

8. Metodické postupy využitelné při návrhu a realizaci experimentů svařování s jasně definovanými okrajovými podmínkami

Při simulacích tavného svařování je nezbytné realizovat experimentální měření popisující odezvu materiálu na teplotně-napěťové zatížení, způsobené jak nestacionárními teplotními poli, tak okrajovými podmínkami při jejich realizaci. Takováto měření mohou být koncipována buď jako experimenty definující vstupní data numerických simulací (velikost natavené oblasti, veličiny potřebné k definování modelu zdroje tepla, podmínky při upnutí vzorku atd.), nebo jako experimenty verifikační určené k potvrzení vhodnosti navrženého postupu a k potvrzení výsledků získaných pomocí numerických řešení (strukturní analýzy, tvrdosti v definovaných místech, napěťová a deformační pole).

První typ experimentů slouží k navržení vhodného výpočetního modelu, druhý typ experimentů slouží k určení přesnosti výsledků simulací, spolurozhoduje o aplikovatelnosti vytvořených modelů, případně o jejich modifikaci. Vhodně navržený je však takový experiment, který v sobě dokáže zahrnout oba zmíněné typy měření.

Stejně jako u výpočtu velikosti austenitického zrna (kapitola 7), ani při návrhu a realizaci experimentů svařování neexistují metodické postupy doporučující, jak by takový experiment měl být realizován. Mnoho uživatelů řešící simulace tavného svařování pomocí komerčních programů se spokojí pouze s využitím předdefinovaných modelů zdrojů tepla, jež tyto programy nabízejí a do výpočtu zadávají pouze předpokládaný výkon zdroje a rychlost svařování. Tyto postupy však mohou poskytnout pouze velmi hrubou představu o simulovaných dějích, ať již z hlediska geometrie svarové lázně a teplotních polí, nebo z hlediska napěťovo-deformačních změn svařovaného dílu.

Pokročilejší uživatelé simulačních programů (většinou z výrobních firem) provádějí před vlastními výpočty experimenty svařování, které vycházejí ze svařovacích postupů zavedených v těchto firmách. Většinou se jedná o experimenty svařování koncipované na základě normy ČSN EN ISO 15614-1 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování. Tedy experimenty, kdy je známa velikost zkušebních těles, geometrie svarových úkosů, postup kladení housenek atd. Dále jsou pro každou housenku stanoveny rozmezí svařovacích proudů a napětí, jež musí být pro příslušnou housenku dodrženy a také rychlosti svařování. Při kvalifikaci takových postupů se navíc provádí metalografický rozbor a měření tvrdosti, takže jsou k dispozici údaje o natavené oblasti a tvrdosti ve svaru a TOO, které lze následně použít k ověření přesnosti dosažené numerickými výpočty. Přestože jsou takto získané vstupní údaje mnohem vhodnější než v prvním případě a lze díky nim získat mnoho užitečných informací o simulovaném procesu, stále ještě existuje značné množství neznámých majících značný vliv na dosažené výsledky a přesnost simulačních výpočtů. Tyto neznámé lze částečně

eliminovat vhodnou volbou okrajových podmínek experimentu. Jedná se především o definování podmínek přestupu tepla do okolí, umístění čidel pro měření teploty a deformací, způsob vzájemného přesazení housenek aby bylo možné hodnotit výsledky po každé svařované vrstvě atd. V následujících kapitolách proto bude ukázáno, jakým způsobem koncipovat experimenty při jednoznačně definovaných těchto podmínkách. Budou zde představeny dva základní přístupy využívané při svařování žárovevných ocelí s předehřevem a bez předehřevu.

U experimentu svařování bez předehřevu bude metodický postup návrhu a realizace experimentu demonstrován na pětivrstevném tupém svaru z C-Mn oceli P235GH. Jeho cílem je ukázat postup řešení s ohledem na jednoznačné definování okrajových podmínek nutných pro mapování teplotních a deformačních polí v celém průběhu svařování. Druhý metodický přístup bude ukázán při experimentech svařování s předehřevem na osmivrstevných svarech z materiálů 10GN2MFA a X22CrMoV12-1. Jejich cílem je demonstrovat postupy zaměřené na jednoznačně definovaná teplotní pole od jednotlivých housenek, na strukturní změny a na časové změny tvrdosti v průběhu vícenásobných teplotních cyklů.

8.1. Postup návrhu a realizace experimentu při svařování bez předehřevu

Výsledná přesnost numerických simulací závisí na kvalitě a množství vstupních dat, ale také na zkušenostech se simulovanými ději a interpretaci výsledků vzhledem k okrajovým podmínkám. V kapitole 3 byl popsán způsob získávání materiálových vstupních dat, a proto bude tato kapitola věnována vstupním datům pro definici a popis tvaru tepelného zdroje a definování okrajových podmínek, včetně dat verifikačních.

Celkový proces numerických simulací svařování je rozdělen do dvou základních oblastí na teplotně-metalurgické a napětovo-deformační analýzy, přičemž teplotně-metalurgické analýzy jsou vždy řešeny prvotně. Bez správně definovaného modelu zdroje tepla generujícího teplotní pole ve vzorku a majícího tak vliv na fázové transformace nelze úspěšně řešit napětí a deformace ve vzorku. Z tohoto důvodu je při stanovení vstupních dat generujících model zdroje tepla pozornost věnována primárně okrajovým podmínkám ovlivňujícím teplotní pole, zejména součiniteli přestupu tepla do okolí.

8.1.1. Návrh a konstrukční řešení přípravku pro svařování s přesně definovanými podmínkami pro sdílení tepla

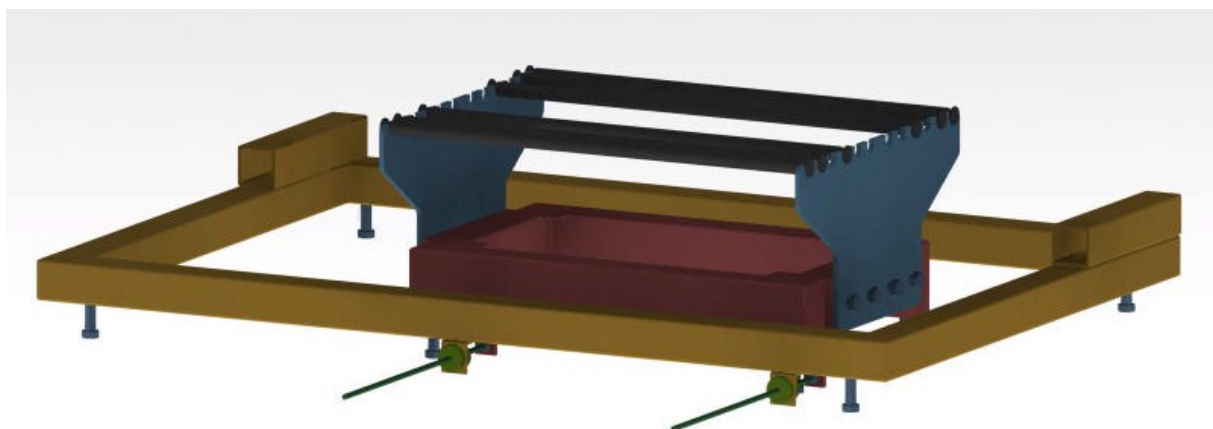
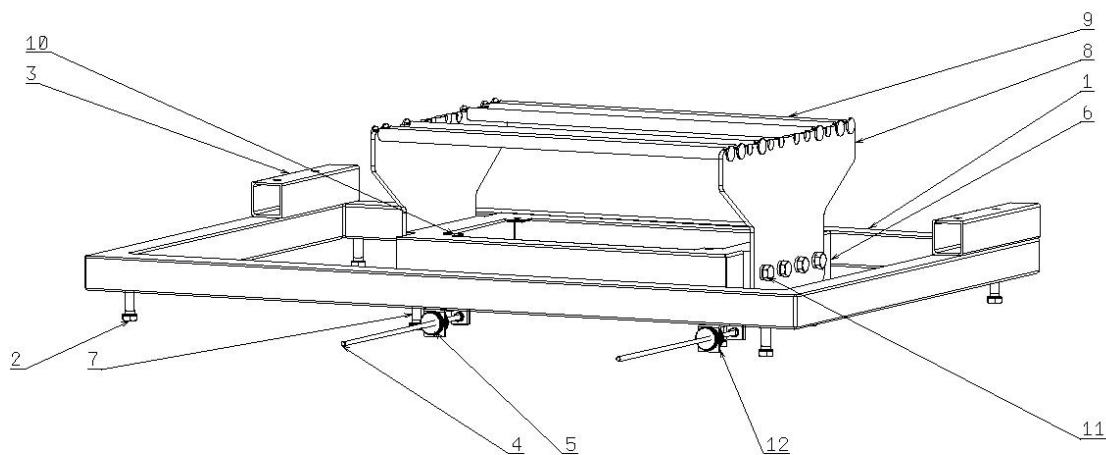
Při stanovení součinitele přestupu tepla do okolí α [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$] je vždy třeba vycházet z celkové koncepce prováděného experimentu, nebo reálného svaru. Pro volné plochy svařence lze součinitel α stanovit výpočtetně, nebo experimentálním měřením. Problematickými místy jsou tak z tohoto pohledu zejména místa dotyku svařence se svařovací deskou, nebo přípravkem. Při svařování bez předehřevu jsou zpravidla

experimenty koncipovány tak, aby bylo možné zároveň měřit i pole deformační. Z důvodu deformace se místa i celkové plochy dotyku mezi vzorkem a podložkou v průběhu svařovacího experimentu mění a nelze je proto jednoznačně popsat okrajovými podmínkami. Proto bylo rozhodnuto, že bude navržen a vytvořen nový typ svařovacího přípravku určený pro požadovaný typ experimentů, reflektující uvedené požadavky, při jednoznačném definování okrajových podmínek. Při návrhu přípravku se vycházelo z následujících požadavků:

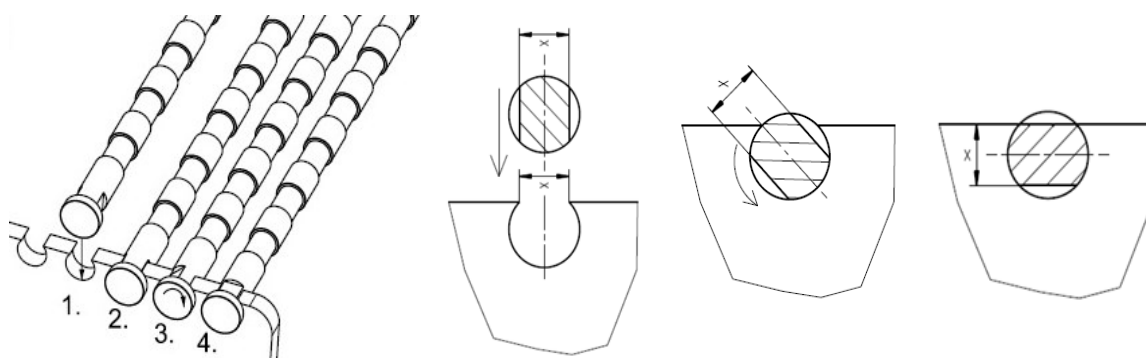
- 1) Přípravek by měl umožnit dostatečně tuhé upnutí svařovaného vzorku, při minimálním odvodu tepla přípravkem v místě dosedacích ploch.
- 2) Přípravek by měl vhodnou konstrukcí dosedacích ploch umožnit umístění měřicí aparatury (termočlánky, tenzometry, LVDT čidla) do libovolného místa svařovaného vzorku, včetně umístění držáků těchto aparatur.
- 3) Přípravek by měl být schopen adaptace do stávajícího pracoviště poloautomatického svařování v laboratořích TUL a zároveň by měl umožnit jednoznačné definování polohy přípravku vůči svařovacímu hořáku umístěnému na lineárním automatu.
- 4) Přípravek by měl být dostatečně veliký, aby umožnil svařovat vzorky ve shodě s normou ČSN EN ISO 15614-1 a mohl tak být využit k získání specifikace svařování pWPS, WPQR a následné WPS.

Na základě uvedených požadavků byl konstrukčně navržen a následně vytvořen přípravek, tak jak je ukázáno na schematických obrázcích 40 a 41. Přípravek je složen ze základního rámu (1) horizontálně vyrovnaného pomocí čtyř stavěcích šroubů (2). Rám je osazen otevřenými patkami (3) pro připevnění lineárního automatu a úchytkami s otvory (12) pro rovnoběžné vyrovnaní osy svařování hlavního těla přípravku (6) s osou lineárního automatu pomocí závitových tyčí a rýhovaných matic (obr. 40, pozice 4 a 5). Hlavní tělo přípravku (6) používá, stejně jako základní rám čtyři stavěcí šrouby (7) k dosažení horizontální rovinnosti přípravku. Tělo přípravku má dvě rovinné (obrobené) plochy, na nichž jsou přišroubovány bočnice (8), mající ve své horní části otvory pro upevnění dotykové části přípravku (9).

Jednotlivé bočnice i dotykové části přípravku, je možné měnit podle požadované tuhosti přípravku a tedy podle velikosti (průměru) dotykových částí přípravku. Vlastní dotykové části přípravku jsou jednoduše vyměnitelné (obr. 42) a lze je umístit na libovolné pozice v bočnicích, podle požadavků na rozmístění měřicí aparatury na vzorku. Tyto komponenty mají na svých okrajích vyfrézovány dotykové plošky (obr. 42), pomocí nichž jsou zasunuty do požadovaných otvorů v bočnicích a jednoduchým pootočením dále zajištěny na požadované pozici. Díky takto koncipované dotykové části přípravku je styk mezi svařovaným dílem a přípravkem pouze liniový, snižující velikost dotykové plochy na minimum, při zachování dostatečné tuhosti přípravku.



Obr. 41. Prostorový model přípravku pro svařování s přesně definovanými podmínkami pro sdílení tepla



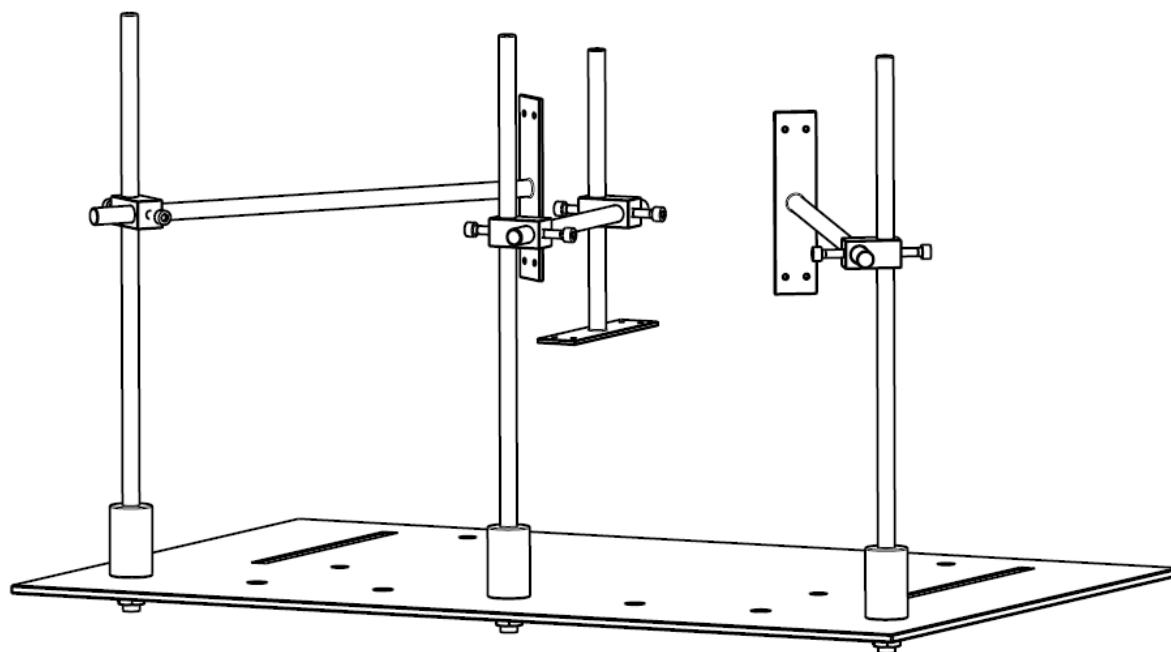
Obr. 42. Dotykové části přípravku a způsob zajištění jejich polohy v přípravku

Z důvodu ještě větší eliminace přestupu tepla ze vzorku do přípravku byly dotykové části přípravku vyrobeny z austenitické oceli, která má mnohem nižší hodnoty součinitele přestupu tepla vedením oproti konstrukčním ocelím. Dále byla na dotykových částech přípravku vyrobena osazení (obr. 42) pro další snížení celkové plochy dotyku. Ověřovací experimenty

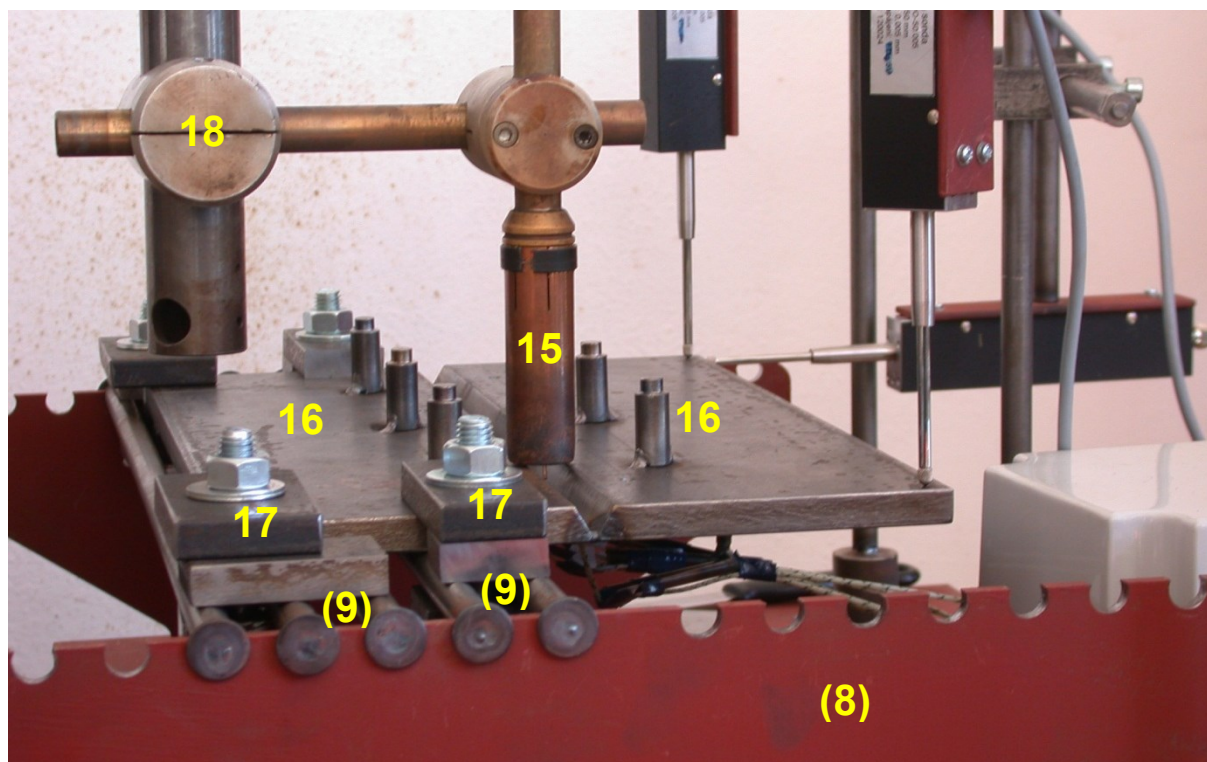
ovšem potvrdily pouze minimální vliv těchto úprav na rozložení teplotních polí oproti původním dotykovým částem přípravku z konstrukční oceli a s liniovým dotykem v celé délce přípravku.

V současné době obsahuje přípravek čtyři sady bočnic (8), přičemž dvě sady jsou s otvory průměru 12 mm a roztečí otvorů 25 respektive 30 mm, jedna sada s otvory průměru 16 mm a roztečí děr 30 mm a jedna sada bočnic je vzájemně spojena rámem vypáleným z plechu tloušťky 30 mm, pro případy simulací svařování v podmínkách úplné tuhosti, kdy jsou okraje vzorku přivařeny přímo do tohoto rámu.

Hlavní tělo přípravku dále obsahuje úchyty, umožňující připevnění dalších přípravků a čidel pro měření posuvů, deformací a teplotních polí v průběhu svařování. Díky tomu je možné provádět různé typy experimentů zaměřených na konkrétní požadovaná vstupní data, nebo jejich kombinace. Na schematickém obrázku 43 je ukázána nadstavbová část přípravku pro upevnění LVDT čidel deformací, kterou lze připojit k hlavnímu tělu přípravku. Na obrázku 44 je pak ukázán celý přípravek zabudovaný do poloautomatického pracoviště pro svařování metodami 131 a 135 dle ČSN EN ISO 4063. Toto pracoviště je kromě zmíněného svařovacího přípravku vybaveno lineárním automatem s plynulým nastavením rychlosti pojezdu, svařovacím zdrojem BDH 550 Puls Syn, monitorovacím systémem WeldMonitor a měřícím systémem DiagWeld V0, vyvinutým k současnému záznamu informací o teplotě v definovaných místech vzorku a vlivu vznikajících teplotních polí na deformace. V kapitole 8.1.2. budou uvedeny teoreticky spočítané i experimentálně stanovené hodnoty součinitele přestupu tepla do okolí.



Obr. 43. Nadstavbová část přípravku pro upevnění LVDT čidel pro měření deformací



Obr. 44. Detail bočnice (8) s dotkovými částmi přípravku (9) pro liniový dotyk
15 – svařovací hořák, 16 – vzorek, 17 – upínky, 18 – rameno lineárního automatu

8.1.2. Stanovení součinitele přestupu tepla do okolí pro vytvořený přípravek

Je třeba si uvědomit, že z důvodu nestacionárních teplotních polí má každá povrchová část svaru rozdílné podmínky pro přestup tepla do okolí. Při svařování je teplo předáváno do okolí nejen prouděním, ale také sáláním. Přibližně od teploty 600°C se přitom sálání stává hlavním mechanismem přestupu tepla do okolí. Značnou výhodou při těchto dějích je fakt, že přestup tepla do okolí není závislý na druhu svařovaného materiálu, pouze na povrchové teplotě vzorku a teplotě okolního prostředí.

Velmi důležitým kritériem je také poloha povrchu vzorku (vertikální, horizontální), neboť rozdíly v hodnotách součinitele přestupu tepla u vrchní a spodní strany horizontálně orientované plochy mohou činit až 30%. [76] Hodnoty součinitele přestupu tepla prouděním jsou počítány pomocí bezrozměrných čísel (kap. 3.1.1. rovnice (6) až (10)) a hodnoty součinitele přestupu tepla sáláním jsou počítány pomocí rovnice (4) a (5). Celková hodnota součinitele přestupu tepla do okolí je pro horní plochu vzorku dána součtem jednotlivých způsobů přestupu tepla do okolí (proudění, sálání) a jsou identické s hodnotami v tab. 2.

Tyto údaje však platí pouze pro ideální stav, tedy pro podmínky, při kterých se v daném prostoru nevyskytují žádné předměty odrážející zpět teplo vyzářené radiací a při kterých je v prostoru nulové proudění vzduchu. Pro podmínky reálného ochlazování je součinitel přestupu tepla definován na základě měření teplotních cyklů na povrchu testovaného vzorku

na konkrétním měřicím pracovišti (přípravku). Uvedený způsob měření je však možný pouze v určitém intervalu teplot. V tabulce 50 jsou uvedeny hodnoty součinitele přestupu tepla do okolí pro horní a spodní plochu zkušební desky z materiálu X5CrNi18-8, empiricky stanovené na základě takovýchto měření.

Experiment byl realizován na desce tvaru kruhu o průměru 250 mm a tloušťce 20 mm, po ohřevu umístěné na přípravku. Teplota na horní i spodní ploše vzorku byla snímána soustavou 6 termočlánků, přičemž pro horní i spodní plochu vzorku byly použity vždy tři kondenzátorově přivařené termočlánky, umístěné na roztečné kružnici o průměru 100 mm a vůči sobě pootočené o 120°. Deska s termočlánky byla v peci předehřáta na teplotu 850°C s výdrží na teplotě 60 min z důvodu vyrovnaní teplot v celém objemu. Teplota byla snímána po celou dobu ohřevu v peci, i po jejím otevření, umístění vzorku na přípravek a následném chladnutí. Z důvodu manipulačních časů potřebných k usazení vzorku na přípravek, byly k vyhodnocení použity pouze ochlazovací křivky v intervalu 800 až 20 °C.

Součinitel přestupu tepla do okolí byl pro vzorek umístěný na přípravku stanoven empiricky na základě získaných ochlazovacích křivek. Byly k tomu využity rovnice (5) až (8) a tab. 1. Hodnoty součinitele α byly stanoveny s teplotním krokem 50°C a vzájemný procentuální poměr proudění a sálání byl určen zvlášť pro každou z uvažovaných hodnot teploty. Procentuální poměr odpovídal poměru stanovenému teoretickým výpočtem pro ideální podmínky (kap. 3.1.1. tab. 2) a podrobně je uveden v literatuře [76].

Tabulka 50: Vypočtené a pomocí teplotních cyklů empiricky stanovené hodnoty součinitele přestupu tepla do okolí [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] pro horní a spodní plochu vzorku

Teplota [°C]	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
A1 horní plocha	0,0	26,2	34,9	41,1	46,5	51,7	57,1	62,7	68,7	75,3	82,3
A2 horní plocha	19,0	22,9	24,6	27,0	31,8	35,1	38,7	44,3	49,0	53,7	60,2
A3 spodní plocha	19,0	19,5	20,0	22,3	25,1	28,7	32,0	35,9	40,1	44,2	49,1
Teplota [°C]	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050
A1 horní plocha	90,1	98,5	107,7	117,7	128,5	140,3	153,0	166,7	181,5	197,4	214,3
A2 horní plocha	67,0	73,8	83,4	93,3	103,1	113,8	124,5*	137,3*	154*	174*	197*
A3 spodní plocha	54,5	60,1	67,9	75,8	83,7	92,3	101*	111*	124*	140*	159*
Teplota [°C]	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600
A1 horní plocha	232,6	252,0	272,8	294,8	318,2	343,0	369,3	397,0	426,4	457,2	489,7
A2 horní plocha	219*	243*	273*	301*	324*	355*	390*	437*	-	-	-
A3 spodní plocha	181*	206*	234*	265*	293*	325*	362*	410*	-	-	-

A1 – Hodnoty α stanovené výpočtem pro horní plochu (ideální podmínky)

A2 – Hodnoty α stanovené pro horní plochu empiricky na základě ochlazovacích křivek

A3 – Hodnoty α stanovené pro spodní plochu empiricky na základě ochlazovacích křivek

.* – Hodnoty stanoveny nepřímou metodou pomocí numerických simulací

Hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ a měrného tepla při konstantním tlaku c_p potřebné ke stanovení Nusseltova a Prandtlova čísla, byly pro materiál X5CrNi18-8 a příslušné teploty použity z materiálové databáze programu Sysweld. Vzhledem k tomu, že je velice obtížné stanovit experimentálně hodnoty součinitele přestupu tepla pro teploty vyšší než 800°C, byly tyto hodnoty stanoveny nepřímou metodou pomocí numerických simulací v programu Sysweld. Při svařování je teplot přesahujících 800°C dosaženo pouze v oblasti široké 2 až 5 mm a těsně přiléhající ke svaru. Jde tedy o oblast dostatečně vzdálenou od dotkových částí přípravku, proto by se případné drobné nepřesnosti v hodnotách součinitele přestupu tepla do okolí neměli výrazněji projevit na spočítaných teplotních polích.

K ověření správnosti dosažených výsledků byly následně provedeny numerické simulace vzorku chladnoucího ve speciálním svařovacím přípravku a vzorku chladnoucího za stejných podmínek při letmém podepření vzorku pomocí tříbodového dotyku. Výsledky získané numericky vykazovaly v obou případech velice dobrou shodu s experimenty a maximální odchylka teplotních průběhů nepřekročila v celém rozsahu teplot 2,7%. Proto jsou empiricky stanovené hodnoty součinitele přestupu tepla do okolí, uvedené v tabulce 50, využívány pro simulace všech experimentů realizovaných pomocí popsaneho přípravku.

8.1.3. Příprava experimentu, definování okrajových podmínek a vstupních dat

V této a následujících kapitolách bude ukázána metodika návrhu a realizace experimentu pětivrstvého svaru z C-Mn oceli P235GH. Jejím cílem je co nejpřesněji definovat model zdroje tepla a s jeho pomocí následně generovat odpovídající teplotní pole. Metodický postup je navržen pro vícevrstvé svary, protože každá následující vrstva násobí případnou nepřesnost při simulaci vrstvy předchozí. Z tohoto důvodu je již po dvou, případně třech svarových housenkách zřejmé, zda je použitý výpočetní model vhodný pro daný typ úlohy a zda výsledná přesnost simulace bude dostatečná pro požadované výsledky simulace. Experiment je také koncipován tak, aby bylo možné na základě spočítaných teplotních polí predikovat a zároveň verifikovat také výsledky tvrdosti a deformací v průběhu celého postupu svařování a chladnutí.

Pro takto pojaté experimenty jsou zpravidla použity poloautomatické, nebo automatické metody svařování, aby se zamezilo vlivu lidského faktoru na některou z okrajových podmínek. Z tohoto důvodu není účelem experimentu získat v určitém stupni kvality, ale zajistit konstantnost a jednoznačné definování procesních a technologických parametrů a okrajových podmínek po celou dobu experimentu. To ale neznamená, že nelze simulovat ručně prováděné metody svařování. Naopak, je-li výpočetní model pro daný materiál vytvořen a optimalizován, lze jej s úspěchem využít také pro simulace a optimalizace postupů svařování reálných celků, prováděných pomocí ručních metod svařování.

Jak již bylo uvedeno, primárně jsou vždy řešena teplotní pole od jednotlivých svarových housenek a teprve poté všechny ostatní veličiny. Proto je nezbytné jednoznačně definovat geometrii a také vliv každé svarové vrstvy na rozložení teplotních polí ve vzorku. Jedním možným způsobem je vytvoření samostatného experimentu pro každou svarovou housenku. V takovém případě je však problematické opakovatelné umístění termočlánků v identických vzdálenostech od hranice ztavení (vzdálenost a hloubka). Proto je mnohem výhodnější koncipovat experiment tak, aby byl počátek každé následné svarové housenky posunut o přesně definovanou vzdálenost (zpravidla 30 až 45 mm) oproti počátku housenky předchozí. Díky tomu je možné v rámci jednoho experimentu vyhodnotit geometrii každé svarové housenky v rámci známých průběhů teplotních polí a jak bude ukázáno dále, také definovat vliv jednotlivých housenek na průběh deformací a změny tvrdosti. Minimální vzájemné posunutí jednotlivých housenek musí být takové, aby byla zajištěna stabilita procesu a ustálené teplotní pole každé housenky v oblasti, ze které bude odebírán makrovýbrus svaru ke geometrickému vyhodnocení. V běžném rozsahu svařovacích proudů 180 až 320 A se u ocelí a metody MAG pohybuje oblast nasycení teplem od 18 do 28 mm, v závislosti na dalších vstupních podmínkách [2]. Poté by se již mělo jednat o ustálený proces.

Vlastní experiment byl navržen pro pětivrstvý tupý svar. Ke svařování byly použity dva polotovary z materiálu P235GH o rozměrech 350x120x12 mm. Chemické složení oceli P235GH odečtené z materiálového atestu je uvedeno v tabulce 24. Na každém z polotovarů byly frézováním připraveny svarové úkosal s otupením 1,5 mm a celkovým úhlem rozevření 60°. Polotovary byly k sobě nastehovány pomocí čtyř stehů, tak jak je ukázáno na obrázku 45. Při přípravě experimentu je třeba zachovat konstantní svarovou mezeru v celé délce vzorku. V tomto případě se svarová mezera pohybovala v rozmezí od 1,54 do 1,68 mm. Protože jsou jednotlivé stehy součástí prostorového modelu a mají vliv zejména na velikost příčných deformací v průběhu svařování, byly definovány jak jejich délky, tak také jejich vzdálenosti od počátku vzorku v souladu s obrázkem 46.

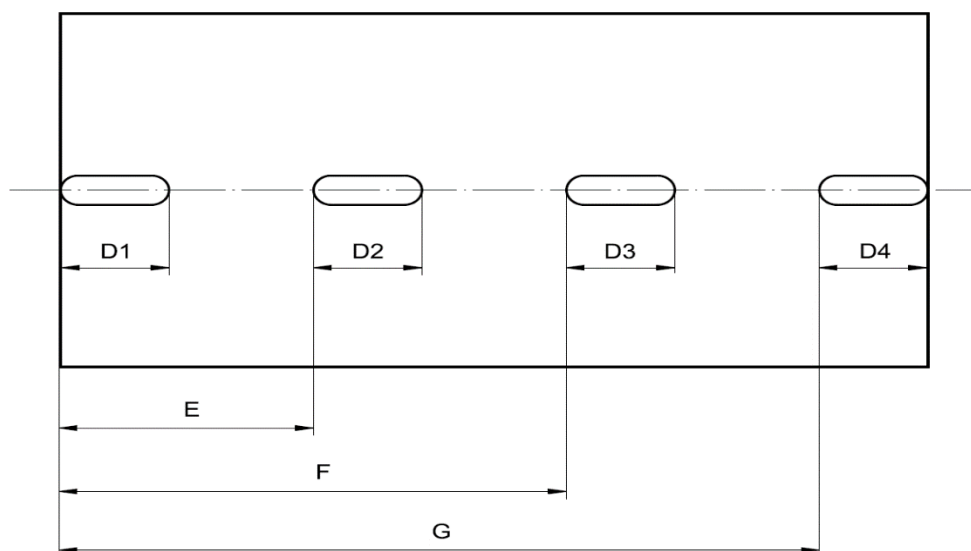


Obr. 45. Způsob nastehování vzorku při dodržení konstantní svarové mezery

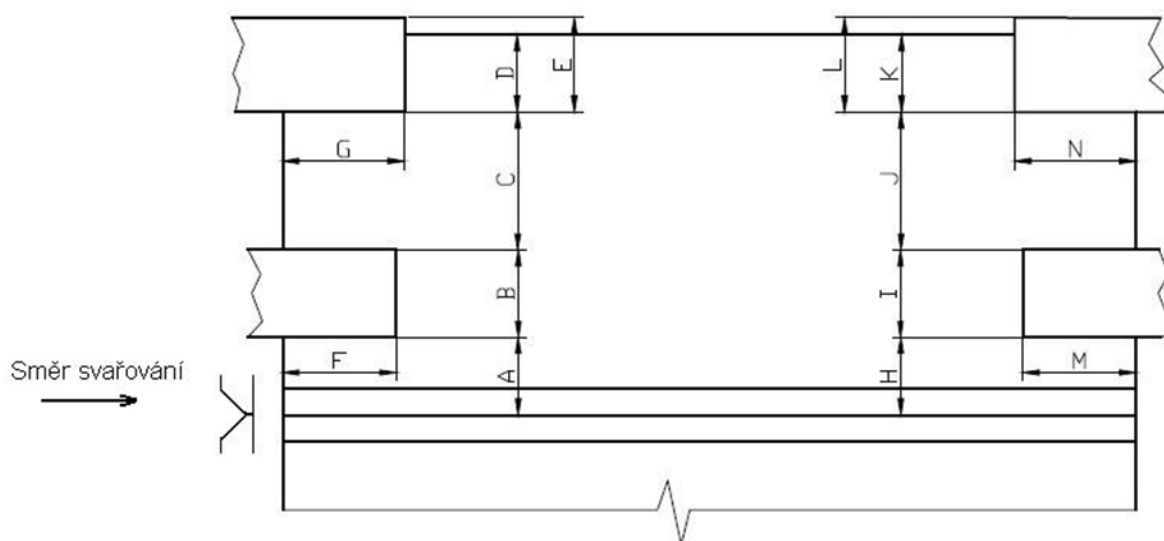
Pro svařování vzorků byl použit přípravek popsáný v kapitole 8.1.1. s liniovým dotykem se vzorkem a s definovaným součinitelem přestupu tepla do okolí. Nastehovaný vzorek byl připevněn k přípravku tak, jak je ukázáno na obrázku 44. Jedna jeho část byla připevněna

k přípravku pomocí 4 upínek a druhá část byla volně v prostoru tak, aby se mohla libovolně prostorově deformovat a mohly tak být sledovány průběhy příčných a úhlových deformací po celou dobu experimentu. Vzhledem k rozložení teplotních polí, není nezbytné při svařování takto koncipovaného experimentu zohlednit místa dotyku upínek při definování plochy pro přestup tepla. Je sice možné použít speciálně upravené upínky mající ve své dotykové části dva hroty, aby byl dotyk se vzorkem pouze bodový. Z hlediska následných výpočtů velikosti vnitřních napětí a hodnot plastické deformace je však mnohem výhodnější definovat celkovou dotykovou plochu upínek, tak jak je schematicky ukázáno na obrázku 47.

	1 steh – délka D:	15,1 mm	
2 steh – rozměr E:	108,5 mm	2 steh – délka D:	15,7 mm
3 steh – rozměr F:	222,7 mm	3 steh – délka D:	15,7 mm
4 steh – rozměr G:	335,2 mm	4 steh – délka D:	14,8 mm



Obr. 46. Definování délek jednotlivých stehů a jejich vzdáleností od počátku vzorku



Obr. 47. Schematické znázornění způsobu a rozměrů upevnění vzorku

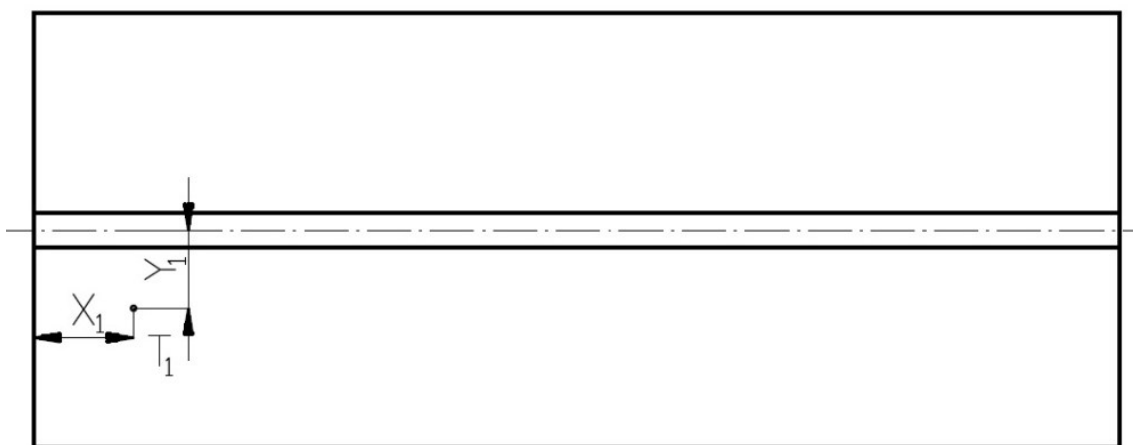
Protože se jednalo o připevnění vzorku k přípravku pomocí upínek šroubů a matic, lze takové upnutí považovat za dokonale tuhé, s okrajovou podmínkou definující nulová posunutí bodů v celé dotykové ploše upínky. V případě požadavku na připevnění vzorku přesně definovanou silou jsou do systému upínek vloženy tlačné pružiny a dotažení je provedeno momentovým klíčem. Pro realizovaný experiment byly plochy dotyku mezi upínkami a vzorkem definovány následujícími rozměry (ve shodě s obr. 47).

Rozměr A = 25,1 mm	Rozměr F = 22,8 mm	Rozměr K = 25,8 mm
Rozměr B = 33,5 mm	Rozměr G = 21,1 mm	Rozměr L = 44,0 mm
Rozměr C = 34,8 mm	Rozměr H = 25,0 mm	Rozměr M = 21,7 mm
Rozměr D = 25,8 mm	Rozměr I = 33,5 mm	Rozměr N = 22,4 mm
Rozměr E = 44,0 mm	Rozměr J = 35,4 mm	

Dalšími vstupními údaji, které je nezbytné definovat před začátkem svařování, jsou údaje o umístění měřících čidel. V případě tohoto experimentu se jedná o umístění termočlánků a LVDT čidel měřících posuvy a deformace definovaných míst vzorku. Aby bylo možné oba tyto typy měření synchronizovat s procesem svařování, byla v rámci projektu TAČR 02010992 vyvinuta měřicí aparatura DiagWeld V0 s galvanicky chráněnou ústřednou. Tato aparatura umožňuje synchronizovaně měřit teplotní a deformační pole bez ohledu na typ a velikost elektrických a magnetických polí vznikajících při ohřevu materiálu (vysokofrekvenční nebo odporový ohřev), nebo při různých metodách svařování (např. vysokofrekvenční zapalování oblouku u metody TIG) [93].

