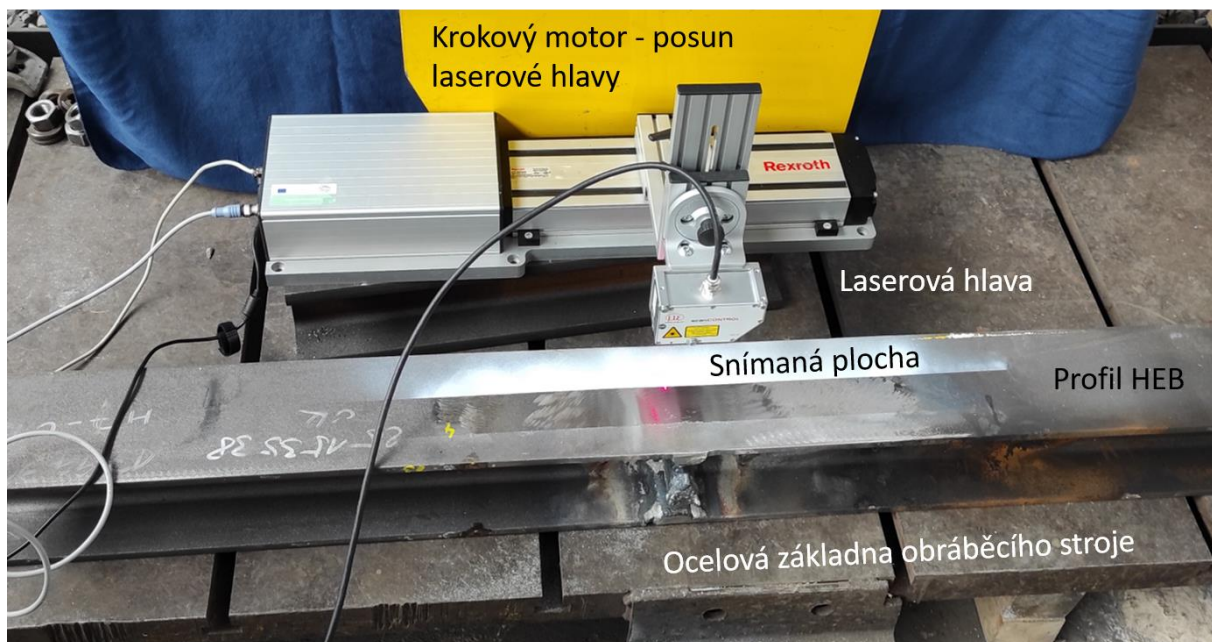
8. Profilometrie

Pro vytvoření roviny profilu pomocí laserové triangulace jsem vybrousil přelitek svaru do roviny s profilem HEB a následně jsem výbrus zaleštil. Poté jsem nanesl bílou barvu, tím jsem připravil ideální podmínky pro měření profilometrem. Následovalo vyrovnaní profilometru se svařencem, to jsem provedl na ocelové základně obráběcího stroje pro zajištění přesné roviny (Obr. 41)

K měření bylo použito zařízení Micro-epsilon Laser scanner ScanControl LLT 2800-25 (Obr. 1), zapůjčené z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR.

Dalším krokem bylo nastavení vzdálenosti laserové hlavy od povrchu ve stanoveném rozmezí rozměrů od výrobce profilometru. Připojením profilometru k softwaru počítače se nastavil offset neboli počáteční doraz pojezdu, od něho se odvíjela vzdálenost měření, v polovině této maximální vzdálenosti se upravila poloha profilometru vůči povrchu tak, aby byla ve středu

svaru. Pomocí důlčiku jsem označil střed svaru a krajní body ve vzdálenosti 10 cm na každou stranu, pro názornost polohy svaru a příslušných oblastí. Po provedení těchto úkolů jsem provedl kontrolu měřené oblasti posunem pojezdu profilometru do krajních hodnot a poté provedl měření. Výsledkem měření je řada výškových profilů ve směru kolmém k pohybu profilometru. Tyto profily jsou pak v prostředí aplikace Matlab spojeny v jedinou souvislou plochu ve 3D prostoru.



Obr. 41 – Sestava profilometru s měřeným vzorkem



Obr. 42 – Elektronické pravítko EML-T/2003

9. Tvrdost

Na ověření tvrdosti a vlivu svarového spoje jsem vybroušený profil po profilometrii použil pro zkoušku tvrdosti. Plochu profilu jsem ještě více vyleštil (což je podmínka dosahování správných hodnot tvrdosti indentorem), poté si narýsoval body, ve kterých jsem poté provedl měření (Obr. 43).



Obr. 43 – označené polohy bodů vpichu

Pro zkoušku tvrdosti mi bylo zapůjčeno mobilní tvrdoměrné zařízení Meopta POLDI 568 01 z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR (Obr. 45). Tvrdoměr využívá mechanický pákový převod ke vtlačení indentoru do materiálů a poté je vybaven podsvíceným optickým mikroskopem s cejchovanou stupnicí a mikrometrickým šroubem pro přesné změření délky uhlopříček vpichu. Obsahem balení tvrdoměru byla tabulka pro přesné vyhodnocení tvrdosti na základě výpočtu průměru hodnot délek úhlopříček.



Obr. 44 – Ukázka měření tvrdosti



Obr. 45 – Tvrdoměr Meopta POLDI 568 01

V této práci jsem srovnal zkoušku tvrdosti od výrobce termických dávek pod označením HBW 2.5/187.5 (průměr kuličky/měřítka), při zatěžovací síle 1839 N. Výsledkem měření výrobce je průměr tří příčných vpichů na ose svaru (viz Obr. 46), tato hodnota je poznamenána v protokolu ke každé svařovací dávce. Tento protokol je neveřejný, obsahuje citlivá data, jejichž použití mi nebylo dovoleno.

MESURE DE LA DURETE (MĚŘENÍ TVRDOSTI)				
DURETE	MOYENNE	190	HB	
	PRŮMÉR	193	HB	
MIN :	160 HB	MAX	200 HB	

Obr. 46 – Protokol o produktu, část měření tvrdosti v ose svaru

Výsledky a porovnání tvrdostí jsou v kapitole III. Převod jednotek HV na HB jsem přepočítával pomocí převodní hodnoty dané normou EN ISO 18265:2014 [36], ve které udávají zaokrouhlený vztah $HB = 0.95 HV$.

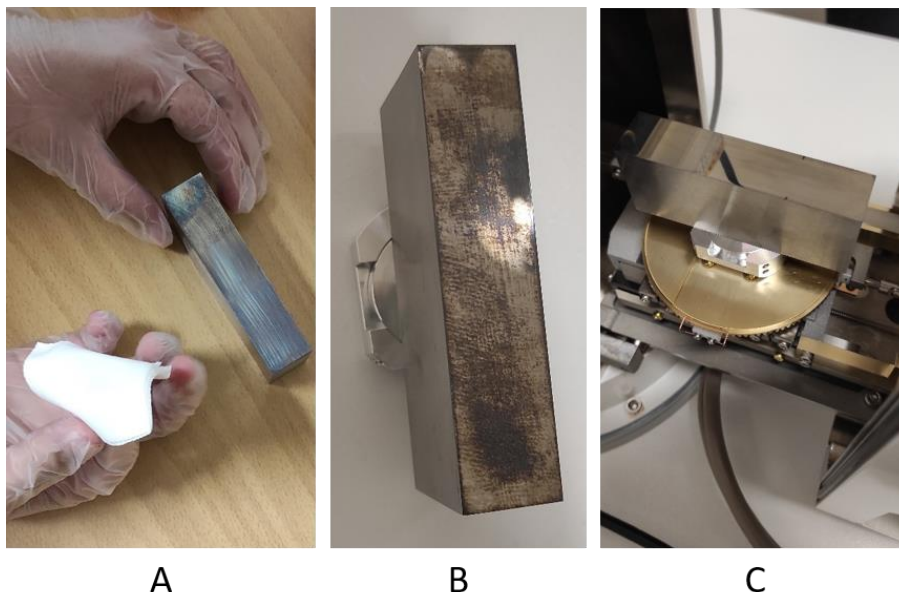
10. Skenovací elektronový mikroskop

Analýze mikrostruktury materiálu po svařování pomocí SEMu předcházela příprava vzorku. Použil jsem stejný vzorek, jako pro experimentální šetření napěťového stavu v laboratorní peci, čili ocel třídy 11. Tento vzorek jsem leštil postupně stále jemnějšími brusivy až jsem docílil hrubosti leštění diamantovým abrazivem o velikosti zrn 3 mikrometry (Obr. 47)



Obr. 47 – vyleštěný vzorek pro SEM

Dále bylo třeba vzorek naleptat Nitalem (5% roztok kyseliny dusičné v ethanolu, $\ominus \text{HNO}_3$ v $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) pro vizuální zobrazení hranic zrn a zrn jako takových. Postup leptání Nitalem byl následovný: nejprve jsem odmastil plochu vzorku, pak vzorek přetřel polštářkem namočeným v Nitalu (**A**, Obr. 48), počkal cca 2 minuty, vzorek otřel suchým polštářkem, a nakonec jsem znovu plochu vzorku odmastil (**B**, Obr. 48). Takto připravený vzorek jsem umístil na nastavitelný stolek mikroskopu (**C**, Obr. 48).



Obr. 48 – Postup přípravy vzorku, A – leptání vzorku, B – leptaný vzorek – odmaštěný, C – umístění vzorku na stolek SEM

Analýza v SEMu Jeol JSM-IT200, kterým disponuje Katedra mechaniky a materiálů FD ČVUT, spočívala v detekci elektronů SE a BSE pro topografii a mikrostrukturu, poté RTG záření pro rozbor atomárního složení. Na vzorku jsem vybral několik míst, zvláště svarový kov, tepelně

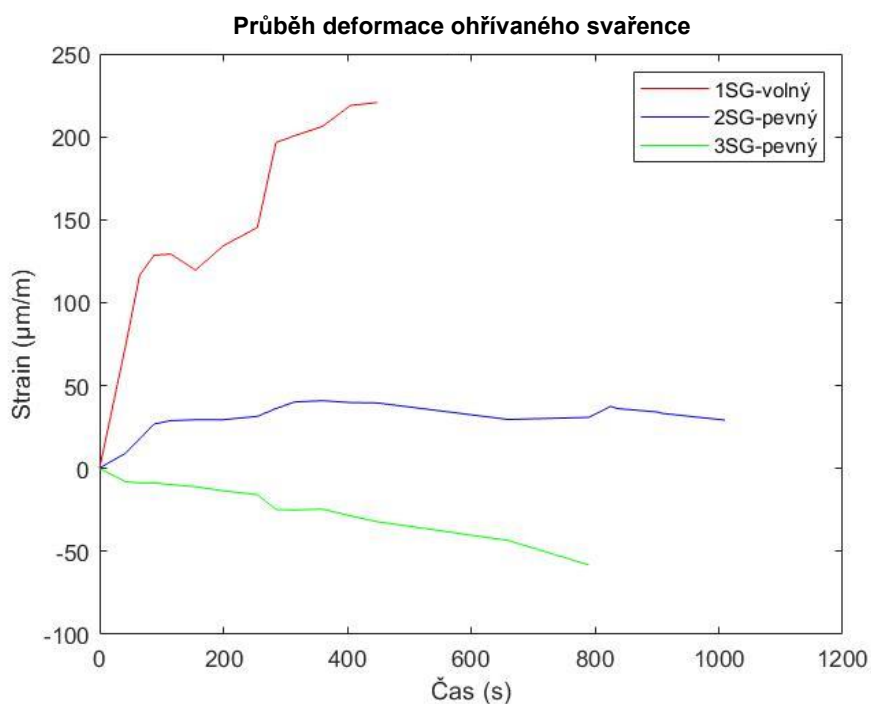


ovlivněnou oblast (TOO) a původní materiál. Snímky ze SEM byly pořízeny při urychlovacím napětí 20 kV při zvětšení 500x.

