



NÁVRH PRACOVNÍ KOMORY PRO SVAŘOVÁNÍ VYSOCE REAKTIVNÍCH MATERIÁLŮ A OPTIMALIZACE PROCESNÍCH PARAMETRŮ PRO SVAŘOVÁNÍ TITANU GRADE 2

Diplomová práce

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



DESIGN OF PURGE CHAMBER FOR WELDING OF HIGHLY REACTIVE MATERIALS, AND OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS FOR THE WELDING OF TITANIUM GRADE 2.

Diploma thesis

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



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Nohýnek**
Osobní číslo: **S13000447**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Návrh pracovní komory pro svařování vysoce reaktivních materiálů a optimalizace procesních parametrů pro svařování titanu Grade 2**
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 titanu a jeho slitin.
2. Provedte rešerši současného stavu znalostí o svařování a využitelnosti Ti a jeho slitin.
3. Na základě zkušeností z experimentů optimalizujte stávající pracovní komoru (provedte návrh a vytvořte výkresovou dokumentaci optimalizované komory).
4. Navrhněte svařovací parametry a provedte experimenty svařování s monitorizací parametrů.
5. Vytvořené svary metalograficky vyhodnoťte a na výbrusech změřte tvrdost a případně i mikrotvrdost.
6. Provedte výsledné zhodnocení.

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 svariteľnosť*. 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**

L.S.

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:

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem pracovní komory pro svařování vysoce reaktivních materiálů a optimalizací procesních parametrů pro svařování titanu Grade 2. Práce se skládá ze dvou základních částí (teoretické a praktické).

Teoretická část popisuje objevení, historii a způsoby výroby titanu. Dále se zabývá jeho materiálovými vlastnostmi, technologiemi zpracování a aplikačním využitím.

V praktické části byla experimentálně ověřena funkce stávající svařovací komory pomocí zkušebních vzorků. Na základě vyhodnocení těchto zkušebních vzorků a vlastního experimentu byl vyhotoven návrh úpravy procesních parametrů svařování současně s koncepčním návrhem nové svařovací komory s příslušenstvím, které zlepšuje jeho funkčnost. Pro návrh nového svařovacího pracoviště byla dále vyhotovena kompletní výkresová dokumentace.

Klíčová slova: titan, svařování, svařovací komora, procesní parametry, inertní atmosféra

Annotation

This thesis describes the design of a welding purge chamber for welding of highly reactive materials, and optimization of process parameters for the welding of titanium Grade 2. The thesis consists of two parts (theoretical and practical).

The theoretical part describes the discovery, history and methods of manufacture of titanium. It also deals with its material properties, processing technologies and application usage.

In the practical part, there were experimentally verified functions of existing welding purge chamber via usage of test samples. Based on the evaluation of the test samples and the experiment itself, the process parameters were adjusted, as so the conceptual design of the new welding chamber with accessories that enhance its functionality. For the design of the new welding workplace was also drawn up a complete design documentation.

Key words: titanium, welding, welding purge chamber, process parameters, inert atmosphere

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky.

Dále také děkuji firmě SWS Tauchmann za možnost provedení experimentu v jejich podniku.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21005/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Obsah

1 Úvod	9
2 Způsoby výroby titanu a jeho vlastnosti	11
2.1 Fyzikální vlastnosti titanu	14
2.2 Chemické vlastnosti titanu	15
2.3 Mechanické vlastnosti titanu	18
2.3.1 Vliv nečistot na mechanické vlastnosti titanu	18
3 Komerčně čistý titan	20
3.1 Technologické vlastnosti komerčně čistého titanu	21
3.2 Titan Grade 2	24
3.2.1 Technologické vlastnosti titanu Grade 2	26
3.3 Obecné zhodnocení vlastností titanu	27
4 Aplikační využití titanu	28
4.1 Uplatnění titanu v kosmonautice, letecké a vojenské aplikace	28
4.2 Civilní aplikace titanu	31
5 Experimentální ověření funkce svařovací komory	33
5.1 Návrh a realizace ověřovacích experimentů svařování	34
5.2 Měření tvrdosti zkušebních svarů	41
5.3 Vyhodnocení provedených experimentálních svarů - Vyhodnocení funkčnosti experimentálního pracoviště	45
5.3.1 Úprava funkčnosti experimentální svařovací komory	46
5.4 Ergonomie svařovacího pracoviště	51
5.4.1 Návrh ergonomické úpravy svařovací komory	53
6 Závěr	55
7 Seznam použitých zdrojů	56
9 Seznam příloh	59

Seznam použitých symbolů a zkratek

p	- tlak[Pa]
T	- teplota[°C]
ΔG	- změna Gibbsovi energie [J]
R_e	- mez kluzu materiálu [MPa]
$R_{p0,2}$	- smluvní mez kluzu materiálu [MPa]
R_m	- mez pevnosti [MPa]
A	- tažnost (měrné prodloužení) [%]
TIG	- Tungsten Inert Gas
AISI	- American Iron and Steel Institute
HV5	- Tvrdost podle Vickerse při zátěži 5 [N]
ANSI	- American National Standards Institute
UZIS	- Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR
ČSN	- Česká technická norma/ Československá Státní Norma

1 Úvod

V technické praxi se můžeme setkat s velkou škálou různých konstrukčních materiálů. Mezi nejdéle používanější a nejběžnější dozajista patří kovy. Nejčastěji se setkáváme s výrobky ze slitin na bázi železa, tedy ocelí a litin. Toto hojné zastoupení bylo dáno především dokonalým ovládnutím výroby těchto slitin a v poměru k ostatním kovům i ekonomicky méně nákladným procesem produkce v průmyslovém měřítku.

Klasické slitiny železa však postrádají některé speciální vlastnosti, které poskytují neželezné kovy a slitiny. I když je obecně výroba a technologie zpracování neželezných kovů z technologického hlediska složitější, s čímž se pojí i ekonomicky vyšší náročnost jejich produkce, jsou neželezné kovy díky svým unikátním mechanickým, fyzikálním a zejména pak chemickým vlastnostem prakticky nenahraditelné. Uplatnění nalézají v těch nejnáročnějších představitelných aplikacích. Dále jsou některé neželezné kovy nasazovány v medicíně či biomechanice a to primárně pro svou nízkou měrnou hmotnost a biokompatibilitu.

Tato diplomová práce je zaměřena na optimalizaci speciální svařovací komory pro technologii tavného svařování vysoce reaktivních materiálů, mezi něž patří bezesporu titan a jeho slitiny.

Titan (chemická značka Ti, lat. Titanium) je šedý až stříbřitě bílý, lehký kov. V zemské kůře je poměrně hojně zastoupen, avšak jeho výroba je značně technologicky náročná, z čehož plyne jeho vysoká cena. Jeho hlavní výhodou je pevnost v kombinaci s nízkou hmotností, proto se primárně užívá v leteckém, kosmickém či vojenském průmyslu a to jak v čisté formě, tak ve formě slitin. Mezi jeho další vlastnosti patří vysoká chemická odolnost proti korozi. Odolává působení kyselin a slané vody.

Nevýhodou je jeho značná chemická reaktivita s atmosférickým kyslíkem a dusíkem, zejména za zvýšených teplot, proto je jeho technologické zpracování poměrně náročné. Vysoká reaktivita se projevuje také při svařování, kde je zapotřebí dodržování specifických technologických postupů, tedy nasazení vysoce čistých ochranných atmosfér inertních plynů, nebo svařování ve vakuu.

Titan byl objeven roku 1791 anglickým chemikem Williamem Gregorem v minerálu ilmenitu, pojmenován byl však až roku 1795 německým chemikem Martinem Heinrichem Klaprothem, který jej objevil nezávisle na Gregorovi ve formě oxidu titaničitého (rutilu). Jako čistý kov byl izolován až v roce 1910 M. A. Hunterem, kdy bylo poprvé možno určit jeho teplotu tání (1668 °C).

Titan je devátým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře a po železe, hliníku a hořčíku čtvrtým nejrozšířenějším kovem. Jeho obsah se odhaduje na 5,7-6,3 g/kg. Titan se vyskytuje nejčastěji v minerálu ilmenitu (FeTiO_3) a rutilu (TiO_2) a to jak ve formě krystalů, tak ve formě písků.

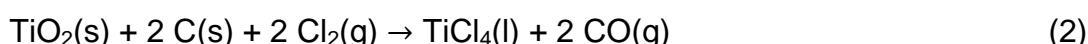
S šedesáti procentním obsahem se k výrobě nejčastěji používá právě rutil. Mezi nejvýznamnější producenty titanu se řadí především Čína, Rusko, Japonsko, Kazachstán, Ukrajina, USA, Kanada, Austrálie, Norsko, Finsko, Sri Lanka či JAR. Více než 95% produkce těžby veškerého titanu je využito za jiným účelem, než je příprava čistého kovu, například jako pigment nátěrových hmot. V tabulce 1 je uvedena roční světová produkce Ti v tunách a její největší producenti.

Tab. 1.1: Světová produkce Titanu v letech 2010-2013 /34/

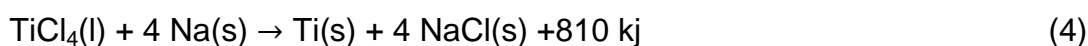
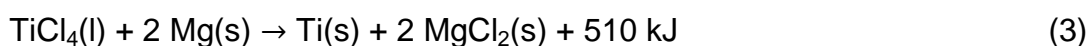
Region		2010	2011	2012	2013
	Svět	137 000	186 000	200 000	222 000
1	Čína	57 800	60 000	80 000	100 000
2	Rusko	25 800	40 000	44 000	45 000
3	Japonsko	31 600	56 000	40 000	40 000
4	Kazachstán	14 500	20 700	25 000	27 000
5	Ukrajina	7 400	9 000	10 000	10 000

2 Způsoby výroby titanu a jeho vlastnosti

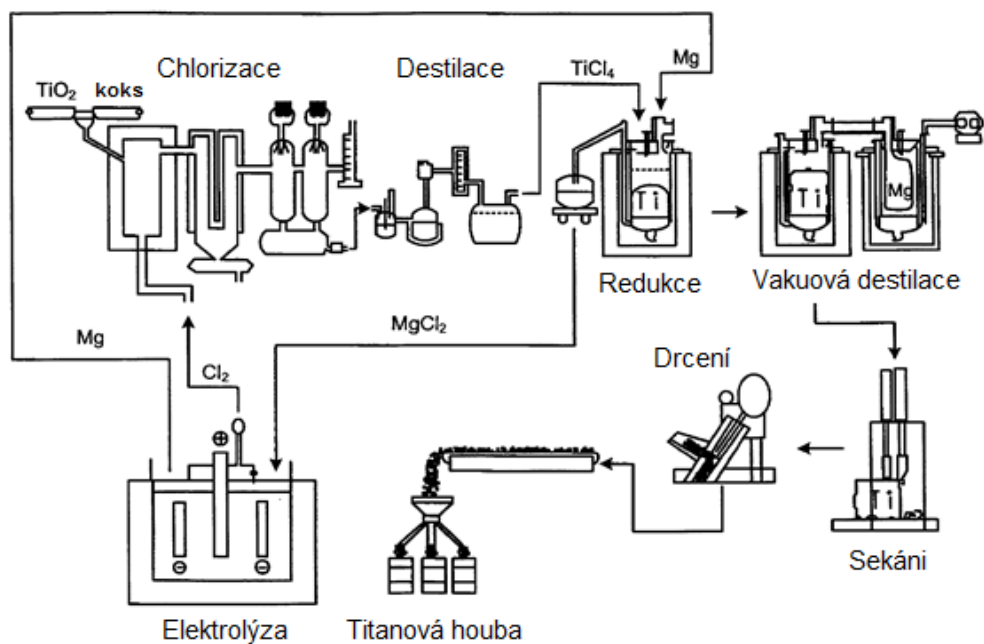
Při přípravě čistého kovu je nejprve nutné přetvořit přírodní formu minerálů obsahujících titan na chlorid titaničitý. Ten se ve volné přírodě nevyskytuje, nejobvyklejší surovinou pro jeho výrobu je rutil a ilmenit. Pro získání chloridů titaničitého se uplatňuje několik procesů chemické rafinace. V každém z těchto chemických postupů, popsaných v rovnicích (1) a (2), se vyskytuje jako mezi-surovina chlorid titaničitý TiCl_4 . Chlór je dodáván do reakce ve formě kyseliny chlorovodíkové nebo ve formě plynu, uhlík pak ve formě kalcinovaného petrolejového koksu.



Chlorid titaničitý uniká ve formě páry, ta se jímá v kondenzátorech. Před vlastní redukcí se chemicky čistí od průvodních kovů (Fe, V, Si) a znovu se destiluje. Z chloridu titaničitého je nadále extrahován titan ve své čisté formě. Existují dva hlavní postupy extrakce čistého titanu. Je to Krollova metoda využívající lázně roztaveného hořčíku, popsána chemickou rovnicí (3), či obdobný Hunterův proces za použití lázně sodíku, s chemickou reakcí popsanou v rovnici (4). Obě tyto reakce jsou silně exotermní a probíhají v reaktoru pod atmosférou ochranného plynu. Na obrázku 2.1 je schematicky znázorněn postup výroby titanu Krollovou metodou.



Jako zajímavost lze uvést, že produkce titanu v průmyslovém měřítku byla v padesátých letech 20. století výsadou pouze tehdejšího Sovětského svazu. Postup jeho výroby byl přísně střežen a pro státy západního světa byl ukořistěn až pomocí průmyslové špionáže. Titan byl považován za jednu ze strategických surovin v následující Studené válce, zejména pro jeho potřebu při stavbě balistických raket a v letectví, dále pak pro své použití ve formě tzv. kosmických slitin používaných v kosmonautice a dobývání vesmíru v 60. a 70. letech.



Obr. 2.1: Krollův proces výroby titanu /8/

Další možné způsoby výroby titanu

Za účelem snadnější a ekonomicky méně náročné výroby titanu v průmyslovém měřítku, bylo navrženo několik dalších experimentálních procesů jeho výroby. Například elektrolytický proces, redukce chloridu titaničitého vodíkem či termický rozklad chloridu titanatého (TiCl_2). Žádná z těchto metod však prozatím nebyla dotažena až do fáze nasazení v průmyslovém měřítku, tak jako Krollův a Hunterův proces.

Při použití elektrolyzy se titan připravuje pouze z jeho roztavených solí, přičemž výchozí látkou mohou být různé sloučeniny, například samotný oxid titaničitý TiO_2 . Ten se dále elektrolyticky rozpouští v lázních na bázi fosforečnanů. Problém nastává se zbytkovým TiO_2 , který se zpětně vylučuje z čistého titanu.

Byly vypracovány i metody elektrolyzy chloridu titaničitého (TiCl_4) ve dvoustupňovém elektrolyzátoru. Kde je elektrolytem roztavená lázeň chloridu stronnatého (SrCl_2) a chloridu sodného (NaCl), nebo pouze roztavená lázeň chloridu sodného, do níž se přivádí chlorid titaničitý. Výhodou elektrolytických způsobů výroby je možnost dosažení vysoké chemické čistoty titanu. Dosud se však žádný ze zmíněných elektrolytických postupů nepodařilo dovést do fáze jeho nasazení v průmyslovém měřítku. Elektrolytický proces se v menším měřítku uplatňuje při zpracování titanového odpadu, především u jeho slitin.

Dalším možným způsobem výroby je redukce chloridu titaničitého v elektrickém oblouku umožňující získávat přímo kovové ingoty. Největší problém zde představuje regenerace nadbytečného vodíku. Posledním způsobem umožňujícím získat čistý titan je metoda termického rozkladu. Tato metoda probíhá ve vakuu při teplotách nad 800°C za vzniku kovového titanu a chloridu titaničitého. Vysoké nároky tohoto procesu představuje dodržení přesných chemicko-technologických podmínek, tedy teploty a reakčního času.



*Obr. 2.2.a: Titanová houba /9/;
Obr. 2.2.b: Titan ve formě ingotů a desek /10/*

Tavení titanu

Koncovým produktem chemické rafinace je tzv. titanová houba (obr. 2.2.a), která ještě není vhodná k dalšímu průmyslovému zpracování. Je nutné jí tavením převést na lépe zpracovatelné polotovary nebo přímo na odlitky. Ingoty a desky vzniklé přetavením se dále tváří. Titan je pak běžně dostupný ve formě tyčí, trubek, desek, plechů, pásků a drátů (obr. 2.2.b).

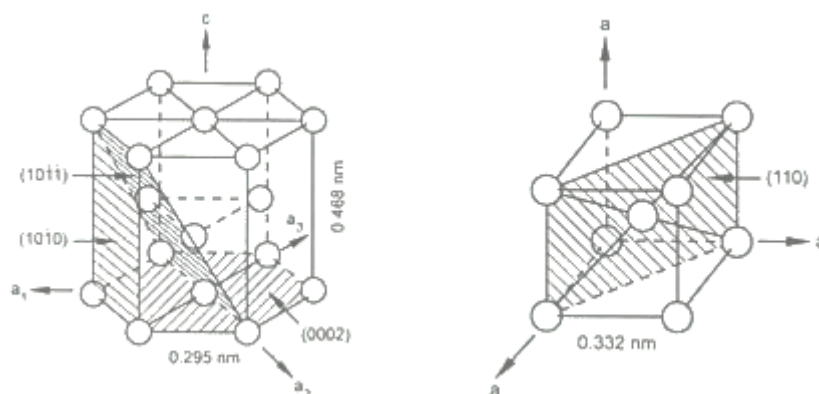
Při tavení titanu je v peci vyvozeno vakuum, nebo je přivedena atmosféra argonu. Titan při tavení velice silně reaguje se vzdušnými plyny, ale také se všemi běžnými materiály vyzdívek. Jako nejvhodnější vyzdívkový materiál se ukázal grafit, především díky jeho nízké ceně a možnosti obrábění do požadovaných tvarů. Grafit z pecní vyzdívky se ale v titanu rozpouští, díky čemuž dochází ke zvyšování jeho tvrdosti a snížení tažnosti. To způsobí obtížnější následné zpracování tvářením. V současnosti se pro přetavení titanové houby používají hlavně pece elektronové, plasmové, obloukové nebo pece indukční.

2.1 Fyzikální vlastnosti titanu

Titan je kov stříbřitě-šedé barvy. Jeho atomová hmotnost je 47,90 [-]. Teplota tání je rovna 1668 °C a teplota varu je dosažena při 3260 °C. Titan v tuhém stavu prochází alotropickou transformací při 882 °C. Pod teplotou 882 °C se vyskytuje ve své α -modifikaci, a to s šesterečnou (hexagonální) těsně uspořádanou mřížkou, mřížkové parametry jsou $a = 0,29506$ [nm] a $b = 0,46788$ [nm]. Nad touto teplotou se až do své teploty tání vyskytuje v tzv. β -modifikaci, s krychlovou (kubickou) prostorově středěnou mřížkou. Mřížkový parametr tohoto uspořádání je roven 0,31650 [nm]. Hustota titanu při 25 °C je rovna 4508 [kg/m³]. Jako kov vykazuje paramagnetické chování. V tabulce 2.1 jsou popsány základní fyzikální a chemické vlastnosti titanu.

Tab. 2.1: Přehled fyzikálních a chemických vlastností titanu /35/

atomové číslo	22
atomová hmotnost	47,867
teplota tání	1668 °C
teplota varu	3260 °C
oxidační čísla	+II, +III, +IV
elektronová konfigurace	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ⁶ 3d ² 4s ²
skupenské teplo tání	104 [cal/g]
skupenské teplo fázové přeměny	17,7 [cal/g]
hustota	4508 [kg/m ³]
teplota alotropické transformace	882 °C



Obr. 2.3.a: Hexagonální mřížka α -modifikace titanu /11/;

Obr. 2.3.b: Kubická mřížka β -modifikace titanu /11/

2.2 Chemické vlastnosti titanu

Nevýhodou titanu je jeho vysoká afinita ke kyslíku a dusíku, ta je nevýhodou zejména za vyšších teplot. Vzniklé oxidy a nitridy sice výrazně zvyšují tvrdost titanu, ale mají nepříznivý vliv na jeho křehkost. To přináší problémy zejména při tepelných technologiích zpracování titanu, např. svařování.

Titan je prvek s atomovým číslem 22, společně se Zirkonem, Hafniem a Rutherfordiem je členem 4. skupiny v periodické tabulce prvků.

The image shows a periodic table of elements with color-coded groups. The groups are: Někovy (green), Alkalické kovy (orange), Kovy alkalických zemin (yellow), Vzácné plyny (blue), Polokovy (light green), Halogeny (teal), Přechodné kovy (pink), Kovy (grey), Lanthanoidy (light orange), and Aktinoidy (purple). Titanium (Ti) is highlighted in a larger pink box at atomic number 22, with its symbol, name, atomic weight (47,867), and group/period (2-8-10-2) listed. The lanthanoid and actinoid series are shown below the main table.

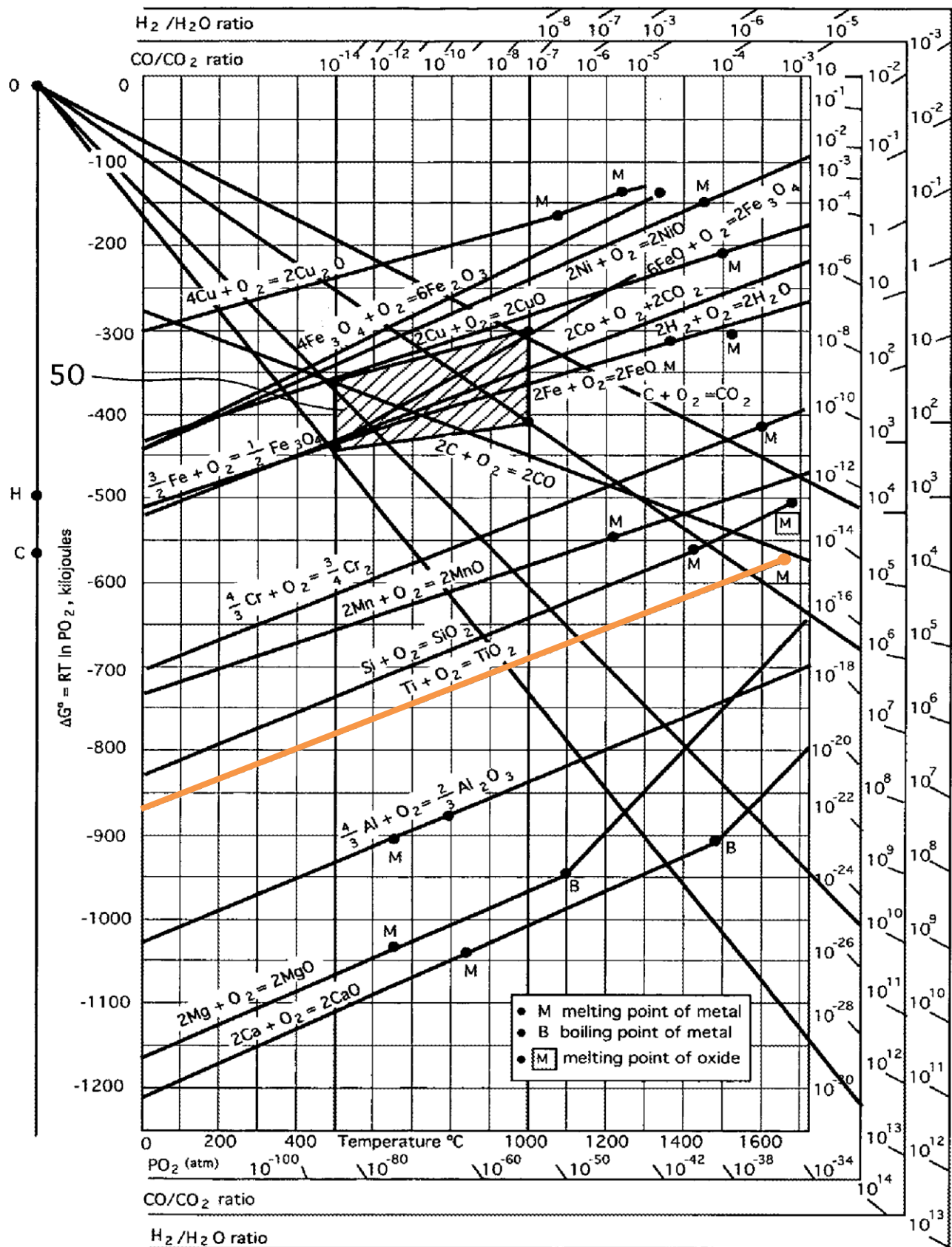
Obr. 2.4: Titan v periodické soustavě prvků /12/

Velkou výhodou titanu je jeho korozivzdornost. Korozní odolnost titanu je zapříčiněna tenkou pasivační vrstvou, které se tvoří na jeho povrchu působením okolní atmosféry, podobně jako je tomu u ostatních kovů 4. skupiny nebo například u hliníku. Vzniku tenké ochranné vrstvy napomáhá přítomnost oxidačních činidel, vzdušného kyslíku v běžné atmosféře či vlhkosti ve vodním prostředí. Titan odolává i mořské vodě nebo působení kyselého a zásaditého prostředí.

Schopnost pasivace si udržuje jak v přítomnosti většiny minerálních kyselin, tak i roztoků alkalických hydroxidů. Zvolna se rozpouští v horké HCl, hůře odolává HF, naopak HNO₃ jeho povrch pasivuje.

Tato korozní odolnost titan předurčuje k nasazení v těch nejnáročnějších prostředích, jakými jsou právě mořská voda či reaktory v chemickém průmyslu. Výhodou je také odolnost vůči elektrochemické korozi. Uplatnění nalézá také v lékařství, jako biokompatibilní materiál. Je hojně užíván ve funkci kloubních náhrad, externích dlah, šroubů a aparátů pro nápravu tříštivých zlomenin. Lze jej použít ve formě destiček při porušení celistvosti lebky, která jako kost nezarůstá, dále také v ortodoncii a stomatologii.

Ochranná vrstva TiO_2 se však za působení vysokých teplot rozpadá a opět se začne projevovat vysoká afinita titanu. Afinita chemické reakce – veličina ΔG ($p, T = \text{konst.}$) kvantitativně určuje tzv. afinitu chemické reakce, tj. schopnost látek vstupovat do reakce. Afinita (slučivost) je záporná hodnota změny Gibbsovy energie ($-\Delta G$) při podmínkách konstantního tlaku a konstantní teploty. Afinitu jednotlivých prvků ke kyslíku popisuje Ellinghamův diagram na obr. 2.5.



Obr. 2.5: Ellinghamův diagram /13/

2.3 Mechanické vlastnosti titanu

Čistý titan je charakteristický zejména svou nízkou měrnou hmotností, dobrou tažností a poměrně vysokou pevností. Tyto vlastnosti jsou pak velmi závislé na jeho čistotě, hlavně pak tedy na obsahu kyslíku, dusíku, uhlíku a železa.

Mechanické vlastnosti titanu závisí mnohem více na rychlosti zatěžování, než je tomu například u oceli, hliníku a jiných technických materiálů. Tvářením za studena lze podstatně zvýšit jeho pevnost. Vhodným tepelným zpracováním lze dosáhnout meze pevnosti až 1700 MPa, běžně se pak u titanu používaného např. v letectví dosahuje pevností v rozsahu 965 - 1240 MPa.

Jak hodnoty meze kluzu R_e , tak hodnoty meze pevnosti R_m technicky čistého titanu odpovídají hodnotám uvedených mezí u středně či nízkolegovaných konstrukčních ocelí. Na hodnoty vrubové houževnatosti má největší vliv obsahu vodíku v titanu. Podle hodnot vrubové houževnatosti nelze u tohoto materiálu posuzovat ostatní mechanické vlastnosti měřeného vzorku. Za minimální hodnotu vrubové houževnatosti je možné považovat 50 [J.cm⁻²]. U vzorků s vysokou čistotou však může tato hodnota překročit i 100 J/cm². /36/

V korozivním prostředí se mez únavy titanu nesnižuje. U vzorků s hladkým povrchem bývá hodnota meze únavy v ohybu větší než 50 % meze pevnosti v tahu. Vrubem se hodnota meze únavy snižuje o 25 až 30 %.

Titan má vysoký bod tání (1668 °C), pro aplikace za vysokých teplot však není vhodný. Při zvýšených teplotách u něj rychle klesá hodnota pevnosti. Při teplotách vyšších než 300°C je hodnota pevnosti titanu nižší než u běžných nízkouhlíkových ocelí. /36/

2.3.1 Vliv nečistot na mechanické vlastnosti titanu

Tažnosti titanu značně závisí na množství obsažených nečistot. Titan má vyšší hodnoty tažnosti než legované oceli srovnatelné pevnosti /36/. Příměsi v titanu mají značný vliv na jeho mechanické vlastnosti. Prvky jako kyslík, dusík, vodík a uhlík, které tvoří s titanem intersticiální tuhé roztoky, mají na jeho vlastnosti podstatnější vliv než prvky jako železo a křemík, které s ním tvoří substituční tuhé roztoky /11/.

Kyslík a dusík - výrazně stabilizují α -fázi titanu. Titan k těmto prvkům vykazuje vysokou afinitu, při běžných teplotách pasivují jeho povrch. Při zvýšených teplotách však vnikají hlouběji do materiálu, zejména pak při technologii svařování. Při koncentracích v desetinách procenta výrazně zvyšují pevnost a tvrdost. Nevýhodou je však výrazné snížení tažnosti a houževnatosti. Tyto prvky dále snižují deformační schopnost titanu při tvářením za studena.

Vodík - jeho obsah nejvíce ovlivňuje vrubovou houževnatost titanu. Tento pokles hodnoty vrubové houževnatosti je zapříčiněn především stárnutím titanu. Při stárnutí dochází k precipitaci hydridu titanu a s tím spojenému zkrěhnutí titanu. Z tohoto důvodu je kladen velký důraz na snížení obsahu vodíku pod hodnotu 0,01 %. Odstranění vodíku ze struktury titanu se provádí žíháním ve vakuu při 800 až 900 °C, a to po dobu 6 až 10 hodin. Pokud jeho obsah nepřekročí 0,03%, nemá podstatný vliv na pevnost ani tvrdost materiálu. /1/

Uhlík - jeho rozpustnost ve fázích α i β je značně omezená, při běžných teplotách na méně než 0,25 %. Do této koncentrace uhlík zvyšuje mechanické vlastnosti titanu. Při vyšších koncentracích vytváří karbid titanu TiC. Uhlík má velice nepříznivý vliv na svařitelnost titanu, proto se jeho obsah udržuje pod hodnotou 0,1 %. /1/

Železo - jedná se o obvyklou příměs ve struktuře titanu, je to pozůstatek redukční metody za pomoci hořčíku. Železo mírně zvyšuje pevnost a tvrdost titanu, ale zhoršuje jeho tvárnost. Stejně jako u uhlíku, pokud jeho obsah nepřekročí koncentraci 0,1 %, je jeho vliv na mechanické vlastnosti zanedbatelný. /36/

Křemík - stejně jako u železa je jeho výskyt pozůstatkem chemického procesu výroby titanu. Zhoršuje hlavně houževnatost, na hodnotu pevnosti nemá výraznější vliv. Koncentrace křemíku je obvykle do 0,1 %. /36/

Jak je uvedeno výše, chemické příměsi ve struktuře titanu mají velice nepříznivý vliv na jeho mechanické vlastnosti. Při jeho výrobě jsou nutná taková technologická opatření, aby se obsahy sledovaných prvků držely na co možná nejnižší úrovni či v předepsaných intervalech pro jednotlivé jakostní třídy titanu (Grade).