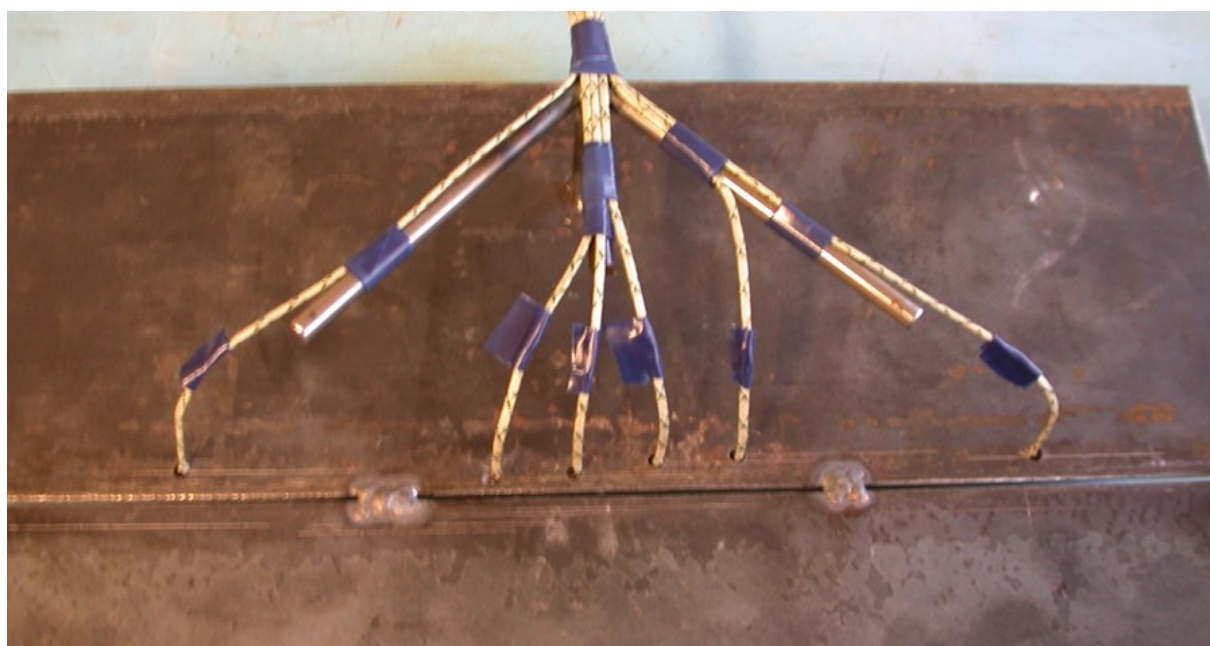
Pro verifikaci teplotních polí jsou u vícevrstevných svarů požadovány minimálně tři termočlánky rozmístěné podél osy svařování a umístěné v různých hloubkách ve vzorku. Termočlánky je možné umístit ve stejné, nebo v různých vzdálenostech od osy svaru. Jedinou podmínkou pro verifikace teplotních polí je, aby alespoň jeden z termočlánků naměřil při některém z teplotních cyklů hodnotu teploty vyšší než 900°C. Je to důležité proto, aby se výrazněji projeví případné odchylky mezi reálně změřenými teplotními poli a numericky spočítanými hodnotami. Z tohoto důvodu je také vhodné ověření skutečného umístění termočlánku od hranice natavení. Toto ověření je realizováno pomocí metalografických výbrusů provedených v místě přivaření termočlánku.

Pro měření teplotních polí bylo použito celkem šest termočlánků typu K, kondenzátorově přivařených v příslušných otvorech. Pozice přivaření jednotlivých termočlánků jsou uvedeny ve shodě se schematickým obrázkem 48. Hloubka přivaření jednotlivých termočlánků je uvedena od spodní hrany svařovaného vzorku a souřadnice y od osy svaru. Na obrázku 49 je celkové rozmístění termočlánků na vzorku, včetně podpůrné konstrukce bránící odtržení termočlánků při manipulaci se vzorkem.



Obr. 48. Schématické znázornění umístění jednotlivých termočlánků

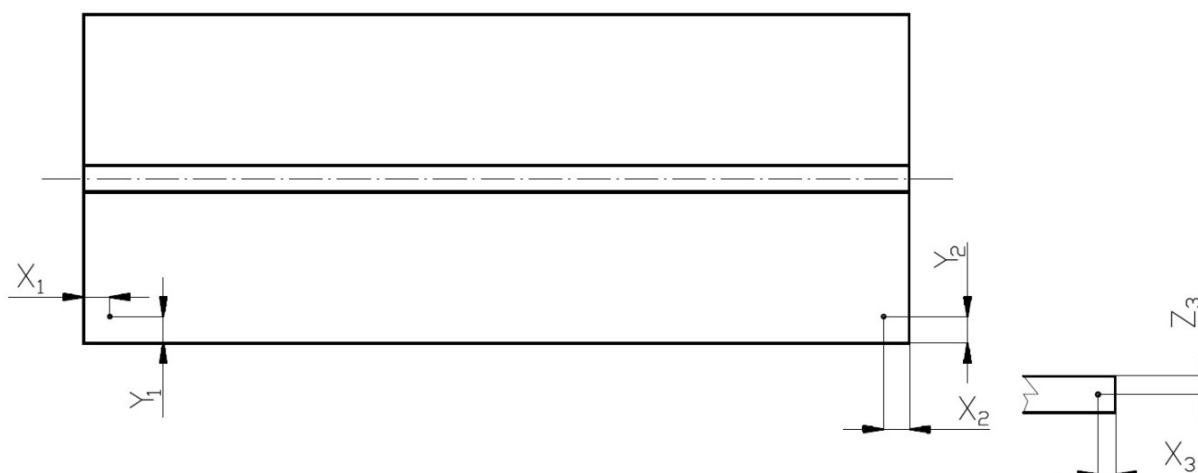
Termočlánek T1:	x= 70 mm	y= 6,2 mm	hloubka= 6 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T2:	x= 145 mm	y= 3,3 mm	hloubka= 2 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T3:	x= 165mm	y= 4,5 mm	hloubka= 4 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T4:	x= 185 mm	y= 6,7 mm	hloubka= 7 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T5:	x= 205 mm	y= 7,7 mm	hloubka= 10 mm	umístěno: zdola
Termočlánek T6:	x= 280 mm	y= 6,2 mm	hloubka= 6 mm	umístěno: zdola



Obr. 49. Celkové rozmístění termočlánků na svařovaném vzorku

Pro měření deformací byla použita celkem tři LVDT čidla. Dvě z nich sloužila k měření úhlových deformací a jedno čidlo k měření příčné deformace na konci vzorku. Pozice dotyku jednotlivých čidel se vzorkem jsou uvedeny ve shodě se schématickým obrázkem 50. Reálné umístění LVDT čidel je ukázáno na obrázku 44.

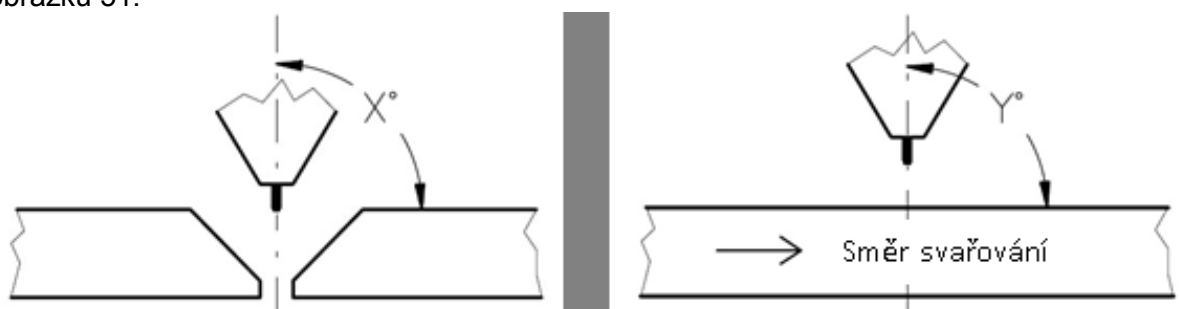
LVDT snímač č.1:	x3= 11,5 mm	y3= 0,0 mm	z3= -1,6 mm	směr měření: osa y
LVDT snímač č.2:	x1= 4,6 mm	y1= 4,7 mm	z1= 0,0 mm	směr měření: osa z
LVDT snímač č.3:	x2= 5,2 mm	y2= 5,8 mm	z2= 0,0 mm	směr měření: osa z



Obr. 50. Schematické znázornění umístění polohových LVDT čidel

8.1.4. Realizace experimentu a monitorizace procesních veličin

Vlastní svařování bylo provedeno metodou MAG na materiálu P235GH ve speciálním přípravku a s hořákem vedeným pomocí lineárního automatu. Jako přídatný materiál byl použit drát OK AristoRod 13.09 GMoSi dle EN 12070 průměru 1,2 mm a jako ochranný plyn byl použit směsný plyn M21 dle ČSN EN 439 s poměrem mísení Ar/CO₂ 82/18. Hořák svíral se vzorkem úhel 90° v příčném i podélném směru, tak jak je ukázáno na schematickém obrázku 51.

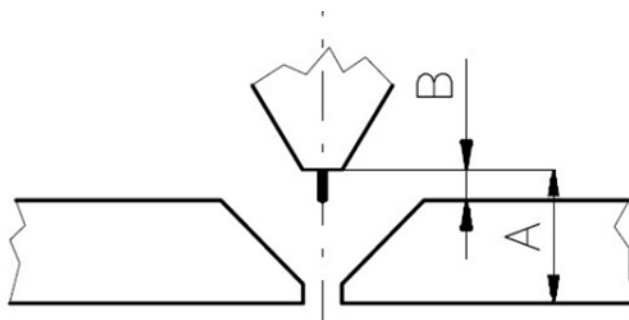


Obr. 51. Schematické znázornění polohy hořáku vůči svařovanému vzorku

Svar byl realizován jako 5-ti vrstvý, přičemž u každé housenky musela být definována poloha středu hořáku vůči ose svaru a také vzdálenost A [mm] kontaktní špičky od místa svařování. Při volbě této vzdálenosti je doporučeno vycházet ze vztahů (46) a (47), přičemž vztah (46) je vhodný pro zkratový přenos kovu v oblouku a vztah (47) pro bezzkratový přenos kovu v oblouku. Proměnná d [mm] definuje průměr přídatného drátu (tavící se elektrody). [2]

$$A = (10 \cdot d) + 1 \quad (46)$$

$$A = (10 \cdot d) + 3 \quad (47)$$



Obr. 52. Schematické znázornění vzdálenosti kontaktní špičky od místa svařování

První kořenová housenka byla svařována s kontaktní špičkou vzdálenou od spodní plochy svařovaného vzorku $A = 13 \text{ mm}$, ve shodě s obrázkem 52. Z důvodu snadnějšího nastavení vzdálenosti kontaktní špičky od místa svařování bylo využito distančních podložek položených na povrchu svařovaného vzorku, tedy rozměr B na obrázku 52. Při každé následující vrstvě musela být vzdálenost kontaktní špičky od svařovaného vzorku změněna podle výšky předchozí svarové housenky. Z hlediska polohy hořáku vůči svařovanému vzorku byly housenky 1, 2 a 5 svařovány s osou hořáku v ose svaru a u housenek 3 a 4 musel být hořák vyosen ve směru osy y. V tabulce 51 jsou uvedena geometrická nastavení polohy hořáku vůči svařovanému vzorku pro všechny housenky. Tyto údaje jsou velice důležité pro definování trajektorií pohybu jednotlivých modelů zdroje tepla prostorovým modelem. Kromě již zmíněných údajů jsou v tabulce 51 také uvedeny nastavované hodnoty svařovacího proudu a rychlosti svařování, typ housenky a režim svařování.

Tab. 51. Geometrická nastavení polohy hořáku a nastavované procesní parametry

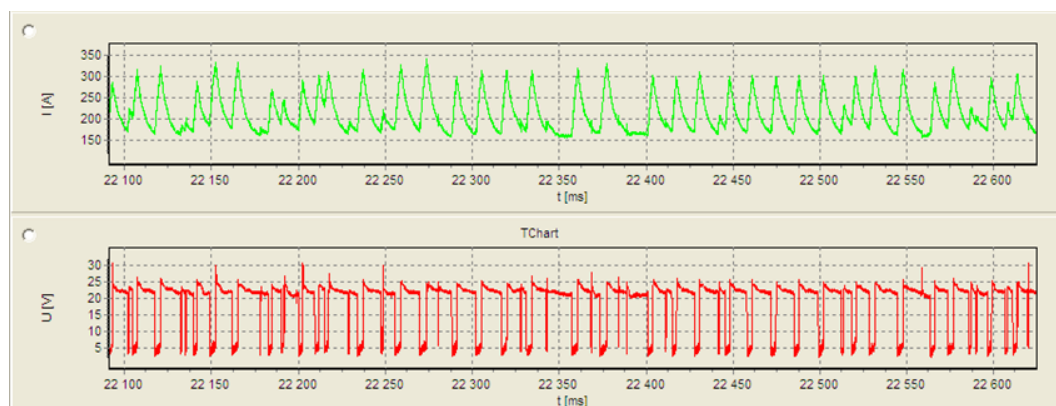
	Hous. 1	Hous. 2	Hous. 3	Hous. 4	Hous. 5
Rozměr A [mm]	13,0	18,2	21,8	21,8	24,6
Rozměr B [mm]	1,0	6,2	9,8	9,8	12,6
Vyosení hořáku [mm]	0,0	0,0	-3,3	3,3	0,0
Délka svař. hous. [mm]	350	310	270	230	190
Svařovací proud [A]	200	200	200	200	280
Rychlost svař. [m.min⁻¹]	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
Typ housenky	kořenová	1 výplňová	2 výplňová	3 výplňová	krycí
Režim svařování	synergický	synergický	synergický	synergický	synergický

K vlastnímu svařování byl použit svařovací invertor BDH 550 Puls Syn, lineární automat s plynule nastavitelnou rychlostí svařování a speciální přípravek s definovanými podmínkami pro přestup tepla do okolí. Svařování proběhlo v synergickém režimu a veškeré procesní parametry byly snímány aparaturou WeldMonitor. Skutečné procesní parametry byly následně použity k definování výkonu a rychlosti pohybu modelu zdroje tepla. Způsob použití uvedených parametrů bude popsán v kapitole 8.1.5. V tabulce 52 jsou uvedeny

monitorované svařovací parametry a skutečné délky housenek včetně definování vzdálenosti jejich začátku od okraje vzorku. Protože má na geometrii svarové lázně také vliv způsob přenosu kovu v oblouku, je v tabulce 52 uvedena i tato hodnota. Na obrázku 53 je pak detailně ukázán záznam průběhu napětí a proudu pro housenku číslo 1 (zkratový přenos) a na obrázku 54 je záznam průběhu napětí a proudu pro housenku číslo 5 (bezzkratový přenos). Z obrázků je zřejmý zřetelný rozdíl mezi oběma záznamy.

Tab. 52. Skutečné monitorované svařovací parametry pro všechny housenky

	Hous. 1	Hous. 2	Hous. 3	Hous. 4	Hous. 5
Svařovací proud [A]	217,8	214,6	211,4	211,9	302,6
Svařovací napětí [V]	20,1	20,3	20,4	20,3	27,4
Rychlost svařování [m.min⁻¹]	0,316	0,315	0,413	0,411	0,413
Rychlost pod. drátu [m.min⁻¹]	5,657	5,351	5,353	5,354	8,643
Průtok plynu [l.min⁻¹]:	12,0	15,0	15,0	15,0	22,0
Vnesené teplo [kJ.cm⁻¹]	8,312	8,298	6,235	6,280	12,045
Vzdálenost od zač. vzorku [mm]	0	37	79	118	156
Skutečná délka hous. [mm]	348	311	269	230	192
Účinnost přenosu tepla [-]	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Způsob přenosu kovu	Zkratový	zkratový	zkratový	zkratový	sprcha



Obr. 53. Záznam průběhu napětí a proudu při svařování kořenové housenky



Obr. 54. Záznam průběhu napětí a proudu při svařování krycí housenky

8.1.5. Geometrické vyhodnocení jednotlivých housenek

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.2.2., dvouelipsoidní (nebo také tzv. Goldakův) model zdroje tepla lze v základní nebo modifikované formě použít pro většinu konvenčních metod tavného svařování. Je popsán dvěma rovnicemi (21) a (22) jednotlivě pro každý z elipsoidů. Jak je z rovnic zřejmé, k definování tohoto modelu je nutné znát celkový výkon zdroje Q [W], ale také geometrické parametry a , b , c_1 , c_2 [mm] definující natavenou oblast. Rychlost svařování a její vliv na celkovou geometrii svaru je pak zohledněna v parametru ξ [mm].

Celkový výkon zdroje Q závisí na efektivním napětí a na efektivním svařovacím proudu a je ovlivněn účinností přenosu tepla v oblouku, tak jak je definováno vzorcem (48). Pro kořenovou housenku číslo 1 je tak na základě údajů z tabulky 52 hodnota výkonu použita pro definování dvouelipsoidního modelu zdroje tepla rovna $Q = 3502$ W. Účinnost přenosu tepla od zdroje byla volena 0,8 pro metodu MAG, ve shodě s normou ČSN EN 1011-1.

$$Q = U \cdot I \cdot \eta \quad (48)$$

Kde:

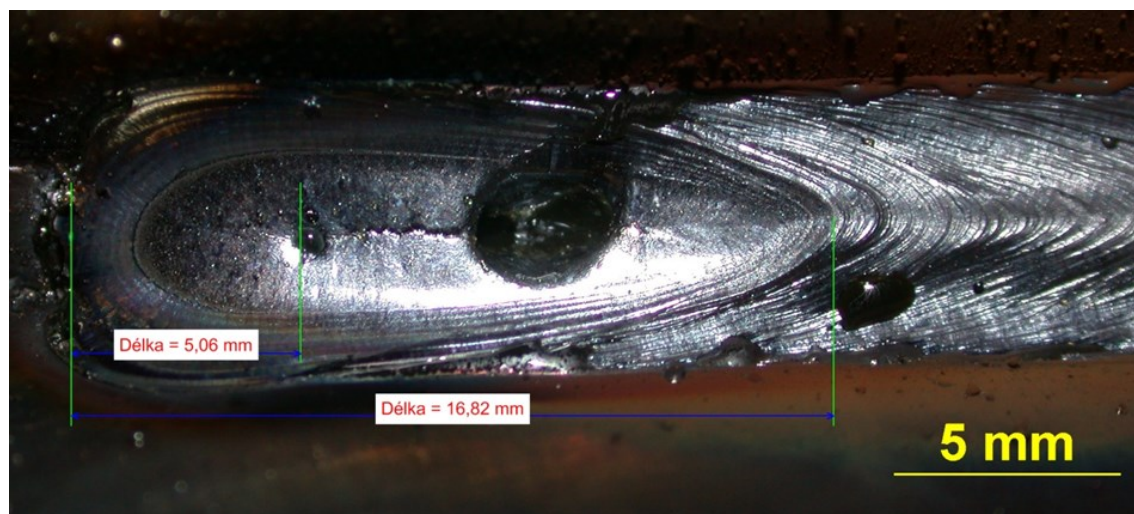
Q - je celkový výkon zdroje [W]

U - je svařovací napětí [V]

I - je svařovací proud [A]

η - je účinnost přenosu tepla od zdroje, [-]

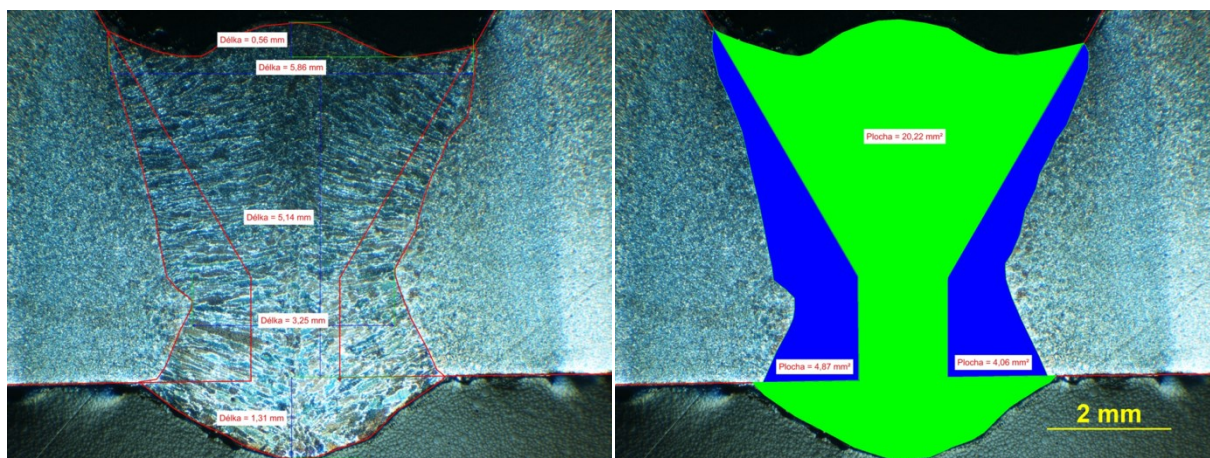
Dále je třeba pro každou z housenek získat k definování Goldakova modelu geometrické parametry natavené oblasti a , b , c_1 , c_2 . Na základě obrázku 10 (kap. 3.2.2.) definuje parametr a polovinu šířky svarové lázně, parameter b hloubku svarové lázně a parametry c_1 a c_2 definují délky jednotlivých elipsoidů. Z tohoto důvodu musel být po svaření každé dílčí housenky vyfocen a změřen konec svarové lázně, tak jak je pro kořenovou housenku ukázáno na obrázku 55.



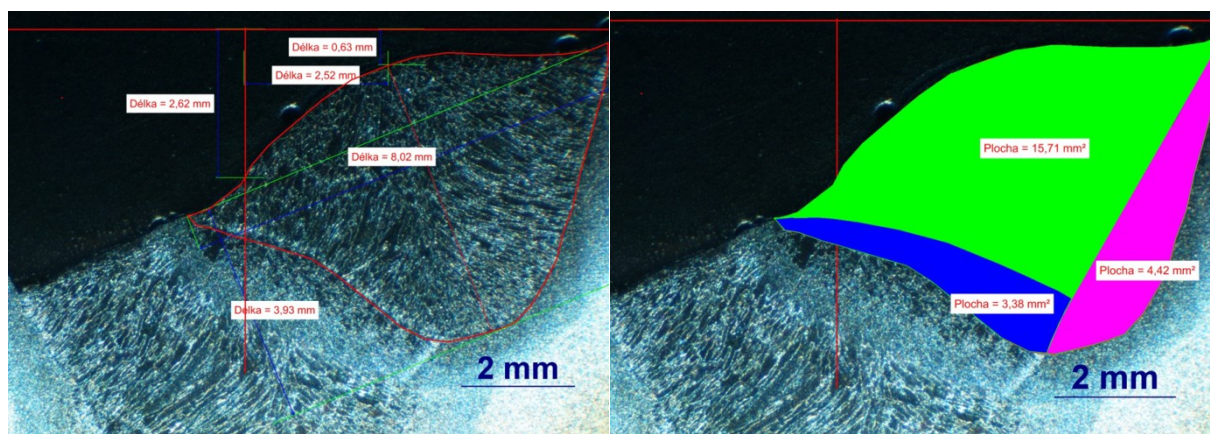
Obr. 55. Konec kořenové housenky číslo 1, včetně údajů pro definování parametrů c_1 a c_2

Celková délka svarové lázně byla u této housenky 16,82 mm. O velikosti parametrů c_1 a c_2 rozhoduje poloha tavné elektrody vůči konci svarové lázně. Tuto polohu je možné změřit přímo při ukončení svařování příslušné housenky, ale toto místo je zřetelné i na konci svarové lázně, jak je vidět z obrázku 55. Poměr parametrů c_1 a c_2 je silně závislý na rychlosti svařování. Obecně však lze říci, že v rozmezí rychlostí svařování 0,2 až 0,6 m.min⁻¹ tvoří parametr c_1 přibližně 1/3 celkové délky svarové lázně [2].

Ke stanovení šířky a hloubky svarové lázně (tedy parametrů a ; b) byly použity makrovýbrusy jednotlivých housek. Místo odběru vzorku se musí nacházet v již ustáleném teplotním poli (tedy 25 až 30 mm od začátku housenky), ale mělo by být vzdáleno alespoň 5 mm od housenky následující z důvodu možného teplotního ovlivnění. Takto získané makrovýbrusy mohou být následně použity jako verifikační vzorky pro ověření správné predikce tvrdosti. Na obrázku 56 je ukázán způsob odečtení parametrů a , b . Kromě těchto veličin se stanovuje také celková plocha svaru, případně velikosti ploch definující natavení základního materiálu.



Obr. 56. Makrovýbrus kořenové housenky, včetně údajů pro definování dvojitého elipsoidu a údajů definujících plochy přetaveného zákl. materiálu a plochu vyplněnou příd. materiálem



Obr. 57. Makrovýbrus druhé výplňové housenky, včetně údajů pro definování dvojitého elipsoidu a údajů definujících jednotlivé plochy

U výplňových a krycích housenek se kromě šířky a hloubky svarové lázně, plochy přetaveného základního materiálu a plochy tvořené přídavným materiálem, stanovuje ještě plocha přetavení původní housenky nebo housenek, tak jak je ukázáno na obrázku 57 (plocha vyplněná modrou barvou).

Spočítané výkony zdroje Q a zjištěné geometrické parametry natavených oblastí a , b , c_1 , c_2 použité k definování dvouelipsoidních modelů zdrojů tepla jsou pro všech pět housenek uvedeny v tabulce 53. Jednotlivé vyhodnocené snímky konců svarových lázní a vyhodnocené snímky se všemi geometrickými údaji jsou uvedeny v přílohách 4.1. a 4.2. Díky těmto údajům je již možné vytvořit prostorový model, definovat dvouelipsoidní modely zdroje tepla a přistoupit k ověření vhodnosti použitého modelu při teplotně-metalurgické analýze.

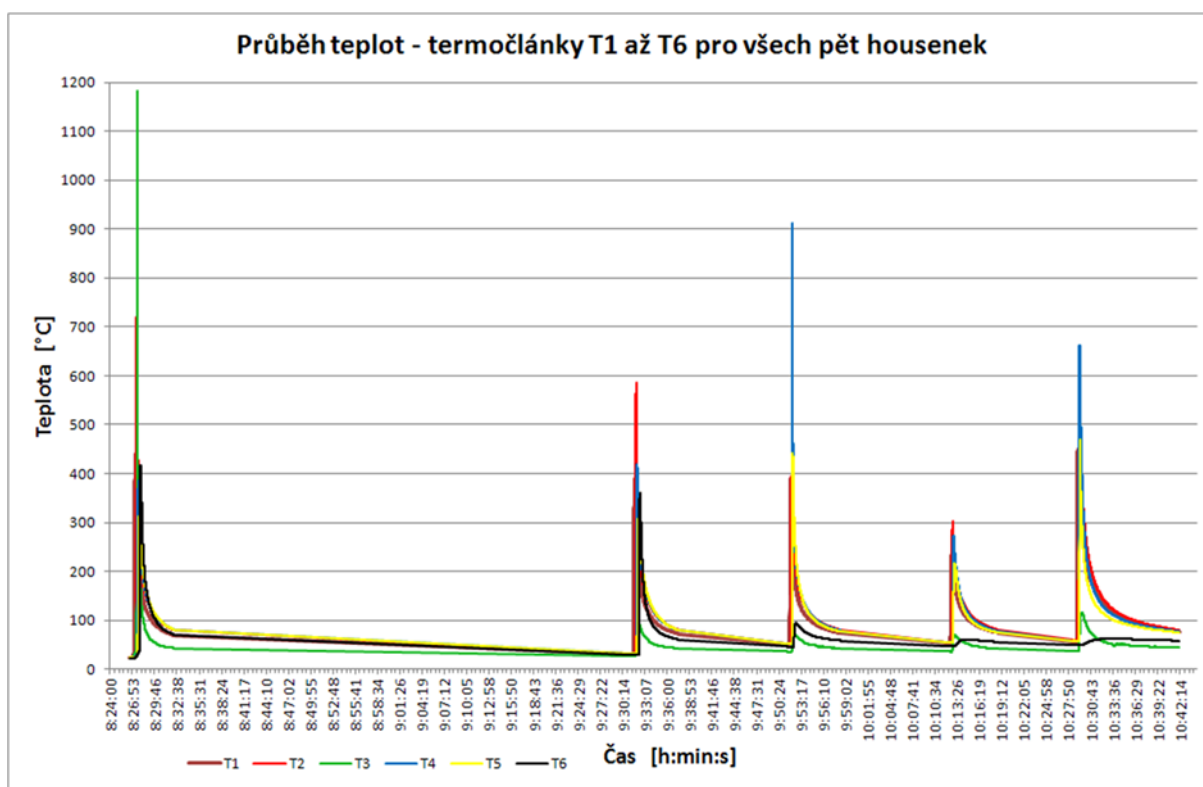
Tab. 53. Zjištěné geometrické údaje a spočítané výkony zdroje použité pro Goldakův model

	Hous. 1	Hous. 2	Hous. 3	Hous. 4	Hous. 5
Parametr a [mm]	2,93	4,13	4,01	3,67	6,57
Parametr b [mm]	5,14	4,99	3,93	4,29	6,31
Parametr c_1 [mm]	5,06	4,83	5,68	4,77	8,79
Parametr c_2 [mm]	11,76	10,30	10,63	10,94	20,63
Výkon zdroje Q [W]	3502	3485	3451	3441	6633
Celk. plocha hous. [mm²]	29,15	31,20	23,51	23,22	61,40

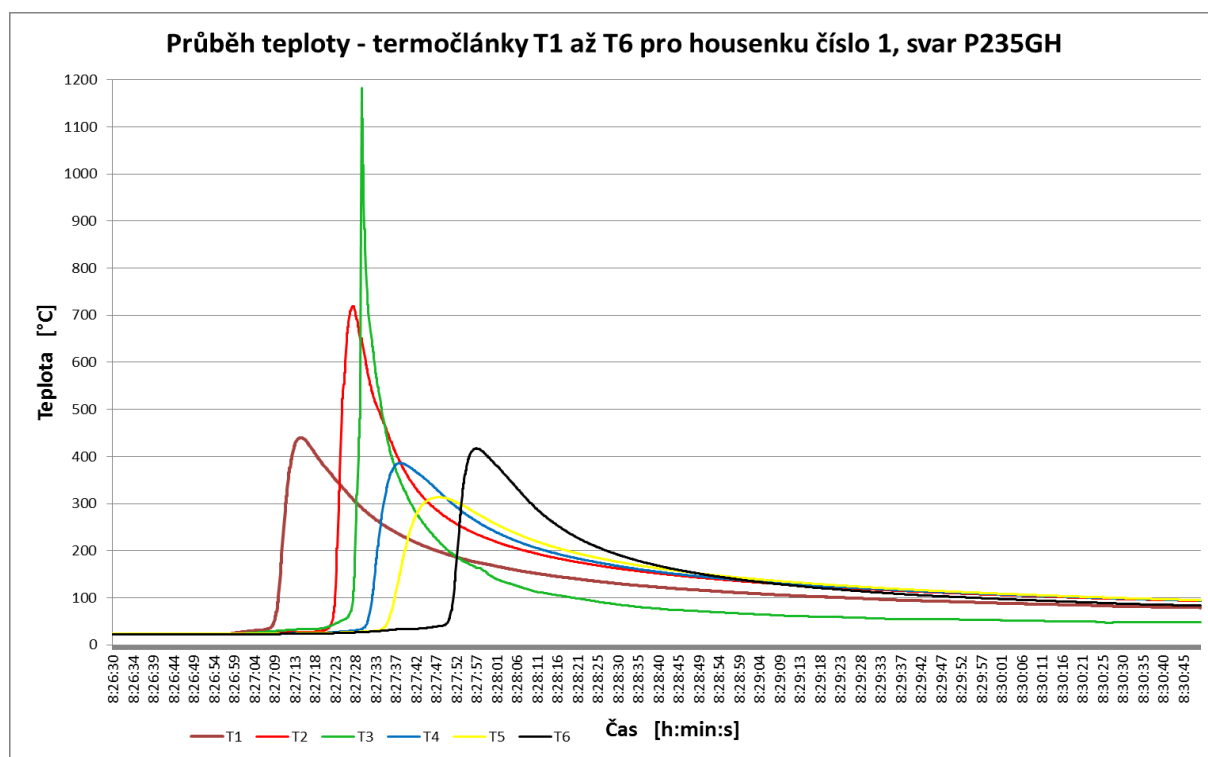
8.1.6. Výsledky měření teplotních a deformačních průběhů

Údaje o výsledcích průběhů teploty v závislosti na čase jsou využity pro kontrolu vhodnosti vytvořeného simulačního modelu. Právě zde se nejvíce ukáže přesnost simulačního výpočtu, protože teplotní pole od jednotlivých housenek se překrývají a vzájemně ovlivňují. Z důvodu následné verifikace je nutné umístit termočlánky dostatečně blízko hranice ztavení, aby alespoň na jednom z termočlánků byly naměřeny maximální hodnoty vyšší než 900°C. Na obrázku 58 jsou ukázány průběhy teploty po celou dobu svařování u všech 6 použitých termočlánků.

Pro detailnější představu je vhodnější porovnávat průběhy teploty pro jednotlivé svarové housenky, tak jak to je pro kořenovou housenku číslo 1 ukázáno na obrázku 59. Při ověření výsledků simulačních výpočtů je porovnáván zvláště každý z termočlánků. Z obrázku 59 je dále zřejmé, že při teplotách nižších než 500°C jsou si záznamy z jednotlivých termočlánků velice podobné, a proto je obtížné hledat výraznější odchylky při porovnání s výsledky teplotních polí získaných pomocí numerických simulací. Detailní průběhy teploty pro ostatní housenky jsou uvedeny v příloze číslo 4.3.



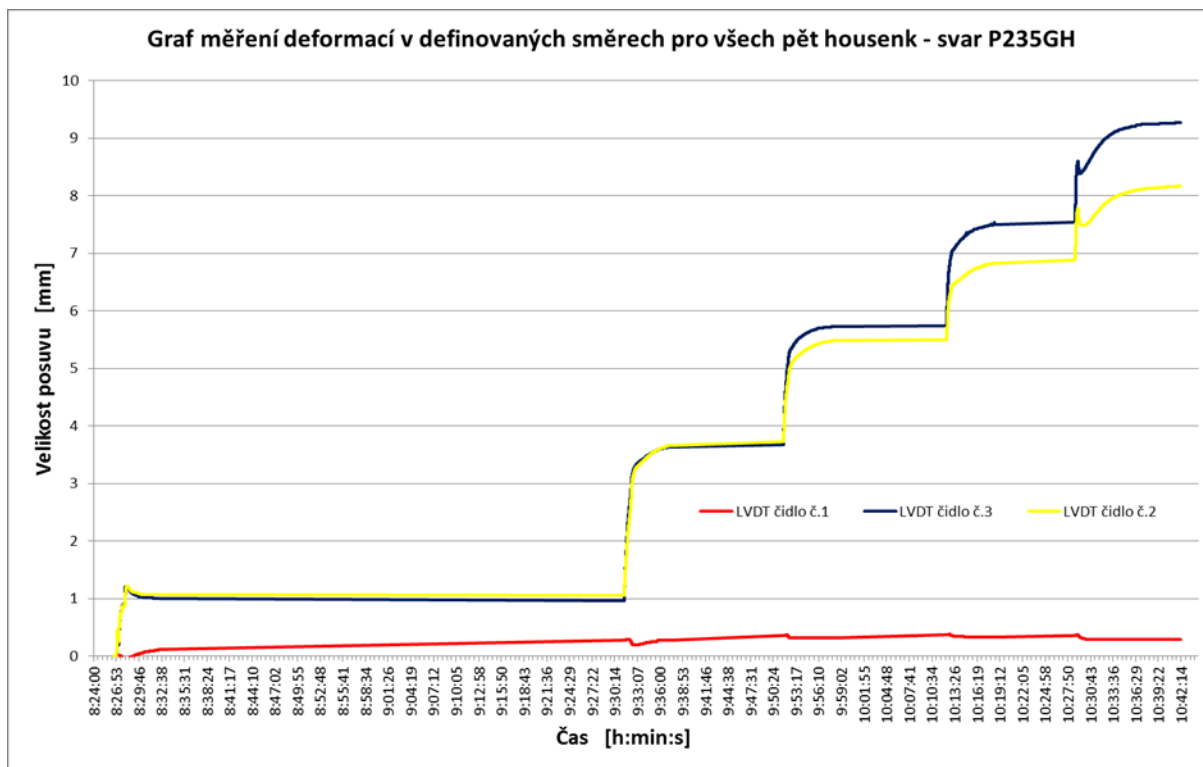
Obr. 58. Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků po celou dobu experimentu



Obr. 59. Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro kořenovou housenku číslo 1

Na obrázku 60 jsou ukázány posuvy odpovídající příčným a úhlovým deformacím svařovaného vzorku zaznamenané LVDT snímači délky umístěných v definovaných místech

(kap. 8.1.3.). Z obrázku je zřejmé, že u příčných deformací (červená barva) došlo pouze k minimálním deformacím, což lze z počátku vysvětlit tuhostí vzorku ve směru osy y způsobenou stehováním vzorku a poté již vlastní tuhostí vzorku způsobeným jednotlivými housenkami. Proto příčné deformace nepřekročily hodnotu 0,4 mm.



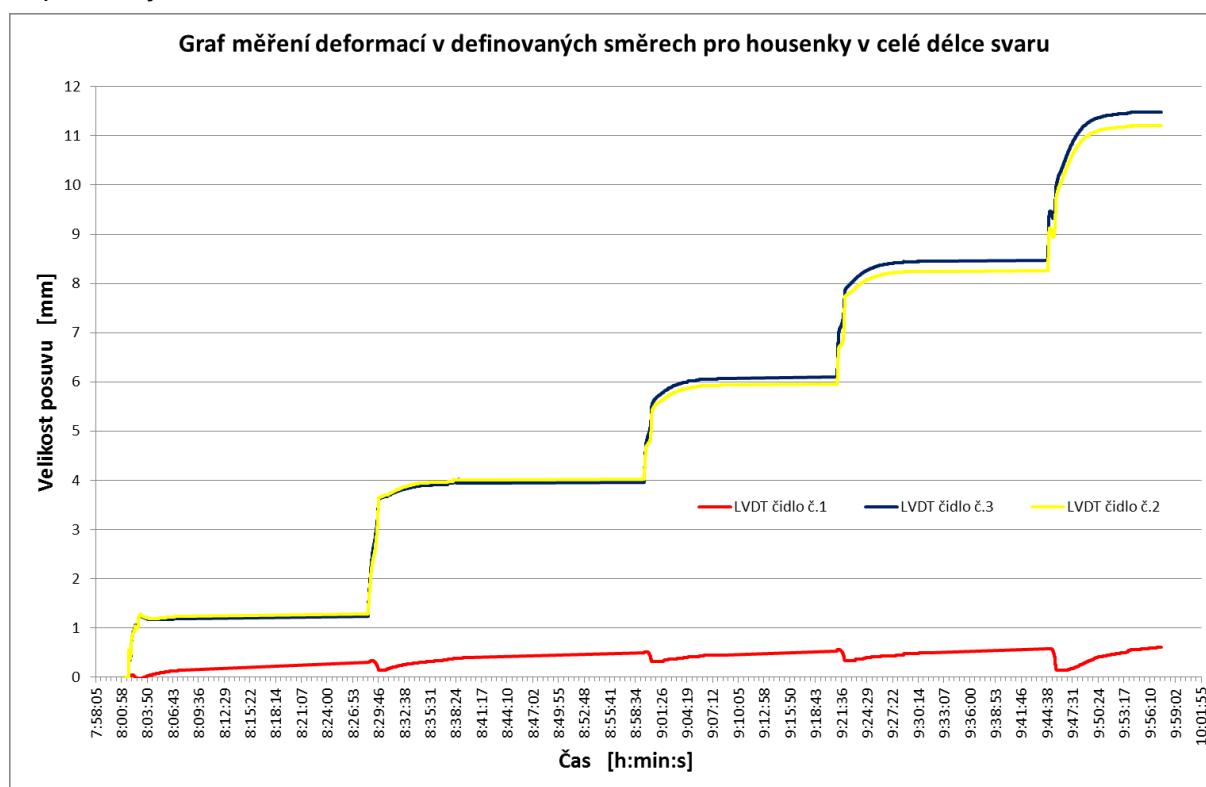
Obr. 60. Průběhy posuvů v definovaných místech zaznamenané LVDT snímači délky

Výrazně odlišný výsledek je u posuvů způsobených úhlovými deformacemi. Zde se projevil vliv každé svarové housenky a celková deformace byla větší než 9 mm. Z průběhů je také zřejmý rozdíl mezi úhlovými deformacemi na počátku a na konci svařovaného vzorku způsobený tím, že jednotlivé housenky nezačínaly na začátku vzorku, ale byly vůči sobě vzájemně posunuty o hodnoty uvedené v tabulce 52. Z tohoto důvodu se zpravidla realizuje ještě jeden identický experiment svařování. Jediný rozdíl je v tom, že jsou všechny housenky svařovány v celé délce vzorku. Rozdíl ve změřených deformacích je při takto realizovaném svařování ukázán na obrázku 61. Z průběhů je zřejmé, že velikosti úhlových deformací jsou (při svařování všech housenek v celé délce vzorku) na začátku a konci vzorku téměř identické. Svarové housenky provedené po celé délce vzorku se také projeví na celkové deformaci, která se zvětšila přibližně o 3 mm.

Záznamy o průběhu deformací jsou důležité pro porovnání s výsledky získanými při napětovo-deformační analýze. Při verifikaci výsledků a stanovení přesnosti a aplikovatelnosti použitého výpočetního modelu je při napětovo-deformační analýze výhodnější používat velikost deformací. Jedná se totiž o veličinu, kterou lze bez větších obtíží zaznamenávat v průběhu celého procesu. Naopak při ověřování výsledků pomocí měření napjatostí ve

svařovaném vzorku lze získat (při požadavku na konstantní okrajové podmínky po celou dobu experimentu) požadované hodnoty až po ukončení celého experimentu.

V současné době je k měření zbytkových napětí používána odvrtávací metoda, metoda pracující na principu Barkhausenova šumu a metody využívající rentgenové, nebo neutronové difrakce. Každá z těchto metod však má svá úskalí. Odvrtávací metoda je destruktivní a neumožňuje provést více opakovaných měření blízko sebe. Metodu pracující na principu Barkhausenova šumu lze použít pouze pro magnetické materiály a metody využívající rentgenové, nebo neutronové difrakce umožňují stanovit hodnotu zbytkových napětí pouze na povrchu vzorku, případně při odleptání povrchu v hloubkách nepřesahujících 2 mm.



Obr. 61. Průběhy posuvů v definovaných místech zaznamenané LVDT snímači délky pro housenky svařené v celé délce vzorku

8.1.7. Data pro ověření predikovaných hodnot tvrdosti

Tvrdost je významným parametrem umožňujícím definovat a klasifikovat změny, ke kterým dochází ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné oblasti. Na základě takto změřených hodnot je možné získat představu jak o strukturních změnách, tak také o pravděpodobných změnách mechanických vlastností jako jsou pevnost, tažnost a houževnatost. U materiálů používaných v energetickém průmyslu navíc hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu a TOO spolurozhodují o tom, zda je aplikovaný svařovací postup vhodný pro zamýšlené použití či

ne. Z těchto důvodů jsou při numerických simulacích vyžadovány predikce tvrdosti ve svarovém kovu a v tepelně ovlivněné oblasti.