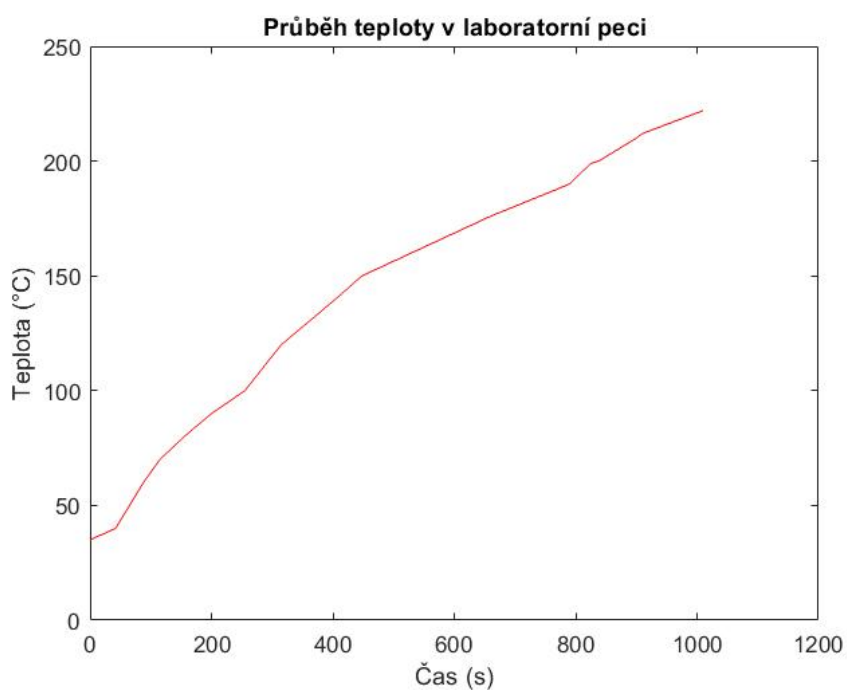
Měření a záznam mikrostruktury provedené na Katedře mechaniky a materiálů FD ČVUT bylo za účelem porovnání výsledků zopakováno na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. Zde disponují zařízením SEM MIRA II LMU firmy TESCAN (Brno, ČR), vybavený SE a BSE detektory a EDS zařízením Quantax od firmy Bruker, kterým bylo možné vzorek snímat s větším přiblížením, konkrétně 6030x a 14810x, viz snímky v kapitole PREZENTACE VÝSLEDKŮ – SEM.

PREZENTACE VÝSLEDKŮ

11. Tenzometrické šetření napěťového stavu v laboratorní peci

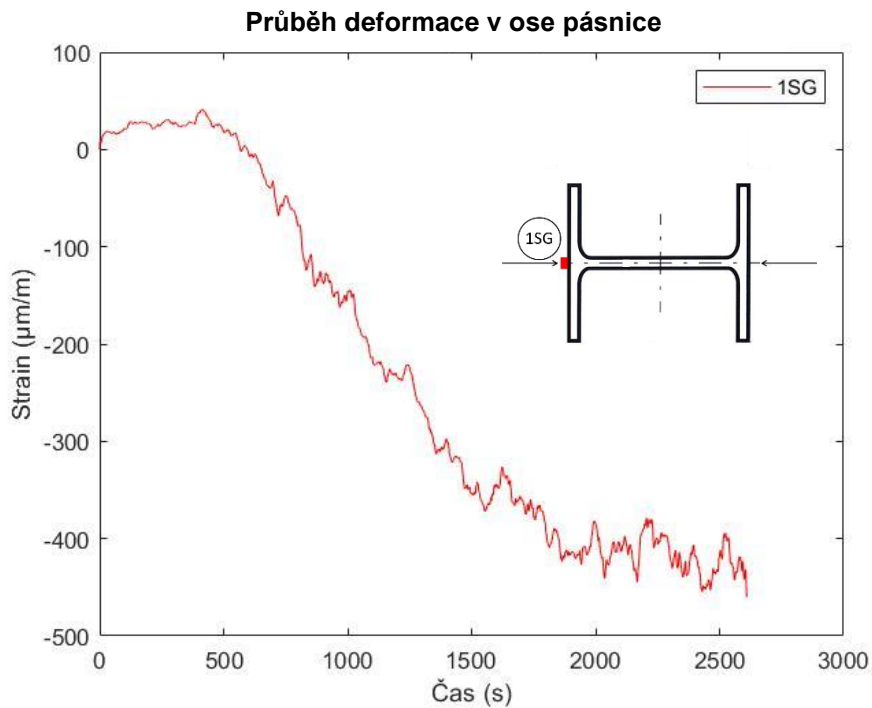


Obr. 49 – Průběh deformace měřený tenzometry LY61

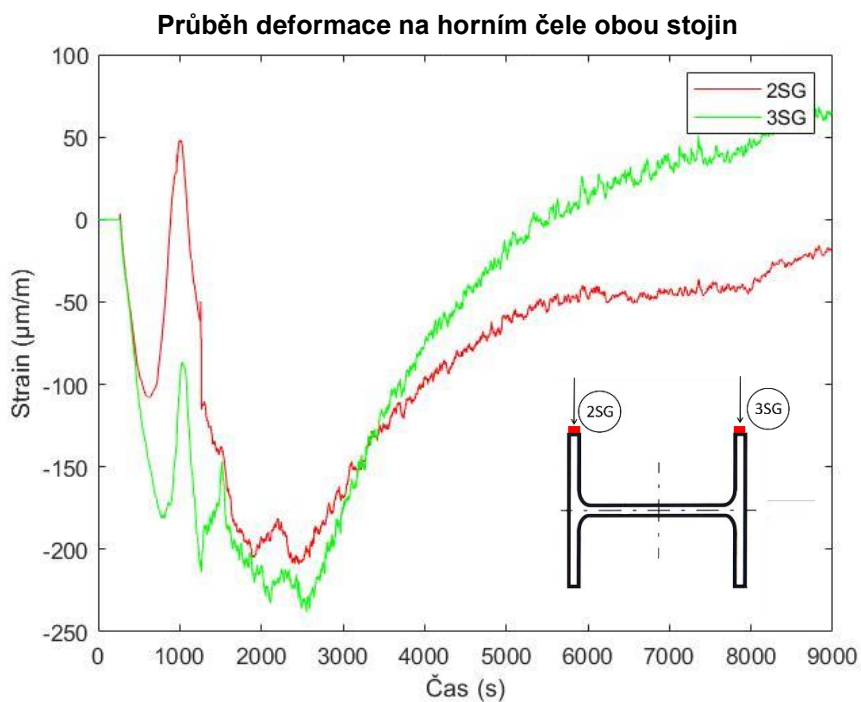


Obr. 50 – Průběh zvyšování teploty v laboratorní peci

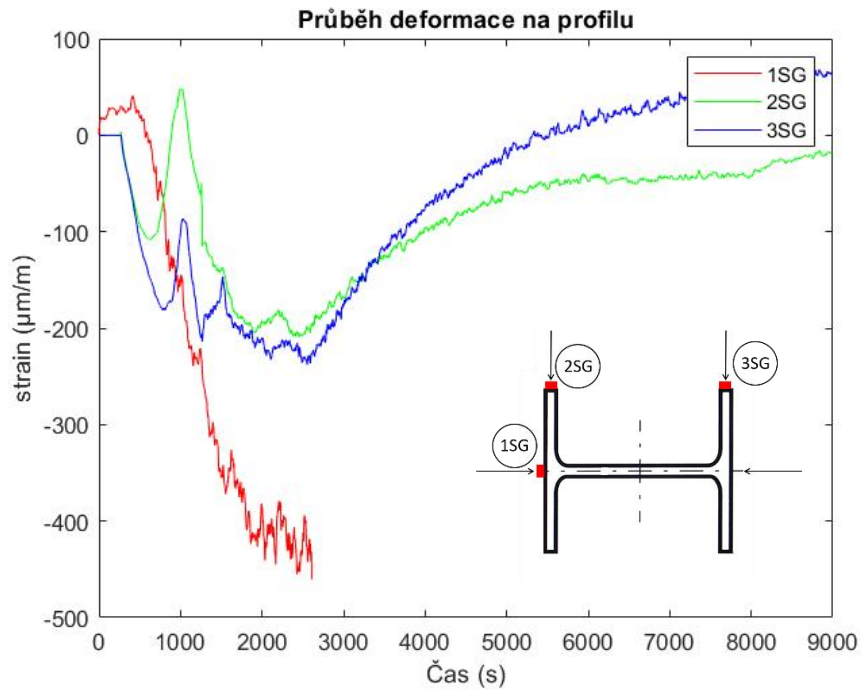
12. Tenzometrické šetření napětového stavu v průběhu svařování



