



Vliv umělého a přirozeného stárnutí na mechanické vlastnosti svarů u vytvrditelných slitin hliníku AW 6082

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Ladislav Riedl**
Vedoucí práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.





Influence of artificial and natural aging on the mechanical properties of welds of hardenable aluminum alloys AW 6082

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials
Author: **Bc. Ladislav Riedl**
Supervisor: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav Riedl**
Osobní číslo: **S13000506**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Vliv umělého a přirozeného stárnutí na mechanické vlastnosti svarů u vytvrditelných slitin hliníku AW 6082**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se teoreticky s metodami využitelnými při svařování hliníku a jeho slitin.
2. Proveďte rešerši současného stavu znalostí o svařování a využitelnosti tvářených vytvrditelných slitin Al.
3. Proveďte svařovací experimenty na slitině Al AW 6082.
4. Navrhněte a proveďte experimenty s různými časy výdrže při umělém a přirozeném stárnutí.
5. Změny mechanických vlastností v základním materiálu, TOO a svarovém kovu vyhodnoťte pomocí tvrdosti HV1.
6. Proveďte zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 60**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- [1] HRIVŇÁK, I. *Teória svariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. Bratislava: Veda, 1989.
- [2] ORSZAGH, V. *Zváranie neželezných kovov*. Bratislava: Weldtech, 1995.
- [3] AWS Welding Handbook. *Welding Science and Technology*. 9th Ed., Vol. 1. Editor: AWS-s Technical Activities Committee, 2001. ISBN 0-87171-657-7.
- [4] AMBROŽ O., B. KANDUS a J. KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vydání. Ostrava: Zeross, 2001. s.395. ISBN 80-85-771-81-0.
- [5] FOLDYNA, Václav et. al. *Materiály a jejich svariteľnost*. 1. vydání. Ostrava: Zeross, 1999. s.295. ISBN 80-85771-85-3.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Iva Nováková, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **2. března 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho ochotu a trpělivost, odbornou pomoc, připomínky, poskytnuté odborné materiály a cenné rady při zpracování této práce. Dále za čas, jež mi věnoval při konzultacích.

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o vlivu umělého a přirozeného stárnutí na mechanické vlastnosti svarů u vytvrditelných slitin hliníku AW 6082. Obecně slitiny hliníku jsou hned po slitinách železa nejpoužívanějšími konstrukčními materiály dneška. Je to dáno zejména jejich vhodnými vlastnostmi, mezi které patří například dobrá odolnost vůči korozi, nízká měrná hmotnost, dobrá svařitelnost v inertních ochranných plynech a dostačující mechanické vlastnosti.

Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a experimentální. V teoretické části jsou popsány metody využívané při svařování hliníkových slitin. Dále je zde popsána svařitelnost různých hliníkových slitin, způsob tepelného zpracování vytvrditelných slitin hliníku s ohledem na testovanou slitinu hliníku AW 6082. Nechybí zde i nejdůležitější technické informace o zkoumané slitině hliníku AW 6082.

Cílem experimentální části bylo zjistit, jaký vliv má přirozené a umělé stárnutí na mechanické vlastnosti svarů u slitiny hliníku AW 6082. Byl navržen postup realizace experimentu, který lze rozdělit na tři části. Prvním úkolem bylo navrhnout vhodné parametry pro vícevrstvé svary, druhým úkolem bylo zjistit vliv svařovacího procesu na změnu mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti a třetím úkolem bylo posouzení a vyhodnocení vlivu umělého a přirozeného stárnutí na změnu vlastností v tepelně ovlivněné oblasti. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí měření tvrdosti v oblasti svaru, TOO i v základním materiálu.

Klíčová slova

Měření tvrdosti, slitina AW 6082, svařování, vytvrzování, stárnutí.

Abstract

This study is focused on artificial and natural aging influence on mechanical properties of welds of heat-treatable aluminium alloys AW 6082. In general, aluminium alloys (following steel alloys) are currently the most widely used construction materials. This is mainly due to their properties such as e.g. corrosion resistance, low-density, good weldability in shielding gas and sufficient mechanical properties.

The study is divided into two major parts - a theoretical study and an experimental study. The theoretical part provides a description of welding methods of aluminium alloys. Also you can find here more about weldability of various aluminium alloys, heat treatment processes of heat-treatable aluminium alloys in respect to the tested aluminium alloy AW 6082. Moreover, the most important technical information on aluminium alloy AW 6082 are also included.

The goal of the experimental part was to determine how artificial and natural aging affects mechanical properties of welds of the heat-treatable aluminium alloy AW 6082. The experiment realization process divided into three parts was suggested. The first task includes suggestion of suitable parameters for multilayer welds; the second task was to find out a welding process influence on changes within mechanical properties in the heat affected zone; and the third task was to assess and evaluate an impact of artificial and natural aging on the properties changes in the heat affected zone. The evaluation was performed by measuring the hardness of the weld area, and TOO in the base material.

Key Words

Hardness measurements, alloy AW 6082, welding, heat treatment, aging.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	10
1. Úvod	11
2. Teoretická část	12
2.1 Metody využitelné při svařování hliníku a jeho slitin	12
2.1.1 Svařování metodou MIG	12
2.1.2 Svařování metodou WIG.....	14
2.1.3 Svařování elektronovým paprskem	17
2.1.4 Svařování laserem	18
2.1.5 Friction Stir Welding - FSW	19
2.2 Svařitelnost a využitelnost tvářených vytvrditelných slitin hliníku se zaměřením na slitinu AW 6082	20
2.2.1 Svařitelnost vytvrditelných slitin hliníku	20
2.2.2 Rozdělení hliníku a jeho slitin pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3	21
2.2.3 Tepelné zpracování vytvrditelných slitin hliníku.....	22
2.2.4 Technické údaje svařované slitiny hliníku AW 6082 T651 (AlSi1MgMn) dle ČSN 42 4400 použité v experimentech	23
3. Experimentální část	25
3.1 Realizace vícevrstvých svarů provedených na slitině hliníku AW 6082	25
3.1.1 Příprava svařovaného materiálu a pracoviště pro následné svařování	26
3.1.2 Veličiny měřené při svařování a následném chladnutí.....	29
3.1.3 Vlastní realizace experimentálních svarů.....	32
3.1.4 Průběh naměřených deformací v materiálu po svaření jednotlivých housenek .	36
3.2 Vliv svařování na tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti.....	37
3.2.1 Zvolený postup pro měření tvrdosti HV 10 svařence po svařování	37
3.2.2 Průběh a vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti	42
3.2.3 Hodnoty tvrdosti HV 10 měřené přes celý testovaný vzorek odpovídající polohou Řadě 4.....	43
3.3 Vyhodnocení vlivu umělého stárnutí na změnu mechanických vlastností.....	44
3.3.1 Průběh tepelného zpracování slitiny hliníku AW 6082	44

3.3.2 Volba postupu měření tvrdosti HV 10 pro tepelně zpracované vzorky dané slitiny.....	45
4. Závěr.....	53
5. Použitá literatura.....	55
Seznam tabulek.....	57
Seznam obrázků	58

Seznam symbolů a zkratk

MIG	Metoda svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře
WIG	Metoda svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře
FSW	Friction stir welding
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
AW 6082	Vytvrditelná slitina hliníku
AlMgSi	Označení slitiny hliníku
PA	Poloha svařování vodorovná shora
VUT	Vysoké učení technické v Brně
LVDT	Linear variable differential transformer
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
HV 10	Tvrдость podle Vickerse
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	International Organization for standardization
Mg ₂ Si	Intermetalická fáze
T651	Stav hliníkové slitiny definovaný normou ČSN EN 515
RŽ	Rozpouštěcí žihání
GP	Guinier – Prestonovy zóny
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu [MPa]
R _m	Mez pevnosti [MPa]

1. Úvod

Pro svařování hliníku a jeho slitin se v dnešní době používá celá řada metod. V zásadě lze hliník a jeho slitiny svařovat všemi způsoby obloukového svařování, plamenem, elektrickým odporem, elektronovým paprskem, laserem, plazmou, difúzně, ultrazvukem, výbuchem, tlakem za studena. Nejčastější a nejpoužívanější metodou je svařování v ochranném inertním plynu netavicí se elektrodou (WIG) a to díky svým vhodným vlastnostem, nebo svařování metodou MIG (viz kapitola 2). Svařitelnost hliníku a jeho slitin je negativně ovlivněna přítomností oxidu Al_2O_3 na povrchu. Teplota tání tohoto oxidu je $2050\text{ }^\circ\text{C}$ (teplota tání hliníku je $658\text{ }^\circ\text{C}$). Tato vrstva oxidů se odstraňuje mechanicky nebo chemicky, po odstranění vrstvy se na povrchu hliníku okamžitě začne tvořit nová vrstva a to i při pokojové teplotě. Za jednu vteřinu se vytvoří na povrchu hliníku oxidická vrstva o tloušťce až $0,1\mu\text{m}$. Pro zajištění kvalitního metalurgického spojení svařovaných materiálů je nutné oxidické vrstvy před svařováním i v průběhu svařování odstranit. Před svařováním se oxidická vrstva odstraňuje mechanicky nebo chemicky, během svařování chemicky nebo přímým účinkem elektrického oblouku v ochranném plynu argonu (tzv. čistící účinek argonu). [2]

Při svařování tenkých plechů není nutný předehřev. Předehřev zvyšuje šířku tepelně ovlivněné oblasti. Při svařování větších tlouštěk je však předehřev nevyhnutelný, a to z důvodu vysoké tepelné vodivosti hliníku. Předehřev v tomto případě snižuje potřebný měrný příkon svařování. Teplota předehřevu u technického hliníku a slitin hliníku není zpravidla vyšší než $200\text{ }^\circ\text{C}$. Při svařování vytvrditelných slitin hliníku může předehřev způsobit pokles pevnostních vlastností (přestárnutí) základního materiálu. V těchto případech je teplota předehřevu na úrovni teploty umělého stárnutí. [2]

2. Teoretická část

V teoretické části budou popsány metody svařování, které se využívají při svařování hliníku a jeho slitin a to zejména o svařování metodou MIG, WIG, elektronovým paprskem, laserem a FSW metodou. Dále bude popsána svařitelnost a využitelnost tvářených vytvrditelných slitin hliníku s ohledem na slitinu hliníku AW 6082. Mimo to budou popsány způsoby tepelného zpracování vytvrditelných hliníkových slitin.

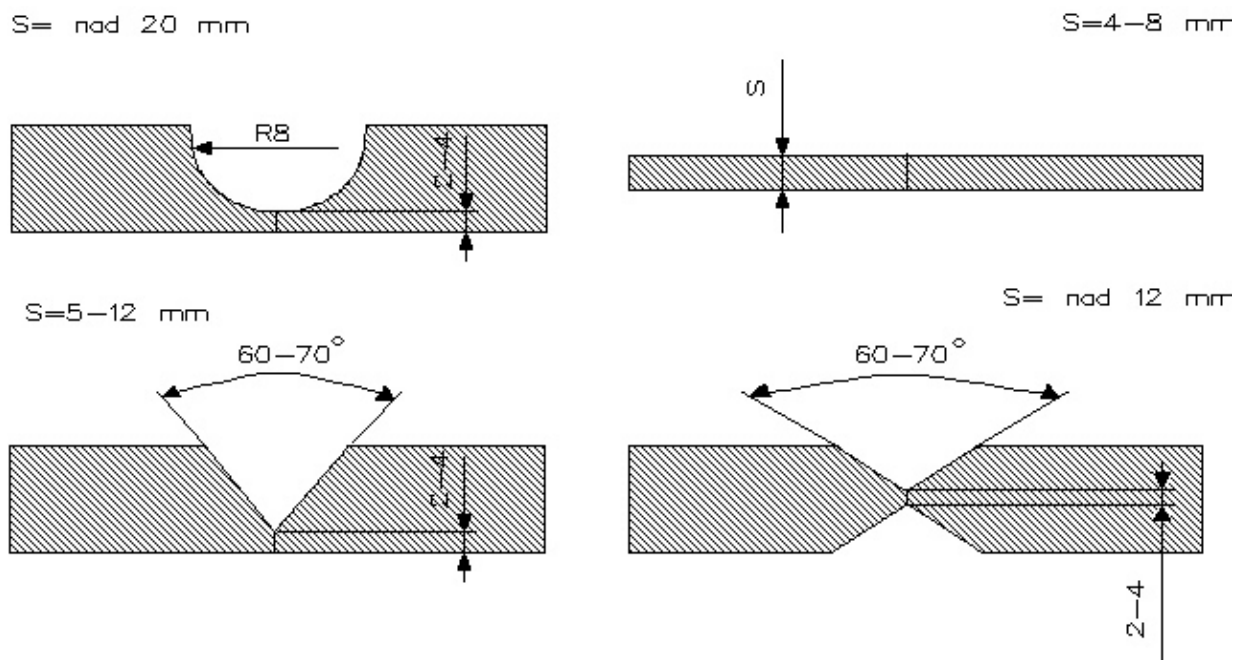
2.1 Metody využitelné při svařování hliníku a jeho slitin

Při svařování hliníku a jeho slitin se s výhodou využívá tzv. čistícího účinku elektrického oblouku. A aby byl tento účinek dosažen, je potřeba použít tzv. obrácenou polaritu, kdy základní materiál je připojen na záporný pól zdroje stejnosměrného svářecího proudu (tvořící katodu) a svářecí elektroda je připojena na kladný pól (tvořící anodu). Pohyb elektronů od katody k anodě vyvolá tok elektrického proudu. Na katodě se vytvoří tzv. katodová skvrna, což je oblast s nejvyšší emisí elektronů. Katodová skvrna má tendenci vyhledávat na katodě místo s nejvyšším elektrickým potenciálem, což u hliníku a jeho slitin tvoří vrstvička oxidu Al_2O_3 . Energie katodové skvrny tento oxid z povrchu odpaří. Nevýhodou obrácené polaroty je vysoké tepelné zatížení zejména netavící se elektrody, což má za následek nižší životnost elektrody. [2]

2.1.1 Svařování metodou MIG

Svařování MIG (obr. 2) patří mezi technologie tavného svařování. Místním natavením svarových ploch základního materiálu a odtavením elektrody vzniká svarová lázeň, která následně tuhne a vytváří požadovanou fyzikální vazbu spojovaných materiálů. [3]

Zdrojem tepla je elektrický oblouk, který hoří mezi kovovou tavící se elektrodou a svařovaným materiálem v proudu netečného (inertního) plynu argonu, helia nebo jejich směsi. Elektroda je kontinuálně dodávána do místa svaru. Svařování se provádí stejnosměrným nebo pulzním proudem při kladné polaritě elektrody, poloautomaticky nebo automaticky. [1] Jako přídavný materiál pro svařování hliníku a jeho slitin se většinou používá drát \varnothing 0,8 - 1,6 mm navinutý v cívkách. Základní parametry svařování jsou uvedeny v tabulce 1. Z hlediska přípravy základního materiálu opět postačí jeho očištění drátěným kartáčem těsně před svařováním. Doporučený je také přehřev na teplotu 150 - 300 °C. [2,4] Úprava svarových ploch je na obrázku 1.

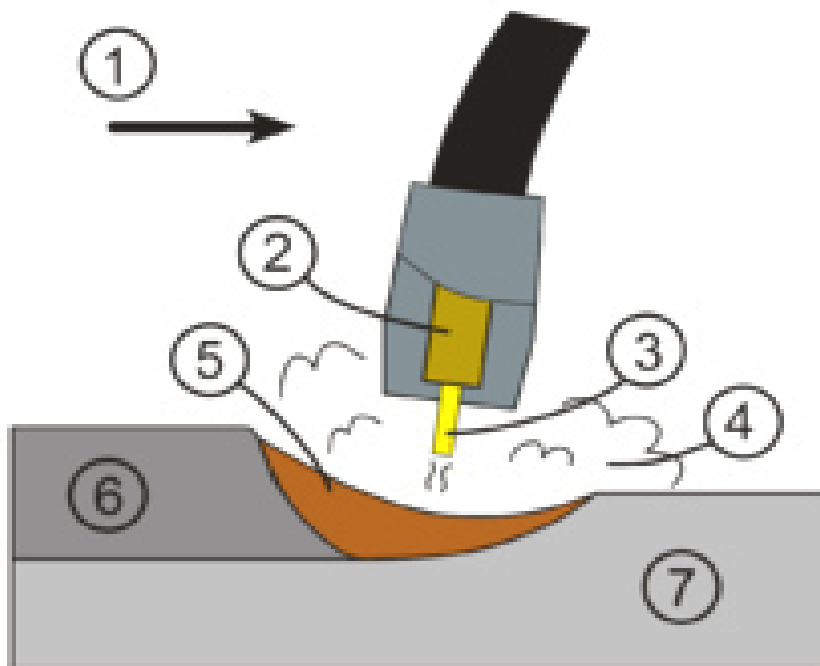


Obr. 1: Úprava svarových ploch před svařováním metodou MIG. [4]

Svařování MIG, tedy svařování tavící se elektrodou v inertním plynu, získává na důležitosti vlivem růstu objemu konstrukcí, staveb, lodí a dopravních prostředků vyráběných z hliníkových slitin. Hlavními důvody rozšíření metody MIG jsou: široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace, velký sortiment vyráběných svařovacích zařízení. [2]

Velký vliv na kvalitu svaru má volba ochranného plynu. Většinou se používá čistý argon, který zajišťuje klidné hoření el. oblouku a dochází k minimálnímu rozstříku. Jelikož má argon nízkou tepelnou vodivost, je předurčen především pro svařování malých tlouštěk materiálu. Proto se v dnešní době využívá tzv. směsných plynů. Typickým představitelem jsou směsi argonu a hélia s obsahem helia 15 - 90 %. Helium zvyšuje napětí na oblouku, čímž umožňuje lepší přenos tepelného výkonu do svařovaného materiálu. Díky tomu je možno dosáhnout vyšší rychlosti svařování a hloubky závaru. Obecně lze říci, že s vzrůstající tloušťkou materiálu by se měl zvyšovat obsah helia v ochranném plynu. Dle nejnovějších poznatků o ochranných plynech se dnes kromě helia s výhodou uplatňuje i jiná složka ochranného plynu a sice dusík, který stabilizuje el. oblouk a umožňuje lepší přenos energie v el. oblouku. Výzkumem byl stanoven optimální podíl dusíku v ochranném plynu o hodnotě 0,015 %. Dusík se v této koncentraci používá nejen jako příměs do čistého argonu, ale také do směsi argon - helium. [17]

Tato metoda má široké uplatnění v případech, kde se klade důraz na velkou rychlost svařování, velký odtavný výkon a operativnost.



1- směr svařování, 2- svařovací hořák, 3- tavná elektroda, 4- ochranná atmosféra, 5- svarová lázeň, 6- ztuhlý svarový kov, 7- základní materiál

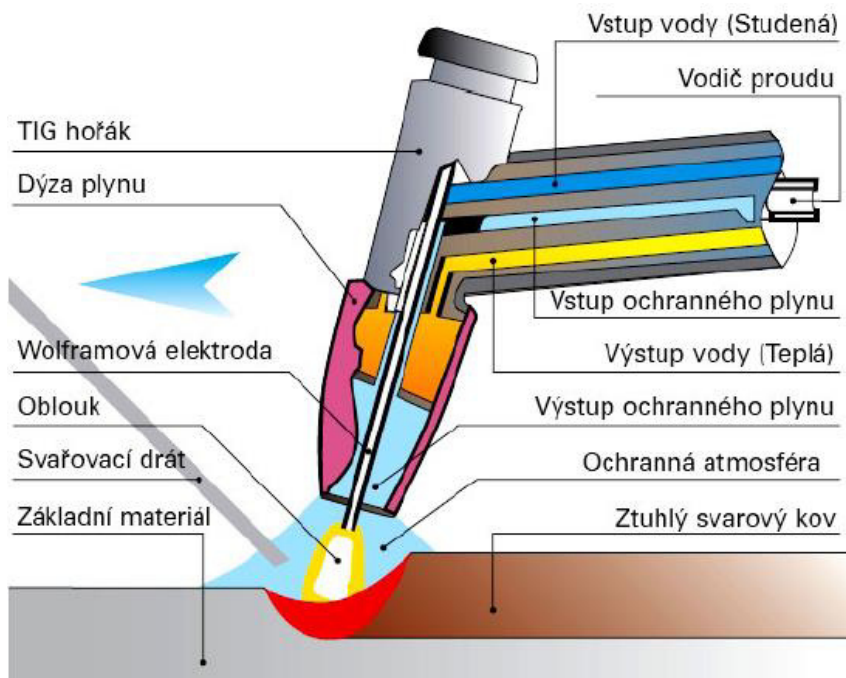
Obr. 2: Svařování metodou MIG [1]

Tabulka 1: Doporučené optimální varianty a parametry pro svařování hliníku a jeho slitin technologií MIG. [2]

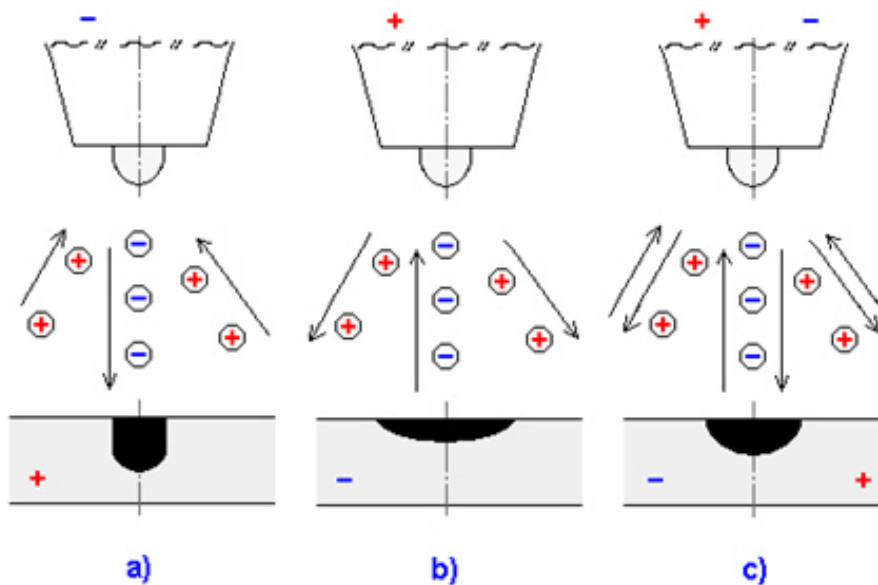
Tloušťka plechu [mm]	Charakteristika procesu	Přídavný materiál Ø [mm]	Svařovací proud [A]	Napětí na oblouku [V]	Poznámka
2-5	svař. tenkými dráty	0,8 – 1,2	80 – 150	21 – 24	ruční svařování, koutové spoje
1,5-10	pulzní svařování	1,2 – 1,6	50 – 80	18 – 24	tupé a koutové spoje
5-30	svař. sprchovým přenosem	1,2 – 2,4	180 – 300	24 – 29	běžný způsob ruční, strojové svařování
nad 20	svař. vysokými proudy	2,4 – 3,6	350 – 650	24 – 30	jen strojní svařování
nad 30	svař. velkými průměry drátů	4,0 – 6,0	nad 500	28 – 34	jen strojní svařování

2.1.2 Svařování metodou WIG

Jedná se o metodu svařování elektrickým obloukem v ochranném plynu neodtavující se elektrodou (obr. 3). Je to nejčastější metoda pro svařování hliníku a jeho slitin tlouštěk od 1 do 10 mm, výjimečně i nad 10 mm. Svařuje se s přídavným materiálem, který je přidáván do svarové lázně, nebo bez přídavného materiálu. [2]



Obr. 3: Princip svařování metodou WIG [5]



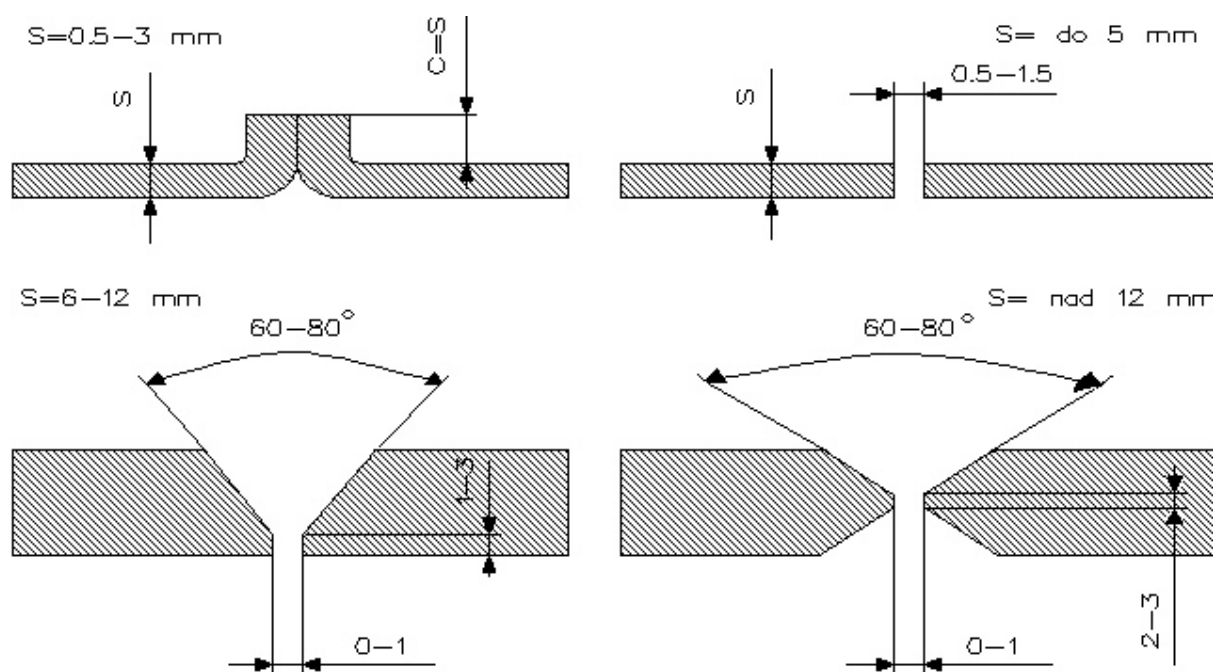
Obr. 4: Způsoby zapojení elektrod při WIG svařování: a) DC nepřímá polarita, b) DC přímá polarita, c) AC [6]

Ochranný plyn musí mít minimální čistotu 99,99 hm. % Ar (čistící účinek argonu). Výjimečně se používá též helium nebo směs 50 hm. % Ar + 50 hm. % He. Čisté helium umožňuje svařovat mechanizovaným způsobem tenké plechy stejnosměrným proudem. [2] Nicméně až na tuto výjimku se při svařování metodou WIG používá střídavý svařovací proud (obr. 4). Jeho výhoda spočívá v jeho čistícím účinku, který je dán porušováním povrchu svařovaného materiálu ionty v okamžiku, kdy je elektroda zapojena na plus pól. Čistící účinek

spočívá v mechanickém rozrušování tvořícího se povlaku oxidu Al_2O_3 . Tento proces zajišťuje minimalizaci tepelného namáhání elektrody při zachování potřebného čistícího účinku elektrického oblouku. Základní parametry svařování jsou uvedeny v tabulce 2. Příprava základního materiálu je shodná s předešlými metodami svařování el. obloukem. [2,4] Úprava hran je na obrázku 5.

Tabulka 2: Základní parametry pro svařování hliníku a jeho slitin technologií WIG. [2]

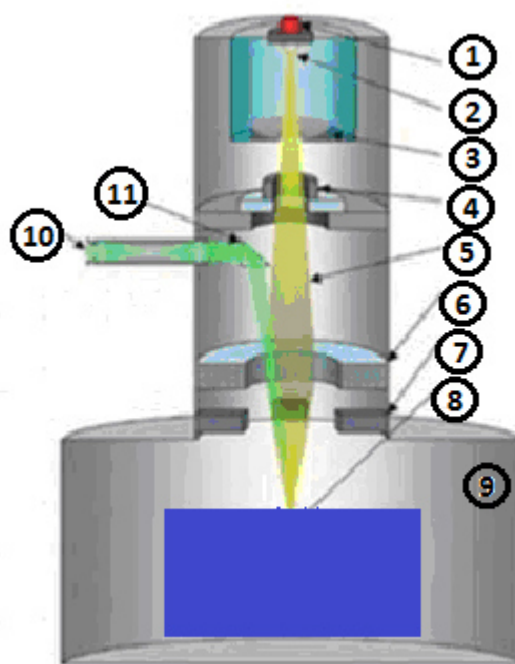
Tloušťka materiálu [mm]	Počet vrstev	Přídavný materiál Ø[mm]	Spotřeba argonu [l/min]	Svařovací proud pro polohu svařování [A]			Předehřev [°C]
				PA	PC	PE	
1	1	2	7	60	50	40	-
2	1	2-3	7	80	80	75	-
3	1	3	8	140	135	130	-
4	1-2	3-4	9	180	170	160	-
5	1-2	3-4	10	200	190	170	-
6	2	3-4	10	280	240	230	-
8	2	4-5	12	320	270	260	150
10	2-3	5	14	360	280	270	200
12	3	5	16	420	330	280	200
20	7	5	20-25	450	-	-	-



Obr. 5: Úprava svarových ploch před svařováním metodou WIG. [4]

2.1.3 Svařování elektronovým paprskem

Jde o tavný způsob spojování součástí (obr. 6), při kterém je zdrojem energie potřebné k roztavení spojovaných dílů v místě jejich styku kinetická energie elektronů, která se v místě dopadu na pevnou látku přeměňuje v teplo. Aplikace elektronové optiky dává možnost soustředit tímto způsobem vysoký výkon do malého objemu látky. To přináší řadu možností jiným způsobem ohřevu (s výjimkou laseru) nedosažitelných. [7]



1- kabel pro vysoké napětí, 2- žhavicí katoda, 3- vychylovací zařízení, 4- urychlující anoda, 5- elektronový paprsek, 6- fokusační cívka, 7- vychylovací cívka, 8- svařovaný díl, 9- vakuová komora, 10- teleskop pro pozorování, 11- prizma

Obr. 6: Zařízení pro svařování elektronovým paprskem [8]

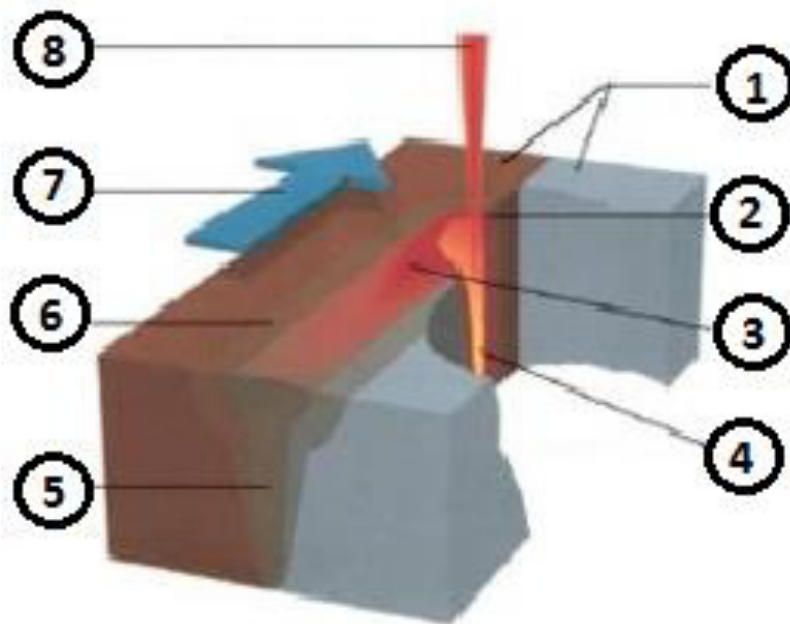
Svařování elektronovým paprskem lze použít pro většinu hliníkových slitin. Při svařování slitin hliníku s Mg, Cu nebo Zn, však vzniká nebezpečí trhlin ve svaru. Náchylnost na vznik trhlin je možné snížit použitím vhodného přídavného materiálu. Při použití vysoké rychlosti svařování mohou ve svarovém kovu vznikat póry, které nejsou v tomto případě iniciovány vodíkem, ale selektivním vypařováním některých prvků ze slitiny, je proto nutné volit vhodné svařovací parametry. [4] Kvalita spoje je velmi závislá na přesném umístění paprsku do místa svarového spoje, aby nedošlo k jejich odchýlení.