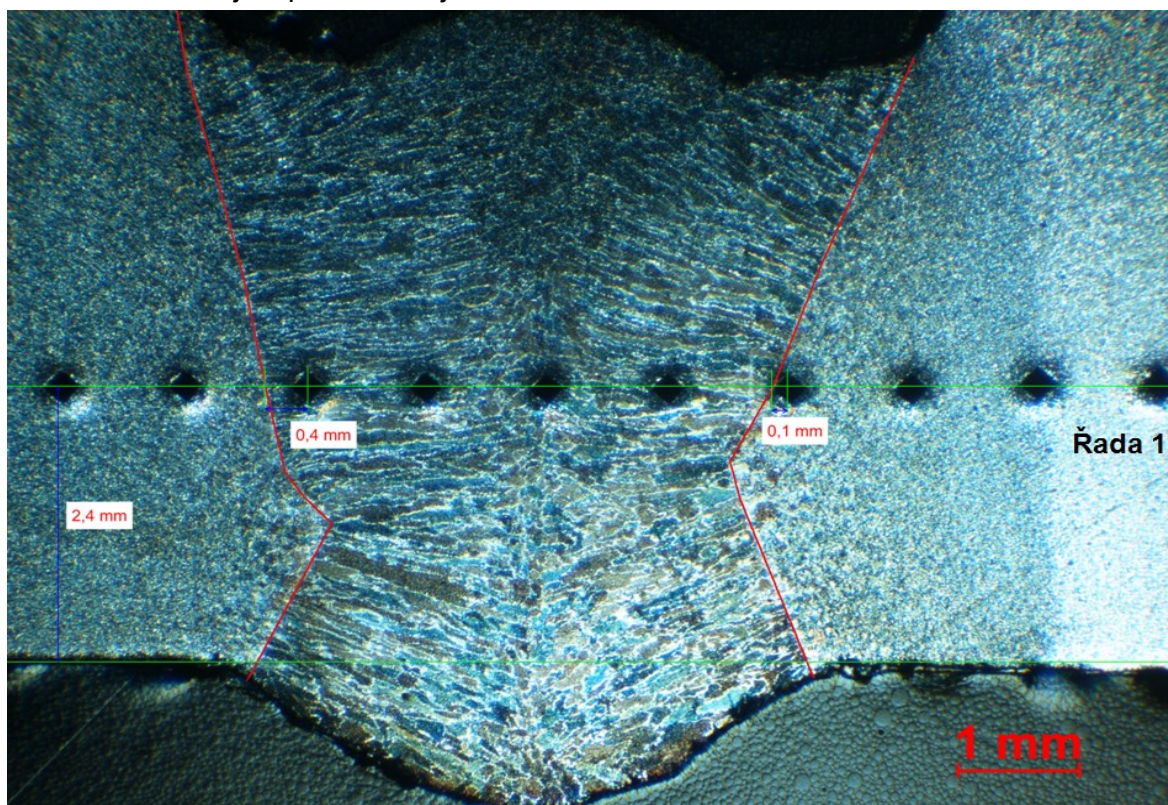
K ověření vhodnosti použitého modelu výpočtu tvrdosti je nezbytná verifikace numericky spočítaných hodnot. Je sice možné porovnat spočítané hodnoty tvrdosti s hodnotami získanými po ukončení celého experimentu, ale pro případné korekce a úpravy výpočetního modelu je vhodnější znát vliv každé svarové housenky na tuto veličinu. Z uvedených důvodů je proto výhodné použít pro měření tvrdosti metalograficky zpracované vzorky určené pro geometrické vyhodnocení jednotlivých housenek. Na těchto vzorcích jsou pak měřeny hodnoty tvrdosti v definovaných řadách, přičemž polohy příslušných vpichů si na všech vzorcích odpovídají. Při předpokladu konstantního průřezu každé z housenek ve směru svařování tak lze jednoduše zjistit vliv jednotlivých housenek na změnu tvrdosti v definovaných místech.

Měření tvrdosti na vzorcích z materiálu P235GH bylo provedeno v souladu s normami ČSN EN ISO 9015-1 a ČSN EN ISO 6507-1. Byla použita zkouška tvrdosti podle Vickerse HV 10, přičemž měření bylo realizováno ve formě řady vtisků se vzdáleností mezi středy 1 mm. Jednotlivé řady vtisků byly na vzorku umístěny tak, aby každá z krajních řad byla ve shodě s nornou, vzdálena od spodního i horního povrchu vzorku alespoň dva milimetry.

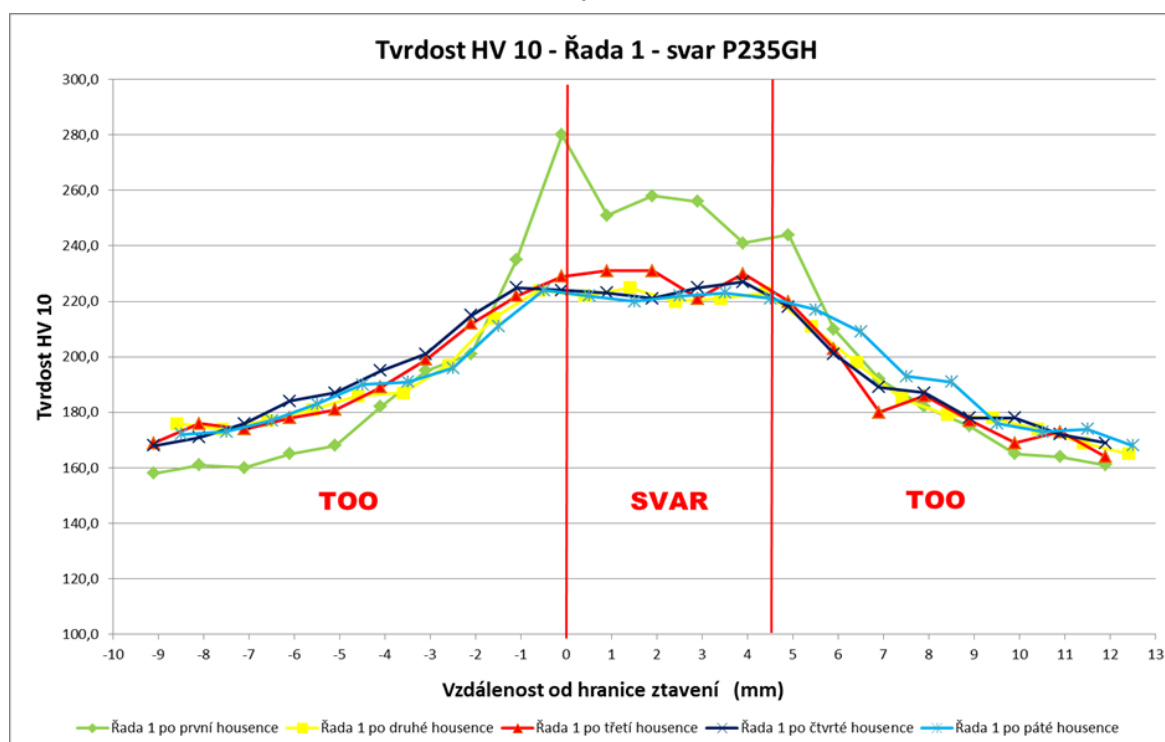
Celkově bylo pro pětivrstvý svar realizováno pět měřených řad vzdálených mezi sebou vždy 2 mm. Aby se podrobně zmapovala celá oblast od svarového kovu, přes TOO až do základního materiálu, obsahovala každá řada 22 vpichů. Z hlediska geometrického rozložení vedla jedna řada vpichů přes kořenovou housenku a následné dvě řady vpichů byly vedeny přes první výplňovou housenku. Třetí a čtvrtá výplňová housenka byly položeny vedle sebe, takže čtvrtá řada vpichů u vzorku č. 3 procházela pouze přes housenku číslo 3, ale u vzorku číslo 4 již bylo možné řadu 4 provést přes obě housenky. Řada 5 přecházela u vzorku číslo 4 přes horní část třetí a čtvrté housenky. Protože krycí housenka realizovaná na vzorku číslo 5 zcela přetavila na výplňových housenkách 3 a 4 místo kudy vedla Řada 5, u vzorku 5 již tato řada prochází pouze přes krycí housenku.

U vzorku číslo 1 byla měřena tvrdost HV 10 pouze jednou řadou, tak jak je ukázáno na obrázku 62. Jako počátek měření (hranice nula) byl zvolen průsečík mezi osou řady vpichů a hranicí ztavení z pravé strany svaru. Na obrázku 62 jsou znázorněny vpichy, včetně uvedení vzdáleností středů nejbližších vpichů od hranice ztavení. V tabulce 54 jsou pak uvedeny příslušné hodnoty tvrdosti HV 10 pro Řadu 1 po provedení kořenové housenky a v tabulce 55 jsou uvedeny hodnoty tvrdosti HV 10 provedené pro Řadu 1 na vzorcích 2, 3, 4 a 5, tedy po postupném ovlivnění výplňovými a krycí housenkou. Celkové grafické vyhodnocení vlivu jednotlivých housenek na hodnoty tvrdosti v definovaných místech svaru je ukázáno na obrázku 63. Z obrázku je zřejmé jak zvýšení tvrdosti v oblasti svarového kovu a TOO po svaření kořenové vrstvy, tak také následné snížení tvrdosti v uvedených místech způsobené

teplotním ovlivněním od první výplňové housenky. Tepelné ovlivnění od dalších housenek se z hlediska tvrdosti jeví pro Řadu 1 jako zanedbatelné.



Obr. 62. Řada vpichů provedených přes kořenovou housenku včetně označení vzdálenosti středů příslušných vpichů od hranice ztavení.



Obr. 63. Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti HV10 pro Řadu 1 a vzorky 1 až 5

Tab. 54. Změřené hodnoty tvrdosti HV10 pro Řadu 1 provedenou na vzorku č. 1

Osa x [mm]	-9,1	-8,1	-7,1	-6,1	-5,1	-4,1	-3,1	-2,1	-1,1	-0,1	0,9
Řada 1 vz. 1	158	161	160	165	168	182	195	201	235	280	251
Osa x [mm]	1,9	2,9	3,9	4,9	5,9	6,9	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9
Řada 1 vz. 1	258	256	241	244	210	192	182	175	165	164	161

POZNÁMKA: Osa x značí vzdálenost středů vpichů od hranice ztavení z pravé strany svaru

Tab. 55. Změřené hodnoty tvrdosti HV10 pro Řadu 1 provedené na vzorcích č. 2, 3, 4 a 5

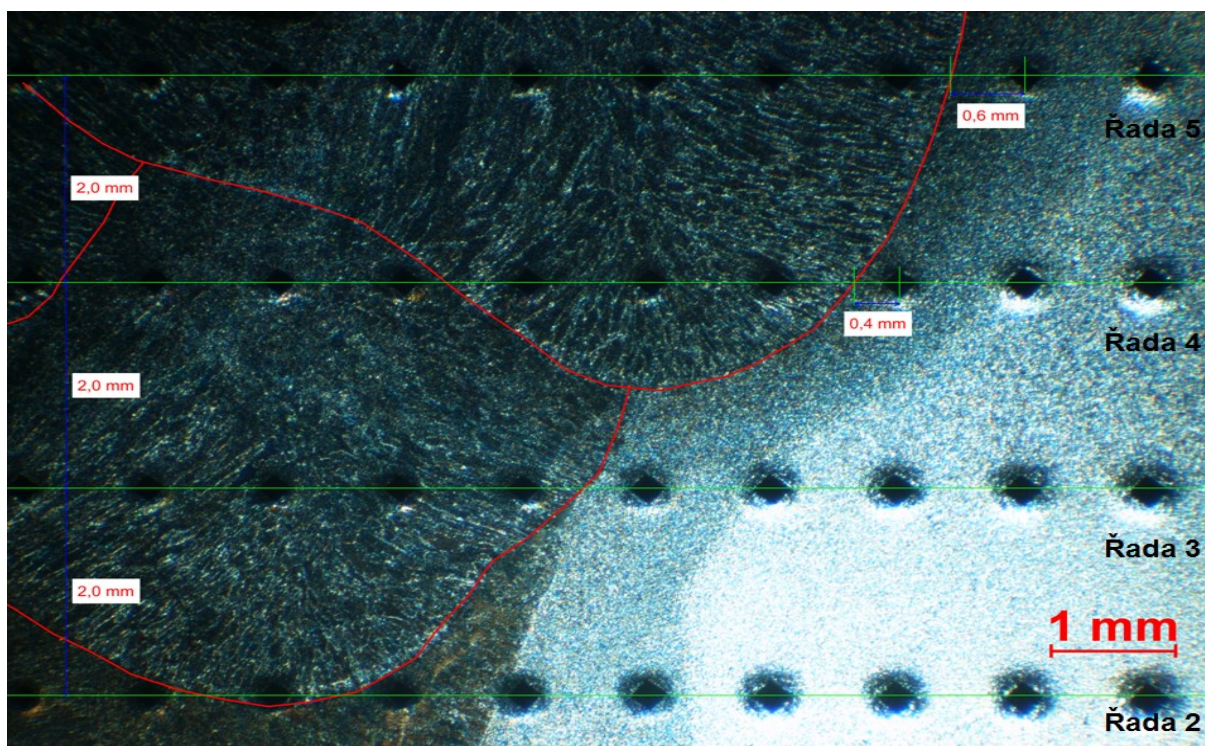
Osa x [mm]	-9,1	-8,1	-7,1	-6,1	-5,1	-4,1	-3,1	-2,1	-1,1	-0,1	0,9
Řada 1 vz. 2	176	174	177	181	186	187	197	214	224	222	225
Řada 1 vz. 3	169	176	174	178	181	189	199	212	222	229	231
Řada 1 vz. 4	168	171	176	184	187	195	201	215	225	224	223
Řada 1 vz. 5	172	173	177	183	190	191	196	211	224	222	220
Osa x [mm]	1,9	2,9	3,9	4,9	5,9	6,9	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9
Řada 1 vz. 2	220	221	223	211	198	185	179	178	174	169	165
Řada 1 vz. 3	231	221	230	220	203	180	186	177	169	173	164
Řada 1 vz. 4	221	225	227	218	201	189	187	178	178	172	169
Řada 1 vz. 5	222	223	221	217	209	193	191	176	173	174	168

POZNÁMKA: Osa x značí vzdálenost středů vpichů od hranice ztavení z pravé strany svaru

Polohy jednotlivých vpichů v následujících řadách (Řady 2 až 5) mají stejnou x-ovou souřadnici jako vpichy v Řadě 1, z důvodu rovnoměrného rozmístění vpichů na vzorku. Pro následné grafické vyhodnocení změny tvrdosti dochází u těchto řad (stejně jako u Řady 1) k přepočtu x-ové souřadnice a novému definování hranice nula v místě průsečíku mezi osou řady vpichů a hranicí ztavení z pravé strany svaru. Na obrázku 64 je vše ukázáno pro Řady 2 až 5, včetně zvýraznění obrysu hranic jednotlivých housenek. Výsledky měření tvrdosti pro Řady 2 až 5 na vzorcích 2, 3, 4 a 5 jsou uvedeny v tabulkách v příloze 4.4. Grafická zpracování výsledků pro jednotlivé řady umožňující definovat vliv každé ze svarových housenek na tvrdost příslušného místa jsou pak uvedena v příloze 4.5.

Metodickými postupy uvedenými v kapitole 8.1 je již možné získat dostatek vstupních i verifikačních dat k vytvoření a případné úpravě celkového výpočetního modelu. Celkový model je složen z jednodušších modelů vytvořených pro dílčí výpočty teplotních polí, strukturních fází, velikosti zrna, tvrdosti struktury, deformačních a napěťových polí atd. Toto tvrzení samozřejmě vychází z předpokladu, že jsou k dispozici materiálová vstupní data pro použité základní a přídavné materiály. V opačném případě je nutné tato data získat způsobem popsaným v kapitole 3. Jednotlivé dílčí modely jsou při celkovém výpočtu vzájemně propojeny a ovlivňují se tedy navzájem. Z uvedených důvodů je po definování dílčích výpočetních modelů a provedení první verze výpočtu potřeba vždy přistoupit

k porovnání spočítaných výsledků s verifikačními daty. Díky takovému porovnání je možné stanovit, zda je navržený výpočetní model dostatečně přesný, nebo zda je potřeba jej upravit. Pokud není přesnost simulačně získaných výsledků pro zamýšlenou aplikaci dostatečná, je třeba analyzovat důvody vzniku těchto nepřesností a následně provést úpravy navržených výpočetních modelů. To znamená stanovit, zda nejsou vzniklé odchylky způsobeny případnou nepřesností experimentálních měření, nepřesně definovanými okrajovými podmínkami, nebo zda byl použit vhodný typ dílčího výpočetního modelu. V této fázi již dochází k úpravám a tedy i ke zpřesňování dílčích i celkového výpočetního modelu. Úpravy jsou však koncipovány tak, aby nebyla potlačena širší aplikovatelnosti uvedeného modelu. V následující kapitole proto budou ukázány základní postupy využívané při definování a kontrole navrženého výpočetního modelu, ale bude zde také ukázáno, jak dále postupovat, když dosažené výsledky výpočtu nejsou v některé z oblastí vyhovující.



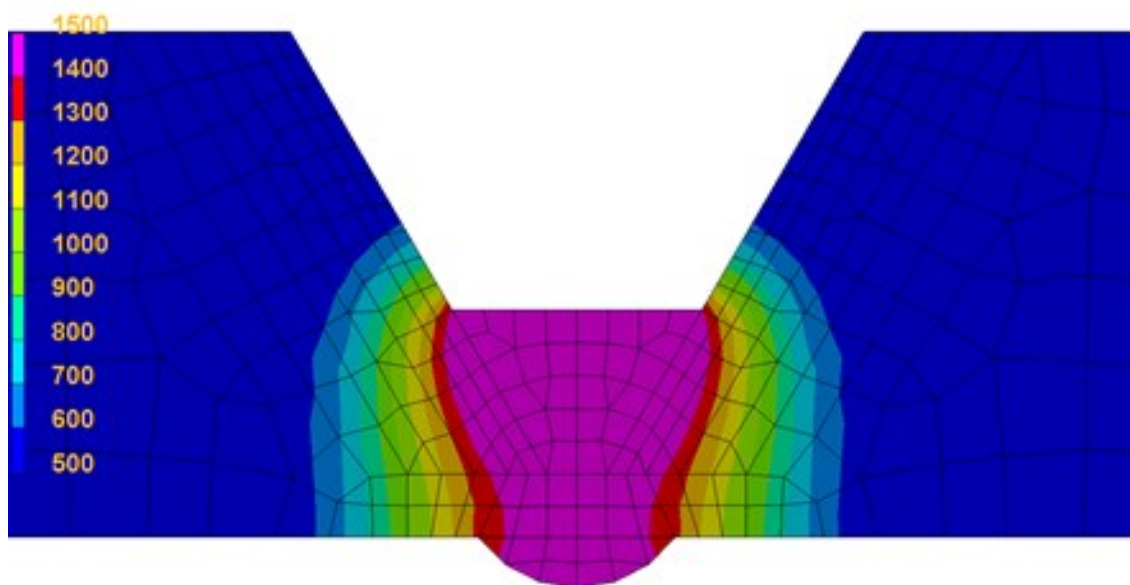
Obr. 64. Řady vpichů 2 až 5, včetně definování hranice nula pro jednotlivé řady

8.1.8. Definování a verifikace výpočetního modelu

Při tvorbě výpočetního modelu je vždy prvním krokem vytvoření geometrického modelu a definování modelu zdroje tepla. Pro většinu konvenčních metod tavného svařování je využíván dvouelipsoidní (Goldakův) model v základní, nebo modifikované podobě. Tento model je popsán rovnicemi (21) a (22) a jeho základní tvar lze modifikovat změnou koeficientů k , l , m , ale také pomocí koeficientů f_1 a f_2 ovlivňujících rozložení intenzity toku energie do materiálu. Všechny tyto koeficienty mohou být měněny uživatelem na základě předchozích zkušeností, ale existují také optimalizační programy definující uvedené

koeficienty na základě optimalizačních algoritmů a vstupních geometrických požadavků [68]. V této kapitole bude ukázána posloupnost kroků nezbytných k definování výpočetního modelu na základě informací získaných z experimentálních měření popsaných v kapitolách 8.1.3. až 8.1.7. Numericky získané výsledky budou porovnány s výsledky experimentů realizovaných na materiálu P235GH, proto také musí vytvořený prostorový model odpovídat svými rozměry a geometrií experimentálnímu vzorku popsanému v kapitole 8.1.3. V modelu musí být definovány všechny oblasti (včetně stehů a geometrie svarového kovu jednotlivých housenek), tak jak bylo podrobně popsáno v kapitole 3.4. Oblasti tvořené přídavným materiálem jsou pak aktivovány postupně, podle aktuálního postupu modelu zdroje tepla.

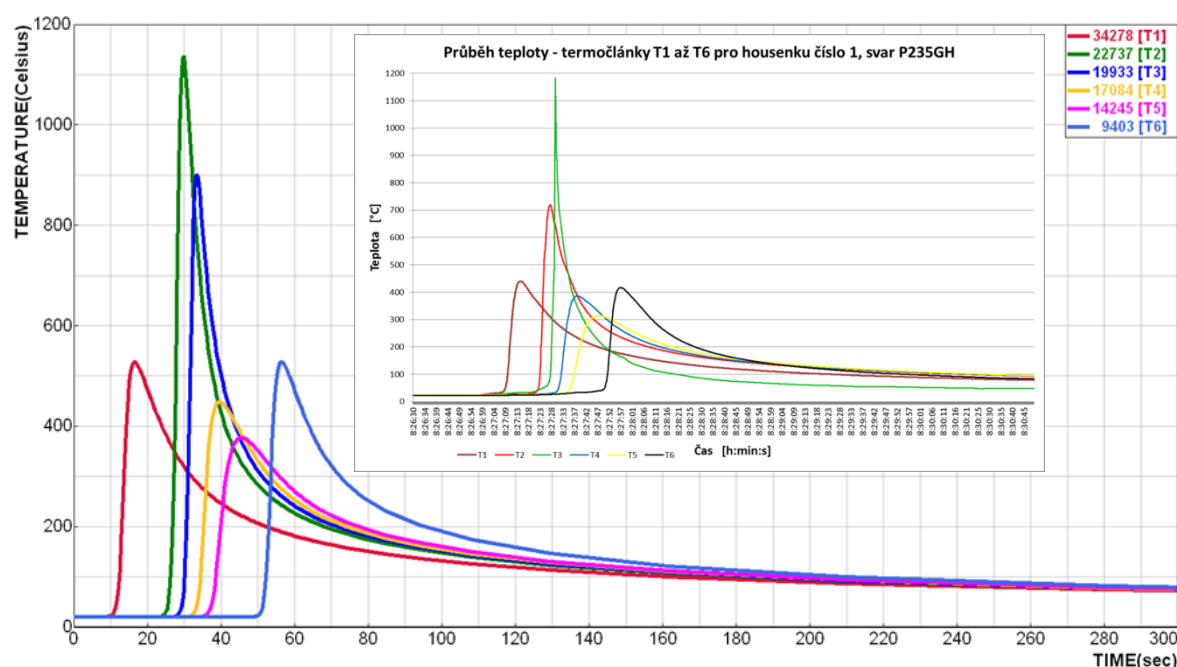
Po vytvoření prostorového modelu a definování trajektorií jednotlivých housenek je již možné přistoupit k definování dvouelipsoidních modelů zdroje tepla dílčích svarových housenek. K definování jednotlivých modelů zdroje tepla byly pro materiál P235GH použity vstupní geometrické údaje a , b , c_1 , c_2 a výkon zdroje Q uvedené v tabulce 53 a údaje o rychlosti svařování v_s a účinnosti přenosu tepla do materiálu uvedené v tabulce 52. Parametry ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu byly voleny $f_1 = 0,6$ a $f_2 = 0,4$ z důvodů uvedených v kapitole 3.2.2. Dosazením uvedených hodnot do rovnic (21) a (22) tak mohly být definovány dílčí modely zdroje tepla pro jednotlivé svarové housenky. Na obrázku 65 je ukázán výsledek numericky spočítané natavené oblasti s využitím modelu zdroje tepla pro kořenovou housenku pětivrstvého svaru definovaného na základě uvedených údajů.



Obr. 65. Natavená oblast predikovaná s využitím upraveného modelu zdroje tepla

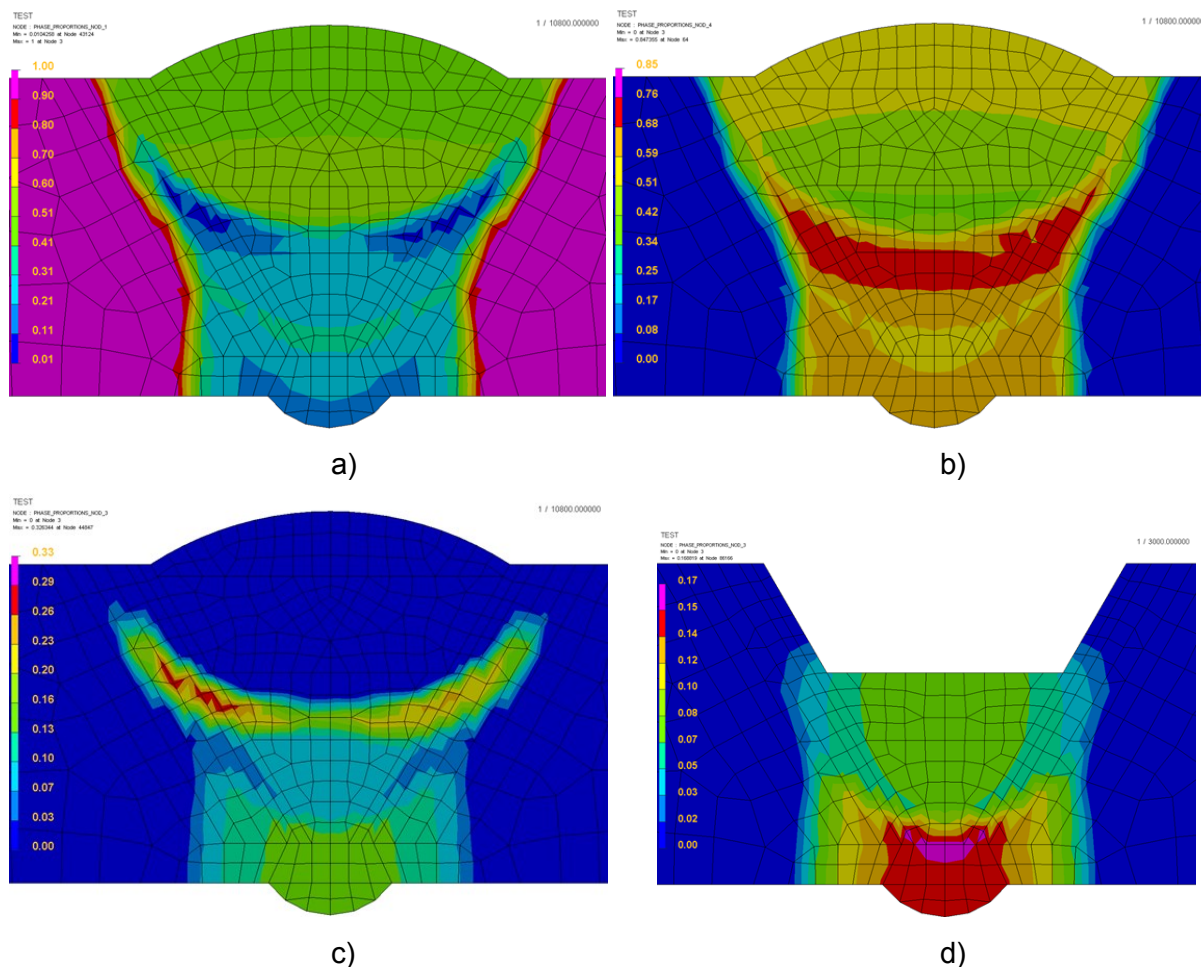
K ověření vhodnosti a aplikovatelnosti použitého modelu zdroje tepla existují dva základní způsoby. První z nich porovnává numericky spočítanou a metalograficky vyhodnocenou natavenou oblast a druhý způsob porovnává v definovaných místech průběhy teplot predikovaných numericky s průběhy změřenými pomocí termočlánků. K verifikaci je častěji

volen druhý způsob, protože přesněji vystihuje děje probíhající v TOO a umožňuje případnou úpravu modelu se zaměřením právě na tuto oblast. Na obrázku 66 jsou ukázány numericky spočítané průběhy teplot pro kořenovou housenku odpovídající místům kondenzátorově přivařených termočlánků definovaných v kapitole 8.1.3. Pro porovnání jsou v obrázku 66 uvedeny také reálně změřené průběhy teplot. V této fázi je pouze na posouzení příslušného pracovníka, zda jsou případné odchylky v predikovaných a reálně dosažených teplotních cyklech pro danou aplikaci akceptovatelné či ne. Pokud jsou odchylky neakceptovatelné a následná kontrola potvrdila správnost zadaných vstupních dat, je zpravidla přistoupeno k modifikaci použitých modelů zdroje tepla úpravou koeficientů k , l , m , v rovnicích (21) a (22). K tomu jsou používány optimalizační algoritmy upravující koeficientů k , l , m na základě vstupních geometrických požadavků. Popis takového algoritmu je například v literatuře [68].



Obr. 66. Numericky spočítané a experimentálně změřené průběhy teplot pro housenku č.1

Po definování dílčích modelů zdroje tepla následují simulace strukturních změn ve vzorku. Při strukturní analýze jsou zpravidla uvažovány následující metalurgické struktury – austenitická, perlitická, bainitická a martenzitická. Použitý výpočetní model vycházel z rovnic (15) až (18) uvedených v kapitole 3.1.2. Na obrázku 67 jsou ukázány výsledky výpočtů strukturní analýzy pro pětivrstvý svar provedený na materiálu P235GH. Na obrázku 67 a) je ukázáno procentuální zastoupení perlitické struktury a na obrázku 67 b) bainitické struktury po provedení a vychladnutí celého pětivrstvého svaru. Na obrázcích 67 c) a d) je ukázáno procentuální zastoupení martenzitu po páté, respektive po druhé svarové housence.



Obr. 67. Výsledky strukturní analýzy s procentuálním zastoupením a) perlitu;
b) bainitu; c) martenzitu po pěti a d) martenzitu po dvou svarových housenkách

Ověření přesnosti strukturních výpočtů je poměrně složité. Při tomto typu výpočtů je v uzlových bodech (nodech) použitého prostorového modelu definováno pro každý výpočetní čas procentuální zastoupení jednotlivých fází. Při strukturním metalografickém vyhodnocení však není možné vyhodnotit příslušnou fázi v jednom konkrétním bodě, ale je třeba použít plochu definované velikosti. To je ovšem v TOO vzorků vzhledem k poměrně strmým teplotním gradientům téměř nemožné. Proto je mnohem výhodnější převzít simulovaný teplotní cyklus v hodnoceném místě a aplikovat jej pomocí teplotně-napěťového simulátoru na vzorek definované velikosti. Pomocí takového postupu je již možné bezproblémově provést strukturní ověření libovolného místa v TOO. Ve většině případů se ale k ověření struktury v TOO svarů nepřístupuje a vhodnost a přesnost použitých modelů se verifikuje pouze pomocí porovnání experimentálně stanovené a simulací spočítané tvrdosti.

Také v případě simulace pětivrstvého svaru na materiálu P235GH došlo k verifikaci výsledků pomocí porovnání změřené a spočítané tvrdosti. V tabulce 56 je provedeno porovnání vypočtené a změřené tvrdosti v oblasti svaru a v TOO pro střední intervaly

tvrdostí. Z tabulky jsou zřejmé, rozdíly mezi spočítanými a změřenými tvrdostmi pro všechny svarové housenky. Simulačně spočítané hodnoty jsou vyšší, než reálně změřené hodnoty.

Tab. 56. Porovnání vypočtené a změřené tvrdosti pro střední intervaly tvrdosti HV

Housenka	kořenová	1 výplňová	2 výplňová	3 výplňová	krycí
Simulace [HV]	261 – 273	262 – 270	289 – 306	304 – 312	241 – 269
Měření [HV]	235 – 255	223 – 252	233 – 258	227 – 254	206 – 233

Protože jsou hodnoty tvrdosti závislé především na typu strukturních fází a protože numericky predikovaná teplotní pole vykazovala velice dobrou shodu s provedenými experimenty, je pravděpodobné, že vzniklé odchylky jsou způsobeny buď nevhodně zvoleným modelem výpočtu tvrdosti (rovnice (11) až (14) kap. 3.1.2.), nebo že ARA diagram použitý z materiálové databáze zcela nevystihuje specifika reálného svařovacího procesu. Použité rovnice (11) až (14) však velice dobře predikují hodnoty tvrdosti při simulačních výpočtech svařování konstrukčních ocelí s obdobným chemickým složením jako má ocel P235GH. Proto byla pozornost zaměřena na ARA diagram použitý z materiálové databáze.

Klasické ARA diagramy nemusí být vždy vhodnou alternativou ke stanovení strukturních změn a hodnot tvrdosti, protože v nich použité ochlazovací křivky mají zpravidla konstantní rychlost ochlazování v celém intervalu teplot. U klasických svařovacích cyklů se však rychlost ochlazování mění. Proto jsou pro numerické simulace svařování mnohem výhodnější tzv. „In situ“ ARA diagramy, kdy jsou pro dilatometrická měření použity konkrétní teplotní cykly zjištěné buď experimentálním měřením, nebo odvozené na základě numerických simulací v definovaném místě vzorku. Proto byla pro čtyři teplotní cykly získané z TOO provedena dilatometrická měření, se stanovením nových hodnot transformačních teplot a měřením tvrdosti po těchto cyklech. Získané výsledky byly použity jako nové vstupní údaje při definování ARA diagramu v materiálové databázi. Po provedení nové simulace s takto změněnými vstupními daty již odpovídaly predikované hodnoty tvrdosti mnohem více změřeným údajům, jak je zřejmé z tabulky 57. Způsob tvorby „In-situ“ ARA diagramů je popsán například v literatuře [130].

Tab. 57. Porovnání vypočtené a změřené tvrdosti po použití „In-situ“ ARA diagramu

Housenka	Kořenová	1 výplňová	2 výplňová	3 výplňová	krycí
Simulace [HV]	249 – 258	241 – 257	255 – 267	259 – 271	219 – 247
Měření [HV]	235 – 255	223 – 252	233 – 258	227 – 254	206 – 233

Jak již bylo uvedeno dříve, napětovo-deformační analýza navazuje na teplotně-metalurgickou analýzu a nelze ji provést bez předchozího teplotního zatížení vzorku. Z uvedeného je zřejmé, že kromě optimalizace výpočetních modelů používaných při

teplotně-napěťové analýze bude celková přesnost této analýzy záviset zejména na přesnosti výpočtu teplotních polí a na přesnosti stanovení fázových přeměn.

Přesnost výpočtu zbytkových napětí je závislá na mnoha proměnných. Kromě základně využívaných materiálových dat jako jsou teplotní závislosti Youngova modulu pružnosti E , meze kluzu R_e , meze pevnosti R_m , hodnot deformačního zpevnění H a Poissonovy konstanty μ , je velmi důležitý vhodný výběr správného typu výpočetního modelu. Tyto modely jsou založeny na různých způsobech definování prvotní a následných podmínek plasticity. Popisují vznik plastického stavu za různých podmínek následujících po překročení příslušné meze kluzu a následném odlehčení. Pro popis následných podmínek plasticity jsou užívány tyto čtyři základní modely:

- Model pro ideálně pružně plastický materiál bez zpevnění.
- Model s izotropním zpevněním.
- Model s kinematickým zpevněním.
- Model s izotropně kinematickým zpevněním.

U ideálně pružně plastického materiálu bez zpevnění není uvažováno zpevnění, a tudíž jsou následné podmínky plasticity totožné s podmínkou prvotní. Model je tedy používán pro simulace, u kterých nebude při zatěžování překročena mez kluzu při dané teplotě.

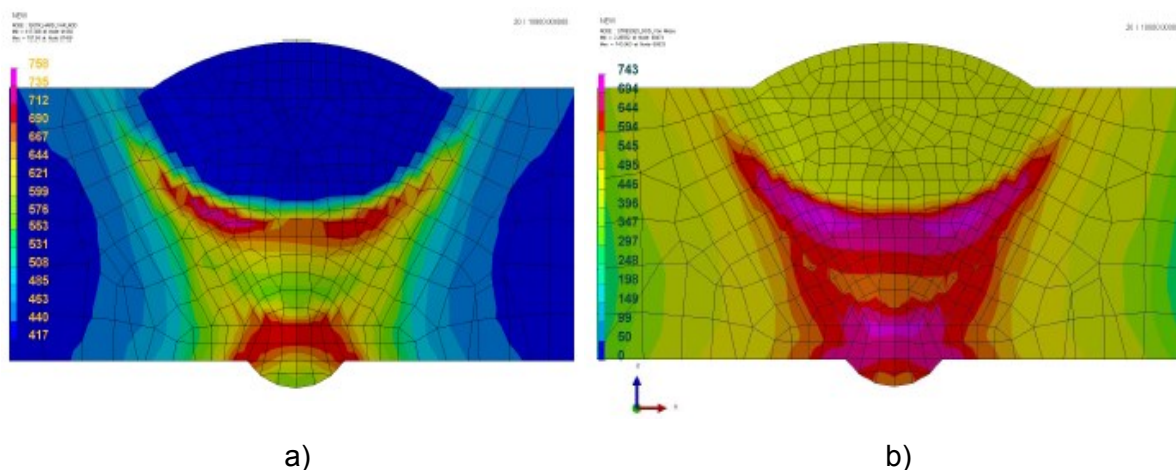
Model pro izotropní zpevnění materiálu uvažuje takové podmínky, při kterých plastická deformace zůstává při zatěžování izotropní a vykazuje deformační zpevňování. To se projeví rovnoměrným zvětšováním mezní plochy plasticity až do případného porušení. Model izotropního zpevnění lze použít v případech, kdy po odlehčení nastává zatížení ve směru shodném se směrem původním.

Model s kinematickým zpevněním umožňuje zahrnutí Baushingerova efektu. Je založen na předpokladu, že tvar mezní plochy zůstává zachován, ale plocha plasticity se posouvá. Tento materiál je vhodný pro simulace tavného svařování bez dalšího zatížení, protože zde dochází v průběhu teplotního cyklu k přeměně tlakových napětí na tahové s vysokou pravděpodobností překročení meze kluzu při dané teplotě v tahu i tlaku.

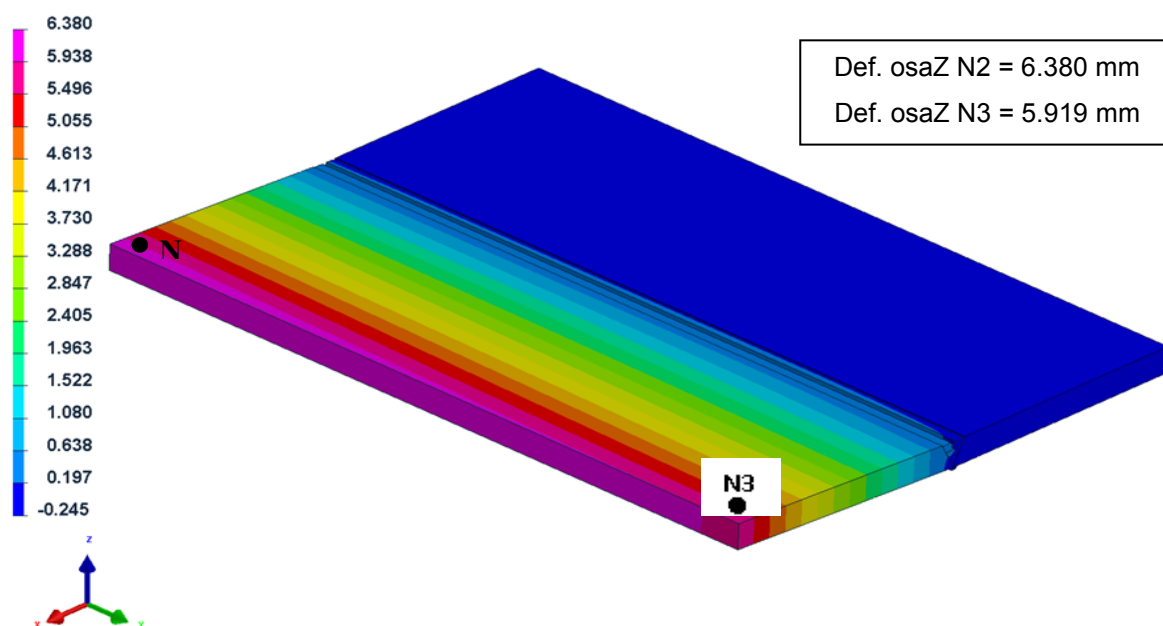
Model využívající izotropně-kinematické zpevnění je pak kombinací obou uvedených zpevnění. Více o popsání modelek a definování následných podmínek plasticity je uvedeno například v literatuře [79,150].

Z důvodů vysvětlených v kapitole 8.1.6. je pro verifikaci výsledků dosažených při napěťovo-deformační analýze výhodnější používat velikost deformací. Výpočet celkových i dílčích deformací je totiž realizován na základě výpočtu následných podmínek plasticity (plastických deformací). Kromě již definovaných materiálových dat a použitého výpočetního modelu vychází výpočet deformací také z okrajových podmínek definujících místa a tuhosti upnutí deformovaného vzorku.

Pro simulovaný pětivrstvý svar byl použit model s kinematickým zpevněním. Na obrázku 68 a) je pro představu ukázáno rozložení numericky spočítaných hodnot meze kluzu po fázových transformacích a po dokončení celého svařování. Na obrázku 68 b) jsou pak ukázány hodnoty vypočítaného redukovaného zbytkového napětí podle teorie HMM. Grafické zobrazení demonstrované na obrázku 68 může dát představu o rozložení napjatostí ve svarku pro zvolený výpočtový čas, případně o změně rozložení napětí v čase. Pokud je však třeba provést podrobnou analýzu napjatostí ve vzorku, je třeba znát nejen konkrétní velikost napjatosti v daném místě vzorku, ale také teplotu v tomto místě, protože pevnostní vlastnosti materiálu jsou závislé na teplotě. V takových případech jsou prováděny komplexní analýzy napjatosti ve všech uzlových bodech a pro všechny výpočtové časy. Při těchto analýzách již grafické zobrazení nedostačuje a pracuje se pouze s kompletními datovými soubory.