Vysoká reaktivnost titanu za zvýšených teplot a s tím spojený nárůst obsahu nečistot, činily po dlouhou dobu problémy právě při výrobě. Dokonalé zvládnutí výrobního procesu bylo podmíněno přesným dodržováním chemicko-technologického postupu. Tyto přísné požadavky při výrobě titanu se odrážejí v ceně titanu dle tříd jeho chemické čistoty.

V první řadě pak dodržení nízkého obsahu vzdušných plynů ve struktuře, tedy příměsí vnikajících do materiálu z okolní atmosféry, je podmíněno nasazením atmosfér inertních plynů či zpracování ve vakuu. Tyto technologické požadavky nalézají uplatnění při dalším technologickém zpracování titanu kdy je přítomna zvýšená teplota. Technologické postupy zpracování titanu budou podrobněji popsány v podkapitole 3.1.

3 Komerčně čistý titan

Komerčně čistý titan se vyrábí v několika jakostních úrovních, tzv. *Grade*. Hovoříme-li o komerčně čistém titanu, pak do této kategorie spadají Grade 1 až 4. Jednotlivé Grade se liší zejména svojí chemickou čistotou, tedy obsahem příměsných prvků. Tato chemická čistota se odvíjí od způsobu výroby titanu. Náročnější požadavky na výrobu jakostnějších tříd titanu a následná chemická rafinace se promítají do jeho vyšší koncové ceny. Od chemické čistoty jednotlivých skupin jakostí titanu se odvíjí jejich mechanické a technologické vlastnosti. V tabulce 3.1 jsou znázorněny jednotlivé třídy titanu, jejich označení, mechanické vlastnosti a oblasti použití.

Tab. 3.1:- Přehled vybraných Grade titanu /14/, /37/

Druh titanu	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Vlastnosti a použití
Titan Grade 1 3.7025	240 – 345	170 - 220	25 - 37	druhý nejpoužívanější, vynikající tažnost a svařitelnost, nižší pevnost
Titan Grade 2 3.7035	345 – 485	275 – 450	20 - 28	nejpoužívanější, vyvážená kombinace tažnosti spolu s dostatečnou pevností, velmi dobrá svařitelnost
Titan Grade 3 3.7055	460 - 590	380 – 550	18 - 22	méně obvyklý druh, střední tažnost, zvýšená pevnost, velmi dobrá svařitelnost
Titan Grade 4 3.7065	550 – 685	483 – 560	15 - 23	méně obvyklý druh, střední tažnost, zvýšená pevnost, velmi dobrá svařitelnost
Titan Grade 5 3.7165	895 - 1000	825 - 910	10 - 18	slitina titanu s prvky 6Al-4V, svařitelná a může být vytvrzena, použití v konstrukčních prvcích pro letecký, kosmický a automobilový průmysl, použití do 400°C
Titan Grade 7 3.7235	345 – 485	275 – 350	20 - 28	méně obvyklý druh, zvýšená korozní odolnost, mechanické hodnoty stejné jako Grade 2, velmi dobrá svařitelnost
Titan Grade 11 3.7225	240 - 345	170 - 220	25 - 37	méně obvyklý druh, zvýšená korozní odolnost, mechanické hodnoty stejné jako Grade 1 obsahuje však Palladium, velmi dobrá svařitelnost

3.1 Technologické vlastnosti komerčně čistého titanu

Z technologického hlediska jsou hodnoceny především:

Tvářitelnost titanu je ovlivněna primárně chemickým složením, tedy danou třídou jakosti titanu, a dále podmínkami deformace. Obvyklé obsahy chemických nečistot u nižších jakostí titanu, tedy zejména obsahy uhlíku, kyslíku a dusíku, nemají podstatný vliv na změnu tvářitelnosti za tepla. Vliv chemických nečistot ve struktuře se projevuje výrazným zpevněním při deformaci za studena.

Komerčně čistý titan je dobře tvářitelný za tepla i za studena. Tvářitelnost za pokojové teploty je nižší, než u běžných konstrukčních materiálů zpracovávaných touto technologií. Díky hexagonální struktuře α -modifikace titanu vzniká při jeho tváření výrazná deformační textura. Tu je možné volbou vhodného technologického postupu, či případným tepelným zpracováním do značné míry omezit, nikoliv však zcela odstranit. Anizotropie mechanických vlastností výrobku z titanu však není vždy nežádoucí.

Titan lze tedy zpracovávat na běžných zařízeních, podobně jako nerezavějící oceli nebo slitiny niklu. Operace tváření za tepla mají ovšem určité zvláštnosti. Titan lze ohřívat jen na nezbytně nutné teploty, kde limitní je transformační teplota 882°C. Je nutné vyhnout se redukční atmosféře při ohřevu a zbytečně dlouhým expozicím na vyšších teplotách. Zde se s výhodou používá indukční ohřev.

Technologie zpracování kování a válcováním za tepla lze tedy bez obtíží použít, naopak protlačování je velice obtížné. Vlivem zadírání titanu v nástroji dochází ke značnému opotřebení. Důsledkem je tedy značná spotřeba nástrojů pro tuto technologii, doprovázena špatnou jakostí povrchu výrobku. Z tohoto důvodu se technologie jako protlačování či lisování volí jen v případech, kdy nelze z technických nebo ekonomických důvodů uplatnit kování či válcování. Válcování titanu za studena probíhá rovněž bez obtíží.

Kování a válcování za tepla se používá při výrobě plechů, tyčí a trubek. Trubky jsou svařované i bezešvé. Výroba tyčí a drátů tažením za studena vyžaduje menší úběry, nižší rychlosti a použití speciálních maziv.

Obrobiteľnosť titanu je pomerne špatná. To je spôsobeno jeho vyššou pevnosťou a malou tepelnou vodivosťou. Tvar trisky umožňuje len minimálny kontakt odobieraného materiálu s nástrojom. V kombinácii s vysokým koeficientom trenia titanu (0,65 až 0,68), dochádza k miestnemu prehriatiu v oblasti odběru trisky až na teploty prevažujúce 1000°C. Ďaký vysokej afinitě titanu k atmosférickému kyslíku a dusíku pri týchto teplotách, dochádza k absorpcii týchto plynů do štruktúry obrobku, to má za následok zkrhnutie a zároveň zpevnenie povrchovej vrstvy (kap. 2.3.1 Vliv nečistot). Vlivem tohoto zpevnenia dochádza k rýchlejšiemu otupovaniu obrábacích nástrojů.

Užitie rýchlořezných olejů a chladicích emulzií pri obráběni titanu nemá na trenie výraznejšii vliv. Pro proces soustruženii jsou nástroje vyrobeny se slinutých karbidů na bázi wolframu či nástroje ze Stelliteu.

Pri nevhodne zvolených parametroch obrábacieho procesu (rýchlosť obráběni, posuv) pro danou geometrii nástroje také dochádza k navařovaniu odobieraného materiálu na břit nástroje. Tento návarek je posléze stržen dále odobieranou triskou a tvorba návarku se opakuje. Tento proces má na povrch nástroje erozivní účinek. Také pro proces frézovani byly původní rýchlořezné oceli nahrazeny nástroji s vyměnitelnými destičkami ze slinutých karbidů podobně jako u procesu soustruženii.

Titan se také špatně brousí, zrna brusiva se velice rychle otupují nebo dochádza k jejich značnému vylamovaniu z brusného kotouče. Chemicky čistý titan navíc chemicky reaguje s některými typy brusiva, což vede k ještě rychlejšiemu opotrebeniu brusného nástroje. Ďalším nepříznivým faktorem ovlivňující proces obráběni je snadná vznětlivost titanových třísek a prachu.

Obrábací proces pro tvorbu výrobků v požadované kvalitě je tedy možný za předpokladu, že místo tvorby trisky bude intenzivně chlazeno a při obráběni bude užito strojů s masivnějšii konstrukci, umožňující větší rychlosti posuvů při nižších rychlostech obráběni. Dále je také nutná častá výměna obrábacích nástrojů, která je podmíněná jejich nadměrným opotrebením.

Svařovani titanu je pomerne náročné, to je dáno jeho fyzikálními vlastnostmi (vysoká teplota tání, nízká tepelná vodivosť, velký měrný elektrický odpor), chemickými vlastnostmi (vysoká afinita ke kyslíku), dále mají na proces svařovani vliv také jeho fázové přeměny.

Ďaký výše zmíněné vysokej afinitě titanu ke kyslíku a dusíku není možné titan svařovat plamenem nebo za pomoci obalených elektrod, lze jej svařovat pod tavidlem, neobsahuje-li tavidlo sloučeniny na bázi kyslíku. Svařovani titanu s jinými kovy je velice obtížné, lze jej však uskutečnit, např. pomoci svařovani výbuchem.

V současnosti se primárně pro svařování titanu používá svařování metodou 141 dle (ČSN) EN ISO 4063 tedy svařování netavicí se elektrodou v inertním plynu (TIG). Používají se inertní plyny vysoké čistoty (Ar 99,999). Při tomto způsobu svařování je nutno zajistit dokonalé krytí místa svaru ochrannými plyny před okolní atmosférou, to je vykoupeno znatelně vyšší spotřebou přiváděného plynu. Další možnosti je svařování ve speciálních vakuovaných svařovacích komorách, kde se uplatňuje svařování pomocí elektronového paprsku a metoda odporového svařování, tedy metody 511 a 21.

Dále se používá svařování v komorách s vnitřní přetlakovou atmosférou inertního plynu. V 50. letech se užívaly komory s atmosférou helia a svařovalo se pomocí elektrického oblouku. V současnosti se uplatňují komory s vnitřní atmosférou Argonu (Ar 99,999), kde je možné uplatit automatické a poloautomatické svařování pomocí laseru nebo komory pro ruční svařování metodou 141 (TIG).

Jako metoda spojování titanu s jinými kovy se uplatňuje zejména metoda pájení, i zde se jedná o tepelný proces, je tedy nutné užití ochranné atmosféry inertního plynu. Titan lze za pomoci stříbrných, hliníkových pájek dobře spojovat s nerezovými oceli, toho je využito např. u plátování titanem při výrobě chemických reaktorů atd.

Tepelné zpracování u titanu a jeho slitin má svá specifika. U výrobků z komerčně čistého titanu připadá v úvahu jen žihání k odstranění vnitřního pnutí po svařování, ohýbaní nebo tažení. U jeho slitin, pak například rekrytalizační žihání po vyčerpání zásoby plasticity materiálu při tváření za studena.

Žihání k odstranění vnitřního pnutí se provádí po dobu 15 až 30 minut při teplotách 600°C až 750°C. Rekrytalizační žihání probíhá při teplotách okolo 800°C. /14/

Výše zmíněná reaktivnost titanu s atmosférickými plyny představuje nebezpečí také při tepelném zpracování. Tenké plechy a dráty je nutno žihat ve vakuu nebo v ochranné atmosféře velice čistého argonu.

Odstranění pasivační vrstvy oxidů z povrchu je často obtížné. Provádí se mořením v roztocích kyselin. Při vzniku oxidické vrstvy za vyšších teplot je nutné použít máčení v roztavených solích, případně mechanické úpravy povrchu, tedy kartáčování, pískování a broušení v kombinaci s mořením.

3.2 Titan Grade 2

Optimalizace funkce svařovací komory probíhala na vzorcích titanu jakostní třídy Grade 2. Titan Grade 2 byl zvolen z důvodu jeho nečastějšího užití v průmyslových aplikacích. Nabízí optimálně vyváženou kombinaci pevnosti a tažnosti. Je vysoce korozně odolný v oxidačním a lehce redukčním prostředí včetně chloridů. V tabulkách 3.1, 3.2 a 3.3 je znázorněn obsah příměsí v titanu Grade 2 a jeho fyzikální a mechanické vlastnosti, na obrázcích 3.1 a 3.2 je znázorněna závislost meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m na teplotě.

Tab. 3.1:- Chemické složení titanu Grade 2 /14/

Chemické složení (hmotnost %)										
O	N	C	H	Fe	Al	V	Ni	Mo	Jiné	Rezidua
0,25	0,03	0,08	0,015	0,3	-	-	-	-	-	0,4

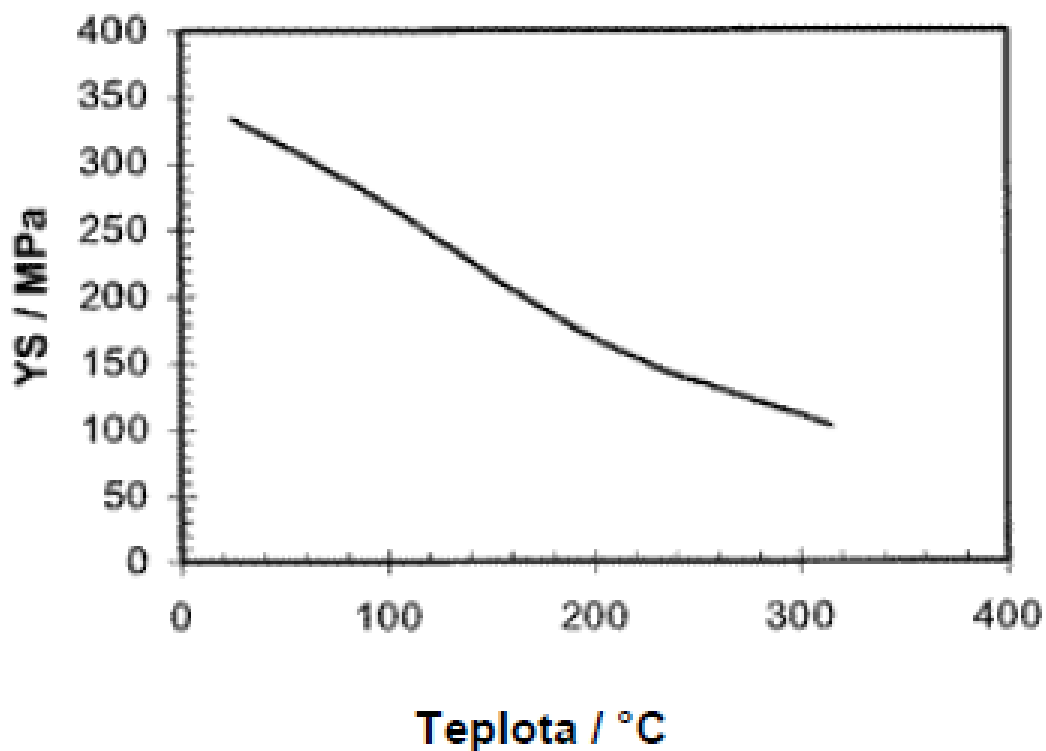
Tab. 3.2:- Přehled fyzikálních vlastností titanu Grade 2 /14/

Fyzikální vlastnosti	
Bod tání, ± 15 °C	1660 °C
Hustota	4.51 [kg/m ³]
Beta fáze, ± 15 °C	910 °C
Teplotní roztažnost, 20 - 100 °C	$8.6 \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]
Teplotní roztažnost, 0 - 300 °C	$9.7 \cdot 10^{-6}$ [K ⁻¹]
Teplotní vodivost při pokojové teplotě	20.8 [W/mK]
Teplotní vodivost, 400 °C	15 [W/mK]
Poissonova konstanta	0.34 - 0.40
Měrný el. odpor - pokojová teplota	56 [μΩ*m]
Měrná tepelná kapacita - 25 °C	520 [J/kg ⁻¹ K ⁻¹]
Měrná tepelná kapacita - 400 °C	600 [J/kg ⁻¹ K ⁻¹]

Tab. 3.3:- Přehled mechanických vlastností titanu Grade 2 /14/

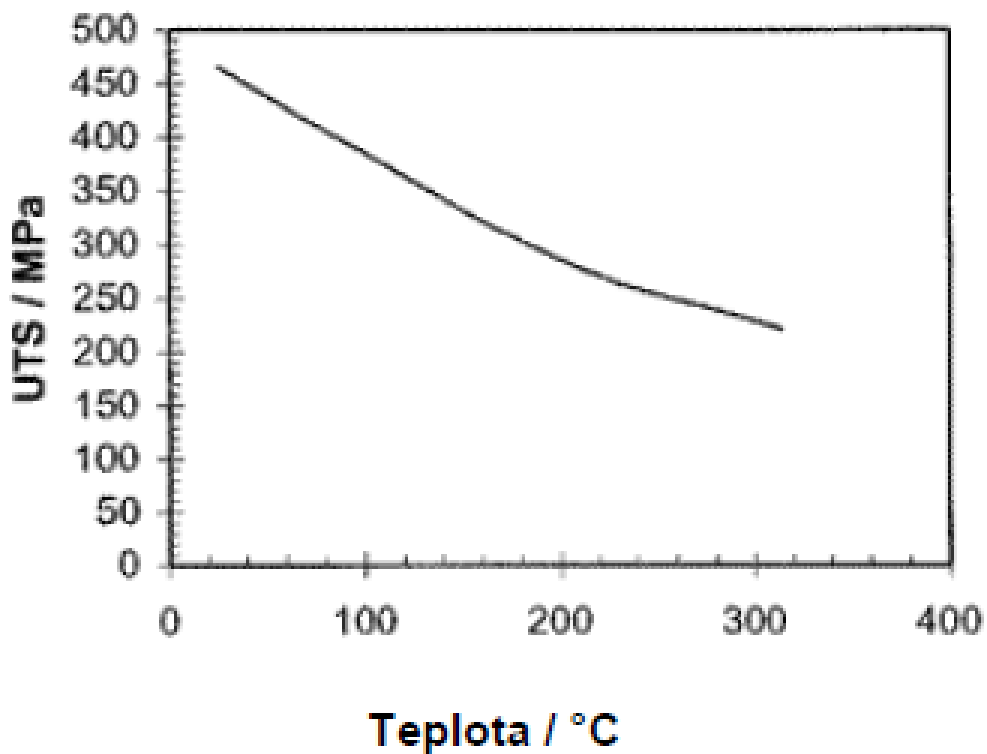
Mechanické vlastnosti - 25°C		
	Minimální hodnoty	Typické hodnoty
Mez kluzu	275 MPa	350-450 MPa
Mez pevnosti v tahu	345 MPa	485 MPa
Prodloužení v 50 mm, A5	20%	28%
Redukce na plochu	30%	55%
Tvrdość	-	160-200 HV
Modul pružnosti	-	103 GPa
Vrubová houževnatost Charpy	-	40-82 J

Mez kluzu vs. teplota



Obr. 3.1: Graf závislosti meze kluzu $R_{p0,2}$ titanu Grade 2 na teplotě /14/

Mez pevnosti v tahu vs. teplota



Obr. 3.2: Graf závislosti meze pevnosti R_m titanu Grade 2 na teplotě /14/

3.2.1 Technologické vlastnosti titanu Grade 2

Titan Grade 2 může být tvářen za tepla i studena použitím hydraulického, ohraňovacího a přetahovacího lisu nebo bucharu. Materiál disponuje podobnými vlastnostmi jako nerezové oceli třídy AISI 300.

Tváření za tepla zredukuje odpružení i potřebné tvářicí síly a zvýší celkovou tažnost materiálu. Při tváření za studena se materiál chová podobně jako austenitická nerez ocel. Při vícenásobných operacích tváření za studena se doporučuje mezi jednotlivými kroky provést odstranění vnitřního pnutí materiálu, aby nedocházelo k jeho nežádoucím defektům či trhání. Po dokončení tváření je vhodné provést následné žíhání k obnovení optimálních vlastností materiálu.

Příklad postupu žíhání je následovný. Ohřev na teplotu 700°C, výdrž po dobu 2 hodin a následné ochlazení na vzduchu. Pro relaxaci napětí je nutné výrobek zahřát na 480°C s výdrží na této teplotě po dobu 45 minut. /14/

Obrobitelnost titanu Grade 2 a chování tohoto materiálu při obrábění lze přirovnat k podmínkám při obrábění nerezové oceli AISI 316. Doporučený postup obrábění zahrnuje vysoký přísun chladicího média za účelem kompenzace nízké tepelné vodivosti materiálu, nízké otáčky a vysoké rychlosti posuvu. Pro obrábění je vhodné použít wolfram-karbidové nástroje pod označením C1-C4 nebo nástroje pro vysoké rychlosti na bázi kobaltu.

Titan Grade 2 se velmi dobře svařuje. Jedná se o převážně jednofázový materiál, mikrostruktura α -fáze není nijak zásadně ovlivněna tepelným působením svařovacích teplot. Při dodržení správného technologického postupu jsou mechanické vlastnosti správně provedeného svaru shodné s vlastnostmi základního materiálu a vykazují dobrou tažnost (tvárnost). /14/

Typické aplikace titanu Grade 2

Pro svou korozní odolnost se uplatňuje v chemickém a námořním průmyslu. Využíván je také v různých konstrukčních aplikacích, kde je důležitý vyvážený poměr pevnosti a tvárnosti, tj. např. v leteckém či automobilovém průmyslu. Dále slouží k výrobě tepelných výměníků, chlornanových systémů, požárních systémů atd. /14/

3.3 Obecné zhodnocení vlastností titanu

Příznivé vlastnosti titanu a jeho slitin:

- nízká měrná hmotnost
- vysoká měrná pevnost (poměr pevnosti a hmotnosti)
- vysoká korozivzdornost i ve slané vodě - tvorba ochranné pasivační vrstvy TiO_2
- chemická odolnost - odolává většině kyselin a hydroxidů
- výborná biokompatibilita
- vysoká vrubová houževnatost - možnost konstrukčního nasazení za nízkých teplot

Nepříznivé vlastnosti titanu a jeho slitin:

- vysoké náklady na výrobu a zpracování
- vysoká reaktivnost za zvýšených teplot
- vysoká afinita ke kyslíku a dusíku
- technologicky náročný proces obrábění
- vysoké technologické nároky při svařování
- špatné třecí vlastnosti
- obtížnost zpracování vratného odpadu

4 Aplikační využití titanu

Titan se využívá z 95% v jiné formě, než jako čistý kov. Například, při výrobě pigmentů nátěrových hmot, obalů elektrod pro svařování, výrobě keramiky, ve formě karbidů řezných destiček a povlaků řezných nástrojů.

Praktické využití Titanu jako kovu v jeho čisté formě nebo ve formě slitin je vhodné jen v případě, kdy je maximálně využito jeho nízké měrné hmotnosti za současného uplatnění jeho vynikajících mechanických vlastností a korozivzdornosti.

Bereme-li v potaz jeho extrémně ekonomicky a technicky náročnou výrobu, pro běžné civilní aplikace je jej možno s výhodou nahradit levnější alternativou na bázi nerezových ocelí, slitin hliníku či slitin hořčíku. Provozní nasazení titanových komponent v civilním sektoru je tedy podmíněno nemožností nasazení běžnějších konstrukčních materiálů.

4.1 Uplatnění titanu v kosmonautice, letecké a vojenské aplikace

Počátky průmyslové výroby titanu v 50. letech počítaly s jeho strategickým využitím hlavně ve vojenství, kosmických technologiích a speciálních aplikacích leteckého průmyslu. Titan a jeho slitiny jsou proto základním materiálem při výrobě skeletů a nádrží raketoplánů. Společně s keramickými tepelnými štíty slouží jako povrchové panelové díly kosmických objektů jako jsou orbitální družice, vesmírné sondy či vesmírné stanice.

V leteckém průmyslu, v civilním i vojenském sektoru nacházejí využití při výrobě zvláště namáhaných součástí letadel, jako jsou skelety letounů nebo lopatky kompresorů proudových motorů. Na obrázku 4.1.a je znázorněn raketoplán Columbia při svém první misi na oběžnou dráhu v roce 1981, na obr. 4.1.b je zobrazen motor Rolls-Royce pro Boeing 787 Dreamliner, při jehož konstrukci bylo hojně využito titanu, titanových slitin a kompozitních materiálů.



*Obr. 4.1.a: Raketoplán Columbia při startu mise STS-1, 14. Duben 1981 /15/
Obr. 4.1.b: Motor Rolls-Royce pro Boeing 787 Dreamliner /16/*

Za zmínku stojí oficiálně nejrychlejší proudový letoun na světě, Lockheed SR-71 Blackbird. V jeho konstrukci bylo hojně využito titanu, včetně povrchových dílů. Tento průzkumný špionážní letoun, který nebyl nikdy sestřelen, létal ve výškách okolo 25 km nad zemí a 27. července roku 1976 s ním dosáhla posádka Joersz/Morgan rychlosti 3 529,56 km/h. Při takto vysokých rychlostech docházelo na jeho povrchu k ohřevu až na 300°C vlivem tření o okolní atmosféru. To způsobovalo teplotní dilatace a letoun se při letu natáhl až o 0,1m. /17/



Obr. 4.2: Lockheed SR-71A Blackbird /18/

Další vojenská využití nalézá titan v konstrukci strukturálních dílů a pasivního pancéřování obrněných vozidel. Na obrázku 4.3 je tank M1 Abrams MBT, při jehož konstrukci bylo využito titanu například pro pohonnou jednotku (jedná se spalovací turbínu). Dále se titan uplatňuje jako materiál pro výrobu lodních šroubů, šroubů ponorek nebo listů rotoru dopravních a bojových vrtulníků (obr. 4.4)



Obr. 4.3: Tank M1 Abrams MBT /19/



Obr. 4.4: Vrtulník AH-64 Apache /20/

4.2 Civilní aplikace titanu

Titan je ve svých aplikacích dále ceněn pro svou vysokou chemickou netečnost k okolnímu prostředí za běžných teplot. Nevyskytuje se nikdy v takové formě, která by mohla být metabolizována živými organismy. Není proto známo žádné zapojení titanu do enzymatických reakcí. /36/

Z tohoto důvodu je titan pro tělo člověka biokompatibilní materiál a nehrozí jeho odmítnutí při voperování do těla pacienta. Titan není toxický jak lokálně, tak ve vztahu k celému organismu. Není karcinogenní a nemá alergenní vlastnosti. Implantát se při kontaktu s tkáněmi po vložení do těla příjemce obalí ochrannou pasivační vrstvou TiO_2 , kde při jejím případném porušení dochází k jejímu samovolnému obnovení.

Důležitý je také modul pružnosti titanu, který je blízký modulu pružnosti lidské kosti. Nedochozí tak k poškozování částí kosti, do kterých byl implantát zasazen. Titan se v lékařství vyskytuje ve formě implantátů, jako jsou: kloubní náhrady, dentální implantáty, ortodontické aparáty, šrouby a destičky při spojování šroubových a tříštivých fraktur kostí aj. V neposlední řadě nalézá uplatnění jako materiál chirurgických nástrojů. Nejčastěji se titan v lékařství vyskytuje v čisté formě jakosti Grade 4, jako slitina Ni-Ti, Ti-15Mo, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-17Nb. /36/

Pro svou korozivzdornost se titan uplatňuje při výrobě zařízení, která jsou vystavena účinkům agresivního kyselého nebo zásaditého prostředí. Používá se pro aplikace kdy je nutný dlouhodobý kontakt s mořskou vodou, tedy součásti lodí a ponorek, jako jsou povrchové panelové díly a lodní šrouby. Jako materiál komponentů jej můžeme také nalézt v zařízeních, sloužících k odsolování (desalinaci) mořské vody.

V chemickém průmyslu je vynikající korozní odolnost využito při výrobě těles chemických reaktorů, nebo pomocí plátování slouží pouze jako jejich chemická výstelka. V každodenním životě se s titanem setkáváme například jako s materiálem pro výrobu luxusních náramkových hodinek nebo šperků. Titan se používá také při výrobě sportovního náčiní, na výrobu golfových holí, horolezeckých cepínů, nožů, tenisových raket a rámu luxusních jízdních kol.

V automobilismu se titan uplatňuje především při konstrukci rámu závodních monopostů F1 a WRC. V soukromé sféře například u automobilů značky Pagani (obr.4.7). Jako kompozitní materiál společně s uhlíkem jej lze nalézt v brzdových kotoučích, rámu a panelových dílech karoserie.



Obr. 4.5.a: Silniční kolo s titanovým rámem /21/;
 Obr. 4.5.b: Prostetická náhrada - 3D tisk titanu /22/



Obr. 4.6.a: Titanové hole na golf /23/; Obr. 4.6.b: Titanové hodinky Roger Dubuis Excalibur /24/; Obr. 4.6.c: Titanové kuchyňské nože Evercut /25/

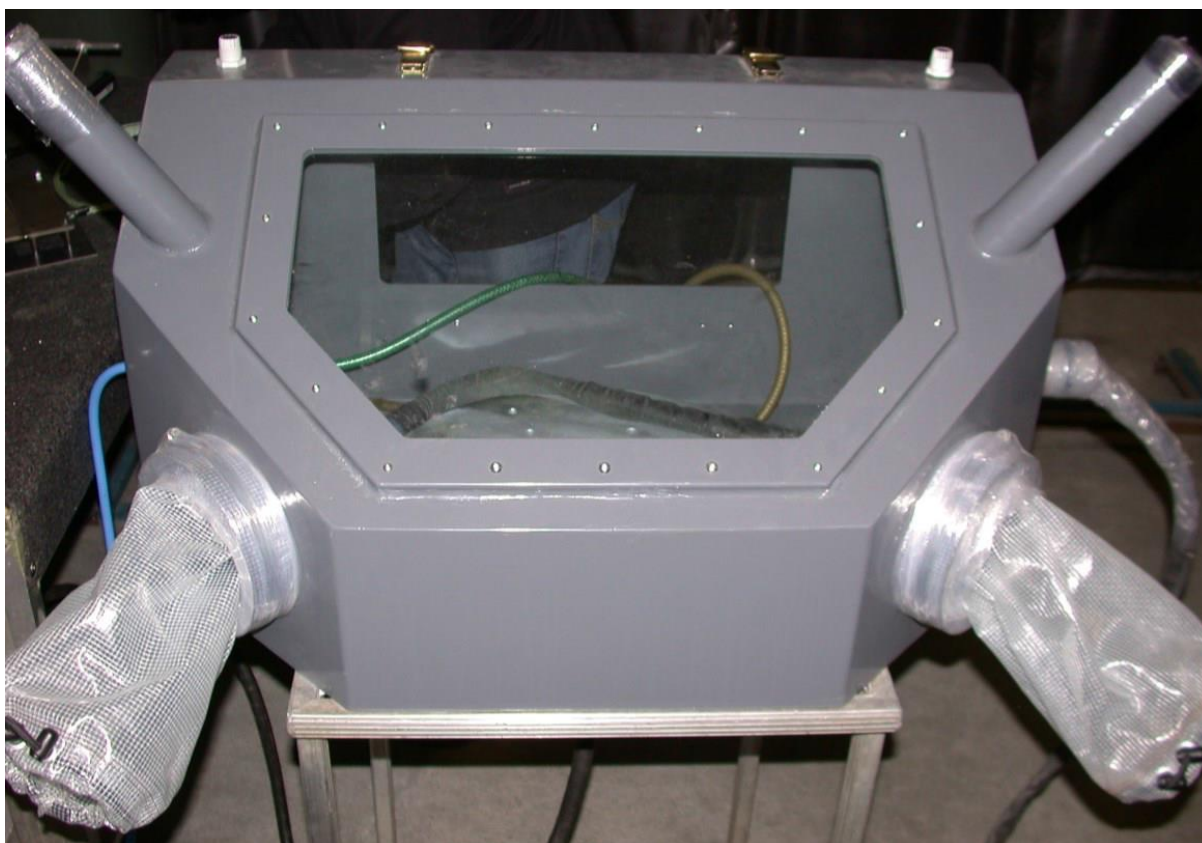


Obr. 4.7: Pagani Zonda R /26/

5 Experimentální ověření funkce svařovací komory

Při experimentálním svařování vysoce reaktivních materiálů je kladen požadavek na dokonalou ochranu svarové lázně a okolní tepelně ovlivněné oblasti (TOO). V našem konkrétním případě při svařování titanu dochází při teplotách vyšších než 500°C ke značnému nárůstu pohlcování atmosférických plynů základním materiálem. To má za následek zvýšení pevnosti a snížení houževnatosti. I malé množství pohlcených plynů v místě svaru či v základním materiálu může vést k úplnému zkřehnutí svarového spoje.