Mezi výhody použití této technologie svařování patří zejména úzká natavená tepelně ovlivněná oblast svaru, malé deformace, velmi vysoká kvalita svarů, dokonalá ochrana před vzdušnou atmosférou díky použití vakua, možnost svařovat i velké tloušťky na jeden průchod

elektronového paprsku zpravidla bez použití přídavného materiálu, možnost automatizace svařovacího procesu a využitelnost pro svařování různorodých materiálů. Za nevýhody při použití svařování elektronovým paprskem lze považovat vysoké nároky na přesnost vedení paprsku a čistotu svarových ploch, potřeba použití vakua, poměrně vysoké investiční náklady na svařovací zařízení. [11]

2.1.4 Svařování laserem

Při svařování laserem (obr. 7) vzniká kapilára vyplněná parami kovu pod vysokým tlakem. Páry jsou vysokou teplotou ionizovány a tato laserem indukovaná plazma tryská vysokou rychlostí z místa svaru. Přitom brání pronikání fotonů do svarové spáry, pohlcuje značnou část záření svazku a snižuje hloubku průniku fotonů. Plazma se běžně vychyluje ofukováním ochranným plynem Ar, Ar+CO₂, N₂, (nejlepší výsledky vykazuje He). Zároveň je těmito plyny chráněna tavná lázeň a tuhnoucí svarový kov před negativními vlivy okolní vzdušné atmosféry.



1- spojované díly, 2- spojování vlivem povrchového napětí tavné lázně, 3- tavná lázeň, 4- klíčová dírka, 5- roztavený kov, 6- tepelně ovlivněná zóna, 7- směr svařování, 8- laserový svazek

Obr. 7: Princip laserového svařování [10]

Vliv indukované plazmy můžeme ovlivnit pomocí nastavených parametrů svařování (nastavené tak, aby se materiál neodpařoval, dokud se neprohřeje do oblasti tavení v podpovrchové vrstvě). Při nízké hustotě energie u svařování se teplota povrchu nedostane

na teplotu varu dříve, než se teplota pod povrchem dostane na teplotu tavení. Díky této skutečnosti se vytvoří svarový kráter s příhodným rozložením taveniny.

Zpravidla se svařuje bez přídavných materiálů, nicméně vývoj dneška směřuje už i k využití drátu jako přídavného materiálu. Lasery umožňují velmi rychlý ohřev a svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí (Cu, Ag, Al) i materiálů s vysokou teplotou tavení W, Mo, Ta, Zr atd. Změna hustoty výkonu v dopadové ploše ovlivňuje rozměr i geometrii svarové lázně. Při malých hustotách výkonu do 106 W.cm^2 dochází k přenosu tepla a formování svarové lázně hlavně vedením a je vhodné pro spojování tenkých plechů. [9]

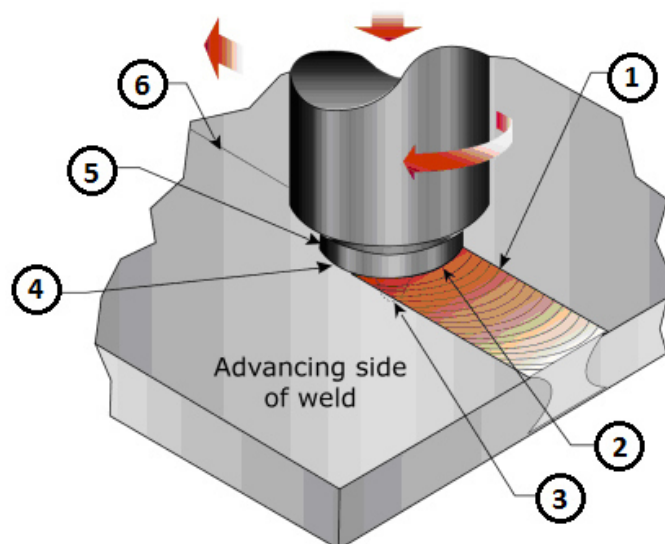
Při svařování hliníku a jeho slitin laserem nastává problém s vysokou odrazivostí (cca 90 %) hliníku. Proto je nutné použít laser s vysokou energií, provést zdrsňení povrchu, případně nanést na povrch matný lak. [2]

2.1.5 Friction Stir Welding - FSW

Tato speciální metoda svařování vznikla postupným vývojem svařování třením a to zejména pro potřeby svařování hliníku a jeho slitin. V současnosti se již běžně svařují i materiály s vyšší teplotou tavení. [11]

Princip metody spočívá ve spojení dvou hliníkových součástí za vysokých teplot, které ale nepřesáhnou bod tavení. Zdrojem tepla je válcový nástroj s profilovaným kolíkem, který se zaboří do materiálu a pohybuje se podél spáry mezi dvěma deskami. [6] V místě kontaktu trnu se svařovanými materiály dochází k ohřevu kovu a vytvoření vysoce plastické oblasti, v níž dochází ke vzájemnému promísení kovu. Materiál v plastickém stavu je přenesen z čelního okraje nástroje a přemístěn těsným kontaktem ramenem nástroje a profilem kolíku. Po přenesení materiálu na zadní stranu nástroje, kde není takové tření a tlak, dochází k ochlazení materiálu (obr. 8). Zároveň dochází ke spojení a k vytvoření pevného spoje bez pórů nebo vměstků. [11]

Výhodou metody FSW je vysoká kvalita spoje a jeho výborné mechanické vlastnosti, jako je pevnost a chování spoje při ohybu. Ve srovnání s ostatními metodami svařování má spoj vynikající únavové vlastnosti, protože neobsahuje vměstky a nečistoty. Spoje mohou být vytvořeny rychleji, při svařování nedochází k velkým deformacím a lze spojovat díly v tloušťkách od 1,6 do 30 mm bez přídavného materiálu. Tato nová technologie tak může nahradit klasické a většinou obtížné svařování součástí z hliníkových slitin v oborech jako je stavba lodí, letecký průmysl, výroba železničních vagónů, automobilový průmysl, chladírenství atd. [6]



1- sestupná strana svaru, 2- zadní třecí okraj nástroje, 3- třecí hrot, 4- rameno nástroje, 5- čelní třecí okraj nástroje, 6- místo spojení

Obr. 8: Proces svařování metodou FSW [13]

2.2 Svařitelnost a využitelnost tvářených vytvrditelných slitin hliníku se zaměřením na slitinu AW 6082

2.2.1 Svařitelnost vytvrditelných slitin hliníku

Při tavném svařování hliníkových slitin je třeba rozlišovat, zda se jedná o slitiny vytvrditelné nebo nevytvrditelné. Obecně lze říci, že tavným svařováním jsou dobře svařitelné všechny nevytvrditelné slitiny a z vytvrditelných slitin jsou to slitiny **AlMgSi** a **AlZnMg**.

Při tavném svařování je důležitá volba přídavného materiálu. Není ovlivněna pouze snahou o maximalizaci pevnostních vlastností svarového spoje, ale zejména snahou o optimální průběh chladnutí svarového spoje, který nevede ke vzniku trhlin. Volba vhodného přídavného materiálu hraje roli zejména v případech, kdy jsou požadovány velké rychlosti svařování. Sklon k tvorbě trhlin za tepla ve svarovém spoji závisí na chemickém složení slitiny. Citlivé jsou na tvorbu trhlin za tepla zejména vytvrditelné slitiny. Největší sklon k tvorbě trhlin za tepla je při obsahu křemíku kolem 0,75 % a hořčíku okolo 1,5 %. Z tohoto důvodu se pro vytvrditelné slitiny **AlMgSi** používá přídavný materiál s 5 % Mg nebo s 5 % Si. Obsah hořčíku a křemíku je u slitiny tohoto typu zásadní, neboť tyto prvky jsou schopny vytvořit sloučeniny Mg_xSi_y umožňující v určité fázi vyloučení z přesyceného tuhého roztoku α pozitivně modifikovat mechanické vlastnosti slitiny. [15]

2.2.2 Rozdělení hliníku a jeho slitin pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3

Tyto normy platí pro tvářené výrobky a ingoty určené ke tváření a stanoví označování písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Číselné označení lze doplnit i chemickým označením, např. EN AW-5052 [AlMg2.5]. Jednotlivé části označení následují v pořadí:

- předpona EN následována mezerou,
- písmeno A určuje, že se jedná o hliník,
- písmeno W určuje tvářené výrobky,
- spojovací čárka
- čtyři číslice označují chemické složení.

V čtyřmístném číselném označení udává první ze čtyř číslic skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků:

řada 1000 - Al minimálně 99,9 % a více

řada 2000 - slitina AlCu

řada 3000 - slitina AlMn

řada 4000 - slitina AlSi

řada 5000 - slitina AlMg

řada 6000 - slitina AlMgSi

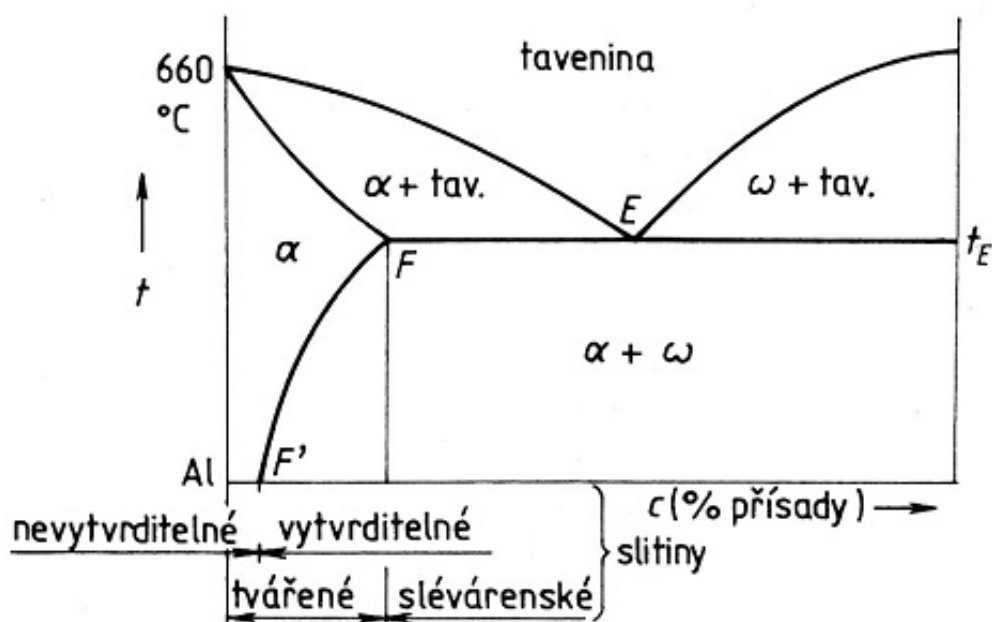
řada 7000 - slitina AlZn

řada 8000 - slitina Al s různými prvky

Tvářené slitiny se dále dělí na:

- **tepelně vytvrditelné** (řada 2000, 4000, 6000 a 7000)
- **tepelně nevytvrditelné, zpevněné tvářením** (řada 1000, 3000 a 5000)

Názorné rozdělení slitin hliníku je na obrázku 9.

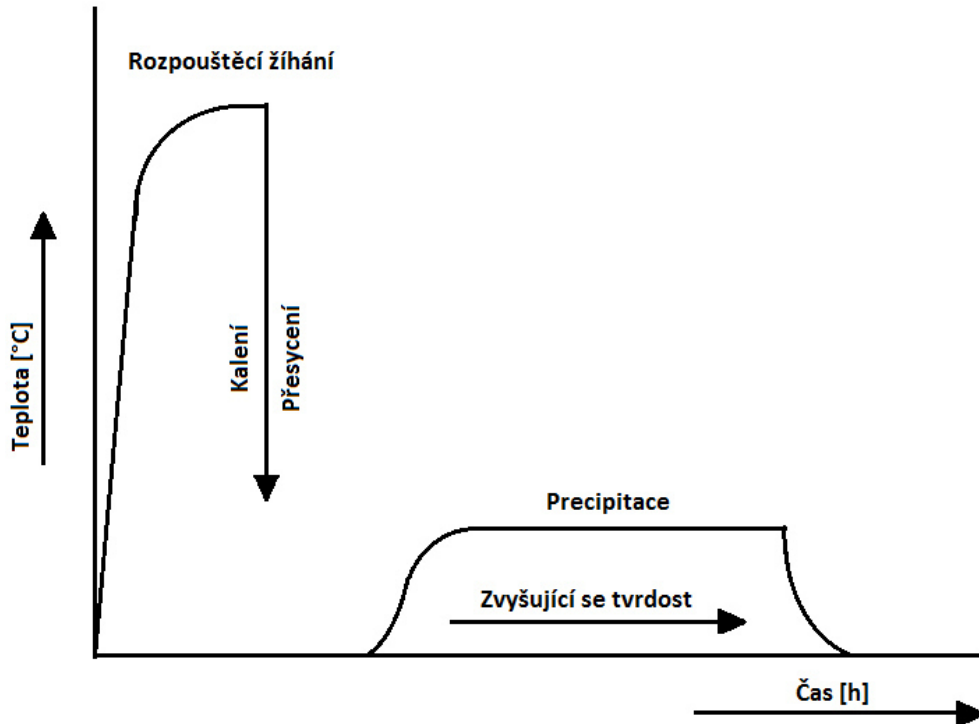


Obr. 9: Rozdělení slitin hliníku [14]

2.2.3 Tepelné zpracování vytvrditelných slitin hliníku

Vytvrditelné slitiny hliníku mají na jednu stranu výhodu v možnosti výrazného zvýšení pevnosti tepelným zpracováním, avšak na druhou stranu tímto procesem klesá jejich tažnost. Účelem tepelného zpracování je získat určitý nerovnovážný stav struktury, který zajišťuje požadované vlastnosti výrobku. [14]

Tepelné zpracování má tři stádia (obr. 10). Prvním je rozpouštěcí žíhání, následuje rychlé ochlazení a konečný technologický proces je vytvrzování.



Obr. 10: Schematické znázornění celkového tepelného zpracování [12]

Rozpouštěcí žíhání je ohřev na teplotu kolem 500 °C s dostatečnou výdrží, přičemž se vychází z fázového diagramu konkrétní slitiny, kdy nesmí dojít k překročení křivky solidu, neboť by došlo k natavení hranic zrn.

Rychlé ochlazení se provádí ponořením do vody nebo oleje. Dojde ke vzniku přesyceného tuhého roztoku. Přesycený tuhý roztok vykazuje daleko větší obsah rozpuštěné příměsi než při její rovnovážné rozpustnosti při dané teplotě.

Vytvrzování je proces, kdy dochází k přirozenému nebo umělému stárnutí slitin. Obecně je rozpad přesyceného tuhého roztoku difúzní proces, který začíná nukleací a vznikem koherentních precipitátů, tzv. Guinierových-Prestonových zón. Výsledkem je pnutí v mřížce hliníku v okolí zón, které je překážkou pro pohyb dislokací, s čímž je spojený vytvrzovací efekt. Tyto zóny postupně rostou a ztrácejí koherenci. Proces končí vznikem

nekoherentního rovnovážného precipitátu. Při delší výdrži na teplotě stárnutí dochází k nežádoucímu hrubnutí rovnovážného precipitátu, klesá tvrdost. Toto stádium označujeme jako přestárnutí. Přesycený tuhý roztok je termodynamicky nestabilní, dochází k jeho rozpadu. U některých slitin dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku již při teplotě okolí, tento pochod označujeme jako přirozené stárnutí. Při umělém stárnutí se proces urychlí ohřevem. U přirozeného stárnutí proces vytvrzování probíhá dny až týdny s přihlédnutím na teplotu okolí. Umělé stárnutí probíhá při zvýšených teplotách 50 °C - 180 °C daleko rychleji, v řádu hodin. [12]

2.2.4 Technické údaje svařované slitiny hliníku AW 6082 T651 (AlSi1MgMn) dle ČSN 42 4400 použité v experimentech

Slitina EN AW 6082 T651 je precipitačně vytvrditelná slitina, která se používá na středně namáhané části draků letadel, vozidel a součástí pro jemnou mechaniku a optiku. Potrubí pro vedení vody, oleje nebo benzínu. Údaj T651 za názvem slitiny označuje normalizovaný stav materiálu, jeho úpravu a tepelné zpracování dle ČSN EN 515. V tomto případě se jedná o stav slitiny hliníku po rozpouštěcím žihání, uvolněním vnitřního pnutí vypnutím řízenou velikostí (pro plech je trvalá deformace 0,5 % až 3 %) a následném umělém stárnutí. Po vypnutí se slitina dále nevyrovnává. [18]

Vytvrzovací proces se skládá z rozpouštěcího žihání za teplot 520-535 °C a ochlazení do vody. Poté následuje žihání (stárnutí) za teplot 155-170 °C s následným ochlazením na vzduchu, které je nutné aplikovat ihned po rozpouštěcím žihání.

Odolnost proti korozi je v normálních atmosférických podmínkách a v mořském prostředí výborná. Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082 T651 podle EN 485-2 jsou uvedeny níže v tabulce 3. Chemické složení slitiny je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082 T651 podle EN 485-2 [12]

EN AW	Specifikovaná tloušťka [mm]		Pevnost v tahu [MPa]	Rp0,2 [MPa]	Tažnost [%]	Tvrdost [HBS]
	nad	do	min.	min.	A50mm	
6082 T6	≥0,4	1,5	310	260	6	94
	1,5	3	310	260	7	94
	3	6	310	260	10	94
	6	12,5	310	255	9	91

Tabulka 4: Chemické složení slitiny AW 6082 (hm. %) [12]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ostatní	Ti	Al
min.	0,7			0,4	0,6					zbytek
max.	1,3	0,5	0,1	1	1,2	0,2	0,25	0,15	0,15	

3. Experimentální část

Účelem experimentální části bylo zjištění vlivu umělého a přirozeného stárnutí na svarové spoje provedené na tvářené slitině hliníku AW 6082. Tato práce byla řešena v rámci grantového projektu na Katedře strojírenské technologie, jehož úkolem je návrh a realizace nových výpočetních modelů v oblasti svařování a tepelného zpracování. Realizaci vlastního experimentu lze rozdělit na tři po sobě následující části. Prvním úkolem bylo nalezení vhodných parametrů svařování pro vícevrstvé svary realizované na slitině hliníku AW 6082 s následnou realizací kompletně monitorovaných zkušebních svarů (kap. 3.1). Druhým úkolem bylo zjištění vlivu svařovacího procesu na změnu mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti pomocí měření tvrdosti dle Vickerse, v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-1 (kap. 3.2). Třetím úkolem pak bylo zjistit a vyhodnotit možnosti vlivu umělého a přirozeného stárnutí na změnu mechanických vlastností v základním materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarovém kovu pomocí měření tvrdosti HV 10 (kap. 3.3).

3.1 Realizace vícevrstvých svarů provedených na slitině hliníku AW 6082

Vzhledem ke skutečnosti, že hliník a jeho slitiny mají velký koeficient délkové roztažnosti a rovněž také velkou tepelnou vodivost, je nutné brát na tyto skutečnosti zřetel při návrhu postupu svařování. Tyto vlastnosti totiž způsobují při svařování velké deformace a napětí, které mohou být příčinou vzniku trhlin, a to především u vytvrditelných slitin. S ohledem na tyto skutečnosti je vhodné volit takové technologie svařování, při které dochází k co nejmenšímu tepelnému ovlivnění materiálu. Nicméně průmyslově je z důvodu vysoké produktivity s úspěchem používána právě metoda MIG, a to zejména pro svařování větších konstrukcí.

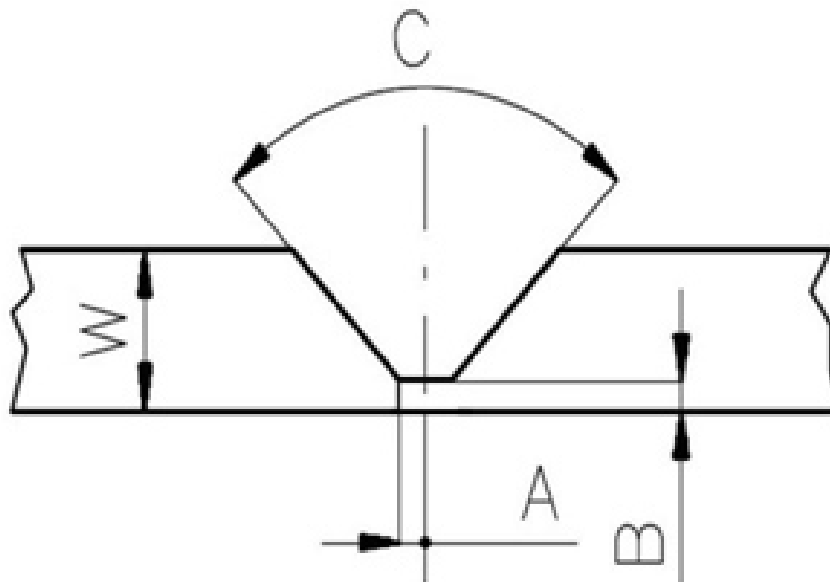
Dalším aspektem, jež je nutné při návrhu svarového spoje a technologických parametrů zohlednit, je tloušťka materiálu. Pro experimentální část měla zvolená tloušťka materiálu hodnotu $t = 15$ mm z důvodu následného využití výsledků při numerických simulacích svařování. Tato tloušťka umožňuje realizovat vícevrstvé svary, což je výhodné zejména při definování a následné verifikaci výpočetních modelů.

Protože bylo experimentální svařování realizováno poloautomatickým způsobem pomocí lineárního automatu, muselo být přistoupeno ke geometrické úpravě svarového spoje. Pokud by zůstala klasická geometrie svaru, musela by být použita keramická podložka sloužící k formování kořene.

3.1.1 Příprava svařovaného materiálu a pracoviště pro následné svařování

- **Geometrie svarových ploch**

Svarové plochy byly vytvořeny frézováním (obr. 11) a to z důvodu přesnosti geometrie a čistoty procesu, neboť použitím broušení by mohly být kontaminovány svarové plochy zrnky z brusného kotouče. Tvar svarových ploch (drážky) byl zvolen s ohledem na použitou technologii svařování, tloušťku materiálu a parametrů svařování dle ČSN EN ISO 9692-3 pro svařování s podložkou. Podložka byla v tomto případě tvořena otupením velikosti 2 mm. Díky tomu bylo docíleno optimální tvorby a formování kořenové housenky a tím i konstantnosti okrajových podmínek využitelných při definování matematického modelu. Uvedená geometrie umožnila zkušební svary koncipovat jako třívrstvé.

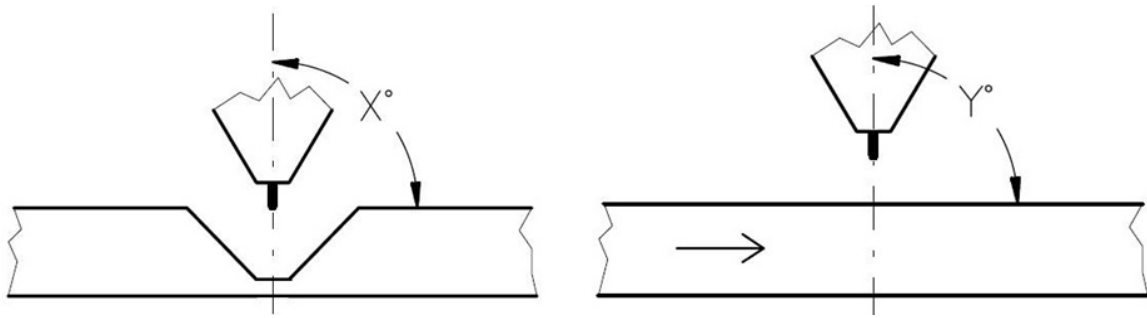


A= 0,75 mm (šířka spodní drážky), B= 2 mm (velikost otupení), C= 60° (úhel rozevření),
W= 15 mm (tloušťka materiálu)

Obr. 11: Úprava svarových ploch frézováním

K nalezení vhodných procesních parametrů byly použity desky ze slitiny AW 6082 o rozměrech 200 x 200 x 15 a drážkou vyfrézovanou podle uvedené geometrie. Po těchto dílčích experimentech byly realizovány dva zkušební, kompletně monitorované svary realizované na deskách o velikosti 350 x 200 x 15 mm.

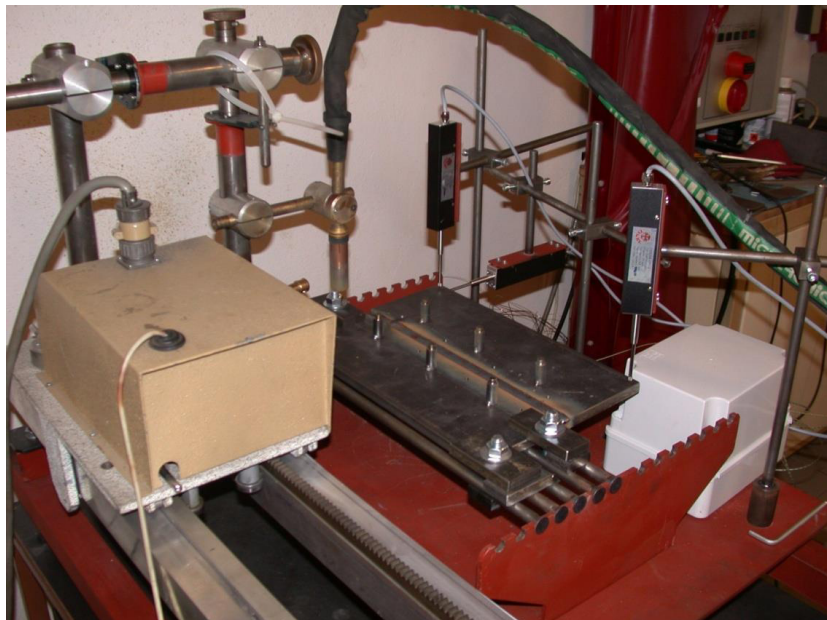
Zkušební svary byly provedeny v poloze PA (poloha svařování vodorovná shora) do drážky tak jak je naznačeno na obrázku 12.



Úhel X ve směru kolmém na směr svařování = 90° Úhel Y ve směru svařování = 90°

Obr. 12: Nastavení hubice hořáku

Pro svaření vzorků bylo použito svařovacího zdroje MIGATRONIC BDH 550 Puls Syn. Jde o inverterový zdroj s možností pulzního režimu synergického ovládání. Pojezd byl realizován pomocí lineárního automatu s plynule nastavitelnou rychlostí pojezdu v rozmezí svařovacích rychlostí 0,2 - 2,3 m/min propojeného se svařovacím zdrojem. Svařování vzorků probíhalo ve speciálním přípravku, který zaručoval jednak správnou geometrickou polohu mezi svařovaným materiálem a svařovacím hořákem (konstantní vzdálenost špičky), a také přesné nastavení geometrie hubice hořáku (obr. 12). Bohužel jsem nepořídil obrazovou dokumentaci pracoviště při daném experimentu, proto je na obrázku 13 zobrazeno svařování jiného druhu materiálu, nicméně pro názornou ukázkou, zejména lineárního automatu a speciálního přípravku, je toto dostatečné.



Obr. 13: Ukázka svařovacího pracoviště včetně lineárního automatu a speciálního přípravku pro měření deformací a posuvů v průběhu svařování a chladnutí.

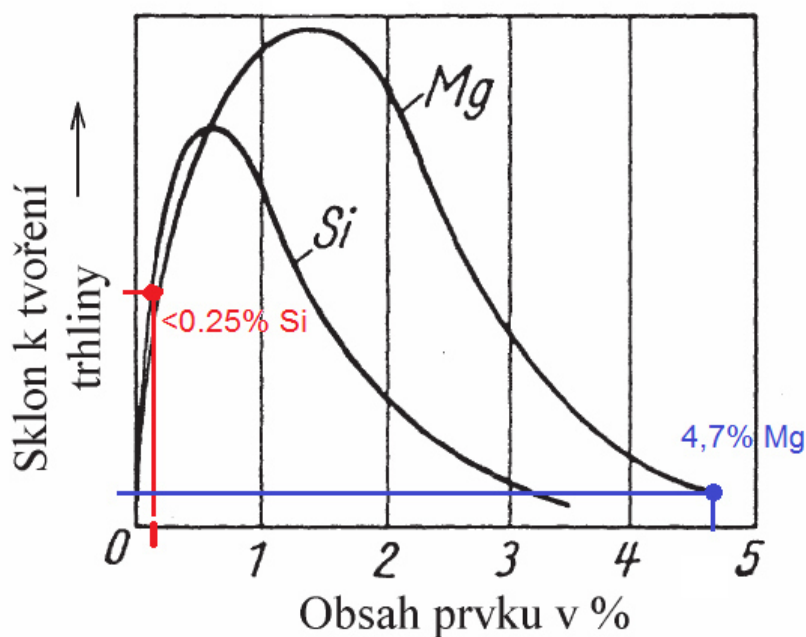
Monitorizace svařovacích parametrů byla zajištěna pomocí systému Weld Monitor. Tento systém se skládá z několika na sobě nezávislých modulů použitých při monitorování svařování metodou MIG. Naměřená data se zaznamenávají a ukládají do externího počítače. Následná editace umožňuje získat průměrné ale i okamžité hodnoty, včetně detailního grafického výstupu měřeného signálu (viz například obr. 19).

Teplotní ovlivnění materiálu při svařování a následné deformace byly monitorovány pomocí termočlánků a LVDT polohových čidel (kap. 3.1.2)

Jako přídatný materiál byl zvolen drát OK Autrod 5087 (AlMg5) o průměru 1,2 mm vhodný pro svařování hliníkových slitin s obsahem hořčíku do 5 % a slitin, kde je požadována vysoká pevnost v tahu. Přídavek zirkonu zlepšuje odolnost proti trhlinám za tepla při tuhnutí svarového kovu. Typické chemické složení drátu je v tabulce 5 a v tabulce 6 jsou uvedeny doporučené hodnoty svařovacího proudu, napětí a rychlosti podávání drátu a také orientační výkonové hodnoty udávané výrobcem drátu. Tento druh přídatného materiálu byl zvolen z toho důvodu, že je využíván pro svařování vytvrditelných slitin hliníku, z důvodu eliminace trhlin za tepla. Přesto byla snaha o získání přídatného materiálu řady 6000, ale v České republice není možné získat uvedený typ přídatného drátu. Lze ho koupit v zahraničí, nicméně získání tohoto drátu je podmíněno odběrem celé palety, což je vzhledem k rozsahu experimentu neekonomické.

Náchylnost vybraných hliníkových slitin k tvorbě trhlin za horka je ukázána na obrázku 14. Jak je vidět, největší sklon k tvoření trhlin za horka je při obsahu Si kolem 0,75 % a 1,5 % Mg, i z tohoto důvodu byl zvolen tento přídatný materiál, který obsahuje 4,7 % Mg a méně než 0,25 % Si zaručující nízkou náchylnost ke vzniku trhlin za horka, tak jak je zobrazeno barevně na obrázku 14.

Základním plynem pro svařování hliníku a jeho slitin je inertní plyn argon o minimální čistotě 99,9 %. U větších tloušťek se používá ve směsi s heliem. Helium zvyšuje napětí na oblouku, což má za následek větší přenos výkonu a tím i příznivé ovlivnění hloubky závaru a výkonu svařování. Navíc má helium větší účinnost přenosu tepla od zdroje do materiálu. Negativní vlastností přidáním helia je to, že elektrický oblouk je méně stabilní. Tato vlastnost se negativně projevuje zejména u malých tloušťek, kdy je důležitější stabilita el. oblouku, proto se u malých tloušťek používá zejména argon, jehož hloubka závaru je pro tenké plechy dostatečná. S ohledem na tyto poznatky a metodu svařování byl zvolen jako ochranný plyn dvousložkový inertní plyn ve složení 75 % argonu a 25 % helia.