Obr. 68. Predikovaná hodnota a) meze kluzu; b) zbytkového napětí podle teorie HMM



Obr. 69. Spočítaná velikost úhlových deformací po třetí housence

Obrázek 69 pak ukazuje spočítané hodnoty úhlových deformací po třetí housence, včetně údajů o velikosti deformací v místech dotyku LVDT čidel. V tabulce 58 jsou pak uvedeny hodnoty numericky spočítaných a změřených deformací v místech dotyku LVDT čidel.

Takto vytvořený a upravený výpočetní model je již možné použít pro simulace svařování rozměrných, nebo tvarově složitých konstrukčních celků a k hledání vhodných svařovacích postupů, ať již s ohledem na zbytková napětí a velikost plastických deformací, nebo s ohledem na eliminaci celkových deformací.

Tab. 58. Hodnoty spočítaných a změřených deformací v místech dotyku LVDT čidel

LVDT čidlo	Simulace [mm]			Měření [mm]		
	N2	N3	N1	N2	N3	N1
Housenka 1	1,24	1,37	0,31	1,19	1,23	0,29
Housenka 2	3,89	4,21	0,40	3,66	3,91	0,38
Housenka 3	6,38	5,92	0,49	6,02	5,85	0,48
Housenka 4	8,97	8,61	0,53	8,38	8,23	0,55
Housenka 5	11,93	11,34	0,59	11,35	11,10	0,63

8.2. Definování a verifikace výpočetního modelu při svařování s předehřevem

Svařování s předehřevem se používá zejména u martenzitických a bainitických ocelí, nebo u materiálů náchylných ke vzniku trhlin především z důvodu nízkých hodnot plastických vlastností a vysokých hodnot vnitřních napětí v průběhu svařování a chladnutí. Předehřev zde má zásadní vliv na vznikající teplotní pole a rychlosti ochlazování. Spolurozhoduje tedy o výsledných strukturách ve svaru a TOO a jeho výše významně ovlivňuje hodnoty tvrdosti jednotlivých struktur v závislosti na vícenásobných teplotních cyklech.

Při plánování experimentů pro svařování s předehřevem je třeba vycházet z rozdílné koncepce oproti právě popsaným postupům použitým při svařování bez předehřevu. Také zde je primárním úkolem dodržení konstantních okrajových podmínek po celou dobu experimentu, avšak nejdůležitějším parametrem z hlediska definování výpočetního modelu je právě zajištění konstantní teploty předehřevu.

Uvedené experimentální postupy jsou zpravidla aplikovány na středně a vysokolegované materiály, u kterých prozatím nebyly uspokojivě vyřešeny výpočetní modely využitelné zejména pro predikci tvrdosti ve svaru a TOO. V následujících kapitolách proto budou popsány metodické postupy definující celý postup od návrhu tvaru experimentálního vzorku až po způsoby definování okrajových a technologických podmínek tak, aby bylo možné získat dostatečné množství relevantních vstupních a verifikačních dat. Popis bude kompletně proveden pro nízkolegovanou bainitickou ocel 10GN2MFA a vysokolegovanou martenzitickou ocel X22CrMoV12-1.

8.2.1. Příprava experimentu, tvar vzorku, definování okrajových podmínek

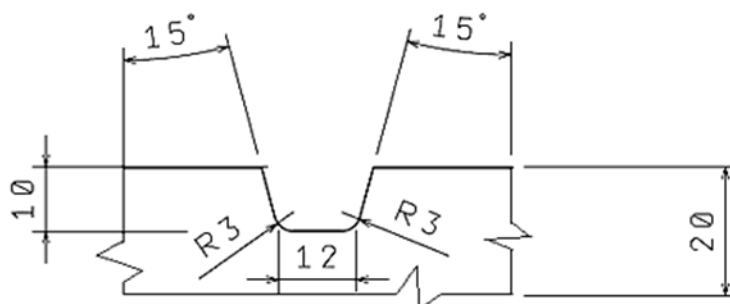
Přestože je nezbytné navrhovat experimenty svařování s předehřevem v odlišném duchu než experimenty sloužící k definování výpočetního modelu bez předehřevu, jedno mají oba způsoby společné. Je vhodné je koncipovat jako vícevrstvé svary, protože každá následující vrstva násobí případnou nepřesnost při simulaci vrstvy předchozí a po dvou, případně třech svarových housenkách je již zřejmé, zda je použitý výpočetní model vhodný či ne.

U svařování s předehřevem se tyto nepřesnosti projevují ještě mnohem více, protože předehřev velice intenzivně ovlivňuje výsledné teplotní cykly a díky tomu také fázové transformace a výslednou tvrdost. Kromě toho by mělo být možné z výsledků experimentů zjistit veškeré údaje o vlivu svařovacích cyklů na základní materiál, TOO a svarový kov. Tím je myšlen především časový průběh změn strukturních fází a tvrdostí způsobený teplotními cykly od následných svarových vrstev. Tyto následné teplotní cykly mohou způsobit rozpad metalurgických fází, nebo změnu mechanických vlastností u stávajících metalurgických fází, případně vznik zcela nových fází ve sledovaném místě vzorku. Kromě toho je zde (z důvodu zjednodušení popisu okrajových podmínek) požadavek na zachování konstantních hodnot předehřevu v celém objemu vzorku, ovlivněný pouze teplotními cykly a to po celou dobu trvání experimentu. Z těchto požadavků poté vychází návrh tvaru experimentálního vzorku.

Při návrhu geometrie tvaru vzorku je třeba brát v úvahu několik základních faktorů, mezi které patří například:

- Možnost provedení dostatečného počtu svarových housenek z důvodu vzájemného ovlivnění vznikajícími teplotními poli.
- Dostatečný prostor pro zkoumání vlivu jednotlivých svařovacích cyklů na změny vznikající v TOO a to ve všech směrech odvodu tepla.
- Eliminace ostrých hran ve svarové drážce, působících jako potenciální vruby.
- Možnost měření teplotních polí v různých místech svaru, včetně neustálé kontroly teploty předehřevu.
- Dostatečná délka vzorku pro získání ustálených teplotních polí, umožňující stanovit pro jednotlivé housenky geometrické údaje, průběh teplotních cyklů a strukturní změny.

Zkušební vzorek byl navržen jako deska tloušťky 20 mm s vyfrézovanou drážkou pro experimentální svařování. To umožní sledovat vliv teplotních polí od jednotlivých housenek na materiál ve všech třech směrech odvodu tepla. Na obrázku 70 je schematicky znázorněn použitý tvar drážky pro výplňový svar. Tvar a základní rozměry drážky pro výplňový svar byly odzkoušeny pro navrženou technologii 111 dle ČSN EN ISO 4063 tak, aby mohlo být realizováno osm svarových housenek ve čtyřech vrstvách.

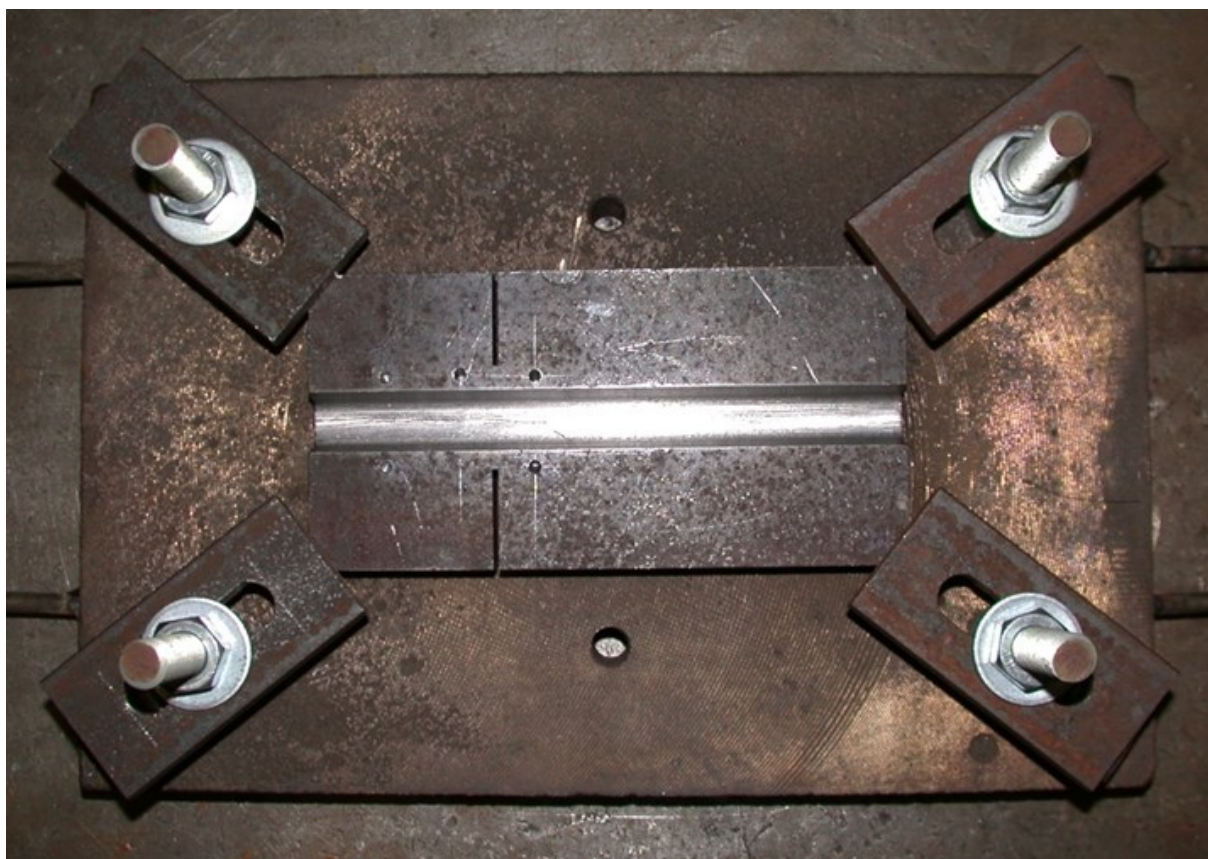


Obr. 70. Schematicky znázorněný tvar drážky pro experimenty svařování s předehřevem

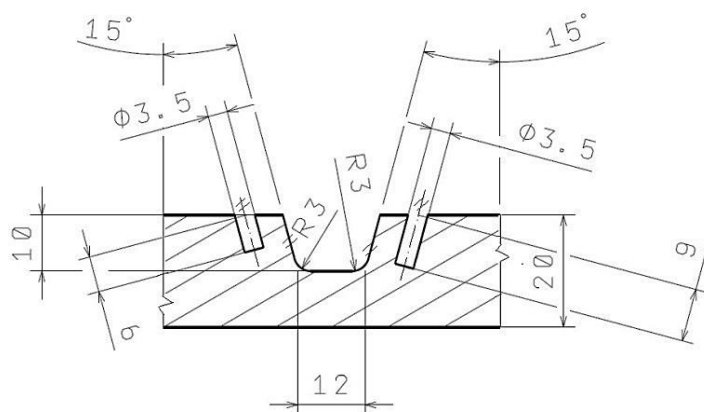
Pro zachování konstantních okrajových podmínek teploty předehřevu po celou dobu experimentu je nezbytné zajištění konstantního přenosu tepla celou spodní plochou vzorku a to po celou dobu svařování. Časová náročnost takto koncipovaného experimentu svařování je přitom z důvodu většího počtu housenek a požadavku na dodržení interpass teploty poměrně vysoká a zpravidla překračuje sto minut. Konstantnosti přenosu tepla celou spodní plochou vzorku lze dosáhnout buď použitím speciálně vytvořených předehřívacích desek, topných elektrických deček, nebo přípravků s dostatečně naakumulovaným množstvím tepla. Takto vytvořený přípravek má ještě další výhody, mezi které patří například jednoznačné definování míst a tuhosti připevnění vzorku, konstantnost teplotních polí přípravku i vzorku při předehřevu, dostatečná tuhost přípravku, nebo možnost jednoduché izolace celého systému.

Proto byl navržen a vyroben jednoduchý svařovací přípravek, jehož nosná část je tvořena 50 mm tlustou litinovou deskou. Tato deska velice dobře akumuluje teplo a je schopna předávat teplo experimentálnímu kusu po celou dobu svařování. Jak je ukázáno na obrázku 71, svařovací přípravek je osazen šrouby a upínkami pro upnutí experimentálního vzorku. Tento způsob upnutí sice zajistí konstantnost podmínek při přestupu tepla z přípravku do vzorku v celé ploše, eliminuje však možnost měření deformací. Ty jsou pak kompenzovány vznikem plastických deformací ve svařovaném vzorku.

Zkušební vzorek (obr. 71) je dále opatřen otvory pro umístění termočlánků ke sledování teplotních polí během předehřevu a během vlastního svařování. Otvory byly vyvrtány do různých hloubek vzorku, rovnoběžně s boky drážky pro výplňový svar, tak jak je ukázáno na obrázku 72. Bylo použito celkem šest kondenzátorově přivařených termočlánků typu K, přičemž zvolené hloubky byly navrženy tak, aby došlo k záznamu teplotních cyklů od všech svařovaných housenek. Pro umístění termočlánků platí stejné podmínky a důvody, tak jak byly uvedeny v kapitole 8.1.6. Větší počet termočlánků nebyl použit z důvodu omezeného manipulačního prostoru v okolí drážky.



Obr. 71. Svařovací přípravek s upnutým zkušebním vzorkem



Obr. 72. Schematické znázornění umístění otvorů pro termočlánky ve zkušebním vzorku

Termočlánek T1:	x = 100 mm	y = 3,5 mm	z = 9 mm	umístěno: shora
Termočlánek T2:	x = 120 mm	y = 3,3 mm	z = 6 mm	umístěno: shora
Termočlánek T3:	x = 140mm	y = 3,6 mm	z = 3 mm	umístěno: shora
Termočlánek T4:	x = 100 mm	y = 4,4 mm	z = 9 mm	umístěno: shora
Termočlánek T5:	x = 140 mm	y = 4,3 mm	z = 3 mm	umístěno: shora
Termočlánek T6:	x = 96 mm	y = 16,2 mm	z = 0 mm	umístěno: shora

Termočlánky byly upevněny na speciálně vytvořené konstrukci (obr. 73) tak, aby nedošlo k jejich okamžitému odtržení při kontaktu s rukou svářeče, nebo s hořákem či obalenou

elektrodou. Znalost umístění jednotlivých termočlánků je nezbytná z důvodu následné verifikace teplotních polí při optimalizaci výpočetního modelu. Osa x definuje vzdálenost termočlánku od počátku vzorku ve směru svařování, osa y definuje vzdálenost termočlánku od boku drážky a osa z definuje hloubku připevnění termočlánku od povrchu vzorku.

Svařovací přípravek včetně upnutého experimentálního kusu osazeného termočlánky (obr. 73) byl částečně zaizolován vatou Sibal (sloužící k eliminaci přestupu tepla do okolí radiací) a vložen do pece. Zde byla celá sestava ohřívána na příslušnou teplotu předehřevu s rychlostí ohřevu $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Tento způsob přípravy experimentu byl identický pro oba experimentálně svařované materiály (10GN2MFA a X22CrMoV12-1).



Obr. 73. Svařovací přípravek včetně upnutého experimentálního kusu při předehřevu v peci

8.2.2. Realizace experimentu svařování materiálu 10GN2MFA s předehřevem

Při experimentálním svařování materiálu 10GN2MFA byl požadavek na teplotu předehřevu základního materiálu v rozmezí $200\text{ až }220^{\circ}\text{C}$ a na dodržení interpass teploty 350°C . Předehřev byl realizován v elektrické odporové peci s programovanou rychlostí ohřevu $1,5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ a výdrží na teplotě po dobu 150 minut. Přestože se jednalo o velice pomalý ohřev, byla teplota vzorku (po dosažení teploty pece 220°C) pouze 126°C . Trvalo dalších

132 minut výdrže na této teplotě, než bylo dosaženo požadované teploty předehřevu v celém průřezu materiálu. Po 150 minutách výdrže na teplotě 220°C byl předehřátý a částečně zaizolovaný přípravek s upnutým vzorkem z pece vyjmut, položen do Sibalové vaty s následnou izolací celé horní části přípravku a vzorku (mimo drážky pro svařování), tak jak je ukázáno na obrázku 74. Po celou dobu ohřevu v peci, manipulace s přípravkem a izolace celé sestavy byla teplota snímána všemi termočlánky a v žádném místě vzorku neklesla pod teplotu 200°C. Na takto připraveném vzorku již mohlo být realizováno vlastní svařování.



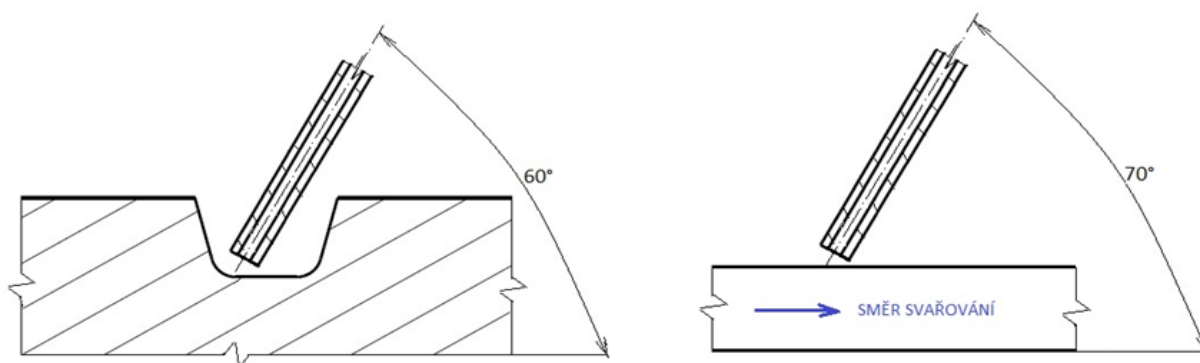
Obr. 74. Zaizolovaný svařovací přípravek se vzorkem při svařování

Pro materiál 10GN2MFA a metodu svařování 111 dle ČSN EN ISO 4063 je jako optimální přídavný materiál doporučena elektroda Phoenix SH Ni 2 K 100. Tato elektroda však není standardně dodávána do ČR a při jejím dodání je třeba objednat a odebrat celou paletu. Z tohoto důvodu byly pro experiment použity elektrody FOX EV 85 o průměru 2,5 mm a délce 350 mm, s obdobným chemickým složením. Tyto elektrody jsou v ČR běžně dostupné. Pro porovnání je v tabulce 59 uvedeno chemické složení obou typů elektrod.

Tab. 59. Porovnání chemického složení elektrod Phoenix SH Ni 2 K 100 a FOX EV 85

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo
Phoenix SH Ni 2 K 100	0,06	1,6	0,2	-	-	1,85	0,38	0,4
FOX EV 85	0,05	1,7	0,4	-	-	2,1	0,4	0,5

Při definování a modifikaci modelu zdroje tepla je nutné definovat také geometrickou polohu zdroje (hořáku, elektrody) vůči místu svařování. Při svařování svírala elektroda se spodkem drážky úhel cca. 60° ve směru kolmém na směr svařování a ve směru svařování couvala před svarovou lázní pod úhlem cca. 70° , jak je zřejmé ze schematického obrázku 75.



Obr. 75. Schematické definování polohy elektrody vůči místu svařování

Při definování a modifikaci modelu zdroje tepla je nutné definovat také geometrickou polohu zdroje (hořáku, elektrody) vůči místu svařování. Při svařování svírala elektroda se spodkem drážky úhel cca. 60° ve směru kolmém na směr svařování a ve směru svařování couvala před svarovou lázní pod úhlem cca. 70° , jak je zřejmé ze schematického obrázku 75.

Experiment byl plánován pro svařování 8 housenek ve čtyřech vrstvách, s tím že každá vrstva bude vůči předchozí posunuta o určitou vzdálenost tak, aby bylo možné vyhodnotit kompletní geometrii každé housenky. Protože byla celková délka zkušebního vzorku pouze 180 mm, měly housenky svařené ve stejné vrstvě vedle sebe vždy stejnou délku. V tabulce 60 jsou uvedeny navržené délky jednotlivých housenek, nastavované hodnoty svařovacího proudu a předpokládané rychlosti svařování. Na obrázku 76 je pak schematicky naznačen postup kladení jednotlivých svarových housenek.

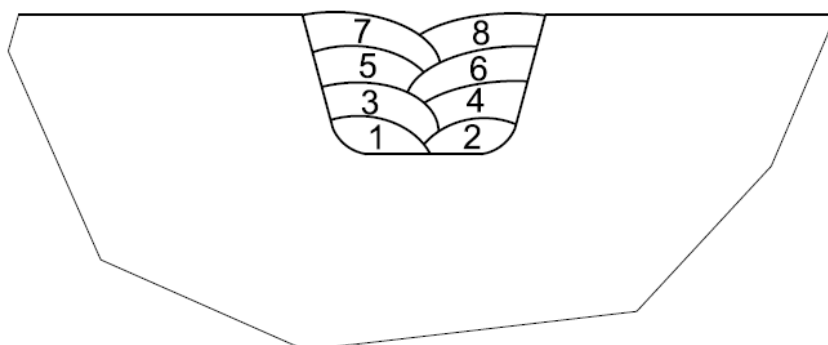
Tab. 60. Geometrická nastavení polohy hořáku a nastavované procesní parametry

	Hous. 1	Hous. 2	Hous. 3	Hous. 4	Hous. 5	Hous. 6	Hous. 7	Hous. 8
Délka hous. [mm]	180	180	155	155	130	130	105	105
Svař. proud [A]	90	90	90	90	90	90	90	90
v_s [m.min⁻¹]	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10

Poznánka: v_s – předpokládaná dosažená rychlost svařování [m.min⁻¹]

K vlastnímu svařování byl použit svařovací invertor LORCH X 350 ControlPro a procesní parametry byly snímány aparaturou WeldMonitor. Skutečné procesní parametry byly následně použity k definování výkonu a rychlosti pohybu modelu zdroje tepla, způsobem

popsaným v kapitole 8.1.5. V tabulce 61 jsou uvedeny monitorované svařovací parametry a skutečné délky housenek včetně jejich vzdálenosti od počátku svaru.



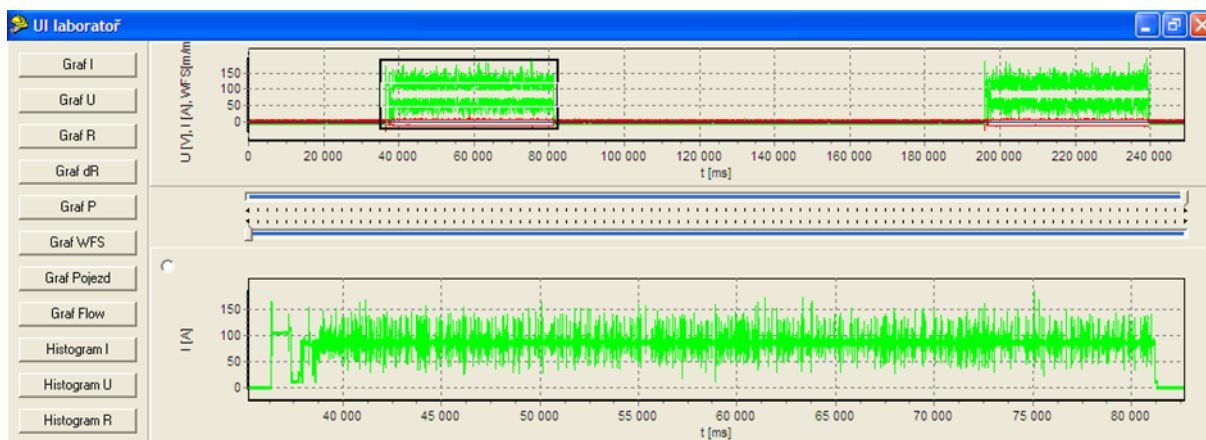
Obr. 76. Postup kladení jednotlivých svařových housenek do vyfrézované drážky vzorku

Tab. 61. 10GN2MFA - Změřené procesní parametry a délky u jednotlivých housenkách

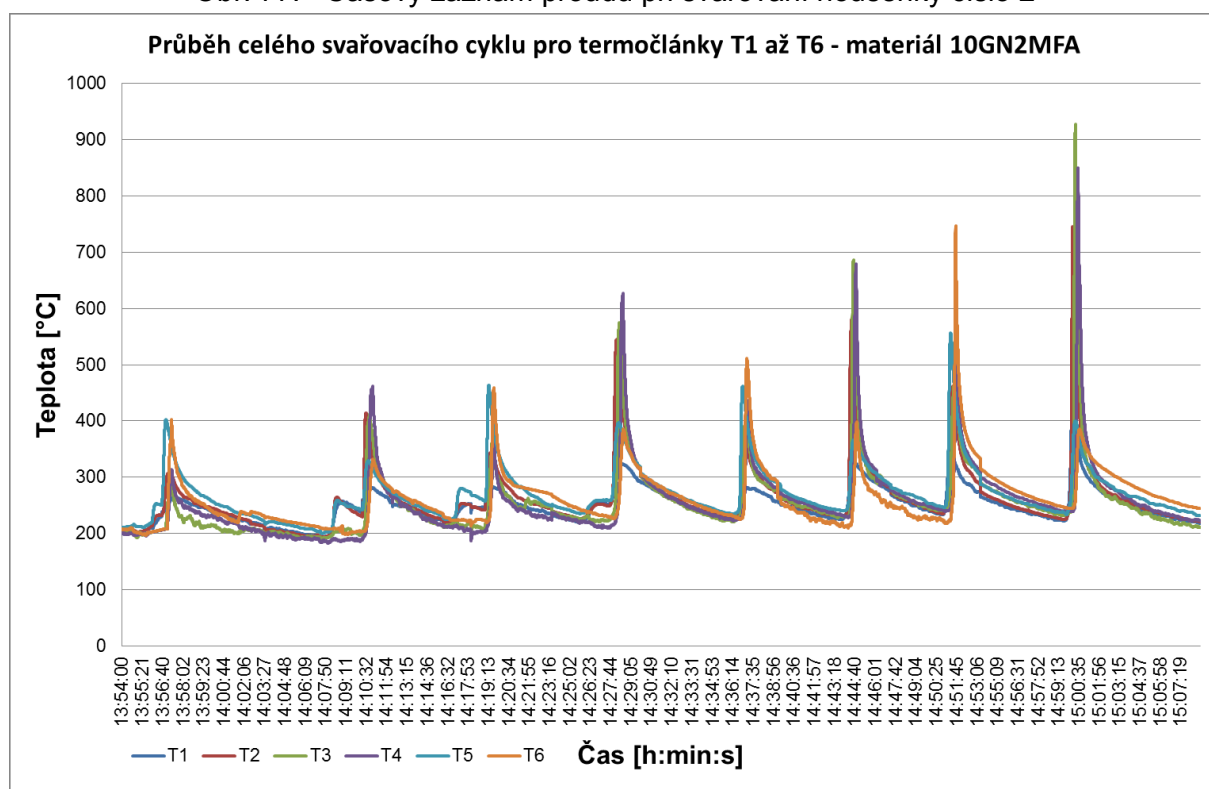
	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Prům. rychl. Svař. [m.min ⁻¹]	Čas svařování [s]	Čas prodlevy [s]	Celkový čas svař. hous. [s]	Vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	Vzdálenost od zač. svaru [mm]	Skutečná délka hous. [mm]
Hous. 1 – část 1	87,3	24,7	0,138	41,3	107,0	627,3	9,375	0	98
Hous. 1 – část 2	87,2	24,6	0,141	35,0	444,0		9,128	98	82
Hous. 2 – část 1	86,7	24,8	0,123	43,1	114,0	571,8	10,489	0	92
Hous. 2 – část 2	86,7	24,7	0,124	42,7	372,0		10,362	92	88
Hous. 3 – část 1	87,5	24,6	0,110	41,0	117,0	585,9	11,741	27	75
Hous. 3 – část 2	87,1	25,0	0,109	42,9	385,0		11,986	102	78
Hous. 4 – část 1	86,8	24,5	0,109	42,4	102,0	653,7	11,706	26	77
Hous. 4 – část 2	86,8	25,0	0,109	42,3	467,0		11,945	103	77
Hous. 5 – celá	87,1	25,1	0,126	60,3	422,0	482,3	10,452	53	127
Hous. 6 – celá	86,9	25,2	0,112	67,3	394,0	461,3	11,732	54	126
Hous. 7 – celá	86,8	24,6	0,111	55,9	431,0	486,9	11,435	77	103
Hous. 8 – celá	86,8	25,7	0,109	55,6	447,0	502,6	12,279	79	101

Protože nebylo možné svařit jednotlivé housenky v celé jejich délce pouze jednou elektrodou, musely být při přerušení svařování měřeny i časové prodlevy mezi jednotlivými částmi housenky způsobené odstraňováním strusky a čekáním na dosažení interpass teploty. Systém WeldMonitor zaznamenává kompletní časový průběh procesních parametrů včetně úseků, kdy nedochází ke svařování (obr. 77). Díky tomu bylo možné (při změřeni délky jednotlivých úseků svařové housenky) definovat průměrné rychlosti svařování na jednotlivých úsecích. Tyto záznamy bylo možné následně použít při definování a optimalizaci

výpočetních modelů tak, jak jich bylo použito při reálném svařování. V tabulce 61 jsou proto uvedeny také údaje o dílčích délkách a prodlevách v průběhu svařování jednotlivých housenek.



Obr. 77. Časový záznam proudu při svařování housenky číslo 2



Obr. 78. Teplotní průběhy celého svařovacího cyklu pro všech 6 termočlánků – 10GN2MFA

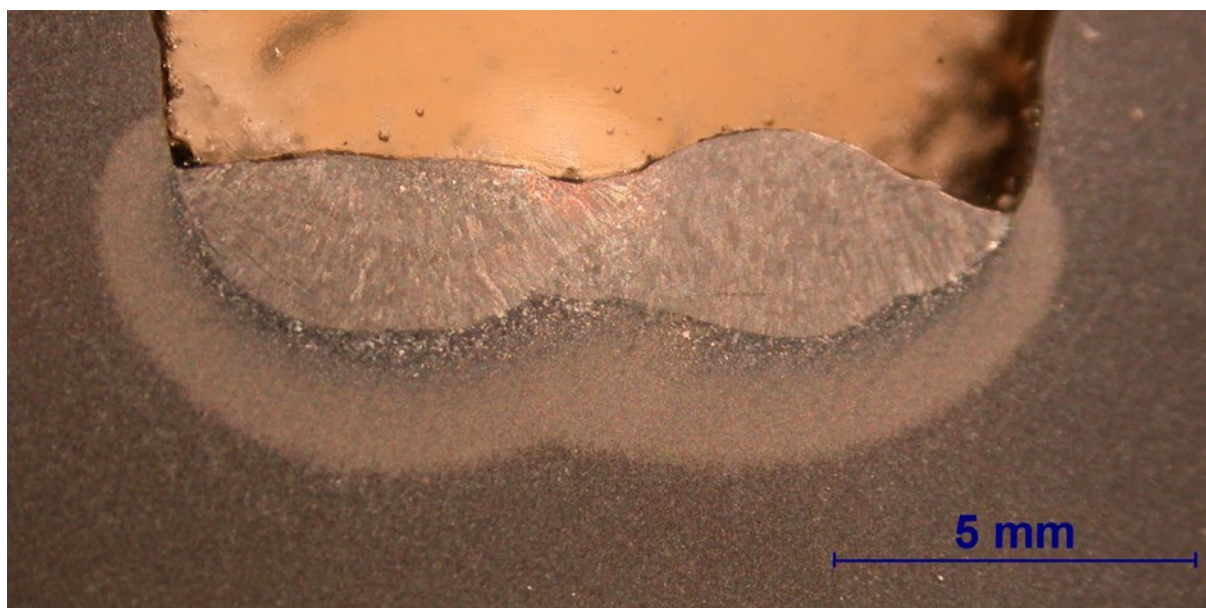
Údaje o výsledcích průběhů teploty v závislosti na čase jsou využity pro kontrolu vhodnosti vytvořeného simulačního modelu. Z důvodu následné verifikace je vhodné, aby alespoň na jednom z termočlánků byly při jednom teplotním cyklu naměřeny maximální hodnoty vyšší než 900°C. Při svařování obalenou elektrodou je mnohem obtížnější splnit uvedenou podmínku, protože teplo vnesené do svaru je zde mnohem menší a je problematické při takto navrženém experimentu umístit termočlánky dostatečně blízko hranice ztavení

aktuálně svařované housenky. Na obrázku 78 jsou ukázány získané teplotní průběhy pro jednotlivé termočlánky pro celý svařovací cyklus. Teplotní cykly jednotlivých housenek jsou uvedeny v příloze 4.6.

8.2.3. Geometrické vyhodnocení jednotlivých housenek na vzorku z 10GN2MFA

Geometrické vyhodnocení jednotlivých svarových housenek slouží k definování modelu zdroje tepla. Pro simulace svařování obalenou elektrodou je dosahováno největších přesností simulací s nemodifikovaným Goldakovým modelem zdroje tepla. Proto se také v tomto případě vychází z rovnic (21), (22), (23) a (48) a jsou zjišťovány stejné geometrické parametry a , b , c_1 , c_2 a celkový výkon zdroje Q , způsobem popsáním v kapitole 8.1.5.

Ke stanovení šířky a hloubky svarové lázně byly použity makrovýbrusy jednotlivých housek. Protože se jednalo o větší počet housenek, které byly vytvořeny na vzorku dlouhém 180 mm, nebylo možné vyhodnotit každou housenku zvlášť a geometricky byly vyhodnoceny vždy dvě housenky nacházející se ve stejné vrstvě, tak jak je zřejmé z makrovýbrusu housenek 1 a 2 na obrázku 79.

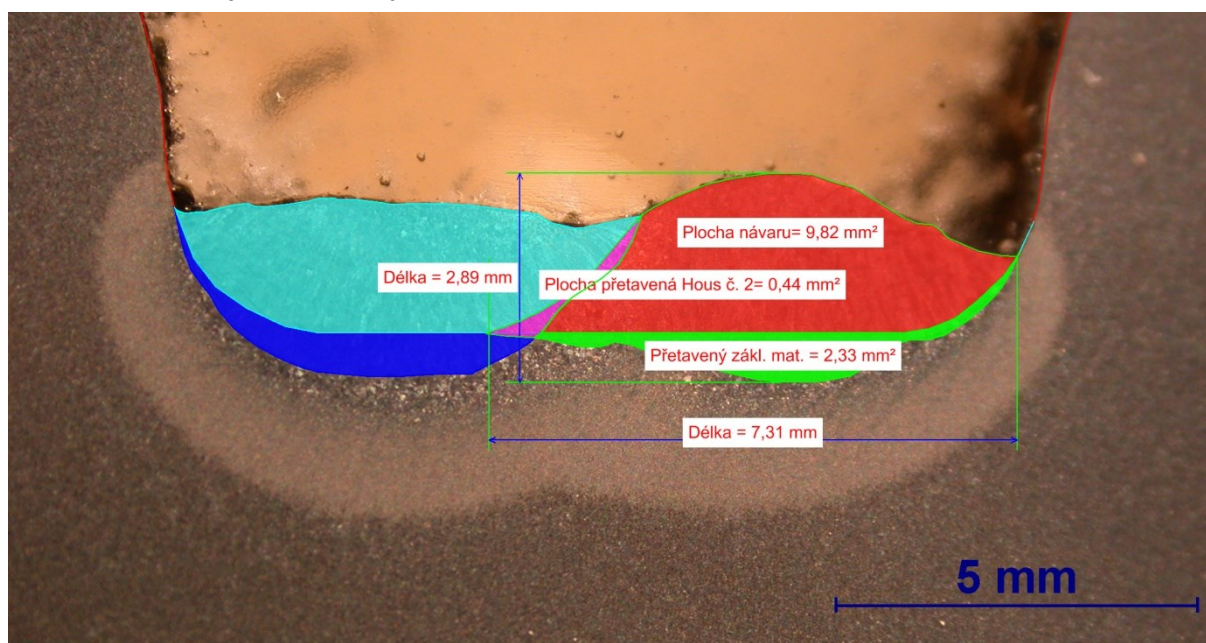


Obr. 79. Makrovýbrus housenky č. 1 (vpravo) a housenky č. 2 (vlevo)

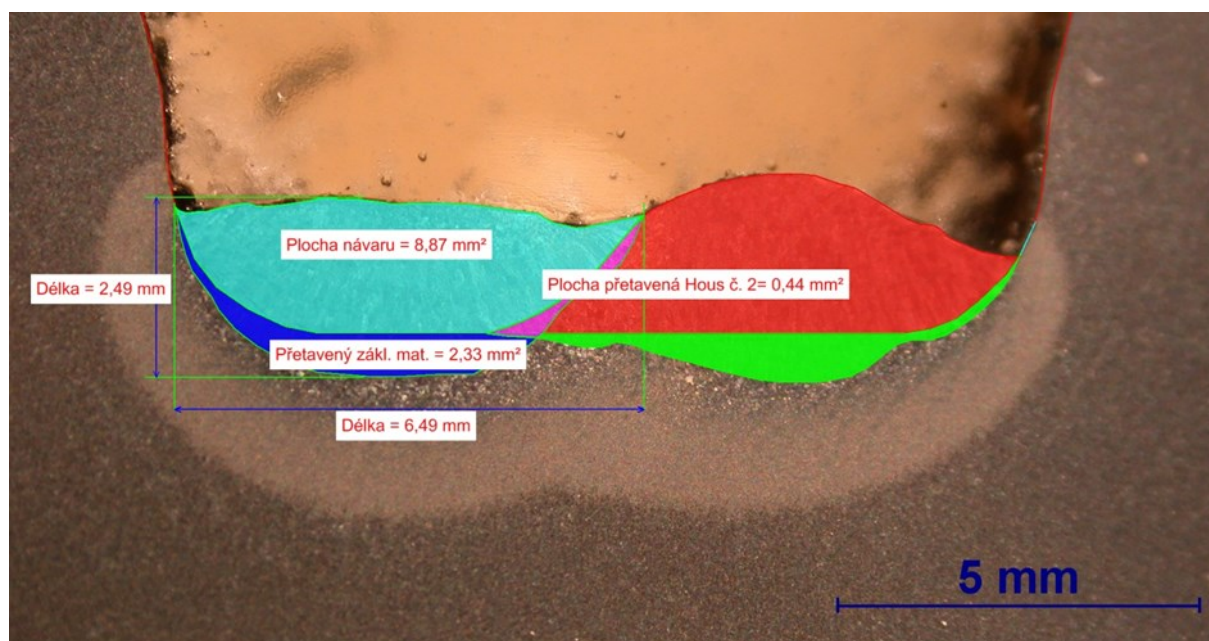
Pro svařování byly použity nízké svařovací proudy a pomalé rychlosti svařování, ustálených teplotních polí proto bylo dosaženo již po cca. 15 mm. Místa odběru vzorků pro geometrické vyhodnocení byla zvolena ve vzdálenosti 20 mm od začátku housenky. Díky tomu byl dodržen také požadavek na vzdálenost místa odběru 5 mm od následující vrstvy z důvodu možného teplotního ovlivnění. Takto získané makrovýbrusy byly následně použity jako verifikační vzorky pro ověření správné predikce tvrdosti. Na obrázku 80 je ukázáno geometrické vyhodnocení housenky číslo 1 a na obrázku 81 je geometrické vyhodnocení housenky číslo 2. Z obrázků je zřejmý způsob odečtení dílčích ploch definujících natavení

základního materiálu, plochu tvořenou přídavným materiálem, plochu natavenou v předchozí housence a způsob odečtení šířky a hloubky svarové lázně, tedy parametrů a , b .

Červeně zbarvená plocha na obrázcích 80 a 81 definuje část housenky č. 1 tvořenou přídavným materiálem, zeleně zbarvená plocha definuje část základního materiálu nataveného housenkou č. 1 a růžově zbarvená plocha definuje část housenky č. 1 přetavenou housenkou č. 2. Světle modře zbarvená plocha pak značí část housenky č. 2 tvořenou přídavným materiálem a tmavě modře zbarvená plocha definuje část základního materiálu nataveného housenkou č. 2. Obrázky s geometrickým vyhodnocením zbylých housenek 3 až 8 jsou uvedeny v příloze 4.7.



Obr. 80. Geometrické vyhodnocení housenky č. 1, materiál 10GN2MFA



Obr. 81. Geometrické vyhodnocení housenky č. 2, materiál 10GN2MFA

Velikost parametrů c_1 a c_2 je závislá na výkonu svařovacího zdroje a rychlosti svařování. Pro rychlosti svařování v rozmezí 0,1 až 0,2 m.min⁻¹ tvoří parametr c_1 přibližně 2/5 celkové délky svarové lázně. Způsob vyhodnocení je identický s postupem popsáným v kapitole 8.5.1.

V tabulce 62 jsou uvedeny zjištěné geometrické parametry natavených oblastí a, b, c_1 , c_2 použité k definování dvouelipsoidních modelů a také spočítané výkony zdroje Q pro účinnost přenosu tepla od zdroje $\eta=0,8$. V tabulce je dále uvedena poloha zdroje tepla charakterizovaná souřadnicí x definující vzdálenost od osy svaru a souřadnicí y definující vzdálenost ode dna drážky. Tyto údaje jsou nezbytné k definování dvouelipsoidního modelu a k definování trajektorií zdroje tepla.