Pro zajištění dobré ochrany v celé oblasti svařování byla zkonstruována speciální svařovací komora, která je ukázána na obrázku 5.1. Úkolem předložené diplomové práce bylo ověření funkce této prototypové komory, s její následnou konstrukční optimalizací jak z hlediska funkčnosti, tak z hlediska ergonomie. Vlastní optimalizace mohla být provedena na základě zkušeností získaných při experimentálním svařování zkušebních svarů z titanu Grade 2. Parametry svařování a výsledné zhodnocení experimentů vedoucích k následným konstrukčním úpravám komory budou popsány v následujících kapitolách.



Obr. 5.1: Experimentální komora pro svařování vysoce reaktivních materiálů /27/

5.1 Návrh a realizace ověřovacích experimentů svařování

Experimentální svařovací komora představuje izolovaný, utěsněný prostor, jimž během svařování protéká ochranný plyn argon o čistotě 99,9993 %. Ochranný plyn je do komory přiváděn spodní částí komory, má vyšší měrnou hmotnost než vzduch a proto jej postupně vytlačuje výfukovými otvory umístěnými v horní části svařovací komory. Před zahájením vlastního experimentálního svařování byl do prostoru komory přiváděn ochranný plyn s průtokem 20 [l.min⁻¹] po dobu 30 minut. Přívod ochranného plynu byl zachován i během celého experimentu. Cílem bylo vytvoření přetlakové atmosféry ochranného plynu a zamezení vniknutí plynů z okolní atmosféry do svařovací komory či základního materiálu a samotné svarové lázně. Svarové spoje byly zkoumány vizuálně a porovnávány se vzhledovou inspekční tabulkou (Příloha: Tabulka 1- Inspekční tabulka svarových spojů titanu), která popisuje množství pohlcených plynů z okolního prostředí. Přípustné množství kyslíku a dusíku pro akceptovatelný vzhled svarového spoje při svařování titanu je 50 [ppm]. /29/

Výsledky experimentálního svařování byly použity pro optimalizaci výpočetního modelu v programu Sysweld. Z tohoto důvodu byl experimentální svar navržen jako dvouvrstvý, aby bylo zohledněno případné vzájemné ovlivnění jednotlivými housenkami. Dále byl svar koncipován tak, aby první z housenek byla vytvářena po celé délce svařence a druhá přibližně do 2/3 svařovaného vzorku. Důvodem byla potřeba zjištění geometrie jednotlivých svarových housenek, nutných k následným numerickým simulacím.

Vlastní svařování bylo provedeno ve firmě SWS Tauchmann, metodou 141 dle ČSN EN ISO 4063. Procesní parametry metody svařování byly snímány po celou dobu svařování pomocí systému WeldMonitor. Jako základní materiál byly použity dva plechy o rozměrech 200x60x5 mm z materiálu Titan Grade 2 (ASTM B 348). Jako přídavný materiál byly použity dráty průměru 1,6 mm a délky 350mm také z titanu Grade 2. Teplotní pole ve zkoumaném vzorku byly snímány pomocí 6 ks termočlánků (obr. 5.4 a obr. 5.5) připojených k měřicí aparatuře DiagWeld. Průběhy teplot měřených jednotlivými termočlánky byly zaneseny do grafů, které jsou součástí přílohy (Příloha: Graf 1 až 11 - Měření průběhu teploty).

Chemické složení použitého základního materiálu Titan Grade 2 získané z materiálového atestu je uvedeno v tabulce 5.2. Typické hodnoty mechanických vlastností pro Titan Grade 2 byly uvedeny v kapitole 3.2 *Titan Grade 2*. V tabulce 5.3 jsou uvedeny naměřené hodnoty mechanických vlastností pro uvedenou tavbu. Jako přídavný materiál byl doporučen materiál stejného chemického složení.

Tab. 5.2.: Chemické složení základního materiálu získané z atestu /27/

N2 [%]	C [%]	H2 [%]	Fe [%]	O2 [%]	Ostatní prvky [%]		Ti [%]
					Jednotlivě	Celkem	
0.03 max.	0.08 max.	0.015 max.	0.3 max.	0.25 max.	0.1 max.	0.4 max.	Zbytek
0,01	0,01	0,002	0,06	0,10	< 0,1	< 0,4	Zbytek

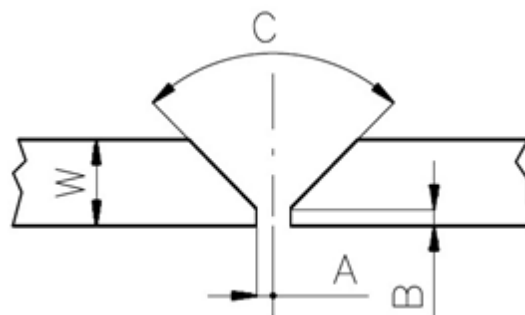
Tab. 5.3.: Mechanické vlastnosti použité tavby vzorků /27/

Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Rp 0,2 [MPa]	Prodloužení [%]	Kontrakce [%]
≥ 345	≥ 275	≥ 20	≥ 30
477	364	25	39

Návrh a realizace experimentálních svarů byly provedeny podle následující specifikace:

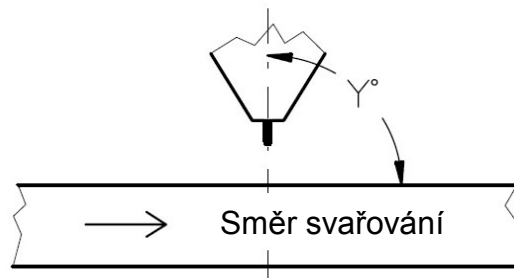
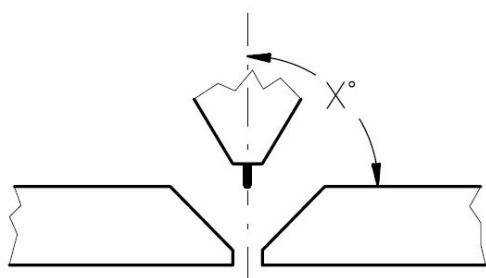
Geometrie svarových ploch:

Způsob přípravy ploch:	frézování
Rozevření C:	60°
Rozevření B:	1,5 mm
Úhel rozevření C:	60°
Tloušťka materiálu W:	5 mm
Svarová mezera A (začátek):	0,6 mm
Svarová mezera A (konec):	1,05 mm
Rozevření C:	200x60x5



Geometrie nastavení hořáku při svařování:

Svařování bylo provedeno ve svařovací komoře s omezeným manévrovacím prostorem, proto nebyla poloha svařování po celou dobu svařování konstantní. Na počátku svařování však hořák svíral se svařencem úhel cca. 60° ve směru svařování a úhel cca. 70° ve směru kolmém na směr svařování.



Úhel X ve směru kolmém na směr svařování:

60°

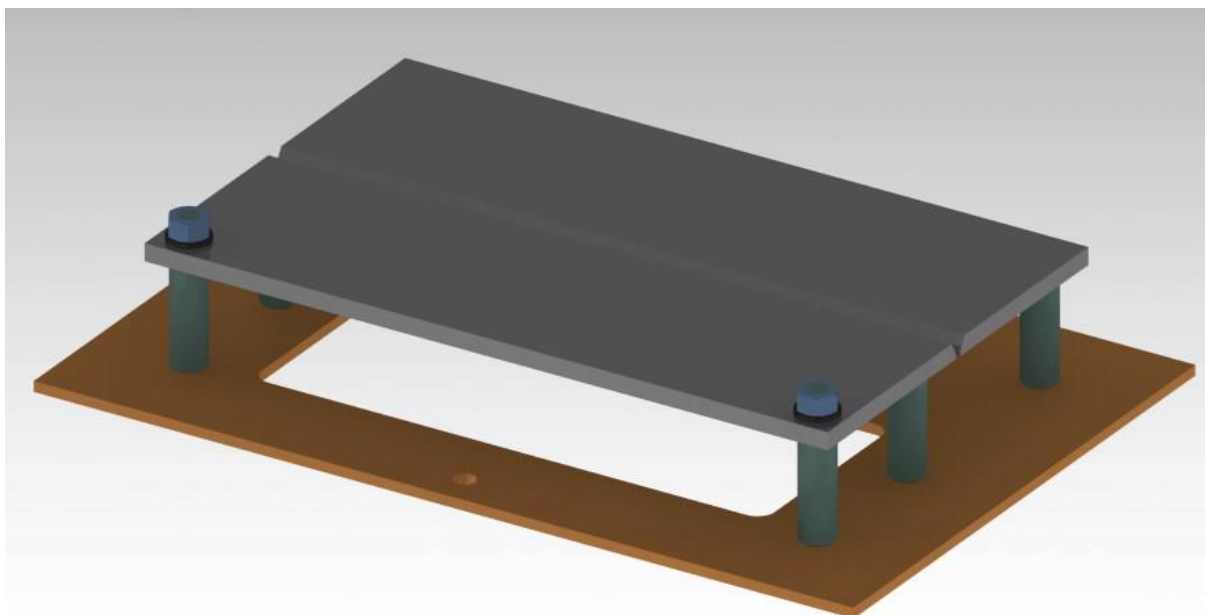
Úhel Y ve směru svařování:

110°

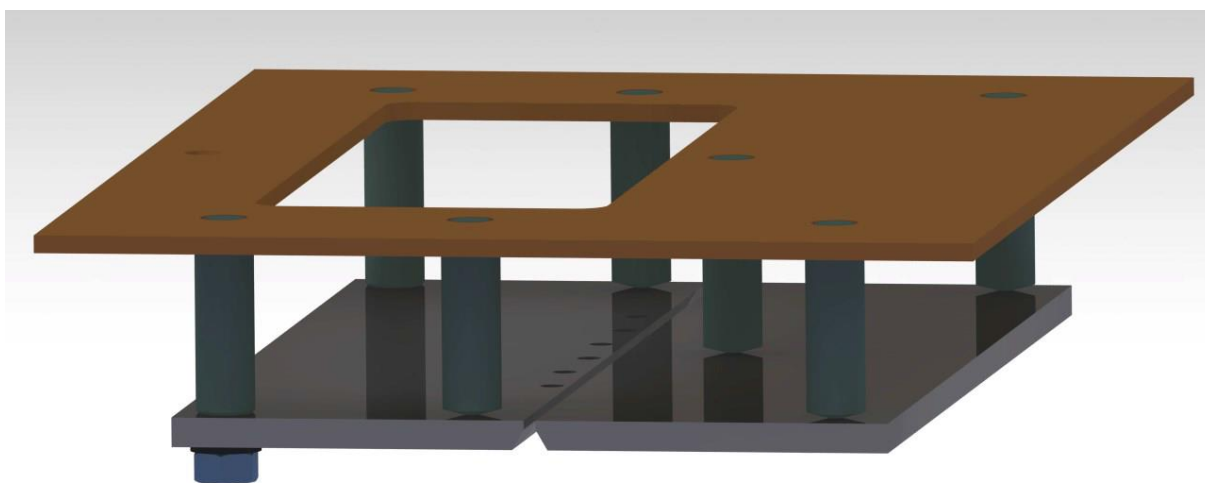
Způsob upnutí svařence:

Počet upínacích míst:	2
Počet podpůrných míst:	6
Způsob dotyku s upínkou a přípravkem:	pomocí matky M6
Tuhost upnutí:	tuhé maticí přes závit

Znázornění míst upnutí a míst dotyku svarku s přípravkem je na obrázku 5.2 a 5.3.



Obr. 5.2: Způsob upnutí svařovaného materiálu při experimentu /40/



Obr. 5.3: Způsob upnutí svařovaného materiálu a místa dotyku při experimentu /40/

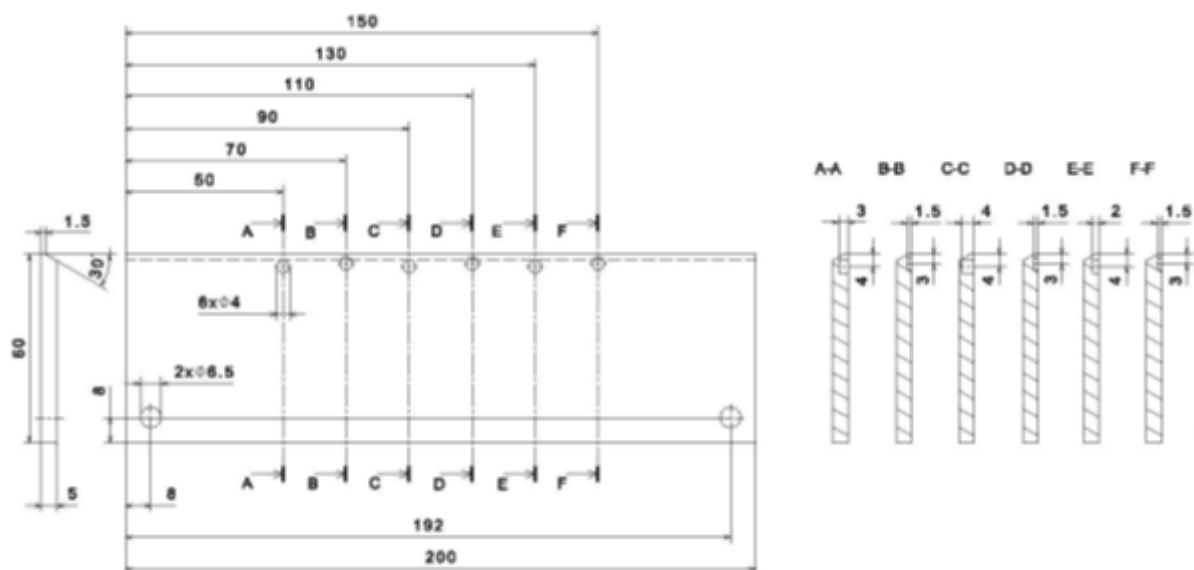
Způsob umístění termočlánků na svařovaných deskách:

Upevnění termočlánků: Kondenzátorové přivaření + zalití vysokoteplotní pastou

Typ termočlánků: Typ K

Počet termočlánků: 6

Na obrázku 5.4 jsou zakótována místa připevnění termočlánků a hloubky otvorů, do nichž byly termočlánky přivařeny a na obrázku 5.5 je znázorněno reálné připojení termočlánků, včetně zalití vysokoteplotní pastou.



Obr. 5.4: Místa připojení měřících termočlánků v průběhu svařování /27/



Obr. 5.5: Reálné připojení termočlánků, včetně zalití vysokoteplotní pastou /27/

Tab. 5.4: Tabulka naměřených svařovacích parametrů Housenky 1

Geometrické umístění – ypsilonová souřadnice je uvedena od osy svaru:				
Termočlánek T1:	x= 50 mm	y= 4,6 mm	hloubka= 3 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T2:	x= 70 mm	y= 3,6 mm	hloubka= 1,5 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T3:	x= 90mm	y= 4,6 mm	hloubka= 4 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T4:	x= 110 mm	y= 3,6 mm	hloubka= 1,5 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T5:	x= 130 mm	y= 4,6 mm	hloubka= 2 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T6:	x= 150 mm	y= 3,6 mm	hloubka= 1,5 mm	umístěno: zdola

Postup svařování – svařovací parametry:

Housenka 1:

Dalším faktorem zjištěným při experimentu bylo místní přehřívání titanu v důsledku jeho nízké tepelné vodivosti. Z tohoto důvodu musela být každá ze svařovaných housenek rozdělena na několik menších svařovacích úseků. Přestože skutečná délka svařené housenky číslo jedna byla 200 mm, vlastní svařování proběhlo v 5 etapách. V tabulce 5.5 jsou uvedeny skutečné svařovací parametry zaznamenané aparaturou WeldMonitor.

Nastavované parametry:

Svařovací proud:	110 A
Průtok plynu na svářečce:	16 l.min⁻¹
Průtok plynu do svařovací komory:	20 l.min⁻¹

Tab. 5.5: Tabulka naměřených svařovacích parametrů Housenky 1

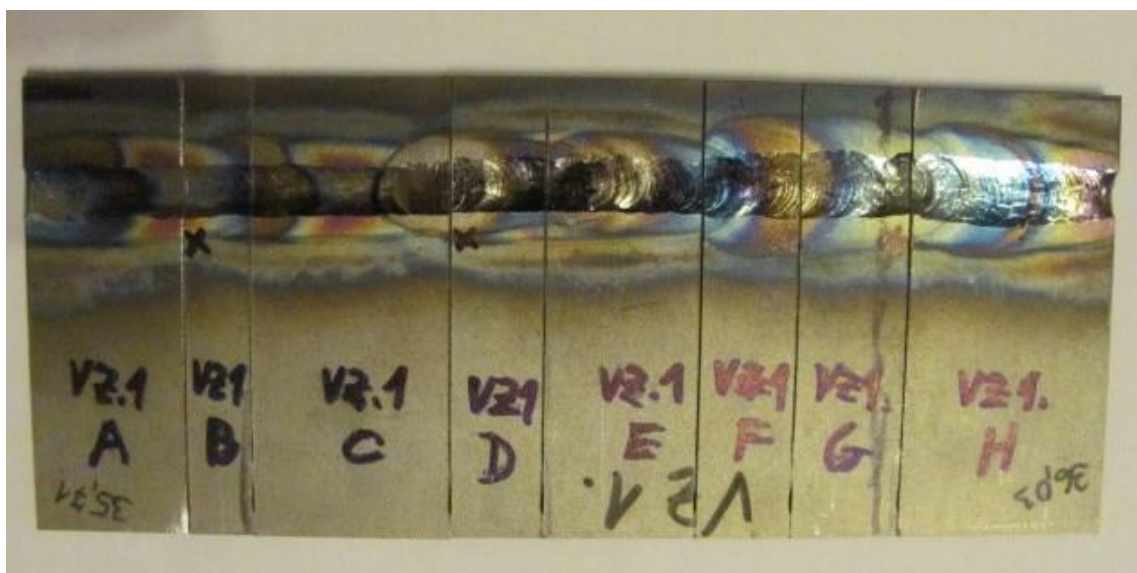
Svařovací parametry	Část 1	Část 2	Část 3	Část 4	Část 5
svařovací proud [A]	110,8	110,7	110,7	110,7	110,7
svařovací napětí [V]	10,5	10,3	10,8	11,3	11,3
čas svařování housenky [s]	46,6	68	68,2	47,6	44,7
čas chladnutí housenky [s]	290	234,8	171	191,4	---
délka housenky [mm]	26,7	46,9	53,4	39,5	33,5
rychlost svařování [m.min ⁻¹]	0,034	0,041	0,047	0,050	0,045
celkově vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	20,305	16,532	15,269	15,074	16,691
účinnost přenosu tepla [-]	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
výkon zdroje [W]	1163,4	1040,2	1195,6	1250,9	1250,9

Geometrie svarové housenky číslo 1:

Pro vyhodnocení geometrie svarů byla u všech housenek měřena šířka svaru a hloubka protavení, dále také celková plocha svarové housenky. Na (obr. 5.6) je znázorněn svar v celé délce z vrchního pohledu s vyznačenými místy, ve kterých byla hodnocena geometrie svarových housenek a průběh tvrdosti základního materiálu tepelně ovlivněné oblasti a vlastního svaru.

Obrázek 5.7 pak ukazuje stejný svar, ovšem ze strany kořene. Geometrie a tvrdost byly hodnoceny v místech označených křížky.

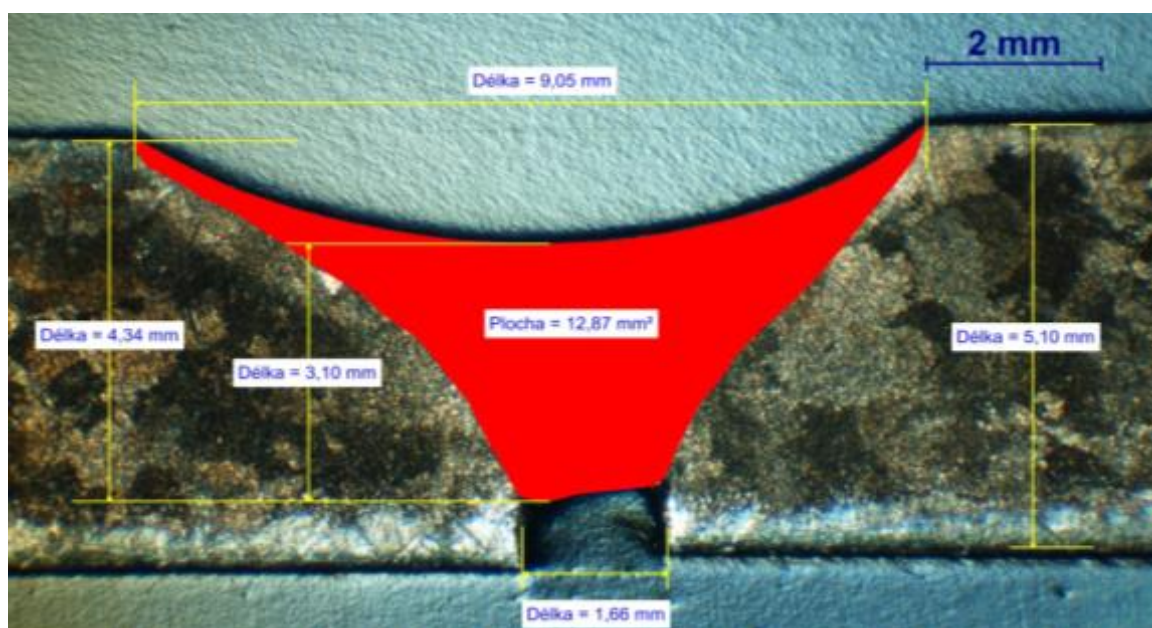
Na obrázku 5.8 je detail makrovýbrusu housenky č.1, odpovídající poloze u křížku vzorku B. Jak je zde vidět, nedošlo k úplnému protavení svaru. To bylo zapříčiněno částečným stažením materiálu ve svarové mezeře a špatným přístupem svářeče do místa svaru.



Obr. 5.6: Vrchní strana svaru s označenými místy, ve kterých byla hodnocena geometrie /27/



Obr. 5.7: Spodní strana svaru s označenými místy, ve kterých byla hodnocena geometrie /27/



Obr. 5.8: Makrovýbrus housenky č. 1, řez B /27/

Housenka 2:

Skutečná délka svažené housenky číslo dvě byla 122,4 mm, přičemž vlastní svařování proběhlo ve 4 etapách. V tabulce 5.6 jsou uvedeny skutečné svařovací parametry zaznamenané aparaturou WeldMonitor.

Nastavované parametry:

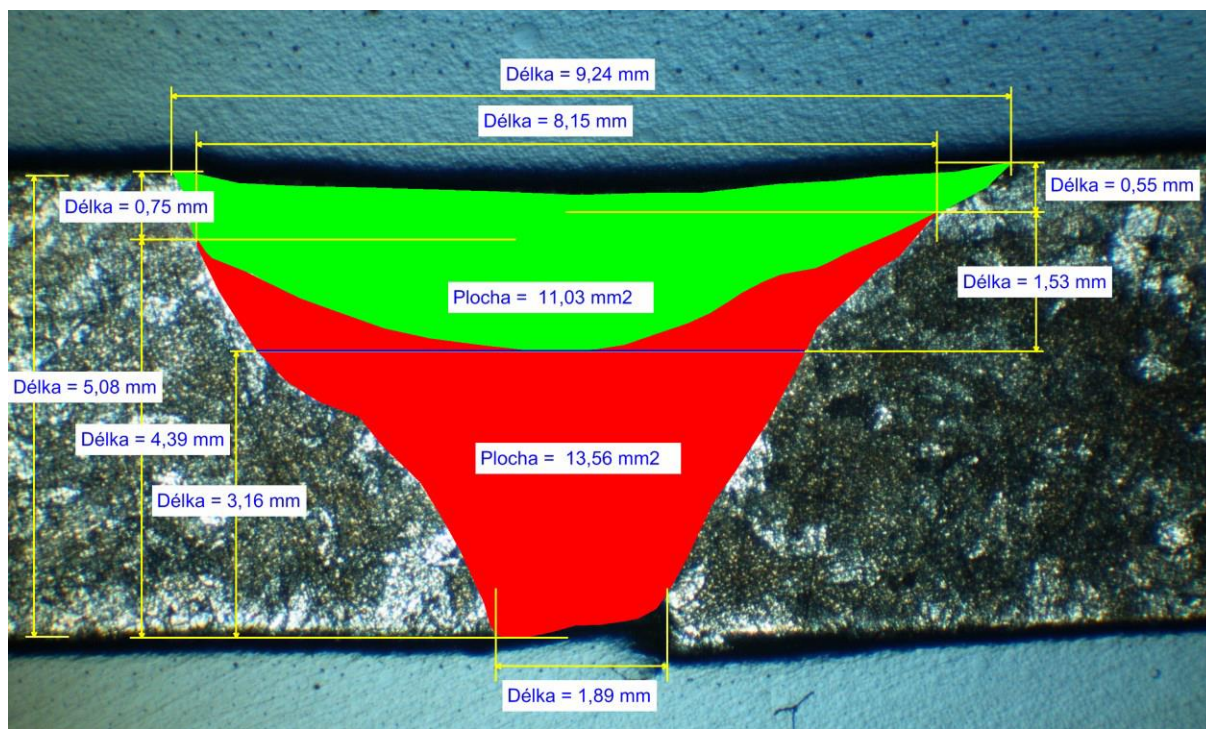
Svařovací proud:	110 A
Průtok plynu na svářečce:	18 l.min⁻¹
Průtok plynu do svařovací komory:	20 l.min⁻¹

Tab. 5.6: Tabulka naměřených svařovacích parametrů Housenky 2

Svařovací parametry	Část 1	Část 2	Část 3	Část 4
svařovací proud [A]	110,7	110,7	110,8	110,8
svařovací napětí [V]	12,4	11,9	12,3	11,9
čas svařování housenky [s]	54,5	66,7	33,0	36,3
čas chladnutí housenky [s]	132,8	265,7	170,0	---
délka housenky [mm]	38,2	40,3	23,9	20,0
rychlost svařování [m.min ⁻¹]	0,042	0,036	0,043	0,033
celkově vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	19,584	21,803	18,817	23,931
účinnost přenosu tepla [-]	0,60	0,60	0,60	0,60
výkon zdroje [W]	1318,5	1317,3	1362,8	1318,5

Geometrie svarové housenky 2:

Na obrázku 5.9 je vyhodnocení geometrie svarové housenky č. 2. Ve znázorněném průřezu byly měřeny dvě housenky. Housenka číslo 1 je na obrázku zvýrazněna červeně a housenka číslo 2 zeleně. Výbrus odpovídá poloze označené křížkem u vzorku D na obrázku 5.6.

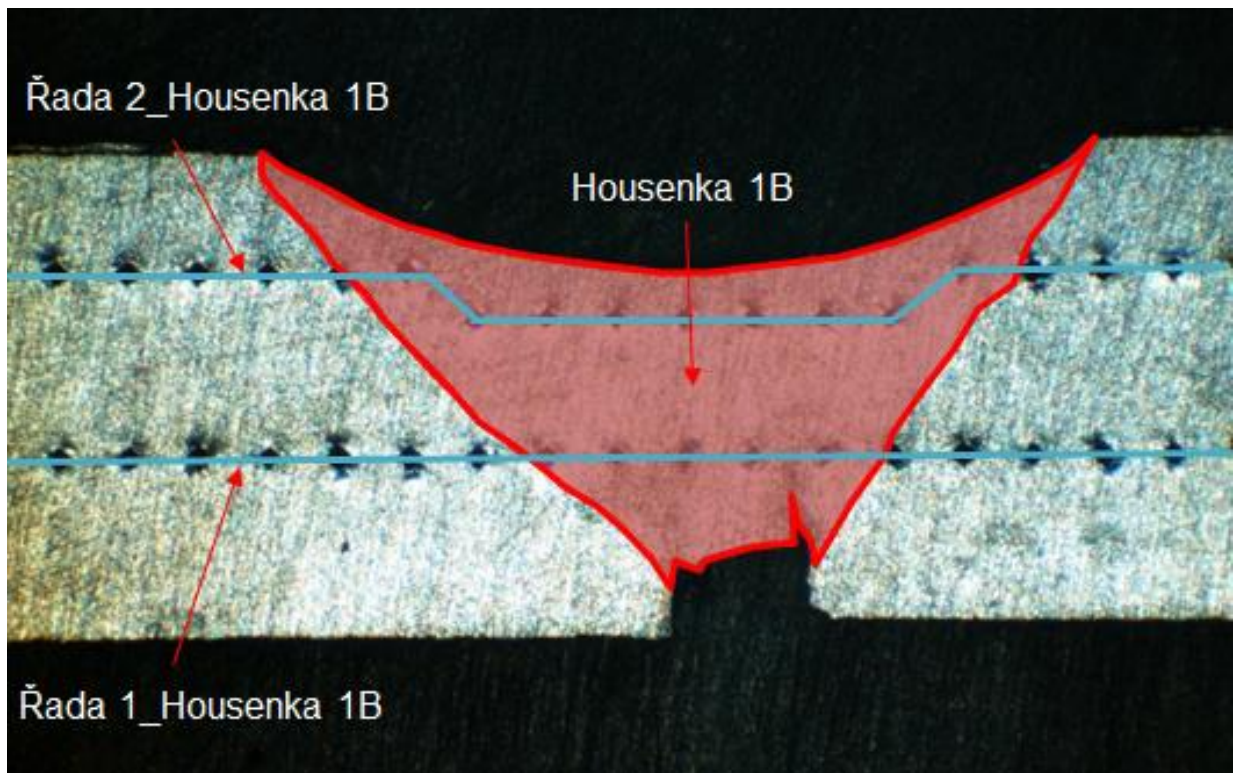


Obr. 5.9: Geometrické vyhodnocení housenky č. 1 a 2, řez D /27/

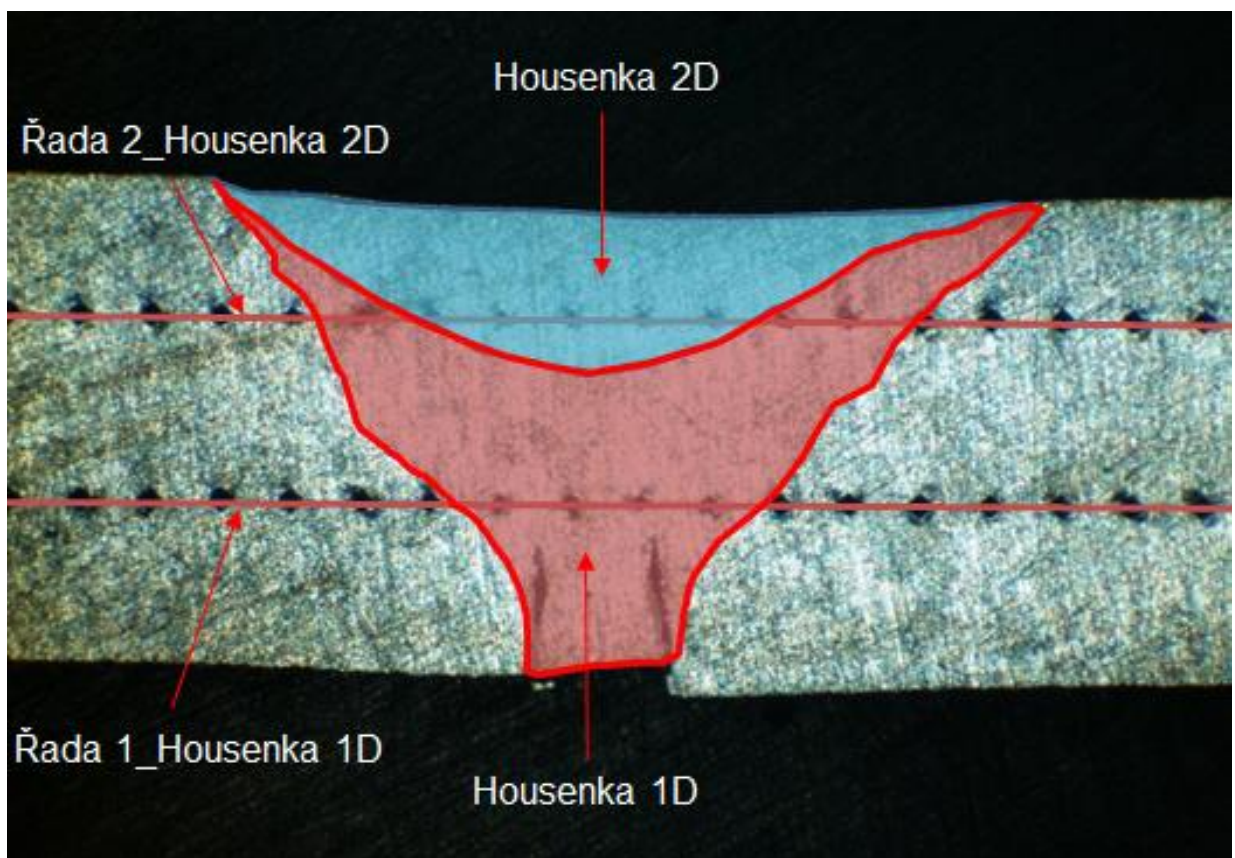
5.2 Měření tvrdosti zkušebních svarů

Pro zjištění, zda byly atmosférické plyny pohlceny i ve svarové lázni, bylo dále provedeno měření tvrdosti. Tvrdost byla měřena v místech měření geometrie svarových housenek (obr. 5.10 a 5.11, Příloha: Obrázek 1 až 6).