Obr. 14: Vliv obsahu legujících prvků Si a Mg na sklon k tvoření trhlin za tepla ve svarových spojích [15]

Tabulka 5: Typické chemické složení drátu v %

Si	Mn	Mg	Zn	Zr	Al
<0,25	0,8	4,7	0,2	0,15	95

Tabulka 6: Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty dané výrobcem

Ø drátu [mm]	Proud[A]	Napětí[V]	Rychlost podávání [m/min]	Výkon navaření [kg/h]
1,2	140-260	20-29	7-13	1,2-2,3

3.1.2 Veličiny měřené při svařování a následném chladnutí

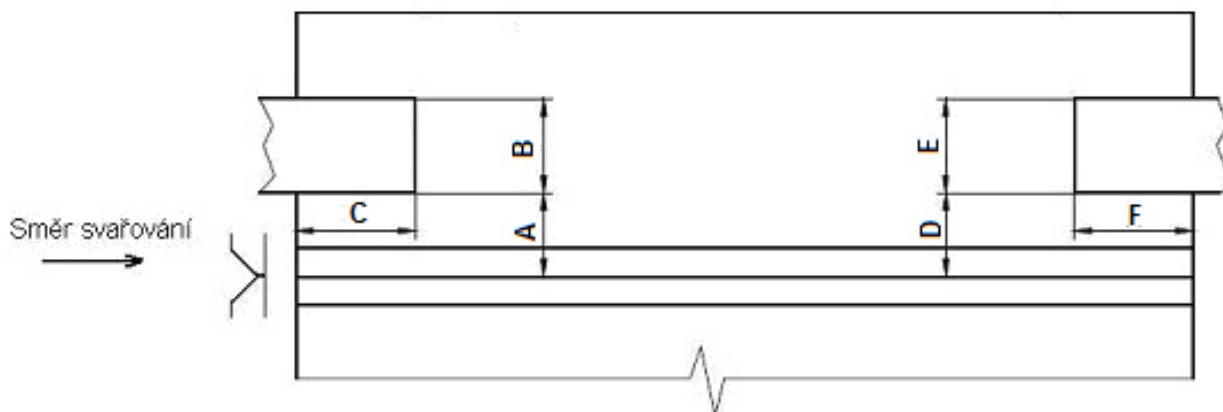
Pro získání vstupních dat pro numerické simulace byly měřeny následující veličiny:

1. Svařovací proud, svařovací napětí.
2. Rychlost podávání drátu.
3. Celkové vnesené teplo.
4. Průtok plynu.
5. Teplotní pole.
6. Podélné a příčné deformace.

Systémem Weld Monitor byly monitorovány svařovací parametry uvedené výše pod bodem 1 až 4. Pomocí termočlánků byla měřena teplotní pole a pomocí LVDT polohových čidel byla měřena deformace způsobená svařovacím procesem. Při numerických simulacích je nutné znát všechny okrajové podmínky simulovaného děje, proto musela být popsána nejen místa a způsoby upnutí vzorku, ale také přesné umístění termočlánků a čidel snímajících podélné a příčné deformace.

- **Způsob upnutí svařovaných desek**

Desky byly upnuty na dvou upínacích místech. Způsob dotyku svařence s upínkou a přípravkem byl plošný tak, aby kopíroval stykovou plochu upínané desky. Velikost upínacích ploch musí být dostatečně velká s ohledem na skutečnost, že při nedostatečně velké ploše styku by mohl nastat otisk hran na povrchu desky a nebo i prohnutí desky, pokud by deska byla upnuta celkově. To ale není případ tohoto experimentu, neboť pro potřebu získání hodnot deformací desky po svaření pro numerickou simulaci byla jedna strana svařence volná. Tuhost upnutí byla zajištěna pomocí upínky a šroubu, takže upnutí bylo pro podmínky simulací bráno jako zcela tuhé. Schematické naznačení míst upnutí a míst dotyku svařence s upínacím přípravkem včetně rozměrů od počátku a osy svaru (tab. 7) je na obrázku 15.



Obr. 15: Schematické naznačení míst upnutí svařence s přípravkem

Tabulka 7: Rozměry od počátku a osy svaru

A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]
61,4	38,6	17,3	42,1	33,5	18,2

Počet upínacích míst, způsob upnutí a velikost upínacích sil byla volena s ohledem na skutečnost, že hliník má jednu z největší délkových teplotních roztažností ze všech kovů, což má za následek značná pnutí při chladnutí hliníkového svařence. Umístění míst upnutí

je voleno i s ohledem na jejich funkci odvodu tepla z místa svařování, proto jsou umístěna co nejbližže svaru při zaručení volného přístupu k místu svařování.

- **Volba umístění termočlánků na svařovaných deskách**

Zkušební vzorek byl osazen šesti termočlánky dle obrázku 16 z důvodu monitorování a hlídání průběhu teploty ve svařenci. Jejich rozmístění na svařenci bylo voleno s ohledem na teplotní ovlivnění od jednotlivých housenek. Naměřené hodnoty teplot ve svařenci byly následně využity jako podklady pro simulace průběhů teplotních polí. Tyto simulace a definování modelu bylo realizováno na VUT v Brně.



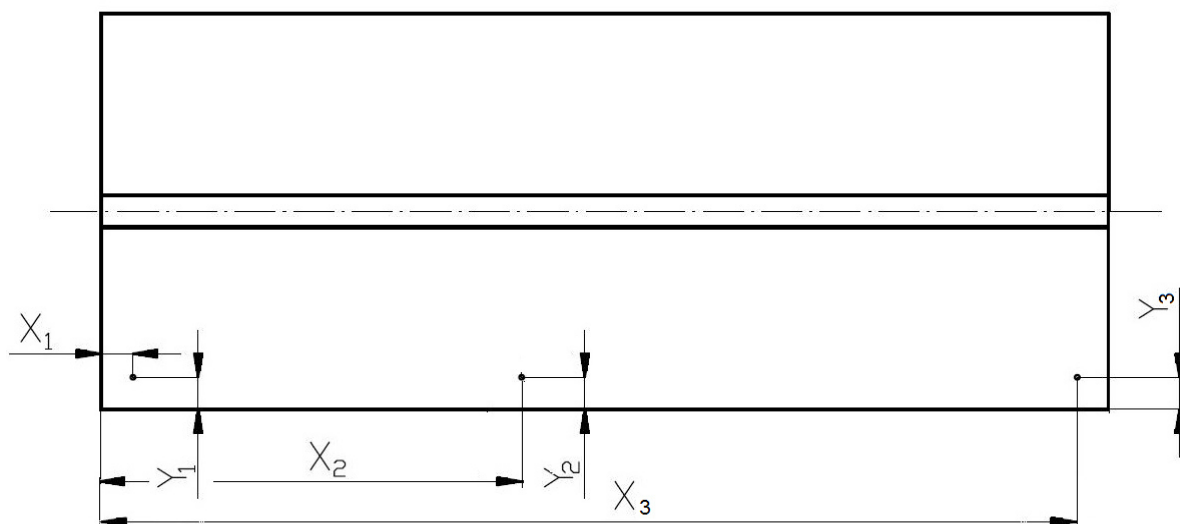
Obr. 16: Umístění termočlánků na svařenci

- **Umístění polohových čidel na svařovaných deskách**

Pro snímání podélných a příčných deformací byla použita LVDT čidla polohy. Jejich geometrické umístění je uvedeno v tabulce 8 a schematicky znázorněno na obrázku 17. Získané hodnoty byly opět využity jako vstupní data pro průběhy deformací od jednotlivých housenek a též pro nový výpočetní model realizovaný v Brně na VUT.

Tabulka 8: Geometrické souřadnice umístění LVDT čidel

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
LVDT snímač č. 1	6,3	5,8	0
LVDT snímač č. 2	175,4	6,7	0
LVDT snímač č. 3	343,9	5,3	0



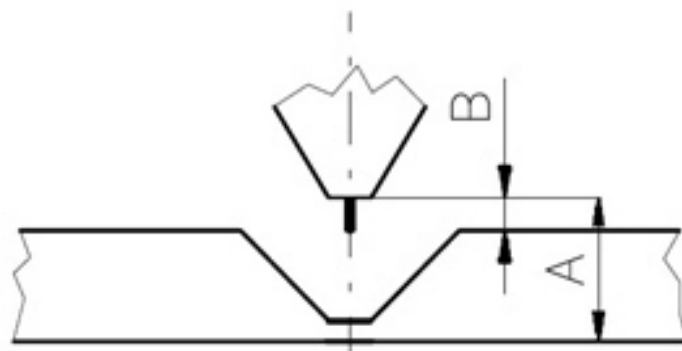
Obr. 17: Schematické znázornění umístění polohových čidel

3.1.3 Vlastní realizace experimentálních svarů

Vzhledem k navržené geometrii svaru a na základě experimentů optimalizujících svařovací parametry byl svar navržen a realizován jako třívrstvý. Experimenty využívané k vytvoření nových výpočetních modelů mají oproti běžným experimentům určitá specifika. Například jednotlivé housenky jsou svařeny tak, aby se nepřekrývaly v celé délce a každá vrstva tak mohla být metalograficky vyhodnocena. První ze zkušebních svarů byl proto proveden tak, že první housenka (kořenová) byla svařena po celé délce svařence, druhá housenka (výplňová) byla svařena do cca $\frac{3}{4}$ délky svařence a třetí housenka (krycí) do cca $\frac{3}{5}$ délky svařence. Díky tomu lze jednotlivé housenky vyhodnotit v oblasti stabilního ustáleného teplotního pole. Druhý zkušební svar byl proveden zcela identickými parametry svařování jako ten první, pouze byly v tomto případě svařeny všechny tři housenky po celé délce svařence. Důvodem bylo jednodušší vyhodnocení vzniklých deformací. V dalším textu jsou uvedeny všechny důležité hodnoty včetně svařovacích parametrů pro jednotlivé housenky.

a) Housenka číslo 1

Jako první byla navařena kořenová housenka po celé délce svařence a měla tedy délku 350 mm. Na obrázku 18 jsou uvedeny vzdálenosti kontaktní špičky od místa svařování a v tabulce 9 jsou uvedeny nastavené a skutečné monitorované svařovací veličiny pro housenku číslo 1. Grafické zobrazení signálu pomocí tzv. UI laboratoře systémem Weld Monitor je na obrázku 19. Jak je zřejmé, jedná se skutečně o sprchový přenos kovu do svarové lázně. Vyobrazení makrovýbrusu kořenové housenky je na obrázku 20.

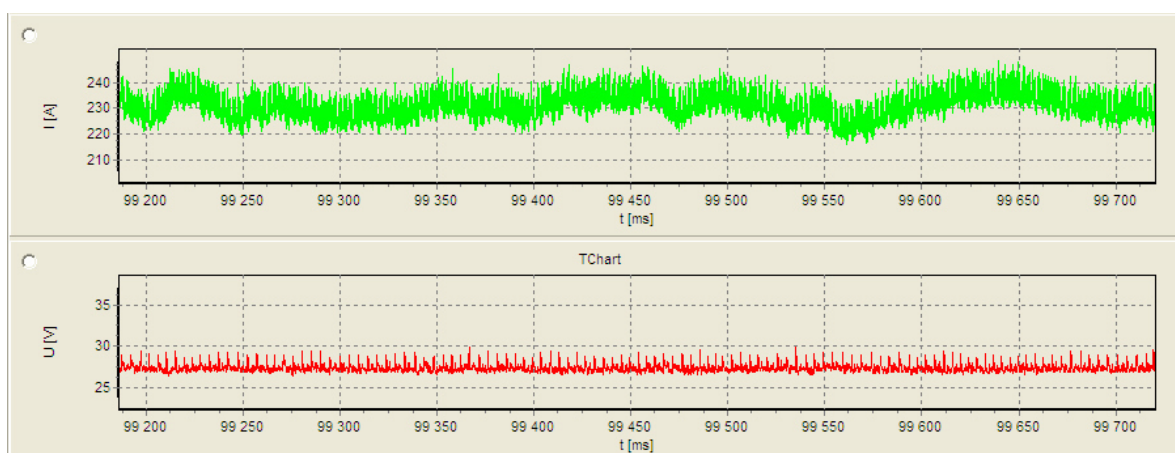


A = 21,3 mm (vzdálenost kontaktní špičky), B = 6,3 mm (vzdálenost kontaktní špičky)

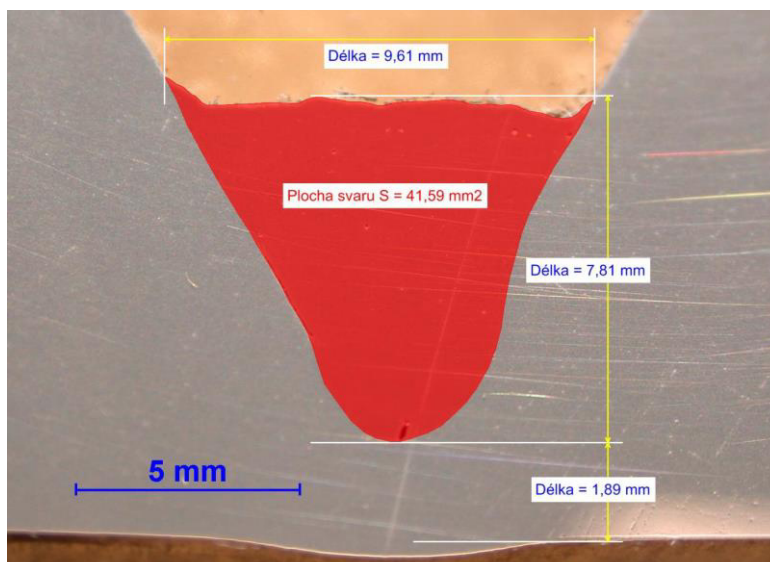
Obr. 18: Vzdálenost kontaktní špičky

Tabulka 9: Nastavované a skutečné monitorované svařovací parametry pro housenku číslo 1

Nastavované parametry		Skutečné monitorované svař. parametry	
Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
svařovací proud [A]	228	svařovací proud [A]	227,2
		svařovací napětí [V]	27,5
rychlost svařování [m/min]	0,4	rychlost svařování [m/min]	0,414
		průtok plynu [l/min]	26
		celkové vnesené teplo [kJ/cm]	9,055
číslo programu svářečky	P28	rychlost podávání drátu [m/min]	12,961
		účinnost přenosu tepla [-]	0,84
		způsob přenosu kovu v oblouku	bezzkratová oblast-sprcha



Obr. 19: Grafické zobrazení signálu z UI laboratoře programem Weld Monitor pro housenku číslo 1



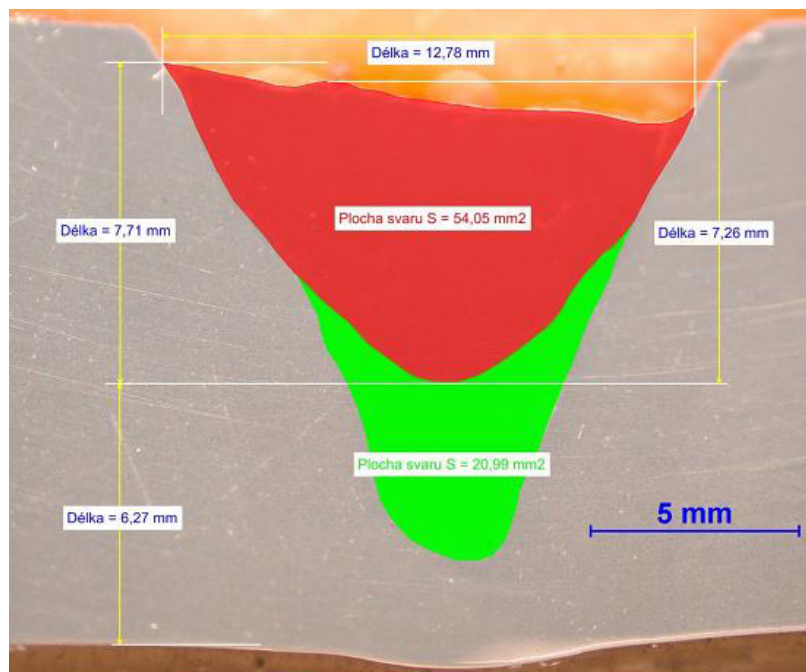
Obr. 20: Makrovýbrus kořenové housenky včetně rozměrů

b) Housenka číslo 2

Druhá housenka byla výplňová a byla navařena, jak už bylo zmíněno výše, v délce cca. $\frac{3}{4}$ svařence. Vzdálenost kontaktní špičky (obr. 18) pro druhou housenku měla hodnotu $A = 27$ mm a $B = 12$ mm. Skutečná délka svařené výplňové housenky měla délku 261 mm. Nastavované a skutečné monitorované svařovací veličiny pro housenku číslo 2 jsou uvedeny níže v tabulce 10. Grafické zobrazení signálu pomocí tzv. UI laboratoře systémem Weld Monitor pro housenku číslo 2 je uvedeno v příloze 1. Jak je zřejmé, jedná se opět o sprchový přenos kovu do svařové lázně. Vyobrazení makrovýbrusu výplňové housenky je na obrázku 21.

Tabulka 10: Nastavované a skutečné monitorované svařovací parametry pro housenku číslo 2

Nastavované parametry		Skutečné monitorované svař. parametry	
Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
svařovací proud [A]	238	svařovací proud [A]	240,4
		svařovací napětí [V]	28,2
rychlost svařování [m/min]	0,36	rychlost svařování [m/min]	0,373
		průtok plynu [l/min]	26
		celkové vnesené teplo [kJ/cm]	10,905
číslo programu svářečky	P28	rychlost podávání drátu [m/min]	13,549
		účinnost přenosu tepla [-]	0,84
		způsob přenosu kovu v oblouku	bezzkratová oblast-sprcha



Obr. 21: Makrovýbrus výplňové housenky včetně rozměrů. Červená barva značí plochu housenky číslo 2 a zelená barva značí housenku číslo 1.

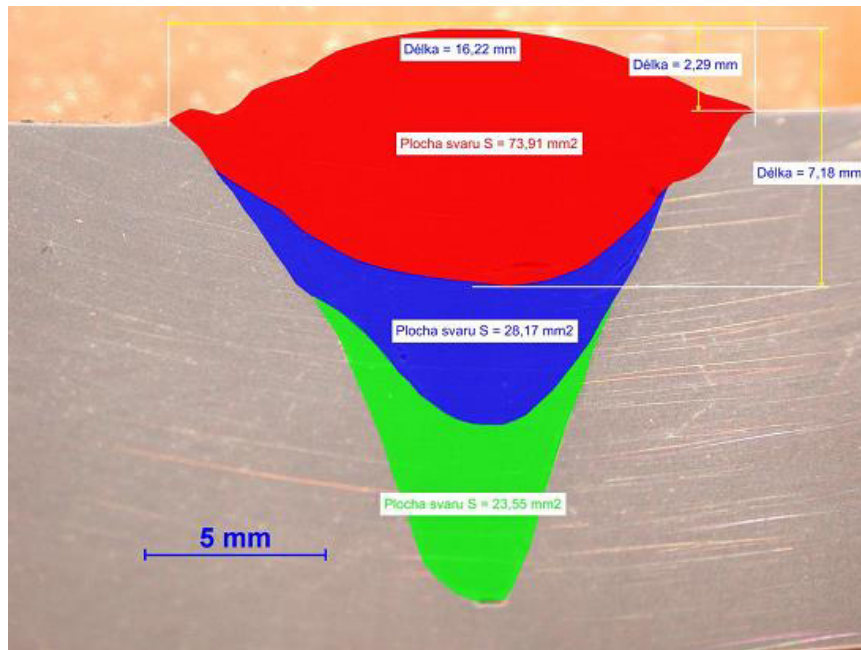
c) Housenka číslo 3

Poslední housenka byla výplňová a byla navařena, jak už bylo zmíněno výše, v délce cca. 3/5 svařence. Vzdálenost kontaktní špičky (obr. 18) pro třetí housenku měla hodnotu $A = 28,5$ mm a $B = 13,5$ mm. Skutečná délka svařené výplňové housenky měla délku 207 mm. Nastavované a skutečné monitorované svařovací veličiny pro housenku číslo 3 jsou uvedeny níže v tabulce 11.

Tabulka 11: Nastavované a skutečné monitorované svařovací parametry pro housenku číslo 3

Nastavované parametry		Skutečné monitorované svař. parametry	
Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
svařovací proud [A]	245	svařovací proud [A]	249,3
		svařovací napětí [V]	28,6
rychlost svařování [m/min]	0,30	rychlost svařování [m/min]	0,342
		průtok plynu [l/min]	26
		celkové vnesené teplo [kJ/cm]	12,509
číslo programu svářečky	P28	rychlost podávání drátu [m/min]	14,026
		účinnost přenosu tepla [-]	0,84
		způsob přenosu kovu v oblouku	bezzkratová oblast-sprcha

Grafické zobrazení signálu pomocí tzv. UI laboratoře systémem Weld Monitor pro housenku číslo 3 je uvedeno v příloze 1. Opět se jedná o sprchový přenos kovu do svarové lázně. Vyobrazení makrovýbrusu výplňové housenky je na obrázku 22.

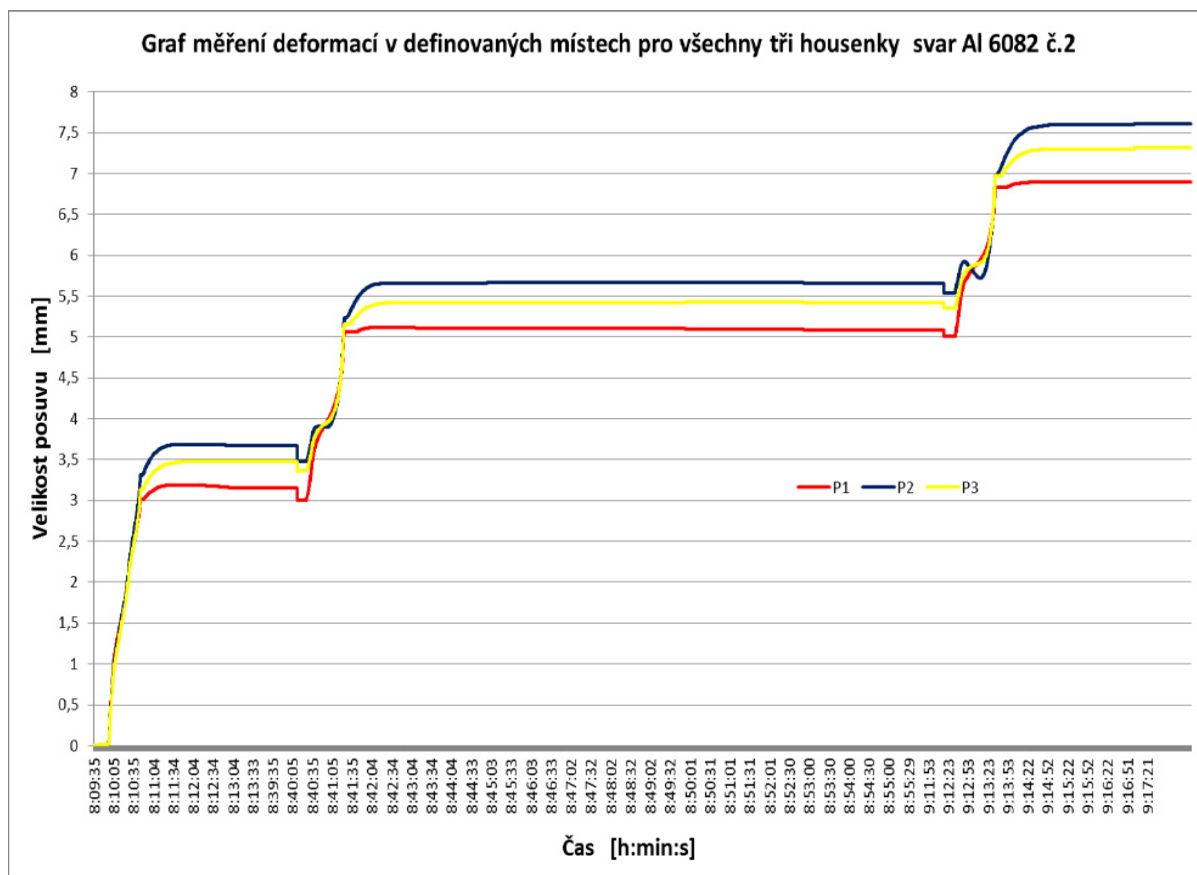


Obr. 22: Makrovýbrus krycí housenky včetně rozměrů. Červená barva značí plochu housenky číslo 3, modrou barvou je označena housenka číslo 2 a zelená barva značí housenku číslo 1.

3.1.4 Průběh naměřených deformací v materiálu po svaření jednotlivých housenek

Pomocí polohových čidel LVDT určených pro snímání deformací byly naměřeny hodnoty deformací vzniklých v materiálu po svaření jednotlivých housenek. Tyto naměřené hodnoty jsou zobrazeny v souhrnném grafu níže pro všechny 3 housenky v celém časovém intervalu od počátku svařování první housenky až po navaření housenky číslo 3 (obr. 23).

Průběhy naměřených deformací po navaření jednotlivých housenek číslo 1, číslo 2 a číslo 3 jsou uvedeny v příloze 2. Hodnoty P1 až P3 v grafech značí posuvy jednotlivých polohových čidel číslo 1 až číslo 3. Z naměřených průběhů deformací vyplývá, že k největším deformacím ve svařenci dochází po svaření první housenky, poté už je tuhost v místě svařování dostatečná k tomu, že i když každou další housenkou se vnáší další deformace, tak tyto deformace už nenabývají tak vysokých hodnot, jako tomu bylo u svaření první housenky.



Obr. 23: Průběh naměřených deformací (posuvů) v závislosti na čase v definovaných místech pro všechny tři housenky

3.2 Vliv svařování na tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti

Při svařování dochází v tepelně ovlivněné oblasti k rozpuštění precipitátů způsobujících zpevnění materiálu. Z tohoto důvodu dochází k poklesu mechanických vlastností v uvedené oblasti. Změnu a pokles mechanických vlastností lze vyjádřit pomocí měření tvrdosti materiálu. K vyhodnocení byla použita zkouška tvrdosti dle Vickerse HV 10, v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-1.

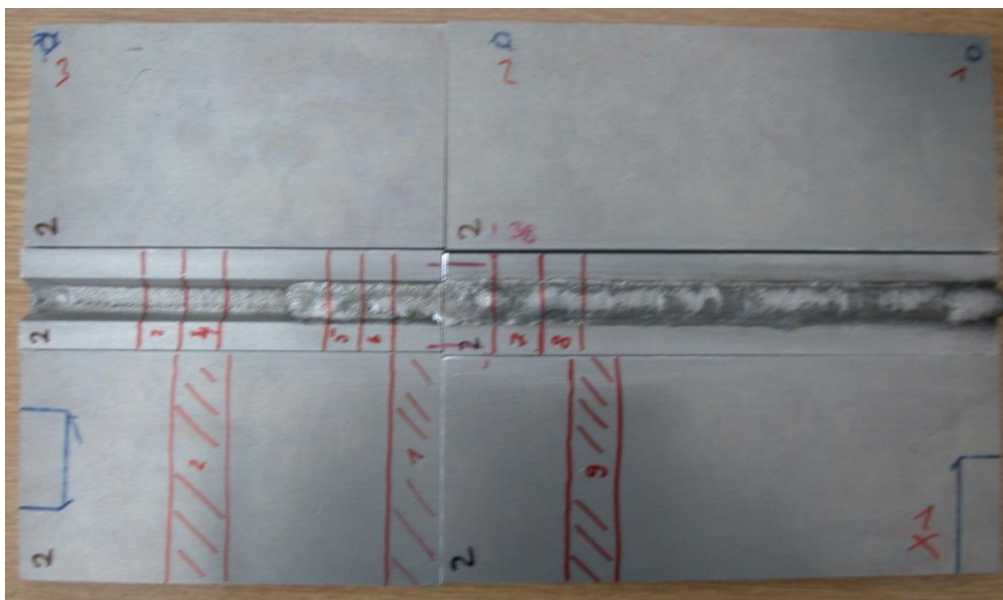
3.2.1 Zvolený postup pro měření tvrdosti HV 10 svařence po svařování

Zkouška tvrdosti HV 10 dle ČSN EN ISO 9015-1 byla provedena na třech metalografických výbrusech, přičemž výbrusy byly vybrány tak, aby bylo možné sledovat tepelné ovlivnění způsobené housenkami jdoucími po sobě, tak jak je zřejmé z obrázku 24. Na každém z výbrusů byly provedeny řady vtisků tak, že první řada (Řada 1) byla vzdálena 1,5 mm od spodního okraje vzorku a každá následující řada byla posunuta o 2 mm.

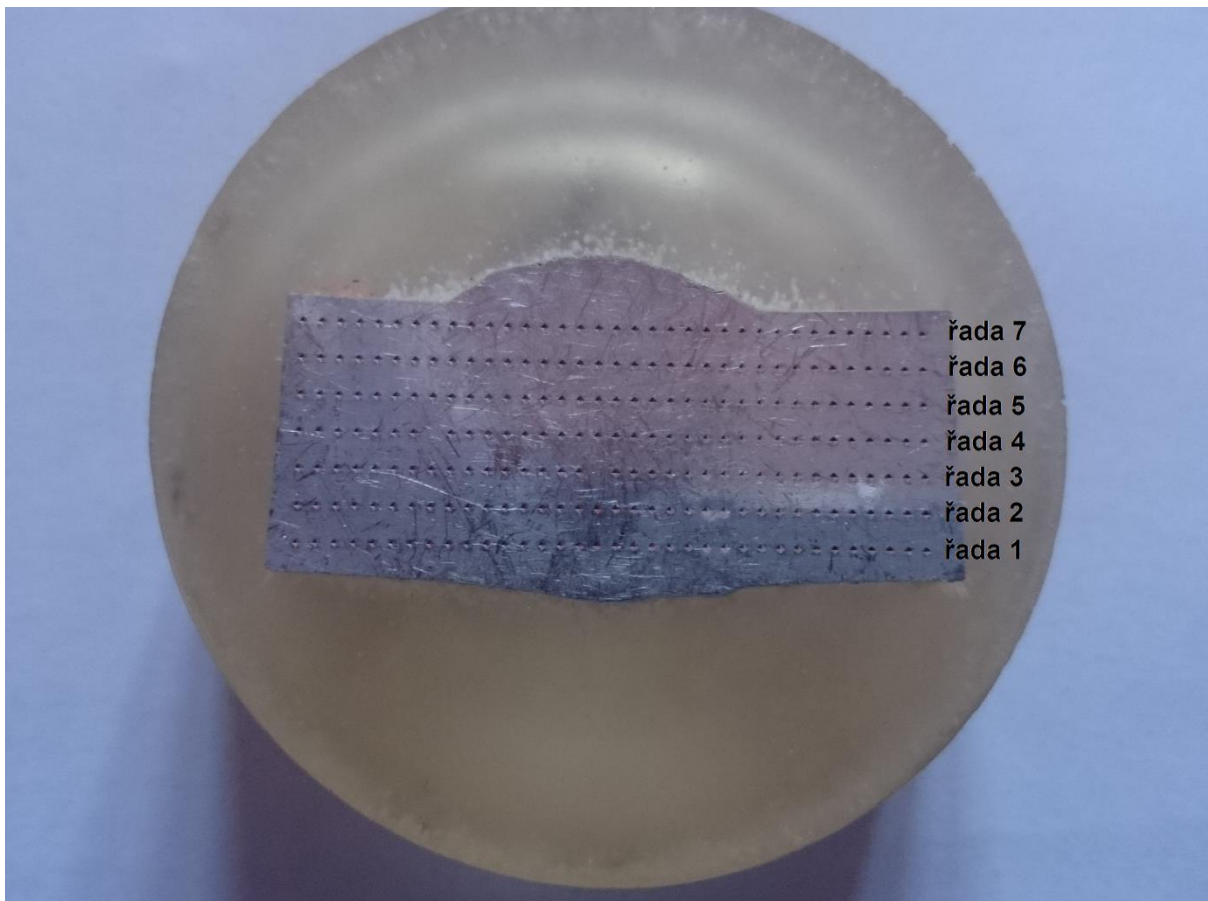
U vzorku číslo 1 byly provedeny 4 řady vtisků, které procházely pouze přes kořenovou housenku. U vzorku číslo 2, obsahující kořenovou a výplňovou housenku, byly provedeny opět 4 řady vtisků (stejně jako u vzorku číslo 1), plus byly přidány další 2 řady vtisků. Vzorek číslo 3 obsahoval všechny tři housenky, a proto na něm bylo provedeno 7 řad vtisků stejným způsobem jako u předchozích dvou vzorcích. Ukázka měření tvrdosti například pro vzorek číslo 3 je na obrázku 25. V každé řadě vtisků pak bylo celkem 34 vpichů, přičemž vzdálenost mezi středy vtisků byla 1 mm.

Pro ukázkou naměřených hodnot tvrdosti jsou v tabulce 12 uvedeny hodnoty pro vzorek číslo 1 a sice pro řadu 1 a 2, zbývající řady 3 a 4 jsou uvedeny v tabulce 13. Naměřené hodnoty tvrdosti řady 1 až řady 6 vzorku číslo 2 jsou uvedeny v příloze 3. Naměřené hodnoty tvrdosti řady 1 až řady 7 vzorku číslo 3 jsou také uvedeny v příloze 3.