Tab. 62. Zjištěné geometrické údaje a spočítané výkony zdroje použité pro Goldakův model

	Parametr a [mm]	Parametr b [mm]	Parametr c_1 [mm]	Parametr c_2 [mm]	Výkon zdroje Q [W]	Celk. plocha svaru [mm ²]	Vzdálenost x od osy svaru [mm]	Vzdálenost y ode dna drážky [mm]
Housenka č. 1	3,66	2,89	3,4	5,3	1725	12,59	2,4	2,4
Housenka č. 2	3,25	2,49	3,3	5,2	1720	11,64	2,8	2,1
Housenka č. 3	4,47	3,86	3,1	5,1	1722	20,75	2,1	4,8
Housenka č. 4	3,78	3,95	3,1	5,0	1701	21,10	2,3	4,8
Housenka č. 5	3,51	3,91	3,2	5,3	1749	17,38	3,8	7,8
Housenka č. 6	4,63	3,45	3,3	5,4	1752	21,70	1,7	8,6
Housenka č. 7	3,78	3,42	3,1	5,1	1708	20,02	3,4	9,2
Housenka č. 8	4,87	3,77	3,3	5,6	1785	23,63	2,1	9,8

8.2.4. Realizace experimentu svařování materiálu X22CrMoV12-1 s předeřevem

Při přípravě experimentu svařování materiálu X22CrMoV12-1 byla použita identická geometrie drážky jako v případě materiálu 10GN2MFA, pouze délka byla z důvodu menšího polotovaru kratší a to 160 mm. Jednotlivé termočlánky tak byly umístěny v následujících vzdálenostech od počátku vzorku ve směru svařování (osa x), od boku drážky (osa y) a od povrchu vzorku (osa z), stejně jak bylo popsáno v kapitole 8.2.1.

Termočlánek T1:	x = 100 mm	y = 3,6 mm	z = 9 mm	umístěno: shora
Termočlánek T2:	x = 120 mm	y = 3,4 mm	z = 6 mm	umístěno: shora
Termočlánek T3:	x = 140mm	y = 3,4 mm	z = 3 mm	umístěno: shora
Termočlánek T4:	x = 79,2 mm	y = 27,8 mm	z = 0 mm	umístěno: shora
Termočlánek T5:	x = 100 mm	y = 4,5 mm	z = 9 mm	umístěno: shora
Termočlánek T6:	x = 140 mm	y = 4,4 mm	z = 3 mm	umístěno: shora

Pro svařování byl použit stejný přípravek, způsob předehřevu a způsob izolace celé zkušební sestavy. U materiálu X22CrMoV12-1 byl požadavek na teplotu předehřevu základního materiálu v rozmezí 250 až 275°C a na dodržení interpass teploty 300°C. Přípravek se vzorkem byly v elektrické odporové peci předehřáty na teplotu 276°C rychlostí ohřevu 1 °C.min⁻¹, s následnou výdrží na teplotě po dobu 210 minut. Přestože se jednalo o velice pomalý ohřev, byl reálný ohřev vzorku zpožděn za plánovaným programovaným teplotním cyklem. Celková doba vzorku v peci byla 470 minut. Po 210 minutách výdrže na programované teplotě 280°C byl předehřátý a částečně zaizolovaný přípravek s upnutým vzorkem z pece vyjmut, položen do Sibalové vaty s následnou izolací celé horní části přípravku a vzorku stejně jako je ukázáno na obrázku 74. Po celou dobu ohřevu v peci, manipulace s přípravkem a izolace celé sestavy byla teplota snímána všemi termočládky a v žádném místě vzorku neklesla pod požadovanou teplotu 250°C.

Pro materiál X22CrMoV12-1 a metodu svařování 111 dle ČSN EN ISO 4063 je jako optimální přídatný materiál doporučena elektroda Thermanit MTS 4. Pro vlastní experiment byl použit tento typ elektrod o průměru 2,5 mm a délce 250 mm. V tabulce 63 je uvedeno chemické složení elektrody Thermanit MTS 4. Poloha elektrody vůči svařovanému vzorku byla ve shodě se schematickým obrázkem 75.

Tab. 63. Chemické složení elektrody Thermanit MTS 4

	C	Mn	Si	W	V	Ni	Cr	Mo
Thermanit MTS 4	0,18	0,6	0,3	0,5	0,3	0,6	11,0	1,0

Experiment byl plánován a realizován pro 8 housenek ve čtyřech vrstvách, přičemž každá následující vrstva byla vůči předchozí posunuta o určitou vzdálenost tak, aby bylo možné vyhodnotit kompletní geometrii každé housenky. V tabulce 64 jsou uvedeny navržené délky jednotlivých housenek, nastavované hodnoty svařovacího proudu a předpokládané rychlosti svařování. Postup při kladení jednotlivých housenek je stejný jako u materiálu 10GN2MFA a shodný s obrázkem 76.

Tab. 64. Geometrická nastavení polohy hořáku a nastavované procesní parametry

	Hous. 1	Hous. 2	Hous. 3	Hous. 4	Hous. 5	Hous. 6	Hous. 7	Hous. 8
Délka hous. [mm]	160	160	135	135	110	110	85	85
Svař. proud [A]	75	75	75	75	75	75	75	75
v_s [m.min⁻¹]	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Poznánka: v_s – předpokládaná dosažená rychlost svařování [m.min⁻¹]

Pro svařování byl použit invertor LORCH X 350 ControlPro, procesní parametry byly snímány aparaturou WeldMonitor a teplotní pole aparaturou DiagWeld. Skutečně změřené

procesní parametry jsou uvedeny v tabulce 65 a byly následně použity k definování modelu zdroje tepla. V tabulce jsou dále uvedeny skutečné délky housenek a jejich vzdálenosti od počátku svaru. Také v tomto případě byl systém WeldMonitor použit ke stanovení průměrných rychlostí svařování a prodlev při svařování jednotlivých částí housenky. Na obrázku 82 je ukázán tento záznam pro housenku číslo 2. Z detailního zobrazení průběhu napětí a proudu při svařování první části housenky číslo 2 je zřejmé, že se jednalo o zkratový přenos kovu.

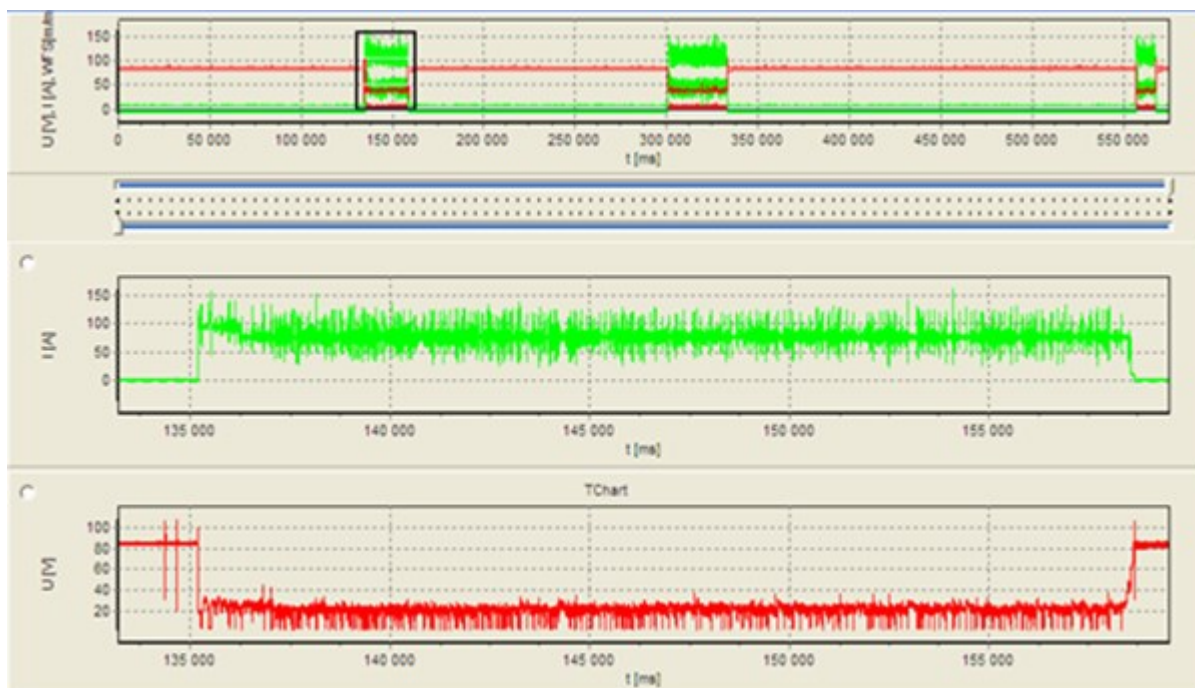
Elektrody použité pro svařování měly délku pouze 250 mm. Z tohoto důvodu bylo svařování u housenek 1 až 4 rozděleno vždy na tři části, u housenek 5 a 6 na dvě části a housenky 7 a 8 již byly svařeny najednou.

Tab. 65. X22CrMoV12-1 - Změřené procesní parametry a délky u jednotlivých housenek

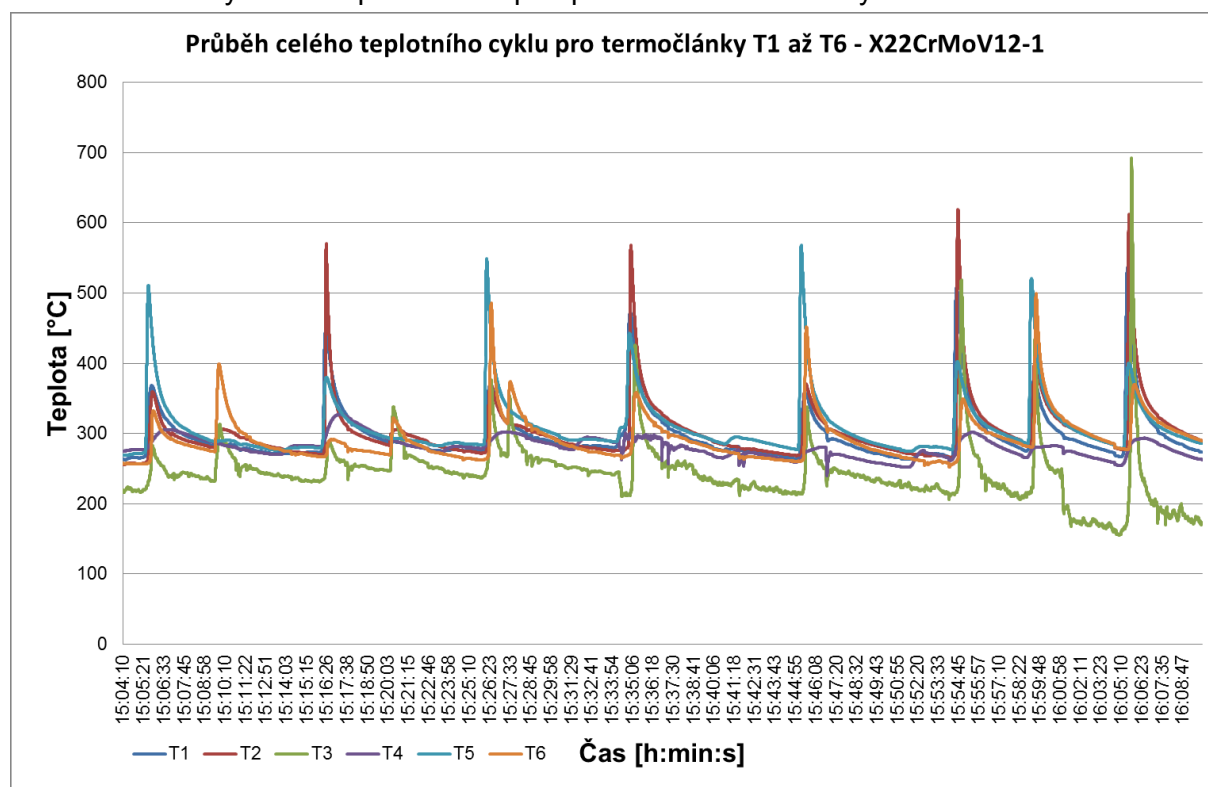
	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Prům. rychl. Svař. [m.min ⁻¹]	Čas svařování [s]	Čas prodlevy [s]	Celkový čas svař. hous. [s]	Vnesené teplo [kJ.cm ⁻¹]	Vzdálenost od zač. svaru [mm]	Skutečná délka hous. [mm]
Hous. 1 – část 1	78,6	22,9	0,131	31,8	122,0		8,295	0	69
Hous. 1 – část 2	78,6	22,7	0,116	33,2	221,0	674,9	9,256	69	133
Hous. 1 – část 3	78,7	22,7	0,109	14,9	252,0		9,858	133	160
Hous. 2 – část 1	78,2	23,3	0,145	22,7	143,0		7,520	0	55
Hous. 2 – část 2	78,5	22,8	0,150	31,7	225,0	572,2	7,182	55	134
Hous. 2 – část 3	78,6	22,4	0,144	10,8	139,0		7,313	134	160
Hous. 3 – část 1	79,0	22,8	0,142	17,8	155,0		7,634	26	68
Hous. 3 – část 2	78,5	23,3	0,144	32,5	69,0	486,2	7,625	68	146
Hous. 3 – část 3	78,7	22,5	0,142	5,9	206,0		7,462	146	160
Hous. 4 – část 1	78,3	23,3	0,127	19,4	151,0		8,632	24	65
Hous. 4 – část 2	78,2	24,1	0,125	36,5	60,0	647,0	9,030	65	141
Hous. 4 – část 3	78,6	23,4	0,125	9,1	371,0		8,833	141	160
Hous. 5 – část 1	78,8	22,0	0,137	16,2	254,0	568,7	7,590	49	86
Hous. 5 – část 2	78,9	22,7	0,137	32,5	266,0		7,868	86	160
Hous. 6 – část 1	78,8	22,9	0,127	17,9	142,0	307,3	8,501	48	86
Hous. 6 – část 2	79,1	22,4	0,129	34,4	113,0		8,247	86	160
Hous. 7 – celá	79,1	22,5	0,142	35,6	357,0	392,6	7,543	72	160
Hous. 8 – celá	79,0	22,5	0,130	40,3	388,0	428,3	8,204	73	160

Na obrázku 83 jsou ukázány získané teplotní průběhy pro jednotlivé termočlánky pro celý svařovací cyklus. Z obrázku je zřejmé, že u termočlánku T3 došlo k poškození dotykového

kontaktu mezi svařovaným vzorkem a termočlánkem. Díky tomu nebyla měřena skutečná teplota v místě dotyku, ale teplota uvnitř vyvrtaného otvoru. Termočlánek T3 tak není možné využít k verifikaci teplotních polí získaných při optimalizaci modelu zdroje tepla. Detaily teplotních cyklů získaných pro jednotlivé housenky a použitých k verifikaci použitého výpočetního modelu jsou uvedeny v příloze 4.8.



Obr. 82. Časový záznam proudu a napětí při svařování housenky číslo 2 – X22CrMoV12-1



Obr. 83. Teplotní průběhy svařovacího cyklu pro všech 6 termočlánků – X22CrMoV12-1

8.2.5. Geometrické vyhodnocení jednotlivých housenek na vzorku z X22CrMoV12-1

Geometrické vyhodnocení jednotlivých svarových housenek bylo realizováno stejným způsobem, jaký byl popsán v kapitole 8.2.3. Také zde byly ke stanovení šířky a hloubky svarové lázně použity makrovýbrusy jednotlivých housek, přičemž z důvodu většího počtu housenek byly geometricky vyhodnoceny vždy dvě housenky nacházející se ve stejné vrstvě. Pro svařování byly použity nízké svařovací proudy a pomalé rychlosti svařování, proto bylo ustálených teplotních polí dosaženo již po cca. 15 mm. Přestože byla celková délka vzorku pouze 160 mm, podařilo se i zde zachovat místa odběru vzorků pro geometrické vyhodnocení ve vzdálenosti 20 mm od začátku housenky. Takto získané makrovýbrusy byly následně použity jako verifikační vzorky pro ověření správné predikce tvrdosti. Obrázky s geometrickým vyhodnocením housenek 1 až 8 jsou uvedeny v příloze 4.9.

V tabulce 66 jsou pak uvedeny zjištěné geometrické parametry natavených oblastí a , b , c_1 , c_2 použité k definování dvouelipsoidních modelů a také spočítané výkony zdroje Q pro účinnost přenosu tepla od zdroje $\eta=0,8$. V tabulce je dále uvedena poloha zdroje tepla definovaná souřadnicí x určující vzdálenost od osy svaru a souřadnicí y definující vzdálenost ode dna drážky. Všechny tyto údaje jsou nezbytné k definování modelů zdroje tepla a k definování jejich trajektorií.

Tab. 66. Zjištěné geometrické údaje a spočítané výkony zdroje použité pro Goldakův model

	Parametr a [mm]	Parametr b [mm]	Parametr c_1 [mm]	Parametr c_2 [mm]	Výkon zdroje Q [W]	Celk. plocha svaru [mm ²]	Vzdálenost x od osy svaru [mm]	Vzdálenost y ode dna drážky [mm]
Housenka č. 1	3,61	3,36	3,3	5,1	1440	15,06	3,2	2,0
Housenka č. 2	3,47	3,54	3,2	5,2	1458	16,70	2,9	2,1
Housenka č. 3	4,21	3,69	3,0	5,1	1441	21,45	3,1	4,4
Housenka č. 4	3,43	3,80	3,2	5,2	1460	18,38	3,7	4,1
Housenka č. 5	3,35	4,32	3,1	5,1	1387	20,38	4,6	6,8
Housenka č. 6	3,79	3,80	3,2	5,3	1444	21,61	4,1	6,7
Housenka č. 7	4,08	4,01	3,0	5,2	1424	23,27	3,9	8,7
Housenka č. 8	4,16	4,28	3,1	5,2	1422	24,33	4,4	9,3

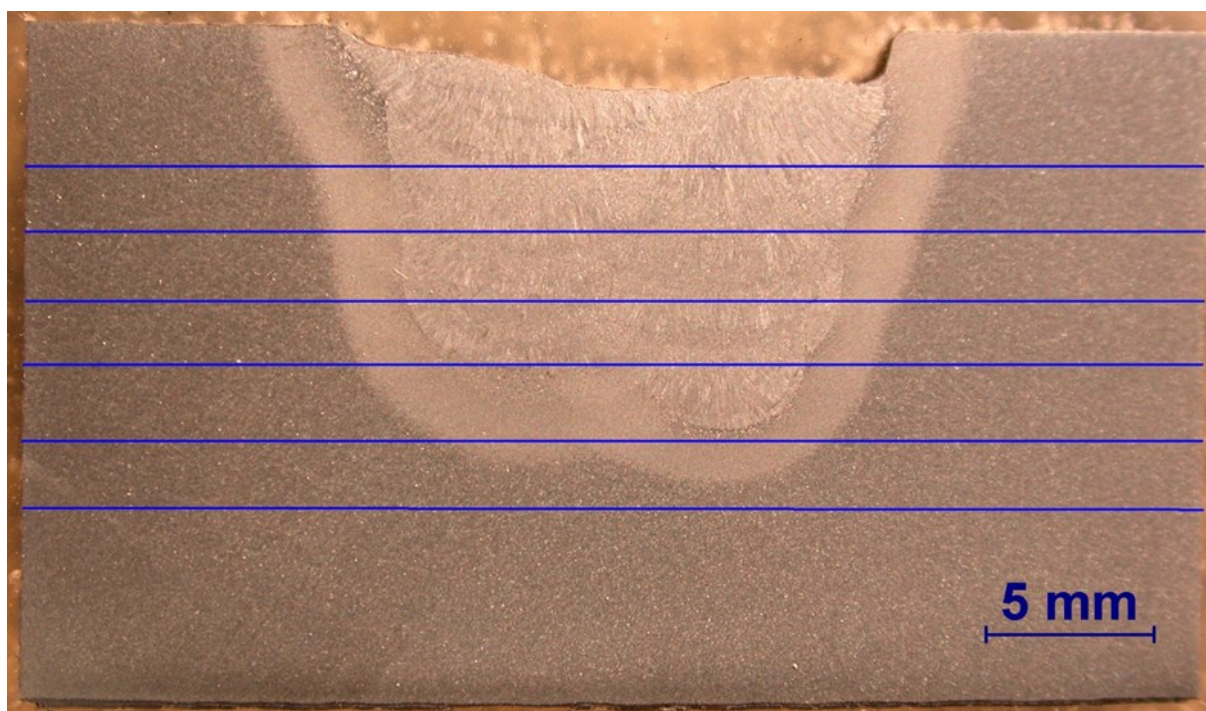
8.2.6. Data pro ověření predikovaných hodnot tvrdosti

Jak již bylo definováno v kapitole 8.1.7., tvrdost je významným materiálovým parametrem umožňujícím definovat a klasifikovat změny, ke kterým dochází ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné oblasti. To platí zejména pro martenzitické a bainitické oceli, u nichž se ještě

mnohem více projeví vliv procesních a technologických parametrů (předehřev, interpass teplota, tepelné zpracování) na změny struktury a mechanických vlastností.

K ověření vhodnosti a případným korekcím navrženého výpočetního modelu predikujícího tvrdost je dobré znát skutečné hodnoty tvrdosti v průběhu celého procesu, nebo alespoň v jeho klíčovém úsecích (zpravidla po každé housence). Z tohoto důvodu jsou (i při svařování s předehřevem) ke zjišťování změn tvrdosti v definovaných místech používány metalografické výbrusy zmíněné již v kapitolách 8.2.3. a 8.2.5.

Na uvedených vzorcích bylo měření tvrdosti provedeno v souladu s normami ČSN EN ISO 9015-1 a ČSN EN ISO 6507-1 zkouškou tvrdosti HV 10 podle Vickerse. Měření bylo realizováno formou řady vtisků se vzdáleností 1 mm mezi středy. Celkově tak bylo pro uvedené osmivrstvé svařky realizováno šest měřených řad, přičemž každá z nich obsahovala 33 vpichů. První řada (Řada 1) byla vzdálena 6 mm od spodního okraje vzorku a procházela 4 mm pod spodním okrajem výplňové drážky, tak jak je schematicky naznačeno na obrázku 84. Každá z následujících řad pak byla vůči Řadě 1 posunuta vždy o 2 mm. Řada 2 procházela přes TOO od housenek 1 a 2 a Řada 3 procházela přes housenky 1 a 2. Řada 4 pak procházela přes housenky 3 a 4, Řada 5 přes housenky 5 a 6 a Řada 6 procházela přes spodní okraj housenek číslo 7 a 8.



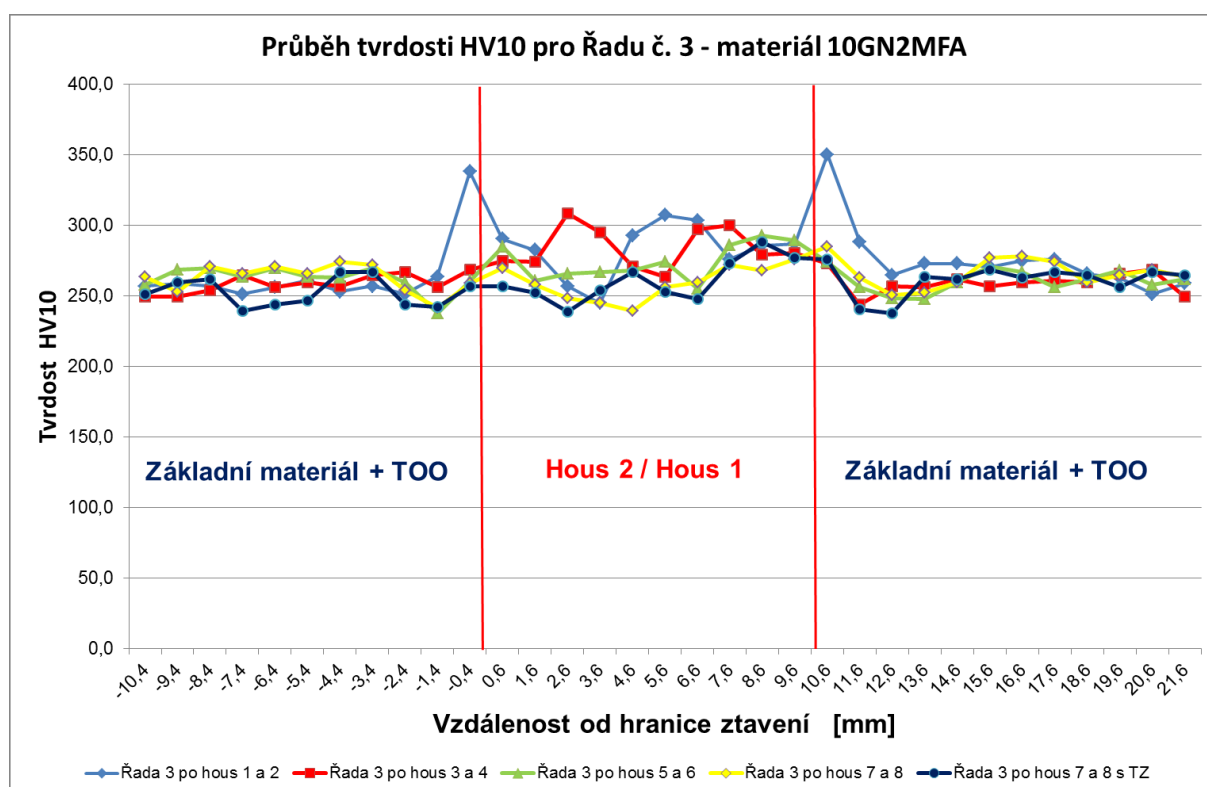
Obr. 84. Schematické znázornění umístění jednotlivých řad měření tvrdosti na vzorku

Měření tvrdosti bylo realizováno na celkem pěti metalografických výbrusech, přičemž první čtyři výbrusy obsahovaly různé počty svarových housenek (2, 4, 6 a 8 jak je zřejmé z obrázků v přílohách 4.7. a 4.9.). Pátý metalografický výbrus byl odebrán z části svaru, kde již bylo provedeno všech 8 housenek, přičemž tato část svaru byla ihned po svaření tepelně

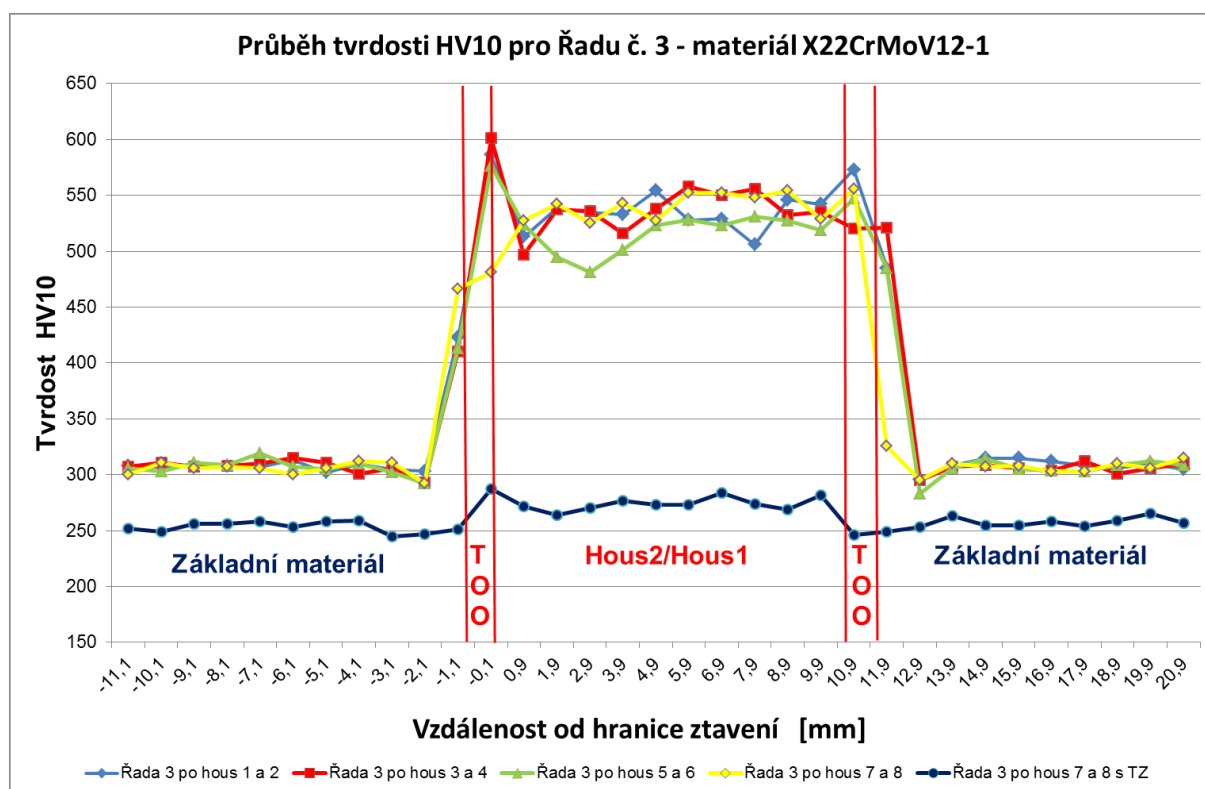
zpracována. Jednalo se o koncovou část svaru (obr. 71) oddělenou částečným naříznutím, z důvodu snadného oddělení od zbytku svaru ihned po svařování.

Uvedená část svaru byla, v případě materiálu 10GN2MFA, ihned po svaření vložena do pece předehřáté na 300 °C s dobou výdrže 2 hodiny. Poté následovalo žíhání na odstranění vnitřního napětí složené z ohřevu na teplotu 580 °C rychlostí 2,5 °C.min⁻¹, výdrže na teplotě po dobu dvou hodin, s následným ochlazením v peci na teplotu 300 °C rychlostí 3 °C.min⁻¹ a konečným dochlazením na vzduchu. U materiálu X22CrMoV12-1 byla příslušná část svaru ihned po svaření a dochlazení pod teplotu 120 °C frikčně oddělena a vložena do pece předehřáté na 120 °C. Následoval ohřev na popouštěcí teplotu 740 °C rychlostí 3 °C.min⁻¹, s následnou výdrží 4 hodiny na této teplotě. Poté byl vzorek z pece vyjmut a ochlazen volně na vzduchu.

Protože se u každého z materiálů jednalo o 792 vpichů, nebudou v této práci uvedeny tabulky s jednotlivými hodnotami tvrdosti, ale bude zde ukázáno pouze grafické vyhodnocení průběhu tvrdosti jednotlivých řad. Na obrázku 85 je ukázán časový průběh tvrdosti v definovaných místech vzorku pro Řadu 3 na materiálu 10GN2MFA a na obrázku 86 je ukázán časový průběh tvrdosti pro Řadu 3 na materiálu X22CrMoV12-1. Grafické vyhodnocení průběhu tvrdosti je pro ostatní řady a materiál 10GN2MFA uvedeno v příloze 4.10. a pro materiál X22CrMoV12-1 v příloze 4.11.



Obr. 85. Časový průběh tvrdosti HV 10 pro Řadu 3 - materiál 10GN2MFA



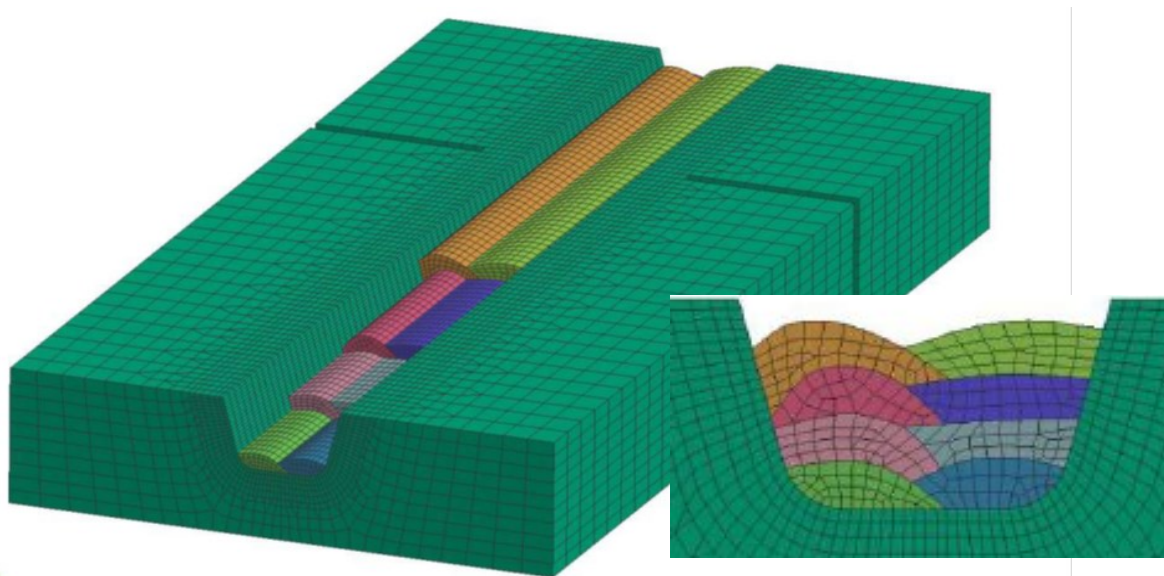
Obr. 86. Časový průběh tvrdosti HV 10 pro Řadu 3 - materiál X22CrMoV12-1

8.2.7. Definování a verifikace výpočetního modelu pro svařování s předeřevem

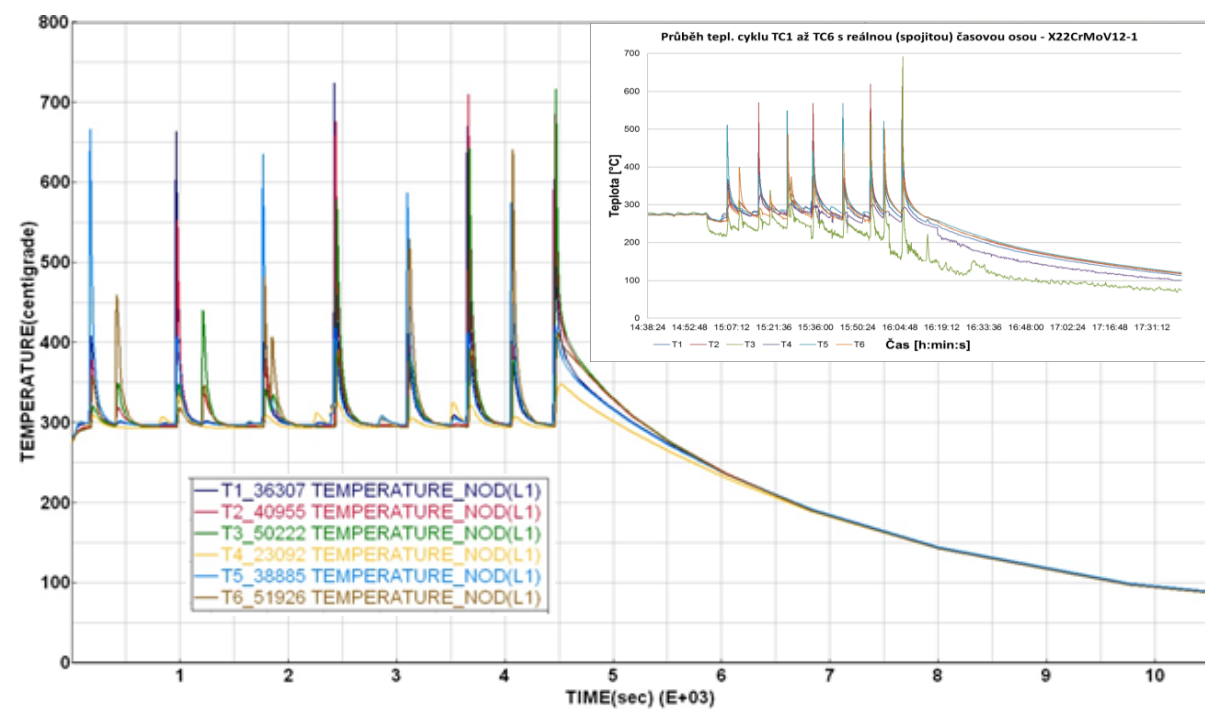
Stejně jako při svařování bez předeřevu je i při tvorbě výpočetního modelu svařování s předeřevem vždy prvním krokem vytvoření prostorového modelu a definování modelu zdroje tepla s následnou verifikací numericky vypočítaných teplotních polí. Pro svařování obalenou elektrodou je využíván dvouelipsoidní model zdroje tepla v základní nemodifikované podobě popsany rovnicemi (21) a (22). K definování modelu zdroje tepla byly pro materiál 10GN2MFA použity vstupní údaje uvedené v tabulce 62 a pro materiál X22CrMoV12-1 byly použity vstupní údaje uvedené v tabulce 66. Takto získané modely zdroje tepla byly aplikovány na prostorovém modelu vytvořeném přesně podle reálného svaru, jak je zřejmé z obrázku 87.

K ověření vhodnosti a aplikovatelnosti použitého modelu zdroje tepla byl použit způsob porovnání průběhů teplot změřených pomocí termočlánků s numericky predikovanými teplotními cykly v odpovídajících místech vzorku. Na obrázku 88 jsou ukázány numericky spočítané průběhy teplot pro celý teplotní cyklus svařování materiálu X22CrMoV12-1. Pro porovnání jsou v obrázku 88 uvedeny také reálně změřené průběhy teplot. Z průběhů jsou zřejmé drobné odchylky mezi maximálně dosaženou predikovanou a reálně změřenou teplotou. Protože však časová osa predikovaných cyklů odpovídá realitě, je pouze na posouzení příslušného pracovníka, zda je dosažená přesnost simulace dostačující, nebo zda se přistoupí k optimalizaci příslušného modelu zdroje tepla. Protože maximální zjištěné

odchyly teplotních cyklů odpovídají rozdílu v poloze termočlánku 0,12 mm, je možné, že uvedené odchyly jsou částečně způsobeny chybou měření při stanovení vzdálenosti termočlánků od svarového úkosu a hranice ztavení. Z výše uvedených důvodů byl použitý model zdroje tepla vyhodnocen jako vyhovující. Stejný postup byl zvolen také při verifikaci modelu zdroje tepla pro materiál 10GN2MFA.



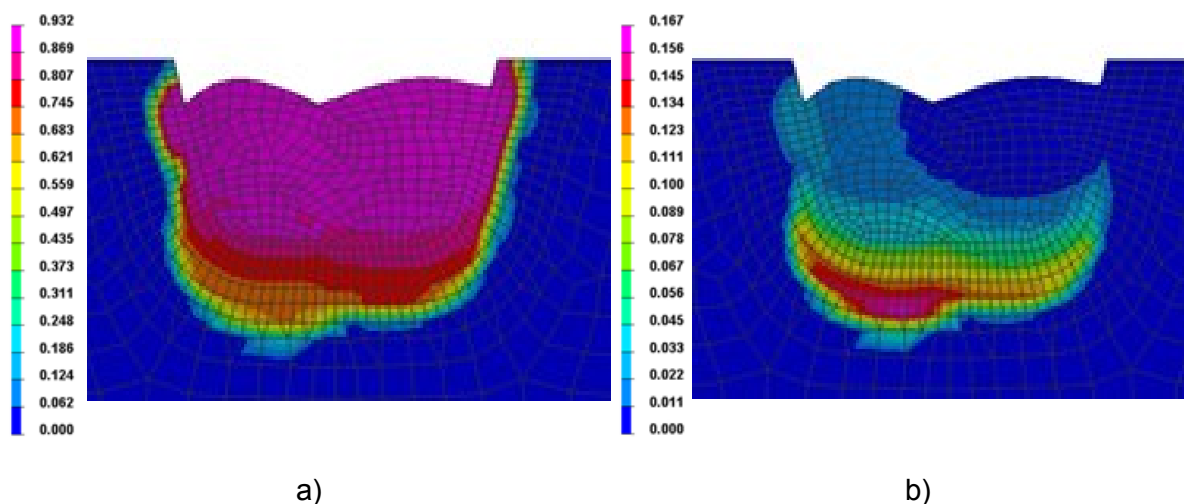
Obr. 87. Prostorový model použitý pro simulace na materiálu X22CrMoV12-1 [49]



Obr. 88. Numericky spočítané teplotní cykly pro materiál X22CrMoV12-1 [49]

Při strukturní analýze svařování materiálu X22CrMoV12-1 byly uvažovány pouze tři metalurgické fáze – austenitická, bainitická a martenzitická. Použitý výpočetní model

vycházel z rovnic (15) až (18) uvedených v kapitole 3.1.2. Na obrázku 89 jsou ukázány výsledky výpočtů strukturní analýzy na tomto materiálu po svaření a vychladnutí všech osmi housenek. Na obrázku 89 a) je ukázáno procentuální zastoupení martenzitické struktury a na obrázku 89 b) je ukázáno procentuální zastoupení bainitické struktury.



Obr. 89. Výsledky strukturní analýzy s procentuálním zastoupením a) martenzitu;
b) bainitu po osmi svarových housenkách [49]

Verifikaci strukturních výpočtů odpovídajících ověřovanému místu vzorku je vhodné provést pomocí simulovaných teplotních cyklů na teplotně napěťovém simulátoru. Tímto způsobem lze verifikovat strukturu odpovídající libovolné fázi svařování, nebo výslednou strukturu v daném místě po celém vícenásobném teplotním cyklu, včetně zahrnutí vlivu předehřevu. Toto však platí pouze pro tepelně ovlivněnou oblast. Pokud by měly být verifikovány strukturní změny v konkrétním místě svarového kovu, musí být zkušební těleso vyrobeno z materiálu tvořeného přídavným materiálem. Při takto koncipované verifikaci však není možné zahrnout vliv promíšení se základním materiálem.

Ve většině případů se ale k ověření strukturní analýzy nepřistupuje a vhodnost a přesnost použitých modelů se verifikuje pouze pomocí porovnání experimentálně změřené a numericky spočítané tvrdosti. U obou osmivrstvých svarů z materiálů 10GN2MFA a X22CrMoV12-1 byla provedena verifikace výsledků pomocí porovnání změřených a spočítaných hodnot tvrdosti.

V první fázi verifikace byly pro oba materiály použity standardní rovnice pro výpočet tvrdosti (rovnice (11) až (14) kap. 3.1.2.). Zatímco materiál 10GN2MFA svým chemickým složením vyhovuje rozmezí určenému pro použití uvedených rovnic (tab. 3), u oceli X22CrMoV12-1 je mnohem více Cr a o něco více V oproti mezním hodnotám hm. % těchto prvků, daných tabulkou 3.