Průběhy tvrdostí základním materiálem a svarovou housenkou jsou zaneseny do grafů na obrázcích 5.12 a 5.13 (Příloha: Graf 12 až 13). Všechny naměřené hodnoty tvrdostí zkoumaných vzorků byly zaneseny do tabulek, které jsou součástí přílohy (Příloha: Tabulka 2 až 5).

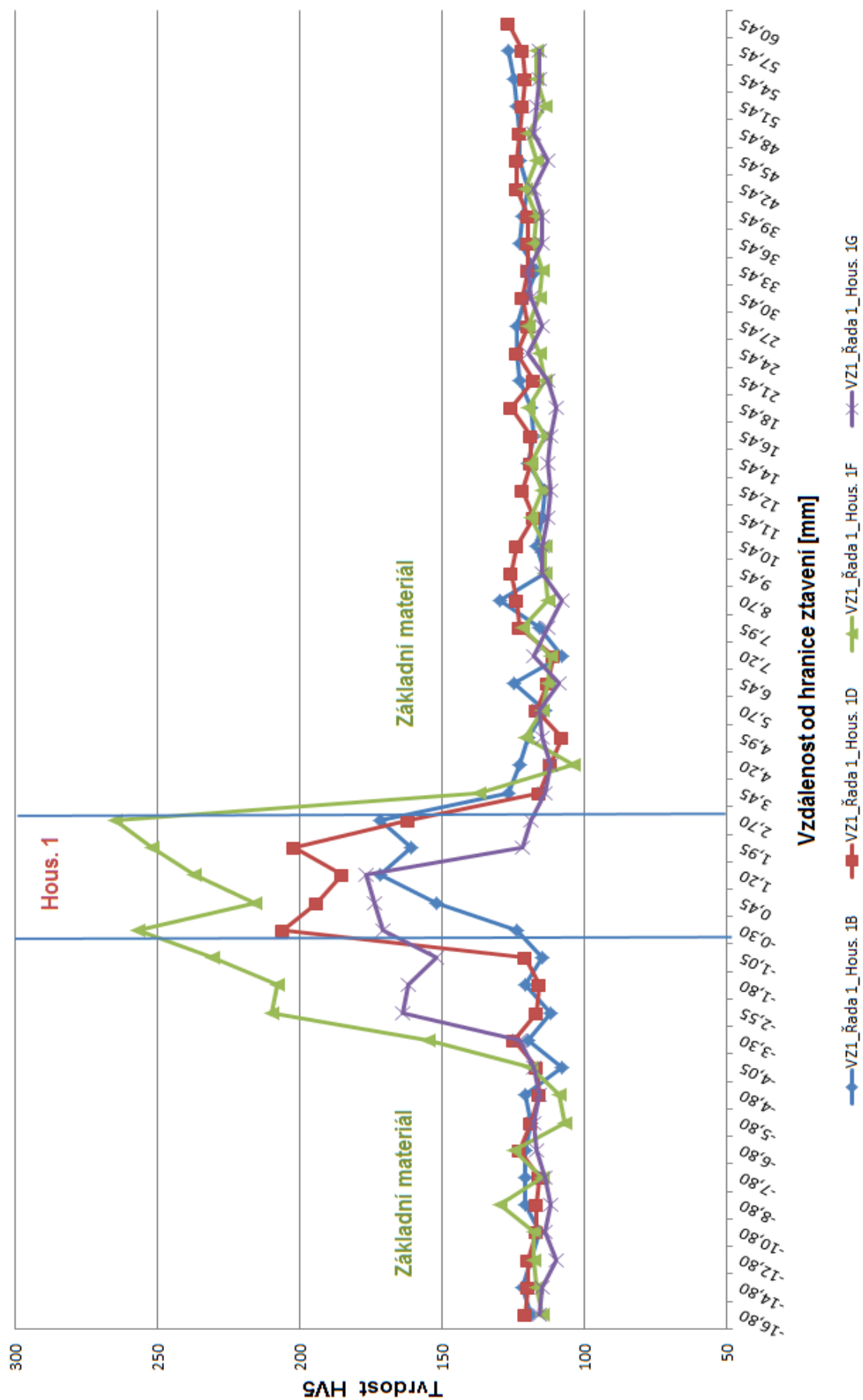


Obr. 5.10: Měření tvrdosti - Vzorek 1, Housenka 1, řez B

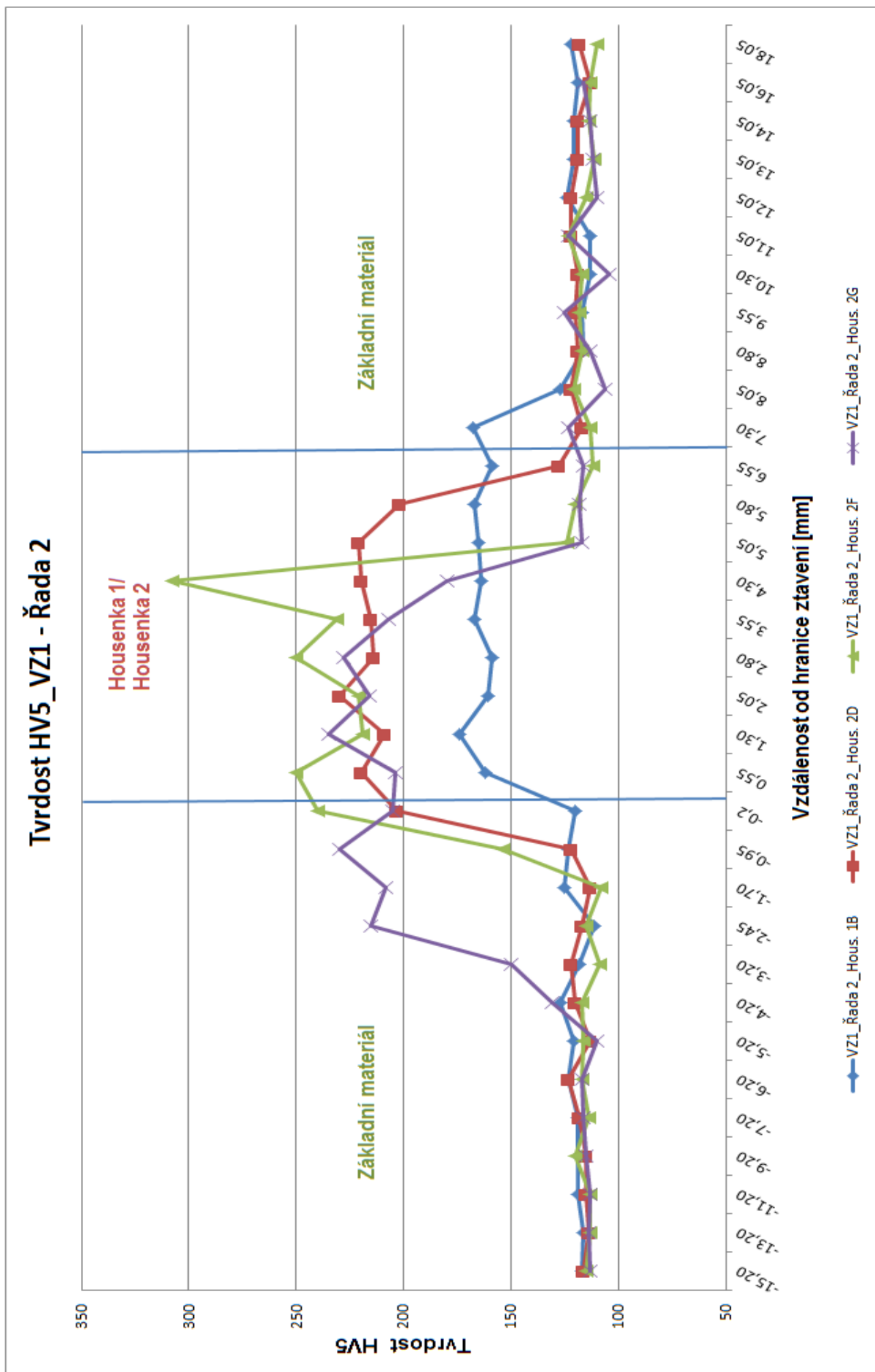


Obr. 5.11: Měření tvrdosti - Vzorek 1, Housenka 1 a 2, řez D

Tvrdość HV5_VZ1 - Řada 1



Obr. 5.12: Graf průběhu tvrdostí v základním materiálu a svarové housence 1, VZ 1



Obr. 5.13: Graf průběhu tvrdostí v základním materiálu a svarové housence 1 a 2, VZ 1

5.3 Vyhodnocení provedených experimentálních svarů - Vyhodnocení funkčnosti experimentálního pracoviště

Na základě provedených experimentů byly zjištěny některé nedostatky týkající se jak konstrukčního řešení navržené svařovací komory, tak vlastního návrhu a realizace svařování materiálu Grade 2. Tyto nedostatky byly sumarizovány v následujících 6 bodech a byly řešeny dále v diplomové práci.

- 1) Provedené zkušební svary se při srovnání s vizuální tabulkou (Příloha: Tabulka 1- Inspekční tabulka svarových spojů titanu) jeví jako nevyhovující. Zabarvení povrchové vrstvy naznačuje, že bylo v místě svaru pohlceno větší množství atmosférických plynů, než je přípustné, a to i přes snahu o utěsnění. To znamená, že musí dojít ke konstrukčním úpravám komory z hlediska celkového utěsnění.
- 2) Také celkové ergonomické řešení stávající komory bylo vyhodnoceno jako nevyhovující. Je zde třeba ještě více zohlednit poměr mezi roztečí pro ruce a sklonem a rozměrem místa pro průzor svářeče.
- 3) Celý systém je nezbytné osadit měřícím zařízením pro stanovení zbytkových plynů v inertní atmosféře, aby bylo zřejmé, zda je již pracoviště připraveno ke svařování reaktivních materiálů, nebo k detekování případných netěsností. Zároveň je díky tomu možné posoudit vhodnost použité inertní atmosféry.
- 4) Doplnění systému o vakuovou vývěvu, která odsátím vzduchu z komory s následným nasáváním ochranné atmosféry značně urychlí dosažení vhodného prostředí pro svařování.
- 5) Z důvodu značných příčných deformací je nezbytné zvětšit svařovou mezeru vzorku přibližně o 20 až 25%.
- 6) Použít vyšší hodnoty svařovacího proudu o 10 až 15 % při snaze o zachování hodnot vneseného tepla z důvodu přehřívání materiálu.

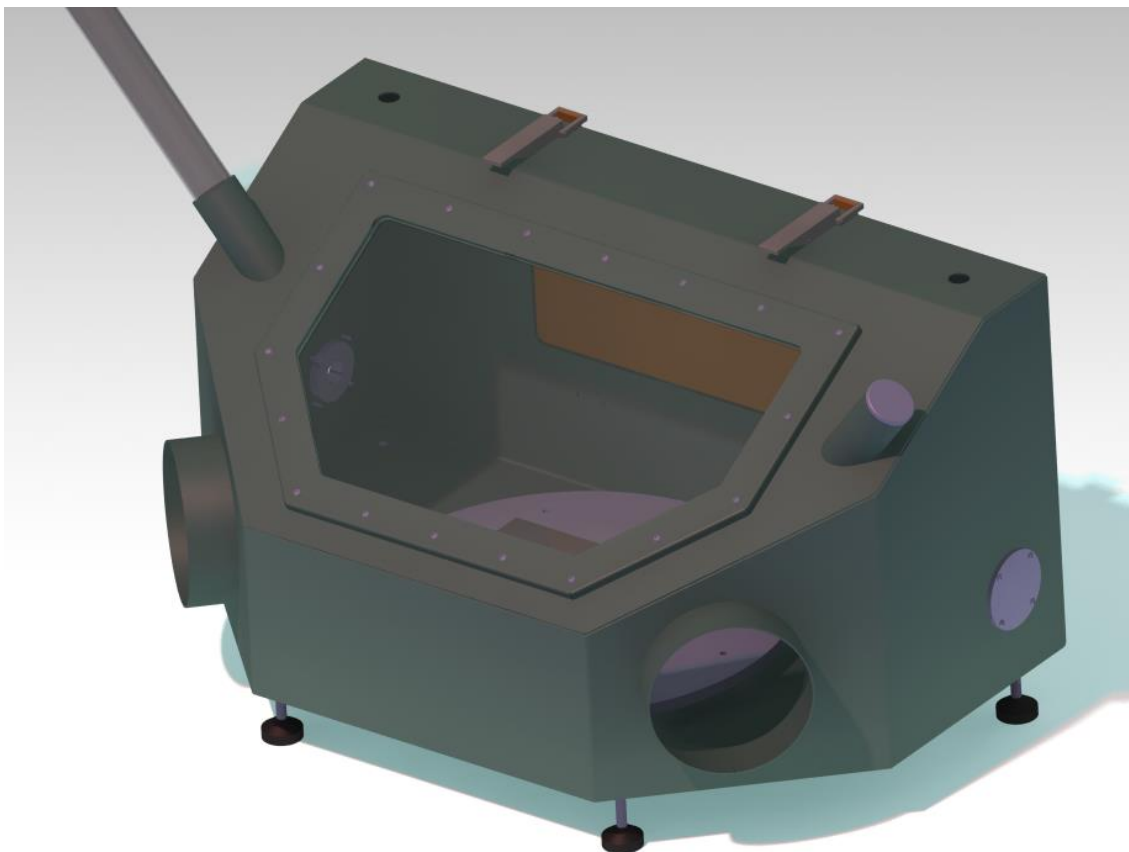
Po zhodnocení provedených experimentů na stávajícím prototypovém svařovacím stanovišti byl připraven nový experiment. Ten bude proveden s upravenými parametry svařování v novém návrhu svařovací komory vycházejícím z této diplomové práce.

5.3.1 Úprava funkčnosti experimentální svařovací komory

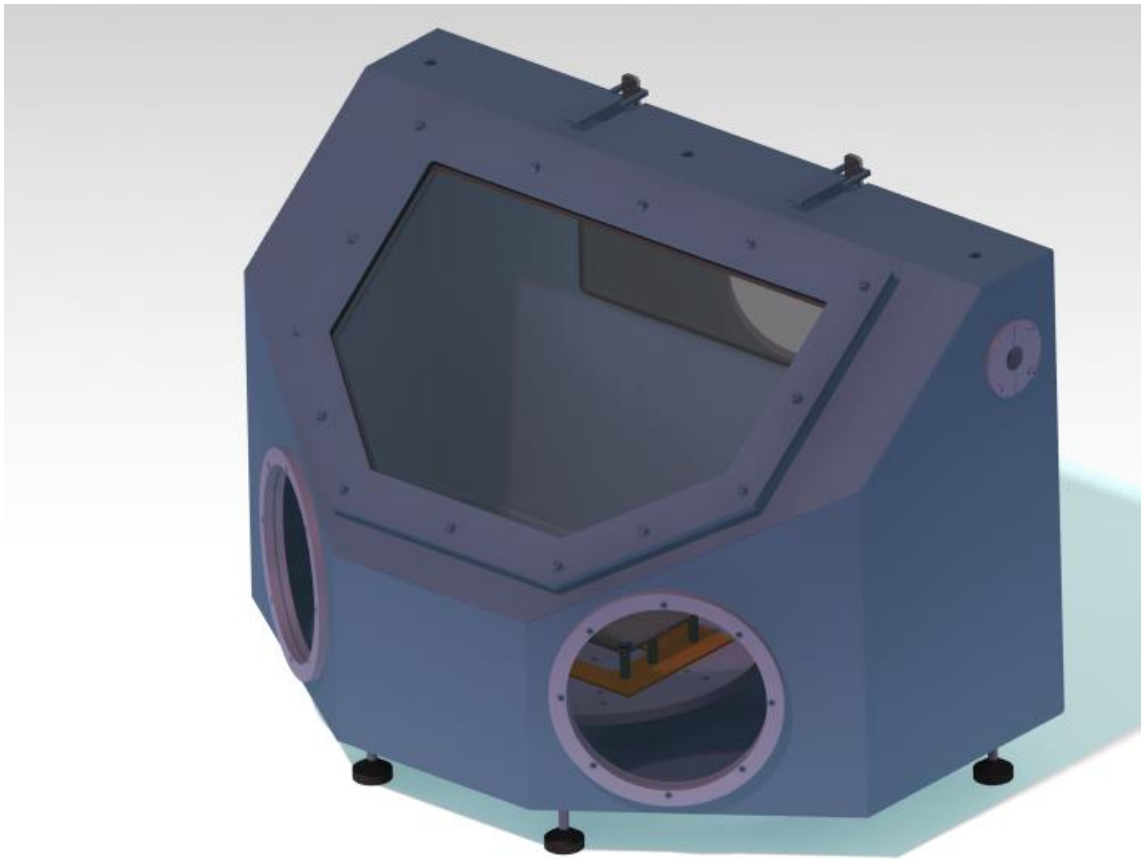
I přes mírně přetlakovou vnitřní atmosféru komory je ze vzhledu provedených experimentálních svarů a naměřených hodnot tvrdostí v místech svarů zřejmé, že dochází ke kontaminaci inertní atmosféry a tím i vlastní svařové lázně.

Jedním z možných zdrojů kyslíku, dusíku a vodíku může být zbytkový vzduch, zachycený v trubkových zásobnících původního návrhu komory (obr. 5.12), sloužících k umístění drátů přídavného materiálu. Proto byly v nové verzi komory tyto zásobníky zcela odstraněny (obr. 5.13).

Primární příčinou kontaminace inertní atmosféry argonu jsou však s největší pravděpodobností netěsnosti ve vlastní konstrukci komory.



Obr. 5.12: Zobrazení stávající experimentální komory /40/



Obr. 5.13: Zobrazení návrhu upravené experimentální komory /40/

Jak je patrné ze znázornění skutečného stanoviště na obrázku 5.1, vstupní otvory pro ruce operátora jsou v průběhu experimentu chráněny pouze stahovacími rukávy, to je během svařování při pohybu svářeče jednou z možných příčin zpětné kontaminace vnitřní atmosféry komory molekulami kyslíku, dusíku a vodíku z okolní atmosféry.

Proto u upravené komory došlo k přidání kompresních těsnících prstenců a to společně s užitím neprodyšných a tepelně resistantních rukavic z materiálu Viton[®] (obr. 5.14.a). Pro případné zvýšení odolnosti nebo jen prodloužení životnosti lze tento systém doplnit o vysoce tepelně a mechanicky odolné převlečné rukavice HexArmor 408 (obr. 5.14.b).



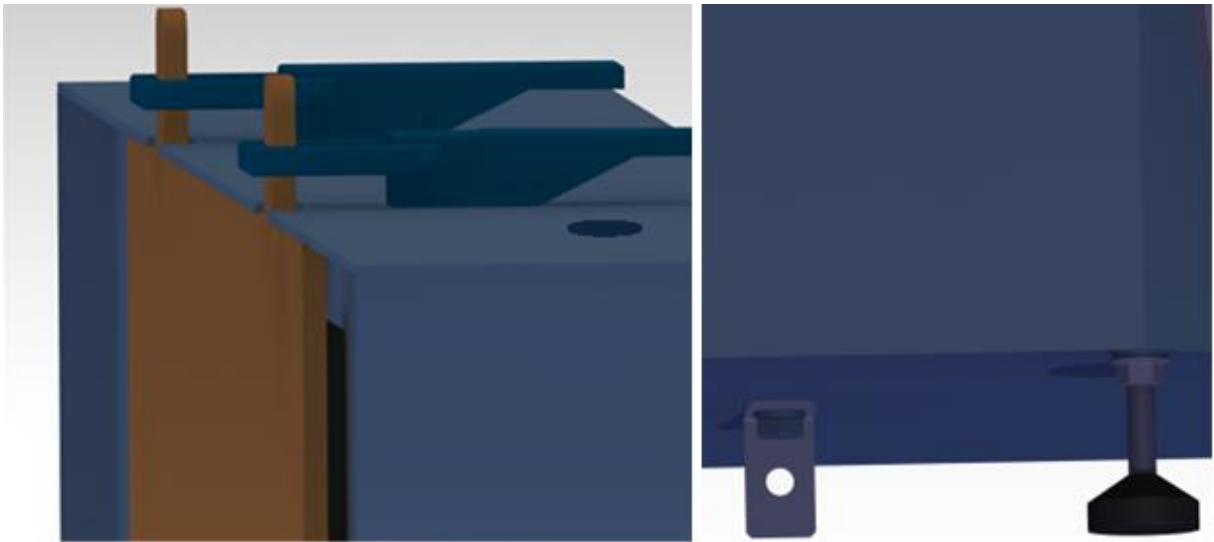
Obr. 5.14.a: Komorové rukavice z materiálu Viton[®] /30/;
 Obr. 5.14.b: Vysoce odolné převlečné rukavice HexArmor 408 /30/

Další možnou příčinou kontaminace vnitřní atmosféry mohou být netěsnosti průzoru, zadního víka, těsnění svařovacího stolku, či průniky přes závity šroubů průchozích do komory.

U upravené komory je plexisklo průzoru do experimentální komory upevněno pomocí vnějšího rámečku a šroubů přivařených přímo k čelu komory (obr. 5.15). Sklo průzoru je následně utěsněno pomocí dvou pryžových těsnění. Došlo i k úpravě těsnění zadního víka komory, jak je znázorněno na obrázku 5.16.a.



Obr. 5.15: Detail těsnění plexiskla průzoru svařovací komory /40/



Obr. 5.16.a: Detail těsnění zadního víka svařovací komory /40/

Obr. 5.16.b: Detail výstupku zemnění svařovací komory /40/

Těsnění svařovacího stolku bylo u nového návrhu možno zcela eliminovat. Stolek je nyní upevněn přes vodící čep s valivým ložiskem, ten je napevno navařen uvnitř komory. Svařovací oblouk je zaručen kontaktem vodícího čepu, stěny komory, průchozího šroubu a speciálního výstupku ve spodku vnější části komory (obr.5.16.b, Výkres 09.001 - Kontaktní výstupek - uzemnění).

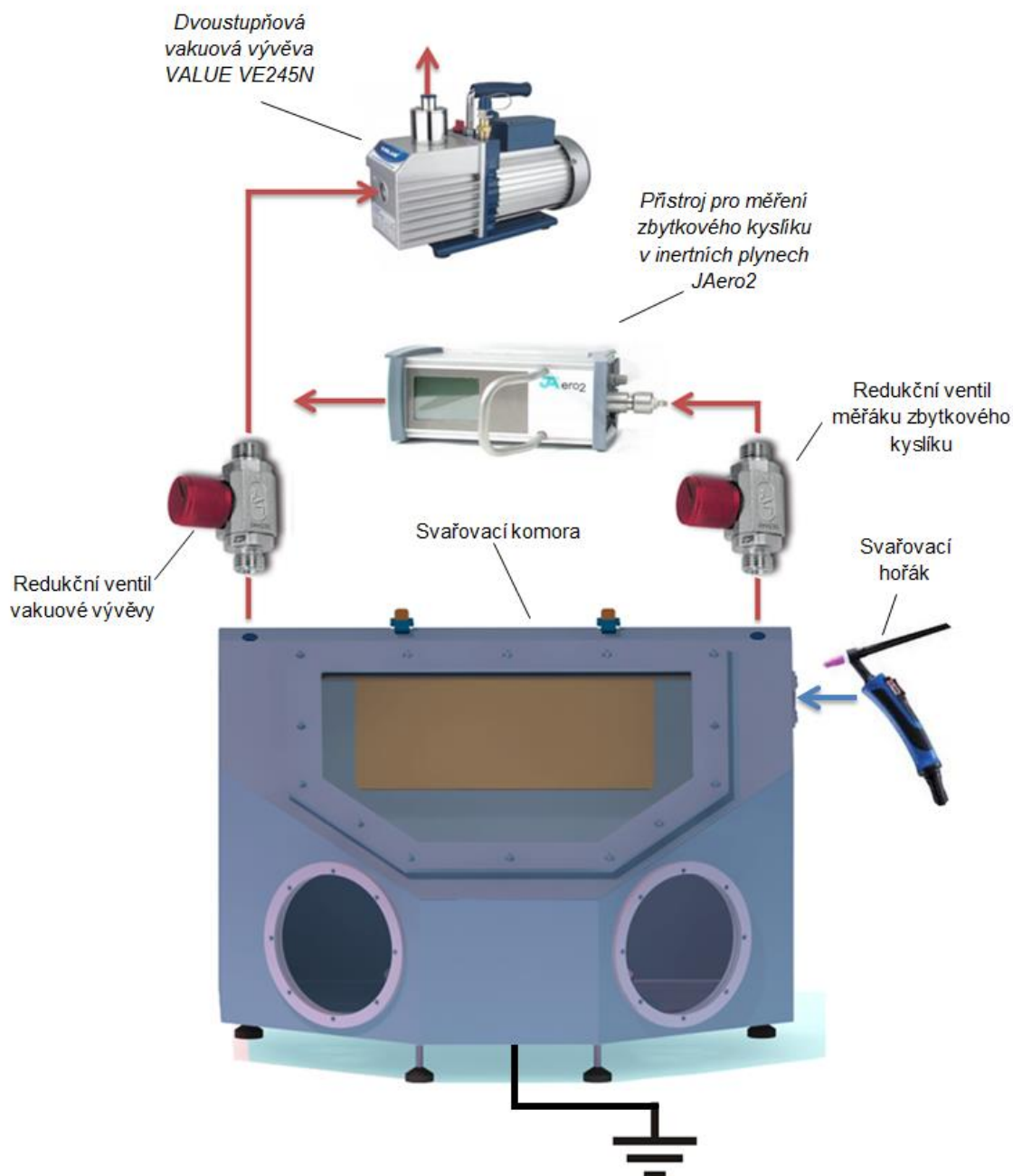
Poslední úpravou designu experimentální svařovací komory je posunutí jediného průchozího otvoru pro svařovací hořák výš k horní části komory. Pro dokonalé utěsnění však bude nutno hořák i šrouby těsnícího víčka v tomto místě napevno zalepit těsnícím silikonem.

Pro dokonalou kontrolu a přesnou regulaci vnitřní přetlakové atmosféry návrhu vylepšené svařovací komory, bude nutno v jejím levém horním rohu umístit vypouštěcí ventil, pro napojení na vývěvu odsávání vzduchu.

V pravém horním rohu bude připojen stejný ventil a přístroj pro měření zbytkového kyslíku v inertních plynech. Schéma zapojení zmíněných měřidel, aparatur a příslušenství je znázorněno na obrázku 5.17. Pro připojení tohoto příslušenství jsou v horní části komory vytvořeny příslušně otvory dle obrázku 5.16.a.

Pro vytvoření podtlaku v komoře je navržena dvoustupňová olejová vývěva VALUE VE245N, schopná dosáhnout hrubého vakua ($\max Pa \cdot 2 \times 10^{-1} Pa$). Před zahájením vlastního svařování, bude levý vypouštěcí ventil otevřen a vývěva bude odsávat vzduch z komory, komora bude postupně zaplňována argonem přiváděným z její spodní části, a to po dobu nezbytně nutnou k odsání vzduchu z vnitřního objemu komory.

Pravý ventil bude uzavřen, při zaplnění vnitřního objemu komory argonem se ventil odsávání uzavře, ventil měřáku zbytkového kyslíku v pravém rohu se otevře a přetlakový plyn bude procházet pouze přes otvor v pravé horní části komory do přístroje pro měření zbytkového kyslíku. Tento cyklus se bude opakovat až do dosažení minimální čistoty 50 [ppm], kdy může následovat vlastní proces svařování.