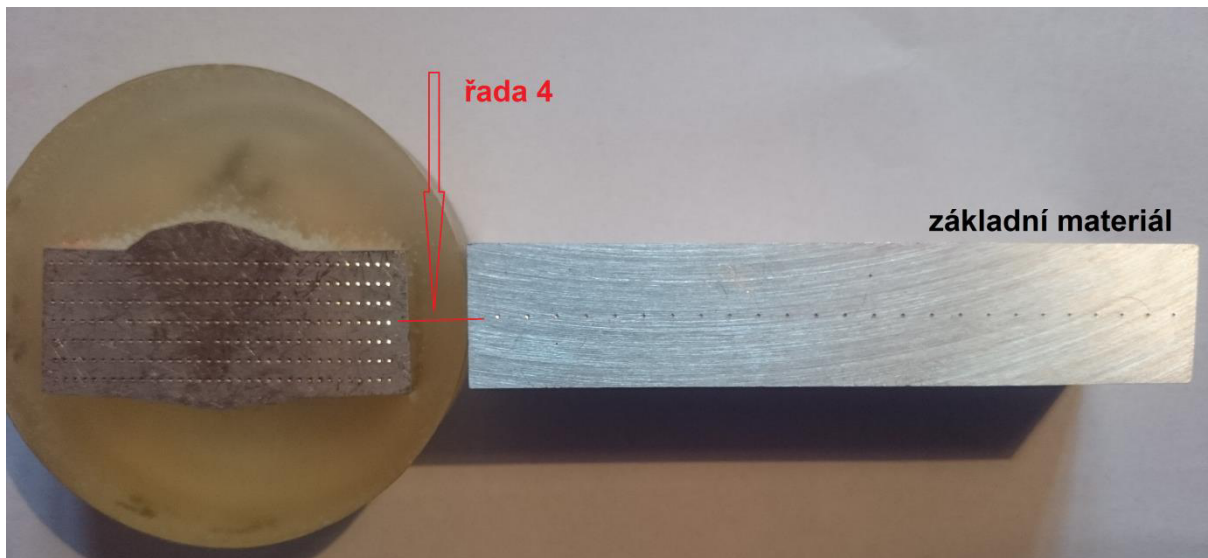
Kromě toho bylo měřeno vždy 28 vpichů na vzorcích ze základního materiálu a to celkem na třech vzorcích, tak jak je ukázáno na obrázku 24. Řada vpichů v základním materiálu byla provedena uprostřed materiálu ve vzdálenosti 7,5 mm od spodního okraje a korespondovala tak s Řadou 4. První vpich v základním materiálu byl proveden ve vzdálenosti 3 mm od okraje materiálu a každý z následných vpichů měl osovou vzdálenost také 3 mm (obr. 26). Celkově tak bylo provedeno, změřeno a vyhodnoceno 662 vpichů HV 10.



Obr. 24: Místo odběru vzorků pro měření tvrdosti HV 10 v základním materiálu a ve svarovém kovu



Obr. 25: Zobrazení postupu měření tvrdosti demonstrováno pro vzorek č. 3



Obr. 26: Návaznost měření tvrdosti v základním materiálu na řadu 4

Tabulka 12: Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 1, Řada 1 a 2

Pořadí	Řada 1				Řada 2			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-15,1		106,0	ZM	-13,9		107,0	ZM
2	-14,1		110,0	ZM	-12,9		108,0	ZM
3	-13,1		105,0	ZM	-11,9		104,0	ZM
4	-12,1		101,0	ZM	-10,9		98,2	ZM
5	-11,1		99,3	ZM	-9,9		99,8	ZM
6	-10,1		91,9	ZM	-8,9		95,6	ZM
7	-9,1		91,0	ZM	-7,9		92,1	ZM
8	-8,1		86,6	ZM	-6,9		89,2	ZM
9	-7,1		82,8	ZM	-5,9		83,8	ZM
10	-6,1		78,3	ZM	-4,9		77,4	ZM
11	-5,1		64,8	ZM	-3,9		67,1	ZM
12	-4,1		65,1	ZM	-2,9		68,9	ZM
13	-3,1		72,2	ZM	-1,9		71,9	ZM
14	-2,1		71,4	ZM	-0,9	0,9	74,3	ZM
15	-1,1		74,3	ZM	0,1	0,1	70,4	Svar1
16	-0,1	0,1	73,1	ZM	1,1		69,6	Svar1
17	0,9	0,9/0,8	71,7	Svar 1	2,1		70,2	Svar1
18	1,9	0,2	73,7	ZM	3,1	0,3	67,6	Svar1
19	2,9		73,9	ZM	4,1	0,7	76,1	ZM
20	3,9		72,8	ZM	5,1		72,1	ZM
21	4,9		71,3	ZM	6,1		73,5	ZM
22	5,9		66,5	ZM	7,1		68,7	ZM
23	6,9		66,6	ZM	8,1		65,6	ZM
24	7,9		67,9	ZM	9,1		69,7	ZM
25	8,9		72,7	ZM	10,1		75,8	ZM
26	9,9		80,4	ZM	11,1		82,3	ZM
27	10,9		84,9	ZM	12,1		86,8	ZM
28	11,9		87,1	ZM	13,1		90,1	ZM
29	12,9		90,4	ZM	14,1		92,5	ZM
30	13,9		95,3	ZM	15,1		95,1	ZM
31	14,9		97,6	ZM	16,1		96,8	ZM
32	15,9		101,0	ZM	17,1		103,0	ZM
33	16,9		101,0	ZM	18,1		108,0	ZM
34	17,9		106,0	ZM	19,1		107,0	ZM

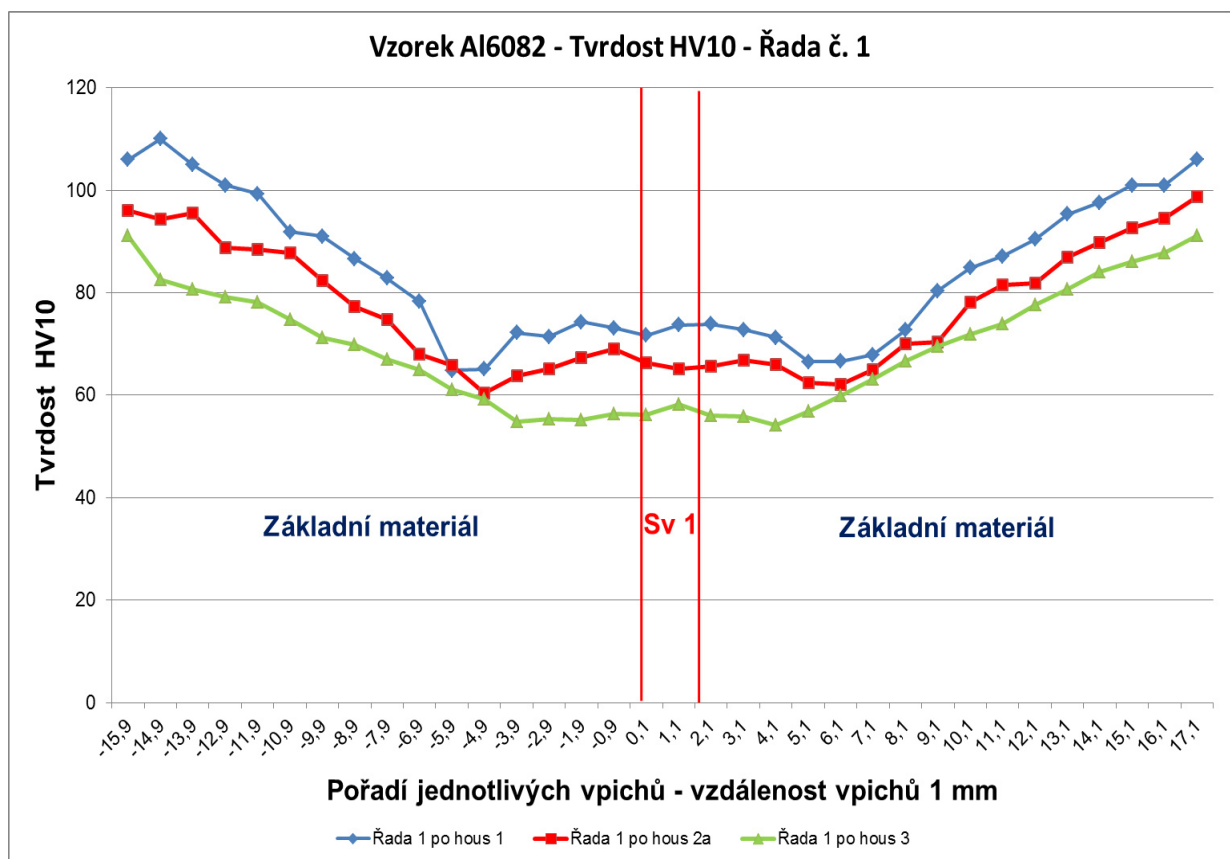
Tabulka 13: Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 1, Řada 3 a 4

Pořadí	Řada 3				Řada 4			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-13,4		109,0	ZM	-12,3		107,0	ZM
2	-12,4		104,0	ZM	-11,3		101,0	ZM
3	-11,4		103,0	ZM	-10,3		102,0	ZM
4	-10,4		104,0	ZM	-9,3		98,6	ZM
5	-9,4		99,7	ZM	-8,3		96,0	ZM
6	-8,4		99,0	ZM	-7,3		88,3	ZM
7	-7,4		93,2	ZM	-6,3		88,2	ZM
8	-6,4		89,7	ZM	-5,3		80,2	ZM
9	-5,4		83,2	ZM	-4,3		76,8	ZM
10	-4,4		73,7	ZM	-3,3		66,7	ZM
11	-3,4		66,2	ZM	-2,3		65,7	ZM
12	-2,4		72,6	ZN	-1,3		65,6	ZM
13	-1,4		71,3	ZM	-0,3	0,3	67,6	ZM
14	-0,4	0,4	74,2	ZM	0,7	0,7	69,2	Svar1
15	0,6	0,6	70,1	Svar1	1,7		67,2	Svar1
16	1,6		68,3	Svar1	2,7		68,5	Svar1
17	2,6		68,2	Svar1	3,7		71,3	Svar1
18	3,6		67,3	Svar1	4,7		69,0	Svar1
19	4,6	0,2	72,9	Svar1	5,7		67,0	Svar1
20	5,6	0,8	74,0	ZM	6,7	0,4	67,6	Svar1
21	6,6		74,9	ZM	7,7	0,6	69,8	ZM
22	7,6		74,4	ZM	8,7		67,2	ZM
23	8,6		71,2	ZM	9,7		70,4	ZM
24	9,6		65,2	ZM	10,7		66,0	ZM
25	10,6		72,2	ZM	11,7		65,7	ZM
26	11,6		80,0	ZM	12,7		70,9	ZM
27	12,6		84,7	ZM	13,7		77,6	ZM
28	13,6		90,2	ZM	14,7		83,2	ZM
29	14,6		93,6	ZM	15,7		89,5	ZM
30	15,6		95,0	ZM	16,7		90,3	ZM
31	16,6		96,1	ZM	17,7		93,8	ZM
32	17,6		100,0	ZM	18,7		98,2	ZM
33	18,6		100,0	ZM	19,7		96,0	ZM
34	19,6		107,0	ZM	20,7		101,0	ZM

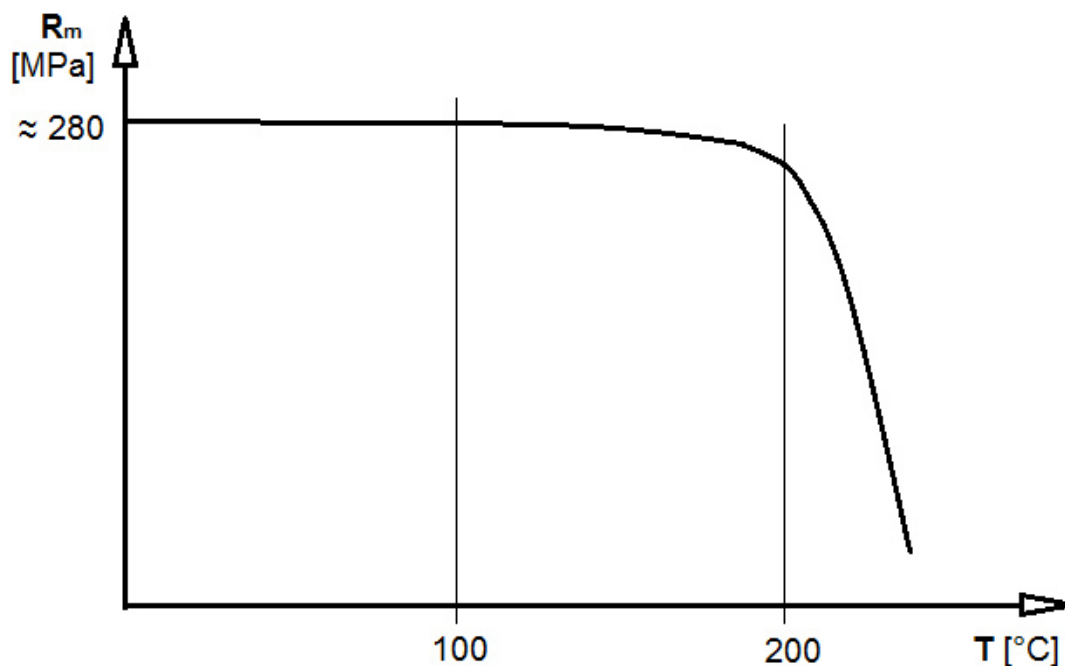
3.2.2 Průběh a vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti

Na obrázku 27 je grafické zobrazení průběhu tvrdosti HV 10 pro řady 1 od všech tří vzorků. Z průběhu tvrdosti pro řady 1 je zřejmé, že pro zvolený interval měření od -16 mm do + 16 mm se stále pohybujeme v tepelně ovlivněné oblasti, v níž došlo ke změnám mechanických vlastností. To je způsobeno vneseným teplem při svařování, kdy v přehřáté TOO (nejblíže ke svarovému kovu) došlo ke zhrubnutí precipitátů, následkem byl významný pokles mechanických vlastností (zřetelné z průběhu tvrdosti jako náhlý propad tvrdosti v TOO). Grafy zobrazující ostatní průběhy tvrdosti HV 10 pro řady 2 až řadu 7 jsou uvedeny v příloze 4.

Vliv teploty při svařování na mechanické vlastnosti je zobrazen na obrázku 28. Je zřejmé, že k významnému poklesu mechanických vlastností dochází už při teplotě ohřevu vytvrditelné slitiny nad 200 °C.



Obr. 27: Grafické zobrazení průběhu tvrdosti pro Řady 1



Obr. 28: Citlivost vytvrditelných slitin hliníku na ohřev [16]

3.2.3 Hodnoty tvrdosti HV 10 měřené přes celý testovaný vzorek odpovídající polohou Řadě 4

Protože vzorky použité pro metalografické vyhodnocení jednotlivých housenek svou velikostí nedokázaly definovat celou TOO, byly pro měření tvrdosti použity nové vzorky, vedoucí od počátku svařované desky až do svarového kovu. Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vpichy provedené přes celý testovaný vzorek, tedy přes neovlivněný základní materiál, tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov jsou uvedeny v příloze 5. Tyto vpichy byly provedeny ve vzdálenosti 7,5 mm od spodního okraje, přičemž první vpich v základním materiálu byl proveden ve vzdálenosti 3 mm od okraje materiálu a každý následný vpich měl osovou vzdálenost také 3 mm. Tato řada svou polohou korespondovala s Řadou 4 a v TOO na ní plynule navázala.

Na již zmiňovaném obrázku 24 je vidět umístění a odběr jednotlivých vzorků ze základního materiálu, na nichž byla měřena tvrdost. Vzorek na obrázku 24 označený číslem 2 je ovlivněn teplotním polem především od housenky číslo 1. Vzorek na obrázku 24 označený číslem 1 (červeně vyšrafován) je odebrán přibližně uprostřed svařence a je ovlivněn teplotním polem od housenek číslo 1 a 2. Vzorek na obrázku 24 označený číslem 9 je ovlivněn teplotním polem od všech tří housenek. Označení polohy v ose x je dáno vzdáleností od hranice ztavení. Celkově tak bylo pro každý ze tří odebraných vzorků hodnoceno 62 vpichů.

Získané hodnoty tvrdosti HV 10 měřené přes celý testovaný vzorek následně posloužily při porovnání vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti v závěru tohoto experimentu.

3.3 Vyhodnocení vlivu umělého stárnutí na změnu mechanických vlastností

3.3.1 Průběh tepelného zpracování slitiny hliníku AW 6082

Vzorky pro umělé a přirozené stárnutí byly použity z třívrstvého tupého svaru (kap. 3.1) provedeného po celé délce svařence. Cílem bylo zjistit jaký vliv má proces vytvrzování na změnu hodnoty tvrdosti a tím tedy i na samotné mechanické vlastnosti v základním materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a ve svaru.

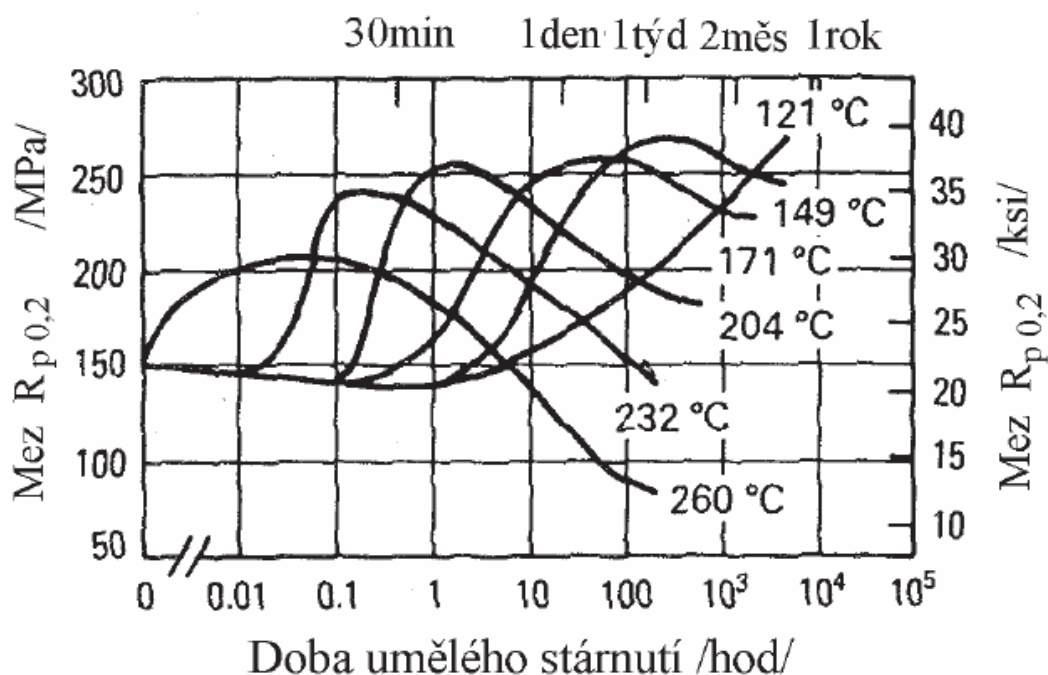
S ohledem na již známé poznatky v oblasti vytvrzování hliníkových slitin byl navržen postup tepelného zpracování této slitiny hliníku AW 6082. Samotný vytvrzovací proces se skládá z rozpouštěcího žíhání, rychlého ochlazení a následného vytvrzování (stárnutí) viz kap. 2.2.3. U této konkrétní testované slitiny AW 6082 bylo po svaření vzorků aplikováno rozpouštěcí žíhání při teplotě 530 °C. K posouzení vlivu délky rozpouštěcího žíhání na výsledné vlastnosti po vytvrzení byly výdrže na teplotě zvoleny 1 a 5 hodin. Výdrž na teplotě je nutná pro převedení jedné či více intermetalických fází do tuhého roztoku. Po rozpouštěcím žíhání následovalo rychlé ochlazení nadkritickou rychlostí do vody pro získání přesyceného tuhého roztoku α . Voda byla použita z důvodu, že tato slitina má vyšší přebytek křemíku. Po ochlazení byl ihned aplikován proces umělého stárnutí při zvolené teplotě 165 °C, a to z důvodu citlivosti slitiny na prodlevu mezi ochlazením a započítí umělého stárnutí. Hodnota této teploty byla zvolena s ohledem na získání optimálních mechanických vlastností. Při návrhu teploty umělého stárnutí se vycházelo z údajů pro slitinu hliníku AW 6061 uvedenou na obrázku 29. Pro slitinu AW 6082 se nepodařilo obdobný diagram získat.

K získání závislosti doby výdrže na změnu mechanických vlastností v TOO svaru, byla výdrž na teplotě zvolena po dobu 2, 4, 8 a 22 hodinách a to pro obě varianty rozpouštěcího žíhání. Ihned po vytvrzení byly vzorky srovnány na metalografické brusce (cca 10 minut) a na každém vzorku byly měřeny hodnoty tvrdosti HV 10.

Celkově tak byly realizovány následující experimenty uvedené v tabulce 14 níže.

Tabulka 14: Plán tepelného zpracování

Rozpouštěcí žihání 1 hodina při 530°C					Rozpouštěcí žihání 5 hodina při 530°C				
Doba umělého stárnutí při teplotě 165°C					Doba umělého stárnutí při teplotě 165°C				
0 h	2 h	4 h	8 h	22 h	0 h	2 h	4 h	8 h	22 h



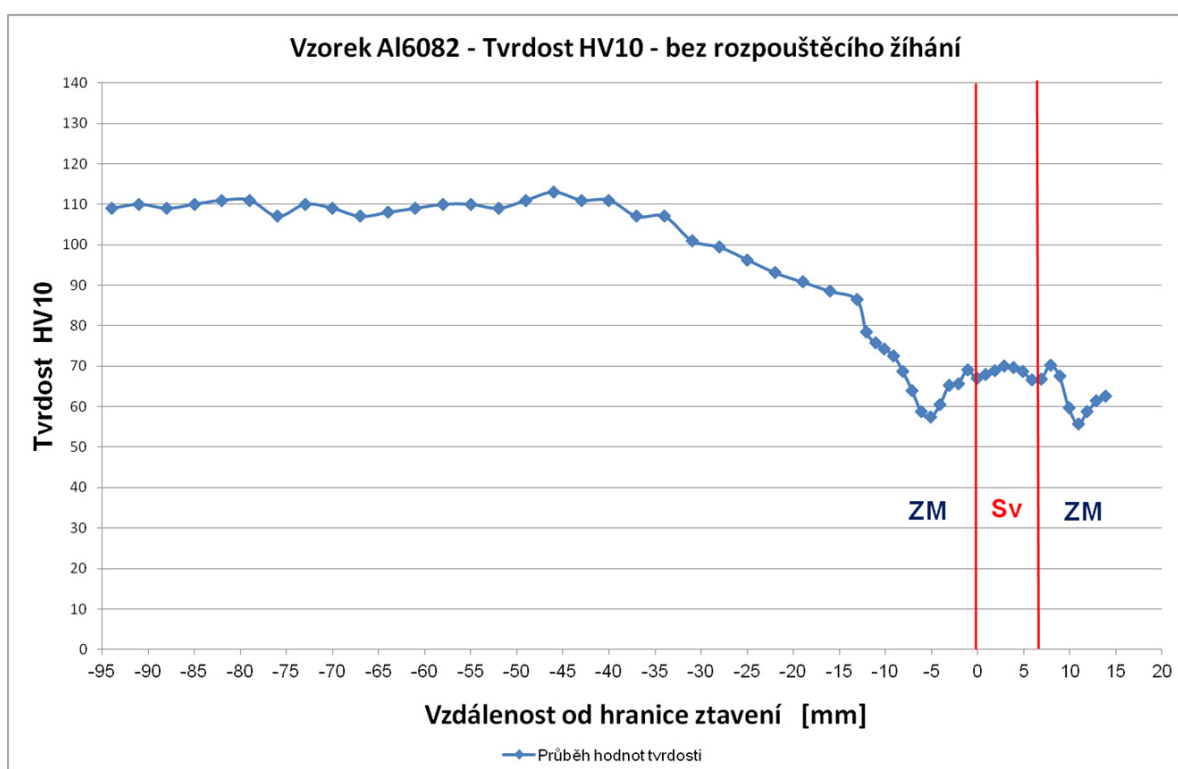
Obr. 29: Vliv doby umělého stárnutí na změnu meze kluzu $R_{p0.2}$ pro různé teploty umělého stárnutí pro hliníkovou slitinu AW 6061 [15]

3.3.2 Volba postupu měření tvrdosti HV 10 pro tepelně zpracované vzorky dané slitiny

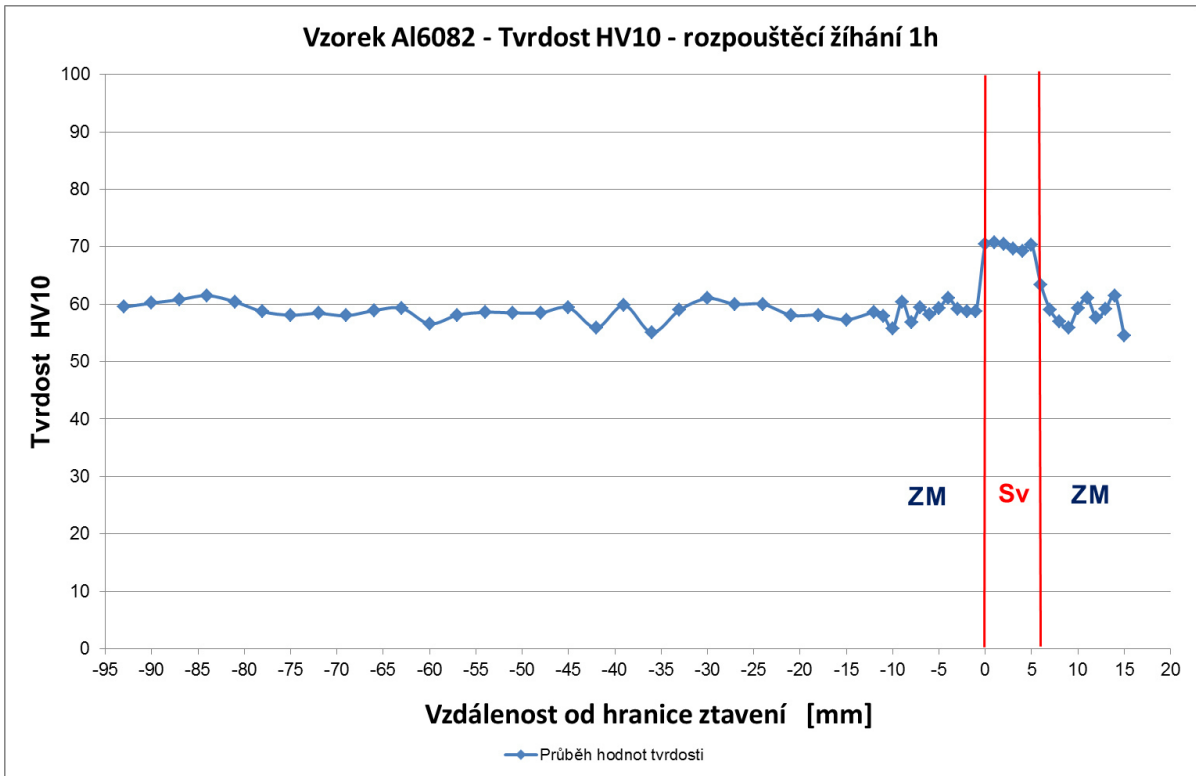
Na každém ze vzorků byla provedena řada vtisků tak, že první vtisk začínal v základním materiálu tloušťky 15 mm na okraji svařovaného plechu. Poloha vtisku byla vždy vzdálena 7,5 mm od spodního okraje vzorku, tedy ve středu testovaného vzorku a 3 mm od okraje tohoto plechu. V každé řadě pak bylo celkem 55 vtisků, přičemž vzdálenost mezi středy vtisků byla v základním materiálu 3 mm. V oblasti svaru a tepelně ovlivněné oblasti byla tato vzdálenost 1 mm z důvodu získání přesnějšího průběhu tvrdosti pro TOO a oblast svaru. Celkem bylo provedeno 28 vtisků po 3 mm a 37 vtisků po 1 mm. Hodnoty tvrdosti pro tepelně nezpracovaný svar jsou použity z experimentu z kapitoly 3.2 a jsou uvedeny v tabulce pod označením svar 11 v příloze 7.

Naměřené hodnoty tvrdosti pro jednotlivé doby stárnutí pro rozpouštěcí žihání 1 hodina a pro samotné rozpouštěcí žihání 1 hodina jsou uvedeny v tabulkách v příloze 6. Grafický průběh tvrdosti pro svar bez tepelného zpracování je na obrázku 30, na obrázku 31 je ukázána hodnota tvrdosti po aplikaci rozpouštěcího žihání s výdrží 1 hodina a v souhrnném grafu na obr. 32 jsou zobrazeny průběhy tvrdostí po aplikaci umělého stárnutí po 2, 4, 8 a 22 hodinách.

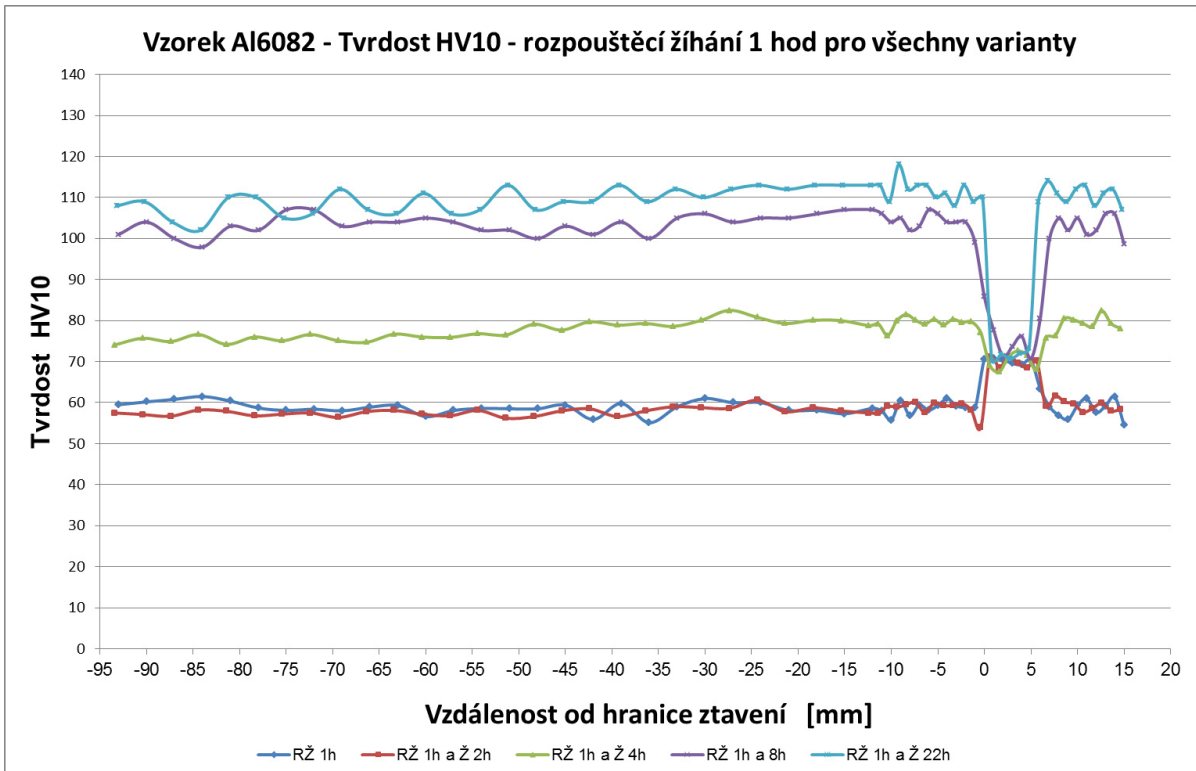
Grafy jednotlivých průběhů tvrdostí pro rozpouštěcí žihání 1 hodiny a jednotlivé varianty doby stárnutí jsou k nahlédnutí v příloze 6.