Obr. 51 – Průběh deformace tenzometru (GE-LM11) 1 v ose pásnice

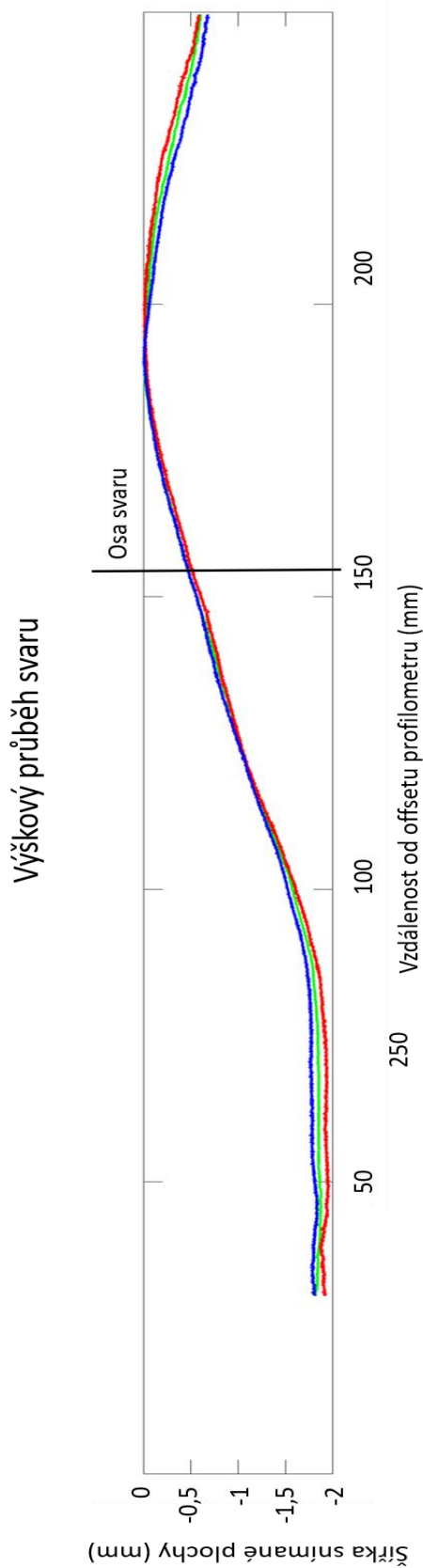


Obr. 52 – Průběh deformace tenzometrů (GE-LM11) 2 a 3 na horním čele obou stojin

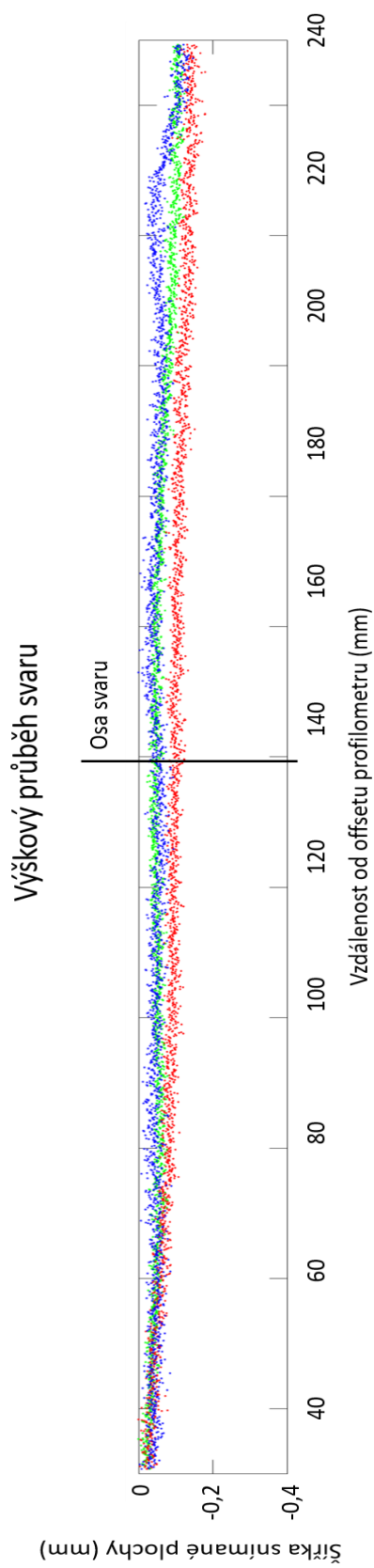


Obr. 53 – Srovnání průběhů deformace mezi tenzometry (GE-LM11) 1,2 a 3. Bod A označuje počátek vlivu přehřevu, B počátek vlivu vlitého svarového kovu, C největší sdílené teplo a maximální teplota v místech tenzometrů

13. Profilometrie

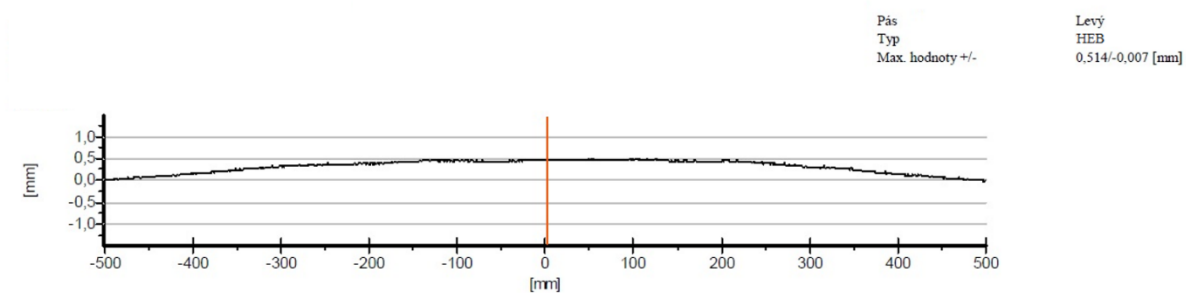


Obr. 55 – 2D výškový průběh broušeného svaru stojiny profilu HEB – s boční deformací

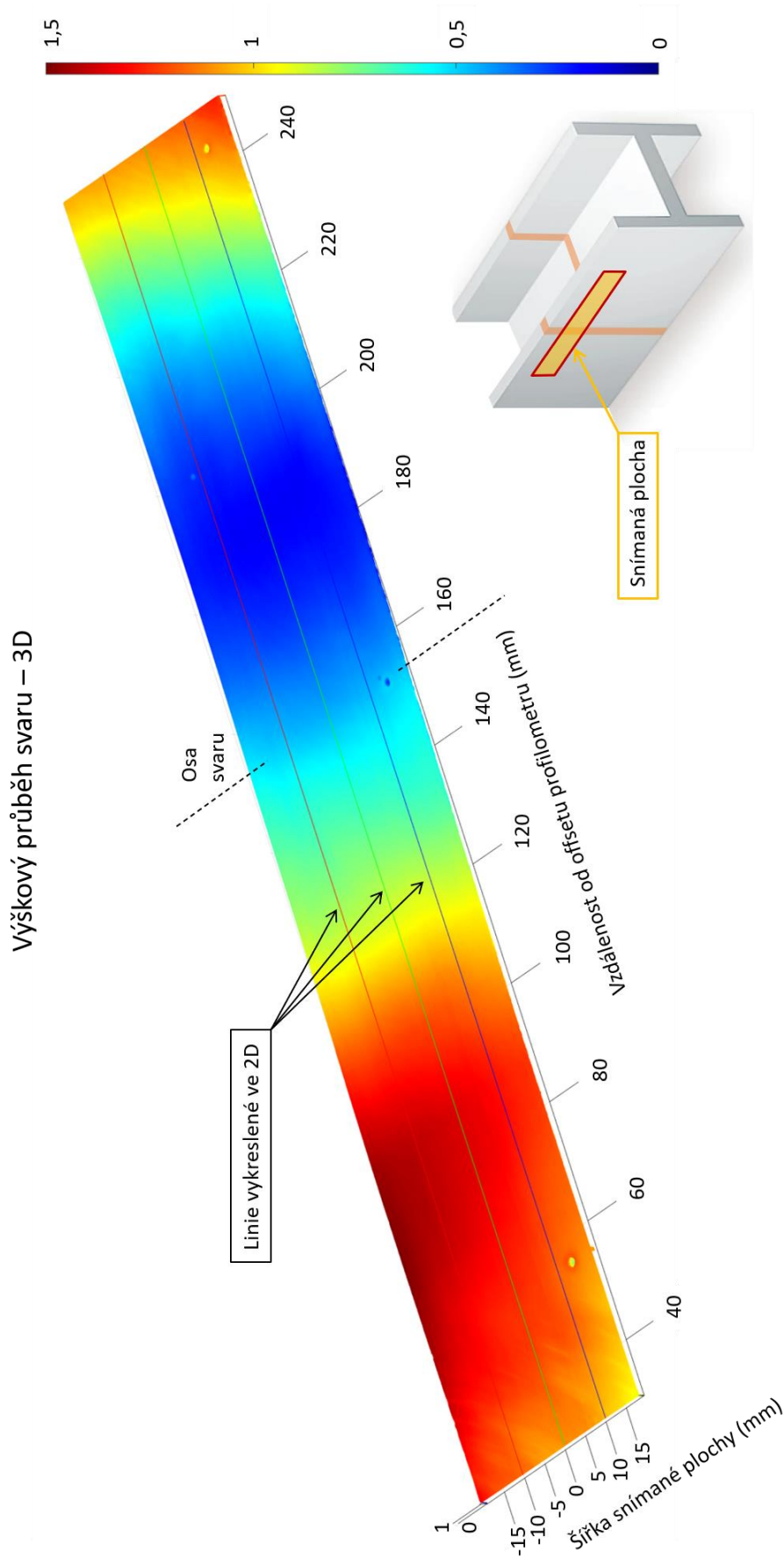


Obr. 54 – Ukázka výsledku svařování při správném provedení

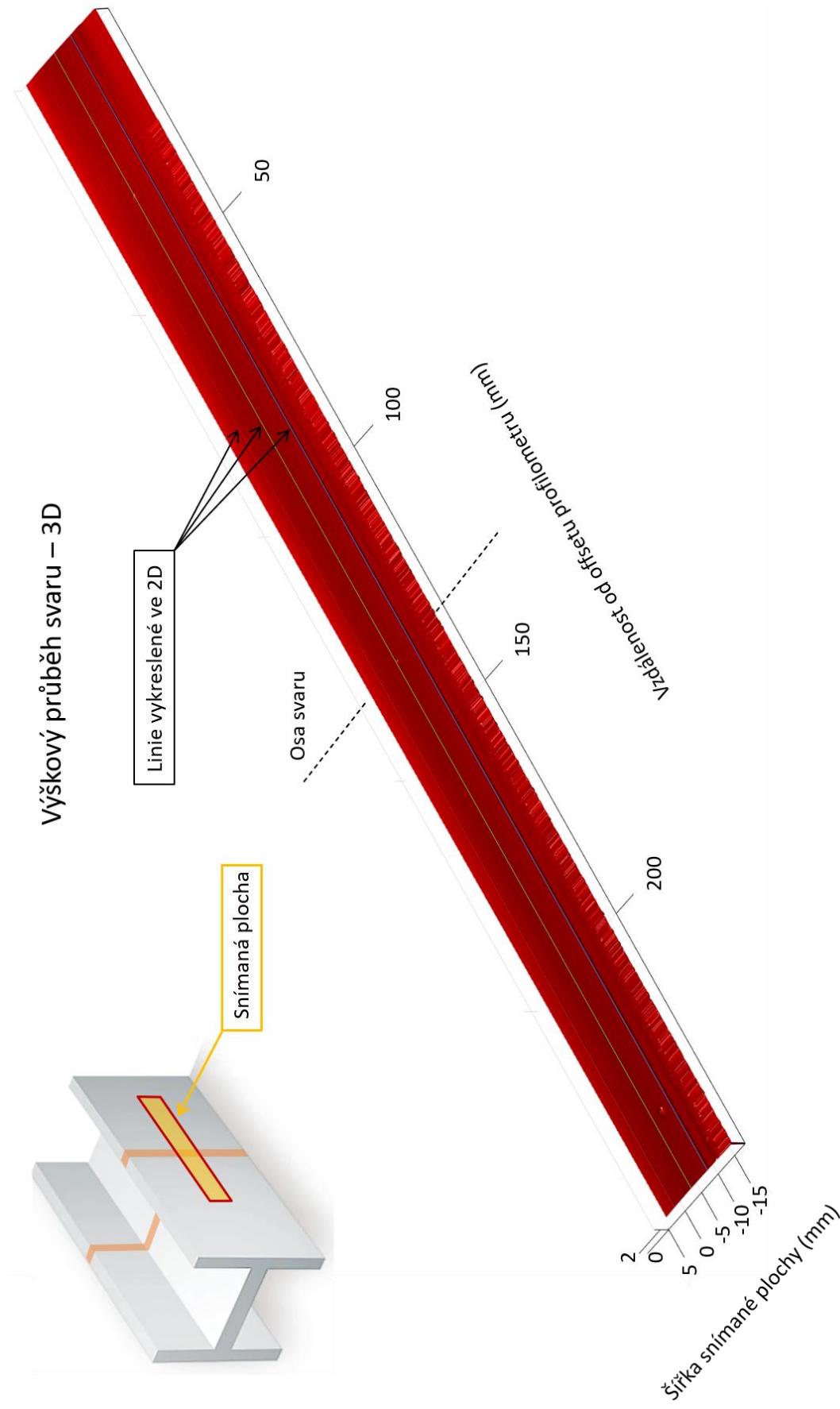
GRAF - MĚŘENÍ PRŮBĚHU SVARU



Obr. 56 – Srovnání – profilometrie pomocí elektronického pravítka EML-T/2003 profilu HEB