Porovnání vypočtených a změřených intervalů hodnot tvrdosti HV10 v oblasti svaru a TOO, pro jednotlivé měřené řady, je pro materiál 10GN2MFA uvedeno v tabulce 67 a pro materiál X22CrMoV12-1 v tabulce 68. Z tabulky 67 je zřejmé, že numericky predikované hodnoty

tvrdosti jsou pro první dvě řady (řady vedené mimo svarový kov) nižší přibližně o 7 %. Spočítané hodnoty tvrdosti u ostatních řad jsou již v předpokládaných intervalech tvrdosti. Materiál X22CrMoV12-1 svým chemickým složením překračuje hodnoty Cr o 8,7 hm. % a proto hodnoty tvrdosti predikované pomocí rovnic (11) a (12) vykazují ve všech řadách nižší hodnoty oproti realitě. Tyto rozdíly (tab. 68) jsou o 8 až 12% nižší, což je z hlediska predikce tvrdosti (zejména u martenzitických ocelí) neakceptovatelné. Z tohoto důvodu vyvstal požadavek na stanovení nového výpočetního vzorce pro predikci tvrdosti, zejména u martenzitických ocelí s 9 – 12% Cr. Postup při stanovení nových výpočetních vzorců je popsán v kapitole 8.2.8., stejně jako aplikace těchto rovnic do výpočetního modelu pro predikci tvrdosti na materiálu X22CrMoV12-1.

Tab. 67. Porovnání vypočtené a změřené tvrdosti HV10 pro materiál 10GN2MFA

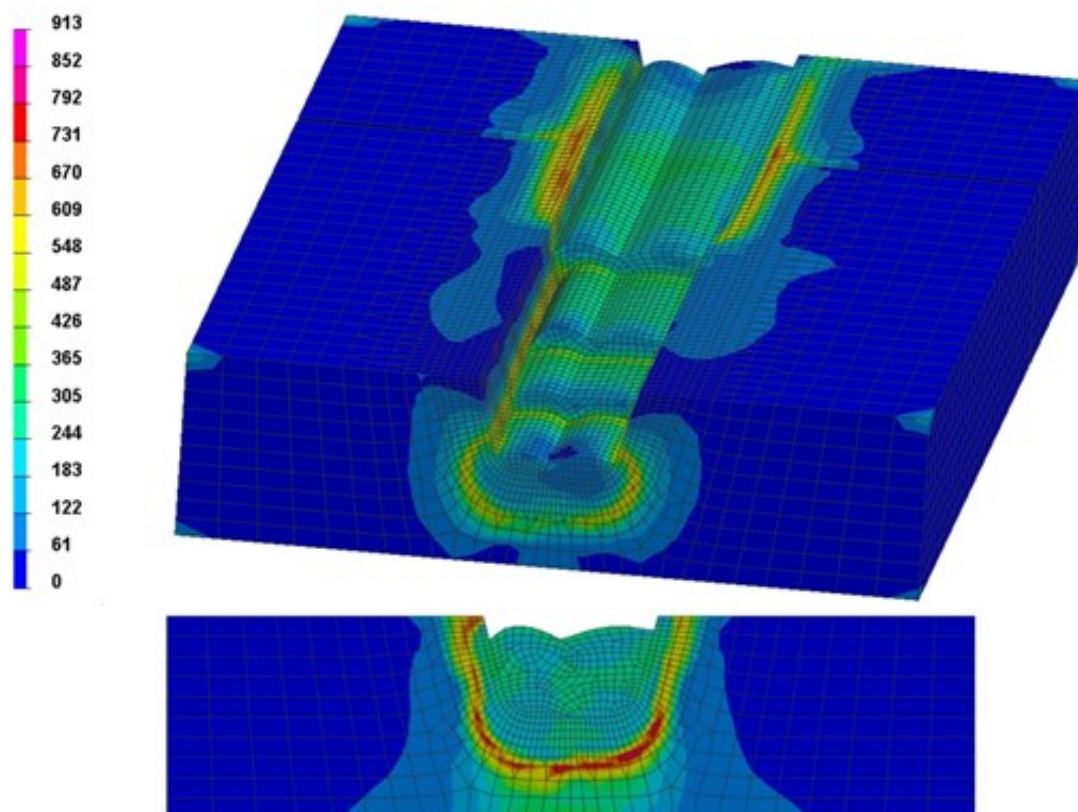
Číslo řady	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Řada 5	Řada 6
Simulace [HV]	226 – 257	248 - 289	241 - 318	283 - 342	272 - 328	281 - 331
Měření [HV]	244 – 271	259 - 296	245 - 350	274 - 364	252 - 333	269 – 337

Tab. 68. Porovnání vypočtené a změřené tvrdosti HV10 pro materiál X22CrMoV12-1

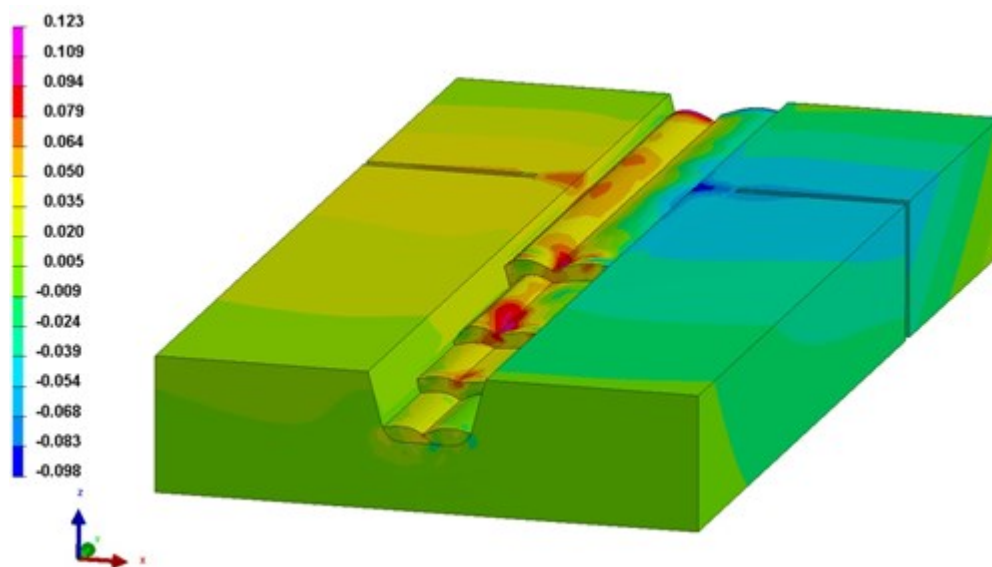
Číslo řady	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4	Řada 5	Řada 6
Simulace [HV]	267 – 292	394 - 506	396 - 489	419 - 481	426 - 503	417 – 511
Měření [HV]	290 – 317	437 - 594	442 - 573	478 - 569	481 - 607	473 - 606

Je-li vytvořený výpočetní model pro teplotně-metalurgickou analýzu definován a vyhovuje-li z hlediska přesnosti predikce výsledků zamýšlenému použití, je možné přistoupit k návrhu a verifikaci výpočetního modelu pro napětovo-deformační analýzu. Protože se jedná o svařování vícenásobnými teplotními cykly, kdy se v jednotlivých místech vzorku několikrát mění hodnota napjatosti z tahu na tlak a naopak, byl pro výpočet použit model s kinematickým zpevněním zahrnující vliv Baushingerova efektu. Na obrázku 90 jsou ukázány výsledky výpočtu zbytkových napětí podle teorie HMM na povrchu a v řezu vzorku, po kompletním dokončení procesu svařování a po vychladnutí a uvolnění desky z upínacího a předeřívacího přípravku.

Pro verifikaci výsledků dosažených při napětovo-deformační analýze je nejvýhodnější používat velikost deformací. Koncepce experimentu svařování s předeřevem je však založená na jednoznačně definovaných okrajových podmínkách při přestupu tepla mezi přípravkem a vzorkem při přestupu tepla do okolí. Z tohoto důvodu je nezbytné dostatečné tuhé upnutí vzorku, eliminující vznikající deformace, což potvrzuje i výsledná hodnota predikovaných deformací na obrázku 91. V takovém případě je k verifikaci možné použít některou z metod uvedenou v kapitole 8.1.6. Při experimentech svařování materiálů 10GN2MFA a X22CrMoV12-1 však nebyly tyto verifikace použity.



Obr. 90. Výsledky výpočtu zbytkových napětí podle teorie HMM na povrchu a v řezu vzorku po kompletním dokončení procesu svařování a po vychladnutí a uvolnění vzorku [49]



Obr. 91. Úhlové deformace vzorku po svaření, vychladnutí a uvolnění vzorku [49]

8.2.8. Definování a verifikace nových vzorců pro výpočet tvrdosti

Celá řada žárovevých a žáruvzdorných materiálů patří mezi středně a vysokolegované oceli, které svým chemickým složením leží mimo interval prvků požadovaný tabulkou 3. Jedná se především o prvky jako je Cr, Ni, Mo V a W. V některých případech může být

dosaženo značných nepřesností při predikci tvrdosti i v případě, kdy je více prvků blízko horní hranice uvedeného intervalu.

Cílem proto bylo nalézt takový model, který by s dostatečnou přesností predikoval tvrdost pro uvedený typ ocelí, zejména u bainitických a martenzitických struktur. První fáze výzkumu a testování byla zaměřena na vytvoření jednoduchého modelu pro výpočet výsledné tvrdosti bez ohledu na strukturní analýzu. Tento přístup uvažoval jako vstupní parametr pouze chemické složení materiálů spadajících do skupiny středně a vysoce legovaných žáropevných ocelí a z ARA diagramů získané rychlosti ochlazování s odpovídajícími hodnotami tvrdosti. Návrh modelu byl založen na matematické statistice, a proto byly rozdílné struktury vyloučeny jako závislé proměnné, jejichž procentuální zastoupení z velké části závisí právě na chemickém složení a rychlosti ochlazování daného materiálu. Velkou výhodou takového přístupu je fakt, že jako vstupní údaje dostačující pouze data z ARA diagramů. Díky tomu bude možné v budoucnosti soubor vstupních údajů rozšiřovat a tím zpřesňovat dosažený výsledek.

K definování vstupního souboru byla použita jak měření na materiálech uvedených v této práci, tak také měření na dalších materiálech realizovaná v rámci komerčních zakázek ve firmě Mecas ESI, s.r.o. V tabulce 69 jsou uvedeny materiály použité pro tvorbu nového modelu predikce tvrdosti, včetně jejich chemického složení. Pro každý z materiálů uvedených v tabulce 69 bylo k dispozici nejméně 7 ochlazovacích rychlostí, s příslušnou hodnotou dosažené tvrdosti HV. Celkový vstupní soubor tak obsahoval 147 údajů.

Tab. 69. Materiály použité pro nový model predikce tvrdosti

	C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Mo	Al	V	W
0,3C_1,4Mn_0,25Si	0,33	0,24	1,39	0,00	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00
15Ch2NMFA	0,17	0,30	0,49	0,06	2,06	1,45	0,60	0,00	0,12	0,00
2,25Cr1Mo0,25V	0,14	0,09	0,46	0,00	2,38	0,06	1,04	0,00	0,29	0,00
23CrMoWV8-8	0,23	0,02	0,69	0,00	2,12	0,74	0,86	0,00	0,31	0,61
26NiCrMoV14-5	0,29	0,04	0,15	0,08	1,58	3,33	0,48	0,01	0,07	0,00
27NiCrMoV15-6	0,27	0,13	0,28	0,00	1,5	3,70	0,35	0,00	0,10	0,00
300M	0,36	1,32	0,93	0,03	0,88	1,57	0,42	0,02	0,06	0,00
30CrMoNiV5-11	0,30	0,20	0,70	0,00	1,30	0,70	1,05	0,00	0,30	0,00
32CDV13	0,30	0,29	0,59	0,02	2,93	0,06	0,85	0,00	0,28	0,01
ASTM A183F22	0,16	0,44	0,51	0,00	2,26	0,05	1,01	0,00	0,00	0,00
P91	0,14	0,03	0,53	0,02	10,3	0,66	1,65	0,00	0,17	0,03
ASTM A705/630	0,05	0,49	0,62	3,48	15,2	4,49	0,04	0,01	0,08	0,00
P24	0,07	0,26	0,51	0,13	2,43	0,11	1,04	0,00	0,23	0,00
P92	0,10	0,25	0,41	0,00	8,94	0,01	0,43	0,01	0,19	1,69
X22CrMoV12-1	0,21	0,25	0,68	0,00	11,7	0,63	0,83	0,00	0,34	0,00

Údaje ze vstupního souboru byly vloženy do programu R-Project určeného pro statistické výpočty a použity k vytvoření lineárně regresního modelu. Největší výhodou lineárně regresního modelu je jednoduchý výstup ve tvaru jedné jediné rovnice. Nezávislými proměnnými (prediktory) vstupujícími do výpočtu, byla rychlost ochlazování vzorku a chemické složení, respektive hmotnostní procentuální zastoupení jednotlivých chemických prvků. Závislými prediktory pak byly materiálové struktury, respektive dosažené hodnoty tvrdosti dle Vickerse HV. Počet prediktorů byl do lineárně regresního modelu vybrán na základě testu statistické významnosti. Pro model vytvořený na základě souboru 147 vstupních údajů, byly programem R-Project určeny jako hlavní prediktory rychlost ochlazování v_r [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$] a hm. % prvků C, Cr, Mn. Výsledek získaný ze vstupního souboru hodnot pomocí lineární regrese je vyjádřen rovnicí (49).

$$HV = 243,8 + 22,57 \cdot \log_{10}(v_r) + 1139 \cdot C + 12,3 \cdot Cr - 168,3 \cdot Mn \quad (49)$$

Aplikovatelnost tohoto přístupu však nemá zcela reálné opodstatnění, protože je při něm vyžadováno mnoho předpokladů, které nelze zcela splnit. K nejpodstatnějším z nich patří požadavek na normální rozdělení všech proměnných. To však neznamená, že by takový model nefungoval. Pouze je nutné při interpretaci výsledků uvažovat uvedená omezení a zkreslení, vyjádřená koeficientem determinace R^2 [73]. Koeficient determinace totiž udává variabilitu výsledku vyčerpanou modelem. Jedná se v podstatě o druhou mocninu korelačního koeficientu. Koeficient determinace může nabývat hodnot od 0 do 1. Čím je hodnota koeficientu R^2 nižší, tím menší je predikční schopnost modelu. Klesne-li tento koeficient pod hodnotu 0,7 je zřejmé, že v modelu chybí nějaká podstatná informace. Model tvořený rovnicí (49) má pro použitý vstupní soubor hodnotu koeficientu $R^2 = 0,61$. Odchyly predikovaných hodnot tvrdosti od reality se při aplikaci na jednotlivé materiály pohybovaly v rozmezí od 8 do 23% [73]. Z uvedených důvodů není model vycházející z rovnice (49) vhodný pro výpočty tvrdosti u středně a vysoce legovaných žáropevných ocelí.

V dalším kroku byl k vytvoření rovnice predikující tvrdost použit model MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines), u něhož byly, stejně jako u lineárně regresního modelu, rozdílné struktury vyloučeny jako závislé proměnné. Model MARS je neparametrickou obdobou regresního modelu, zahrnující vzájemnou interakci prediktorů. To znamená, že nemá téměř žádné omezující požadavky na vstupní data, a tudíž není překážkou, že jednotlivé proměnné nejsou distribuovány s normálním rozdělením. Výhodou modelu MARS je možnost provádět tzv. křížovou validaci, ověřující jak dobře model predikuje nová data. Nevýhodou je pak komplikovanější zápis rovnice, kde každý ze členů může nabývat různých hodnot daných jeho intervalem. Z tohoto důvodu není výstup modelu prezentován pomocí rovnice, ale pro lepší orientaci je výstup prezentován formou tabulky 70.

Tab. 70. Výstup modelu MARS pro predikci tvrdosti HV [73]

Absolutní člen	452,4	Max. (0; 9.410 - Cr)	-26,79
Max. (0; $v_r + 2.787$)	14,10	Max. (0; $v_r + 2.787$) * max. (0; Cr - 2.120)	-1,417
Max. (0; - 2.787 - v_r)	-53,64	Max. (0; $v_r + 2.787$) * max. (0; 2.120 - Cr)	29,07
Max. (0; C - 0.124)	1465	Max. (0; - 2.787 - v_r) * max. (0; Cr - 11.50)	91,55
Max. (0; C - 0.330)	27298	Max. (0; - 2.787 - v_r) * max. (0; Cr - 9.320)	-49
Max. (0; Cr - 9.410)	-14	Max. (0; C - 0.2900) * max. (0; 9.410 Cr)	-1546

Tučně zvýrazněny jsou v tabulce 70 členy rovnice, představující lomenou čáru, definovanou intervalem uvedeným v závorce příslušného členu. Vedle nich jsou pak uvedeny koeficienty patřící jednotlivým členům rovnice. Výsledná predikovaná hodnota tvrdosti HV je dána prostým součtem jednotlivých členů, stejně jako v případě lineární regrese. Výpočetní postup vytvořený modelem MARS má pro vstupní soubor 147 údajů koeficient determinace $R^2 = 0,90$. Jako proměnné vstupují do modelu pouze příslušná rychlost ochlazování v_r [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$] a hmotnostní procentuální zastoupení uhlíku a chromu. Výsledky predikce tvrdosti aplikované na materiály uvedené v tabulce 69 vykazují u mnoha materiálů velice dobrou shodu s naměřenými hodnotami tvrdosti (např. u materiálů 15Ch2NMFA, 23CrMoWV8-8, P24). U materiálů s obsahem Cr v rozmezí 9 až 12% (P91, P92, X22CrMoV12-1) jsou však odchylky získané při predikci tvrdosti stále ještě značné, zejména při rychlostech ochlazování odpovídajících strukturám s větším podílem bainitu [73]. To může být způsobeno například také tím, že vstupní údaje vstupující do modelu MARS byly použity z ARA diagramů změřených pro konstantních rychlostech ochlazování. U reálného svařování se však tyto rychlosti mění a jsou ovlivněny i dalšími proměnnými, jako je například teplota přehřevu. Z uvedených důvodů byl i tento model vyhodnocen jako nevyhovující. Proto bylo přistoupeno k druhé fázi řešení spočívající ve vytvoření modelů predikujících tvrdost zvlášť pro každou z uvažovaných struktur.

Postup při tvorbě nového modelu predikce tvrdosti s uvažováním struktur byl opět založen na metodě využívající lineární regresi. V tomto případě však byl regresní model zobecněn na více rozměrů. Do takového typu modelu může vstupovat více proměnných (prediktorů) a zároveň zde není podmínkou, aby tyto proměnné měly lineární průběhy. Proto je možné do modelu zahrnout i vyšší mocniny nebo interakce, aniž by tím bylo ovlivněno zobecnění modelu. Pod pojmem interakce je pak možné chápat vzájemné ovlivnění vstupních proměnných, kdy změna jedné proměnné upraví hodnotu vlivu druhé proměnné na výsledek a opačně.

Počet členů je do rovnice vybírán opět na základě testu statistické významnosti jednotlivých prediktorů a na základě hodnoty koeficientu determinace R^2 , která v tomto případě udává modelem vyčerpanou variabilitu v příslušných datech. Obecně lze říci, že pokud proměnná

do modelu nepřináší alespoň 5% vlivu na celkový výsledek, je vhodnější použít jednodušší model, který má zpravidla obecnější platnost než model složitější. Ověření správnosti modelu probíhá na základě testu normality rozložení reziduí. [73]

Na základě uvedených postupů byl nejprve vytvořen model predikce tvrdosti pro martenzitickou strukturu. Z původního souboru obsahujícího 147 údajů o rychlostech ochlazování u materiálů uvedených v tabulce 69, byly vybrány pouze údaje o ochlazovacích rychlostech, při kterých bylo dosaženo 100% martenzitické struktury. Tato data nemají podle testu normality normální rozložení, ale vzhledem k malému množství měření (15 materiálů a 56 údajů o ochlazovacích rychlostech) to ještě nemusí znamenat, že normálně rozložena nejsou. Výsledný model pro výpočet tvrdosti martenzitické struktury [HV] získaný ze vstupního souboru pomocí statistického programu R-Project je popsán rovnicí (50). Hlavními prediktory jsou obsahy C a Cr udávané v hm. % a rychlost ochlazování v_r [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$].

$$HV_{Martenzit} = 316,6 + 2464 \cdot C^2 + 58,95 \cdot C \cdot Cr + 23,46 \cdot C \cdot \ln(v_r) \quad (50)$$

Z rovnice (50) je zřejmý především vliv obsahu uhlíku. Kromě toho, že v rovnici vystupuje samostatně ve druhé mocnině, interaguje také s chromem i s rychlostí ochlazování, která je zároveň logaritmována přirozeným logaritmem. Hodnota koeficientu determinace R^2 vychází téměř 0.93, což je pro takto jednoduchý model velmi dobrý výsledek. Zároveň test normality reziduí potvrzuje náhodnost jejich rozložení ($p=0,58$), což znamená, že v datech už žádná další relevantní informace není. Modelu je tedy možné věřit i přes to, že se data na vstupu nezdají být normálně rozdělená.

Stejný postup byl zvolen také při tvorbě modelu pro predikci tvrdosti u bainitické struktury. Z původního vstupního souboru byly vybrány údaje o ochlazovacích rychlostech, při kterých bylo dosaženo 100% bainitické struktury. Vzhledem k velmi malému množství měření odpovídajících danému kritériu (15 materiálů a 26 údajů) byl vstupní soubor údajů doplněn ještě o rychlosti ochlazování, při kterých bylo dosaženo směsi bainitu a martenzitu. Celkově tak byl k dispozici vstupní soubor se 42 údaji. Výsledný model pro výpočet tvrdosti bainitické struktury [HV] je popsán rovnicí (51). Hlavními prediktory jsou obsahy C a Si udávané v hm. % a rychlost ochlazování v_r [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$].

$$HV_{Bainit} = 271,9 + 628,8 \cdot C + 81,16 \cdot Si^2 + 63,06 \cdot C \cdot \ln(v_r) \quad (51)$$

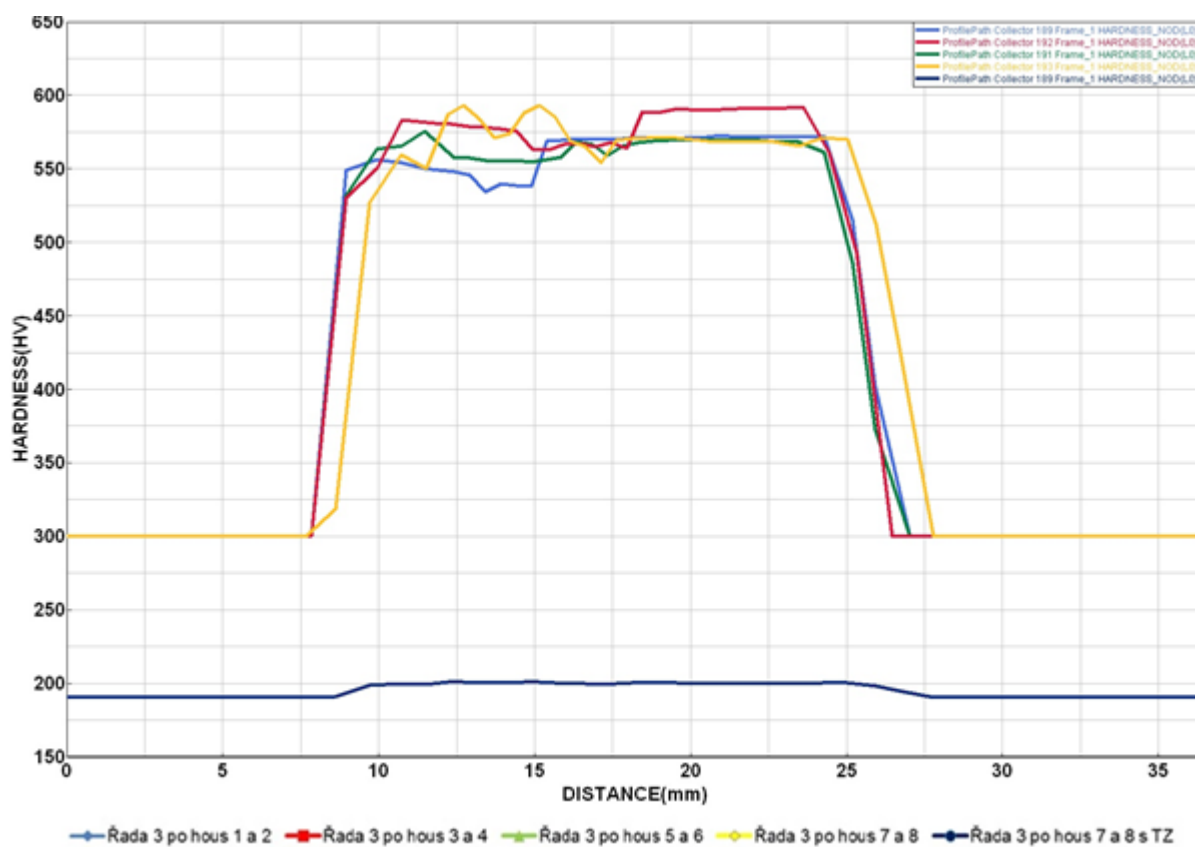
Křemík vstupuje do rovnice ve druhé mocnině a také uhlík se na predikované tvrdosti výrazně podílí. Kromě zahrnutí samostatného vlivu s poměrně vysokým koeficientem 628,8, uhlík současně interaguje s rychlostí ochlazování, která je zároveň logaritmována přirozeným logaritmem. Hodnota koeficientu determinace R^2 vychází téměř 0,95 a test normality reziduí stanovil náhodnost jejich rozložení $p=0,60$.

V tabulce 71 je uveden rozsah obsahů prvků vycházející z materiálů použitých pro tvorbu rovnic (50) a (51). Uvedené rovnice by měly s dostatečnou přesností predikovat hodnoty tvrdosti u materiálů, které svým chemickým složením spadají do intervalů uvedených v tabulce 71.

Tab. 71. Rozmezí hm. % prvků pro výpočet tvrdosti pomocí inovovaných rovnic [73]

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Cu	Al
min.	0,05	0	0,15	0	0	0	0	0	0	0
max.	0,36	1,32	1,40	4,50	15,2	1,70	0,30	1,75	3,50	0,02

Po získání relevantních vstupních údajů pro další materiály spadajících do skupiny středně a vysoko legovaných žárovevých ocelí, bude možné rovnice (50) a (51) dále zpřesňovat. Toto zpřesňování se bude pravděpodobně týkat především úpravy koeficientů u jednotlivých prediktorů. Obě uvedené rovnice byly otestovány při numerických simulacích tvrdosti na všech materiálech obsažených v tabulce 69 s velice dobrými výsledky. Maximální odchylka predikovaných hodnot nepřekročila při simulacích 7,5 % [73].



Obr. 92. Nově predikované hodnoty tvrdosti pro Řadu č. 3 na materiálu X22CrMoV12-1 [49]

Zahrnutím rovnic (50) a (51) do výpočtu tvrdosti u materiálu X22CrMoV12-1 byly predikované hodnoty tvrdosti uvnitř intervalu tvrdostí zjištěných experimentálně (tab. 68) a to u všech šesti řad. Na obrázku 92 jsou ukázány výsledky predikovaných hodnot tvrdosti pro

Řadu č. 3 na materiálu X22CrMoV12-1. Tyto výsledky je možné porovnat s reálně změřenými hodnotami (obr. 86, kapitola 8.2.6.). Z porovnání je zřejmé, že dosažené výsledky jsou uspokojivé.

Model pro výpočet tvrdosti feriticko-perlitické struktury nebyl vytvořen, protože u uvažovaných materiálů nedochází při svařování k ochlazování tak pomalými rychlostmi, aby vznikla tato struktura. Také zde byl problém s dostatkem relevantních vstupních dat pro uvedený typ fázové transformace. Proto bude v případě potřeby výpočtu tvrdosti u feriticko-perlitické struktury dále využívána původní rovnice (13).

8.3. Diskuze dosažených výsledků při simulacích svařování

Experimenty svařování patří mezi nejčastěji realizovaná měření mající za úkol definovat vstupní nebo verifikační data numerických simulací. Přestože jsou realizovány poměrně často, zpravidla se jedná pouze o pracovní zkoušky soustředěné na natavenou a tepelně ovlivněnou oblast, s velkou řadou nedefinovaných okrajových podmínek. Výsledky takto koncipovaných experimentů samozřejmě pomohou zpřesnit výsledky simulací pro identický typ úloh, ale k problémům dochází v okamžiku, kdy je třeba získaný výpočetní model aplikovat na jiný typ úlohy (více vrstev, odlišný typ svaru, jiná metoda svařování, jiné procesní parametry).

Hlavním cílem této části práce proto bylo ukázat, jakým způsobem by měly být navrženy a realizovány experimenty využitelné při získávání vstupních údajů a verifikačních dat pro numerické simulace svařování s předehřevem a bez předehřevu. Pozornost byla zaměřena především na okrajové podmínky týkající se sdílení tepla do okolí, ale popsány byly i další typy okrajových podmínek využitelných při definování výpočetního modelu při teplotně – metalurgické i při napěťovo – deformační analýze.

Obecně lze říci, že při realizaci experimentů svařování je největším problémem popis teplotních polí a teplotních gradientů. Jak bylo ukázáno v kapitolách 8.1.1., 8.1.2. a 8.2.1., podmínky, za nichž je realizován přestup tepla do okolí, se výrazně podílí na výsledných teplotních polích. To se týká jak míst styku svařovaného vzorku s pracovním stolem nebo přípravkem, tak míst vzorku předehřátých na technologicky požadované teploty. Zároveň by u zkušebních vzorků měla být snahou eliminace předehřevů pomocí lokálních tepelných zdrojů, jako jsou například kyslíko – acetylenové, nebo propan – butanové hořáky. Jejich působením vznikají ve vzorcích nestacionární teplotní pole se značnými teplotními gradienty, vedoucí ke vzniku deformací, případně vnitřních pnutí ještě před začátkem vlastního svařování.

Uvedené doporučení platí samozřejmě pouze pro zkušební vzorky. Simulační modely vytvořené a verifikované na základě experimentů s jasně definovanými okrajovými

podmínkami jsou s úspěchem používány také pro simulace dějů, kdy je předehřev realizován lokálně pomocí uvedených hořáků (např. opravy odlitků turbínových skříní). V případě takových simulací jsou již od počátku počítána teplotní pole od lokálních zdrojů vznikajících před vlastním svařováním.

Jak je z realizovaných měření zřejmé, koncepce experimentů svařování s předehřevem a bez předehřevu je značně rozdílná, přestože způsoby vyhodnocení většiny potřebných veličin si jsou podobné. Při svařování materiálu P235GH bez předehřevu byla pozornost zaměřena jak na definování teplotních polí majících značný vliv na fázové transformace (verifikováno pomocí tvrdosti HV10), tak také na volbu vhodného modelu pro stanovení zbytkových napětí a deformací, ověřené zejména pomocí zjištěných průběhů úhlových deformací. Díky takto koncipovanému měření se zároveň podařilo ukázat, jakým způsobem postupovat v případech kdy nějaká část výpočetního modelu neodpovídá ověřeným výsledkům. To vše zároveň otvírá otázku, zda je vhodné pro experimenty a simulace svařování používat klasické ARA diagramy svařovaných materiálů, nebo zda je vhodnější a výhodnější použít rovnou „In-situ“ svářečské diagramy.

Při svařování s předehřevem byly provedeny vícevrstvé svary na materiálech 10GN2MFA a X22CrMoV12-1. Výsledky experimentů potvrdily nutnost dodržení navržených metodických postupů zejména z hlediska přestupu tepla do okolí. Zároveň také potvrdily vhodnost použití dvouelipsoidního „Goldakova“ modelu zdroje tepla v modifikované i nemodifikované podobě při simulacích metod tavného svařování (111, 131, 135 a 141 dle normy ISO 4063) a to při svařování s předehřevem i bez předehřevu. Byla také potvrzena vhodnost použití stávajících rovnic pro výpočet transformačních změn v materiálu a to jak pro nízkolegované, tak také pro středně a vysokolegované oceli. Zásadní neshoda se však, pro v současnosti používané rovnice (11) až (14), projevila při predikci hodnot tvrdosti u materiálů s vyššími obsahy Cr (9 – 12 hm. %) a V ($\geq 0,2$ hm. %), případně u materiálů legovaných W. V předložené práci se jednalo konkrétně o materiály X22CrMoV12-1 a P92.

Tato neshoda byla řešena návrhem nových výpočetních vzorců pro predikci hodnot tvrdosti u bainitických a martenzitických struktur. K řešení této problematiky byly použity metody lineární regrese a matematické statistiky aplikované na soubor 15 ocelí (tab. 69). Původní záměr vytvoření jedné rovnice pro predikce tvrdosti u všech metalurgických fází nebyl úspěšný ani při použití lineárně regresního modelu, ani při použití modelu MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines). Přestože využitím modelu MARS došlo u některých ocelí k dosažení výrazně lepších výsledků než při použití rovnic (11) až (14), u materiálů s vyšším obsahem Cr a W byly predikované hodnoty tvrdosti stále nedostatečně přesné. Proto byl zvolen přístup, při kterém byly vytvořeny rovnice predikující tvrdost zvlášť pro jednotlivé struktury. Výsledkem jsou rovnice (50) pro výpočet tvrdosti u martenzitických

struktur a rovnice (51) pro výpočet tvrdosti u bainitických struktur. Obě uvedené rovnice byly následně otestovány při numerických simulacích predikujících výslednou tvrdost vzorků pro odpovídající konstantní rychlosti ochlazování použité v ARA diagramech. Porovnáním s experimentálně dosaženými tvrdostmi (uvedenými v ARA diagramech), bylo u všech 15 materiálů obsažených v tabulce 69 dosaženo velice uspokojivých výsledků. V předložené práci je výsledná predikce tvrdosti pomocí rovnic (50) a (51) demonstrována na simulaci svařování materiálu X22CrMoV12-1.

Díky použití lineární regrese a matematické statistiky při tvorbě rovnic (50) a (51) bude i do budoucna možné uvedené rovnice dále zpřesňovat. Předpokladem je však získání potřebných vstupních dat pro další materiály spadajících do skupiny bainitických a martenzitických ocelí. Zpřesnění se budou pravděpodobně týkat zejména koeficientů u jednotlivých prediktorů. Je však možné, že se při dalším výraznějším rozšíření vstupního souboru použitelných materiálů objeví v rovnicích (50) a (51) i další legující prvky.

9. Metodické postupy určené ke stanovení součinitele přestupu tepla do ochlazovacího média

Základním úkolem tepelného zpracování je dosažení požadovaných užitečných vlastností zpracovávaného výrobku, závisících na dosažení optimálních rozpadových struktur. Toho lze dosáhnout především vhodnou volbou ochlazovací rychlosti z austenitizační teploty. Tyto rychlosti je možné částečně korigovat volbou vhodného ochlazovacího prostředí, nicméně při ochlazování nebude nikdy dosaženo rovnoměrného teplotního gradientu v celém průřezu zpracovávaného výrobku. Díky tomu mohou v materiálu vznikat značná vnitřní napětí vedoucí k deformacím zpracovávaného výrobku, nebo až k jeho popraskání. To platí zejména pro rozměrné a/nebo tvarově složité výrobky a konstrukční celky. Proto jsou v oblasti tepelného zpracování rozměrných dílů s výhodou používány numerické simulace. Jejich cílem jsou zejména predikce struktury a tvrdosti v jednotlivých místech vzorku, ale také napětovo-deformační analýzy umožňující určit potenciální kritická místa z hlediska kumulace napětí s následně možným vznikem trhlin. Díky těmto analýzám je možné ještě před vlastní výrobou upravit buď tvar zpracovávaného dílu, nebo celý postup tepelného zpracování.

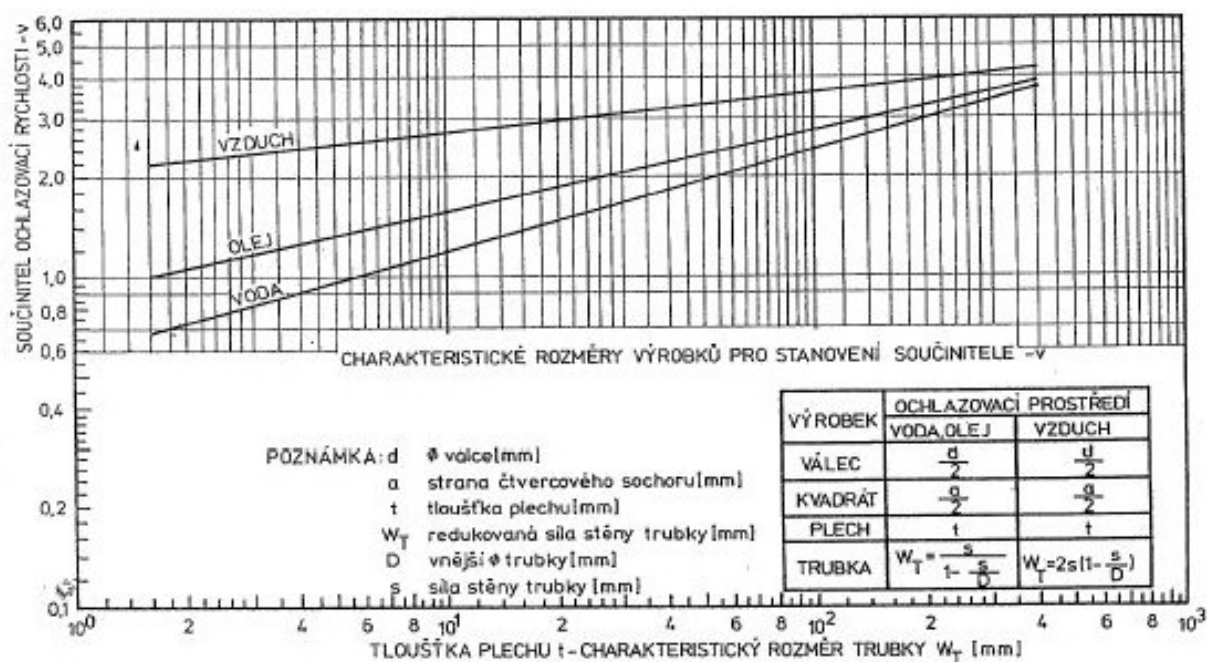
9.1. Zjednodušené způsoby volby vhodné ochlazovací rychlosti

U ocelí určených k tepelnému zpracování je obvykle v materiálových listech doporučováno také vhodné ochlazovací prostředí (voda, olej, polymerní lázně, roztavené soli, případně klidný nebo proudící vzduch), avšak bez bližší specifikace rychlosti ochlazování. V takovémto případě však může dojít u výrobků značně rozdílných rozměrů a tloušťek k dosažení velice odlišných ochlazovacích rychlostí (při použití stejného ochlazovacího média) a tím tedy i ke vzniku odlišných rozpadových struktur. Z těchto důvodů je k vyjádření intenzity ochlazování pro daný materiál mnohem výhodnější použít příslušný interval ochlazovacích rychlostí ve $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, nebo ve $^{\circ}\text{C}\cdot\text{hod}^{-1}$. Vzhledem k obecnému tvaru ochlazovacích křivek je dále vhodné tento údaj doplnit ještě o teplotní rozmezí platnosti příslušné rychlosti ochlazování. Například při hodnocení rychlosti ochlazování v TOO svarových spojů se používá teplotní interval 800 až 500 $^{\circ}\text{C}$, vyjádřený časem $t_{8/5}$.

Při odhadu vhodné rychlosti ochlazování je možné pro výrobky jednoduchých tvarů a konkrétních rozměrů použít metodiku hodnocení podle GUTA a LÜLLINGA [151] pomocí tzv. součinitele rychlostí ochlazování $-v$. Tento parametr je možné s dostatečnou přesností odečíst z ARA diagramu příslušné oceli a jeho absolutní číselná hodnota je rovna dekadickému logaritmu doby potřebné pro dosažení poloviny austenitizační teploty v průběhu chladnutí, vyjádřené rovnicí (52) [152]. Parametr $t_{A/2}$ [s] vyjadřuje dobu nezbytnou k ochlazení výrobku z austenitizační teploty na její polovinu.

$$-v = \log \cdot t_{A/2} \quad (52)$$

Tímto způsobem je možné pomocí ARA diagramu definovat pro požadovanou výslednou strukturu výrobku odpovídající křivku rychlosti ochlazování a následně také parametr $-v$. Potom je již možné s pomocí diagramu na obrázku 93 určit pro jaké tvary a rozměry zpracovávaných výrobků a pro jaký typ ochlazovacího média bude požadované struktury dosaženo. Možný je samozřejmě i obrácený princip, podle kterého je možné pro konkrétní tvar a rozměry výrobku a pro konkrétní ochlazovací médium stanovit součinitel rychlostí ochlazování $-v$. Díky tomu je v souladu se vzorcem (52) stanovena vhodná ochlazovací rychlost. Tento postup lze aplikovat na většinu používaných konstrukčních ocelí [152].



Obr. 93. Závislost součinitele ochlazovací rychlosti na charakteristickém rozměru konkrétního výrobku pro různá ochlazovací prostředí [152]

Jak je z obrázku 93 zřejmé, výrobky jednoduchých tvarů (válec, čtyřhran, plech a trubka) jsou z hlediska tvaru a rozměrů charakterizovány pomocí rozměru W [mm], respektive pomocí dílčích charakteristických rozměrů W_d , W_a , W_p a W_T [mm]. Pro válec je rozměr W_d definován rovnicí (53), pro čtyřhran je rozměr W_a definován rovnicí (54) a pro plech je rozměr W_p definován rovnicí (55), přičemž tyto rozměry jsou využitelné pro všechna tři ochlazovací média uvedená na obr. 93. Trubka je pak pro ochlazování ve vodě a oleji charakterizována rozměrem W_T stanoveným v souladu s rovnicí (56) a pro ochlazování na vzduchu rozměrem W_T stanoveným v souladu s rovnicí (57).

$$W_d = \frac{d}{2} \quad (53)$$

$$W_a = \frac{a}{2} \quad (54)$$

$$W_p = t \quad (55)$$

$$W_T = 2 \cdot s \cdot (1 - s/D) \quad (56)$$

$$W_T = \frac{s}{1 - s/D} \quad (57)$$

Kde:

d	- je průměr válce	[mm]
a	- je strana čtvercového průřezu	[mm]
t	- je tloušťka plechu	[mm]
D	- je vnější průměr trubky	[mm]
S	- je tloušťka stěny trubky	[mm]

Uvedeným způsobem je možné přibližně stanovit vhodný typ ochlazovacího média vedoucí k získání požadované struktury u výrobků jednoduchých tvarů. V technické praxi se však nejedná vždy o jednoduché tvary u tepelně zpracovávaných výrobků a také existuje v rámci jednoho typu média (např. oleje) více druhů s různým ochlazovacím účinkem. Navíc se mohou (se zvyšující se dobou provozu) měnit ochlazovací schopnosti daného média. Definovat přesně vliv ochlazovací schopnosti příslušného média na výrobek konkrétních rozměrů a tvarů je však možné pouze pomocí reálných pracovních zkoušek, případně s dostatečnou přesností pomocí numerických simulací tepelného zpracování. K tomu je ale nezbytné umět experimentálně určit a následně popsat ochlazovací schopnosti zvoleného typu ochlazovacího média na materiál konkrétního typu a rozměrů. Z těchto důvodů byla na TUL v rámci projektu TAČR 02010992 vytvořena a odzkoušena metodika vedoucí ke stanovení teplotní závislosti součinitele přestupu tepla do kalícího média s ohledem na typ ochlazovacího média, druh základního materiálu a rozměry zpracovávaného předmětu. Uvedená metodika byla posléze certifikována akreditovanou společností SVV Praha inspekčním dokumentem číslo 11/2013.