Obr. 30: Grafický průběh tvrdosti pro tepelně nezpracovaný (nevytvrzený) svar



Obr. 31: Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RZ 1 hodina

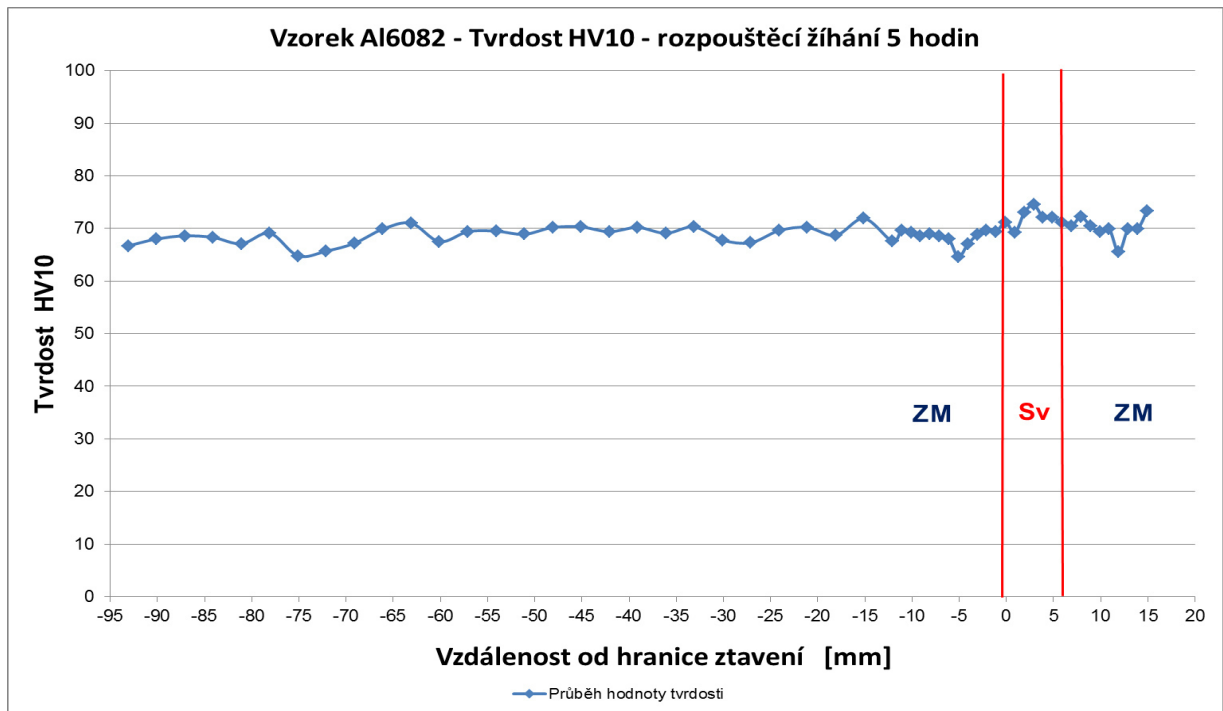


Obr. 32: Souhrnný graf průběhů tvrdostí pro rozpouštěcí žíhání 1 hodina a umělého stárnutí 2 až 22 hodin

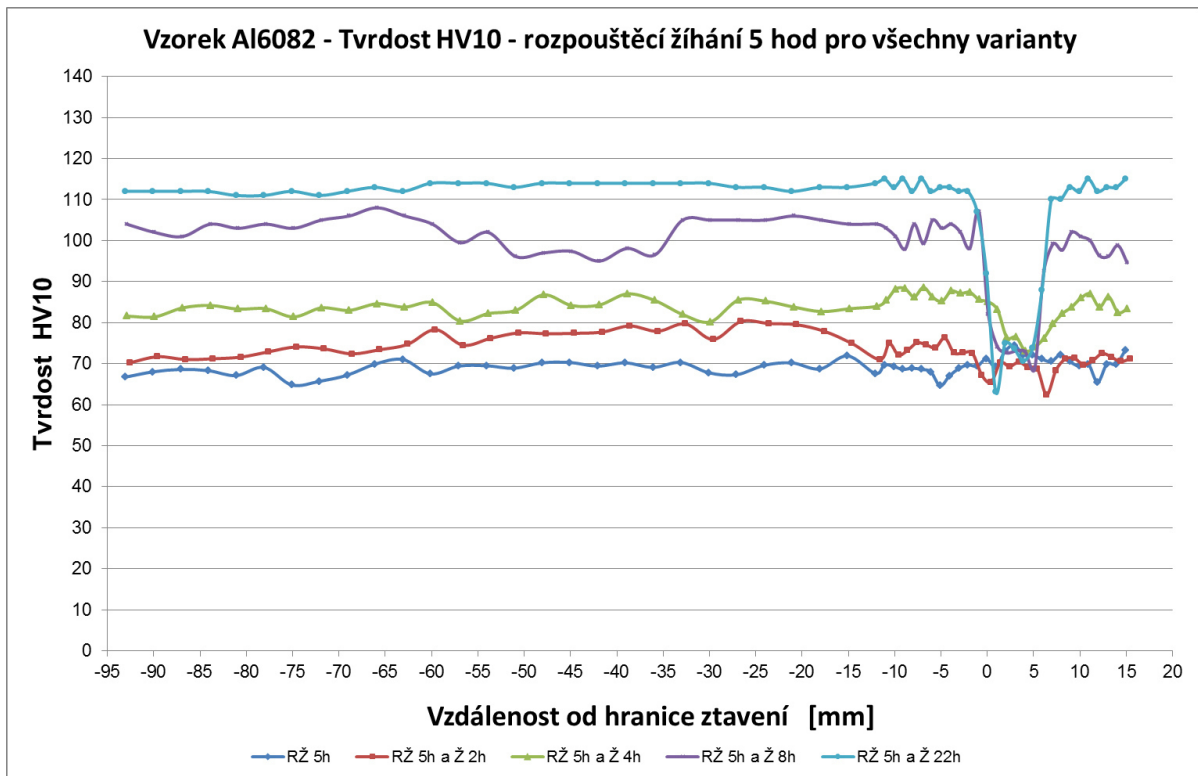
Naměřené hodnoty tvrdosti pro jednotlivé doby stárnutí pro rozpouštěcí žihání 5 hodin a pro samotné rozpouštěcí žihání 5 hodin jsou zobrazeny v příloze 7.

Na obrázku 33 je ukázán průběh tvrdosti po aplikaci rozpouštěcího žihání s výdrží 5 hodin. Grafické průběhy tvrdosti pro rozpouštěcí žihání 5 hodin a následném umělém stárnutí 2h, 4h, 8h, a 22h jsou zobrazeny v souhrnném grafu na obrázku 34.

Grafy průběhu tvrdosti pro jednotlivé varianty doby stárnutí jsou k nahlédnutí v příloze 7.

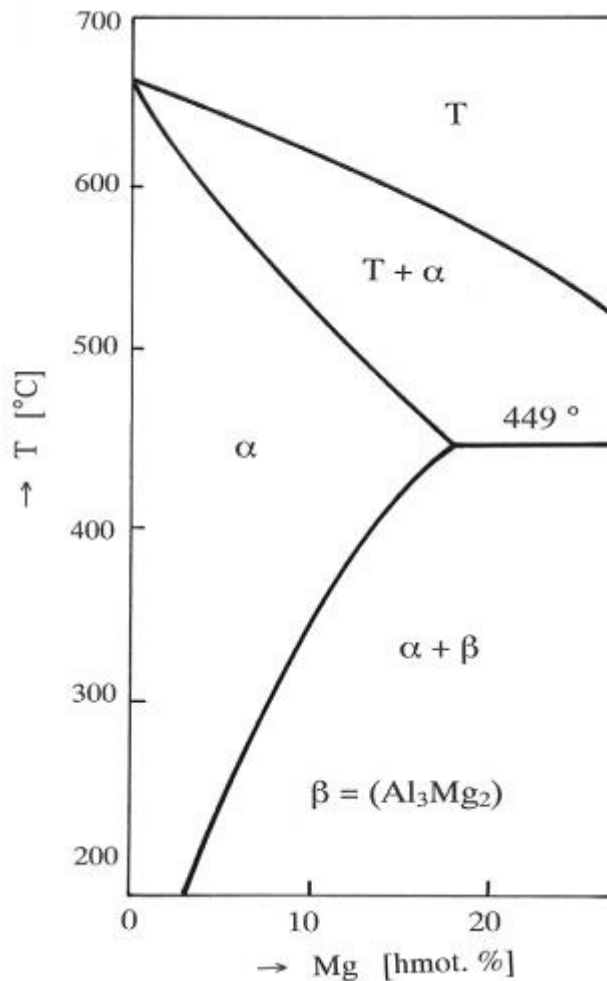


Obr. 33: Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RZ 5 hodin



Obr. 34: Souhrnný graf průběhů tvrdostí pro rozpouštěcí žíhání 5 hodin a umělého stárnutí 2 až 22 hodin

Porovnání všech variant pro oba druhy rozpouštěcího žíhání s různou dobou umělého stárnutí je zobrazeno v souhrnném grafu na obrázku 36. Z průběhu tvrdosti pro tepelně nezpracovaný svar (obr. 30) je zřejmé, že v TOO došlo k poklesu tvrdosti o polovinu, tedy až na hodnotu 55 HV. Porovnáním výsledků průběhů tvrdosti po rozpouštěcím žíhání 1 a 5 hodin je zřejmý obdobný pokles tvrdostí. Pro rozpouštěcí žíhání v délce 1 hodiny došlo k poklesu tvrdosti o 50 HV pro rozpouštěcí žíhání v délce 5 hodin o 40 HV. To je způsobeno samotným procesem rozpouštěcího žíhání, kdy dochází k převedení intermetalické fáze Mg_2Si do tuhého roztoku a tím k poklesu mechanických vlastností v základním materiálu. Další skutečností je, že hodnota tvrdosti ve svaru se v zásadě nezměnila oproti tepelně nezpracovanému vzorku a to ani po žádné z variant rozpouštěcího žíhání. Tento jev je způsoben použitím přídavného materiálu (drátu) AW 5365. Tato slitina hliníku je totiž nevytvrditelná a tudíž nelze měnit její mechanické vlastnosti. Důvodem je, že v této slitině nedochází k tvorbě intermetalických fází (viz obr. 35), navíc tuhý roztok α se rozpadá už v průběhu ochlazování z rozpouštěcího žíhání.



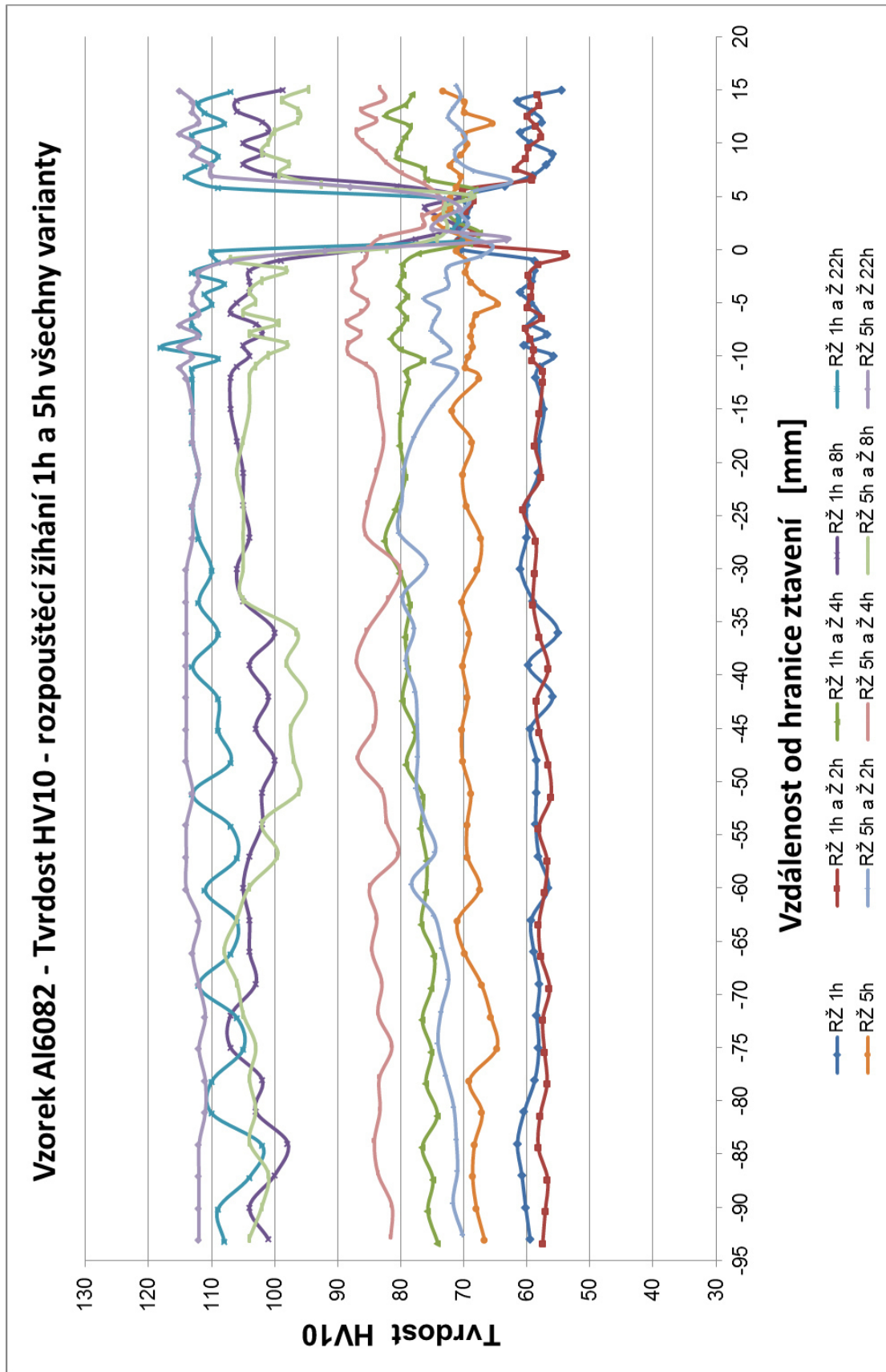
Obr. 35: Binární diagram slitin hliníku typu Al - Mg použité jako přídavný materiál [15]

Porovnáme-li průběhy tvrdostí pro různé doby umělého stárnutí pro obě varianty rozpouštěcího žihání, dojdeme ke zjištění, že na zvýšení tvrdosti a tím i zlepšení mechanických vlastností v základním materiálu a TOO je výhodnější rozpouštěcí žihání trvající 1 hodinu, což koresponduje s již známými poznatky o volbě parametrů vytvrzování pro tyto slitiny Al-Mg-Si. Rozpouštěcí žihání trvající déle než 1 hodinu (v našem případě 5 hodin), nemá tak zásadní vliv na zvýšení tvrdosti po umělém vytvrzování oproti variantě rozpouštěcího žihání 1 hodiny. Výsledné hodnoty tvrdosti pro obě varianty rozpouštěcího žihání jsou v zásadě stejné.

Zaměříme-li se na vliv doby výdrže na teplotě umělého stárnutí, vidíme, že tvrdost roste s rostoucí dobou výdrže na této teplotě. Tento jev je způsoben postupným rozpadem tuhého roztoku, jež začíná nukleací a vznikem koherentních precipitátů nazývaných GP zóny způsobující pnutí v mřížce, to je překážkou pro volný pohyb dislokací, dochází k samotnému vytvrzování. Největší nárůst hodnot tvrdosti pro základní materiál a TOO nastává pro obě

varianty rozpouštěcího žíhání při umělém stárnutí po dobu 8 hodin. Toto zjištění koresponduje s grafem na obrázku 29, kde je zobrazen vliv doby vytvrzování na mez kluzu pro různé teploty umělého stárnutí pro slitinu AW 6061, neboť tvrdost je jedna z možností jak vyjádřit mechanické vlastnosti dané slitiny a je svázána se změnou, ať už meze kluzu daného materiálu, nebo jeho meze pevnosti.

Ze souhrnného grafu na obrázku 36 je také zřejmé, že proces vytvrzování nemá vliv na znatelný nárůst tvrdosti pro samotný svar, neboť jak už bylo řečeno, slitina použitá jako přídavný materiál je nevytvrditelná, proto můžeme docílit vhodným procesem vytvrzování požadované mechanické vlastnosti pouze v základním materiálu a v tepelně ovlivněné oblasti nikoli ve svaru. Podíváme-li se na průběh tvrdosti pro tepelně nezpracovaný vzorek, můžeme pozorovat velký pokles tvrdosti v TOO a svaru a tedy i pokles mechanických vlastností. Tyto mechanické vlastnosti a tedy i tvrdost nelze bez aplikace následného tepelného zpracování obnovit na původní hodnoty.



Obr. 36: Souhrnný graf průběhů tvrdostí pro rozpouštěcí žíhání 1 a 5 hodin a umělého stárnutí 2 až 22 hodin

4. Závěr

Lze s určitostí říci, že na kvalitu a vlastnosti svarového spoje má vliv mnoho vstupních proměnných. Patří sem zejména typ svařovaného materiálu, použitá metoda svařování a zvolené procesní parametry, druh přídavného materiálu, případně ochranného plynu, ale také konstrukční uspořádání svarového spoje a geometrie svarových ploch. Všechny tyto veličiny ovlivňují jakost a výsledné mechanické vlastnosti svarového spoje. Cílem této práce bylo zjistit a posoudit vliv vícenásobného teplotního cyklu na změnu mechanických vlastností ve svaru a v tepelně ovlivněné oblasti u vytvrditelných slitin hliníku typu AW 6082. Dále posoudit možnosti obnovení těchto vlastností pomocí tepelného zpracování sestávajícího se z rozpouštěcího žíhání a následného umělého stárnutí.

Práce je rozdělena do dvou částí na teoretickou a experimentální. V teoretické části jsou popsány základní metody využívané při svařování hliníkových slitin. Dále je zde popsáno základní rozdělení hliníkových slitin s ohledem na jejich svařitelnost a také způsob tepelného zpracování vytvrditelných slitin hliníku. Kromě toho jsou v teoretické části popsány nejdůležitější technické informace o slitině hliníku AW 6082, která byla využita pro experimentální část práce.

Experimentální část pak lze rozdělit na tři na sebe navazující části. První část se týkala návrhu experimentálního měření včetně svarové geometrie pro vícevrstvé poloautomatické svařování metodou MIG. Po nalezení vhodných procesních parametrů byl na vzorku ze slitiny AW 6082 realizován kompletně monitorovaný třívrstvý svar délky 350 mm. Kromě základních svařovacích parametrů byly ještě měřeny průběhy teplot v TOO svarů a deformace vzorku v průběhu svařování. Při měření průběhu teplot se prokázal vliv značné tepelné vodivosti hliníku, díky níž byly jednotlivými termočlánky umístěnými v různých hloubkách (2,5 až 11 mm) a vzdálenostech od osy svaru (5 až 11 mm) a počátku svařování (150 až 260 mm) dosaženy velice obdobné hodnoty maximálních teplot.

Úkolem druhé části experimentálního měření bylo zjištění vlivu jednotlivých svařovacích cyklů na změnu mechanických vlastností především v tepelně ovlivněné oblasti. To bylo realizováno měřením tvrdosti podle Vickerse, v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-1. Aplikací svařovacího cyklu došlo v TOO k poklesu hodnot tvrdosti po první housence o 38%, lokálně až o 42% oproti základnímu materiálu. Po druhé svarové housence došlo ve stejném místě TOO k poklesu hodnot tvrdosti o cca 45% oproti základnímu materiálu, ale již v oblasti šířky několika milimetrů. Třetí svarová housenka pak způsobila pokles hodnot tvrdosti v TOO na polovinu z původní hodnoty 110 HV.

Třetí oblast experimentální části pak byla zaměřena na popis změny mechanických vlastností na svařených vzorcích po aplikaci rozpouštěcího žíhání a následného umělého stárnutí. Aplikací rozpouštěcího žíhání při teplotě 530 °C došlo ve svařovaných vzorcích k vyrovnání hodnot tvrdosti v základním materiálu a v TOO. Po jedné hodině výdrže na této teplotě se tvrdost ustálila na hodnotě 60 HV a po pěti hodinách výdrže na teplotě 530 °C se tvrdost ustálila na hodnotě 68 HV. Pouze ve svarovém kovu tvořeném promíšením základního materiálu AW 6082 s přídatným materiálem AW 5087 (AlMg5) nedošlo k téměř žádným změnám a hodnota tvrdosti oscilovala okolo 72 HV.

Při umělém stárnutí na teplotě 165 °C se výrazně projevil vliv doby výdrže na změně hodnot tvrdosti. Po výdrži 2 hodiny na teplotě stárnutí ještě nebyly pozorovány téměř žádné změny tvrdosti oproti stavu po rozpouštěcím žíhání. Po čtyřech hodinách ale došlo ke zvýšení hodnot tvrdosti na 78, respektive 82 HV po obou typech rozpouštěcího žíhání a po 8 hodinách výdrže došlo téměř k úplné obnově hodnot tvrdosti a tedy i mechanických vlastností v základním materiálu a v TOO. Hodnota tvrdosti se pro oba způsoby rozpouštěcího žíhání pohybovala okolo 103 HV. Výdrží na teplotě po dobu 22 hodin již nedošlo k téměř žádným změnám. Hodnoty tvrdosti se po této výdrži ustálily na hodnotě 108 HV. Umělé stárnutí však nemělo žádný vliv na změnu hodnot tvrdosti ve svarovém kovu. Důvodem je použitý typ přídatného materiálu AlMg5.

Na základě zjištěných výsledků lze doporučit po vícenásobném svařování vytvrditelné slitiny hliníku AW 6082 s přídatným materiálem typu AlMg5 aplikovat rozpouštěcí žíhání při teplotě 530 °C po dobu jedné hodiny, s následným umělým stárnutím při teplotě 165 °C po dobu 4 až 8 hodin. Tímto způsobem jsou neefektivněji a v dostatečné míře obnoveny mechanické vlastnosti svarových spojů. Delší doba výdrže při rozpouštěcím žíhání neměla téměř žádný vliv na změnu hodnot tvrdosti, jakož i časy výdrže při umělém stárnutí překračující hodnotu 8 hodin. Větších pevnostních hodnot svarového spoje by bylo možné dosáhnout použitím přídatných materiálů stejného složení jako je materiál základní, ovšem s rizikem vzniku trhlin za horka ve svarovém kovu. O tom, že tato varianta není využívána, svědčí také fakt, že uvedený přídatný materiál nebylo možné v ČR sehnat a při odběru ze zahraničí by muselo být odebráno paletové množství.

Tato diplomová práce byla vypracována na Katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci s podporou studentského grantového projektu SGS, poskytnutého Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v roce 2016.

5. Použitá literatura

- [1] RIEDL, L. Vliv různých typů ochranných plynů na tvar svarové lázně při svařování metodou MIG. [Bakalářská práce]. Liberec: Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní, 2012.
- [2] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: ZEROSS 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [3] J. TMEJ, HEINZ NEUMANN, S. JENŠÍ.: *Teorie svařování*. Liberec: TUL, 1990
- [4] KOUTNÝ, J. Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování. [cit. 2015-09-11]. Dostupný z WWW: <[http:// www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf](http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf)>
- [5] Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu WIG (TIG) - 141. [cit. 2015-09-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/09-141.pdf> >
- [6] TKANÝ, J. Svařování rozměrných hliníkových svařenců. [Bakalářská práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [7] Svařování svazkem elektronů. [cit. 2015-09-12]. Dostupný z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování_svazkem_elektronů>
- [8] SCHWARZ, D. Plazmové, elektronové a laserové svařování. *Svět Svaru* [online]. 2010 [cit. 2015-09-14]. Dostupný z WWW: <[http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2010-1 %20Plazma-laser-elektronové.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2010-1-%20Plazma-laser-elektronové.pdf)>
- [9] Laserové svařování. [cit. 2015-09-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.technomat.cz/ksp-sm-sms/>>
- [10] ROUBÍČEK, M. Laserové svařování – ekonomika a kvalita. *Konstrukce*. [online] 2006, č. 2. Aktualizováno 2008-12-26. [cit. 2015-09-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita>>
- [11] MORAVEC, J.: *Teorie svařování a pájení II – Speciální metody svařování*. Liberec: TUL, 2009. ISBN 978-80-7372-439-9
- [12] Technické údaje o hliníku. [cit. 2015-09-17]. Dostupný z WWW: <http://www.alucad.cz/public/var/files/file_109.pdf>
- [13] [cit. 2015-09-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.hilda-europe.eu/FSWProcess/tabid/3196/Default.aspx>>

- [14] SLAVÍČEK, J. Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu. [Bakalářská práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [15] MICHNA a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: ADIN, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [16] KOLÁŘ, V. Svařitelnost hliníkových slitin. [cit. 2015-10-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=502>>
- [17] HÁJEK, J. Hliník a možnosti jeho svařování. *Konstrukce*. [online] 2006, Aktualizováno 2008-12-26. [cit. 2015-11-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/ochranne-plyny-s-obsahem-dusiku-pro-svarovani-hliniku-metodou-tig-a-mig/>>
- [18] ČSN EN 515. Hliník a slitiny hliníku - Výrobky tvářené - Označování stavů. Praha: Český normalizační institut, 1996.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Doporučené optimální varianty a parametry pro svařování hliníku a jeho slitin technologií MIG. [2]	14
Tabulka 2: Základní parametry pro svařování hliníku a jeho slitin technologií WIG. [2].....	16
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 6082 T651 podle EN 485-2 [12]	23
Tabulka 4: Chemické složení slitiny AW 6082 (hm. %) [12].....	24
Tabulka 5: Typické chemické složení drátu v %	29
Tabulka 6: Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty dané výrobcem	29
Tabulka 7: Rozměry od počátku a osy svaru	30
Tabulka 8: Geometrické souřadnice umístění LVDT čidel	31
Tabulka 9: Nastavované a skutečné monitorované svařovací parametry pro housenku číslo 1	33
Tabulka 10: Nastavované a skutečné monitorované svařovací parametry pro housenku číslo 2	34
Tabulka 11: Nastavované a skutečné monitorované svařovací parametry pro housenku číslo 3	35
Tabulka 12: Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 1, Řada 1 a 2	40
Tabulka 13: Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 1, Řada 3 a 4	41
Tabulka 14: Plán tepelného zpracování	45

Seznam obrázků

Obr. 1: Úprava svarových ploch před svařováním metodou MIG. [4]	13
Obr. 2: Svařování metodou MIG [1]	14
Obr. 3: Princip svařování metodou WIG [5]	15
Obr. 4: Způsoby zapojení elektrod při WIG svařování: a) DC nepřímá polarita, b) DC přímá polarita, c) AC [6]	15
Obr. 5: Úprava svarových ploch před svařováním metodou WIG. [4]	16
Obr. 6: Zařízení pro svařování elektronovým paprskem [8]	17
Obr. 7: Princip laserového svařování [10]	18
Obr. 8: Proces svařování metodou FSW [13]	20
Obr. 9: Rozdělení slitin hliníku [14]	21
Obr. 10: Schematické znázornění celkového tepelného zpracování [12]	22
Obr. 11: Úprava svarových ploch frézováním	26
Obr. 12: Nastavení hubice hořáku	27
Obr. 13: Ukázka svařovacího pracoviště včetně lineárního automatu a speciálního přípravku pro měření deformací a posuvů v průběhu svařování a chladnutí	27
Obr. 14: Vliv obsahu legujících prvků Si a Mg na sklon k tvoření trhlin za tepla ve svarových spojích [15]	29
Obr. 15: Schématické naznačení míst upnutí svařence s přípravkem	30
Obr. 16: Umístění termočlánků na svařenci	31
Obr. 17: Schematické znázornění umístění polohových čidel	32
Obr. 18: Vzdálenost kontaktní špičky	33
Obr. 19: Grafické zobrazení signálu z UI laboratoře programem Weld Monitor pro housenku číslo 1	33
Obr. 20: Makrovýbrus kořenové housenky včetně rozměrů	34
Obr. 21: Makrovýbrus výplňové housenky včetně rozměrů. Červená barva značí plochu housenky číslo 2 a zelená barva značí housenku číslo 1	35
Obr. 22: Makrovýbrus krycí housenky včetně rozměrů. Červená barva značí plochu housenky číslo 3, modrou barvou je označena housenka číslo 2 a zelená barva značí housenku číslo 1	36
Obr. 23: Průběh naměřených deformací (posuvů) v závislosti na čase v definovaných místech pro všechny tři housenky	37
Obr. 24: Místo odběru vzorků pro měření tvrdosti HV 10 v základním materiálu	38
Obr. 25: Zobrazení postupu měření tvrdosti demonstrovaného pro vzorek č. 3	39

Obr. 26: Návaznost měření tvrdosti v základním materiálu na řadu 4.....	39
Obr. 27: Grafické zobrazení průběhu tvrdosti pro Řady 1	42
Obr. 28: Citlivost vytvrzitelných slitin hliníku na ohřev [16].....	43
Obr. 29: Vliv doby umělého stárnutí na změnu meze kluzu $R_{p0,2}$ pro různé teploty umělého stárnutí pro hliníkovou slitinu AW 6061 [15].....	45
Obr. 30: Grafický průběh tvrdosti pro tepelně nezpracovaný (nevytvrzený) svar	46
Obr. 31: Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RZ 1 hodina	47
Obr. 32: Souhrnný graf průběhů tvrdostí pro rozpouštěcí žíhání 1 hodina a umělého stárnutí 2 až 22 hodin	47
Obr. 33: Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RZ 5 hodin.....	48
Obr. 34: Souhrnný graf průběhů tvrdostí pro rozpouštěcí žíhání 5 hodin a umělého stárnutí 2 až 22 hodin	49
Obr. 35: Binární diagram slitiny hliníku typu Al - Mg použité jako přídavný materiál [15] ..	50
Obr. 36: Souhrnný graf průběhů tvrdostí pro rozpouštěcí žíhání 1 a 5 hodin a umělého stárnutí 2 až 22 hodin	52

Seznam příloh

Příloha 1: Průběh proudu a napětí při svařování pro housenku číslo 2 a číslo 3

Příloha 2: Průběh naměřených deformací v materiálu po svaření jednotlivých housenek

Příloha 3: Tabulky naměřených hodnot tvrdosti HV 10 pro tepelně nezpracované svary číslo 2 a číslo 3

Příloha 4: Průběh naměřených hodnot tvrdosti v TOO

Příloha 5: Hodnoty tvrdosti HV 10 měřené přes celý testovaný vzorek odpovídající polohou Řadě 4

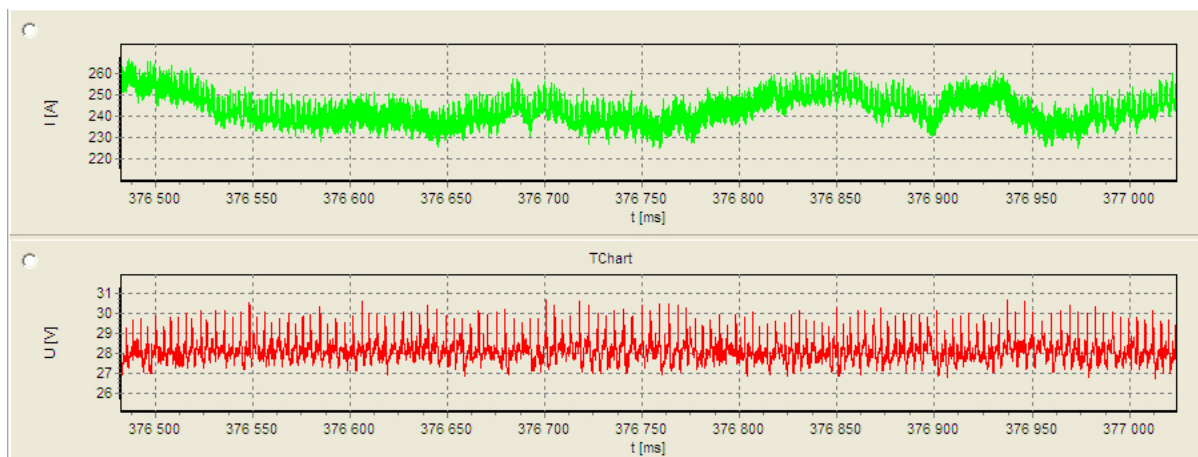
Příloha 6: Tabulky a grafy naměřených hodnot tvrdosti HV 10 jednotlivých svarů po rozpouštěcím žíháním 1 hodina a stárnutí 2h, 4h, 8h a 22h

Příloha 7: Tabulky a grafy naměřených hodnot tvrdosti HV 10 jednotlivých svarů po rozpouštěcím žíháním 5 hodin a stárnutí 2h, 4h, 8h a 22h