Obr. 5.17: Schéma zapojení měřících aparatur a příslušenství svařovací komory /31/, /32/, /33/

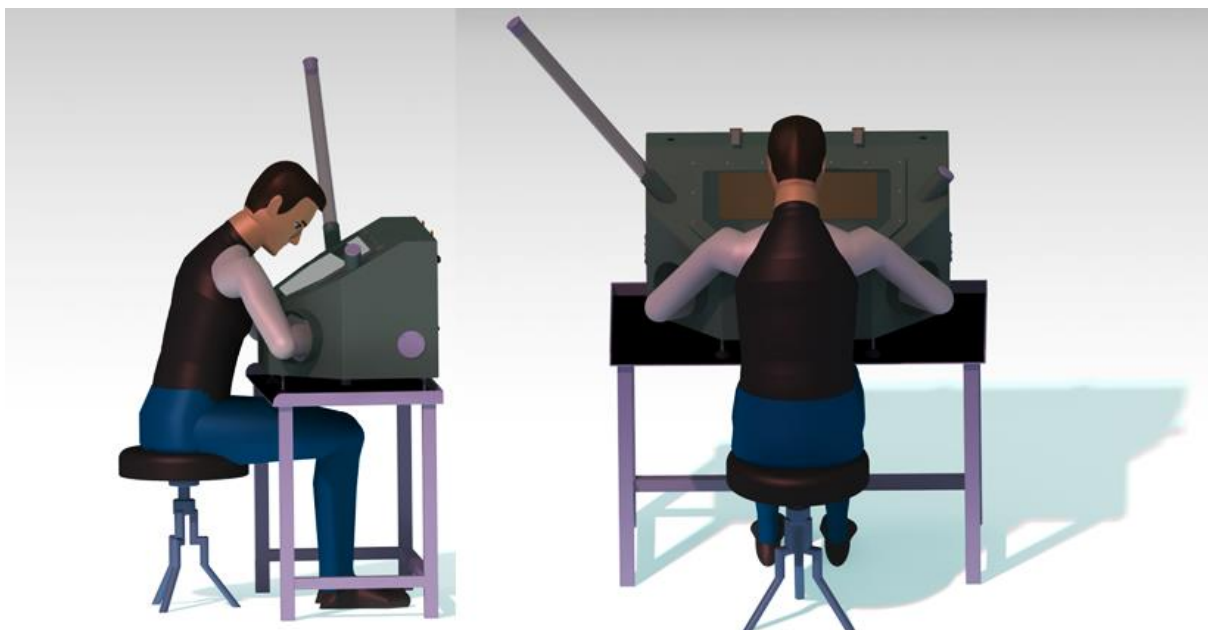
5.4 Ergonomie svařovacího pracoviště

Dále byl proveden ergonomický rozbor polohy operátora během experimentu svařování. Byl zkoumán jeho celkový posed dle normy ANSI standard /38/, poloha paží při tomto posedu, zorný uhel a zorné pole. Jako ergonomický model byla použita figura standartních proporcí průměrného mužského obyvatele České republiky či střední Evropy. Výška přibližně 180cm a váha 83 kg dle údajů UZIS. /39/

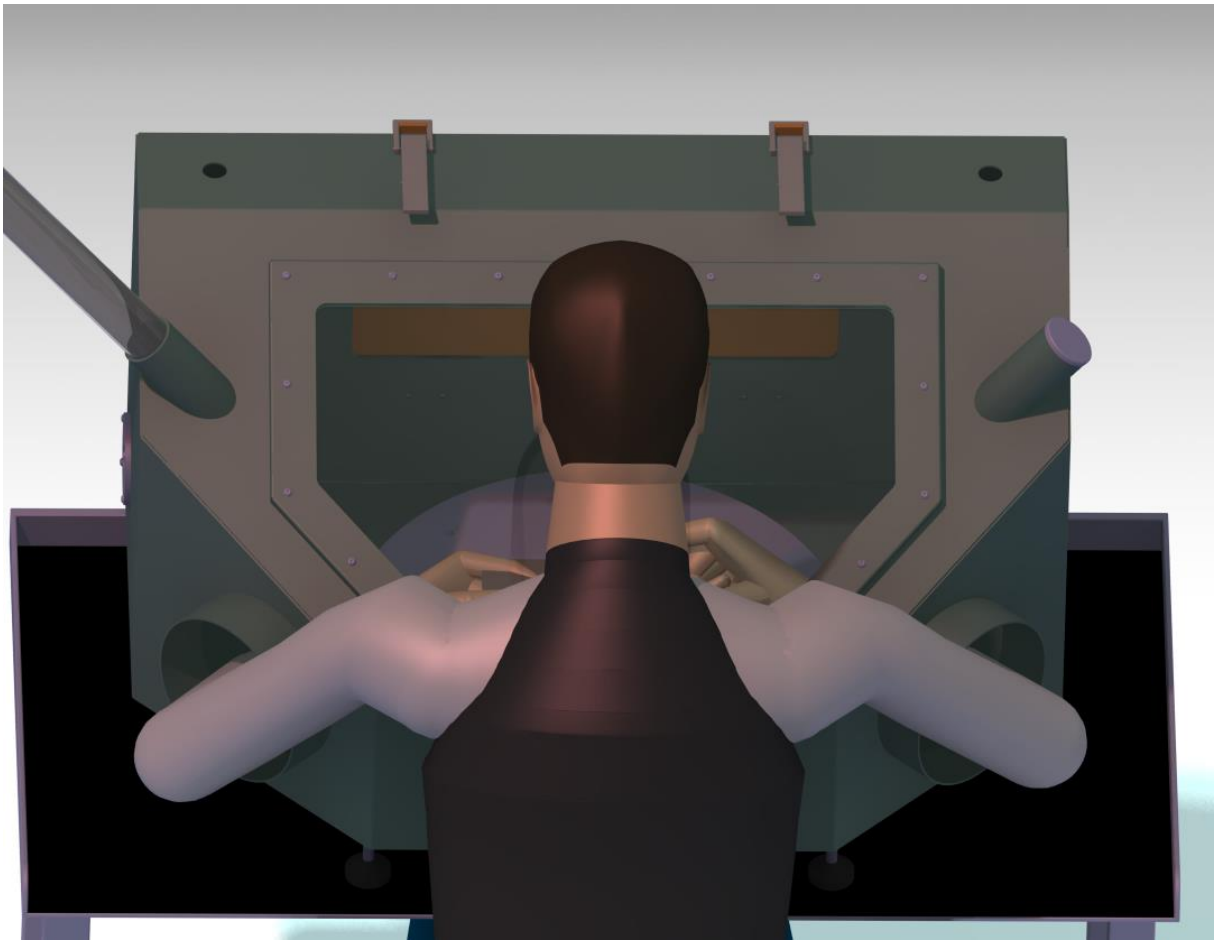
Na obrázku 5.18 je znázorněna stávající experimentální komora, velikost průzoru v čele komory je limitována trubkovými zásobníky (obr. 5.18 a 5.19), ty měli sloužit k možnému dodávání přídatného materiálu ve formě drátu, bez toho aby bylo nutné komoru otvírat a opětovně napouštět inertní atmosférou. Zorné pole operátora je patrné z obr. 5.20.

Úhel průzoru v čele svařovací komory vede k celkově neergonomickému posedu operátora, to je jasně viditelné na obrázku 5.18. Během vlastního svařování operátor nesedí s rovnými zády, musí sklápět hlavu a klopit zrak. Svařovací komora v této konfiguraci se jeví pro dlouhodobou práci jako velice nevhodná. Navíc, celkový úhel čela komory činil pracovní prostor velice stísněný a manipulace se svařencem, hořákem či přídatným materiálem zde byla velice obtížná. To také z části způsobilo částečné neprůvary v oblasti kořene u experimentálního svaru.

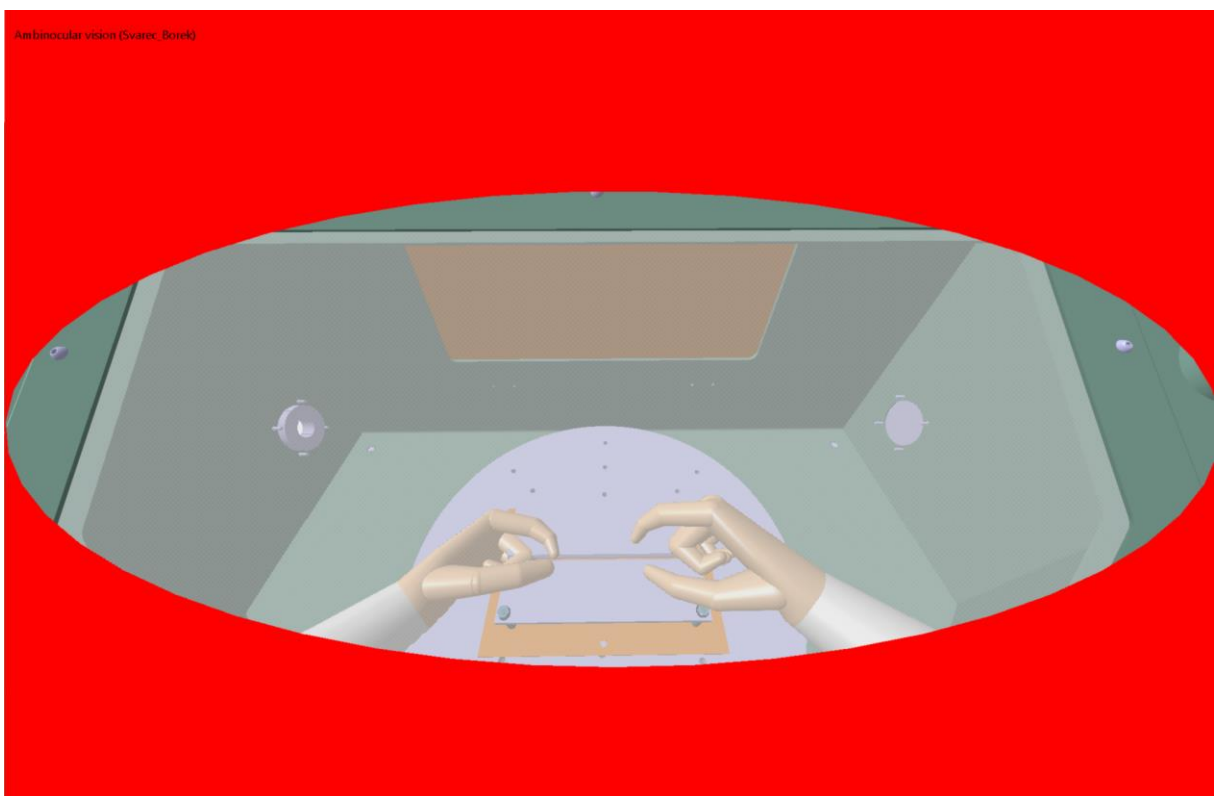
Obruč pro upevnění rukávů a komory je umístěna vně komory, to vede k nutnosti širokého rozpažení operátora během svařování. Celkově špatný přístup pro ruce operátora je patrný na obrázcích 5.18 a 5.19.



Obr. 5.18: Zobrazení ergonomie posedu během svařování ve stávající komoře /40/



Obr. 5.19: Zobrazení ergonomie polohy paží operátora během svařování ve stávající komoře /40/



Obr. 5.20: Zobrazení zorného pole operátora během svařování ve stávající komoře /40/

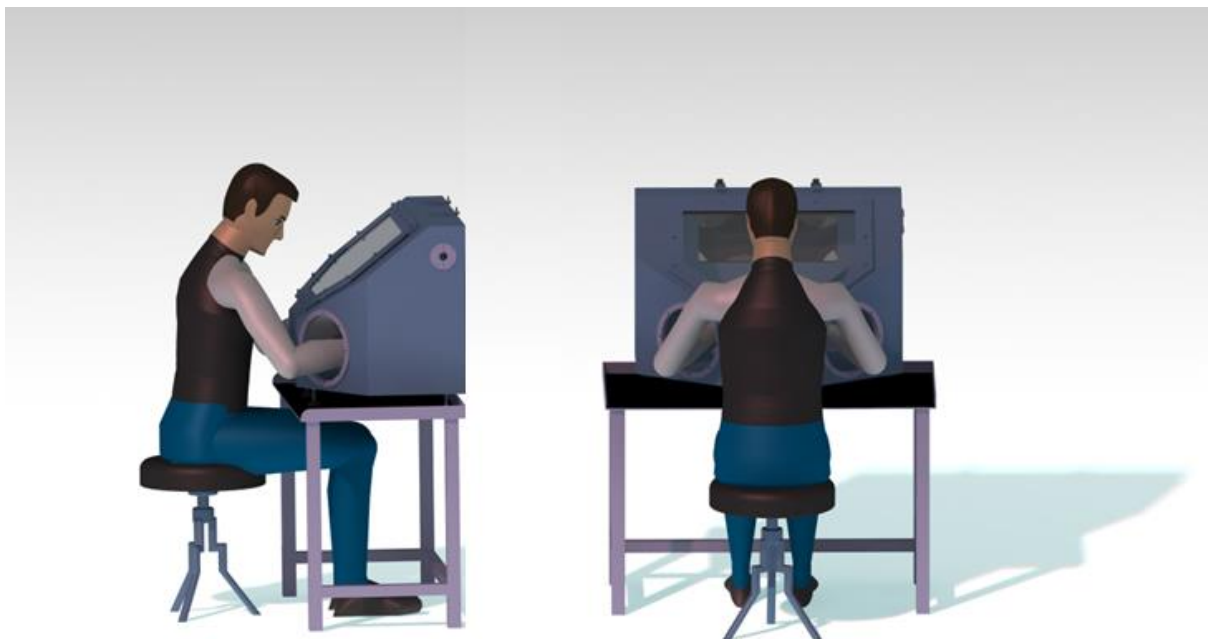
5.4.1 Návrh ergonomické úpravy svařovací komory

Na obrázku 5.21 je zobrazena komora po ergonomické úpravě, ale také po dalších úpravách popsaných výše. V novém návrhu komory zohledňujícím ergonomii je komora vyšší, úhel čela a průzoru je méně strmý a došlo k úpravě vstupních otvorů pro ruce operátora.

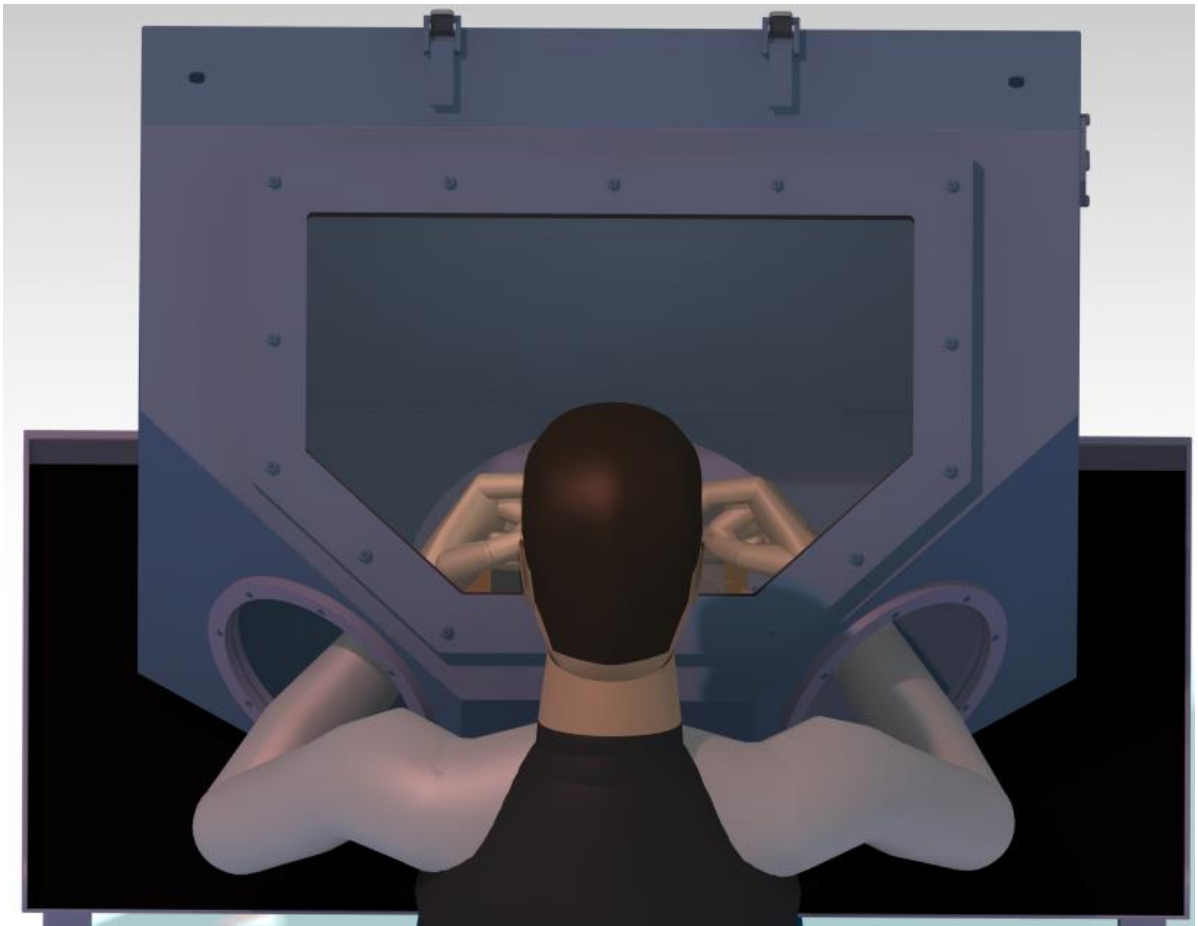
Na obrázku 5.21 je patrná úprava posedu operátora, sedí zpříma s rovnými zády, hlava je jen minimálně sklopená a nemusí klopat zrak. Tato úprava výrazně ulehčí a zpohodlní práci svářeče a zamezí případným nemocím z povolání zapříčiněným špatným posedem.

Vystouplé obruče pro úchyt těsnících stahovacích rukávů (obr. 5.1) byly nahrazeny za standardizované těsnící prstence většího průměru. Touto úpravou společně se zúžením šířky přední stěny komory, bylo dosaženo lepší a pohodlnější polohy paží svářeče viditelnou na obrázku 5.22, současně došlo k nárůstu manévrovatelnosti operátora během vlastního svařovacího procesu.

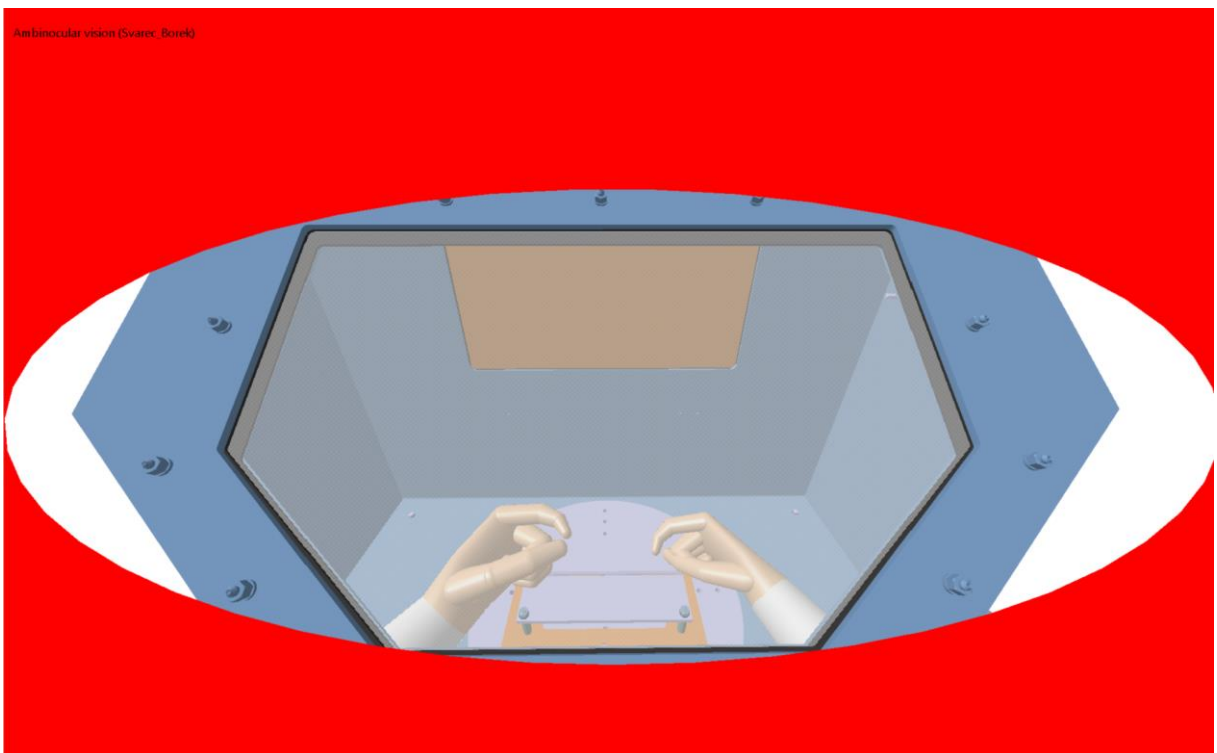
Trubkové zásobníky pro přídatný materiál byly odstraněny, to umožnilo zvětšení průzoru v čele komory a zlepšilo se zorné pole svářeče (obr. 5.23). Celkový nárůst objemu komory dále výrazně usnadňuje manipulaci s hořákem, přídatným svařovaným materiálem a vlastním svařencem.



Obr. 5.21: Zobrazení ergonomie posedu během svařování v upravené experimentální komoře /40/



Obr. 5.22: Zobrazení ergonomie polohy paží operátora během svařování v upravené experimentální komoře /40/



Obr. 5.23: Zobrazení zorného pole operátora během svařování v upravené experimentální komoře /40/

6 Závěr

V předložené diplomové práci byl proveden návrh komory pro svařování vysoce reaktivních materiálů a byla provedena optimalizace procesních parametrů pro svařování titanu Grade 2. Dále byla vyhodnocena funkčnost stávajícího experimentálního svařovacího pracoviště a na základě zjištěných informací byl proveden návrh na úpravu této komory.

Při hodnocení funkčnosti stávajícího experimentálního pracoviště bylo provedeno několik zkušebních svarů. Z vyhodnocení vzhledu dle vzhledové tabulky a následného měření tvrdosti experimentálních svarů provedených na tomto prototypovém svařovacím stanovišti dále vyplývá, že komora ve stávající konfiguraci neplní dostatečně svou funkci pro udržení inertní atmosféry a dochází k její kontaminaci.

Ergonomická analýza jasně poukazuje na špatné koncepční řešení vzhledem k ergonomii dlouhodobější práce či práce ve vícesměnném provozu. Tato zbytečná fyzická náročnost obsluhy a vlastní práce, která je kladená na operátora tohoto svařovacího pracoviště, by se z krátkodobého hlediska určitě projevila na kvalitě odváděné práce. Z dlouhodobějšího hlediska by mohla vést ke zhoršení zdravotního stavu operátora, případně by se projevila jako nemoc z povolání.

Provedený návrh na úpravy současného stavu svařovací komory a úprava parametrů procesu primárně povede ke zlepšení její současné funkčnosti z hlediska ochrany svarové lázně během svařování vysoce reaktivních materiálů. Další zlepšení přinese zvýšení ergonomie celého pracoviště pro pohodlnější obsluhu operátorem.

Pro návrh nově koncipované svařovací komory byla také vytvořena kompletní výkresová dokumentace a kusovníky týkající jak vlastní svařovací komory, tak také příslušenství jako jsou ochranné rukavice, vakuová vývěva, nebo měřák pro stanovení zbytkového kyslíku.

7 Seznam použitých zdrojů

- /1/ SEDLÁČEK, V. Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963, 205 s. Řada hutnické literatury.
- /2/ RUŽA, V. Zváranie titánu v ochrane argónu. 1. vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966, 157 s.
- /3/ ABKOWITZ, S. Titanium in industry: technology of structural titanium. New York: Van Nostrand, [c1955], 224 p.
- /4/ KOUKAL, J; SCHWARZ, D a HAJDÍK, J. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- /5/ CAHN, R a BEVER, M. Encyclopedia of materials science and engineering. 1st ed. New York: Pergamon Press, 1988-1993, 3 v. (xvi, 2229 p.). ISBN 00803252111.
- /6/ LANCASTER, J. The metallurgy of welding, brazing and soldering. 2nd ed. London: Allen & Unwin, 1970, 303 p. ISBN 0046690042.
- /7/ HRIVŇÁK, I. Teória zvariteľnosti kovov a zliatin. Vyd. 1. Bratislava: Veda, 1989, 343 p. ISBN 8022400165.
- /8/ Metallothermic reduction of in-situ generated titanium chloride . Databáze patentů USPTO. [online]. 14.7.2008 [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US20080190778>
- /9/ Titanium Metals – Titanium Sponge. Toho Titanium co.,LTD. [online]. 1.1.2009 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://www.toho-titanium.co.jp/en/products/sponge_en.html
- /10/ Production of titanium ingots and slabs. Antares Internacional Company. [online]. 1.1.2009 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.antares.com.ua/Facilities.html>
- /11/ Vavrda, O. VLASTNOSTI TITANU. Ondřej Vavrda A JEHO OSOBNÍ – NEOSOBNÍ STRÁNKA. [online]. 1.1.2008 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.fd.cvut.cz/personal/vavrdond/text3.html>
- /12/ Periodická tabulka v češtině. Svět Androida. [online]. 1.1.2014 [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://www.svetandroida.cz/periodicka-tabulka-v-cestine-tahak-do-kapsy-nejen-pro-male-chemiky-201310>
- /13/ CRAIG, C. W. Ellingham Diagrams. Equilibrium Conditions for Solid Solutions. [online]. 3.12.2012 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: http://pruffle.mit.edu/3.00/Lecture_33_web/node4.html
- /14/ Titan Grade 2 Komerčně čistý titan. INKOSAS a.s.. [online]. 1.5.2008 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.inkosas.cz/download/titanove-slitiny-grade/titan-grade-2.pdf>
- /15/ Columbia (raketoplán). Wikipedie – Otevřená encyklopedie. [online]. 2.11.2014 [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Columbia_\(raketopl%C3%A1n\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Columbia_(raketopl%C3%A1n))

- /16/ Gold looking great! Plus Titanium another Hot Market!. The Market Oracle. [online]. 16.7.2005 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.marketoracle.co.uk/Article1213.html>
- /17/ Lockheed SR-71 Blackbird. Wikipedie – Otevřená encyklopedie. [online]. 28.12.2014 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Lockheed_SR-71_Blackbird
- /18/ Fascinating photos reveal how they built the SR-71 Blackbird . Sploid. [online]. 2.7.2015 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://sploid.gizmodo.com/fascinating-photos-reveal-how-they-built-the-sr-71-blac-1683754944>
- /19/ JonoZon. M1 Abrams. Photobucket. [online]. 1.1.2015 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://s148.photobucket.com/user/JonoZon/media/M1Abrams2.jpg.html>
- /20/ McDonnell Douglas AH-64 Apache. Wikipedie – Otevřená encyklopedie. [online]. 29.3.2015 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: https://ru.wikipedia.org/wiki/McDonnell_Douglas_AH-64_Apache
- /21/ Burls bike frames. : Road Cycling UK. [online]. 1.2.2008 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://roadcyclinguk.com/gear/burls-bike-frames.html>
- /22/ Technabob. Exo 3D Printed Titanium Leg Concept: The Six Hundred Dollar Man . . [online]. 1.5.2013 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://technabob.com/blog/2014/12/29/exo-3d-printed-titanium-leg/>
- /23/ Buying the Best Golf Clubs. Best Golf Clubs. [online]. 1.1.2008 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.bestgolfclubsinfo.com/>
- /24/ Excalibur Quatuor in titanium DLC. Roger Dubuis – Horloger Genevois. [online]. 16.5.2014 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.rogerdubuis.com/en/collections/excalibur/excalibur/quatuor-limited-edition/2038-rddbex0425.html>
- /25/ Furtif Evercut Knives. A Plus Store. [online]. 18.9.2014 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.aplusstore.com/product/1499/furtif-evercut-knives>
- /26/ Autoart Pagani Zonda . Diecastxchange. [online]. 8.8.2011 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.diecastxchange.com/forum1/topic/59437-autoart-pagani-zonda-another1/>
- /27/ MORAVEC, J.: TA02010992 Vývoj a verifikace nových numerických metod svařování a tepelného zpracování, včetně zjednodušené numerické predikce životnosti svarových spojů, pro progresivní materiály využívané v energetice, leteckém a případně i kosmickém průmyslu. technická zpr. č.: TUL-Z-14-VS-Ti-Gr2-01, Dvouvrstvý testovací svar na Titanu Grade 2 (vzorek 1), Liberec 2015
- /28/ Titanium Weld color quality inspection chart. Mr. Tig Blog. [online]. 16.5.2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: http://weld.com/images/Mr%20TIG%20Articles/Titanium_Weld_Color_Quality_Inspection_Chart_.jpg
- /29/ How to Weld Titanium inside a Purge Chamber | TIG Time. YouTube. [online]. 13.7.2012 [cit. 2014-10-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Pq4ft34TG7s>

- /30/ Relevant Technologies. *Indiamart.com*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.indiamart.com/relevant-technologies/products.html>
- /31/ Kohout kulový – Mini. Schwer fittings – Šroubení z nerezavějících ocelí. [online]. 1.5.2014 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://www.schwer.com/cs_CZ/hydraulika-pneumatika/armatury-kulov%C3%A9-kohouty-ventily/kulov%C3%A9-kohouty-se-z%C3%A1-ezn%C3%BDm-prstencem/kohout-kulov%C3%BD-mini-252865
- /32/ PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ KYSLÍKU JAero2. Společnost ARC – H a.s. Dodavatel komplexních technologických zařízení pro zpracování kovů. [online]. 1.5.2010 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://www.arc-h.cz/files/ja/pristroj_pro_mereni.pdf
- /33/ Vývěva VALUE VE245N. RADESIT, s.r.o.. [online]. 1.1.2010 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.radesit.cz/index.php?route=product/product&product_id=1450
- /34/ List of countries by titanium production. Wikipedie – Otevřená encyklopedie. [online]. 9.2.2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_titanium_production
- /35/ Titan (prvek). Wikipedie – otevřená encyklopedie. [online]. 6.4.2015 [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_%28prvek%29
- /36/ KLAPKOVÁ, Alena. Mechanické vlastnosti titanových slitin. Brno 2012. Bakalářská práce. VUT - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství.
- /37/ Thyssenkrupp. [online]. 11.4.2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp.com/en/suche/index.html?q=titan+grade+11&lr=>
- /38/ Libor Marek. ANSI standard. Ergonomie. [online]. 1.5.2010 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://marlib.cmssps.cz/ergonomie/ergonomie.html>
- /39/ Výběrové šetření o zdravotním stavu české populace (HIS CR 2002) – Index tělesné hmotnosti (III. díl) [PDF]. Ústavu zdravotnických informací a statistiky České republiky. [online]. 1.10.2002 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: www.uzis.cz/system/files/48_02.pdf
- /40/ [program] Catia V5R20 2012, Dessalut Systèmes

8 Seznam příloh

Příloha DP:

Tabulka 1- Inspekční tabulka svarových spojů titanu

Obrázek 1 - Měření tvrdosti - Vzorek 1, Housenka 1 a 2, řez F

Obrázek 2 - Měření tvrdosti - Vzorek 1, Housenka 1 a 2, řez G

Obrázek 3 - Měření tvrdosti - Vzorek 2, Housenka 1, řez B

Obrázek 4 - Měření tvrdosti - Vzorek 2, Housenka 1 a 2, řez C

Obrázek 5 - Měření tvrdosti - Vzorek 2, Housenka 1 a 2, řez E

Obrázek 6 - Měření tvrdosti - Vzorek 2, Housenka 1 a 2, řez F

Tabulka 2 - Průběhy hodnot tvrdostí v jednotlivých řezech - Vzorek 1, řada 1

Tabulka 3 - Průběhy hodnot tvrdostí v jednotlivých řezech - Vzorek 1, řada 2

Tabulka 4 - Průběhy hodnot tvrdostí v jednotlivých řezech - Vzorek 2, řada 1

Tabulka 5 - Průběhy hodnot tvrdostí v jednotlivých řezech - Vzorek 2, řada 2

Graf 1 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1

Graf 2 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 1

Graf 3 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 2

Graf 4 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 3

Graf 5 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 4

Graf 6 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 5

Graf 7 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2

Graf 8 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2, část 1

Graf 9 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2, část 2

Graf 10 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2, část 3

Graf 11 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2, část 4

Graf 12 - Průběhy tvrdostí v základním materiálu a svarové housence 1 a 2, VZ 2

Graf 13 - Průběhy tvrdostí v základním materiálu a svarové housence 1 a 2, VZ 2

Příložené CD:

Výkres 001 - Montážní sestava - Svařovací komora

Kusovník 001.1 - Nenormalizované díly

Kusovník 001.2 - Normalizované díly

Výkres 01.001 - Podsestava 1 - Svařovací sestava

Výkres 01.01 - Svařovací komora - Dno - zadní stěna

Výkres 01.02 - Svařovací komora - Přední - boční stěna

Výkres 01.03 - Svařovací komora - Čelo - vrchní stěna

Výkres 02.001 - Zadní víko

Výkres 03.001 - Plexisklo průzoru

Výkres 04.001 - Rámeček průzoru

Výkres 05.001 - Těsnění průzoru

Výkres 06.001 - Objímka hořáku

Výkres 07.001 - Čep otočného stolku

Výkres 08.001 - Otočný stolek

Výkres 09.001 - Kontaktní výstupek - uzemnění

Výkres 10.001 - Podložka pant

Výkres 002 - Zkušební vzorek

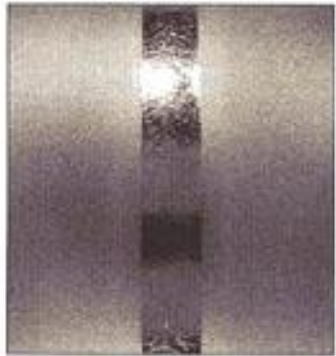

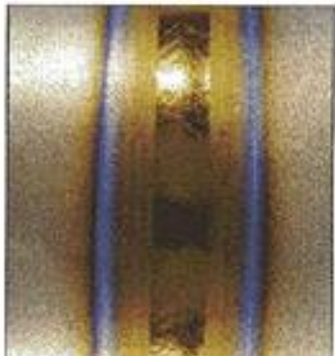
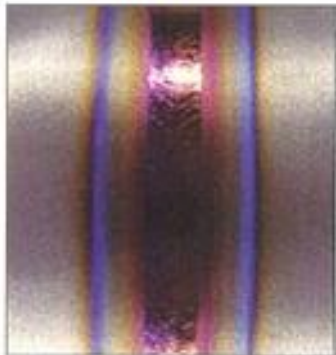


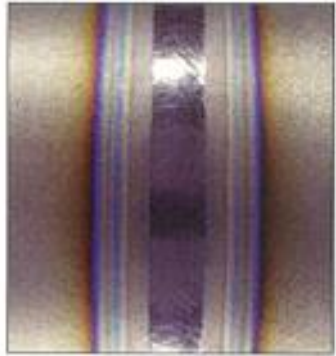
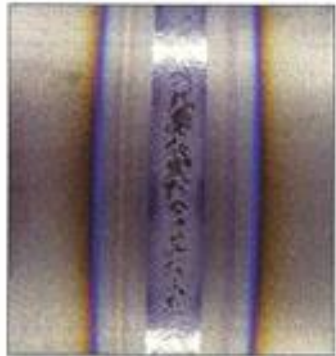

Výkres 003 - Přípravek zkušební vzorku

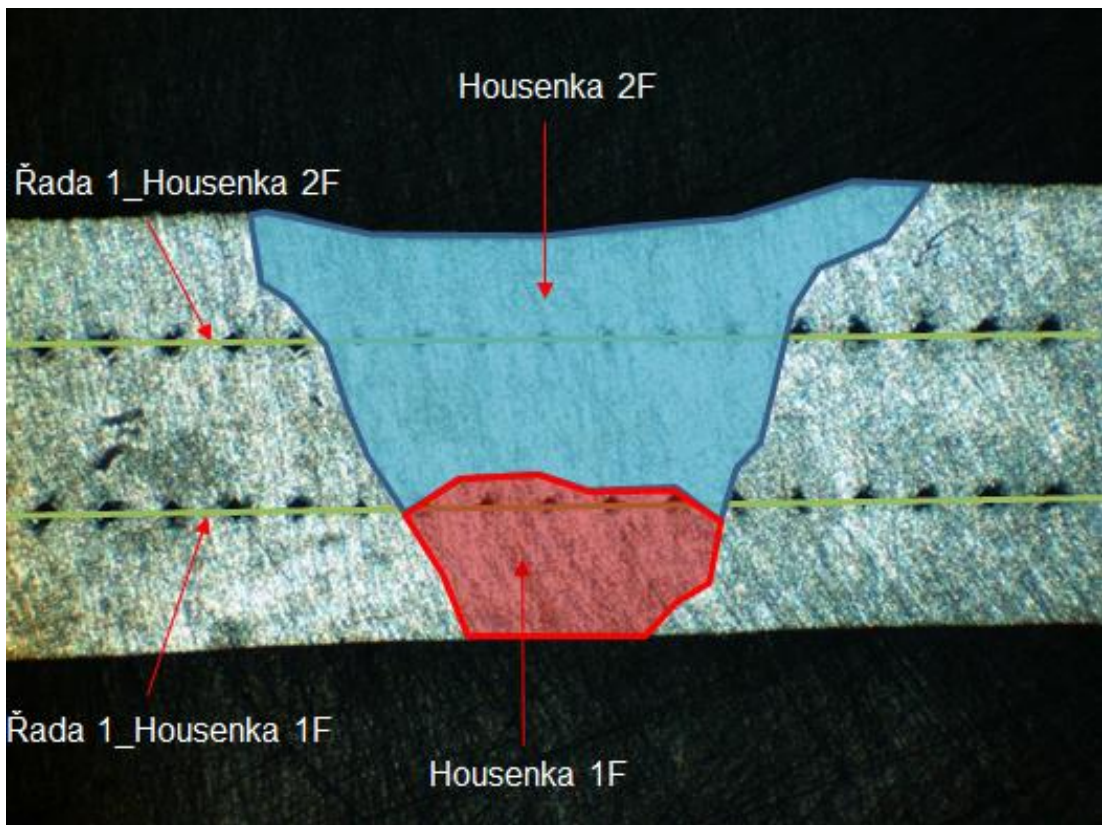
Výkres 01.003 - Upínací deska

Výkres 02.003 - Upínací váleček

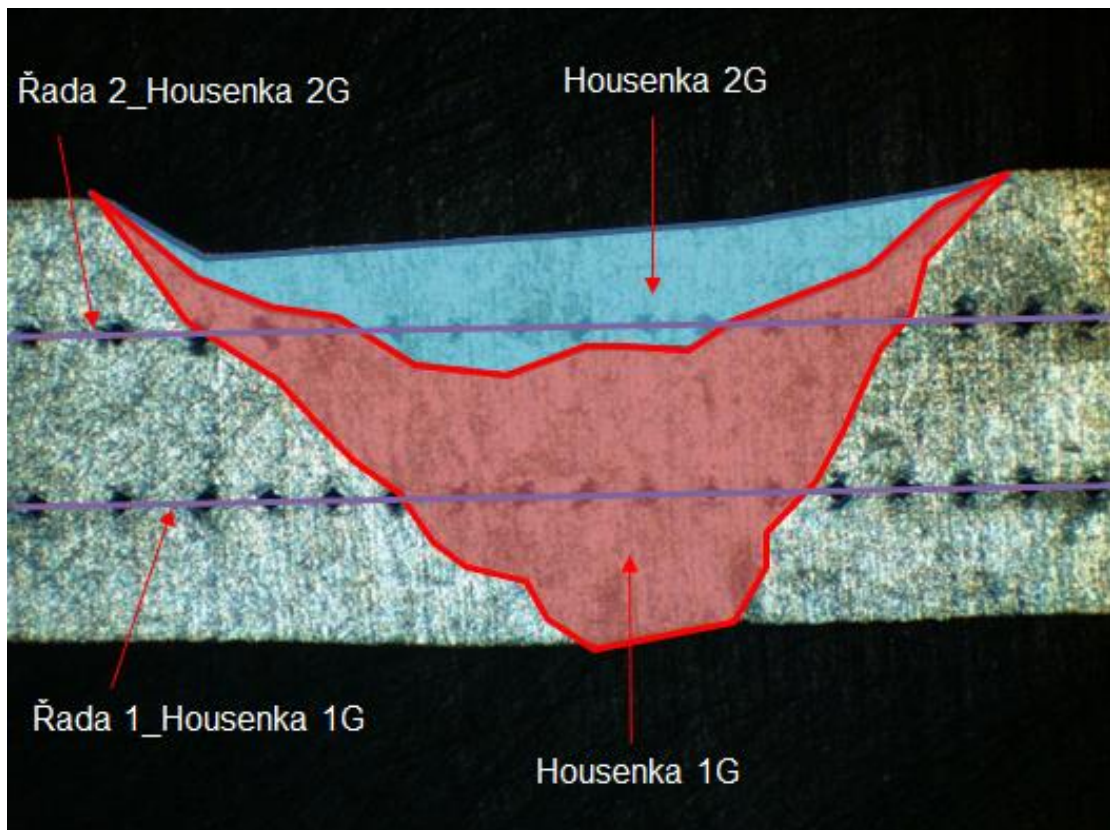
Výkres 03.003 - Kontaktní váleček

Tabulka 1- Inspekční tabulka svarových spojů titanu /28/

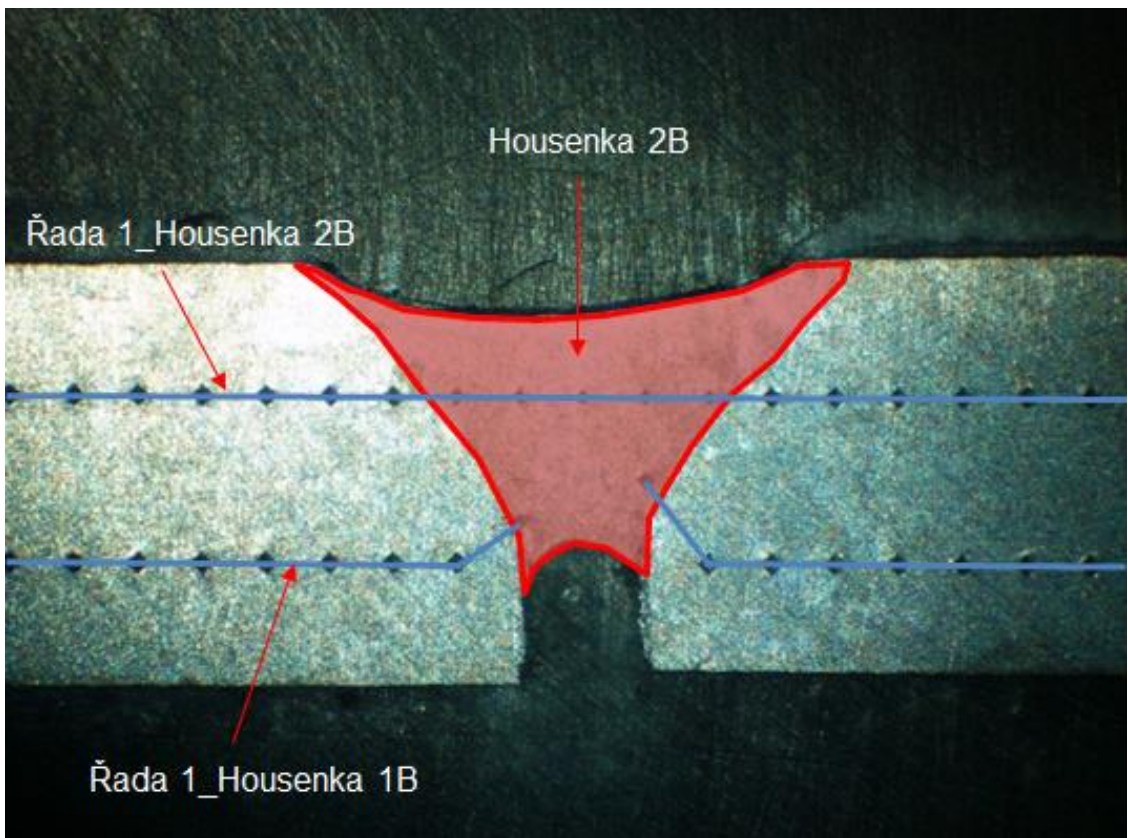
<p>Sříbně lesklá</p>  <p>Akceptovatelné</p>	<p>Světle slámová</p>  <p>Akceptovatelné</p>	<p>Tmavě slámová</p>  <p>Akceptovatelné</p>
<p>Purpurová</p>  <p>Neakceptovatelné</p>	<p>Modrá</p>  <p>Neakceptovatelné</p>	<p>Žlutá</p>  <p>Neakceptovatelné</p>
<p>Šedá</p>  <p>Neakceptovatelné</p>	<p>Bílá</p>  <p>Neakceptovatelné</p>	<p>Po kartáčování</p>  <p>Neakceptovatelné</p>



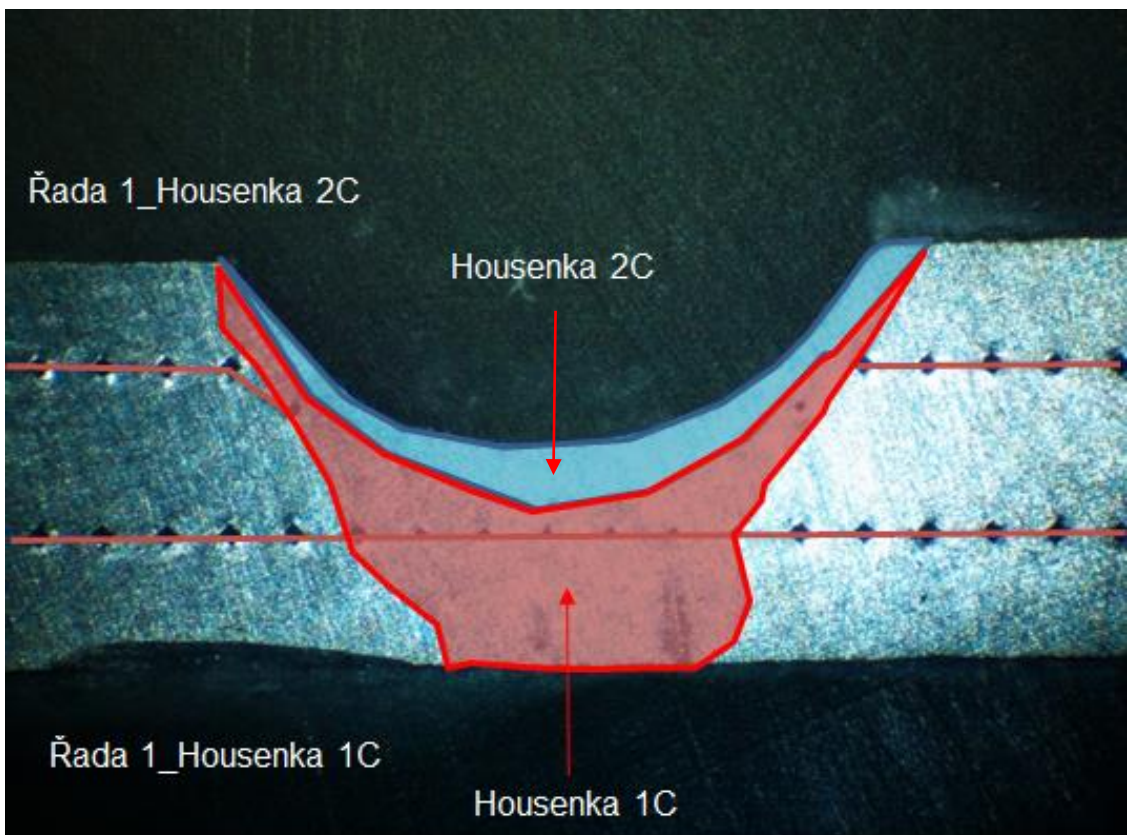
Obrázek 1: Měření tvrdosti - Vzorek 1, Housenka 1 a 2, řez F



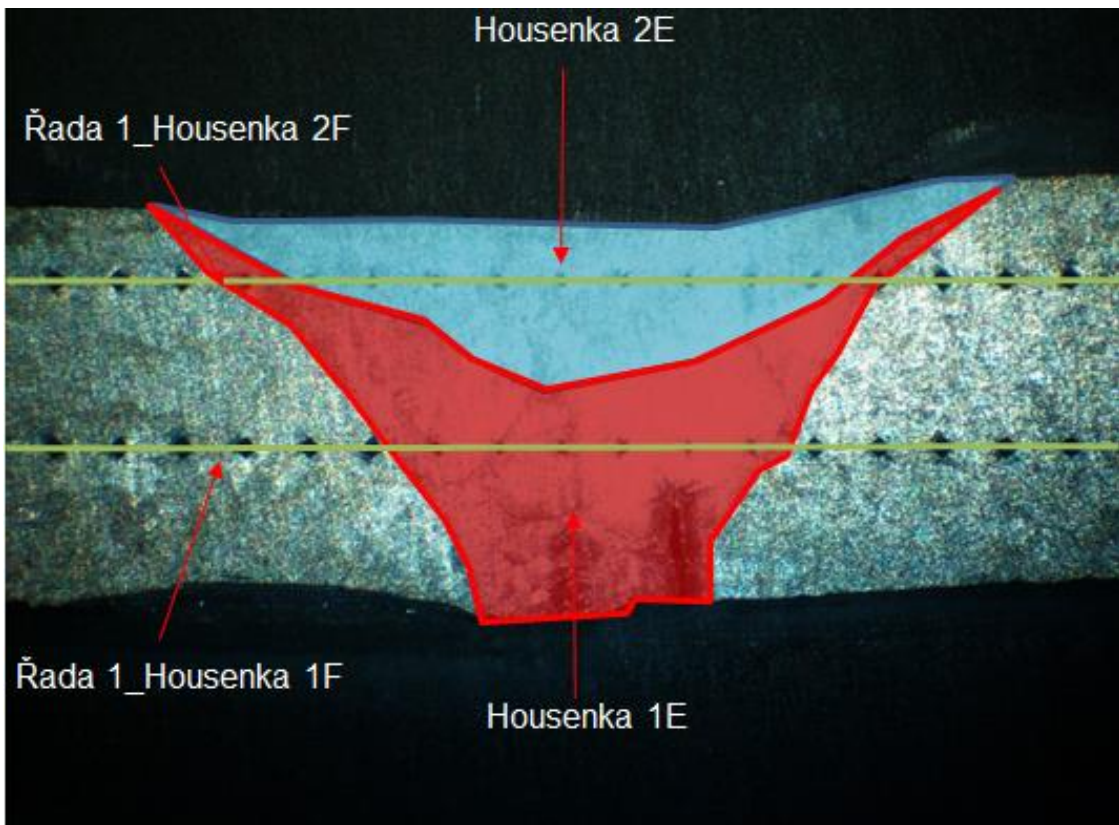
Obrázek 2: Měření tvrdosti - Vzorek 1, Housenka 1 a 2, řez G



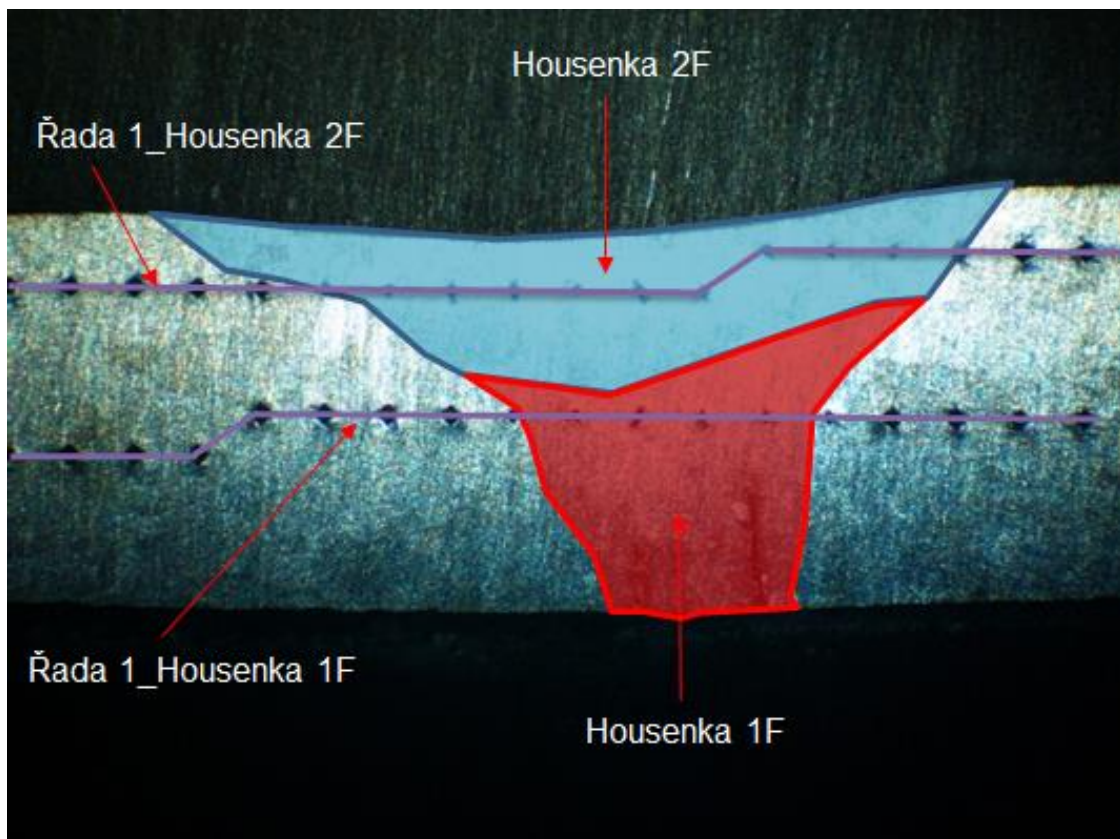
Obrázek 3: Měření tvrdosti - Vzorek 2, Housenka 1, řez B



Obrázek 4: Měření tvrdosti - Vzorek 2, Housenka 1 a 2, řez C



Obrázek 5: Měření tvrdosti - Vzorek 2, Housenka 1 a 2, řez E



Obrázek 6: Měření tvrdosti - Vzorek 2, Housenka 1 a 2, řez F

Tabulka 2 - Průběhy hodnot tvrdostí v jednotlivých řezech - Vzorek 1, řada 1

Pořadí vpichů	Vzorek 1											
	ŘADA 1B			ŘADA 1D			ŘADA 1F			ŘADA 1G		
	Vzdál. od hranic	Tvrdost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdost HV 5	Oblast umístění vpichu
1	-16,80	119	ZM	-16,25	121	ZM	-15,1	115	ZM	-14,85	116	ZM
2	-14,80	122	ZM	-14,25	120	ZM	-13,1	117	ZM	-12,85	115	ZM
3	-12,80	119	ZM	-12,25	120	ZM	-11,1	118	ZM	-10,85	110	ZM
4	-10,80	116	ZM	-10,25	117	ZM	-9,1	118	ZM	-8,85	114	ZM
5	-8,80	121	ZM	-8,25	117	ZM	-7,1	130	ZM	-6,85	112	ZM
6	-7,80	121	ZM	-7,25	116	ZM	-6,1	115	ZM	-5,85	114	ZM
7	-6,80	121	ZM	-6,25	123	ZM	-5,1	125	ZM	-4,85	117	ZM
8	-5,80	119	ZM	-5,25	119	ZM	-4,1	107	ZM	-3,85	118	ZM
9	-4,80	121	ZM	-4,25	116	ZM	-3,1	109	ZM	-2,85	116	ZM
10	-4,05	108	ZM	-3,50	117	ZM	-2,35	119	ZM	-2,1	118	ZM
11	-3,30	120	ZM	-2,75	125	ZM	-1,6	155	TOO	-1,35	123	ZM
12	-2,55	112	ZM	-2,00	117	ZM	-0,85	210	TOO	-0,6	164	TOO
13	-1,80	121	ZM	-1,25	116	ZM	-0,1	208	TOO	0,15	162	SVAR 1
14	-1,05	115	ZM	-0,5	121	TOO	0,65	231	SVAR 1	0,9	152	SVAR 1
15	-0,3	124	TOO	0,25	206	SVAR 1	1,4	257	SVAR 1	1,65	171	SVAR 1
16	0,45	152	SVAR 1	1,00	194	SVAR 1	2,15	216	SVAR 1	2,4	174	SVAR 1
17	1,20	172	SVAR 1	1,75	185	SVAR 1	2,9	237	SVAR 1	3,15	177	SVAR 1
18	1,95	161	SVAR 1	2,50	202	SVAR 1	3,65	252	SVAR 1	3,9	122	TOO
19	2,70	172	SVAR 1	3,25	162	SVAR 1	4,4	265	TOO	4,65	119	ZM
20	3,45	127	TOO	4,00	116	TOO	5,15	137	TOO	5,4	114	ZM
21	4,20	123	ZM	4,75	112	ZM	5,9	104	ZM	6,15	112	ZM
22	4,95	120	ZM	5,50	108	ZM	6,65	121	ZM	6,9	115	ZM
23	5,70	114	ZM	6,25	117	ZM	7,4	115	ZM	7,65	116	ZM
24	6,45	125	ZM	7,00	113	ZM	8,15	113	ZM	8,4	109	ZM
25	7,20	108	ZM	7,75	111	ZM	8,9	112	ZM	9,15	118	ZM
26	7,95	116	ZM	8,50	123	ZM	9,65	122	ZM	9,9	113	ZM
27	8,70	130	ZM	9,25	124	ZM	10,4	113	ZM	10,65	108	ZM
28	9,45	114	ZM	10,00	126	ZM	11,15	114	ZM	11,4	115	ZM
29	10,45	117	ZM	11,00	124	ZM	12,15	114	ZM	12,4	115	ZM
30	11,45	115	ZM	12,00	118	ZM	13,15	119	ZM	13,4	113	ZM
31	12,45	114	ZM	13,00	122	ZM	14,15	115	ZM	14,4	112	ZM
32	14,45	120	ZM	15,00	119	ZM	16,15	119	ZM	16,4	113	ZM
33	16,45	118	ZM	17,00	119	ZM	18,15	114	ZM	18,4	112	ZM
34	18,45	119	ZM	19,00	126	ZM	20,15	120	ZM	20,4	110	ZM
35	21,45	123	ZM	22,00	118	ZM	23,15	114	ZM	23,4	113	ZM
36	24,45	124	ZM	25,00	124	ZM	26,15	116	ZM	26,4	120	ZM
37	27,45	124	ZM	28,00	120	ZM	29,15	120	ZM	29,4	115	ZM
38	30,45	121	ZM	31,00	122	ZM	32,15	116	ZM	32,4	119	ZM
39	33,45	117	ZM	34,00	120	ZM	35,15	115	ZM	35,4	120	ZM
40	36,45	123	ZM	37,00	120	ZM	38,15	118	ZM	38,4	115	ZM
41	39,45	122	ZM	40,00	120	ZM	41,15	117	ZM	41,4	115	ZM
42	42,45	120	ZM	43,00	124	ZM	44,15	121	ZM	44,4	118	ZM
43	45,45	123	ZM	46,00	124	ZM	47,15	117	ZM	47,4	113	ZM
44	48,45	123	ZM	49,00	123	ZM	50,15	120	ZM	50,4	118	ZM
45	51,45	124	ZM	52,00	122	ZM	53,15	114	ZM	53,4	117	ZM
46	54,45	125	ZM	55,00	121	ZM	56,15	117	ZM	56,4	116	ZM
47	57,45	127	ZM	58,00	122	ZM	59,15	117	ZM	59,4	116	ZM
48				61,00	127	ZM						

Tabulka 3 - Průběhy hodnot tvrdostí v jednotlivých řezech - Vzorek 1, řada 2

Pořadí vpichů	Vzorek 1											
	ŘADA 2B			ŘADA 2D			ŘADA 2F			ŘADA 2G		
	Vzdál. od hranic	Tvrdoost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdoost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdoost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdoost HV 5	Oblast umístění vpichu
1	-15,2	117	ZM	-14,35	116	ZM	-14,35	115	ZM	-12,1	113	ZM
2	-13,2	116	ZM	-12,35	114	ZM	-12,35	113	ZM	-10,1	114	ZM
3	-11,2	119	ZM	-10,35	115	ZM	-10,35	113	ZM	-8,1	113	ZM
4	-9,2	119	ZM	-8,35	115	ZM	-8,35	120	ZM	-6,1	115	ZM
5	-7,2	119	ZM	-6,35	118	ZM	-6,35	114	ZM	-4,1	116	ZM
6	-6,2	123	ZM	-5,35	123	ZM	-5,35	117	ZM	-3,1	117	ZM
7	-5,2	121	ZM	-4,35	113	ZM	-4,35	116	ZM	-2,1	110	ZM
8	-4,2	127	ZM	-3,35	120	ZM	-3,35	117	ZM	-1,1	131	ZM
9	-3,2	118	ZM	-2,35	122	ZM	-2,35	109	ZM	-0,1	150	TOO
10	-2,45	111	ZM	-1,6	117	ZM	-1,6	115	ZM	0,65	215	SVAR 2
11	-1,7	125	ZM	-0,85	113	ZM	-0,85	108	ZM	1,4	208	SVAR 2
12	-0,95	123	ZM	-0,1	122	TOO	-0,1	154	TOO	2,15	230	SVAR 2
13	-0,2	120	TOO/ZM	0,65	203	SVAR 2	0,65	240	SVAR 2	2,9	205	SVAR 2
14	0,55	162	SVAR 1	1,4	220	SVAR 2	1,4	250	SVAR 2	3,65	204	SVAR 2
15	1,3	174	SVAR 1	2,15	209	SVAR 2	2,15	219	SVAR 2	4,4	235	SVAR 2
16	2,05	161	SVAR 1	2,9	230	SVAR 2	2,9	221	SVAR 2	5,15	216	SVAR 2
17	2,8	159	SVAR 1	3,65	214	SVAR 2	3,65	250	SVAR 2	5,9	228	SVAR 2
18	3,55	167	SVAR 1	4,4	215	SVAR 2	4,4	231	SVAR 2	6,65	207	SVAR 2
19	4,3	164	SVAR 1	5,15	220	SVAR 2	5,15	308	SVAR 2	7,4	180	TOO
20	5,05	165	SVAR 1	5,9	221	SVAR 2	5,9	124	TOO	8,15	117	ZM
21	5,8	167	SVAR 1	6,65	202	SVAR 2	6,65	120	ZM	8,9	118	ZM
22	6,55	159	TOO	7,4	128	TOO	7,4	112	ZM	9,65	116	ZM
23	7,3	168	TOO	8,15	117	ZM	8,15	113	ZM	10,4	123	ZM
24	8,05	127	ZM	8,9	122	ZM	8,9	121	ZM	11,15	106	ZM
25	8,8	116	ZM	9,65	119	ZM	9,65	117	ZM	11,9	113	ZM
26	9,55	117	ZM	10,4	120	ZM	10,4	118	ZM	12,65	125	ZM
27	10,3	113	ZM	11,15	119	ZM	11,15	117	ZM	13,4	104	ZM
28	11,05	113	ZM	11,9	122	ZM	11,9	123	ZM	14,15	123	ZM
29	12,05	124	ZM	12,9	122	ZM	12,9	115	ZM	15,15	110	ZM
30	13,05	121	ZM	13,9	119	ZM	13,9	111	ZM	16,15	112	ZM
31	14,05	121	ZM	14,9	119	ZM	14,9	114	ZM	17,15	113	ZM
32	16,05	119	ZM	16,9	113	ZM	16,9	113	ZM	19,15	116	ZM
33	18,05	122	ZM	18,9	118	ZM	18,9	110	ZM	21,15	111	ZM
34	20,05	123	ZM	20,9	127	ZM	20,9	115	ZM	23,15	117	ZM
35	23,05	123	ZM	23,9	118	ZM	23,9	117	ZM	26,15	119	ZM
36	26,05	121	ZM	26,9	121	ZM	26,9	116	ZM	29,15	120	ZM
37	29,05	125	ZM	29,9	114	ZM	29,9	117	ZM	32,15	118	ZM
38	32,05	121	ZM	32,9	115	ZM	32,9	115	ZM	35,15	120	ZM
39	35,05	119	ZM	35,9	116	ZM	35,9	117	ZM	38,15	118	ZM
40	38,05	118	ZM	38,9	112	ZM	38,9	125	ZM	41,15	118	ZM
41	41,05	122	ZM	41,9	124	ZM	41,9	120	ZM	44,15	121	ZM
42	44,05	118	ZM	44,9	117	ZM	44,9	117	ZM	47,15	121	ZM
43	47,05	119	ZM	47,9	114	ZM	47,9	119	ZM	50,15	119	ZM
44	50,05	121	ZM	50,9	118	ZM	50,9	120	ZM	53,15	119	ZM
45	53,05	120	ZM	53,9	118	ZM	53,9	119	ZM	56,15	116	ZM
46	56,05	126	ZM	56,9	116	ZM	56,9	118	ZM	59,15	117	ZM
47	59,05	122	ZM	59,9	119	ZM	59,9	115	ZM	62,15	114	ZM
48				62,9	140	ZM	62,9					