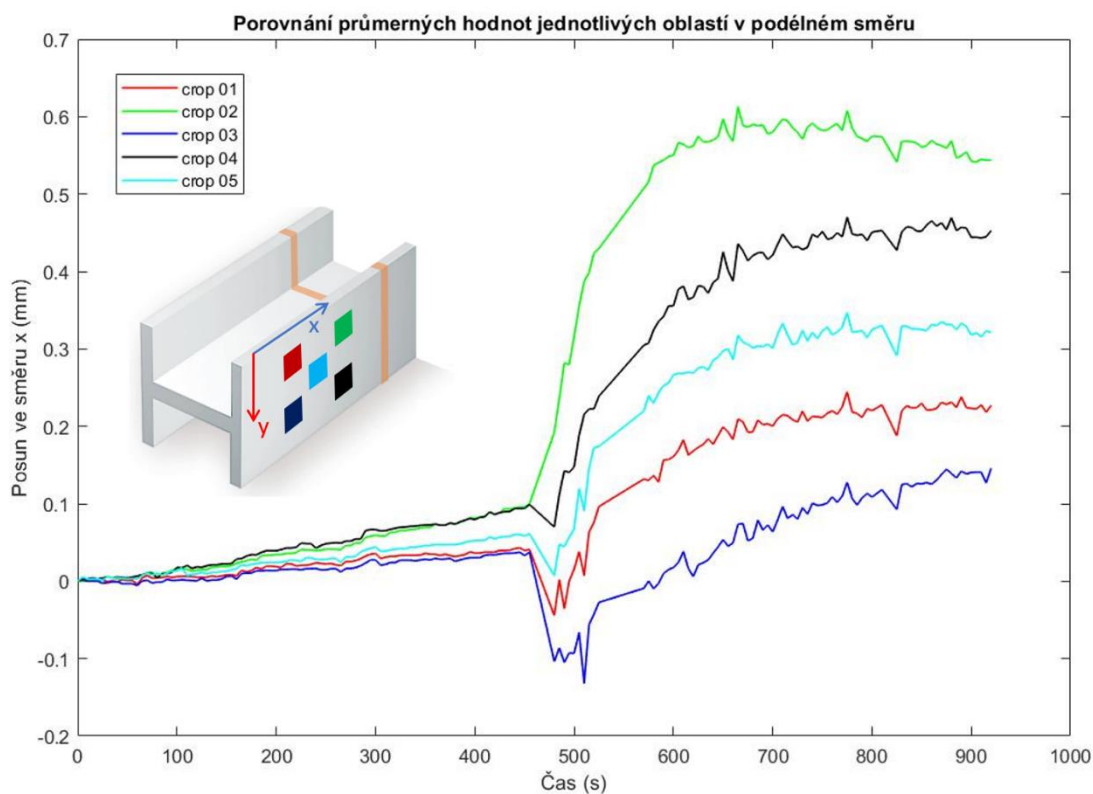


Obr. 57 – 3D výškový průběh svaru profilu HEB – s boční deformací (výhodou 3D zobrazení je, že ukazuje kompletnější informaci o výsledném tvaru, ze které lze vyčíst i přítomnost zkroucení)

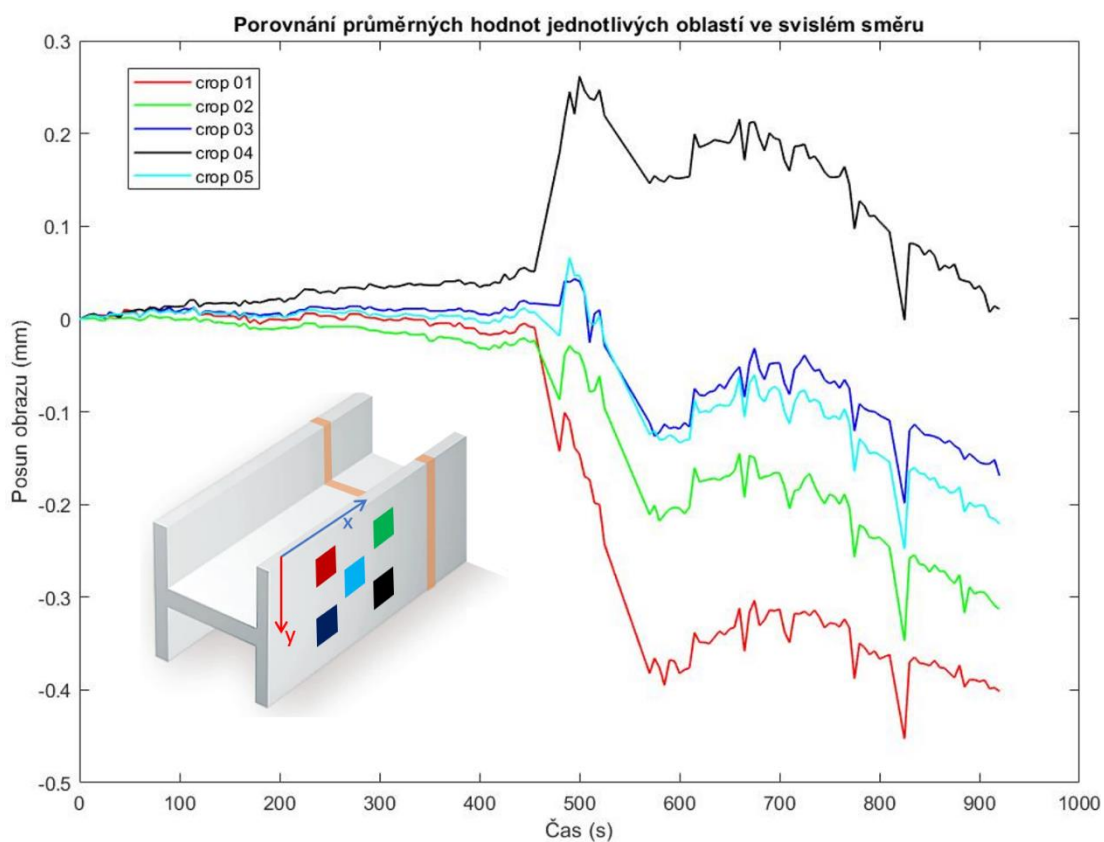


Obr. 58 – 3D ukázka výškového průběhu výsledku svařování při správném provedení

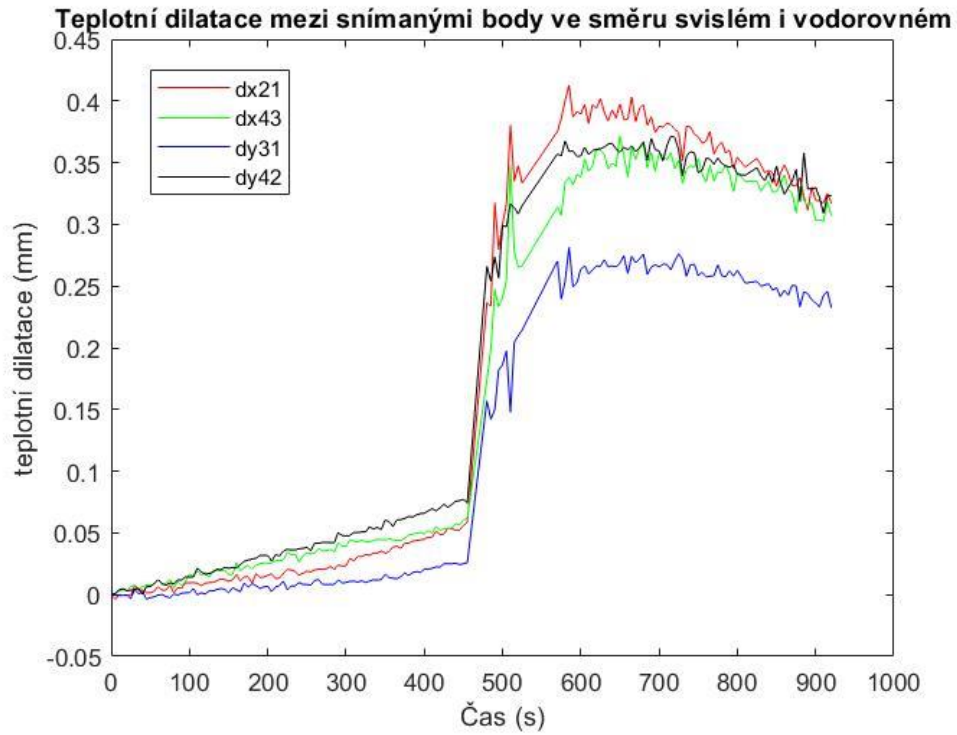
14. DIC



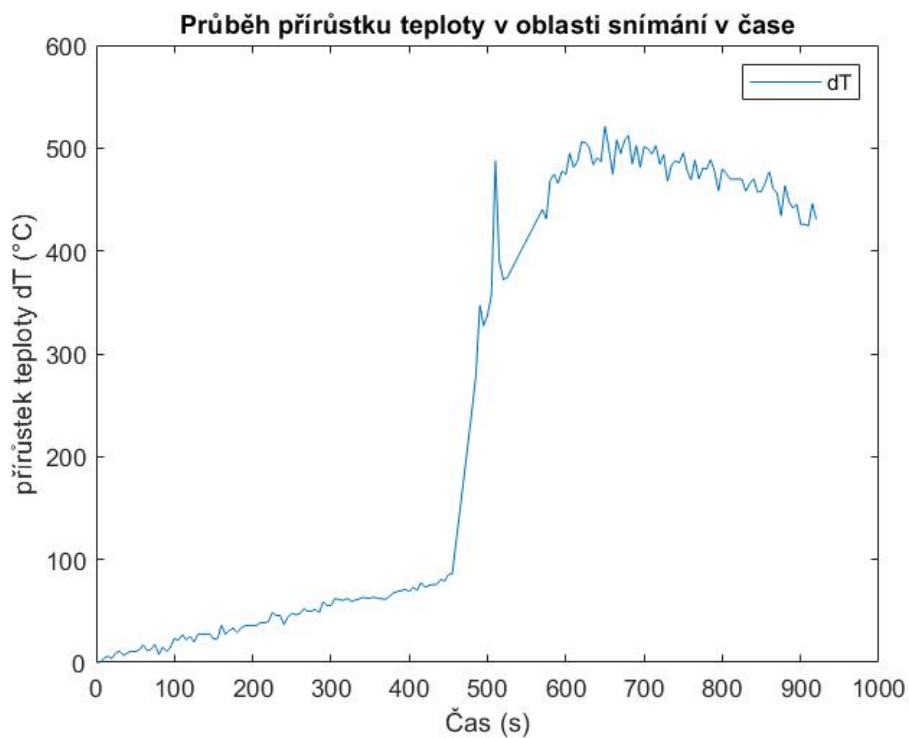
Obr. 59 – Vykreslení posunu jednotlivých polí v čase při procesu svařování ve směru x