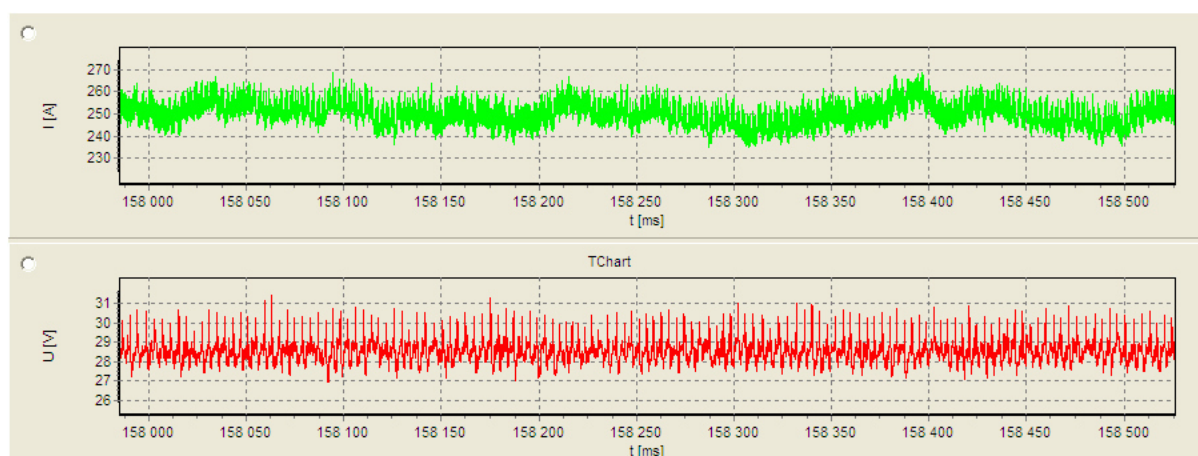
Přílohy

Průběh proudu a napětí při svařování pro housenku č. 2 a č. 3

Grafické zobrazení signálu z UI laboratoře programem Weld Monitor pro housenku číslo 2

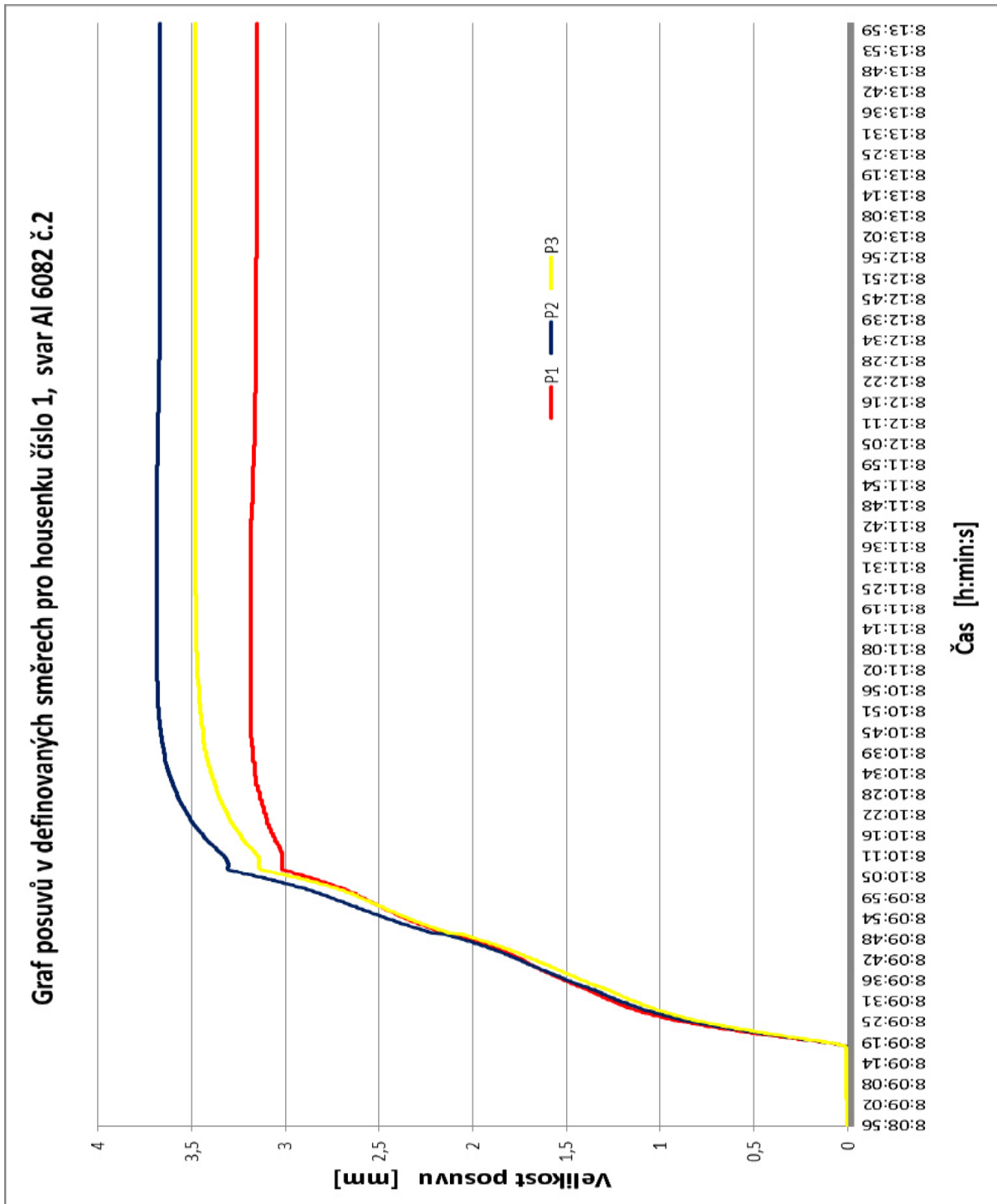


Grafické zobrazení signálu z UI laboratoře programem Weld Monitor pro housenku číslo 3

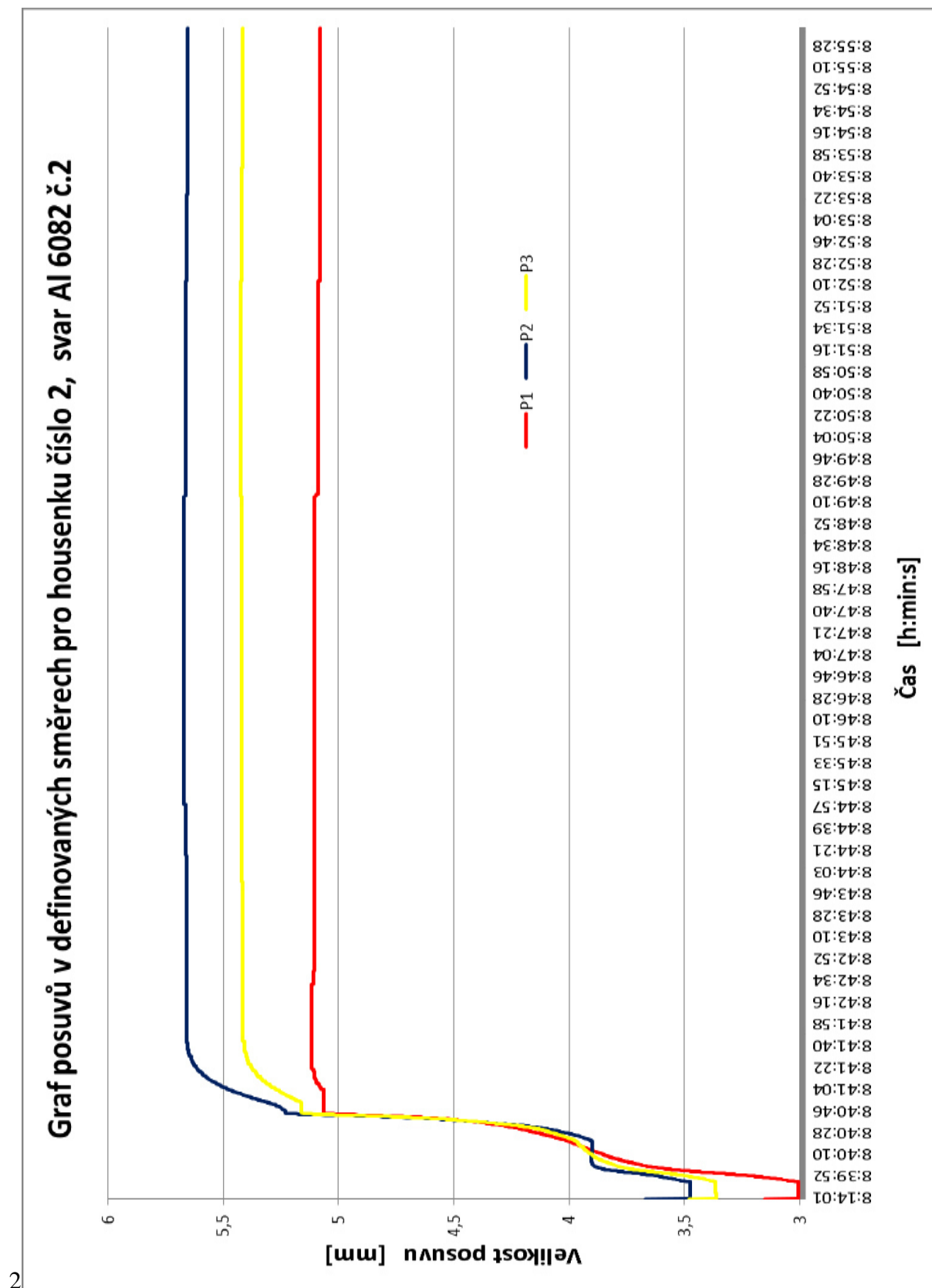


Průběh naměřených deformací v materiálu po svaření jednotlivých housenek

Grafický průběh deformací pro housenku číslo 1

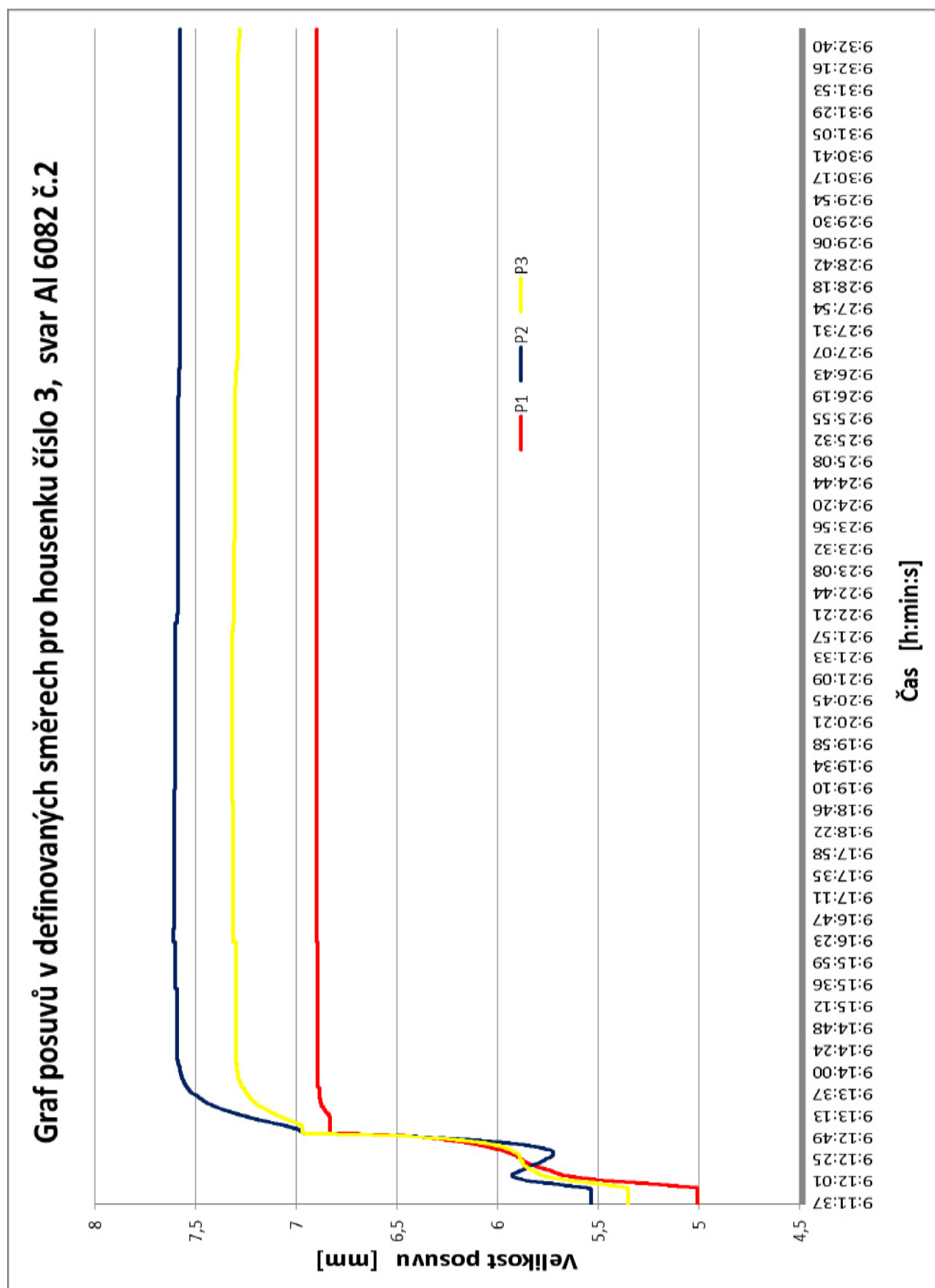


Grafický průběh deformací pro housenku číslo



2

Grafický průběh deformací pro housenku číslo 3



Tabulky naměřených hodnot tvrdosti HV 10 pro tepelně nezpracované svary číslo 2 a číslo 3

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 2, Řada 1 a 2

Pořadí	Řada 1				Řada 2			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-15,9		96,0	ZM	-14,5		100,0	ZM
2	-14,9		94,3	ZM	-13,5		96,2	ZM
3	-13,9		95,5	ZM	-12,5		93,9	ZM
4	-12,9		88,8	ZM	-11,5		90,9	ZM
5	-11,9		88,4	ZM	-10,5		87,7	ZM
6	-10,9		87,8	ZM	-9,5		85,2	ZM
7	-9,9		82,4	ZM	-8,5		83,4	ZM
8	-8,9		77,3	ZM	-7,5		79,4	ZM
9	-7,9		74,7	ZM	-6,5		74,8	ZM
10	-6,9		68,0	ZM	-5,5		70,6	ZM
11	-5,9		65,8	ZM	-4,5		64,8	ZM
12	-4,9		60,4	ZM	-3,5		63,5	ZM
13	-3,9		63,8	ZM	-2,5		68,3	ZM
14	-2,9		65,2	ZM	-1,5		69,2	ZM
15	-1,9		67,4	ZM	-0,5	0,5	75,0	ZM
16	-0,9	0,9	69,0	ZM	0,5	0,5	73,1	Svar1
17	0,1	0,1	66,3	Svar1	1,5		70,9	Svar1
18	1,1	0,4	65,1	Svar1	2,5		71,2	Svar1
19	2,1	0,6	65,7	ZM	3,5	0	70,9	Svar1
20	3,1		66,8	ZM	4,5	1	70,4	ZM
21	4,1		65,9	ZM	5,5		69,5	ZM
22	5,1		62,5	ZM	6,5		66,6	ZM
23	6,1		62,1	ZM	7,5		62,0	ZM
24	7,1		64,9	ZM	8,5		61,7	ZM
25	8,1		70,1	ZM	9,5		68,0	ZM
26	9,1		70,3	ZM	10,5		71,6	ZM
27	10,1		78,1	ZM	11,5		76,3	ZM
28	11,1		81,6	ZM	12,5		81,3	ZM
29	12,1		81,9	ZM	13,5		85,3	ZM
30	13,1		86,9	ZM	14,5		86,3	ZM
31	14,1		89,8	ZM	15,5		93,0	ZM
32	15,1		92,6	ZM	16,5		95,3	ZM
33	16,1		94,5	ZM	17,5		97,8	ZM
34	17,1		98,7	ZM	18,5		98,5	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 2, Řada 3 a 4

Pořadí	Řada 3				Řada 4			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-14		96,2	ZM	-13,2		93,1	ZM
2	-13		98,7	ZM	-12,2		90,9	ZM
3	-12		92,7	ZM	-11,2		87,6	ZM
4	-11		91,3	ZM	-10,2		82,8	ZM
5	-10		89,3	ZM	-9,2		80,5	ZM
6	-9		84,8	ZM	-8,2		76,3	ZM
7	-8		80,0	ZM	-7,2		72,9	ZM
8	-7		74,5	ZM	-6,2		67,0	ZM
9	-6		69,6	ZM	-5,2		64,6	ZM
10	-5		64,6	ZM	-4,2		65,8	ZM
11	-4		66,7	ZM	-3,2		69,7	ZM
12	-3		67,9	ZM	-2,2		71,7	ZM
13	-2		74,1	ZM	-1,2		71,6	ZM
14	-1		72,5	ZM	-0,2	0,2	72,2	ZM
15	0	0	73,9	ZM	0,8	0,8	71,7	Svar1/2
16	1	1	71,8	Svar1	1,8		74,7	Svar1/2
17	2		68,3	Svar1	2,8		73,2	Svar1/2
18	3		70,4	Svar1	3,8		73,5	Svar1/2
19	4	0,9	69,7	Svar1	4,8		75,4	Svar1/2
20	5	0,1	72,1	ZM	5,8	0,9	72,1	Svar1/2
21	6		73,5	ZM	6,8	0,1	71,8	ZM
22	7		71,6	ZM	7,8		72,4	ZM
23	8		67,1	ZM	8,8		72,1	ZM
24	9		63,7	ZM	9,8		67,4	ZM
25	10		63,4	ZM	10,8		65,8	ZM
26	11		67,7	ZM	11,8		65,3	ZM
27	12		73,2	ZM	12,8		64,5	ZM
28	13		78,9	ZM	13,8		70,8	ZM
29	14		81,0	ZM	14,8		76,2	ZM
30	15		87,0	ZM	15,8		80,0	ZM
31	16		89,1	ZM	16,8		84,3	ZM
32	17		91,6	ZM	17,8		84,9	ZM
33	18		95,7	ZM	18,8		89,6	ZM
34	19		99,6	ZM	19,8		94,1	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 2, Řada 5 a 6

Pořadí	Řada 5				Řada 6			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-12,1		96,4	ZM	-10,9		99,0	ZM
2	-11,1		96,1	ZM	-9,9		95,9	ZM
3	-10,1		95,2	ZM	-8,9		90,1	ZM
4	-9,1		91,6	ZM	-7,9		86,6	ZM
5	-8,1		82,1	ZM	-6,9		83,9	ZM
6	-7,1		79,9	ZM	-5,9		80,5	ZM
7	-6,1		74,9	ZM	-4,9		72,0	ZM
8	-5,1		68,3	ZM	-3,9		68,7	ZM
9	-4,1		69,3	ZM	-2,9		72,2	ZM
10	-3,1		74,0	ZM	-1,9		73,4	ZM
11	-2,1		73,9	ZM	-0,9	0,9	77,3	ZM
12	-1,1		76,9	ZM	0,1	0,1	68,6	Svar2
13	-0,1	0,1	69,4	ZM	1,1		69,3	Svar2
14	0,9	0,9	69,7	Svar2	2,1		71,1	Svar2
15	1,9		70,9	Svar2	3,1		73,4	Svar2
16	2,9		72,9	Svar2	4,1		72,7	Svar2
17	3,9		76,1	Svar2	5,1		72,9	Svar2
18	4,9		76,9	Svar2	6,1		73,6	Svar2
19	5,9		76,8	Svar2	7,1		74,5	Svar2
20	6,9		71,7	Svar2	8,1		71,5	Svar2
21	7,9	0,9	72,2	Svar2	9,1		75,6	Svar2
22	8,9	0,1	74,4	ZM	10,1		72,0	Svar2
23	9,9		75,4	ZM	11,1	0,2	74,8	Svar2
24	10,9		72,9	ZM	12,1	0,8	76,3	ZM
25	11,9		73,3	ZM	13,1		77,8	ZM
26	12,9		71,7	ZM	14,1		74,4	ZM
27	13,9		68,9	ZM	15,1		70,9	ZM
28	14,9		70,8	ZM	16,1		68,5	ZM
29	15,9		76,4	ZM	17,1		74,6	ZM
30	16,9		79,2	ZM	18,1		78,2	ZM
31	17,9		85,8	ZM	19,1		86,7	ZM
32	18,9		91,9	ZM	20,1		87,8	ZM
33	19,9		93,6	ZM	21,1		94,8	ZM
34	20,9		96,1	ZM	22,1		98,0	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 3, Řada 1 a 2

Pořadí	Řada 1				Řada 2			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-15,2		91,2	ZM	-14,2		87,2	ZM
2	-14,2		82,6	ZM	-13,2		87,3	ZM
3	-13,2		80,7	ZM	-12,2		80,4	ZM
4	-12,2		79,1	ZM	-11,2		78,2	ZM
5	-11,2		78,1	ZM	-10,2		78,6	ZM
6	-10,2		74,8	ZM	-9,2		75,2	ZM
7	-9,2		71,2	ZM	-8,2		72,1	ZM
8	-8,2		69,9	ZM	-7,2		69,2	ZM
9	-7,2		67,0	ZM	-6,2		67,1	ZM
10	-6,2		65,0	ZM	-5,2		63,2	ZM
11	-5,2		61,0	ZM	-4,2		60,1	ZM
12	-4,2		59,3	ZM	-3,2		55,4	ZM
13	-3,2		54,9	ZM	-2,2		57,4	ZM
14	-2,2		55,3	ZM	-1,2		60,4	ZM
15	-1,2		55,1	ZM	-0,2	0,2	60,5	ZM
16	-0,2	0,2	56,4	ZM	0,8	0,8	68,8	Svar1
17	0,8	0,8/0,7	56,1	Svar1	1,8		69,2	Svar1
18	1,8	0,3	58,2	ZM	2,8	0,5	68,9	Svar1
19	2,8		56,0	ZM	3,8	0,5	62,4	ZM
20	3,8		55,8	ZM	4,8		59,7	ZM
21	4,8		54,1	ZM	5,8		58,5	ZM
22	5,8		56,9	ZM	6,8		57,2	ZM
23	6,8		59,9	ZM	7,8		59,9	ZM
24	7,8		63,1	ZM	8,8		61,6	ZM
25	8,8		66,7	ZM	9,8		66,2	ZM
26	9,8		69,5	ZM	10,8		67,3	ZM
27	10,8		71,9	ZM	11,8		72,8	ZM
28	11,8		73,9	ZM	12,8		74,2	ZM
29	12,8		77,6	ZM	13,8		78,9	ZM
30	13,8		80,7	ZM	14,8		81,6	ZM
31	14,8		84,0	ZM	15,8		81,9	ZM
32	15,8		86,0	ZM	16,8		85,6	ZM
33	16,8		87,8	ZM	17,8		87,0	ZM
34	17,8		91,2	ZM	18,8		87,2	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 3, Řada 3 a 4

Pořadí	Řada 3				Řada 4			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-13,9		88,5	ZM	-13,1		86,4	ZM
2	-12,9		83,6	ZM	-12,1		78,5	ZM
3	-11,9		80,8	ZM	-11,1		75,8	ZM
4	-10,9		79,7	ZM	-10,1		74,2	ZM
5	-9,9		76,6	ZM	-9,1		72,6	ZM
6	-8,9		75,5	ZM	-8,1		68,7	ZM
7	-7,9		70,1	ZM	-7,1		64,0	ZM
8	-6,9		66,9	ZM	-6,1		58,7	ZM
9	-5,9		63,7	ZM	-5,1		57,4	ZM
10	-4,9		61,1	ZM	-4,1		60,5	ZM
11	-3,9		56,3	ZM	-3,1		65,2	ZM
12	-2,9		59,6	ZM	-2,1		65,7	ZM
13	-1,9		67,4	ZM	-1,1		69,1	ZM
14	-0,9	0,9	70,0	ZM	-0,1	0,1	67,0	ZM
15	0,1	0,1	68,9	Svar 1	0,9	0,9	68,0	Svar 1/2
16	1,1		67,7	Svar 1	1,9		68,9	Svar 1/2
17	2,1		70,7	Svar 1	2,9		70,0	Svar 1/2
18	3,1		73,3	Svar 1	3,9		69,6	Svar 1/2
19	4,1	0,3	70,1	Svar 1	4,9		68,8	Svar 1/2
20	5,1	0,7	71,9	ZM	5,9		66,6	Svar 1/2
21	6,1		66,4	ZM	6,9	0,1	66,8	Svar 1/2
22	7,1		62,7	ZM	7,9	0,9	70,3	ZM
23	8,1		56,4	ZM	8,9		67,5	ZM
24	9,1		56,7	ZM	9,9		59,8	ZM
25	10,1		61,8	ZM	10,9		55,8	ZM
26	11,1		65,8	ZM	11,9		58,7	ZM
27	12,1		69,5	ZM	12,9		63,4	ZM
28	13,1		72,6	ZM	13,9		67,1	ZM
29	14,1		77,1	ZM	14,9		71,2	ZM
30	15,1		77,8	ZM	15,9		74,4	ZM
31	16,1		82,7	ZM	16,9		79,5	ZM
32	17,1		84,2	ZM	17,9		81,0	ZM
33	18,1		85,2	ZM	18,9		82,0	ZM
34	19,1		88,5	ZM	19,9		86,4	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 3, Řada 5 a 6

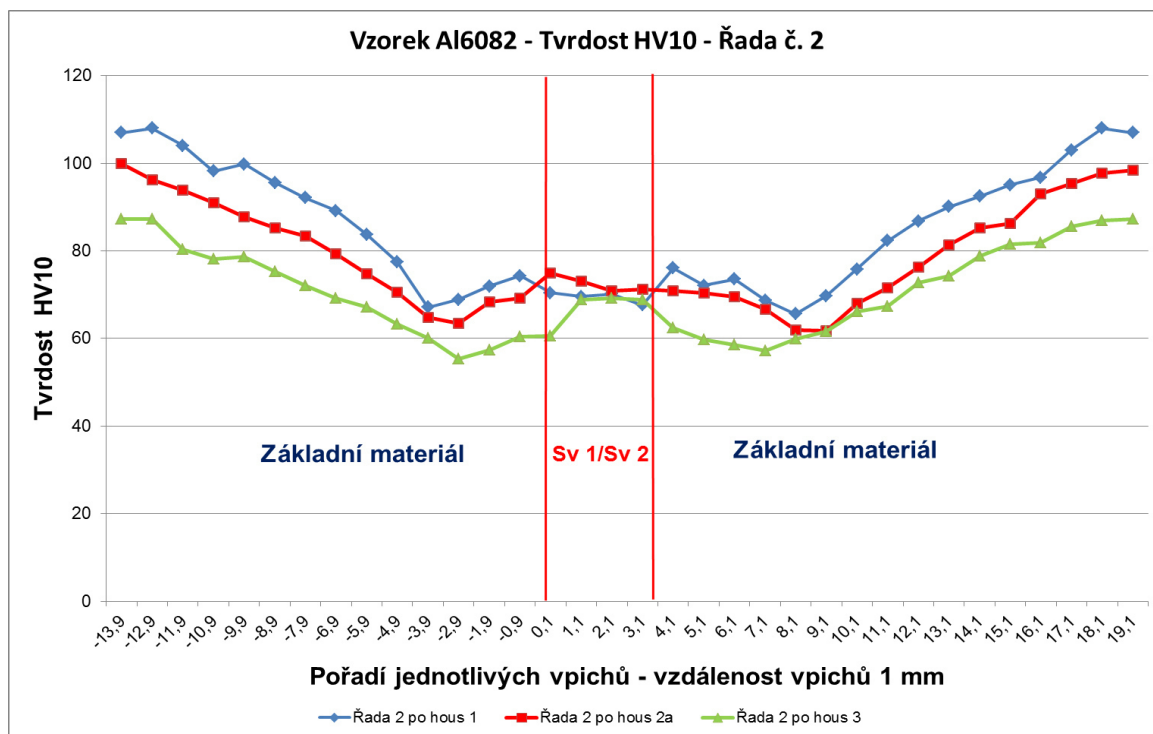
Pořadí	Řada 5				Řada 6			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-12,4		89,0	ZM	-10,9		87,6	ZM
2	-11,4		83,6	ZM	-9,9		80,8	ZM
3	-10,4		81,2	ZM	-8,9		78,7	ZM
4	-9,4		77,5	ZM	-7,9		76,1	ZM
5	-8,4		72,5	ZM	-6,9		71,9	ZM
6	-7,4		69,7	ZM	-5,9		65,2	ZM
7	-6,4		66,1	ZM	-4,9		59,7	ZM
8	-5,4		59,5	ZM	-3,9		67,9	ZM
9	-4,4		63,0	ZM	-2,9		72,3	ZM
10	-3,4		71,1	ZM	-1,9		73,7	ZM
11	-2,4		72,7	ZM	-0,9	0,9	74,0	ZM
12	-1,4		74,2	ZM	0,1	0,1	73,3	Svar3
13	-0,4	0,4	71,8	ZM	1,1		65,3	Svar3
14	0,6	0,6	69,1	Svar3	2,1		66,3	Svar3
15	1,6		68,0	Svar3	3,1		67,8	Svar3
16	2,6		68,4	Svar3	4,1		65,9	Svar3
17	3,6		68,7	Svar3	5,1		64,5	Svar3
18	4,6		69,4	Svar3	6,1		63,4	Svar3
19	5,6		67,2	Svar3	7,1		66,3	Svar3
20	6,6	0,9	70,8	Svar3	8,1		64,7	Svar3
21	7,6	0,1	75,0	ZM	9,1		65,4	Svar3
22	8,6		75,0	ZM	10,1		69,1	Svar3
23	9,6		74,4	ZM	11,1	0,2	72,6	Svar3
24	10,6		73,1	ZM	12,1	0,8	74,7	ZM
25	11,6		63,7	ZM	13,1		74,3	ZM
26	12,6		56,8	ZM	14,1		70,4	ZM
27	13,6		61,9	ZM	15,1		58,8	ZM
28	14,6		66,5	ZM	16,1		61,7	ZM
29	15,6		71,2	ZM	17,1		71,1	ZM
30	16,6		76,5	ZM	18,1		73,9	ZM
31	17,6		79,4	ZM	19,1		78,7	ZM
32	18,6		86,1	ZM	20,1		82,5	ZM
33	19,6		88,2	ZM	21,1		83,3	ZM
34	20,6		89,0	ZM	22,1		87,6	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek číslo 3, Řada 7