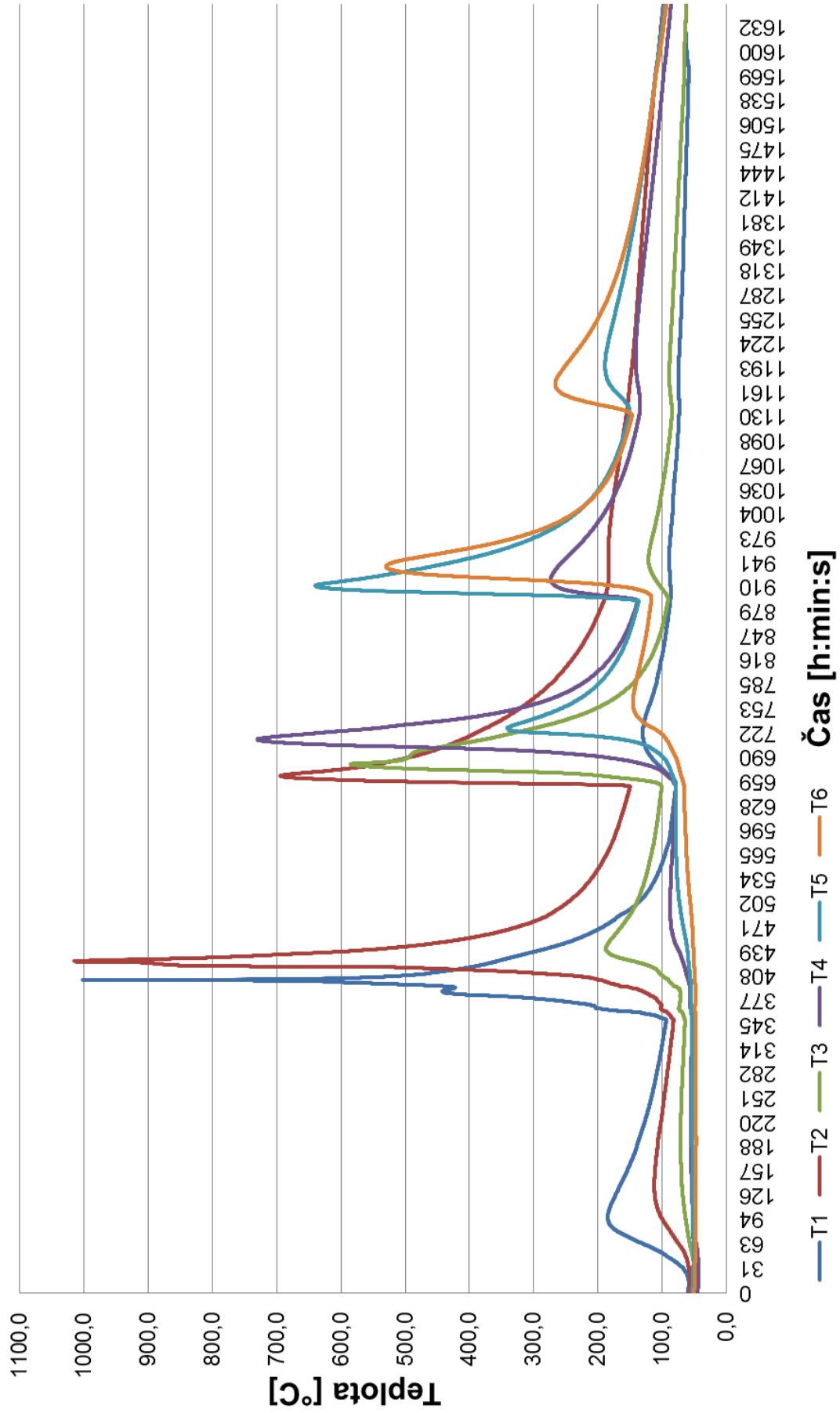
Tabulka 4 - Průběhy hodnot tvrdostí v jednotlivých řezech - Vzorek 2, řada 1

Pořadí vpichů	Vzorek 2											
	ŘADA 1B			ŘADA 1C			ŘADA 1E			ŘADA 1F		
	Vzdál. od hranic	Tvrдост HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrдост HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrдост HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrдост HV 5	Oblast umístění vpichu
1	-58,55	113	ZM	-57,95	112	ZM	-58,05	115	ZM	-58,15	112	ZM
2	-55,55	115	ZM	-54,95	114	ZM	-55,05	116	ZM	-55,15	110	ZM
3	-52,55	115	ZM	-51,95	115	ZM	-52,05	113	ZM	-52,15	116	ZM
4	-49,55	117	ZM	-48,95	111	ZM	-49,05	115	ZM	-49,15	116	ZM
5	-46,55	116	ZM	-45,95	115	ZM	-46,05	119	ZM	-46,15	116	ZM
6	-43,55	113	ZM	-42,95	116	ZM	-43,05	111	ZM	-43,15	114	ZM
7	-40,55	115	ZM	-39,95	108	ZM	-40,05	114	ZM	-40,15	115	ZM
8	-37,55	119	ZM	-36,95	118	ZM	-37,05	115	ZM	-37,15	117	ZM
9	-34,55	118	ZM	-33,95	119	ZM	-34,05	112	ZM	-34,15	119	ZM
10	-31,55	115	ZM	-30,95	116	ZM	-31,05	112	ZM	-31,15	117	ZM
11	-28,55	115	ZM	-27,95	112	ZM	-28,05	113	ZM	-28,15	118	ZM
12	-25,55	116	ZM	-24,95	115	ZM	-25,05	114	ZM	-25,15	118	ZM
13	-22,55	115	ZM	-21,95	116	ZM	-22,05	118	ZM	-22,15	119	ZM
14	-20,55	120	ZM	-19,95	113	ZM	-20,05	112	ZM	-20,15	116	ZM
15	-18,55	118	ZM	-17,95	113	ZM	-18,05	113	ZM	-18,15	118	ZM
16	-16,55	115	ZM	-15,95	115	ZM	-16,05	115	ZM	-16,15	119	ZM
17	-14,55	120	ZM	-13,95	113	ZM	-14,05	113	ZM	-14,15	118	ZM
18	-12,55	116	ZM	-11,95	112	ZM	-12,05	116	ZM	-12,15	111	ZM
19	-11,8	112	ZM	-10,95	113	ZM	-11,3	115	ZM	-11,4	114	ZM
20	-11,05	113	ZM	-9,95	115	ZM	-10,55	113	ZM	-10,65	120	ZM
21	-10,3	115	ZM	-8,95	114	ZM	-9,8	114	ZM	-9,9	117	ZM
22	-9,55	116	ZM	-7,95	114	ZM	-9,05	116	ZM	-9,15	116	ZM
23	-8,8	113	ZM	-6,95	112	ZM	-8,3	115	ZM	-8,4	117	ZM
24	-8,05	112	ZM	-5,95	118	ZM	-7,55	112	ZM	-7,65	119	ZM
25	-7,3	111	ZM	-5,2	112	ZM	-6,8	118	ZM	-6,9	118	ZM
26	-6,55	114	ZM	-4,45	117	ZM	-6,05	112	ZM	-6,15	123	ZM
27	-5,8	111	ZM	-3,7	110	ZM	-5,3	118	ZM	-5,4	120	ZM
28	-5,05	112	ZM	-2,95	109	ZM	-4,55	115	ZM	-4,65	118	ZM
29	-4,3	116	ZM	-2,2	109	ZM	-3,8	113	ZM	-3,9	118	ZM
30	-3,55	111	ZM	-1,45	122	TOO	-3,05	119	TOO	-3,15	124	ZM
31	-2,8	109	ZM	-0,7	120	TOO	-2,3	115	TOO	-2,4	133	ZM
32	-2,05	116	TOO	0,05	286	SVAR 1	-1,55	117	TOO	-1,65	118	ZM
33	-1,3	114	TOO	0,8	338	SVAR 1	-0,8	124	TOO	-0,9	116	TOO
34	-0,55	112	TOO	1,55	318	SVAR 1	-0,05	326	SVAR 1	-0,15	237	SVAR 1
35	0,2	182	SVAR 1	2,3	326	SVAR 1	0,7	279	SVAR 1	0,6	275	SVAR 1
36				3,05	302	SVAR 1	1,45	270	SVAR 1	1,35	258	SVAR 1
37	1,5	189	SVAR 1	3,8	311	SVAR 1	2,2	264	SVAR 1	2,1	249	SVAR 1
38	2,25	119	TOO	4,55	132	TOO	2,95	269	SVAR 1	2,85	295	SVAR 1
39	3	117	TOO	5,3	113	ZM	3,7	304	SVAR 1	3,6	210	TOO
40	3,75	112	TOO	6,05	112	ZM	4,7	121	TOO	4,35	122	TOO
41	4,5	118	TOO	6,8	111	ZM	5,2	117	TOO	5,1	115	ZM
42	5,25	109	ZM	7,55	110	ZM	5,95	116	TOO	5,85	119	ZM
43	6	114	ZM	8,3	119	ZM	6,7	115	TOO	6,6	107	ZM
44	6,75	116	ZM	9,05	121	ZM	7,45	117	TOO	7,35	122	ZM
45	7,5	110	ZM	9,8	110	ZM	8,2	104	ZM	8,1	119	ZM
46	8,25	108	ZM	10,55	112	ZM	8,95	114	ZM	8,85	115	ZM
47	9	113	ZM	11,3	112	ZM	9,7	109	ZM	9,6	121	ZM
48	9,75	114	ZM	12,05	110	ZM	10,45	111	ZM	10,35	126	ZM
49	10,5	116	ZM				11,2	118	ZM	11,1	114	ZM
50	11,25	113	ZM				11,95	114	ZM	11,85	121	ZM

Tabulka 5 - Průběhy hodnot tvrdostí v jednotlivých řezech - Vzorek 2, řada 2

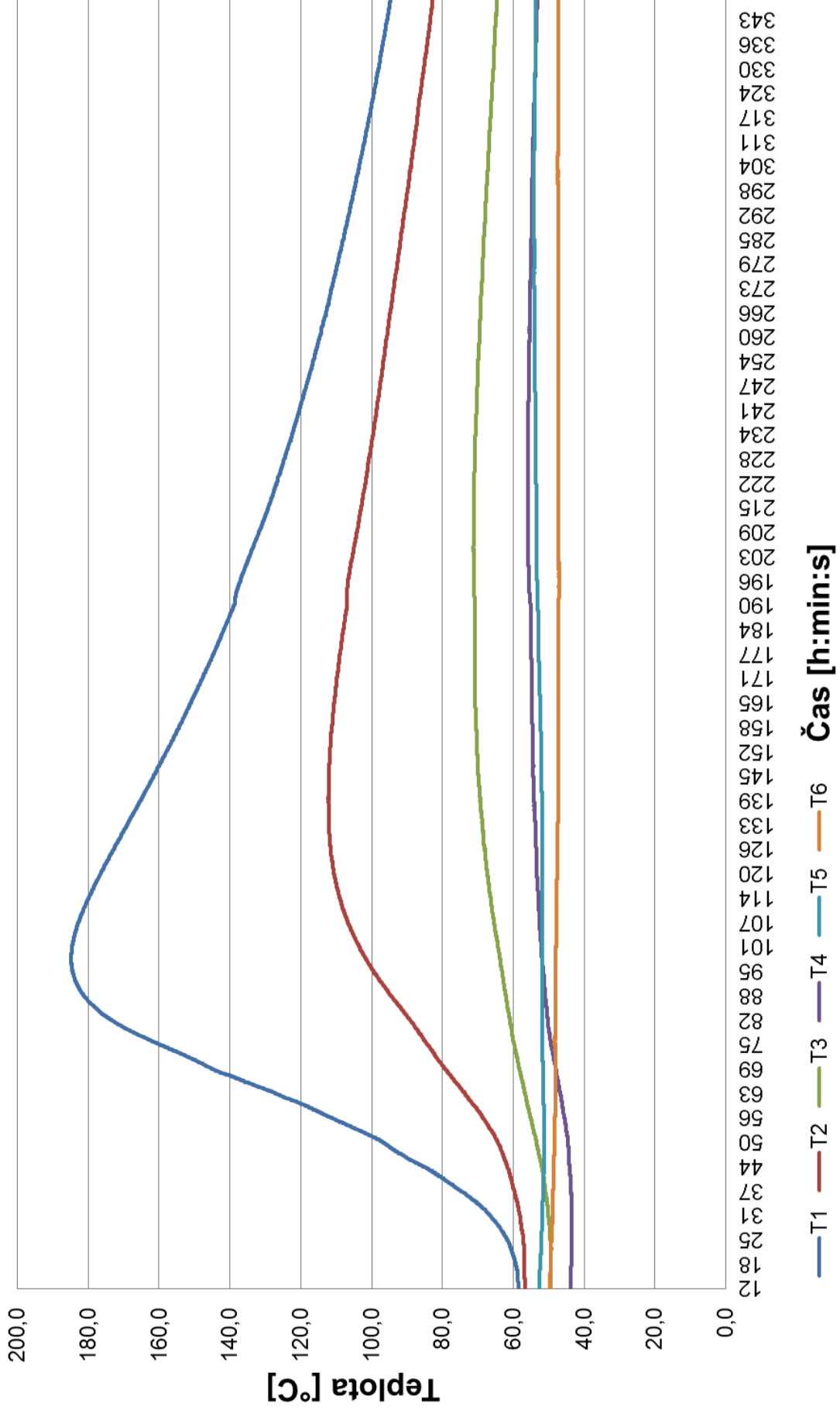
Pořadí vpichů	Vzorek 2											
	ŘADA 2B			ŘADA 2C			ŘADA 2E			ŘADA 2F		
	Vzdál. od hranic	Tvrdoost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdoost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdoost HV 5	Oblast umístění vpichu	Vzdál. od hranic	Tvrdoost HV 5	Oblast umístění vpichu
1	-57,45	113	ZM	-56,85	121	ZM	-56,55	114	ZM	-56,9	125	ZM
2	-54,45	119	ZM	-53,85	116	ZM	-53,55	119	ZM	-53,9	122	ZM
3	-51,45	116	ZM	-50,85	119	ZM	-50,55	116	ZM	-50,9	122	ZM
4	-48,45	111	ZM	-47,85	115	ZM	-47,55	120	ZM	-47,9	119	ZM
5	-45,45	118	ZM	-44,85	118	ZM	-44,55	120	ZM	-44,9	123	ZM
6	-42,45	115	ZM	-41,85	119	ZM	-41,55	116	ZM	-41,9	124	ZM
7	-39,45	112	ZM	-38,85	121	ZM	-38,55	118	ZM	-38,9	121	ZM
8	-36,45	115	ZM	-35,85	118	ZM	-35,55	116	ZM	-35,9	123	ZM
9	-33,45	111	ZM	-32,85	118	ZM	-32,55	113	ZM	-32,9	121	ZM
10	-30,45	113	ZM	-29,85	115	ZM	-29,55	114	ZM	-29,9	123	ZM
11	-27,45	117	ZM	-26,85	117	ZM	-26,55	117	ZM	-26,9	124	ZM
12	-24,45	114	ZM	-23,85	116	ZM	-23,55	120	ZM	-23,9	126	ZM
13	-21,45	116	ZM	-20,85	119	ZM	-20,55	117	ZM	-20,9	125	ZM
14	-19,45	116	ZM	-18,85	116	ZM	-18,55	117	ZM	-18,9	123	ZM
15	-17,45	118	ZM	-16,85	115	ZM	-16,55	117	ZM	-16,9	124	ZM
16	-15,45	115	ZM	-14,85	118	ZM	-14,55	119	ZM	-14,9	128	ZM
17	-13,45	114	ZM	-12,85	116	ZM	-12,55	116	ZM	-12,9	127	ZM
18	-11,45	117	ZM	-10,85	120	ZM	-10,55	119	ZM	-10,9	117	ZM
19	-10,7	114	ZM	-9,85	117	ZM	-9,8	118	ZM	-10,15	121	ZM
20	-9,95	114	ZM	-8,85	116	ZM	-9,05	113	ZM	-9,4	119	ZM
21	-9,2	112	ZM	-7,85	111	ZM	-8,3	116	ZM	-8,65	125	ZM
22	-8,45	113	ZM	-6,85	112	ZM	-7,55	116	ZM	-7,9	117	ZM
23	-7,7	117	ZM	-5,85	114	ZM	-6,8	115	ZM	-7,15	120	ZM
24	-6,95	118	ZM	-4,85	116	ZM	-6,05	117	ZM	-6,4	121	ZM
25	-6,2	116	ZM	-4,1	120	ZM	-5,3	115	ZM	-5,65	119	ZM
26	-5,45	115	ZM	-3,35	111	ZM	-4,55	115	ZM	-4,9	117	ZM
27	-4,7	116	ZM	-2,6	112	ZM	-3,8	117	ZM	-4,15	112	ZM
28	-3,95	114	ZM	-1,85	111	ZM	-3,05	111	ZM	-3,4	114	ZM
29	-3,2	117	ZM	-1,1	119	TOO	-2,3	114	ZM	-2,65	117	ZM
30	-2,45	117	ZM	-0,35	122	TOO	-1,55	114	ZM	-1,9	116	ZM
31	-1,7	119	TOO	0,4	320	SVAR 1	-0,8	113	ZM	-1,15	110	ZM
32	-0,95	118	TOO				-0,05	129	TOO	-0,4	142	TOO
33	-0,2	123	TOO				0,7	209	SVAR 2	0,35	255	SVAR 2
34	0,55	186	SVAR 1				1,45	236	SVAR 2	1,1	265	SVAR 2
35	1,3	182	SVAR 1				2,2	224	SVAR 2	1,85	243	SVAR 2
36	2,05	209	SVAR 1				2,95	221	SVAR 2	2,6	252	SVAR 2
37	2,8	215	SVAR 1				3,7	253	SVAR 2	3,35	234	SVAR 2
38	3,55	205	SVAR 1	6,75			4,45	216	SVAR 2	4,1	272	SVAR 2
39	4,3	126	TOO	7,5	216	TOO	5,2	217	SVAR 2	4,85	245	SVAR 2
40	5,05	126	TOO	8,25	115	ZM	6,2	208	SVAR 2	5,6	227	SVAR 2
41	5,8	125	TOO	9	115	ZM	6,7	207	SVAR 2	6,35	269	SVAR 2
42	6,55	115	TOO	9,75	122	ZM	7,45	196	TOO	7,1	219	TOO
43	7,3	118	TOO	10,5	116	ZM	8,2	113	TOO	7,85	153	TOO
44	8,05	119	ZM	11,25	115	ZM	8,95	107	ZM	8,6	129	TOO
45	8,8	114	ZM	12	111	ZM	9,7	116	ZM	9,35	113	ZM
46	9,55	116	ZM	12,75	108	ZM	10,45	113	ZM	10,1	123	ZM
47	10,3	109	ZM	13,5	110	ZM	11,2	119	ZM	10,85	115	ZM
48	11,05	110	ZM	14,25	115	ZM	11,95	110	ZM	11,6	115	ZM
49	11,8	107	ZM				12,7	114	ZM	12,35	122	ZM
50	12,55	114	ZM				13,45	117	ZM	13,1	117	ZM

Průběh celého teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 1 - Ti Grade 2



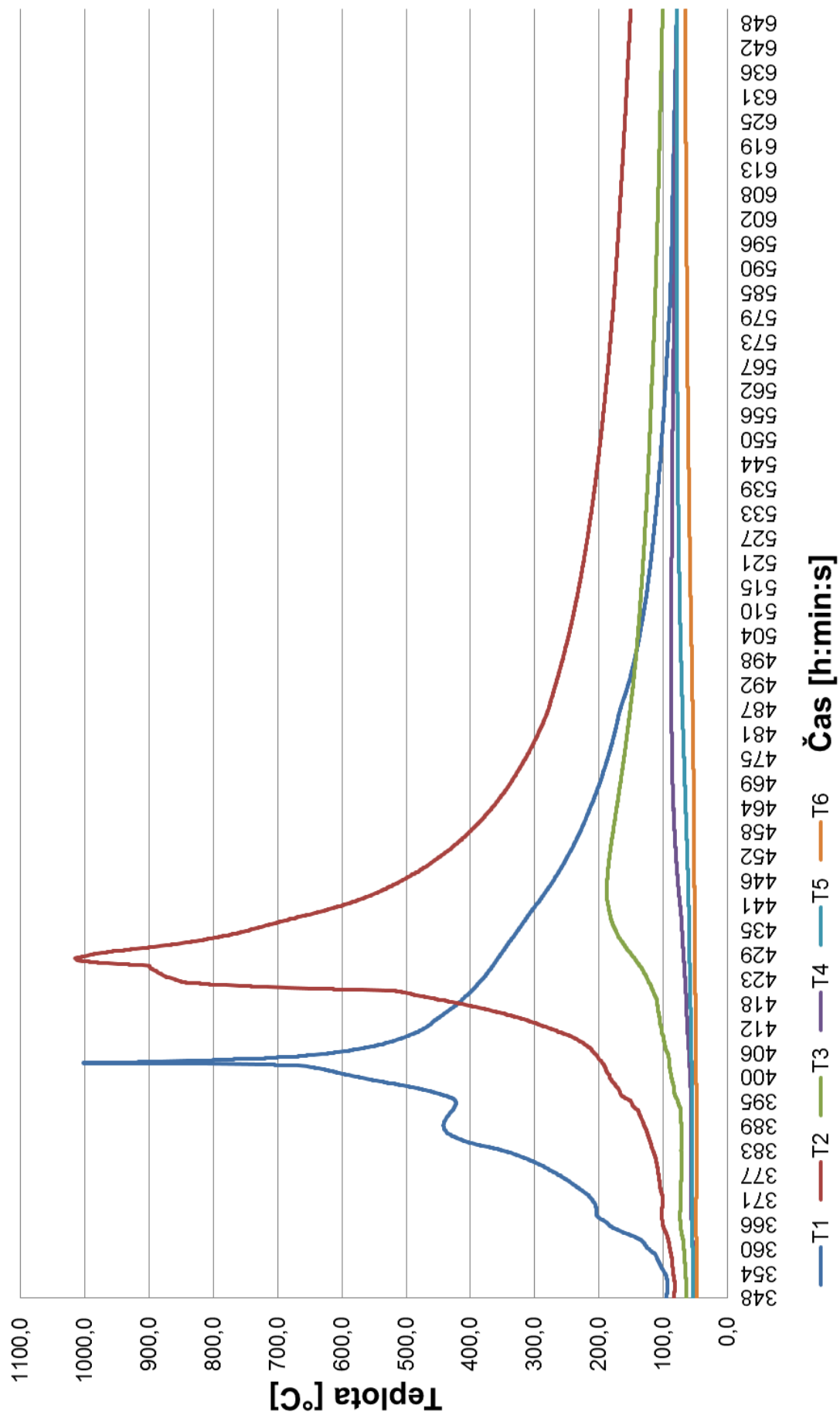
Graf 1 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1

Průběh teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 1 - část 1 - Ti Grade 2



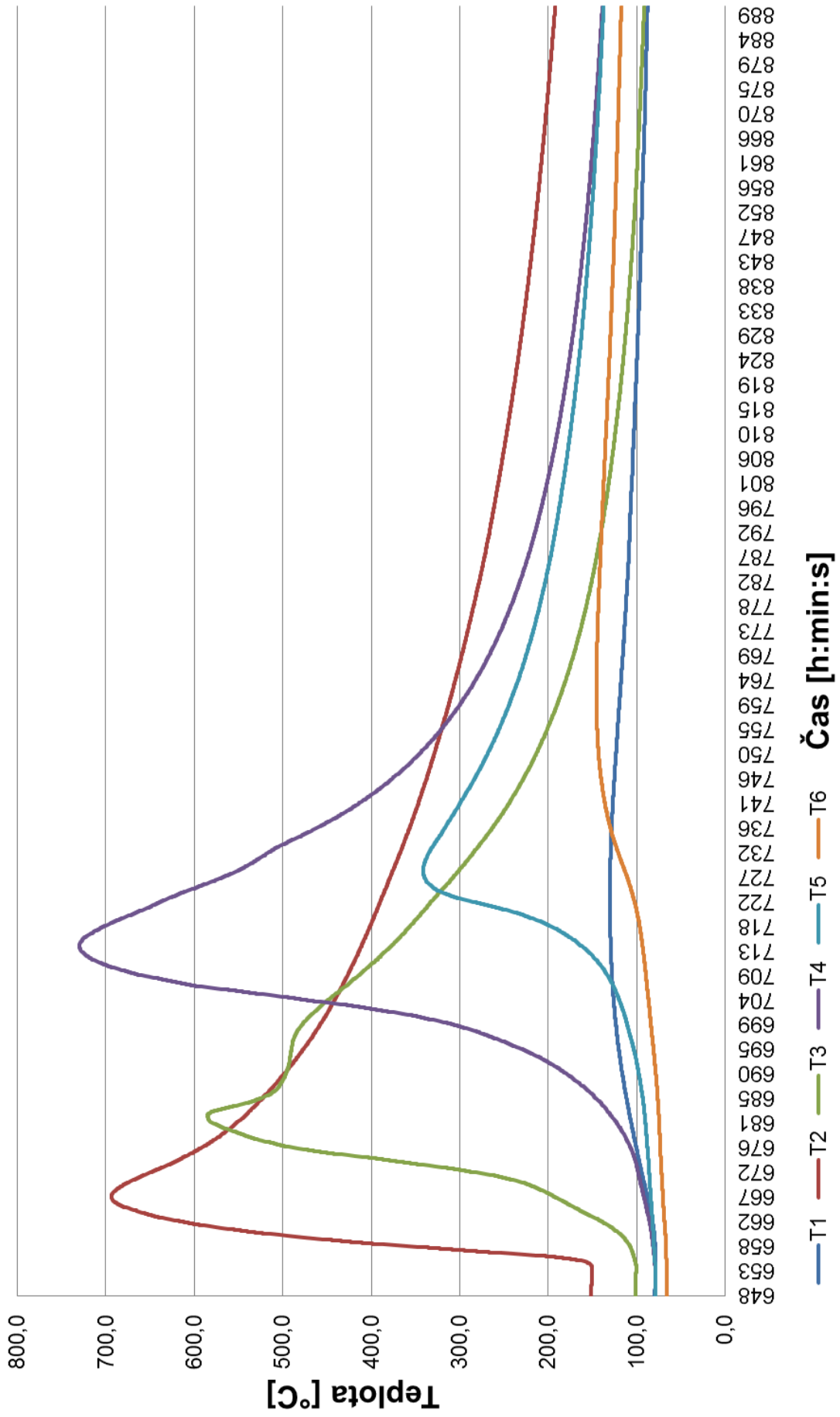
Graf 2 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 1

Průběh teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 1 - část 2 - Ti Grade 2



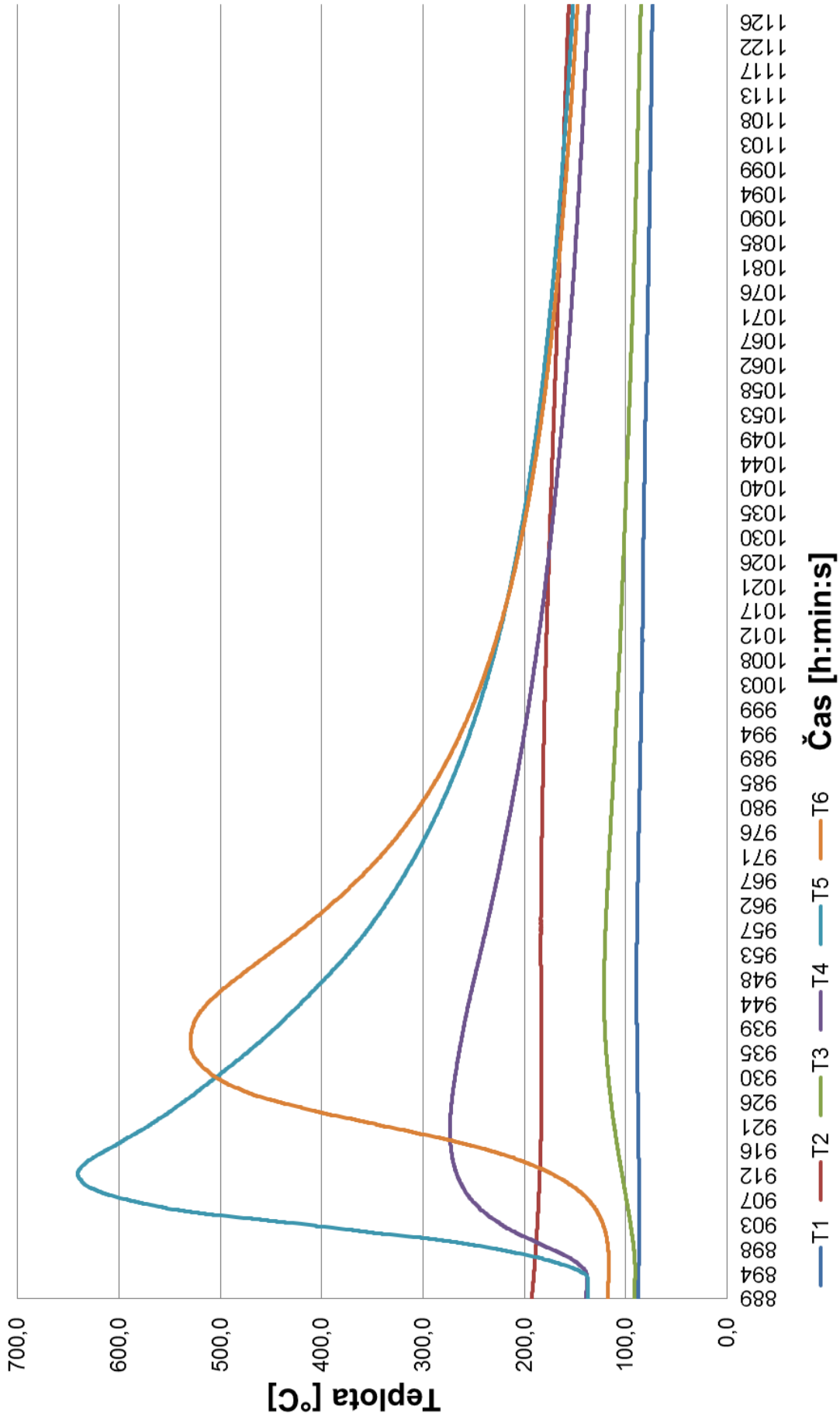
Graf 3 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 2