Obr. 60 - Vykreslení posunu jednotlivých polí v čase při procesu svařování ve směru y



Obr. 61 – Vykreslené výsledky výpočtu teplotní dilatace mezi oblastmi ve směru x a y



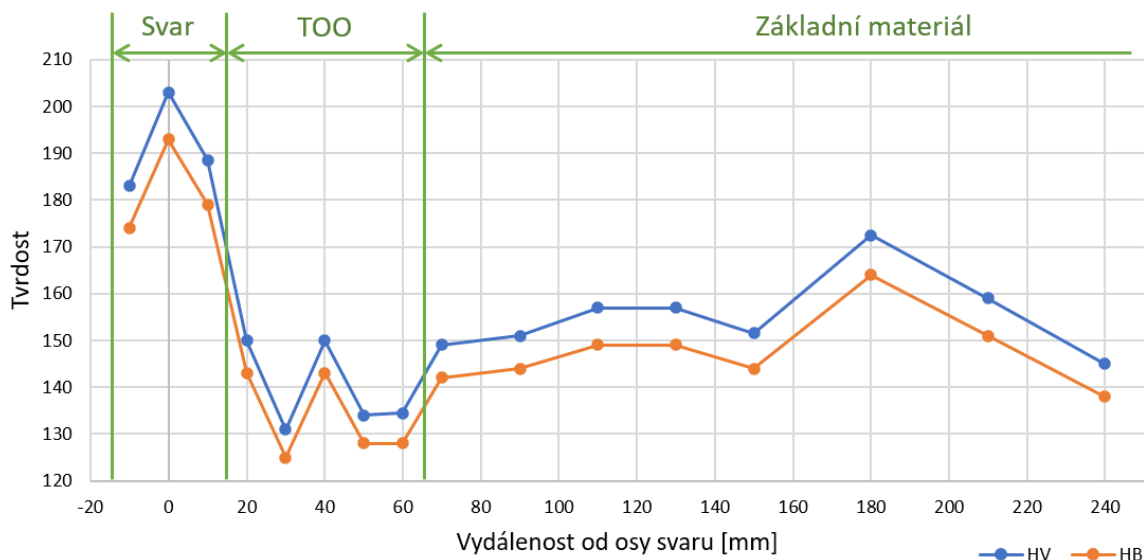
Obr. 62 – Vypočtený průběh přírůstku teploty ve snímaném poli

Čas (s)	Teplotní dilatace (mm)				Průměrná teplotní deformace ϵ_t	Přírůstek teploty Δt (°C)
	Δx_{12}	Δx_{34}	Δy_{13}	Δy_{24}		
655	0,3848	0,3560	0,2747	0,3625	0,034666	499,37

Tabulka 1 – Vypočtené hodnoty v čase ukončení procesu svaření

15. Tvrdost

Průběh tvrdosti ve svaru, TOO a materiálu profilu HEB

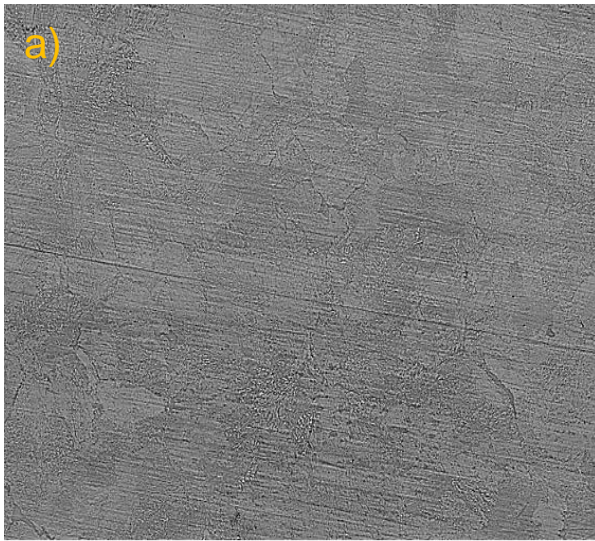


Obr. 63 – Závislost tvrdosti na vzdálenosti od svaru profilu HEB

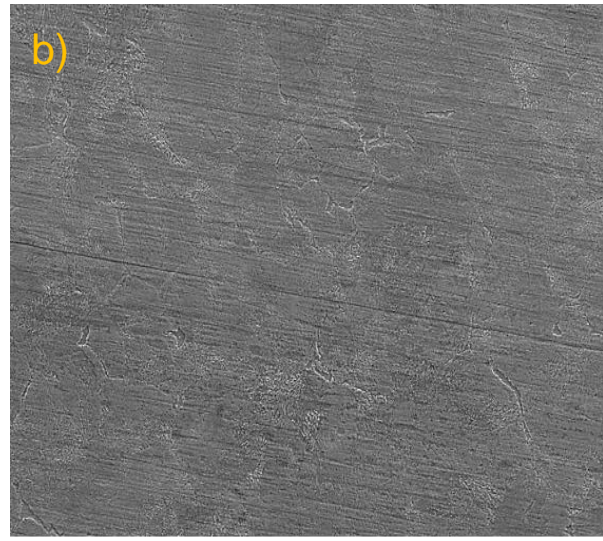
n [mm]	d1 [mm]	d2 [mm]	Průměr	HV	HB
-10	557	547	552	183	174
0	509	537	523	203	193
10	545	542	543.5	188.5	179
20	600	618	609	150	143
30	643	661	652	131	125
40	621	598	609.5	150	143
50	649	641	645	134	128
60	629	638	633.5	134.5	128
70	609	613	611	149	142
90	609	605	607	151	144
110	598	593	595.5	157	149
130	596	596	596	157	149
150	607	604	605.5	151.5	144
180	552	583	567.5	172.5	164
210	578	606	592	159	151
240	619	621	620	145	138

Tabulka 2 – Vstupní a výstupní hodnoty zkoušky tvrdosti

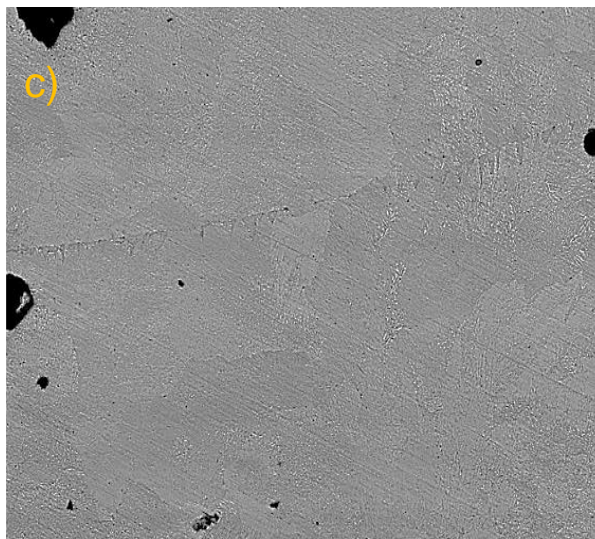
16. SEM



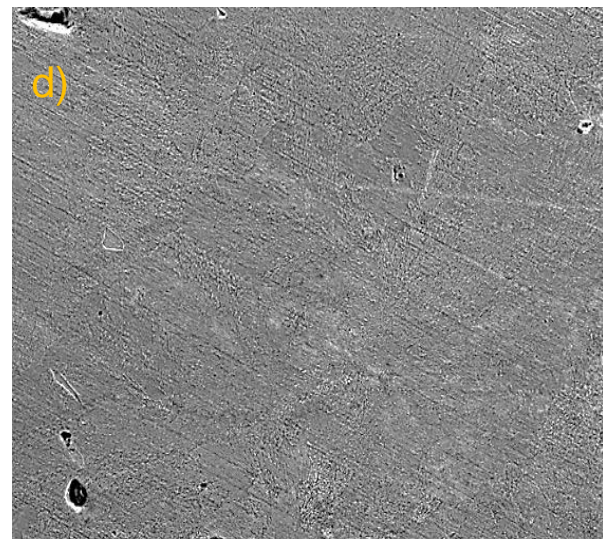
Původní materiál
Detektor: BSE



Původní materiál
Detektor: SE

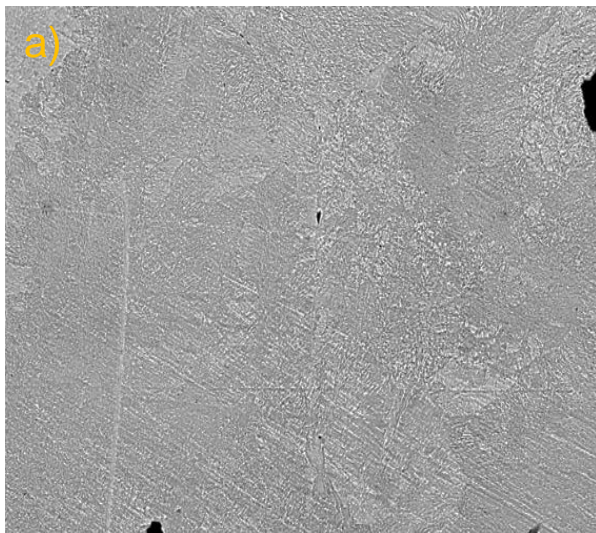


TOO
Detektor: BSE



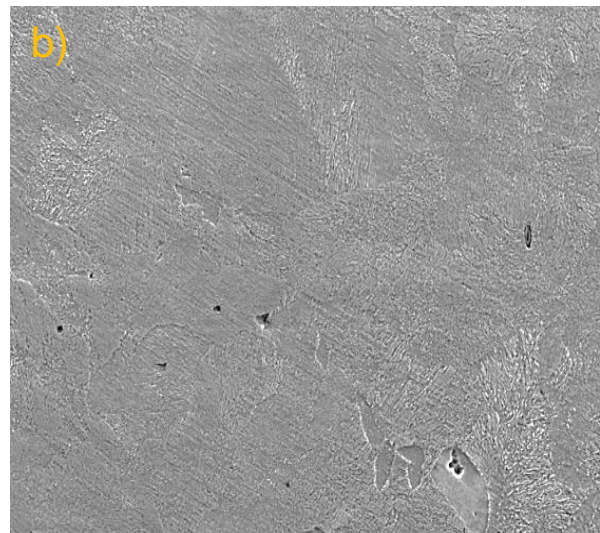
TOO
Detektor: SE

Obr. 64 – Snímky leptaného vzorku ze SEM JSM-IT200 za použití detektoru BSE pro a), c) a detektoru SE pro b), d)