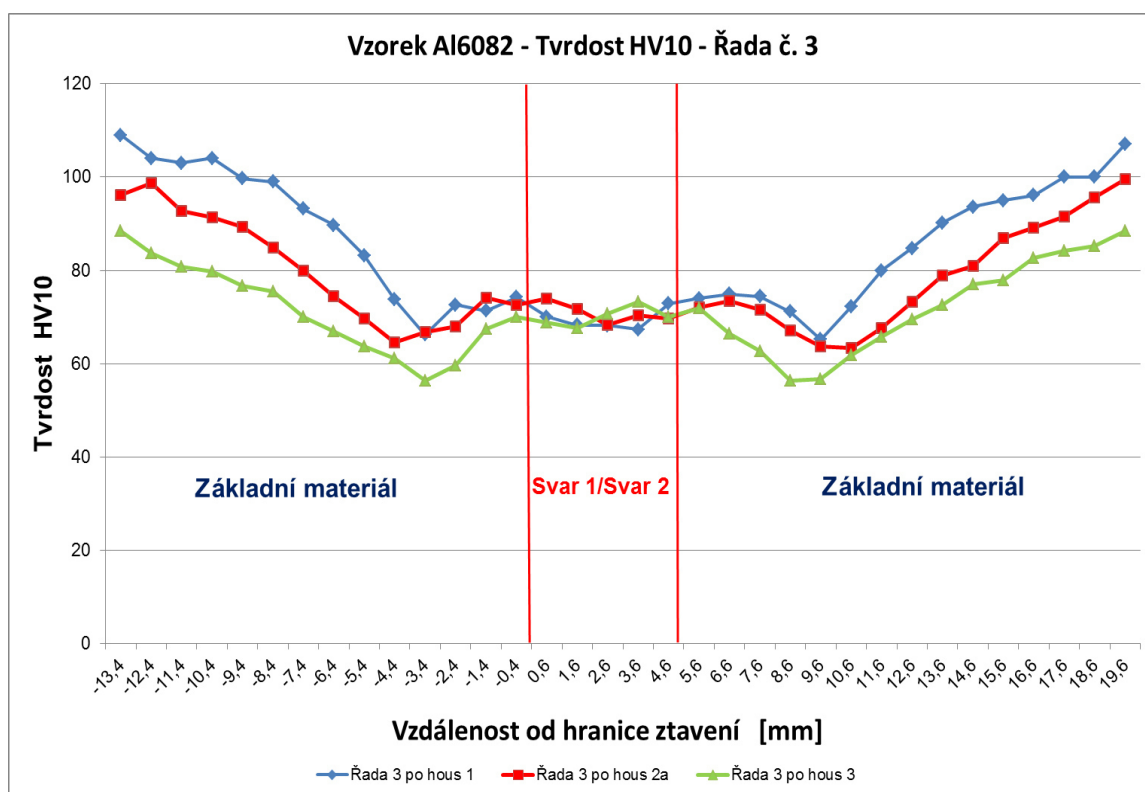
Pořadí	Řada 7			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-9,5		88,3	ZM
2	-8,5		79,4	ZM
3	-7,5		77,0	ZM
4	-6,5		72,3	ZM
5	-5,5		66,3	ZM
6	-4,5		61,4	ZM
7	-3,5		64,5	ZM
8	-2,5		71,8	ZM
9	-1,5		73,8	ZM
10	-0,5	0,5	76,0	ZM
11	0,5	0,5	64,8	Svar2
12	1,5		68,3	Svar2
13	2,5		66,3	Svar2
14	3,5		68,7	Svar3
15	4,5		70,6	Svar3
16	5,5		70,7	Svar3
17	6,5		71,3	Svar3
18	7,5		71,4	Svar3
19	8,5		70,3	Svar3
20	9,5		69,0	Svar3
21	10,5		71,7	Svar3
22	11,5		70,6	Svar3
23	12,5	0,6	66,7	Svar3
24	13,5	0,4	69,8	ZM
25	14,5		75,6	ZM
26	15,5		73,6	ZM
27	16,5		66,6	ZM
28	17,5		58,9	ZM
29	18,5		66,6	ZM
30	19,5		70,2	ZM
31	20,5		77,6	ZM
32	21,5		80,0	ZM
33	22,5		83,7	ZM
34	23,5		88,3	ZM

Průběh naměřených hodnot tvrdosti v TOO

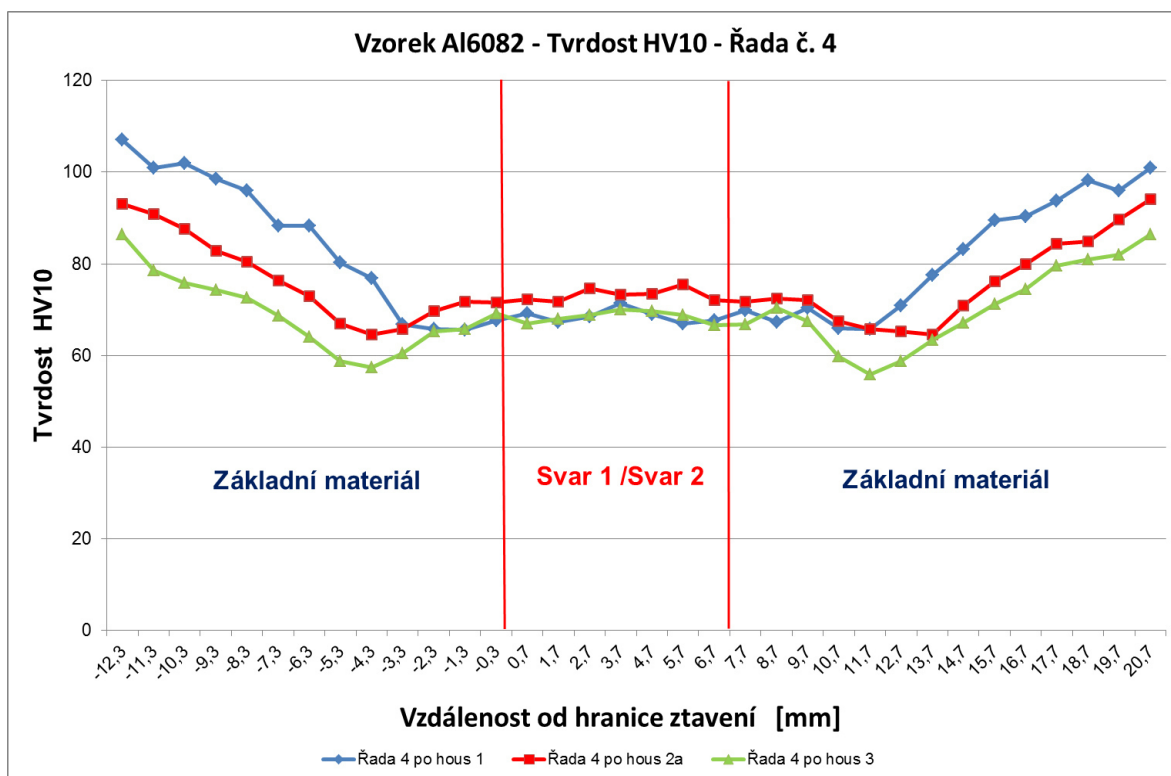
Grafické zobrazení průběhu tvrdosti HV 10 pro Řady 2



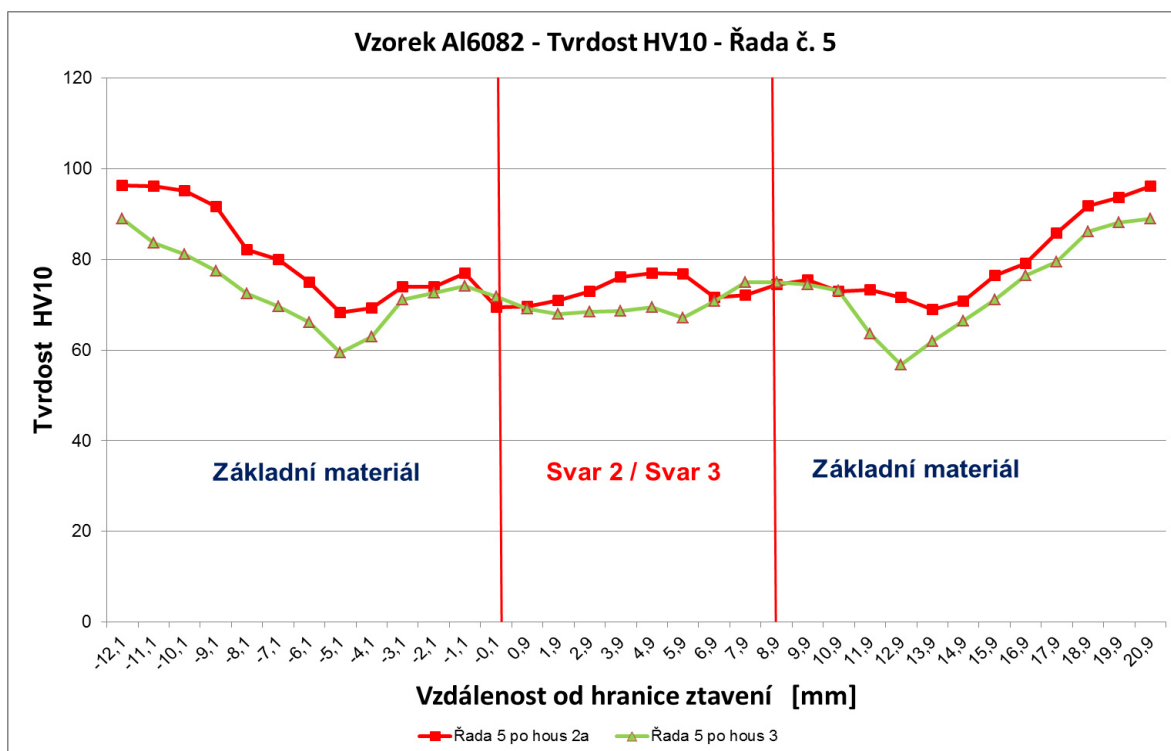
Grafické zobrazení průběhu tvrdosti HV 10 pro Řady 3



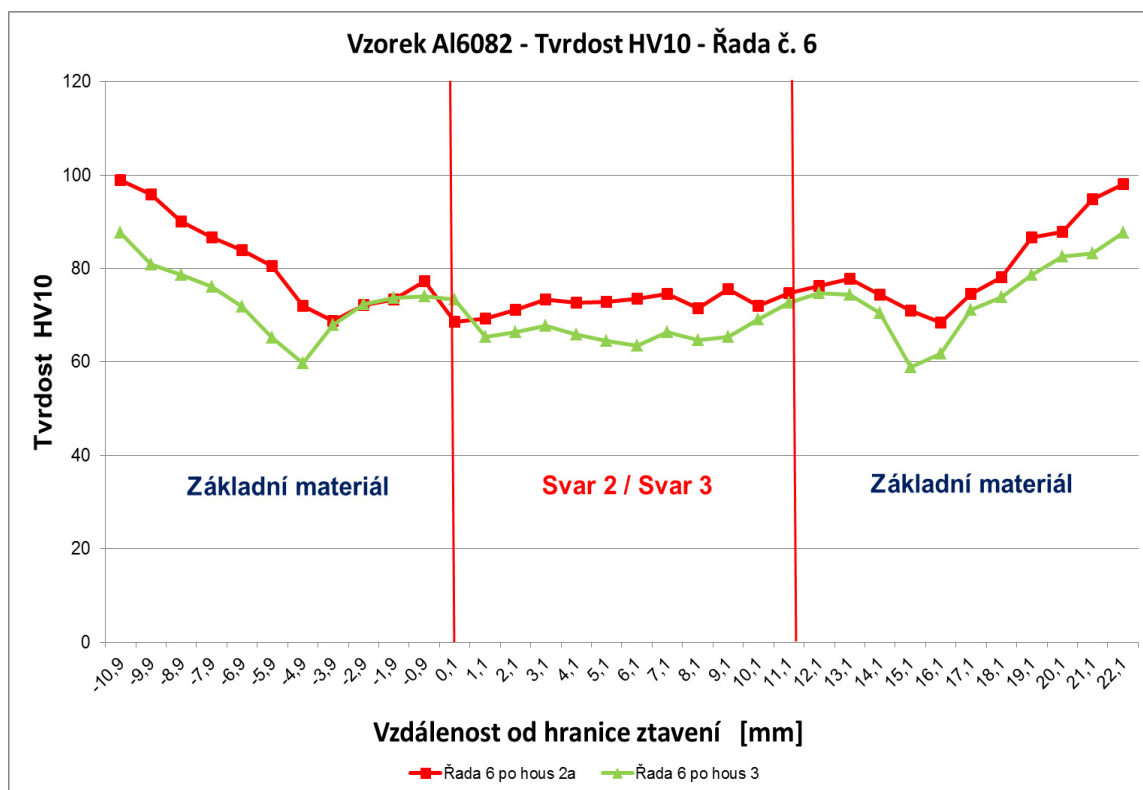
Grafické zobrazení průběhu tvrdosti HV 10 pro Řady 4



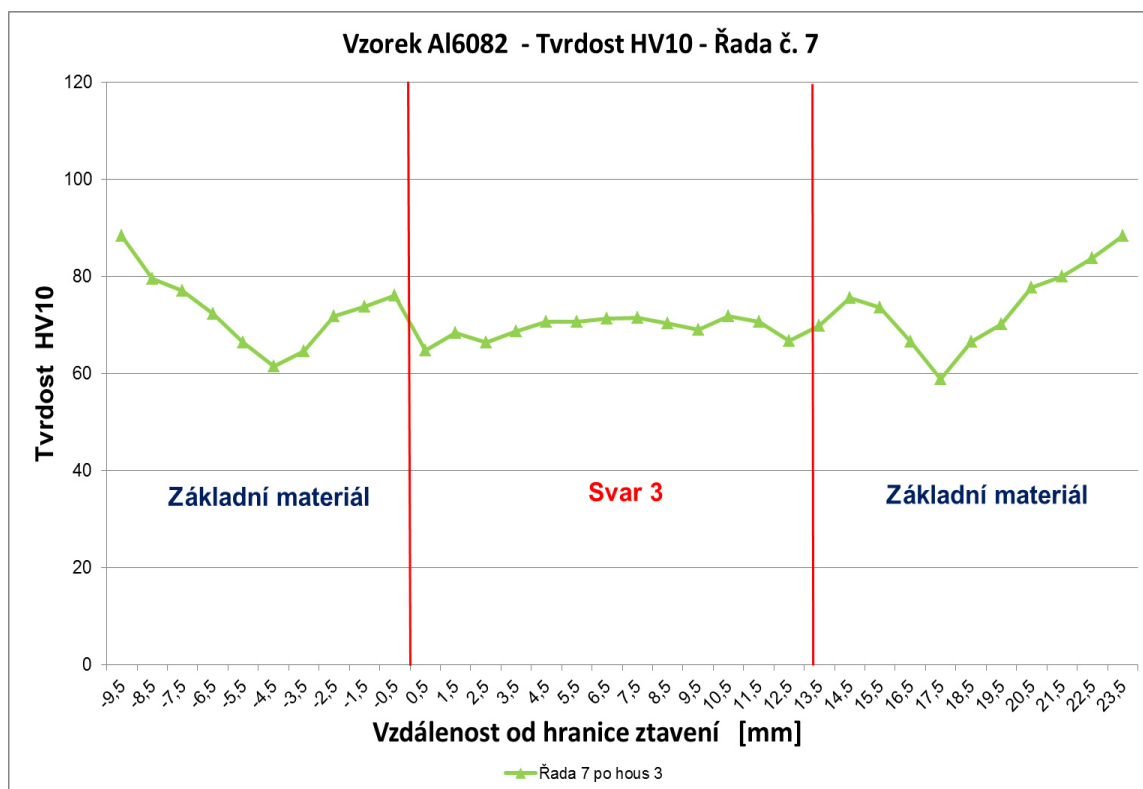
Grafické zobrazení průběhu tvrdosti HV 10 pro Řady 5



Grafické zobrazení průběhu tvrdosti HV 10 pro Řady 6



Grafické zobrazení průběhu tvrdosti HV 10 pro Řady 7



Hodnoty tvrdosti HV10 měřené přes celý testovaný vzorek odpovídající polohou řadě 4

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorky 2 a 1

Pořadí	Vzorek 2				Vzorek 1			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-97,0		110,0	ZM	-97,0		111,0	ZM
2	-94,0		113,0	ZM	-94,0		109,0	ZM
3	-91,0		112,0	ZM	-91,0		110,0	ZM
4	-88,0		108,0	ZM	-88,0		114,0	ZM
5	-85,0		109,0	ZM	-85,0		111,0	ZM
6	-82,0		110,0	ZM	-82,0		113,0	ZM
7	-79,0		109,0	ZM	-79,0		107,0	ZM
8	-76,0		111,0	ZM	-76,0		109,0	ZM
9	-73,0		109,0	ZM	-73,0		114,0	ZM
10	-70,0		109,0	ZM	-70,0		108,0	ZM
11	-67,0		108,0	ZM	-67,0		113,0	ZM
12	-64,0		111,0	ZM	-64,0		112,0	ZM
13	-61,0		109,0	ZM	-61,0		111,0	ZM
14	-58,0		111,0	ZM	-58,0		111,0	ZM
15	-55,0		109,0	ZM	-55,0		109,0	ZM
16	-52,0		110,0	ZM	-52,0		108,0	ZM
17	-49,0		109,0	ZM	-49,0		110,0	ZM
18	-46,0		111,0	ZM	-46,0		109,0	ZM
19	-43,0		112,0	ZM	-43,0		112,0	ZM
20	-40,0		109,0	ZM	-40,0		111,0	ZM
21	-37,0		109,0	ZM	-37,0		111,0	ZM
22	-34,0		109,0	ZM	-34,0		110,0	ZM
23	-31,0		111,0	ZM	-31,0		110,0	ZM
24	-28,0		112,0	ZM	-28,0		111,0	ZM
25	-25,0		108,0	ZM	-25,0		103,0	ZM
26	-22,0		107,0	ZM	-22,0		102,0	ZM
27	-19,0		108,0	ZM	-19,0		98,4	ZM

28	-16,0		108,0	ZM	-16,0		95,6	ZM
29	-12,3		107,0	ZM	-13,2		93,1	ZM
30	-11,3		101,0	ZM	-12,2		90,9	ZM
31	-10,3		102,0	ZM	-11,2		87,6	ZM
32	-9,3		98,6	ZM	-10,2		82,8	ZM
33	-8,3		96,0	ZM	-9,2		80,5	ZM
34	-7,3		88,3	ZM	-8,2		76,3	ZM
35	-6,3		88,2	ZM	-7,2		72,9	ZM
36	-5,3		80,2	ZM	-6,2		67,0	ZM
37	-4,3		76,8	ZM	-5,2		64,6	ZM
38	-3,3		66,7	ZM	-4,2		65,8	ZM
39	-2,3		65,7	ZM	-3,2		69,7	ZM
40	-1,3		65,6	ZM	-2,2		71,7	ZM
41	-0,3	0,3	67,6	ZM	-1,2		71,6	ZM
42	0,7	0,7	69,2	Svar1	-0,2	0,2	72,2	ZM
43	1,7		67,2	Svar1	0,8	0,8	71,7	Svar1/2
44	2,7		68,5	Svar1	1,8		74,7	Svar1/2
45	3,7		71,3	Svar1	2,8		73,2	Svar1/2
46	4,7		69,0	Svar1	3,8		73,5	Svar1/2
47	5,7		67,0	Svar1	4,8		75,4	Svar1/2
48	6,7	0,4	67,6	Svar1	5,8	0,9	72,1	Svar1/2
49	7,7	0,6	69,8	ZM	6,8	0,1	71,8	ZM
50	8,7		67,2	ZM	7,8		72,4	ZM
51	9,7		70,4	ZM	8,8		72,1	ZM
52	10,7		66,0	ZM	9,8		67,4	ZM
53	11,7		65,7	ZM	10,8		65,8	ZM
54	12,7		70,9	ZM	11,8		65,3	ZM
55	13,7		77,6	ZM	12,8		64,5	ZM
56	14,7		83,2	ZM	13,8		70,8	ZM
57	15,7		89,5	ZM	14,8		76,2	ZM
58	16,7		90,3	ZM	15,8		80,0	ZM
59	17,7		93,8	ZM	16,8		84,3	ZM
60	18,7		98,2	ZM	17,8		84,9	ZM
61	19,7		96,0	ZM	18,8		89,6	ZM
62	20,7		101,0	ZM	19,8		94,1	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro vzorek 9

Pořadí	Vzorek 9			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. od hranic [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vpichu
1	-97,0		111,0	ZM
2	-94,0		109,0	ZM
3	-91,0		110,0	ZM
4	-88,0		109,0	ZM
5	-85,0		110,0	ZM
6	-82,0		111,0	ZM
7	-79,0		111,0	ZM
8	-76,0		107,0	ZM
9	-73,0		110,0	ZM
10	-70,0		109,0	ZM
11	-67,0		107,0	ZM
12	-64,0		108,0	ZM
13	-61,0		109,0	ZM
14	-58,0		110,0	ZM
15	-55,0		110,0	ZM
16	-52,0		109,0	ZM
17	-49,0		111,0	ZM
18	-46,0		113,0	ZM
19	-43,0		111,0	ZM
20	-40,0		111,0	ZM
21	-37,0		107,0	ZM
22	-34,0		107,0	ZM
23	-31,0		101,0	ZM
24	-28,0		99,4	ZM
25	-25,0		96,3	ZM
26	-22,0		93,1	ZM
27	-19,0		90,8	ZM
28	-16,0		88,5	ZM
29	-13,1		86,4	ZM
30	-12,1		78,5	ZM
31	-11,1		75,8	ZM
32	-10,1		74,2	ZM
33	-9,1		72,6	ZM

34	-8,1		68,7	ZM
35	-7,1		64,0	ZM
36	-6,1		58,7	ZM
37	-5,1		57,4	ZM
38	-4,1		60,5	ZM
39	-3,1		65,2	ZM
40	-2,1		65,7	ZM
41	-1,1		69,1	ZM
42	-0,1	0,1	67,0	ZM
43	0,9	0,9	68,0	Svar 1/2
44	1,9		68,9	Svar 1/2
45	2,9		70,0	Svar 1/2
46	3,9		69,6	Svar 1/2
47	4,9		68,8	Svar 1/2
48	5,9		66,6	Svar 1/2
49	6,9	0,1	66,8	Svar 1/2
50	7,9	0,9	70,3	ZM
51	8,9		67,5	ZM
52	9,9		59,8	ZM
53	10,9		55,8	ZM
54	11,9		58,7	ZM
55	12,9		63,4	ZM
56	13,9		67,1	ZM
57	14,9		71,2	ZM
58	15,9		74,4	ZM
59	16,9		79,5	ZM
60	17,9		81,0	ZM
61	18,9		82,0	ZM
62	19,9		86,4	ZM

Tabulky a grafy naměřených hodnot tvrdosti HV 10 jednotlivých svarů po rozpouštěcím žihání 1 hodina a stárnutí 2h, 4h, 8h a 22h

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro Svar 1 (RŽ 1h) a svar 2 (RŽ 1h + Ž 2h)

Pořadí	Svar 1				Svar 2			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vtisku	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrđost HV 10	Oblast umístění vtisku
1	-93	3	59,5	ZM	-93,4	3	57,5	ZM
2	-90	6	60,2	ZM	-90,4	6	57,1	ZM
3	-87	9	60,8	ZM	-87,4	9	56,7	ZM
4	-84	12	61,5	ZM	-84,4	12	58,2	ZM
5	-81	15	60,4	ZM	-81,4	15	57,9	ZM
6	-78	18	58,7	ZM	-78,4	18	56,8	ZM
7	-75	21	58,1	ZM	-75,4	21	57,2	ZM
8	-72	24	58,4	ZM	-72,4	24	57,5	ZM
9	-69	27	58,0	ZM	-69,4	27	56,4	ZM
10	-66	30	58,9	ZM	-66,4	30	57,8	ZM
11	-63	33	59,3	ZM	-63,4	33	58,1	ZM
12	-60	36	56,6	ZM	-60,4	36	57,2	ZM
13	-57	39	58,1	ZM	-57,4	39	56,8	ZM
14	-54	42	58,6	ZM	-54,4	42	58,1	ZM
15	-51	45	58,5	ZM	-51,4	45	56,2	ZM
16	-48	48	58,5	ZM	-48,4	48	56,6	ZM
17	-45	51	59,4	ZM	-45,4	51	58	ZM
18	-42	54	55,9	ZM	-42,4	54	58,5	ZM
19	-39	57	59,8	ZM	-39,4	57	56,6	ZM
20	-36	60	55,1	ZM	-36,4	60	58,0	ZM
21	-33	63	59,0	ZM	-33,4	63	59,0	ZM
22	-30	66	61,0	ZM	-30,4	66	58,8	ZM
23	-27	69	60,0	ZM	-27,4	69	58,6	ZM
24	-24	72	60,0	ZM	-24,4	72	60,6	ZM
25	-21	75	58,1	ZM	-21,4	75	57,8	ZM
26	-18	78	58,1	ZM	-18,4	78	58,7	ZM
27	-15	81	57,3	ZM	-15,4	81	58,0	ZM

28	-12	84	58,6	ZM	-12,4	84	57,5	ZM
29	-11	85	57,9	ZM	-11,4	85	57,5	ZM
30	-10	86	55,8	ZM	-10,4	86	59,1	ZM
31	-9	87	60,4	ZM	-9,4	87	58,9	ZM
32	-8	88	56,8	ZM	-8,4	88	59,5	ZM
33	-7	89	59,4	ZM	-7,4	89	60,1	ZM
34	-6	90	58,2	ZM	-6,4	90	57,6	ZM
35	-5	91	59,3	ZM	-5,4	91	59,9	ZM
36	-4	92	61,0	ZM	-4,4	92	59,3	ZM
37	-3	93	59,2	ZM	-3,4	93	59,3	ZM
38	-2	94	58,8	ZM	-2,4	94	59,8	ZM
39	-1	95	58,8	ZM	-1,4	95	58,1	ZM
40	0	96	70,5	Svar	-0,4	96	53,9	Svar
41	1	97	70,7	Svar	0,6	97	71,1	Svar
42	2	98	70,4	Svar	1,6	98	68,5	Svar
43	3	99	69,6	Svar	2,6	99	71,2	Svar
44	4	100	69,2	Svar	3,6	100	69,7	Svar
45	5	101	70,3	Svar	4,6	101	68,5	Svar
46	6	102	63,4	ZM	5,6	102	70,2	Svar
47	7	103	59,0	ZM	6,6	103	59,1	Svar
48	8	104	56,9	ZM	7,6	104	61,7	ZM
49	9	105	55,9	ZM	8,6	105	60,2	ZM
50	10	106	59,3	ZM	9,6	106	59,7	ZM
51	11	107	61,0	ZM	10,6	107	57,7	ZM
52	12	108	57,6	ZM	11,6	108	58,6	ZM
53	13	109	59,2	ZM	12,6	109	59,9	ZM
54	14	110	61,4	ZM	13,6	110	58,0	ZM
55	15	111	54,5	ZM	14,6	111	58,3	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro Svar 3 (RŽ 1h+Ž 4h) a svar 4 (RŽ 1h +Ž 8h)

Pořadí	Svar 3				Svar 4			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku
1	-93,4	3	74,1	ZM	-93	3	101	ZM
2	-90,4	6	75,7	ZM	-90	6	104	ZM
3	-87,4	9	74,9	ZM	-87	9	100	ZM
4	-84,4	12	76,6	ZM	-84	12	97,9	ZM
5	-81,4	15	74,2	ZM	-81	15	103	ZM
6	-78,4	18	76,0	ZM	-78	18	102	ZM
7	-75,4	21	75,1	ZM	-75	21	107	ZM
8	-72,4	24	76,6	ZM	-72	24	107	ZM
9	-69,4	27	75,1	ZM	-69	27	103	ZM
10	-66,4	30	74,7	ZM	-66	30	104	ZM
11	-63,4	33	76,7	ZM	-63	33	104	ZM
12	-60,4	36	76,0	ZM	-60	36	105	ZM
13	-57,4	39	75,9	ZM	-57	39	104	ZM
14	-54,4	42	76,8	ZM	-54	42	102	ZM
15	-51,4	45	76,5	ZM	-51	45	102	ZM
16	-48,4	48	79,1	ZM	-48	48	100	ZM
17	-45,4	51	77,7	ZM	-45	51	103	ZM
18	-42,4	54	79,7	ZM	-42	54	101	ZM
19	-39,4	57	78,9	ZM	-39	57	104	ZM
20	-36,4	60	79,3	ZM	-36	60	100	ZM
21	-33,4	63	78,6	ZM	-33	63	105	ZM
22	-30,4	66	80,1	ZM	-30	66	106	ZM
23	-27,4	69	82,5	ZM	-27	69	104	ZM
24	-24,4	72	80,8	ZM	-24	72	105	ZM
25	-21,4	75	79,3	ZM	-21	75	105	ZM
26	-18,4	78	80,1	ZM	-18	78	106	ZM
27	-15,4	81	80,0	ZM	-15	81	107	ZM
28	-12,4	84	78,8	ZM	-12	84	107	ZM
29	-11,4	85	79,2	ZM	-11	85	106	ZM
30	-10,4	86	76,4	ZM	-10	86	104	ZM

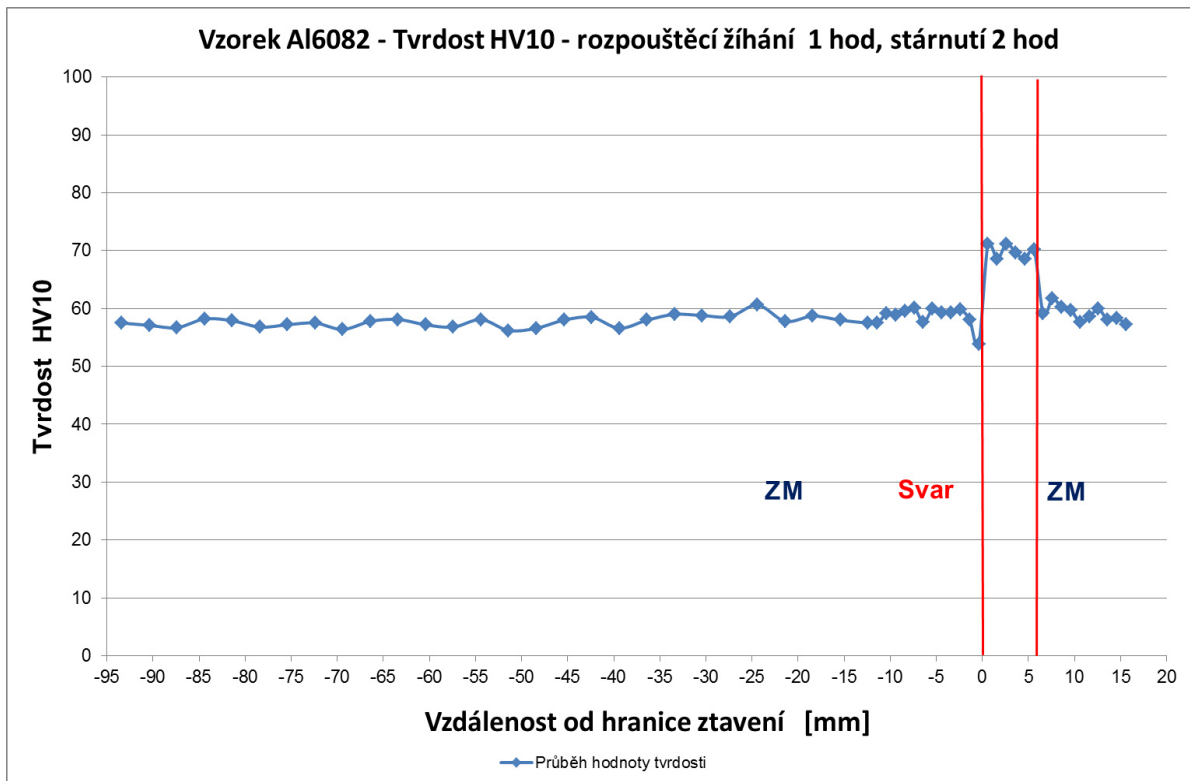
31	-9,4	87	80,0	ZM	-9	87	105	ZM
32	-8,4	88	81,5	ZM	-8	88	102	ZM
33	-7,4	89	80,1	ZM	-7	89	103	ZM
34	-6,4	90	79,2	ZM	-6	90	107	ZM
35	-5,4	91	80,3	ZM	-5	91	106	ZM
36	-4,4	92	79,0	ZM	-4	92	104	ZM
37	-3,4	93	80,3	ZM	-3	93	104	ZM
38	-2,4	94	79,6	ZM	-2	94	104	ZM
39	-1,4	95	79,7	ZM	-1	95	99,0	ZM
40	-0,4	96	77,1	Svar	0	96	85,8	Svar
41	0,6	97	69,0	Svar	1	97	77,6	Svar
42	1,6	98	67,5	Svar	2	98	71,3	Svar
43	2,6	99	71,2	Svar	3	99	73,7	Svar
44	3,6	100	72,6	Svar	4	100	76,2	Svar
45	4,6	101	71,5	Svar	5	101	70,7	Svar
46	5,6	102	68,1	Svar	6	102	80,6	Svar
47	6,6	103	75,8	Svar	7	103	100	ZM
48	7,6	104	76,3	ZM	8	104	105	ZM
49	8,6	105	80,5	ZM	9	105	102	ZM
50	9,6	106	80,2	ZM	10	106	105	ZM
51	10,6	107	79,3	ZM	11	107	101	ZM
52	11,6	108	78,6	ZM	12	108	102	ZM
53	12,6	109	82,4	ZM	13	109	106	ZM
54	13,6	110	79,3	ZM	14	110	106	ZM
55	14,6	111	78,1	ZM	15	111	98,7	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro Svar 5 (RŽ 1h+Ž 22h)