9.2. Cíle navrženého metodického postupu

Cílem této metodiky, je popis postupu vedoucí k získání relevantních materiálových vstupních dat a dat vedoucích k optimalizaci výpočetního modelu, při numerických simulacích tepelného zpracování. Jedná se zejména o výpočet teplotních polí u tepelně zpracovávaných součástí na základě stanovené teplotní závislosti součinitele přestupu tepla do kalícího média pro konkrétní materiál a podmínky ochlazování. Zároveň jsou pro

experimentálně získané ochlazovací křivky stanoveny výsledné struktury materiálu a příslušné hodnoty tvrdosti. Díky těmto údajům je tak možné následně verifikovat a případně i modifikovat celkový výpočetní model. Vytvořená metodika má své základy v Jominyho zkoušce prokalitelnosti a v Quench testu. Proto dříve než bude metodika popsána, bude zde uveden stručný popis obou uvedených metod, včetně jejich výhod a nevýhod z hlediska potřeb numerických simulací. [154]

9.2.1. Podstata Jominyho zkoušky prokalitelnosti

Jominyho zkouška prokalitelnosti je v současné době prováděna dle normy ČSN EN ISO 642. Tato norma specifikuje uvedenou metodu pro stanovení prokalitelnosti ocelí čelní zkouškou prokalitelnosti na zkušebních tělesech o průměru 25 mm a délce 100mm. Zkouška prokalitelnosti se skládá z následujících tří etap:

1. Ohřev válcového zkušebního tělesa na stanovenou teplotu v oblasti austenitu při stanovené době ohřevu a výdrži na teplotě;
2. Rychlého ochlazení zkušebního tělesa proudem vody na jedné z jeho čelních ploch za podmínek stanovených normou;
3. Měření tvrdosti v určených bodech na podélně vybroušených plochách na zkušebním tělese, pro stanovení prokalitelnosti oceli na základě rozdílných hodnot tvrdosti.

Místo odběru vzorku a způsob jeho obrobení je specifikován normou ISO 642. Pokud není dohodnuto jinak, musí se zkušební těleso před opracováním a kalením normalizačně žíhat. Norma ISO 642 definuje také zkušební zařízení, na kterém má být zkouška provedena. Jedná se zejména o vzájemnou polohu konce trysky pro přívod vody vůči zkušebního vzorku, vnitřní průměr přívodní trysky a výšku proudu vody při zajištění konstantního průtoku a tlaku vody).

Z hlediska teplotního cyklu norma definuje minimální dobu ohřevu zkušebního tělesa, výdrže na teplotě, doby mezi vyjmutím zkušebního tělesa z pece a počátkem kalení a doby, po kterou musí kalení probíhat. Po zakalení vzorku následuje příprava vzorku k vyhodnocení a měření tvrdosti. Příprava a vyhodnocení probíhají následujícím způsobem:

1. Na povrchu válcové plochy jsou vybroušeny dvě plochy vzájemně pootočené o 180° a rovnoběžně s osou zkušebního tělesa, hloubka obroušení je mezi 0,4 až 0,5 mm.
2. Vyhodnocení případných změkčených ploch po broušení, ponořením tělesa do 5% vodního roztoku HNO_3 (až dojde k rovnoměrnému zčernání tělesa).
3. Měření tvrdosti v definovaných bodech tělesa dle norem ČSN EN ISO 6507-1, ČSN EN ISO 6508-1, ČSN EN ISO 6508-2 a ČSN EN ISO 6508-3.
4. Vytvoření křivky rozptylu tvrdosti a celkové vyhodnocení zkoušky.

Výhody Jominyho zkoušky z hlediska numerických simulací [154]

- a) Jednoduchost a přesné definování zkoušky.
- b) Relativně rovnoměrný gradient teploty z důvodu intenzivního odvodu tepla pouze z čelní plochy. U zbytku tělesa je přestup tepla radiací.

Nevýhody Jominyho zkoušky z hlediska numerických simulací [154]

- a) Definování zkoušky pouze pro jeden typ ochlazovacího média.
- b) Neznalost ochlazovacích křivek testovaného vzorku.
- c) Zkouška je vhodná pouze pro materiály s malou prokalitelností. U materiálů s velkou prokalitelností budou tvrdosti v celé kontrolní délce tělesa téměř identické.

9.2.2. Podstata Quench testu

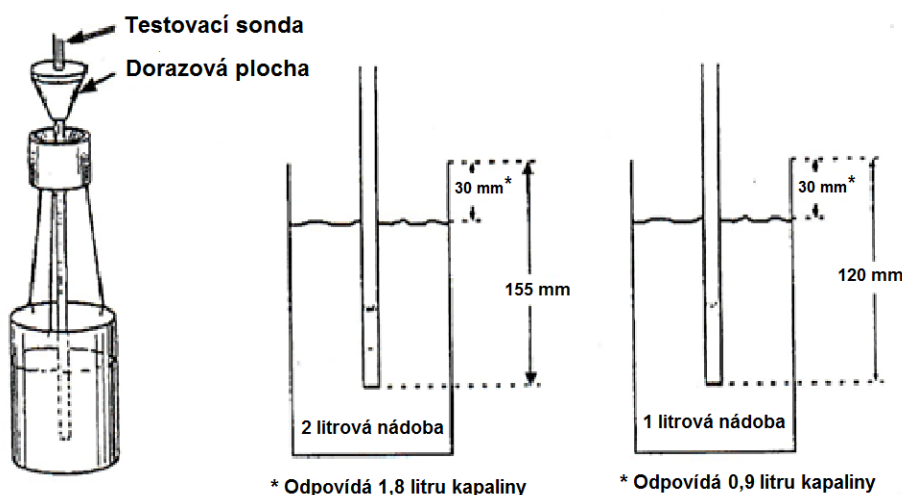
Quench test je testem, pomocí kterého jsou zjišťovány a zaznamenávány ochlazovací křivky různých kalících médií. Výhodou tohoto testu je možnost sledování změn ochlazovacích vlastností kalícího média v závislosti na čase a frekvenci používání. Díky tomu je možné stanovit, zda ochlazovací vlastnosti daného média ještě vyhovují požadavkům pro tepelné zpracování zvolených dílů a materiálů.

K těmto zkouškám se používá například měřicí aparatura Ivf SmartQuench měřící křivky ochlazování v klidném ochlazovacím médiu v souladu s normou: ISO 9950:1995, ASTM D 6200-01, nebo při použití definovaného pohybu ochlazovacího média podle normy ASTM D 6482-99. V současné době v ČR neexistují harmonizované normy pro měření ochlazovacích křivek s definovaným pohybem ochlazovacího média.

Princip zařízení je založen na ponoření v peci ohřáté měřící sondy (nejčastěji z materiálu Inconel 600) do testovaného kalícího média a snímání ochlazovacích křivek po definovanou dobu. K válečku zhotovenému z Inconelu je připojen oddělený termočlánek typ K s izolovaným teplým spojem. Vše je zapouzdřeno v nerezové trubičce, která spojuje váleček a snímací zařízení propojené s řídicím software.

Při vlastním testování je měřící sonda ohřata na teplotu 870°C a po vložení měřící části sondy do ochlazovacího média (obr. 94) je teplota snímána po dobu 20, nebo 60 sekund. Přístroj zaznamená pro konkrétní kalící médium teplotu sondy během ochlazování. Na základě těchto údajů je stanovena rychlost ochlazování. Ochlazovací charakteristiky změřených vzorků se porovnávají s referenčními křivkami nebo se srovnají s diagramy fázových přeměn, což umožňuje vybrat vhodné kalící prostředí pro konkrétní materiál.

Životnost sondy závisí především na intenzitě ochlazování kalícího média a pohybuje se od 150 do 300 testů. Přesnost sondy závisí na čistotě povrchu sondy (nutno ji zbavit povrchových oxidů).



Obr. 94 Schematické znázornění použití měřicí sondy přístroje Ivf SmartQuench [154]

Výhody Quench testu z hlediska numerických simulací [154]

- Získání ochlazovacích křivek a stanovení teplotní závislosti rychlosti ochlazování pro různá ochlazovací média.
- Jednoduchost a opakovatelnost testu, možnost testování konkrétního média, ve kterém bude konkrétní díl ochlazen.
- Mobilita zařízení.

Nevýhody Quench testu z hlediska numerických simulací [154]

- Testování ochlazovacího média, ne hodnocení vlivu podmínek ochlazování na konkrétní materiál.
- Definování zkoušky pouze pro Inconelový váleček.
- Definování zkoušky neumožňuje simulaci pohybu ochlazovaného dílu v médiu (proces, při němž je snaha o odtržení případného parního polštáře).
- Nutnost dokonalého očištění měřicí sondy po každém měření.

9.3. Podstata nově navržené metodiky testování

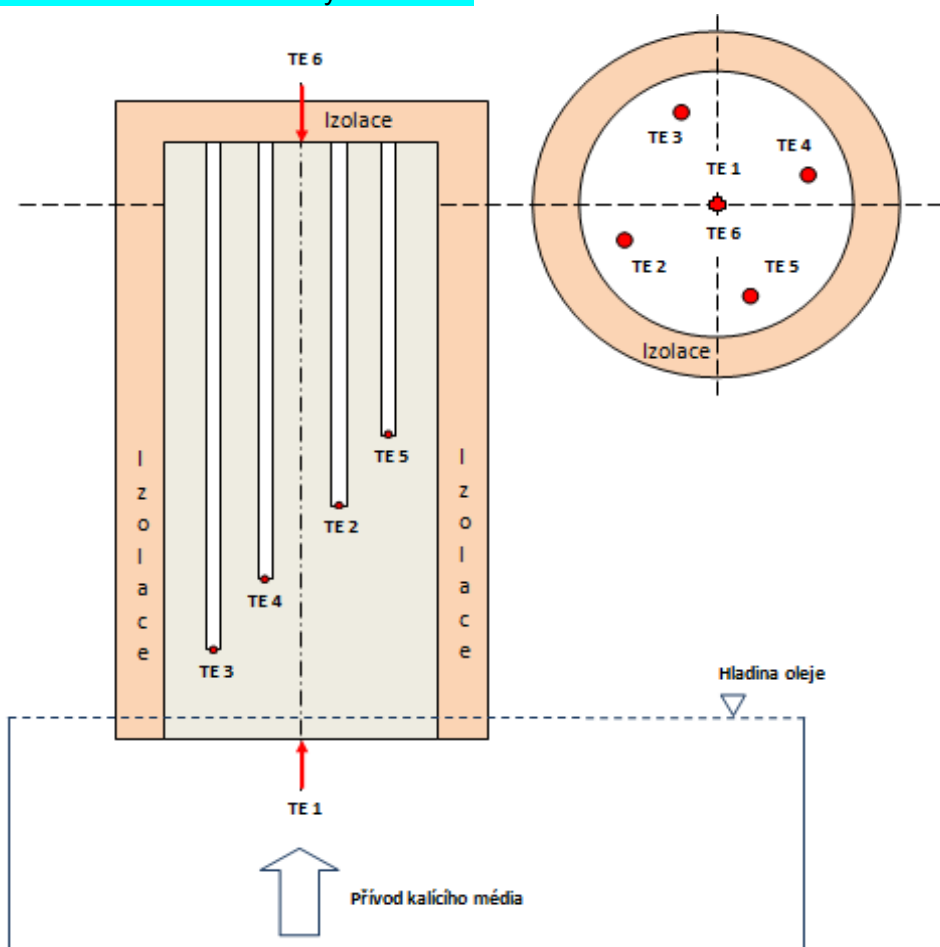
Podstatou navržené metodiky je stanovení teplotní závislosti součinitele přestupu tepla z ochlazovaného zkušební vzorku do ochlazovacího média pro konkrétní testovaný materiál a podmínky ochlazování. Na základě metalografického rozboru lze pro naměřené ochlazovací křivky určit charakter výsledné struktury zkoumaného materiálu a na základě měření tvrdosti stanovit jeden ze základních parametrů popisující mechanické vlastnosti.

Ochlazovací médium je volené s ohledem na testovaný materiál a jeho přívod je řešen variabilně tak, aby bylo možné simulovat okrajové podmínky při ochlazování v konkrétním

médiu. Jako ochlazovací médium mohou být u této metodiky použity veškeré kapaliny, polymerní lázně, ale také klidný, nebo proudící vzduch.

9.3.1. Vliv velikosti a tvaru zpracovávaného dílu

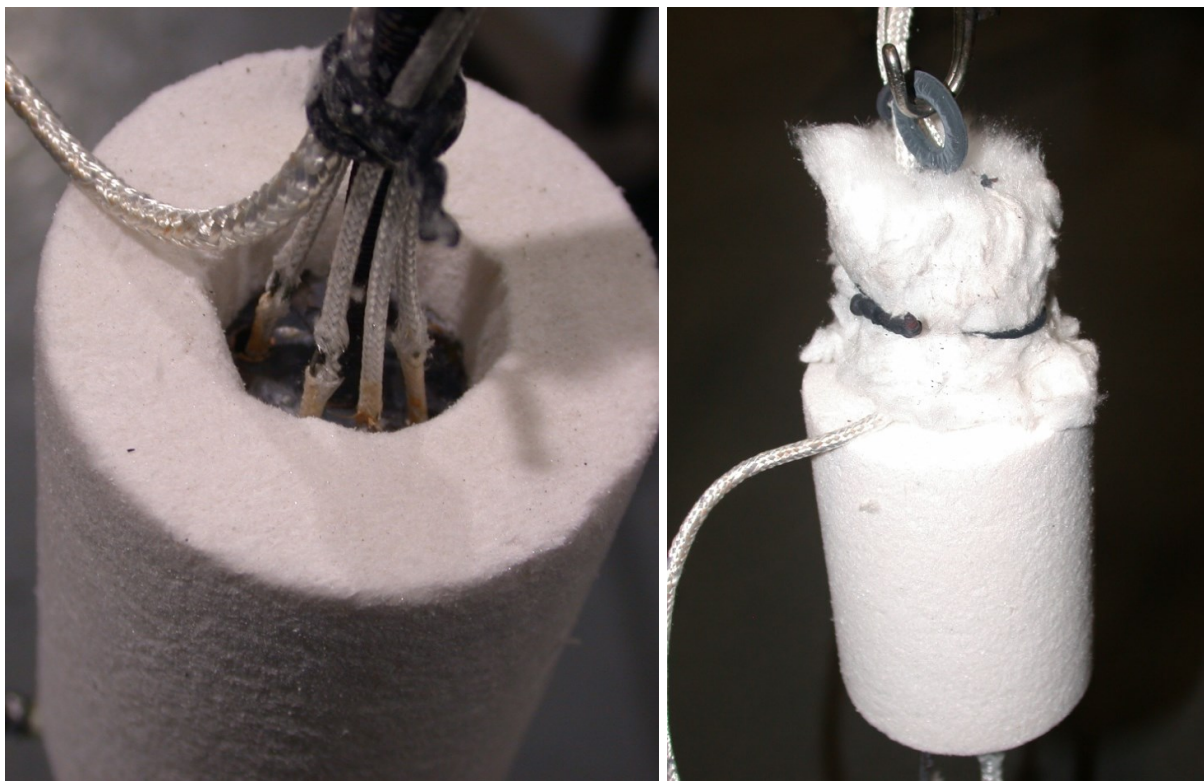
Velmi důležitým parametrem při tepelném zpracování, je velikost a tvar zpracovávaného výrobku, neboť u velmi tenkých dílů lze i na vzduchu docílit ochlazovacích rychlostí srovnatelných s ochlazovacími rychlostmi dosaženými u objemných těles při kalení do vody. Variabilitu složitějších tvarů společně s velikostí dílů lze proto jen velmi obtížně postihnout. Proto byla metodika zaměřena na experimentální stanovení součinitele přestupu tepla pro různá ochlazovací prostředí s velkou variabilitou okrajových podmínek při jejich proudění. Zároveň je použito jednoduchého tvaru zkušebního tělesa, ovšem při striktně definovaných okrajových podmínkách. Díky tomu je možné současně získat i další potřebná vstupní data vedoucí k verifikaci a případně i k modifikaci používaných výpočetních modelů pro konkrétní materiály. Jak bude popsáno dále, velikost skutečného tepelně zpracovávaného dílu lze na zkušebním tělese simulovat změnou jeho délky. Na obrázku 95 je schematicky naznačena podstata nově navržené metodiky testování.



Obr. 95. Schématické naznačení realizace zkoušky a zkušebního vzorku [154]

Navržené zkušební těleso má tvar válce o průměru 30, nebo 50 mm. Toto rozmezí je voleno s ohledem na celkovou délku vzorku, přičemž pro větší délky se volí větší průměr vzorku. Z hlediska metodického postupu je minimální délka zkušebního vzorku stanovena na 50 mm a maximální délka by měla odpovídat polovině maximální tloušťky reálně ochlazovaného výrobku. Pro materiály s vyšší prokalitelností je nutno preferovat co největší délky zkušebního vzorku.

Zkušební těleso je ze všech stran, vyjma čelní plochy, izolováno pomocí tepelně izolační hmoty o tloušťce nejméně 30mm, využitelné pro teploty až do 1200 °C (obr. 96). Díky tomu je možný odvod tepla pouze čelní plochou zkušebního tělesa a může tak být na uvedeném tělese simulován vliv tloušťky materiálu tepelně zpracovávaného dílu. V případě popsaného uspořádání také nezáleží (při uvažování nulových ztrát vedením tepla přes izolační vrstvu) na velikosti čelní plochy zkušebního tělesa, protože při zvětšení čelní plochy zkušebního tělesa úměrně roste množství naakumulovaného tepla ve zkušebním tělese.



Obr. 96. Izolované zkušební těleso osazené termočlánky TE1 až TE6
před a po izolaci horní plochy zkušebního tělesa [153]

Každé zkušební těleso je osazeno nejméně šesti teplotními snímači (termočlánky) označenými TE1 až TE6 pro mapování teplotního pole ve směru délky vzorku. Přitom platí zásada, že první termočlánek TE1 je umístěn uprostřed čelní plochy zkušebního tělesa, tedy v místě styku tělesa a ochlazovacího média. Ostatní snímače teploty jsou rozmístěny ve zkušebním tělese ve vrtaných otvorech, v různých vzdálenostech od ochlazované plochy,

na roztečné kružnici odpovídající 0,7 násobku průměru zkušebního tělesa a vzájemně od sebe pootočených o 90°. Díky tomu je okolo každého snímače teploty rovnoměrně rozloženo stejné množství hmoty tělesa. Termočlánky mohou být rozmístěny ve směru délky zkušebního tělesa libovolně, ale pro jejich umístění jsou z důvodu vhodného mapování teplotních polí doporučeny následující vzdálenosti:

- Termočlánek TE2 by měl být od ochlazovaného čela zkušebního tělesa vzdálen 0,07 násobek délky zkušebního tělesa.
- Termočlánek TE3 by měl být od ochlazovaného čela zkušebního tělesa vzdálen 0,18 násobek délky zkušebního tělesa.
- Termočlánek TE4 by měl být od ochlazovaného čela zkušebního tělesa vzdálen 0,4 násobek délky zkušebního tělesa.
- Termočlánek TE5 by měl být od ochlazovaného čela zkušebního tělesa vzdálen 0,7 násobek délky zkušebního tělesa.
- Termočlánek TE6 je pak umístěn uprostřed zadní izolované plochy zkušebního tělesa.

Pokud před zkouškou není stanoveno jiné tepelné zpracování vzorku, musí být testovaný vzorek normalizačně vyžítán.

9.3.2. Způsob experimentálního provedení zkoušky

Způsob měření a realizace experimentu je založen na zahřátí zkušebního tělesa ve speciálně konstruované vertikální muflové peci, na teplotu (50 až 80°C nad Ac3), nebo na technologicky požadovanou teplotu ohřevu, při technologicky definované rychlosti ohřevu. Pracovní prostor pece je orientován vertikálně, s dělenými otvíracími dvířky umožňujícími horizontální posun do strany. Dvířka jsou v dělicí rovině opatřena otvory pro termočlánky vedoucí ke komunikační sběrnici a řídící jednotce. Po celou dobu ohřevu na požadovanou teplotu (kontrola termočlánekem TE6) a případně předepsané technologické výdrži, je zkušební těleso zavěšeno na posuvném a otočném zařízení umožňující jednoduchou a rychlou manipulaci vzorku do přesné polohy vůči ochlazovacímu médiu. Princip zařízení je popsán v užitém vzoru číslo 28310 a v uděleném patentu číslo 305469 a doba celé manipulace od otevření ohřívací pece po styk čelní plochy tělesa s médiem definovaných technologických parametrů nepřesáhne 6 sekund.

Podle požadavků na simulované děje, je v zásadě možno realizovat následující varianty přívodu ochlazovacího média: [154]

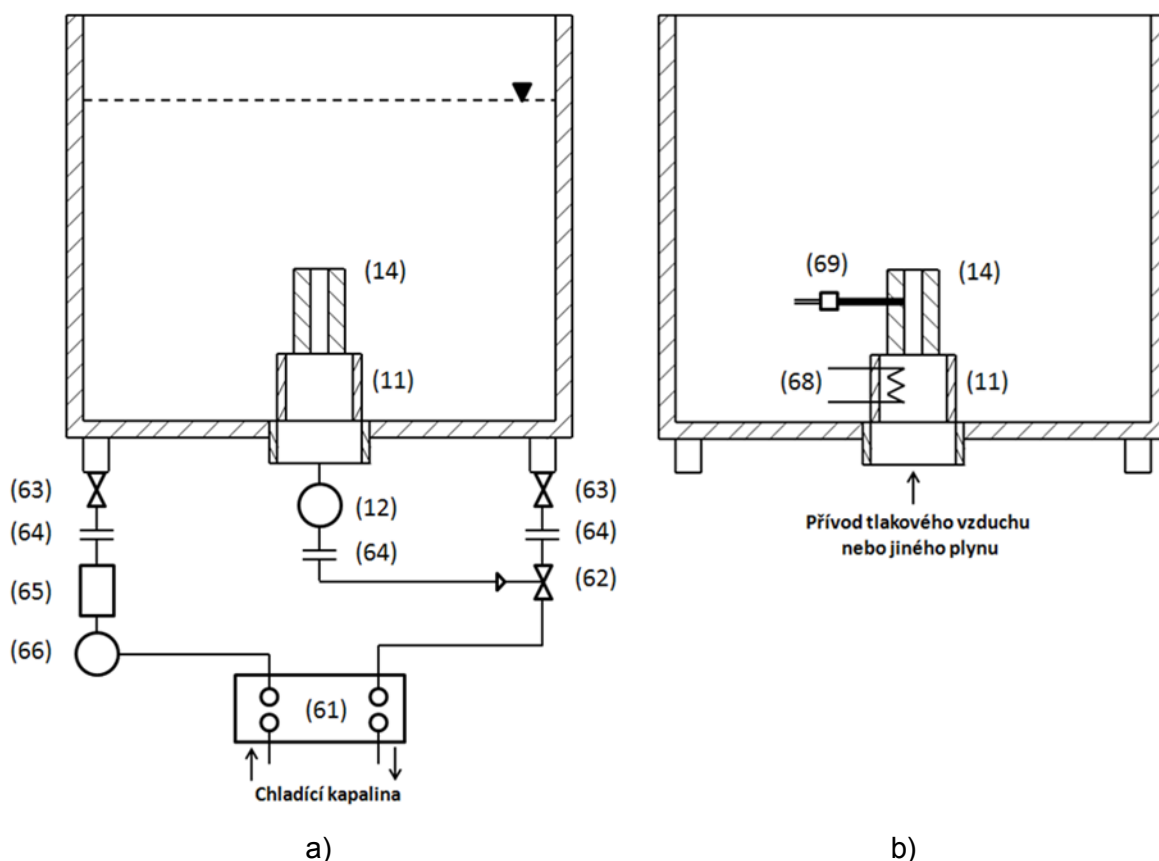
- a) Princip přívodu chladicího média podobný jako u Jominyho zkoušky prokalitelnosti, s definovanou vzdáleností mezi tryskou a čelní plochou vzorku. Tento způsob lze v současné konfiguraci zařízení aplikovat pro vodu, kalící oleje a proudící vzduch.

- b) Ochlazovaný vzorek se dotýká hladiny chladicího média (čelo vzorku je ponořeno do hloubky 1 mm) a přívod média je ve vzdálenosti 50 mm od čela vzorku pod hladinou. Chladicí médium proudí směrem k čelu vzorku s různou (nastavitelnou) rychlostí. Využitelné pro vodu a všechny typy kalících olejů.
- c) Ochlazovaný vzorek se dotýká hladiny chladicího média (čelo vzorku ponořeno do hloubky 1 mm) a médium proudí ve směru kolmém na osu zkušebního tělesa s různou (nastavitelnou) rychlostí. Využitelné pro vodu a všechny typy kalících olejů.
- d) Ochlazování čelní plochy zkušebního vzorku bez pohybu ochlazovacího média. Tento způsob je využitelný pro všechny typy ochlazovacích médií.

Součástí navrženého zařízení je též možnost měření a regulace teploty chladicího média a měření a regulace průtoku média (rychlost proudění), aby bylo možné definovat všechny okrajové podmínky při numerických simulacích. Navrhovaná metodika je plánována pro široký sortiment kapalných ochlazovacích médií i pro ochlazování na klidném nebo proudícím vzduchu. Na obrázcích 97 a), b) je schematicky znázorněn princip pohybu ochlazovacího média při zachování jasně definovaných okrajových podmínek probíhajícího experimentu.

Pro možnost simulace podmínek pohybu tepelně zpracovávaného dílu v kapalných médiích (obr. 97 a)), je zásobník chladicího média uprostřed dna opatřen nástavcem trysky a tryskou definovaného průřezu, jejíž konec je umístěn 50 mm pod ochlazovanou čelní plochou zkušebního tělesa. Cirkulační okruh je za chladičem osazen trojcestným ventilem a čidlem snímajícím průtok média. Díky tomu je možné nastavit konstantní průtok chladicího média tryskou a definovat tak rychlost pohybu média vůči tepelně zpracovávanému dílu, čímž je simulován pohyb zpracovávaného dílu v kalícím médiu. Nástavec trysky ve formě trubky na konci osazený tryskou, může mít jakýkoliv prostorový tvar, takže v případě potřeby je možné definovat jakýkoliv směr proudění ochlazovacího média vůči čelní ochlazované ploše zkušebního tělesa.

Analogickým řešením využitelným zejména pro samokalitelné Cr oceli je použití klidného nebo proudícího vzduchu, případně jiného plynu (obr. 97 b)). V tomto případě je použit zásobník bez ochlazovacího média, opatřený pouze tryskou definovaného průřezu, jejíž konec je umístěn 50 mm pod ochlazovanou čelní plochou zkušebního tělesa. Na nástavec je připojen tlakový vzduch (nebo plyn), který je regulován vzduchovým ventilem a snímán čidlem průtoku. Také zde je možné definovat průtok ochlazovacího plynného média tryskou a tedy přesně definovat okrajové podmínky proudění ochlazovacího média. Do nástavce s tryskou může být vložena topná spirála předeřhřívající plynné médium, z důvodu dalšího snížení rychlosti ochlazování. V takovém případě je snímána teplota plynného média teplotním čidlem na výstupu z trysky.



Obr. 97. Princip pohybu ochlazovacího média pro a) kapalná média; b) plynná média

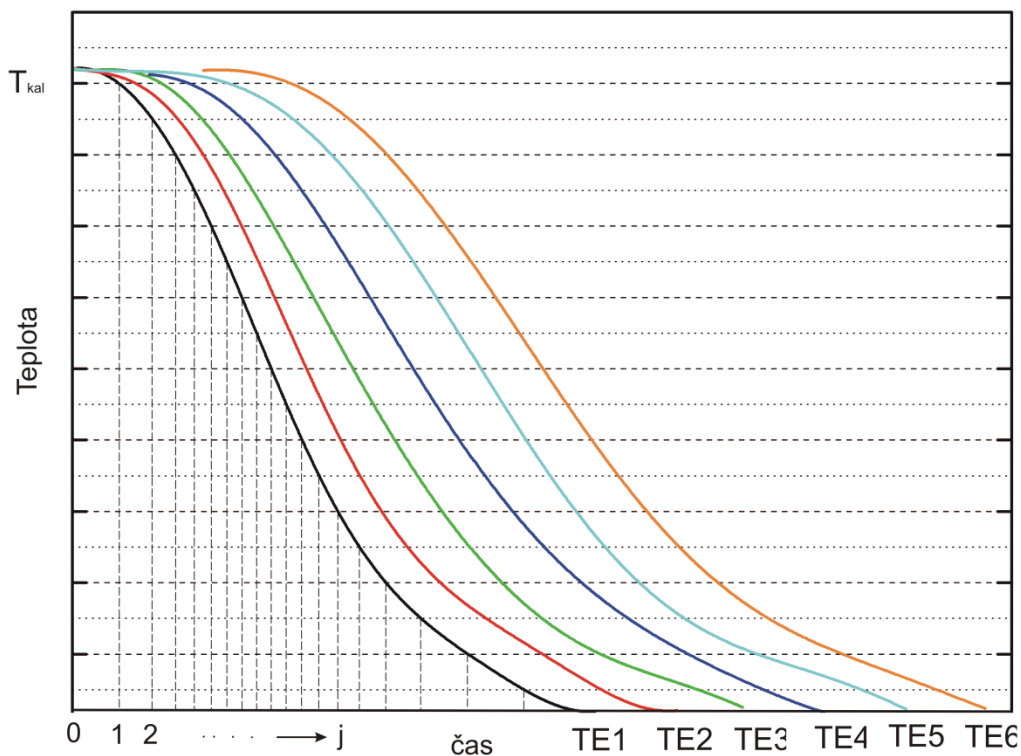
(11) nástavec trysky; (12) průtokové čidlo kapalného média; (14) koncová tryska;
(61) chladič; (62) trojcestný ventil; (63) dvojcestný ventil; (64) rychlospojky; (65) filtr nečistot;
(66) čerpadlo; (68) topná spirála; (69) čidlo teploty plynného média; [155]

U všech definovaných způsobů je potřeba provádět zkoušku tak dlouho, dokud nedojde k ochlazení zkušebního tělesa pod teplotu M_f , nebo na teplotu kalícího média. Tato teplota musí být dosažena na horní, izolované ploše zkušebního tělesa (TE6).

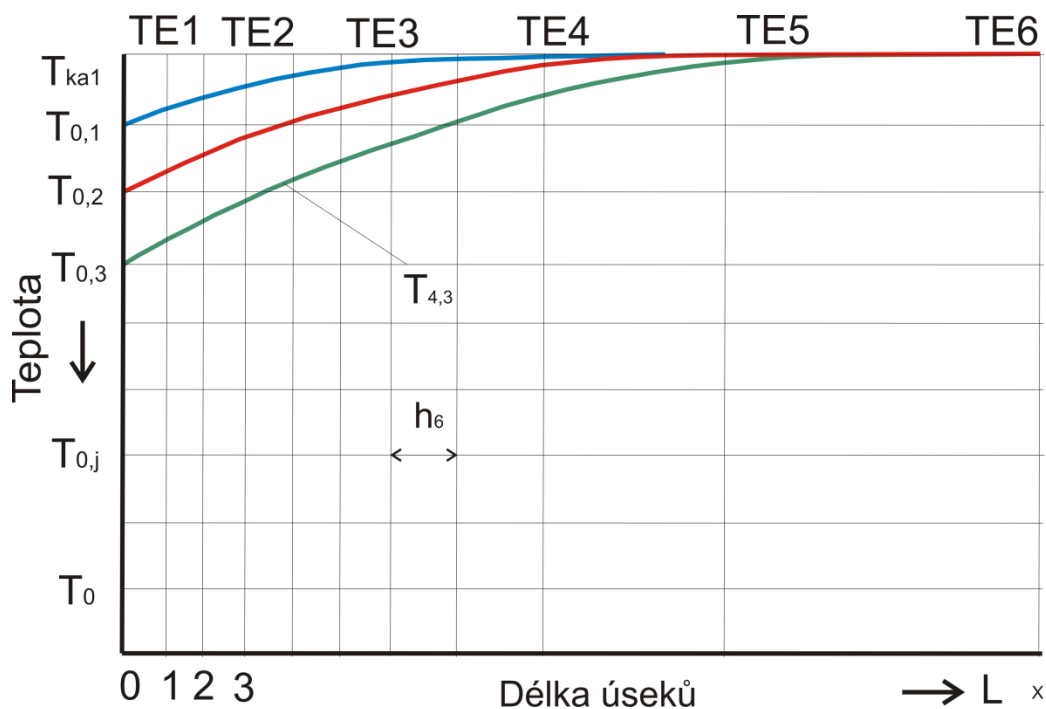
9.3.3. Vyhodnocení experimentálně dosažených výsledků

Základním výsledkem realizované zkoušky ochlazování zkušebního tělesa jsou stanovené ochlazovací křivky v místech umístění termočlánků TE1 až TE6. Na schematickém obrázku 98 je nakreslen průběh naměřených hodnot. Vzhledem k tomu, že výsledky měření teploty jsou v digitální podobě, lze z těchto hodnot stanovit časové závislosti rozložení teploty v tělese ve směru jeho délky podle obrázku 98. Časové intervaly pro realizaci výpočtu součinitele přestupu tepla je vhodné stanovit pro konstantní teplotní rozdíly na ochlazované ploše, pro které bude počítán součinitel přestupu tepla. To znamená, že se nebude jednat o konstantní časové odstupy. Rovněž je nutno stanovit rozměry elementů tělesa ve směru délky – v dalším textu označeno hodnotou h . S ohledem na charakter rozložení teploty v tělese ve směru délky bude vhodné zvolit odstupňovanou velikost elementů. Směrem od

ochlazovaného povrchu by se hodnota h měla postupně zvětšovat. Přesnost výpočtu součinitele přestupu tepla se však obecně bude zvyšovat při zmenšování velikosti elementu, neboť při výpočtu je skutečný průběh teploty v elementu ve směru tloušťky nahrazen přímkou. Na obr. 99. je vyznačena hodnota velikosti elementu h_6 . [154]



Obr. 98. Schematické znázornění časové závislosti teploty v místech umístění termočlánků



Obr. 99. Schematické znázornění rozložení teploty ve směru délky vzorku pro jednotlivé časové okamžiky [154]

Teploty v jednotlivých místech a časech jsou označeny $T_{x,t}$. Hodnota x se pohybuje v intervalu od 0 do L (L je délka zkušební vzorku) a hodnota času t se pohybuje v intervalu od 0 do j , přičemž j odpovídá času ukončení měření teploty. [154]

Ze stanovených křivek rozložení teploty ve vzorku podle obr. 98. se vychází při výpočtu množství akumulovaného tepla ve vzorku a množství odvedeného tepla v jednotlivých časových intervalech. Množství tepla akumulované ve zkušebním tělese po ohřevu na kalici teplotu je dáno rovnicí (58) a množství tepla, které je v tělese v čase t_1 je dáno rovnicí (59).

$$Q_{t_0} = V\rho\bar{c}(T_{kal} - T_m) \quad (58)$$

$$Q_{t_1} = \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,1}} + c_{T_{x+1,1}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,1} + T_{x+1,1}}{2} - T_m \right) \quad (59)$$

Rovnice (60) udává rozdíl obou hodnot akumulovaného tepla a představuje tak hodnotu odvedeného tepla v časovém interval $t_0 - t_1$.

$$Q_{t_0} - Q_{t_1} = V\rho\bar{c}(T_{kal} - T_m) - \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,1}} + c_{T_{x+1,1}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,1} + T_{x+1,1}}{2} - T_m \right) = \Delta Q_{t_0 t_1} \quad (60)$$

Rozdíl v akumulovaném množství tepla vznikl přestupem tepla do kaliciho media a to se dá vyjádřit rovnicí (61), kde $\Delta Q_{t_0 t_1}$ je teplo odvedené ze vzorku v časovém intervalu $t_0 - t_1$.

$$\Delta Q_{t_0 t_1} = \alpha_{T_{0,1}} S (t_1 - t_0) (T_{kal} - T_{0,1}) \quad (61)$$

Z rovnice (61) je pak možno určit součinitel přestupu tepla do ochlazovacího prostředí podle rovnice (62). [154]

$$\alpha_{T_{0,1}} = \frac{V\rho\bar{c}(T_{kal} - T_m) - \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,1}} + c_{T_{x+1,1}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,1} + T_{x+1,1}}{2} - T_m \right)}{S(t_1 - t_0)(T_{kal} - T_{0,1})} \quad (62)$$

Kde symboly v rovnicích (61) až (65) značí:

$\alpha_{T_{0,1}}$	– součinitel přestupu tepla pro teplotu $T_{0,1}$	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
$\bar{c}$	– měrné teplo pro teplotní interval $(T_{kal} - T_m)$	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
T_{kal}	– kalici teplota	[K]
T_m	– teplota kaliciho média	[K]
V	– objem tělesa $V = S \cdot L$	[m ³]
S	– plocha odvádějící teplo	[m ²]
L	– celková délka zkušebního tělesa	[m]
ρ	– hustota	[kg.m ⁻³]

$c_{T_{k,1}}$ – měrné teplo pro teplotu v čase t_1 a v místě k [J.kg⁻¹.K⁻¹]

c_m – měrné teplo pro teplotu T_m [J.kg⁻¹.K⁻¹]

$T_{x,1}$ – teplota v čase t_1 a v místě x [K]

h_x – velikost elementu tělesa [m]

Stejným metodickým postupem lze určovat součinitele přestupu tepla pro další časové intervaly, obecně do intervalu $t_{j-1} - t_j$. Rovnice (63) proto uvádí množství akumulovaného tepla v čase t_j a rovnice (64) v časovém okamžiku t_{j-1} . [154]

$$Q_{t_j} = \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,j}} + c_{T_{x+1,j}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,j} + T_{x+1,j}}{2} - T_m \right) \quad (63)$$

$$Q_{t_{j-1}} = \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,j-1}} + c_{T_{x+1,j-1}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,j-1} + T_{x+1,j-1}}{2} - T_m \right) \quad (64)$$

Následující rovnice (65) představuje teplo odvedené ze zkušební vzorku v obecném časovém období $t_{j-1} - t_j$.

$$\Delta Q_{t_j - t_{j-1}} = \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,j-1}} + c_{T_{x+1,j-1}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,j-1} + T_{x+1,j-1}}{2} - T_m \right) - \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,j}} + c_{T_{x+1,j}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,j} + T_{x+1,j}}{2} - T_m \right) \quad (65)$$

Rozdíl v akumulovaném množství tepla vznikl přestupem tepla do kalicího media v časovém intervalu $t_{j-1} - t_j$ a to se dá vyjádřit rovnicí (66), s následujícím zobecněním pomocí rovnice (67), která udává vztah pro výpočet součinitele přestupu tepla.

$$\Delta Q_{t_j - t_{j-1}} = \alpha_{T_{0,j}} S (t_j - t_{j-1}) (T_{0,j-1} - T_{0,j}) \quad (66)$$

$$\alpha_{T_{0,j}} = \frac{\sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,j-1}} + c_{T_{x+1,j-1}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,j-1} + T_{x+1,j-1}}{2} - T_m \right) - \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x S \rho \left(\frac{c_{T_{x,j}} + c_{T_{x+1,j}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,j} + T_{x+1,j}}{2} - T_m \right)}{S (t_j - t_{j-1}) (T_{0,j-1} - T_{0,j})} \quad (67)$$

Po úpravě rovnice (67) lze vykrácením přestupní plochou vzorku rovnici zobecnit tak, že v ní již figuruje pouze celková délka vzorku. Uvedeným postupem, rovnice (68), lze obdržet teplotní závislost součinitele přestupu tepla pro konkrétní typ materiálu a postup tepelného zpracování zkušební tělesa. Symboly použité v rovnicích (63) až (68) jsou identické s významem symbolů použitých v rovnicích (58) až (62). [154]

$$\alpha_{T_{0,j}} = \frac{\sum_{x=0}^{x=L-1} h_x \rho \left(\frac{c_{T_{x,j-1}} + c_{T_{x+1,j-1}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,j-1} + T_{x+1,j-1}}{2} - T_m \right) - \sum_{x=0}^{x=L-1} h_x \rho \left(\frac{c_{T_{x,j}} + c_{T_{x+1,j}} + 2c_m}{4} \right) \left(\frac{T_{x,j} + T_{x+1,j}}{2} - T_m \right)}{(t_j - t_{j-1}) (T_{0,j-1} - T_{0,j})} \quad (68)$$

Předpokladem pro možnost stanovení teplotní závislosti součinitele přestupu tepla pro daný materiál a podmínky ochlazování, je znalost teplotní závislosti měrného tepla a hustoty testovaného materiálu. Stanovení teplotní závislosti měrného tepla je realizováno pomocí kalorimetrických měření a teplotní závislost hustoty je stanovena nepřímo z testů při stanovení součinitele teplotní roztažnosti. V kapitole 3.1.1. je uvedena bližší specifikace obou veličin a v kapitole 3.1.3. je popsáno měření součinitele teplotní roztažnosti.