Svar

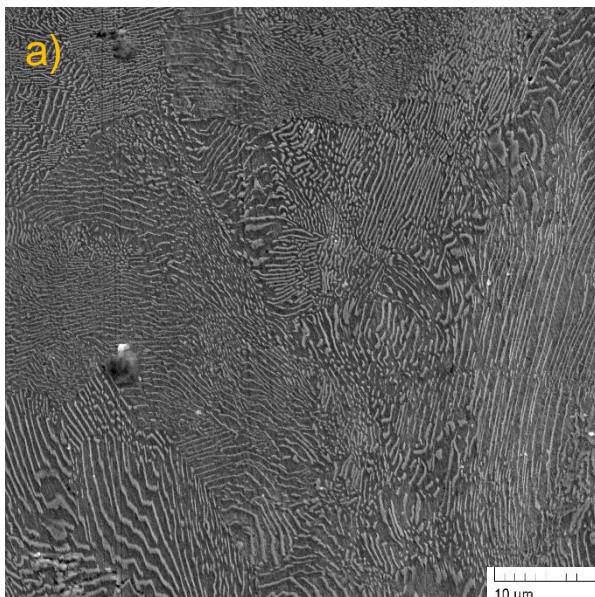
Detektor: BSE



Svar

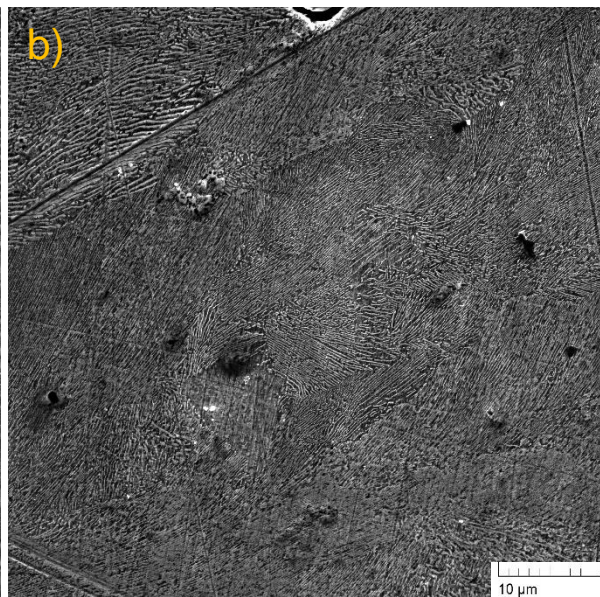
Detektor: SE

Obr. 65 – Snímky leptaného vzorku ze SEM JSM-IT200 za použití detektoru BSE pro a) a detektoru SE pro b)



Původní materiál

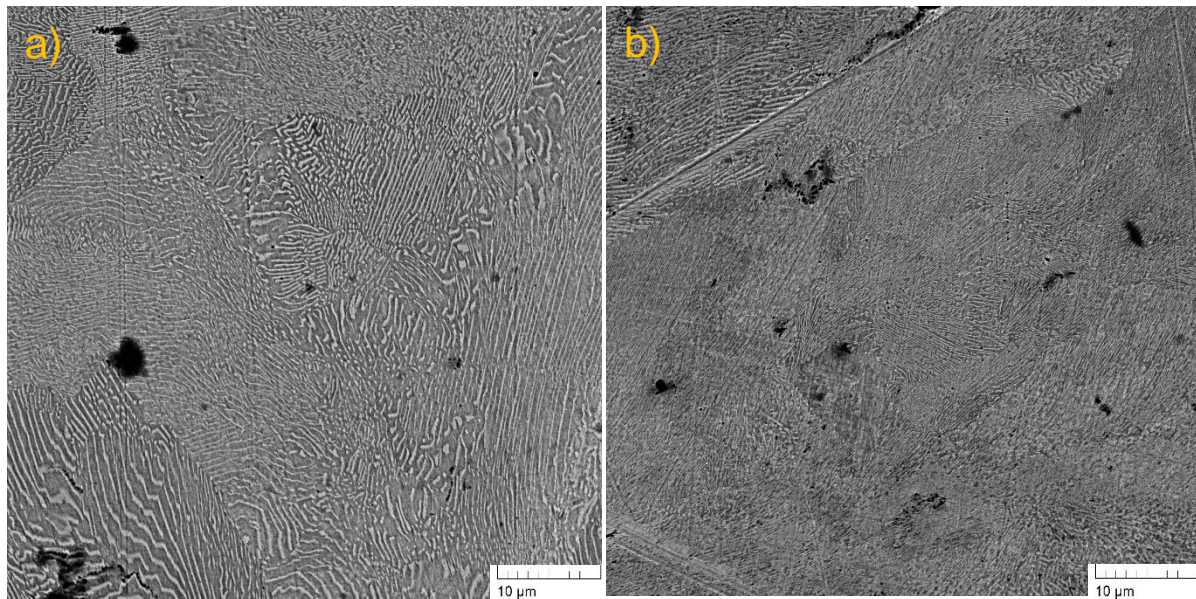
Detektor: SE



Svar

Detektor: SE

Obr. 66 – Snímky vzorku ze SEM MIRA II LMU za použití detektoru SE pro a) a b)



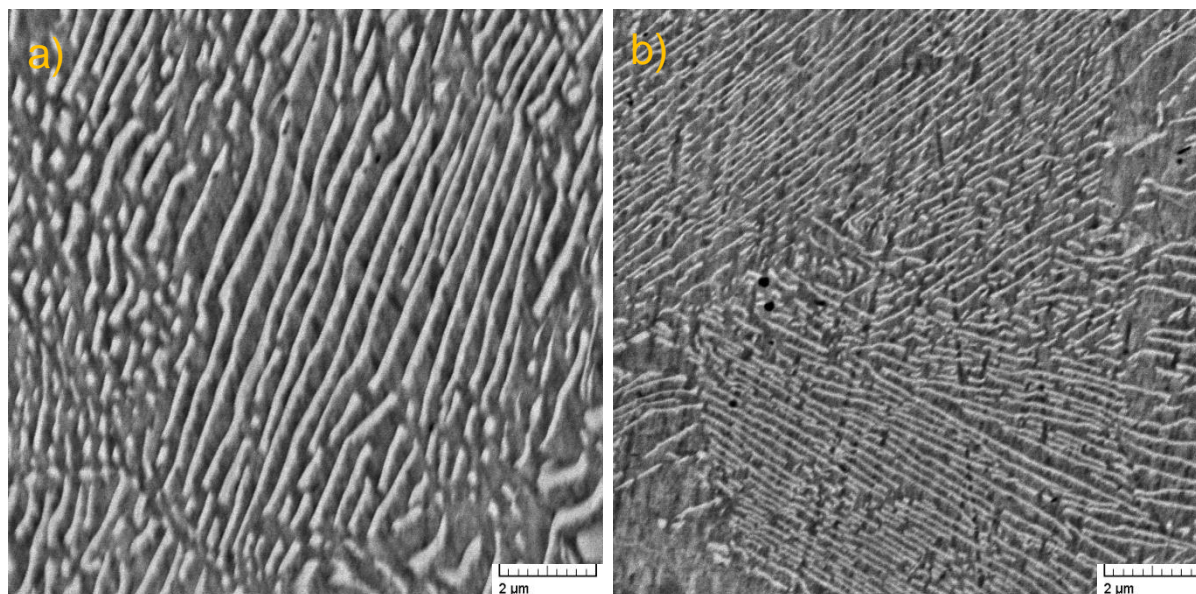
Původní materiál

Svar

Detektor: BSE

Detektor: BSE

Obr. 67 – Snímky vzorku ze SEM MIRA II LMU za použití detektoru BSE pro a) a b)