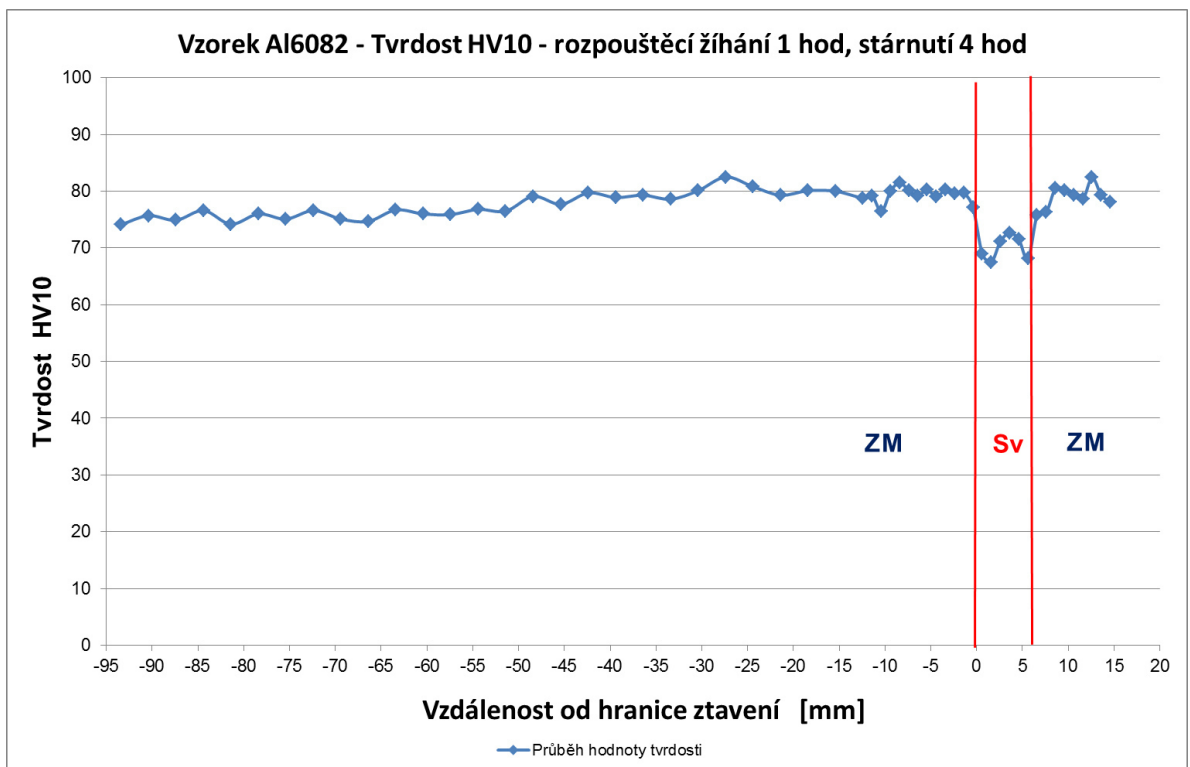
Pořadí	Svar 5			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku
1	-93,2	3	108	ZM
2	-90,2	6	109	ZM
3	-87,2	9	104	ZM
4	-84,2	12	102	ZM
5	-81,2	15	110	ZM
6	-78,2	18	110	ZM
7	-75,2	21	105	ZM
8	-72,2	24	106	ZM
9	-69,2	27	112	ZM
10	-66,2	30	107	ZM
11	-63,2	33	106	ZM
12	-60,2	36	111	ZM
13	-57,2	39	106	ZM
14	-54,2	42	107	ZM
15	-51,2	45	113	ZM
16	-48,2	48	107	ZM
17	-45,2	51	109	ZM
18	-42,2	54	109	ZM
19	-39,2	57	113	ZM
20	-36,2	60	109	ZM
21	-33,2	63	112	ZM
22	-30,2	66	110	ZM
23	-27,2	69	112	ZM
24	-24,2	72	113	ZM
25	-21,2	75	112	ZM
26	-18,2	78	113	ZM
27	-15,2	81	113	ZM
28	-12,2	84	113	ZM
29	-11,2	85	113	ZM
30	-10,2	86	109	ZM
31	-9,2	87	118	ZM
32	-8,2	88	112	ZM

33	-7,2	89	113	ZM
34	-6,2	90	113	ZM
35	-5,2	91	110	ZM
36	-4,2	92	111	ZM
37	-3,2	93	108	ZM
38	-2,2	94	113	ZM
39	-1,2	95	109	ZM
40	-0,2	96	110	Svar
41	0,8	97	70,2	Svar
42	1,8	98	71,7	Svar
43	2,8	99	70,7	Svar
44	3,8	100	72,0	Svar
45	4,8	101	73,3	Svar
46	5,8	102	109	Svar
47	6,8	103	114	ZM
48	7,8	104	111	ZM
49	8,8	105	109	ZM
50	9,8	106	112	ZM
51	10,8	107	113	ZM
52	11,8	108	108	ZM
53	12,8	109	111	ZM
54	13,8	110	112	ZM
55	14,8	111	107	ZM

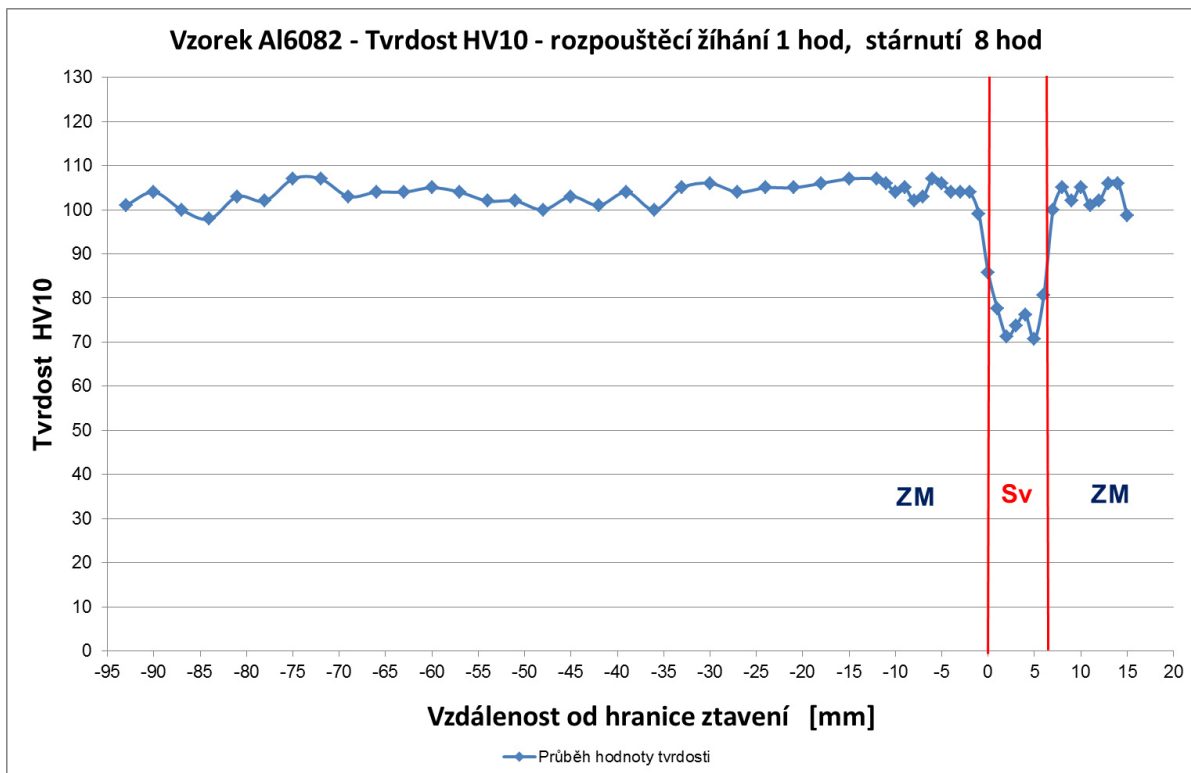
Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RZ 1 hodina, stárnutí 2 hodiny



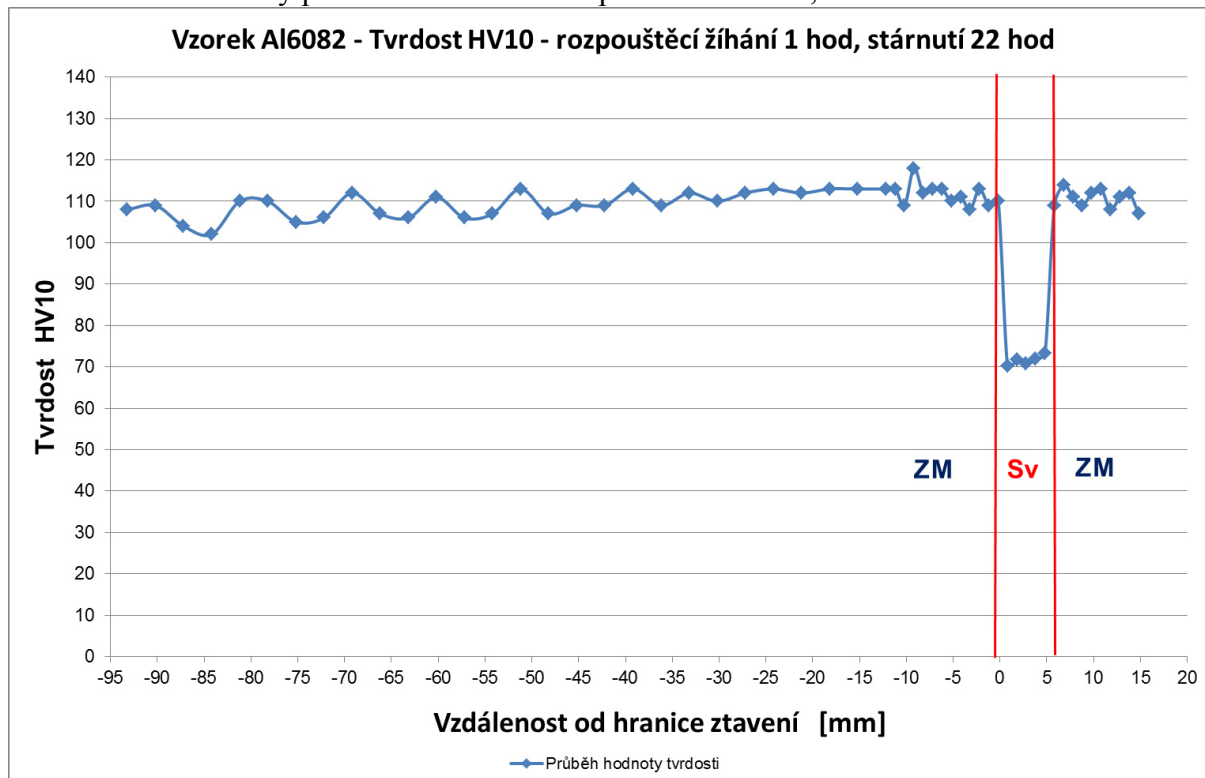
Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RZ 1 hodina, stárnutí 4 hodiny



Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RZ 1 hodina, stárnutí 8 hodin



Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RZ 1 hodina, stárnutí 22 hodin



Příloha 7

Tabulky a grafy naměřených hodnot tvrdosti HV 10 jednotlivých svarů po rozpouštěcím žihání 5 hodin a stárnutí 2h, 4h, 8h a 22h

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro Svar 6 (RŽ 5h) a svar 7 (RŽ 5h + Ž 2h)

Pořadí	Svar 6				Svar 7			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku
1	-93,1	3	66,7	ZM	-92,6	3	70,2	ZM
2	-90,1	6	68,0	ZM	-89,6	6	71,7	ZM
3	-87,1	9	68,6	ZM	-86,6	9	71,0	ZM
4	-84,1	12	68,3	ZM	-83,6	12	71,2	ZM
5	-81,1	15	67,1	ZM	-80,6	15	71,6	ZM
6	-78,1	18	69,1	ZM	-77,6	18	72,9	ZM
7	-75,1	21	64,8	ZM	-74,6	21	74,1	ZM
8	-72,1	24	65,7	ZM	-71,6	24	73,6	ZM
9	-69,1	27	67,2	ZM	-68,6	27	72,4	ZM
10	-66,1	30	69,9	ZM	-65,6	30	73,4	ZM
11	-63,1	33	71,0	ZM	-62,6	33	74,7	ZM
12	-60,1	36	67,5	ZM	-59,6	36	78,3	ZM
13	-57,1	39	69,4	ZM	-56,6	39	74,5	ZM
14	-54,1	42	69,5	ZM	-53,6	42	76,2	ZM
15	-51,1	45	68,9	ZM	-50,6	45	77,5	ZM
16	-48,1	48	70,2	ZM	-47,6	48	77,3	ZM
17	-45,1	51	70,3	ZM	-44,6	51	77,4	ZM
18	-42,1	54	69,4	ZM	-41,6	54	77,7	ZM
19	-39,1	57	70,2	ZM	-38,6	57	79,2	ZM
20	-36,1	60	69,1	ZM	-35,6	60	77,9	ZM
21	-33,1	63	70,3	ZM	-32,6	63	79,7	ZM
22	-30,1	66	67,8	ZM	-29,6	66	75,9	ZM
23	-27,1	69	67,3	ZM	-26,6	69	80,3	ZM
24	-24,1	72	69,6	ZM	-23,6	72	79,8	ZM
25	-21,1	75	70,2	ZM	-20,6	75	79,5	ZM
26	-18,1	78	68,7	ZM	-17,6	78	77,9	ZM

27	-15,1	81	71,9	ZM	-14,6	81	74,9	ZM
28	-12,1	84	67,6	ZM	-11,6	84	71,0	ZM
29	-11,1	85	69,7	ZM	-10,6	85	74,9	ZM
30	-10,1	86	69,3	ZM	-9,6	86	72,1	ZM
31	-9,1	87	68,6	ZM	-8,6	87	73,3	ZM
32	-8,1	88	68,9	ZM	-7,6	88	75,1	ZM
33	-7,1	89	68,6	ZM	-6,6	89	74,6	ZM
34	-6,1	90	68,0	ZM	-5,6	90	73,9	ZM
35	-5,1	91	64,6	ZM	-4,6	91	76,3	ZM
36	-4,1	92	67,0	ZM	-3,6	92	72,6	ZM
37	-3,1	93	68,8	ZM	-2,6	93	72,7	ZM
38	-2,1	94	69,7	ZM	-1,6	94	72,5	ZM
39	-1,1	95	69,4	ZM	-0,6	95	67,2	Svar
40	-0,1	96	71,2	Svar	0,4	96	65,5	Svar
41	0,9	97	69,2	Svar	1,4	97	70,2	Svar
42	1,9	98	73,0	Svar	2,4	98	69,3	Svar
43	2,9	99	74,5	Svar	3,4	99	70,4	Svar
44	3,9	100	72,1	Svar	4,4	100	69,1	Svar
45	4,9	101	72,1	Svar	5,4	101	68,7	Svar
46	5,9	102	71,1	Svar	6,4	102	62,4	Svar
47	6,9	103	70,5	ZM	7,4	103	68,4	ZM
48	7,9	104	72,2	ZM	8,4	104	71,1	ZM
49	8,9	105	70,5	ZM	9,4	105	71,3	ZM
50	9,9	106	69,4	ZM	10,4	106	69,7	ZM
51	10,9	107	69,9	ZM	11,4	107	70,8	ZM
52	11,9	108	65,5	ZM	12,4	108	72,5	ZM
53	12,9	109	69,9	ZM	13,4	109	71,6	ZM
54	13,9	110	69,9	ZM	14,4	110	70,5	ZM
55	14,9	111	73,3	ZM	15,4	111	71,2	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro Svar 8 (RŽ 5h+Ž 4h) a svar 9 (RŽ 5h +Ž 8h)

Pořadí	Svar 8				Svar 9			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku
1	-92,9	3	81,6	ZM	-92,9	3	104	ZM
2	-89,9	6	81,4	ZM	-89,9	6	102	ZM
3	-86,9	9	83,6	ZM	-86,9	9	101	ZM
4	-83,9	12	84,2	ZM	-83,9	12	104	ZM
5	-80,9	15	83,3	ZM	-80,9	15	103	ZM
6	-77,9	18	83,4	ZM	-77,9	18	104	ZM
7	-74,9	21	81,4	ZM	-74,9	21	103	ZM
8	-71,9	24	83,6	ZM	-71,9	24	105	ZM
9	-68,9	27	83,0	ZM	-68,9	27	106	ZM
10	-65,9	30	84,6	ZM	-65,9	30	108	ZM
11	-62,9	33	83,8	ZM	-62,9	33	106	ZM
12	-59,9	36	84,9	ZM	-59,9	36	104	ZM
13	-56,9	39	80,4	ZM	-56,9	39	99,5	ZM
14	-53,9	42	82,2	ZM	-53,9	42	102	ZM
15	-50,9	45	83,0	ZM	-50,9	45	96,1	ZM
16	-47,9	48	86,8	ZM	-47,9	48	97,0	ZM
17	-44,9	51	84,2	ZM	-44,9	51	97,4	ZM
18	-41,9	54	84,3	ZM	-41,9	54	95,0	ZM
19	-38,9	57	87,0	ZM	-38,9	57	98,1	ZM
20	-35,9	60	85,4	ZM	-35,9	60	96,5	ZM
21	-32,9	63	82,0	ZM	-32,9	63	105	ZM
22	-29,9	66	80,2	ZM	-29,9	66	105	ZM
23	-26,9	69	85,5	ZM	-26,9	69	105	ZM
24	-23,9	72	85,2	ZM	-23,9	72	105	ZM
25	-20,9	75	83,8	ZM	-20,9	75	106	ZM
26	-17,9	78	82,7	ZM	-17,9	78	105	ZM
27	-14,9	81	83,4	ZM	-14,9	81	104	ZM
28	-11,9	84	84,0	ZM	-11,9	84	104	ZM
29	-10,9	85	85,4	ZM	-10,9	85	103	ZM
30	-9,9	86	88,2	ZM	-9,9	86	101	ZM
31	-8,9	87	88,3	ZM	-8,9	87	97,9	ZM

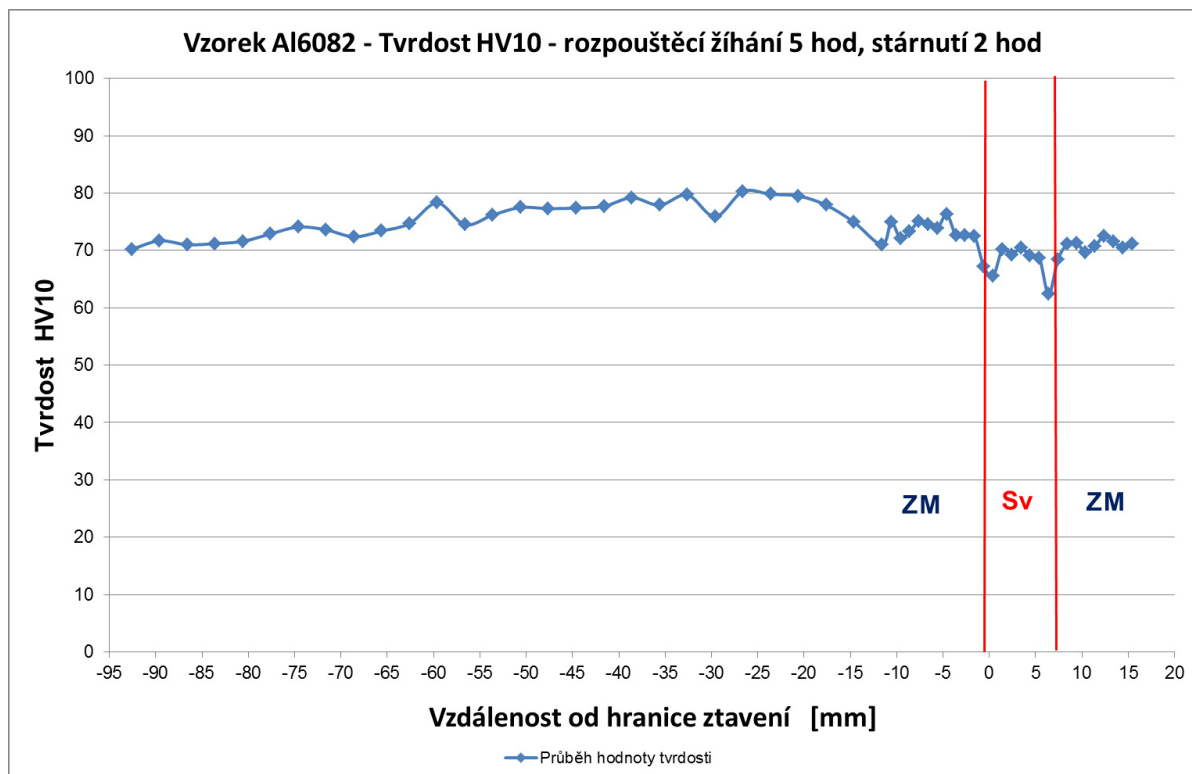
32	-7,9	88	86,3	ZM	-7,9	88	104	ZM
33	-6,9	89	88,6	ZM	-6,9	89	99,3	ZM
34	-5,9	90	86,2	ZM	-5,9	90	105	ZM
35	-4,9	91	85,2	ZM	-4,9	91	103	ZM
36	-3,9	92	87,7	ZM	-3,9	92	104	ZM
37	-2,9	93	87,1	ZM	-2,9	93	102	ZM
38	-1,9	94	87,4	ZM	-1,9	94	98,1	ZM
39	-0,9	95	85,6	Svar	-0,9	95	107	Svar
40	0,1	96	85,1	Svar	0,1	96	82,1	Svar
41	1,1	97	83,1	Svar	1,1	97	74,1	Svar
42	2,1	98	76,4	Svar	2,1	98	72,6	Svar
43	3,1	99	76,5	Svar	3,1	99	73,1	Svar
44	4,1	100	73,1	Svar	4,1	100	72,9	Svar
45	5,1	101	74,0	Svar	5,1	101	68,7	Svar
46	6,1	102	76,2	Svar	6,1	102	92,5	Svar
47	7,1	103	79,7	ZM	7,1	103	99,2	ZM
48	8,1	104	82,2	ZM	8,1	104	97,7	ZM
49	9,1	105	83,8	ZM	9,1	105	102	ZM
50	10,1	106	86,0	ZM	10,1	106	101	ZM
51	11,1	107	87,0	ZM	11,1	107	100	ZM
52	12,1	108	83,8	ZM	12,1	108	96,3	ZM
53	13,1	109	86,3	ZM	13,1	109	96,2	ZM
54	14,1	110	82,5	ZM	14,1	110	98,8	ZM
55	15,1	111	83,3	ZM	15,1	111	94,6	ZM

Hodnoty tvrdosti HV 10 pro Svar 10 (RŽ 5h+Ž 22h) a pro tepelně nezpracovaný svar 11

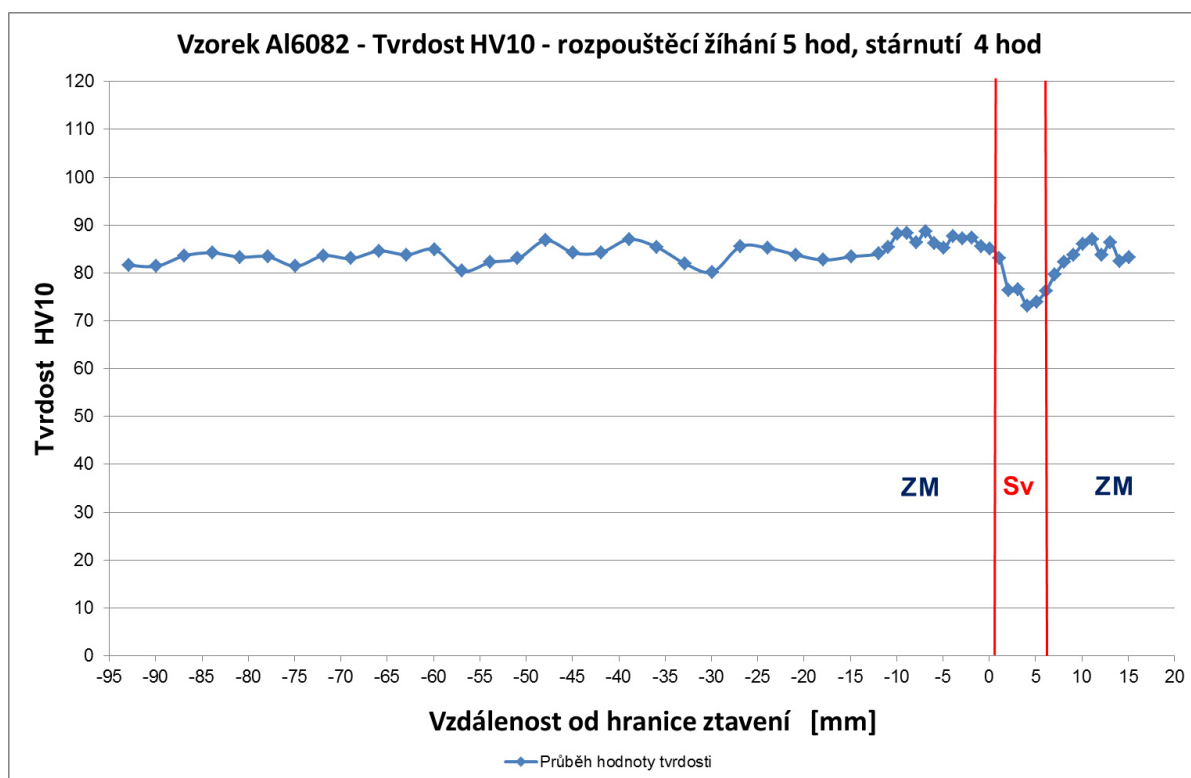
Pořadí	Svar 10				Svar 11			
	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku	Souřad. x [mm]	Vzdál. vtisků [mm]	Tvrdost HV 10	Oblast umístění vtisku
1	-93,1	3	112	ZM	-94	3	109	ZM
2	-90,1	6	112	ZM	-91	6	110	ZM
3	-87,1	9	112	ZM	-88	9	109	ZM
4	-84,1	12	112	ZM	-85	12	110	ZM
5	-81,1	15	111	ZM	-82	15	111	ZM
6	-78,1	18	111	ZM	-79	18	111	ZM
7	-75,1	21	112	ZM	-76	21	107	ZM
8	-72,1	24	111	ZM	-73	24	110	ZM
9	-69,1	27	112	ZM	-70	27	109	ZM
10	-66,1	30	113	ZM	-67	30	107	ZM
11	-63,1	33	112	ZM	-64	33	108	ZM
12	-60,1	36	114	ZM	-61	36	109	ZM
13	-57,1	39	114	ZM	-58	39	110	ZM
14	-54,1	42	114	ZM	-55	42	110	ZM
15	-51,1	45	113	ZM	-52	45	109	ZM
16	-48,1	48	114	ZM	-49	48	111	ZM
17	-45,1	51	114	ZM	-46	51	113	ZM
18	-42,1	54	114	ZM	-43	54	111	ZM
19	-39,1	57	114	ZM	-40	57	111	ZM
20	-36,1	60	114	ZM	-37	60	107	ZM
21	-33,1	63	114	ZM	-34	63	107	ZM
22	-30,1	66	114	ZM	-31	66	101	ZM
23	-27,1	69	113	ZM	-28	69	99,4	ZM
24	-24,1	72	113	ZM	-25	72	96,3	ZM
25	-21,1	75	112	ZM	-22	75	93,1	ZM
26	-18,1	78	113	ZM	-19	78	90,8	ZM
27	-15,1	81	113	ZM	-16	81	88,5	ZM
28	-12,1	84	114	ZM	-13,1	84	86,4	ZM
29	-11,1	85	115	ZM	-12,1	85	78,5	ZM
30	-10,1	86	113	ZM	-11,1	86	75,8	ZM
31	-9,1	87	115	ZM	-10,1	87	74,2	ZM

32	-8,1	88	112	ZM	-9,1	88	72,6	ZM
33	-7,1	89	115	ZM	-8,1	89	68,7	ZM
34	-6,1	90	112	ZM	-7,1	90	64,0	ZM
35	-5,1	91	113	ZM	-6,1	91	58,7	ZM
36	-4,1	92	113	ZM	-5,1	92	57,4	ZM
37	-3,1	93	112	ZM	-4,1	93	60,5	ZM
38	-2,1	94	112	ZM	-3,1	94	65,2	ZM
39	-1,1	95	107	ZM	-2,1	95	65,7	ZM
40	-0,1	96	92,0	Svar	-1,1	96	69,1	ZM
41	0,9	97	63,1	Svar	-0,1	97	67,0	ZM
42	1,9	98	74,9	Svar	0,9	98	68,0	ZM
43	2,9	99	73,6	Svar	1,9	99	68,9	Svar
44	3,9	100	70,6	Svar	2,9	100	70,0	Svar
45	4,9	101	73,9	Svar	3,9	101	69,6	Svar
46	5,9	102	88,0	Svar	4,9	102	68,8	Svar
47	6,9	103	110	ZM	5,9	103	66,6	Svar
48	7,9	104	110	ZM	6,9	104	66,8	Svar
49	8,9	105	113	ZM	7,9	105	70,3	Svar
50	9,9	106	112	ZM	8,9	106	67,5	ZM
51	10,9	107	115	ZM	9,9	107	59,8	ZM
52	11,9	108	112	ZM	10,9	108	55,8	ZM
53	12,9	109	113	ZM	11,9	109	58,7	ZM
54	13,9	110	113	ZM	12,9	110	61,4	ZM
55	14,9	111	115	ZM	13,9	111	62,6	ZM

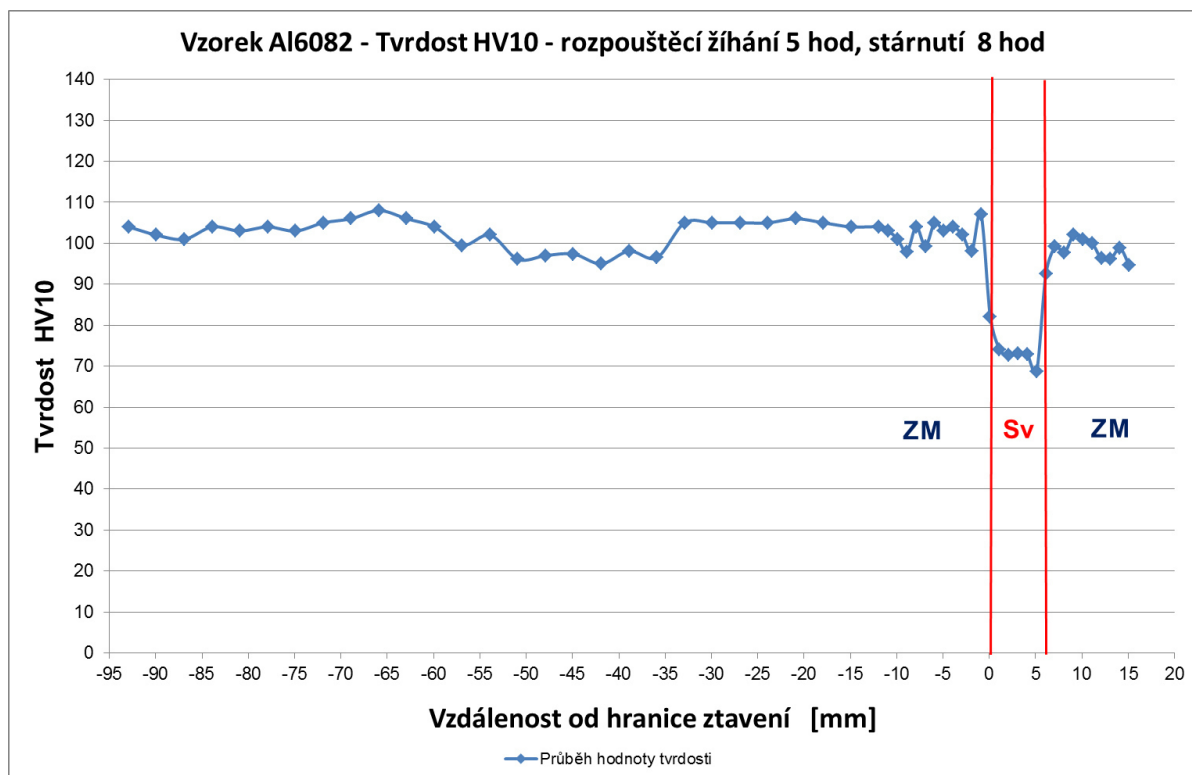
Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RŽ 5 hodin, stárnutí 2 hodiny



Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RŽ 5 hodin, stárnutí 4 hodiny



Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RŽ 5 hodin, stárnutí 8 hodin



Grafický průběh tvrdosti HV 10 pro RŽ 5 hodin, stárnutí 22 hodin