Průběh teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 1 - část 3 - Ti Grade 2



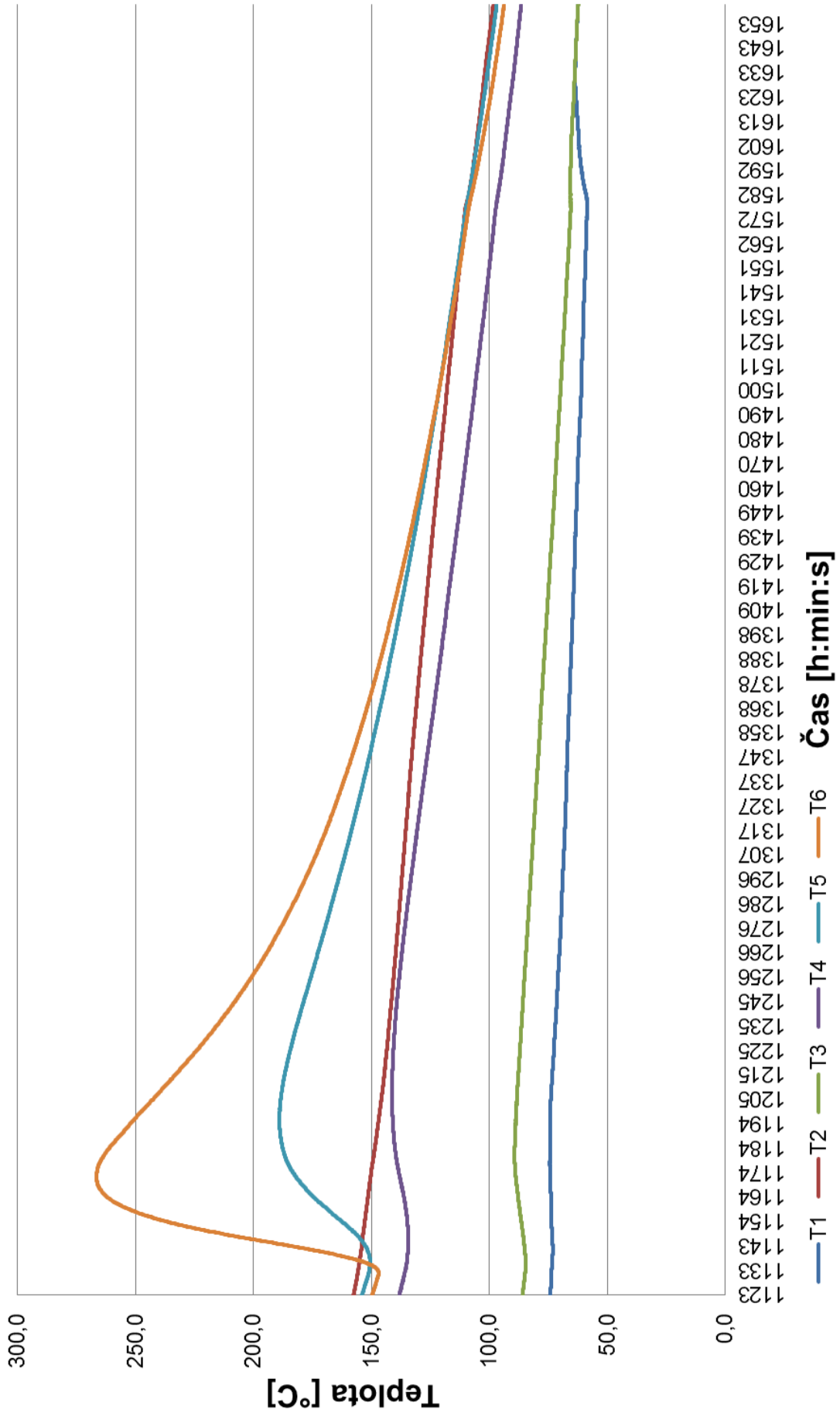
Graf 4 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 3

Průběh teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 1 - část4 - Ti Grade 2



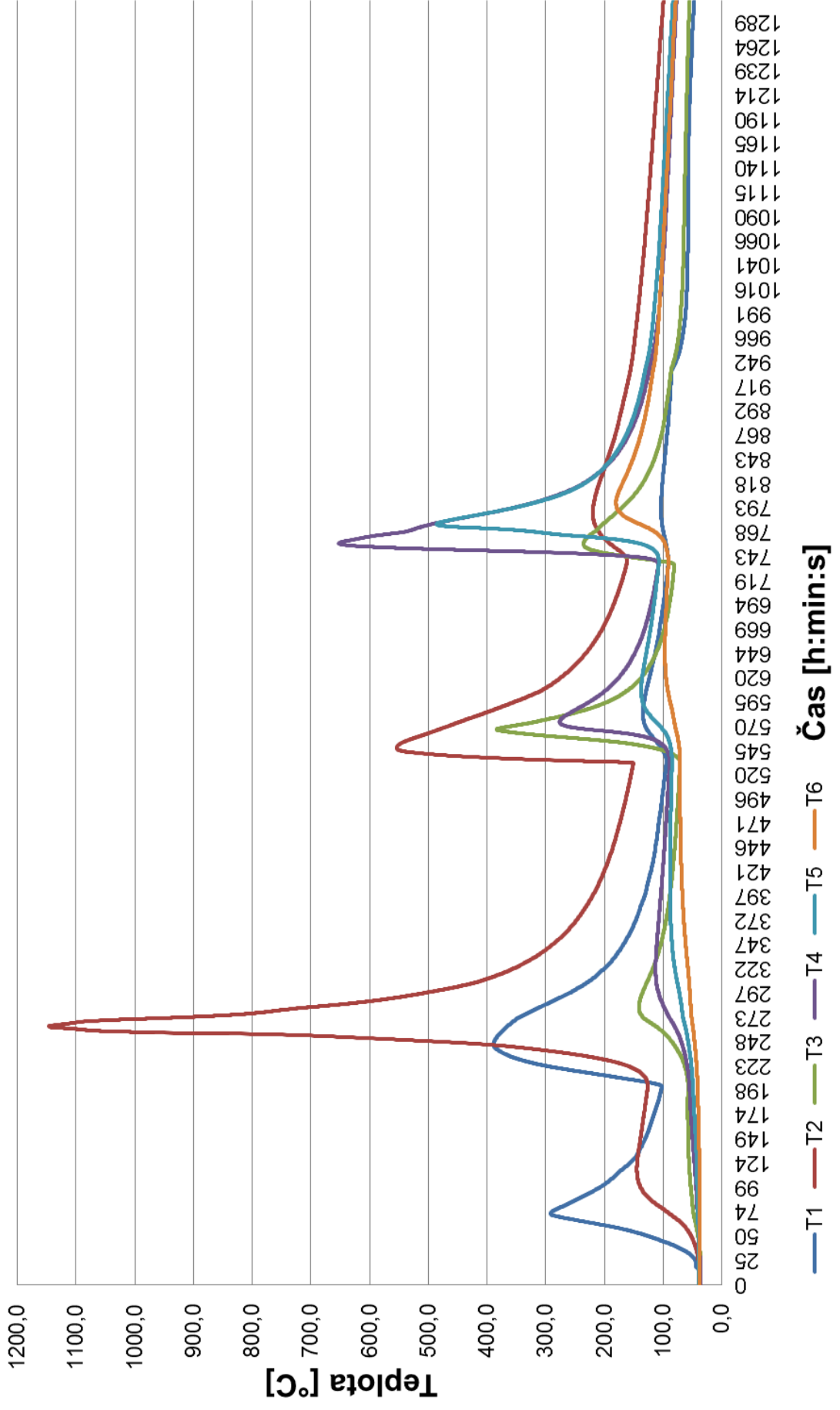
Graf 5 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 4

Průběh teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 1 - část 1 - Ti Grade 2

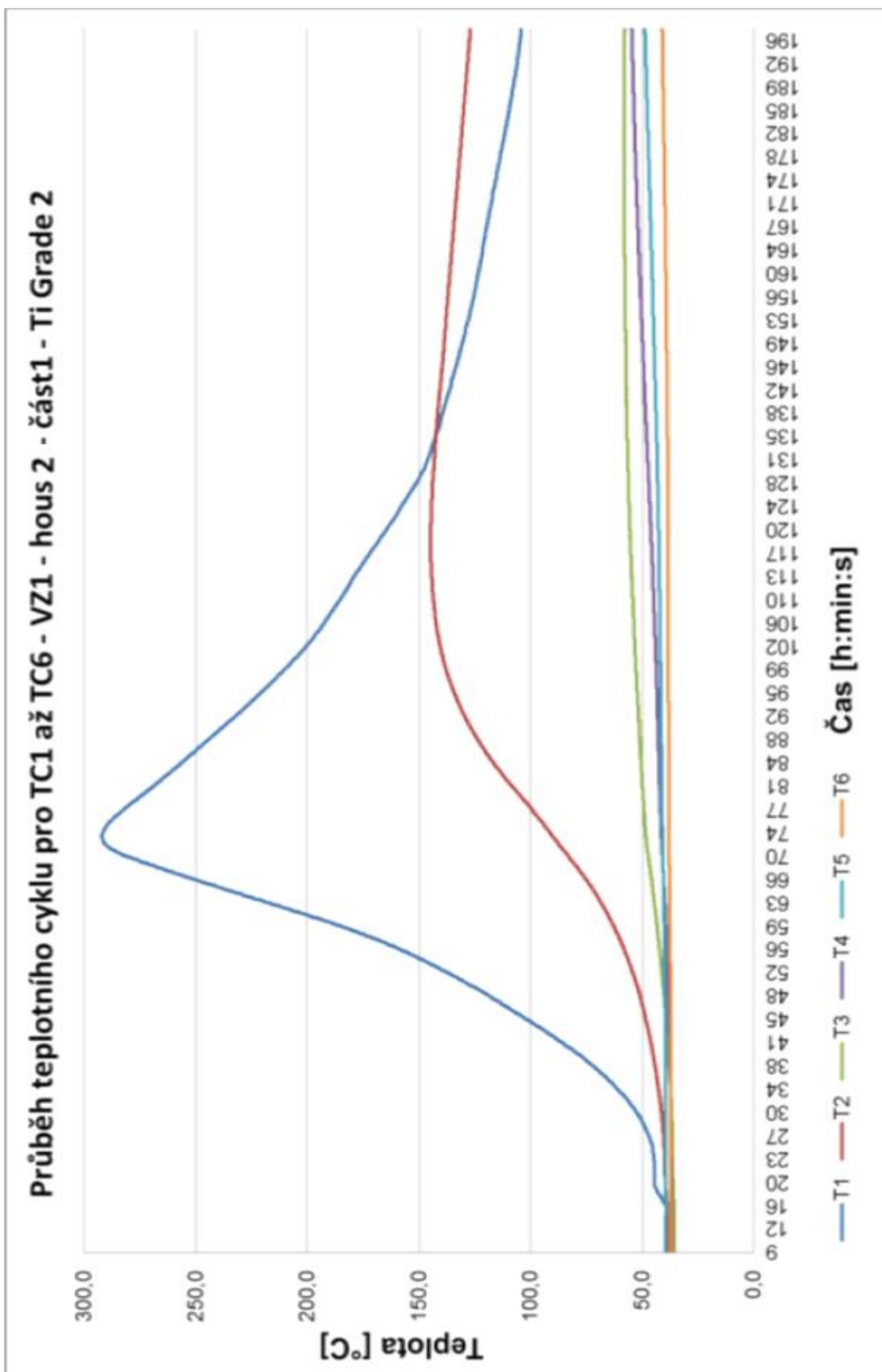


Graf 6 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 1, část 5

Průběh celého teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 2 - Ti Grade 2

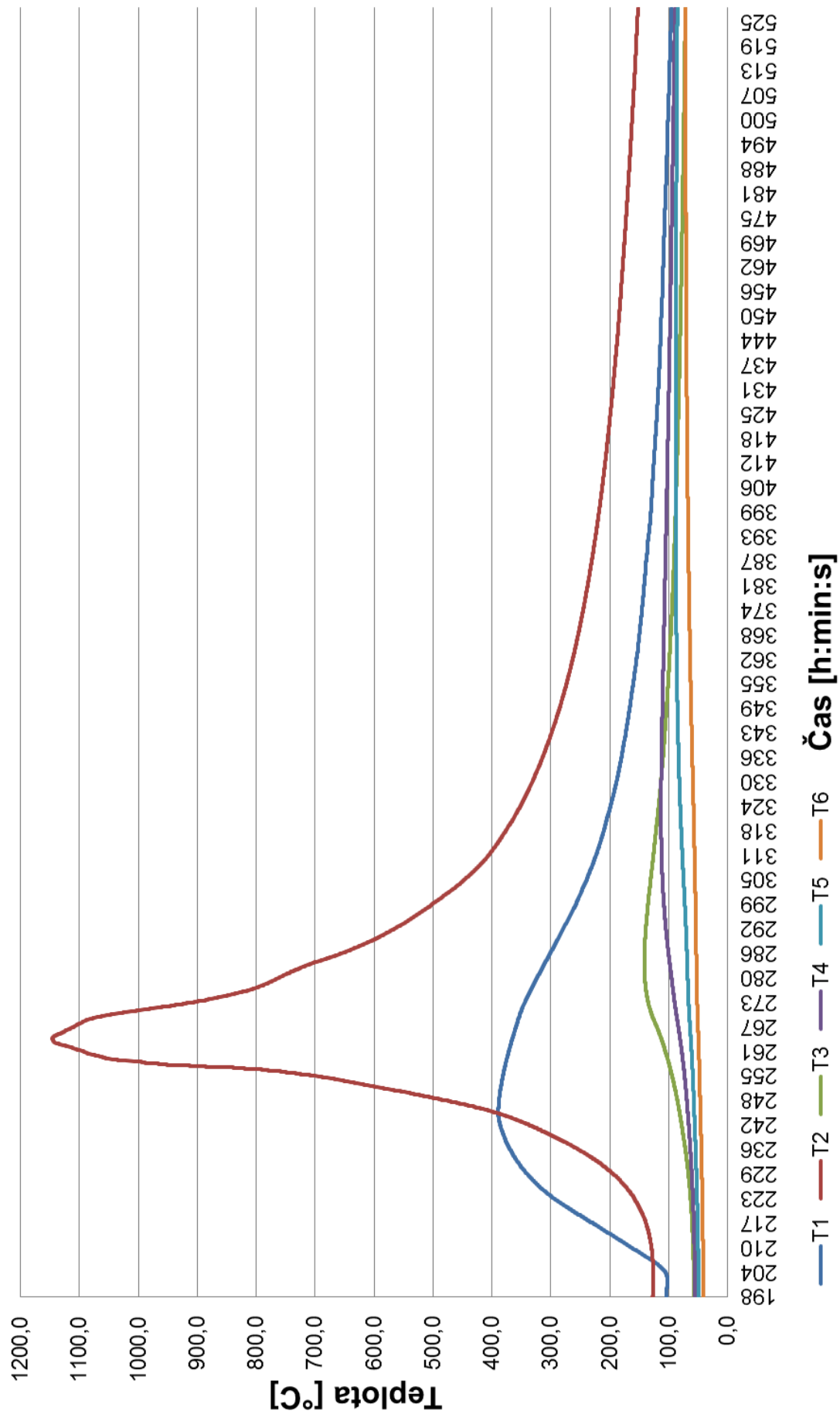


Graf 7 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2



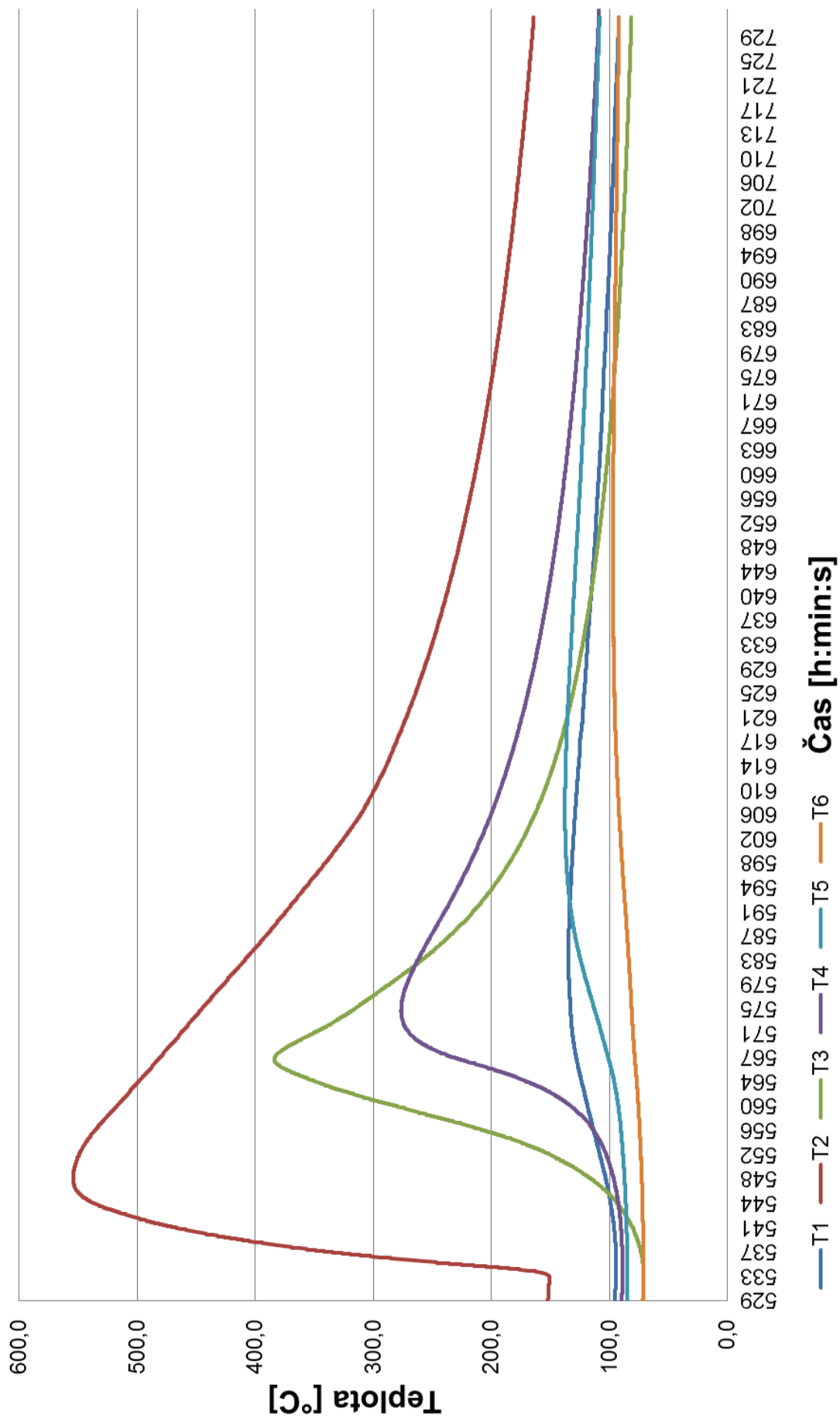
Graf 8 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2, část 1

Průběh teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 2 - část 2 - Ti Grade 2

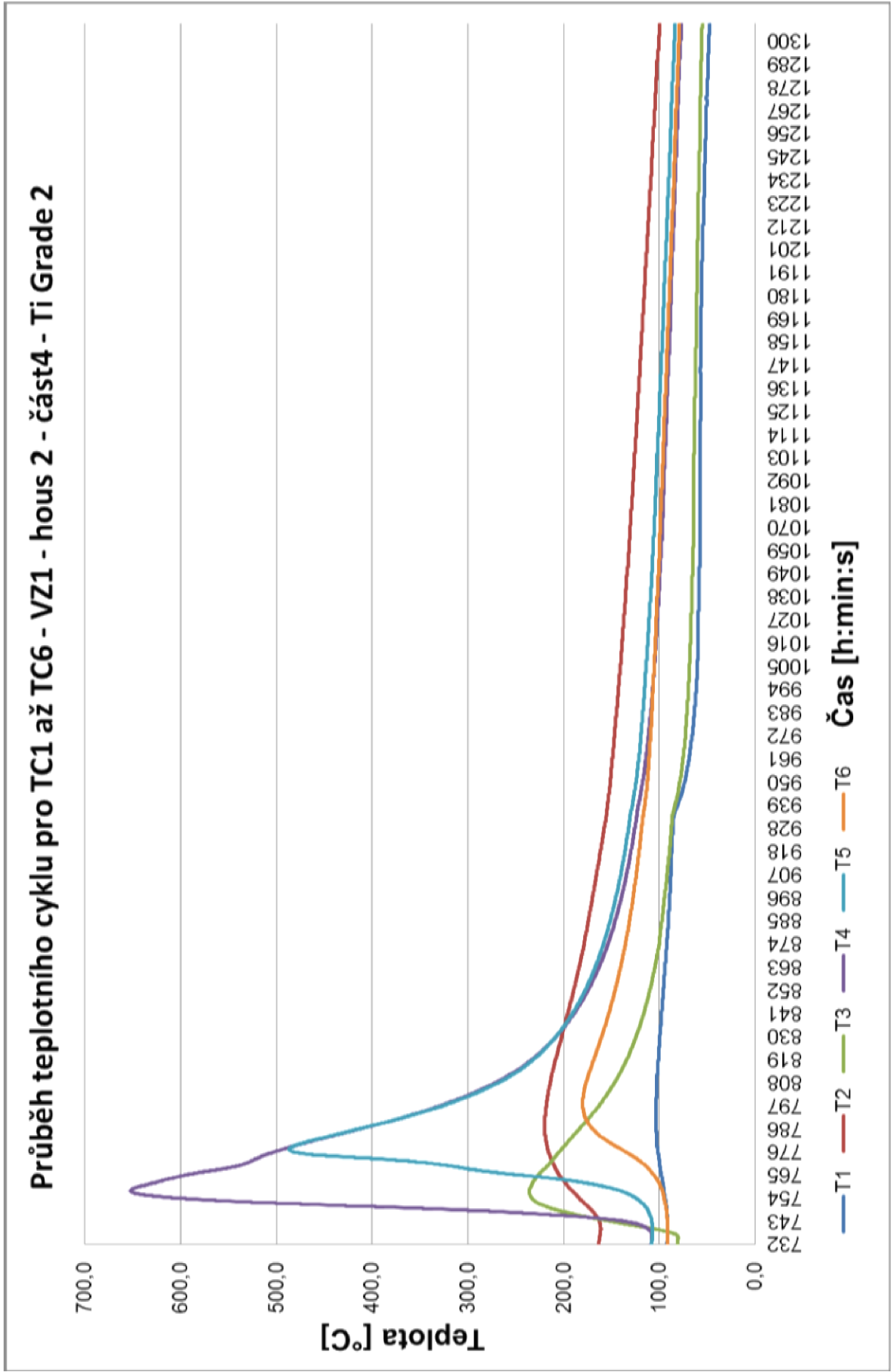


Graf 9 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2, část 2

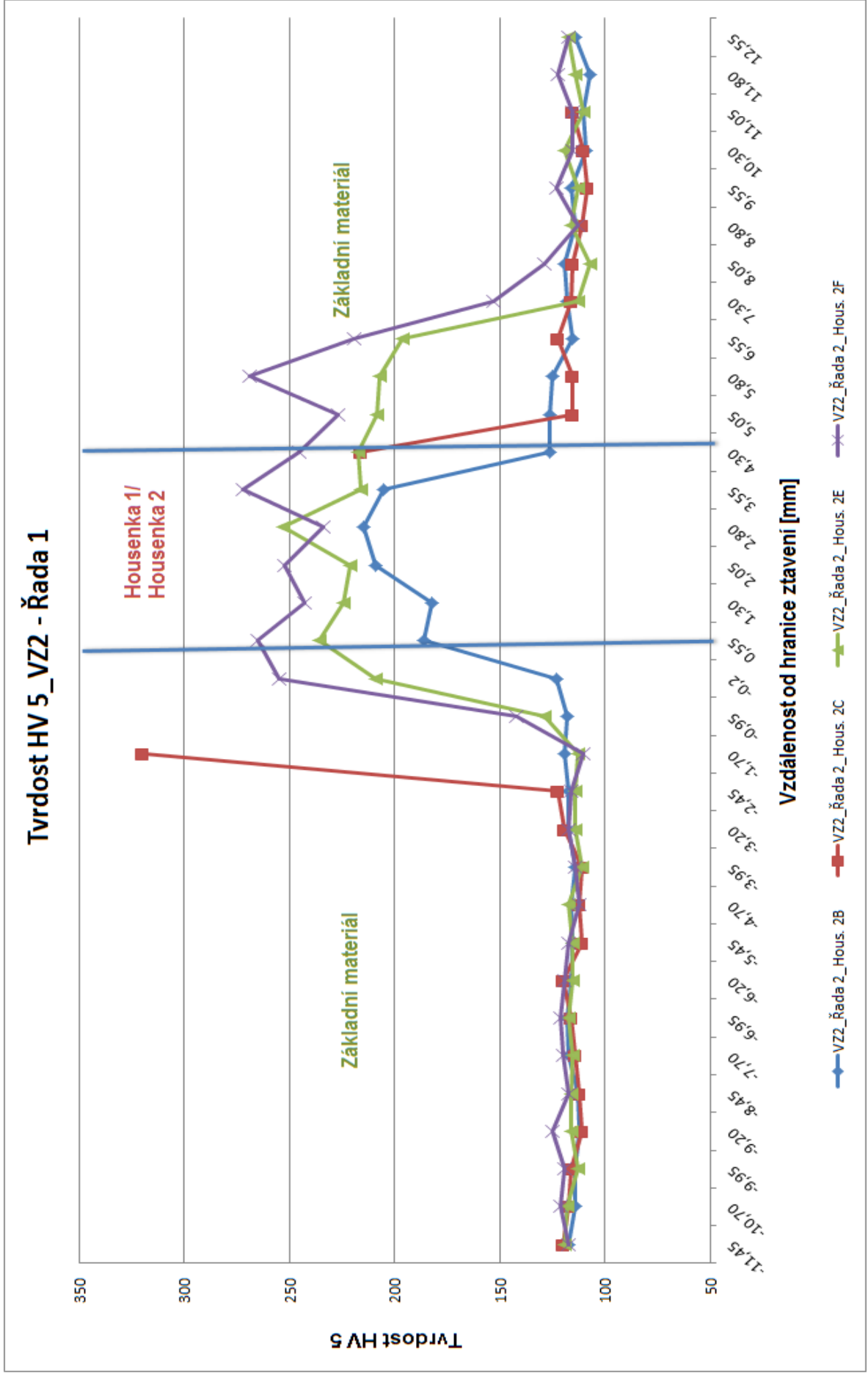
Průběh teplotního cyklu pro TC1 až TC6 - VZ1 - hous 2 - část 3 - Ti Grade 2



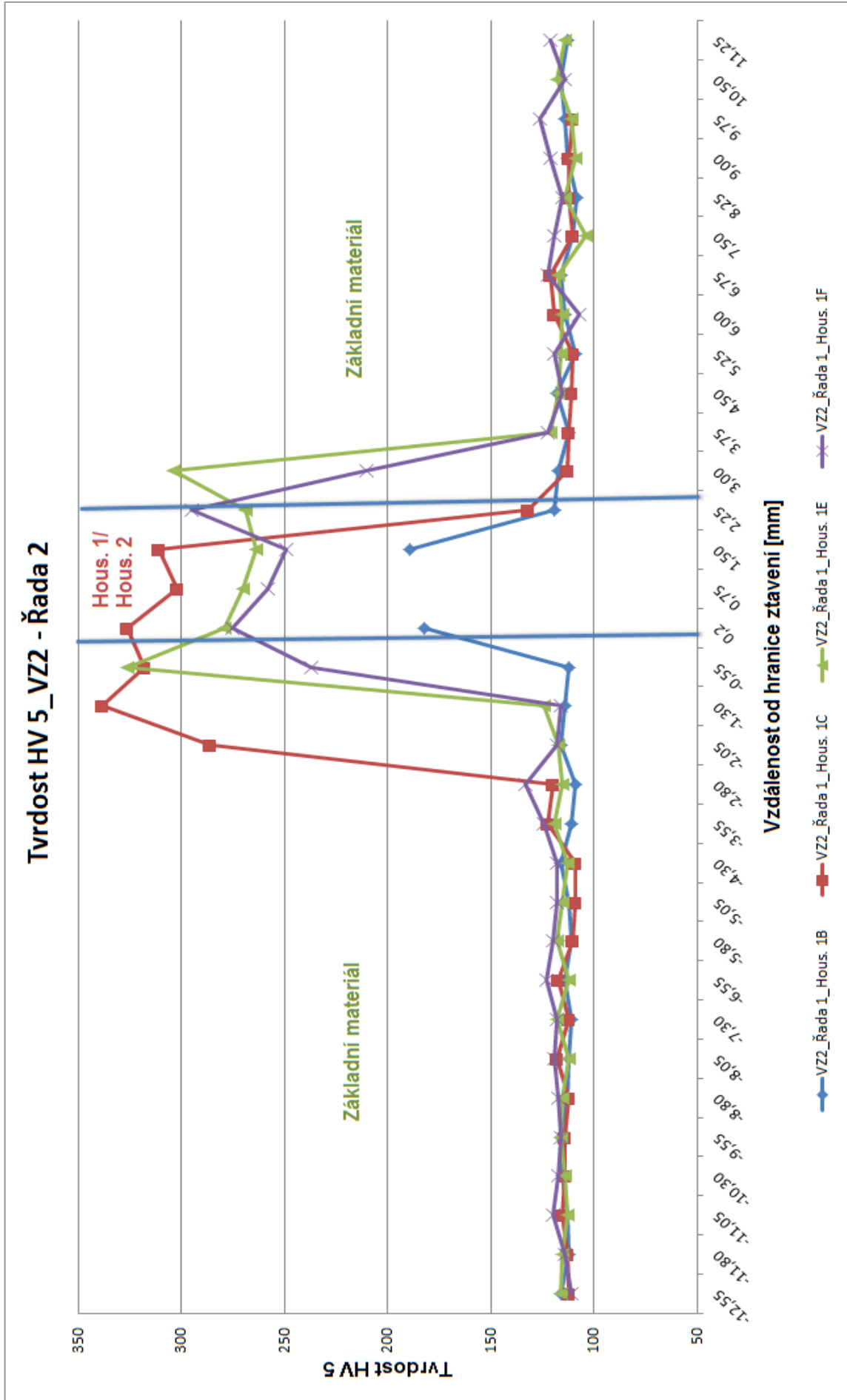
Graf 10 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2, část 3



Graf 11 - Měření průběhu teploty, vzorek 1, housenka 2, část 4



Graf 12: Průběhy tvrdosti v základním materiálu a svarové housence 1 a 2, VZ 2



Graf 13: Průběhy tvrdosti v základním materiálu a svarové housence 1 a 2, VZ 2