Původní materiál

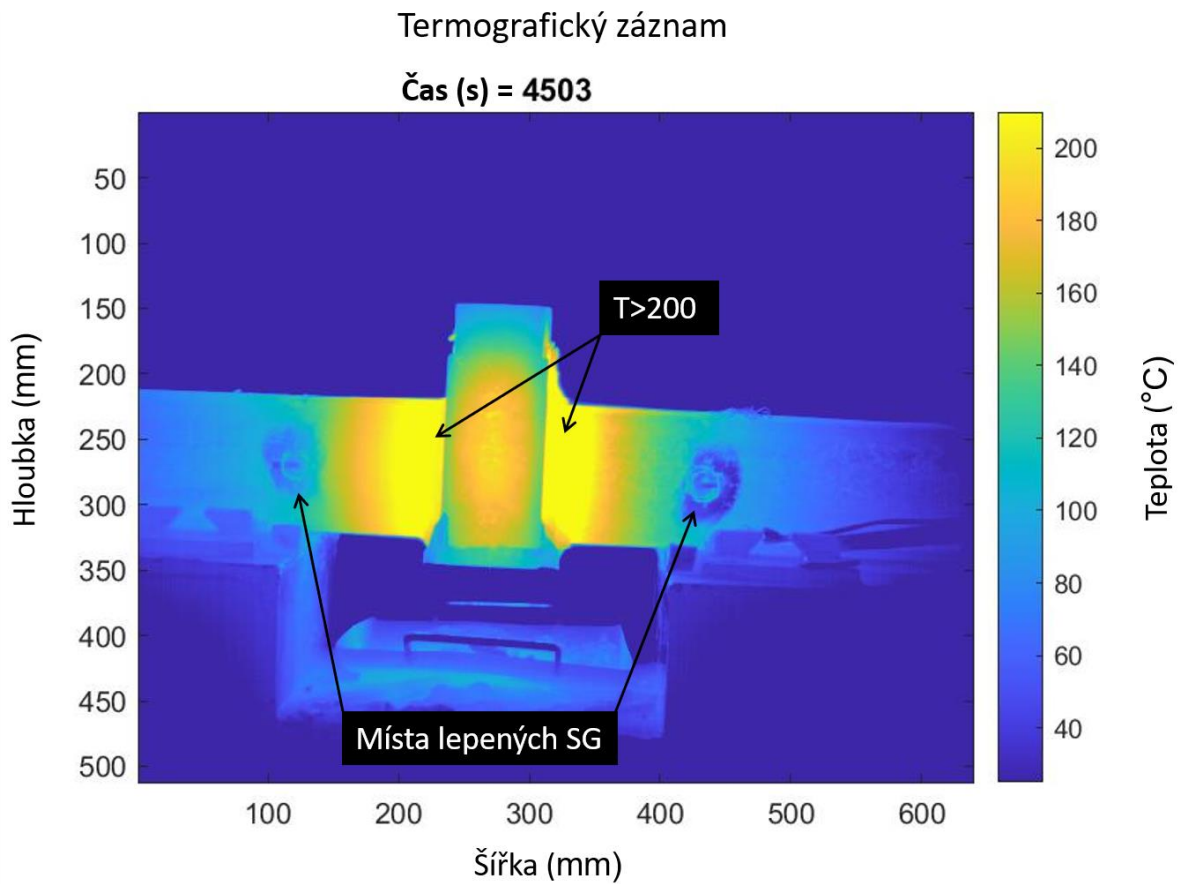
Svar

Detektor: BSE

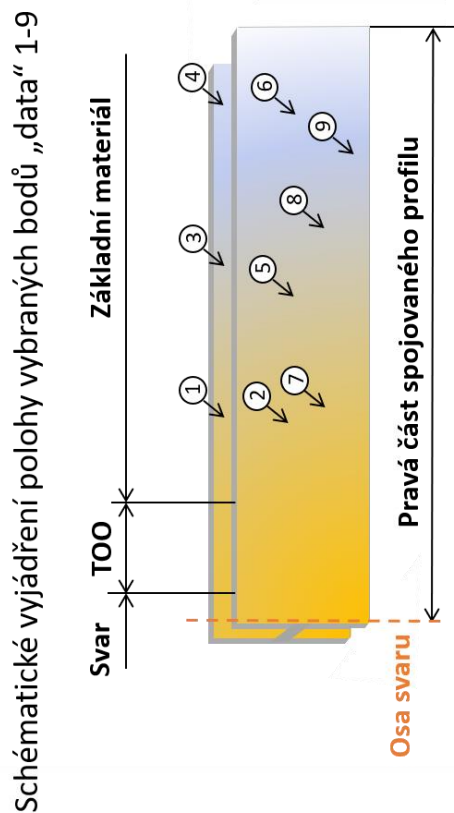
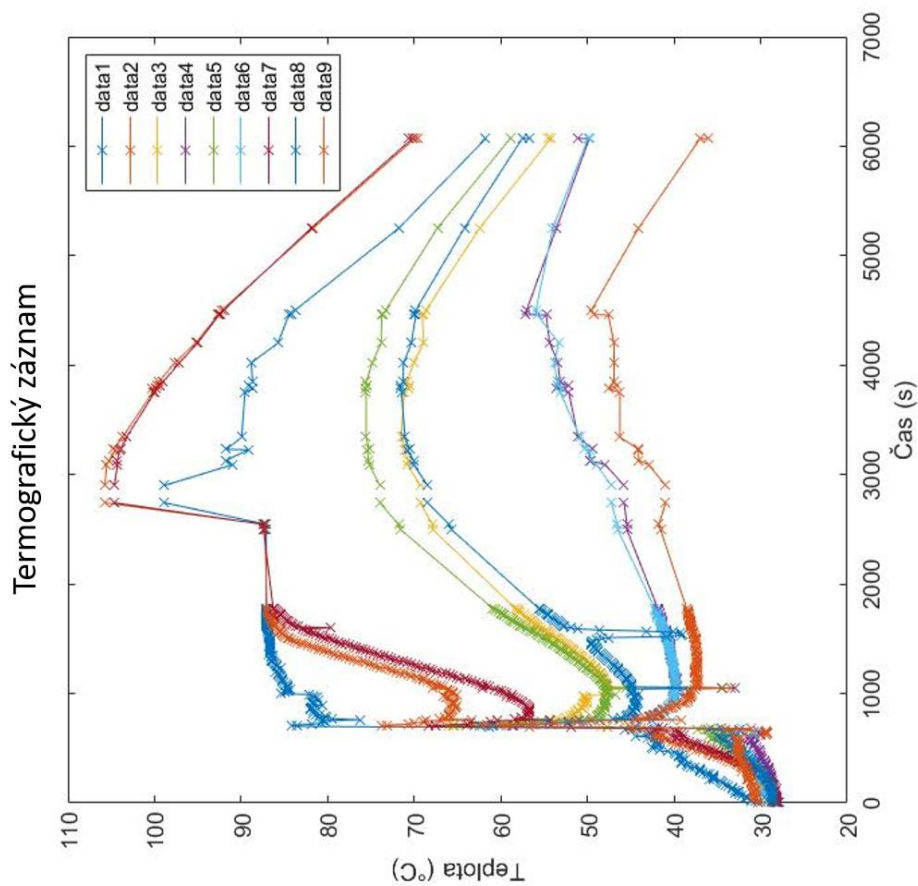
Detektor: BSE

Obr. 68 – Snímky vzorku ze SEM MIRA II LMU za použití detektoru BSE

17. Termografie



Obr. 69 – Teplotní pole v průběhu ochlazování



Obr. 70 – Vývoj teploty vybraných míst na svařovaném profilu v čase



Diskuze výsledků

Níže je předloženo shrnutí výsledků užití jednotlivých metod a experimentálních zařízení spolu s pokusem o jejich interpretaci.

Tenzometrické šetření stavu deformace v laboratorní peci potvrdilo samokompenzační vlastnosti použitých tenzometrů, avšak za vlivu nehomogenního teplotního pole pece. Pec generuje teplo z topných těles a vestavěný teploměr je umístěn mezi tělesy, čímž měří teplotu pouze u topných těles, a ne v objemu pece (Obr. 50). Teplota vzorku je nižší, a tím je zanesena chyba v měření, ale charakter křivky volného SG (Obr. 49) odpovídá polynomu výrobce (Obr. 20). Teplotní dilatace vzorku je všesměrná, pevné SG na povrchu vzorku odhalily tepelnou roztažnost vzorku v dominantních směrech od středu vzorku do prostoru, protože 2SG (Obr. 49) měřil kladné hodnoty (orientace 2SG byla v dominantním směru roztažnosti) a 3SG (Obr. 49) měřil záporné hodnoty (orientace 3SG byla proti směru roztažnosti). Tímto ověřením jsem již mohl důvěřovat zakoupeným tenzometrům, pouze jsem zvýšil teplotní odolnost SG na 250 °C. Současně z provedené zkoušky tenzometrů vyplynul poznatek pro případné budoucí využití pícky ke kalibraci tenzometrů, a tím je nezbytnost zvolit co nejpomalejší ohřívání, aby tělesa uvnitř pece stačila vyrovnávat svou teplotu s okolím.

Experimentální šetření napětového stavu na profilu HEB při procesu svaření aluminotermickou reakcí odhalilo technologické nedostatky výdrže tenzometrů a lepidla nad 150 °C, proto se do konce procesu udržely pouze 2 kusy SG a třetí vydržel do teploty okolo 170 °C. Konkrétně jde o tenzometry 1, 2 a 3 rozmístěné po profilu na Obr. 53. Tento graf ukazuje vliv vnášení tepla při předehřevu formy i při vlití svarového kovu se setrvačností podle šíření teplot v materiálu až do maximální teploty. Ačkoliv graf můžeme srovnávat se vnášeným teplem, tenzometry měřily rozložení, míru a pomyslnou orientaci deformací (rozpínání i kontrakce) vyvolaných právě tepelným procesem. Při vnášení teploty se materiál rozpíná, tento děj zachycuje SG. V mezičase, kdy se zaměnil hořák za termitovou dávku, docházelo ke zpětné kontrakci mírným ochlazováním a při vlití svarového kovu opět zapůsobilo rozpínání kovu. Tento jev byl předvídatelný z logiky působení zákonů termodynamiky. Tímto experimentem se potvrdil výskyt a velikost deformací na SG, a to v oblasti mezi tenzometry a TOO, názorně jsou tyto deformace vykresleny na Obr. 52. Výsledek měření prvního SG na Obr. 51 je připisován vlivu výměně tepla mísením horkého vzduchu s relativně studeným okolím a vytvořením proudění kolem profilu, zároveň tenzometr snímal oblast spojení pásnic se stojinami, čímž se šíření deformace po profilu lišilo od druhého a třetího SG. Záznam z tenzometrů je tedy kombinací dějů teplotní roztažnosti a mechanické deformace profilu jako celku. V případě opakování



experimentu bych navrhnul připevnit teplotně odolné kapslové tenzometry pomocí bodového svaření blíže ke svaru.

U svaření došlo k vyhnutí profilu v bočním směru, důvodem byl volný klín, který vytvořil 2 mm prostor pro prohnutí profilu vlivem vneseného tepla. Tento fakt odhalilo nožové pravítko při broušení boční stěny profilu pro použití profilometru. Rovinné broušení svaru v ploše ukazuje Obr. 55, zde bylo cílem vybrousit přelitek svaru. Výbrus vytvořil plochu mezi vzdálenostmi 80 mm až 180 mm na obrázku. To vytváří zkreslení ohybu profilu ve zmíněných bodech, Avšak ohyb nastal pouze v ose svaru. Prohnutí profilu odhalil i samotný profilometr, který po vyhodnocení vykreslil výškový rozdíl necelé 2 mm v měřené oblasti (Obr. 55 a Obr. 57). Odhalení nerovnosti je zpětnou vazbou pro vývoj lepší metody upnutí, čímž by se i snížil vliv lidského faktoru. Pro porovnání a stanovení závěru, zda je chyba ojedinělá, jsem přeměřil druhý svařovaný profil HEB v ČR pomocí termitové reakce. Výsledkem byla rovina s výškovou odchylkou do 0,2 mm (Obr. 54 a Obr. 58). Tento výsledek je obdivuhodný, protože rovinu vytváří zkušený pracovník ruční úhlovou brusku. Tolerance rovinnosti pro profil HEB je do $\pm 0,6$ mm. Posledním krokem při posuzování metody profilometrie jsem porovnal výsledek auditového měření roviny prvního svařeného profilu v ČR pomocí elektronického pravítka (Obr. 42). Výsledek měření znázorňuje nadvýšení svaru do výšky 0,514 mm od referenční nuly, tedy vyhovuje výše zmíněné toleranci (viz. Obr. 56). Porovnání se všemi třemi svařenci, které byly do konce května roku 2022 svařeny, ukázalo, že je dosažena rovina profilů při svaření touto agresivní metodou za podmínky řádného upnutí.

Ačkoli se vyhodnocení metody DIC pohybovalo na hraně měřitelnosti „signálu“, výsledky posunů ve vodorovném (Obr. 59) a svislém směru (Obr. 60) jsou poměrně konzistentní a ukazují kombinaci rotací a posunutí tělesa v průběhu svařování. Pokud by se podařilo určit střed rotace, bylo by možné hledat dilatace v tělese. Samotný vliv vývoje a gradientu teplotního pole je druhořadý s ohledem na skutečnost, že prudká změna trendu zaznamenaných posunutí nastává u všech vyšetřovaných oblastí najednou. Vlivem je tedy pohnutí profilů, nikoli postupné zvyšování teploty v jednotlivých místech. Potenciál těchto dat se promítl do výpočtů vlivu teplotního pole, a to výpočtem teplotní dilatace, průměrné teplotní deformace a přírůstku teploty v místě snímání. Jejich následné vykreslení do grafů (Obr. 61 a Obr. 62) ukazuje průběh vlivu sdílení tepla v pozdější fázi procesu. Graf přírůstku teploty je spíše informativním pro srovnání s předešlým měřením teploty pomocí IR teploměru, který referoval podobné hodnoty. Vybraný čas v Tabulka 1 odpovídá času, kdy byl ukončen proces svaření a nastala časová prodleva mezi oříznutím svarového kovu a broušením za tepla, tedy zde již dochází pouze k relativně pomalé výměně vneseného tepla po profilu.



Graf závislosti změřené tvrdosti na vzdálenosti od svaru (Obr. 63) potvrzuje dřívější zjištění v literatuře. Totiž to, že místo svaru je tvrdší než samotný svářený materiál (viz Obr. 46 a Tabulka 2), což je důsledek vysoké rychlosti ochlazování vedoucí k jemnější mikrostruktúře. Tuto skutečnost potvrzují i snímky ze SEM. Největší snížení pevnosti nastalo v TOO, kde došlo k „vyžihání“ původního materiálu vlivem teploty tekutého kovu ve svaru. Tato oblast v dalším provozu představuje slabé místo zejména z hlediska únavové životnosti. Mapování této oblasti vede k vyššímu povědomí, znalosti a zlepšení přístupu v řešení jejího odstranění dalšími tepelnými procesy, jako je například rekrytalizační žihání a následné ochlazování s takovým průběhem, aby výsledná mikrostruktura odpovídala vlastnostem o trochu lepším, než je tomu v původním materiálu.

Snímky pomocí SEM ukazují různé chování použitých detektorů. BSE detektor zdůrazňuje odlišnosti složení, místa bohatá na uhlík (lamely karbidu železa) a místa bohatá na železo (lamely feritu) jsou vysoce kontrastní, což je vidět na Obr. 64 a), c), Obr. 65 a) a Obr. 67. Oproti tomu SE detektor zvýrazňuje topografii (viz Obr. 64 b), d), Obr. 65 b)), příkladem jsou póry vzniklé smrštěním kovu při tuhnutí (Obr. 66 b)). Díky SE detektoru také vyniknou všechny nedokonalosti laboratorní přípravy povrchu. U obrázků lamelární struktury (Obr. 68) je vidět, že ve svaru jsou lamely jemnější, protože krystalizovaly rychleji než v původním kovu.

Díky využití termokamery bylo možné odhalit maxima dosažených teplot v jednotlivých místech tělesa a také dynamiku průběhu teplot ve vybraných místech (Obr. 69 a Obr. 70). Takové měření by bylo výchozí informací pro hledání změn v mikrostruktúře a v mechanických vlastnostech materiálu. Časový záznam ukazuje vliv předeřevu i okamžik odlití taveniny do spáry. „Synchronizace“ křivek potvrzuje, že kov je dobrý vodič tepla a dosažená teplota je výslednicí mezi teplotním tokem a ztrátami do okolí (Obr. 70).



Závěr

Použité experimentální metody umožnily potvrdit existenci a rozsah dějů, které probíhají při aluminotermickém svařování. Děje, které jsou známé z teorie, se podařilo prokázat a určit jejich velikost. Prostřednictvím termografie bylo možné ukázat rozsah teplotního ovlivnění a maximální teploty v různých místech tělesa. Toto teplotní pole bylo příčinou teplotní roztažnosti, zaznamenané jak tenzometry, tak pomocí metody DIC. Proces svařování ovlivnil strukturu kovu v místě svaru, ale i ve větší vzdálenosti. Tato skutečnost byla prokázána jak měřeními tvrdosti jako veličiny, do které se spojuje vliv zpracování a „historie“ materiálu, tak studiem mikrostruktury odhalené elektronovým mikroskopem. Skutečnost, že aluminotermické svařování navzdory svému bouřlivému průběhu je technologicky zvládnutý proces, byla potvrzena i pomocí laserové profilometrie, která ukázala velmi přesné napojení svařovaných částí.

Z výsledků a zjištění se naskytá myšlenka opravy nosníků z titanových slitin, ať už hlavních nebo pomocných, které tvoří konstrukci draku letadla, metodou aluminotermické reakce. Tuto myšlenku podporuje fakt možnosti přípravy titanové slitiny, konkrétně aplikace rovnice 4. Zároveň je zde další fakt, a to nízký lidský činitel při svařování. Aplikace této metody by vedla k relativně rychlé opravě zdeformovaného nosníku letadla, uříznutím poškozené části a nahrazením nové pomocí svarového spoje. Dalším důvodem využití této metody je nevýhoda stávajícího nýtového spoje. Nevýhodou jsou díry pro nýty, které jsou iniciátorem trhlin a životnost takového spoje je tím limitována.

Tato práce vedla k osvojení metod, které nabízí uplatnění v praxi nezávisle na oboru, tedy mají uplatnění jak v letectví, tak i v ostatních oborech dopravy. Úplný potenciál získaných dat, z časových důvodů, objemu a náročnosti, není plně využitý a zůstává pro vyhodnocení a použití v budoucích pracích.

Nebylo účelem práce odhalit slabá místa ve studovaném procesu svařování, ale uplatněním velice různorodých experimentálních metod a prostředků vyjádřit měřením, číslem, v jakém rozsahu děj probíhá, a v tomto smyslu práce splnila své zadání.



Seznam použité literatury

- [1] VOJÁČEK, Antonín. Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření: Triangulační princip měření. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2015, **2015** [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [2] *Three-Dimensional Measurements of Bodies in Motion Based on Multiple- Laser-Plane Triangulation* [online]. In: . Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 2015, , s. 53-61. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/281744073_Three-Dimensional_Measurements_of_Bodies_in_Motion_Based_on_Multiple-_Laser-Plane_Triangulation/citations
- [3] Strain Gauge Theory – Types, formulas and applications. In: *911electronic* [online]. 2021 [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://911electronic.com/strain-gauge/>
- [4] PETERS, W. a W. RANSON. *Digital imaging techniques in experimental stress analysis: Optical engineering* [online]. 427-431 [cit. 2022-06-21]. Dostupné z: doi:10.1117/12.7972925
- [5] Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. *Measurement Science and Technology* [online]. 33. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6501
- [6] 420359. ČSN EN ISO 6506-1: *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. 04/2015. ČR: Česká agentura pro standardizaci (ČAS), 2015.
- [7] 420360. ČSN EN ISO 6508-1: *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda*. 06/2017. ČR: Česká agentura pro standardizaci (ČAS), 2017.
- [8] 420374. ČSN EN ISO 6507-1: *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. 08/2018. ČR: Česká agentura pro standardizaci (ČAS), 2018.
- [9] VOJTĚCH, D. a B. KRATOCHVÍL. Vztah struktury a vlastností materiálů. KRATOCHVÍL, B. *Úvod do studia materiálů*. 1. Praha: VŠCHT Praha, 2005, s. 1. ISBN 80-7080-568-4.
- [10] Analytické metody: Skenovací elektronový mikroskop. In: *MATCA* [online]. Dostupné také z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/sem/>
- [11] SEFFRIN, R. James. Thermal Imaging for Detecting Potential SARS Infection. In: *The Definitive Internet Resource For Infrared Thermography* [online]. Dostupné také z: <https://irinfo.org/06-01-2003-seffrin/>
- [12] GERRARD, Gene. The Best Infrared Thermometers. In: *Yourbestdigs* [online]. Dostupné také z: <https://www.yourbestdigs.com/reviews/the-best-infrared-thermometer/>



- [13] PRIEST, Joseph. Temperature and Its Measurement. In: *Science Direct* [online]. Encyklopedia of Energy. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/infrared-thermometer>
- [14] *Úvod do principů termografie* [online]. FLUKE, 1-63 [cit. 2022-06-24].
- [15] Konstrukce termokamery: Princip a funkce. In: *Termokamera.cz* [online]. Dostupné také z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [16] MENDEZ, Patricio a Thomas EAGAR. WELDING PROCESSES FOR AERONAUTICS. *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES*. 2001, **2001**(159), 39-43.
- [17] MONK, Ian, Mirko SCHOENITZ a Edward DREIZIN. The Effect of Heating Rate on Combustion of Fully Dense Nanocomposite Thermite Particles. *TaylorandFrancisOnline* [online]. 2017, 203-221 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: doi:10.1080/00102202.2017.1380002
- [18] SULLIVAN, K., N.W. PIEKIEL, C. WU, S. CHOWDHURY, S.T. KELLY, T.C. HUFNAGEL, K. FEZZAA a M.R. ZACHARIAH. *Reactive sintering: An important component in the combustion of nanocomposite thermites: Combustion and Flame* [online]. 2-15 [cit. 2022-06-21]. ISSN 0010-2180. Dostupné z: doi:10.1016
- [19] BROTMAN, Sarah, Mehdi ROUHANI, Samuel CHARLOT, Alain ESTÈVE a Carole ROSSI. A Benchmark Study of Burning Rate of Selected Thermites through an Original Gasless Theoretical Model. *MDPI: applied sciences* [online]. LAAS-CNRS, University of Toulouse, 7 Avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse, France, 18 [cit. 2022-06-21]. ISSN 6553. Dostupné z: doi:10.3390/ app11146553
- [20] SZABÓ, Ing. Petr. SPRÁVA ŽELEZNIC. *NOVELIZACE PŘEDPISU SŽDC S3/2 BEZSTYKOVÁ KOLEJ: Předpisy skupiny S*. In: . 29.03.2012. 2012. Dostupné také z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50157246/c02-szabo-szdc-sb.pdf>
- [21] SHARMA, I.G., S. MAJUMDAR, S.P. CHAKRABORTY a A.K. SURI. Aluminothermic preparation of Hf–Ta and Nb–10Hf–1Ti alloys and their characterization. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. Materials Processing Division, Bhabha Atomic Research Centre, Trombay, Mumbai 400 085, India, 2002, 184-190 [cit. 2022-06-23].
- [22] IRVING, B. Sparks Begin to fly in Nonconventional Friction Welding and Surfacing. *Welding Journal*. 1993, 37-40.
- [23] KUCHUK-YATSENKO, S.I., V.T. CHEREDNICHOK a L.A. SEMENOV. The Flash-Butt Welding of Aluminium Alloys: in *Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding*. MD: *American Welding Society*. New Carrolton, 1991.
- [24] MASUBUCHI, K. *Integration of NASA-Sponsored Studies on Aluminum Welding: NASA CR-2064*. NASA, Washington, DC, 1972.
- [25] IRVING, B. GTA Welders Put the Finishing Touches on the Fins for the Patriot Missile. *Welding Journal*. 1991, 71-74.



- [26] ANDERSON, C.T. Robotic GTAW Keeps Jet Engine Components Flying. *Welding Journal*. 1987, 45-46.
- [27] IRVING, B. Plasma Arc Welding Takes on the Advanced Solid Rocket Motor. *Welding Journal*. 1992, 49-50.
- [28] CARY, H.B. Modern Welding Technology: Fourth ed. *Prentice Hall*. 1998.
- [29] High-Power Lasers Solve Jet Engine Manufacturer's Welding and Drilling Problems. *Welding Journal*. 1993, 54-55.
- [30] POGORZELSKI, F.S. Novel Approaches to Electron Beam Welding Machine Utilization. *Welding Technology for the Aerospace Industry*. Las Vegas: NV: American Welding Society, 1980.
- [31] FARMER, I., P. DAWSON a R. FLETCHER. Green Light for Eurofighter. *Welding and Metal Fabrication*. 1999, 8-11.
- [32] KAZAKOV, V. a O. NAZARENKO. State-Of-Art and Prospects of development of Electron Beam Welding of Aerospace Vehicles. *Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding*. New Carrollton: MD: American Welding Society, 1991.
- [33] DUNKERTON, S. a C. DAWES. The Application of Diffusion Bonding and Laser Welding in the Fabrication of Aerospace Structures. *Advanced Joining of Aerospace Metallic Materials*. Oberammergau, Germany: Advisory Group for Aerospace Research & Development (NATO), 1985.
- [34] KHCX ENCAPSULATED STRAIN GAGE UP TO 950°C. In: *ZSE Electronic GMBH* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.zse.de/en/transducer-sensors/strain-gages/weldable-high-temperature-strain-gages/half-bridge-strain-gauges/khcx-encapsulated-strain-gage-up-to-950c>
- [35] Strain Gauge. In: *Michigan Scientific Corporation* [online]. [cit. 2022-06-12]. Dostupné z: <https://www.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/?cn-reloaded=1>
- [36] *UNE EN ISO 18265:2014: Metallic materials - Conversion of hardness values (ISO 18265:2013)*. 2014.