Způsob vyhodnocení popsáný rovnicemi (58) až (68) nelze samozřejmě provádět manuálně a v současné době se optimalizuje výpočetní software pro stanovení součinitele přestupu tepla na základě teplotních křivek získaných pomocí termočlánků TE1 až TE6. Na základě těchto výpočtů bude získána teplotní závislost součinitele přestupu tepla pro konkrétní materiál, ochlazovací médium a podmínky ochlazování.

Pro vyhodnocení tvrdosti vzorku a realizaci metalografických výbrusů je třeba zkušební těleso nejprve rozdělit ve směru délky blízko osové roviny. Osová rovina musí zůstat na části, na které se bude realizovat měření tvrdosti. Tato příprava může být provedena například rozříznutím pomocí metalografické pily. Při přípravě vzorků musí být zamezeno tepelnému ovlivnění vzorku. [154]

V ose vzorku bude provedeno měření tvrdosti podle Vickerse HV30 v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1. Vzdálenosti vtisků od ochlazované plochy budou obdobné jako u Jominyho zkoušky prokalitelnosti t.j., 1,5, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 a dále vždy po 5 mm. Výsledkem bude graf závislosti tvrdosti na vzdálenosti od čela vzorku.

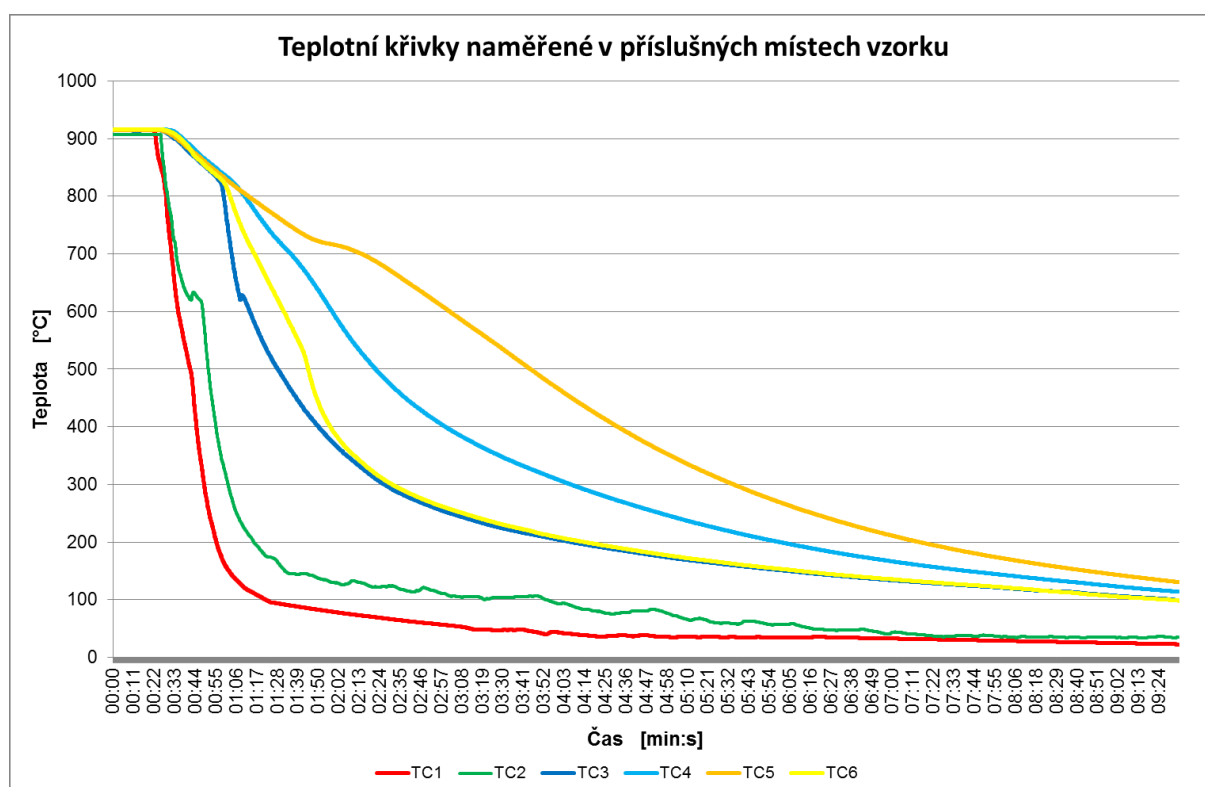
Pro metalografický rozbor je určena druhá část podélně rozděleného vzorku. V definovaných vzdálenostech od čela vzorku a také v místech umístění termočlánků lze kolmo na podélnou osu vzorku realizovat řezy určené k metalografickému vyhodnocení. Uvedené výsledky budou sloužit k verifikaci a případné modifikaci použitých výpočetních modelů.

9.4. Porovnání výsledků měření ochlazovací schopnosti média různými postupy

V této kapitole budou ukázány a porovnány způsoby ochlazování zkušební tělesa pomocí normalizovaného Quench testu, pomocí testu při kterém je realizován odvod tepla čelní plochou vzorku a zbytek povrchu vzorku předává teplo do okolí radiací a nakonec pomocí testu realizovaného podle nově navržené metodiky. Při stanovení ochlazovací schopnosti média pomocí Quench testu (ISO 9950:1995, ASTM D 6200-01) je měřicí sonda umístěna staticky v ochlazovacím médiu bez jeho pohybu. Z tohoto důvodu byly také zbylé testy realizovány bez pohybu ochlazovacího média. Cílem bylo ukázat, jak intenzivně se projeví přestup tepla do okolí (voda, vzduch) na změně ochlazovací rychlosti ve směru tloušťky při statických dějích.

Protože cílem bylo pouze porovnání vznikajících teplotních polí a teplotních gradientů, byla na zkušební vzorky o průměru 30 mm a délce 75 mm použita ocel P235GH. Zkušební tělesa

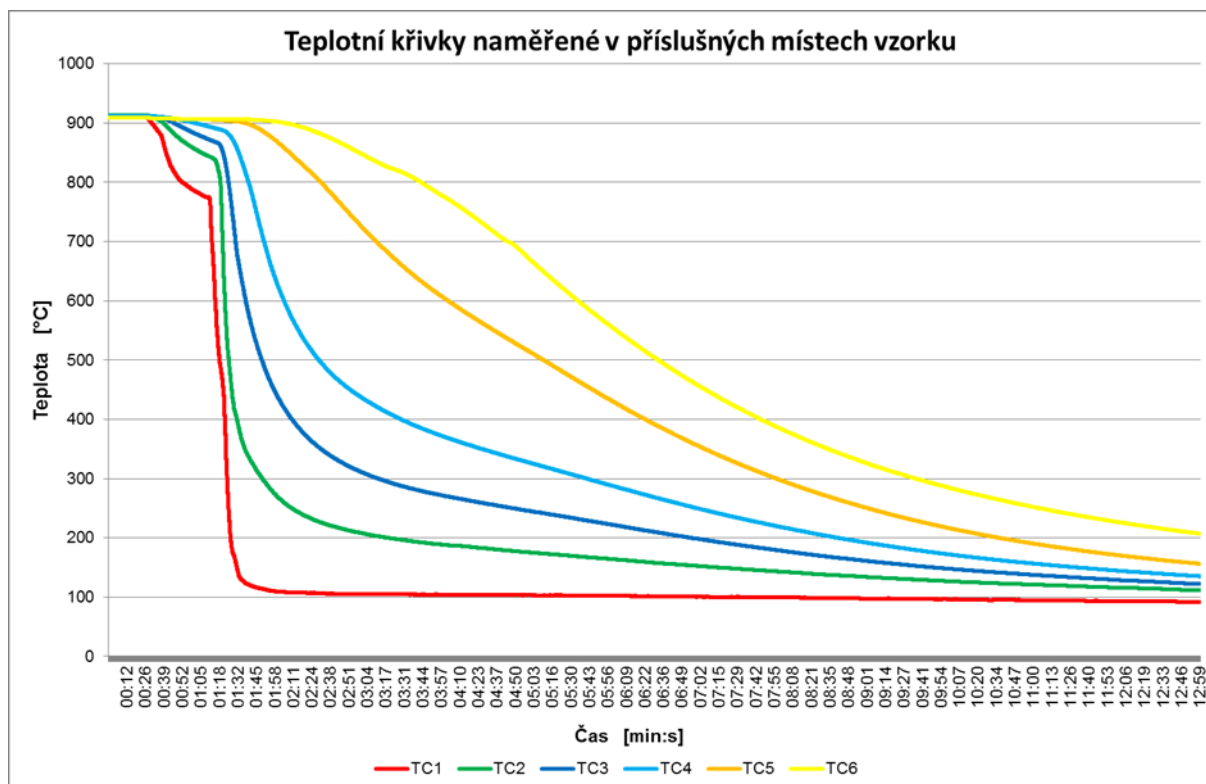
byla osazena 6 snímači teploty ve shodě s kapitolou 9.3.1. V prvním případě bylo termočlánky osazené, neizolované zkušební těleso předeřháto v peci na teplotu 915°C, s následnou výdrží na teplotě po dobu 30 minut. Po vyjmutí z pece bylo těleso ponořeno čelní plochou 1 mm pod vodní hladinu. Po celou dobu ohřevu, výdrže i ochlazování byla teplota vzorku snímána všemi termočlánky. Na obrázku 100 je ukázán průběh teploty zjištěný termočlánky pro jednotlivá definovaná místa. Z průběhu teplot je velmi zřetelný vliv sálání tepla do okolí a tudíž nerovnoměrný odvod tepla čelní plochou do kalícího média. Z tohoto důvodu bylo nejpomaleji ochlazováno místo měřené termočlánekem TE5 vzdálené od ochlazované plochy 52,5 mm. [153]



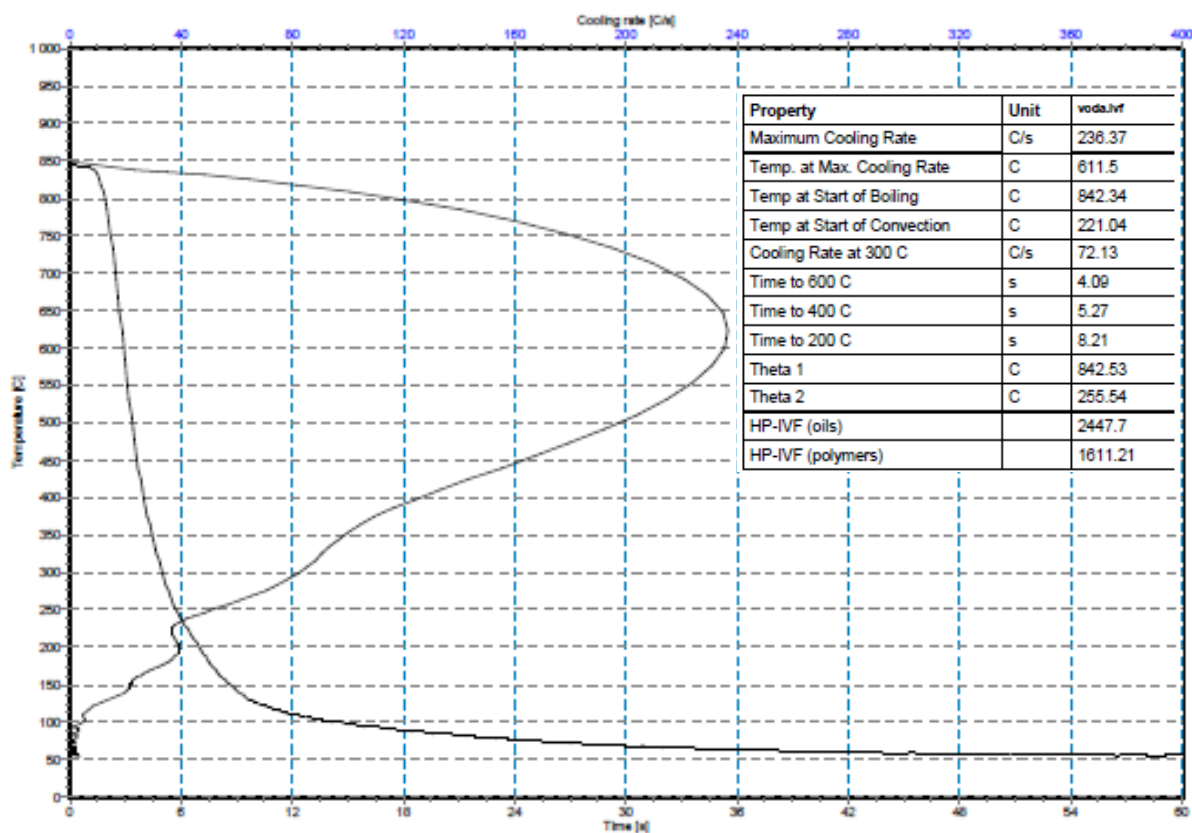
Obr. 100. Průběh teplotních křivek termočláneků TC1 až TC6 pro těleso bez izolace [153]

Ve druhém případě bylo identické zkušební těleso izolováno 35 mm izolační hmoty. Po předeřhání v peci na teplotu 915°C a výdrží na teplotě 30 minut bylo také toto zkušební těleso ponořeno čelní plochou 1 mm pod vodní hladinu. Z průběhu teplot (obr. 101) je zřejmá eliminace přestupu tepla do okolí a odvod tepla je realizován pouze čelní plochou. Teplo akumulované ve zkušebním tělese je vedením neustále předáváno čelní ploše, proto je také rychlost ochlazování čelní plochy pomalejší než v prvním případě.

Protože je metodika měření metodou Quench testu normalizovaná, byl test realizován pomocí aparatury Ivf SmartQuench, která automaticky generuje výsledné křivky teploty a rychlosti ochlazování. Výsledek uvedeného testu je ukázán na obrázku 102. Aparatura zároveň umožňuje vygenerovat číselné hodnoty rychlosti ochlazování.

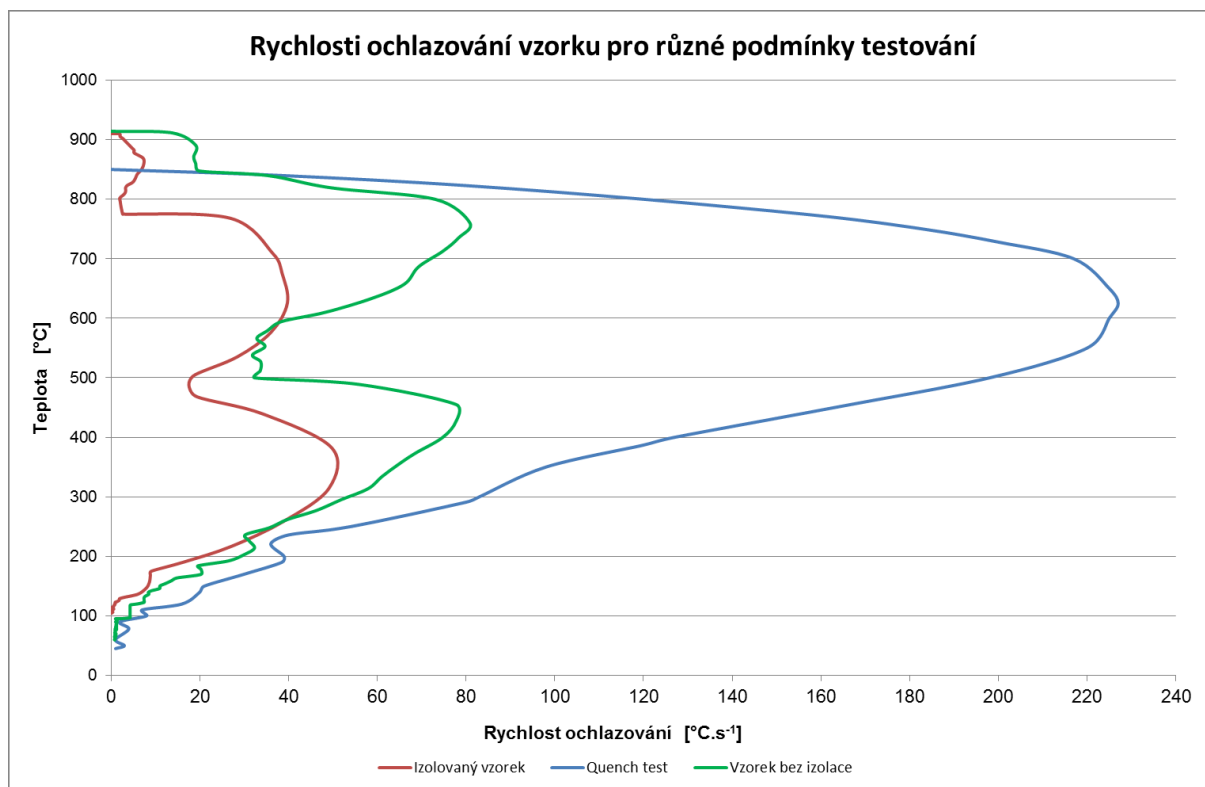


Obr. 101. Průběh teplotních křivek termočlánků TE1 až TE6 pro těleso s izolací [153]



Obr. 102. Quench test – automaticky generované křivky teploty a rychlosti ochlazování

Na obrázku 103 jsou porovnány rychlosti ochlazování čelní plochy (TE 1) zkušebního tělesa s izolací i bez izolace, s rychlostí ochlazování zjištěnou Inconelovou sondou při normovaném Quench testu.



Obr. 103. Rychlost ochlazování čelní plochy zkušebního tělesa bez izolace – zelená barva; zkušebního tělesa s izolací – červená barva a Inconelové sondy – modrá barva [153]

Z obrázku 103 je zřejmý značný rozdíl v rychlosti ochlazování mezi malou inconelovou sondou průměru 10 mm, která je ze všech stran obklopena ochlazovacím médiem a mezi reálnými zkušebními vzorky. Z tohoto důvodu není vhodné používat normovaný Quench test ke stanovení jiných veličin měření než je vzájemné porovnávání ochlazovací schopnosti různých typů kalících médií, případně ke stanovení změny ochlazovací schopnosti média v průběhu jeho používání. Z obrázku je také zřejmý značný vliv odvodu tepla radiací z povrchu neizolovaného zkušební vzorku. Ke stanovení teplotní závislosti součinitele přestupu tepla mezi zkušebním tělesem a ochlazovacím médiem, je proto vhodné použít právě popsanou metodiku, zvláště při simulacích kalení výrobků větších tloušťek. [153]

9.5. Diskuze dosažených výsledků

Úkolem tepelného zpracování je získání požadovaných vlastností zpracovávaného výrobku, závisících na dosažení optimálních rozpadových struktur. U rozměrných a tvarově složitých výrobků je velice obtížné volit vhodná ochlazovací prostředí, případně podmínky ochlazování tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností v celém průřezu výrobku. Navíc v tepelně

zpracovávaných dílech vznikají z důvodu nerovnoměrných teplotních gradientů značná vnitřní napětí vedoucí k deformacím, nebo až ke vzniku prasklin. Numerické simulace mohou pomoci nalézt takové postupy tepelného zpracování, které uvedená nebezpečí částečně, nebo zcela eliminují. K tomu je ale zapotřebí získat relevantní vstupní údaje stanovené za přesně definovaných podmínek.

V současnosti jsou vhodné ochlazovací rychlosti, respektive vhodná ochlazovací prostředí stanovena pro výrobky jednoduchých tvarů pomocí rovnic (52) až (57) a pomocí diagramu na obrázku 93. Takovýto postup je však jen obtížně aplikovatelný na výrobky složitějších tvarů. Výsledky získané uvedeným způsobem také nedávají žádnou představu o vzniku a průběhu napjatostí během procesu. Navíc jsou obecně definovány pouze pro základní ochlazovací prostředí (voda, olej, vzduch) bez dalšího rozlišení ochlazovacích schopností v rámci každého prostředí (intenzita vodní sprchy, různé typy kalících olejů, klidný nebo proudící vzduch atd.).

Nově navržená metodika je určena ke stanovení teplotní závislosti součinitele přestupu tepla na rozhraní materiál – ochlazovací médium, s ohledem na typ ochlazovacího prostředí, druh základního materiálu a velikost (přesněji řečeno maximální tloušťku) kaleného předmětu. Tímto způsobem získaná vstupní data umožňují velice přesně simulovat teplotní pole i v rozměrných a tvarově složitých výrobcích. Na základě metodických postupů jsou zároveň získány údaje pro verifikaci výsledných struktur a hodnot tvrdostí v tepelně zpracovávaném tělese. To umožňuje následnou verifikaci a případně i modifikaci výpočetního modelu.

V současnosti se ve světě používá k určení ochlazovacích vlastností média tzv. „Quenchtest“ realizovaný v souladu s normami ISO 9950:1995, ASTM D 6200-01 a ASTM D 6482-99. V české republice však doposud neexistují harmonizované normy pro uvedený způsob měření. Z hlediska numerických simulací tepelného zpracování je problematický také fakt, že „Quenchtest“ hodnotí pouze ochlazovací schopnost prostředí, případně změny ochlazovací schopnosti média v závislosti na době a frekvenci používání. Kromě toho je test definován pouze pro inconelovou měřicí sondu a nezohledňuje tak ani vliv ochlazování na konkrétní materiál, ani rozměr reálně zpracovávaného tělesa. Neumožňuje také přesnou simulaci pohybu ochlazovaného dílu v ochlazujícím médiu.

Nově navržený metodický postup je založen na definování teplotní závislosti součinitele přestupu tepla ze zkušební vzorku do ochlazovacího média a to pro konkrétní prostředí a konkrétní testovaný materiál a podmínky ochlazování. Navíc umožňuje na relativně malém zkušebním vzorku velice dobře popsat teplotní gradienty vznikající ve směru maximální tloušťky reálně zpracovávaného dílu. Na základě metalografického rozboru lze také pro naměřené ochlazovací křivky určit typ dosažené struktury zkoumaného materiálu, nebo hodnoty tvrdosti v libovolné vzdálenosti od ochlazovaného povrchu. Jako ochlazovací

prostředí mohou být použity veškeré kapaliny, polymerní lázně, ale také klidný, nebo proudící vzduch. Díky nově navrženému zkušebnímu zařízení [155] je také možné přesně specifikovat okrajové podmínky experimentu tak, aby odpovídaly podmínkám při reálném tepelném zpracování rozměrných a tvarově složitých dílů.

Způsob aplikace popsané metodiky byl v této práci prezentován na materiálu P235GH, který však není primárně určen k tepelnému zpracování rozměrných dílů. Důvodem byla nemožnost použití výsledků získaných na ocelích G18NiMoCr3-6 [157] a 30CrNiMo8, protože uvedená měření byla realizována pro průmyslové partnery v rámci komerčních zakázek. Ovšem i na výsledcích rychlostí ochlazování ve vodě, realizovaných na materiálu P235GH pro neizolovaný vzorek, vzorek testovaný podle nové metodiky a pro vzorek ochlazovaný v souladu s normou ISO 9950:1995, ASTM D 6200-01 metodou „Quenchtest“, jsou zřejmé nesporné výhody nově navržené metodiky [153].

Na konci roku 2015 byl udělen patent číslo 305469 na zkušební zařízení „Simulátor tepelného zpracování“ vycházející z popsaných metodických postupů. V současné době se staví kompletní prototyp uvedeného zařízení. Jeho dílčí komponenty jsou však již nyní využívány k experimentálnímu testování podle navržené a certifikované metodiky.

10. Závěr

Předkládaná habilitační práce poskytuje hlubší poznatky teoretického i experimentálního charakteru v oblasti numerických simulací tavného svařování a tepelného zpracování. Je zaměřena do oblasti návrhu, realizace a následné verifikace nových metodických postupů vedoucích k získání relevantních vstupních dat pro numerické simulace svařování a tepelného zpracování, aplikovatelných především na středně a vysokolegované materiály využívané v energetickém průmyslu. Důvodem zaměření této práce je absence spolehlivých numerických modelů využitelných pro uvedený typ ocelí a predikujících s dostatečnou přesností odezvu materiálu na teplotně-napěťové zatěžování. Absence výpočetních modelů je způsobena zejména složitostí popisovaných dějů a vysokými nároky na množství a kvalitu použitých vstupních údajů. Tyto údaje je třeba získat nejen v celé šíři uvažovaného teplotního intervalu daného zpravidla teplotou okolí a teplotou tavení použitých materiálů, ale musí být získány ještě zvlášť pro každou z uvažovaných metalurgických fází. Navíc je třeba uvažovat změny, k nimž dochází u jednotlivých materiálů při jejich provozním zatížení.

Jak bylo v předložené práci ukázáno, numerické simulace mohou sloužit nejen k optimalizaci výrobních postupů, ale mohou pomoci lépe pochopit děje, k nimž dochází v materiálu při technologickém zpracování. To jak účinným pomocníkem budou, však závisí pouze na schopnostech a znalostech pracovníků připravujících vstupní a verifikační údaje a optimalizujících výsledné výpočetní modely. Čím přesněji a podrobněji se podaří definovat okrajové podmínky při experimentálních měřeních a následných definicích výpočetních modelů, tím univerzálněji bude moci být vytvořený simulační model v budoucnosti využíván. Navržené, popsání a experimentálně odzkoušené metodické postupy uvedené v této práci k tomu mohou výrazně přispět.

Práce je koncipována tak, aby bylo zřejmé, jaká vstupní data jsou nezbytná pro daný typ numerických analýz a jakým způsobem je možné tato data experimentálně získat a následně aplikovat. Po úvodu definujícím hlavní směry výzkumu a aplikačních analýz v oblasti numerických simulací svařování a tepelného zpracování, je teoretická část věnována zejména popisu vstupních dat využitelných při teplotně-metalurgických i mechanických analýzách. Z provedených rešerší a rozboru a popisu problematiky vstupních dat, vyplynula značná neucelenost metodik a postupů v současnosti používaných při získávání a ověřování uvedených dat. To vedlo k definování hlavních cílů předložené práce. Protože je oblast numerických simulací svařování a tepelného zpracování velice široká a nelze ji celou pojmut jako jeden celek, byla experimentální část práce zaměřena do tří hlavních oblastí týkajících se simulací růstu zrna, získávání vstupních a verifikačních dat při jednoznačném definování okrajových podmínek při svařování s předehřevem a bez předehřevu a do oblasti

tepelného zpracování popisujících děje, k nimž dochází na rozhraní ochlazovaný vzorek – médium.

Každá z uvedených oblastí byla řešena samostatně a to od popisu teoretických základů přes návrh metodických postupů a řešení, až po tvorbu simulačního modelu a experimentální ověření výsledků dosažených uvedenými postupy. Zároveň byly navržené metodické postupy konfrontovány s doposud využívanými řešeními, tak aby byly zřejmé výhody z nich plynoucí ať již z hlediska výsledné přesnosti, nebo z hlediska následné aplikovatelnosti nově vytvořených modelů.

Mezi nejvýznamnější výsledky této práce patří mimo již zmíněných metodických postupů získané hodnoty aktivačních energií Q a křivek kinetiky růstu zrna pro materiály HR3C, S304H, TP347HFG, P92 a P/T24. Dále vytvoření nového pracoviště pro získávání vstupních údajů pro numerické simulace svařování, návrh přípravků pro svařování s předeřevem i bez předeřevu při znalosti podmínek pro přestup tepla a nové vzorce lépe predikující hodnoty tvrdosti martenzitických a bainitických struktur u středně a vysokolegovaných materiálů. Neméně důležité jsou navržené a experimentálně ověřené postupy umožňující použití malých vzorků pro popis teplotních gradientů a strukturních změn, k nimž dochází při tepelném zpracování rozměrných výrobků.

Přestože se zdá, že byla experimentální část věnována třem zdánlivě odlišným oblastem, jejichž výsledky spolu nesouvisí, opak je pravdou. Výsledky dosažené v jednotlivých oblastech jsou aplikovatelné i na ostatní uvedené oblasti. Například metodické postupy vedoucí ke stanovení velikosti zrna jsou využívány jak při simulacích svařování, tak také při simulacích tepelného zpracování. Navíc hodnoty experimentálně zjištěné aktivační energie růstu zrn jsou součástí tzv. parametru popouštění p využívaného při simulacích popouštění následujících po kalení. Rovněž nově vytvořené rovnice predikující tvrdost jsou využívány ve všech zmiňovaných oblastech a modely tepelného zpracování odvozené na základě nově navržené metodiky lze použít při celkových analýzách svařování martenzitických a bainitických ocelí, ať již při definování strukturních podílů ve specifikovaných místech vzorku realizovaných před vlastním svařováním, tak při následném tepelném zpracování svarů.

Výsledky představené v této práci však mají význam nejen pro oblast numerických simulací, ale také pro celý obor strojírenské technologie a to jak z teoretického, tak také z praktického hlediska. Vytvořené metodické postupy totiž mohou být aplikovány i na další technologické obory jako je například slévárství nebo objemové tváření, u nichž jsou využívány vysoké teploty, při nichž vznikají nestacionární teplotní pole a tedy i teplotní gradienty.

Z teoretického hlediska jsou významné jak nově získané vzorce pro výpočet tvrdosti u středně a vysokolegovaných žárupevných a žáruvzdorných ocelí, tak postupy jakými jich bylo dosaženo. Díky tomu bude do budoucna možné uvedené vzorce dále zpřesňovat,

případně rozšířit pole jejich aplikačního využití. Také výpočetní modely navržené a matematicky popsané díky nové metodice stanovení součinitele přestupu tepla do ochlazovacího média umožní řešit vliv teplotních gradientů na hodnoty deformací a vnitřních pnutí u tvarově složitých a rozměrných výrobků. S tím souvisí možnost tvorby nových, přesnějších matematických popisů modelů simulovaných procesů a díky tomu lepší teoretické pochopení probíhajících dějů

Z praktického hlediska jsou významné experimentálně potvrzené postupy svařování a tepelného zpracování u materiálů 10GN2MFA a X22CrMoV12-1 a pomocí nich vytvořené simulační modely, opakovaně využité firmou Mecas ESI, s.r.o. při řešení komerčních zakázek. Důležité je však především to, že metodické postupy vytvořené a odzkoušené na obou uvedených materiálech mohly být a byly využity při realizaci experimentů vedoucích k získání příslušných dat a k tvorbě výpočetních modelů i pro další materiály využívané v energetickém průmyslu, jako jsou například oceli X10CrWMoVNb9-2, ASTM A705-typ 630, 22CrMoNiWV8-8, nebo 16Mo3. Výsledky dosažené pomocí popsanych postupů na uvedených materiálech jsou v současnosti již také úspěšně aplikovány při optimalizaci postupů svařování, případně při opravách rozměrných konstrukčních celků ve firmách Siemens Turbomachinery (ČR), General Electric (Itálie), Izhora (Rusko). O tom, že uvedené postupy získávání vstupních dat jsou aplikovatelné i do dalších oborů, svědčí zájem o tuto problematiku od společností jako je MAGMA GmbH vyvíjející software pro oblast slévárenství, nebo společnosti Dynamic System Inc. produkující teplotně-napěťové simulátory.

Zpracované teoretické podklady a praktické výsledky práce mají svůj význam také pro oblast výuky a dalšího výzkumu. Problematika svařování a tepelného zpracování žárovečných a žáruvzdorných materiálů s podporou simulačních programů je velice aktuální a je řešena jak pomocí grantových, případně interních podnikových projektů, tak také zprostředkovaně pomocí bakalářských, diplomových, nebo disertačních prací. Díky tomu mohou být (a v současnosti na TUL a VUT jsou) uvedené postupy aplikovány při řešení diplomových a disertačních prací. Oblast aplikačního využití uvedených postupů (v oblasti svařování) byla rozšířena i na oblast neželezných kovů reprezentovaných například Al a jeho slitinami, Ti a jeho slitinami, nebo slitinami Ni.

Snahou autora předkládané habilitační práce bylo navrhnout, sjednotit a metodicky popsat postupy využitelné při přípravě experimentů vedoucích k definování a získání vstupních a případně i verifikačních dat využitelných při simulacích svařování a tepelného zpracování. Uvedené principy jsou primárně určeny uživatelům komerčních simulačních programů v oblasti svařování a tepelného zpracování. Měly by však být snadno aplikovatelné i pro uživatele programů, které nejsou primárně určeny k simulacím svařování a tepelného

zpracování jako jsou Ansys, nebo Abaqus, případně v ostatních technologických zaměřeních pracujících s teplotními gradienty. Měly by napomoci také ve vytváření nových simulačních modelů aplikovatelných na široké spektrum numerických analýz.

V rámci problematiky řešené v této práci bylo publikováno celkem 9 publikací v časopisech a na konferencích zařazených do databází Scopus a WoS a byly vydány 2 odborné knihy. Dále byly podány 3 přihlášky užitných vzorů a dvě přihlášky patentů, přičemž dva užité vzory a jeden patent již byly uděleny. Mimo to byly realizovány 2 ověřené technologie pro firmy Vítkovice Heavy Machinery a.s. a TEN Slovakia, jedna certifikovaná metodika, jeden software pro generování vstupních dat numerických simulací vybraných žárovevných a žáruvzdorných ocelí a 3 funkční vzory.

Seznam použité literatury

- [1] MORAVEC, J., SOBOTKA, J., BRADÁČ, J.: Numerical Simulations Utilization for Welding Hardly Weldable Materials Based on Iron Aluminides. TUL Liberec 2010.
- [2] MORAVEC, J.: Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách. TUL Liberec 2011. Odborná kniha, 102 s.
- [3] DEBROY, T.: Mathematical Modelling of Fluid Flow and Heat Transfer in Fusion Welding. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 5. 2001 London. Str. 1 -20.
- [4] SALDI, Z. S., ZHAO, C., KENJERES, S., RICHARDSON, KLEIJN, R.: Numerical and Experimental Studies of Free Surface Flow Reversals in Liquid Steel Welding Pool. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 9. 2010 Graz. Str. 21 - 34.
- [5] HONG, K., WECKMAN, D. C.: The Predicted Influence of Turbulence in Stationary GTAW. In. Trends in Welding Research. ASM International, Materials Park, OH, 1996. Str. 399 – 404.
- [6] LAUNDER, B. E., SPALDING, B.D.: Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, New York, NY. 1972.
- [7] ALALUSS, K., BURKNER, G., NGUYEN-CHUNG, T., GEHDE, M., MENNIG, G.: Simulation of Weld Pool in Plasma-MIG Deposition Welding. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 9. 2010 Graz. Str. 93 - 110.
- [8] STRUSEVICH, N. V., PERICLEOUS, K., HUGHES, M.: Characterisation of Weldpool Shapes in the Laser Welding of Thick Plates. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 6. 2002 London. Str. 83 - 92.
- [9] EL-KADDAH, N., ARENAS, M., ACOFF, V. L.: Heat Transfer and Fluid Flow in Stationary GTAW of γ -TiAl Based Alloys. In. Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia 1999. Str. 417 – 422.
- [10] THREADGILL, P.: The Prospects for Joining Titanium Aluminides. Material Science Engineering. A 192/193, 1995. Str. 640 – 646.
- [11] NEUMANN. H., MORAVEC, J., BRADAC, J.: Iron Aluminides Ultimate Thermal and Strain Effects. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 9. 2010 Graz. Str. 1035 - 1044.
- [12] HEIPLE, C. R., ROPER, J. R.: Welding Journal Res. Suppl., 1982, 61, Str. 92 – 101.
- [13] PITSCHENEDER, W., DEBROY, T., MUNDRA, K., EBNER, R.: Welding Journal Res. Suppl., 1996, 75 (3), Str. 71 – 80.
- [14] PAUL, A. J., DEBROY, T.: Metall. Trans. B, 1998, 19B, Str. 851 – 858.
- [15] DEBROY, T.: Mathematical Modelling of Weld Phenomena 2, The Institute of Materials, London, England, 1995, Str. 3 – 21.
- [16] PATON, B. E.: Welding in Space. Welding Engineering 57. 1972. Str. 25 – 29.
- [17] FUJII, H., AOKI, Y., NOGI, K.: Welding in Microgravity Environment – Bubble Behaviour. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 5. 2001 London. Str. 21 - 37.

- [18] DUPONT, J. N., MARDER, A. J.: Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. Welding Journal December 1995. Str. 406 – 416.
- [19] LIMMANEEVICHITR, C., KOU, S.: Experiments to Simulate Effect of Marangoni Convection on Weld Pool Shape. Welding Journal. Juli 2000. 79(8).
- [20] LIMMANEEVICHITR, C., KOU, S.: Visualization of Marangoni Convention in Simulated Weld Pools Containing a Surface-Active Agent. Welding Journal. November 2000. 79(11).
- [21] ROGER, F., COIFFIER, J. C., DANG VAN, K.: Modelling the Electromagnetic Force Distribution in a Three Dimensional GMAW Weld Pool. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 5. 2001 London. Str. 123 - 134.
- [22] TSAI, C., KOU, S.: Electromagnetic-force Induced Convention in Weld Pools with Free Surface. Welding Journal. 1990. Str. 241 – 246.
- [23] YANG, Z., DEBROY, T.: Metallic Material Transfer, B 30, 1999. Str. 483 – 493.
- [24] POKHODNYA, I. K., PORTNOV, O. M., SHVACHKO, V. I.: Computer Modelling of Gas Partition between the Weld Metal and its Plasma Enviroment. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 5. 2001 London. Str. 123 - 134.
- [25] Reference manual – Sysweld 2009 – Metallurgical Transformation Model. Str. 3 – 56.
- [26] SAHOO, P., COLLUR, M. M., DEBROY, T.: Metallurgical Transfer. B, 1988, 19B, Str. 967–972.
- [27] MORAVEC, J.: Analýza kritických míst svařovacího procesu na základě simulací v program SYSWELD. Disertační práce. TU v Liberci 2008.
- [28] POTTS, R. B.: Some generalized order-disorder transformations. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 48:106, 1952.
- [29] ANDERSON, M.P., SROLOVITZ, D.J., GREEST, G.S., SAHNI, P.S.: Computer simulation of grain growth - 1. Kinetics. Acta Metallurgica, Volume 32, Issue 5, May 1984, p. 783–791.
- [30] Metoda Monte Carlo. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_Monte_Carlo
- [31] Pseudonáhodná čísla. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Pseudon%C3%A1hodn%C3%A1_%C4%8D%C3%ADsla
- [32] YUE, CH., ZHANG, L., LIAO, S., GAO, H.: Kinetic Analysis of the Austenite Grain Growth in GCr15 Steel. Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 19, no. 1, pp. 112-115, February 2009.
- [33] GIUMELLI, A.: Austenite Grain Growth Kinetics and the Grain Size Distribution Dostupné z: http://circle.ubc.ca/bitstream/handle/2429/3572/ubc_1995-0157.pdf?Sequence=1
- [34] MORHAC, M., MORHACOVA, E.: Crystal Research Technology, 35, 2000, Str. 117.
- [35] TIKARE, V., CAWLEY, J. D.: Journal American Ceramic Society. 81, 1998, Str. 485.
- [36] CAHN, J. W., HOLM, E. A., SROLOVITZ, D. J.: Material Science Forum 94-96. 1992, Pages. 141.

- [37] OLEVSKY, E. A., BORDIA, R.: Advances in Sintering Science and Technology: Ceramic Transactions. 2010. Str. 103 – 107.
- [38] PASTOR, M., ZHAO, H., DEBROY, T.: Proceeding of the Indian National Welding Seminar, '97, Bangalore, India, 1997, Indian Institute of Welding, Str. 31 – 46.
- [39] JONSSON, P. G., EAGAR, T. W., SZEKELY, J.: Metallic Materials. Trans. B, 1995, 26B, Str. 383 – 395.
- [40] PALMER, T. A., DEBROY, T.: Modeling of Nitrogen Dissolution during GTA Welding of Iron and Steels. Mathematical Modelling of Weld Phenomena 5, IOM Communications Ltd, London, 2001, Str. 95 – 122.
- [41] SAHOO, P., COLLUR, M. M., DEBROY, T.: Metall. Trans. B, 1988, 19B, Str. 967 – 972.
- [42] TAKAHASHI, M., BHADESHIA, H. K. D. H.: Mater. Trans., JIM, 1991, 32 (8), Str. 689.
- [43] DONG, P., HONG, J. K., ROGERS, P.: Analysis of Residual Stresses in Al-Li Repair Welds and Mitigation Techniques. Welding Journal, 1998, 77 (11).
- [44] GUTIERREZ, A., LIPPOLD, J. C.: A Proposed Mechanism for Equiaxed Grain Formation along the Fusion Boundary in Al-Cu-Li Alloys. Welding Journal, 1998, 77 (3), Str. 123 - 132.
- [45] DYE, D., ROBERTS, S. M., REED, R. C.: Modeling of the Mechanical Effects Induced by the TIG Welding of the IN718 Superalloy. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 23A (7). Str. 1713 - 1725.
- [46] STONE, H. J., ROBERTS, S. M., REED, R. C.: A Process Model for the Distorsion Induced by the EB Welding of a Nickel-base Superalloy. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 31A (9). Str. 2261 - 2273.
- [47] VEGTER, G. H., OUDEN, G.: Calculation of Residual Stresses in $ZrO_2/Ni/ZrO_2$ and $ZrO_2/Ni/AISI\ 316$ Diffusion Bonds. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 5. 2001 London. Str. 615 - 625.
- [48] POKORNÝ, J.: Numerická simulace tepelného zpracování desek z materiálu 2.25Cr1Mo0.25V. Technická zpráva č. M_Z_13_022_r01 projektu TA02010992. 2013 Plzeň. Str. 2 - 38.
- [49] BEJVL, J.: Numerická simulace svařování desek z materiálu X22CrMoV12-1. Technická zpráva č. M_Z_13_011_r01 projektu TA02010992. 2013 Plzeň. Str. 2 - 35.
- [50] SLOVACEK, M., KIK, T.: Simulace svarového spoje z oceli P92. Technická zpráva č. M_Z_13_020_r01 projektu TA02010992. 2013 Plzeň. Str. 2 - 32.
- [51] SERIZAWA, H., NAKAMURA, S., MURAKAWA, H.: Numerical Analysis of Mechanical Restraint on Residual Stress in Thick Plate Welding by Using EB. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 9. 2010 Graz. Str. 415 - 426.
- [52] WEN, S. W.: Finite Element Modelling of Residual Stresses and Distorsion in SAW Welds. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 6. 2002 London. Str. 719 - 730.

- [53] PIRCH, N., KREUTZ, E. W.: Front Tracking Thermomechanical Model for Transient Stresses During Laser Welding. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena* 6. 2002 London. Str. 629 - 650.
- [54] SAFTA, V., FOGARASSY, P.: Stress Concentration of the Lap Welded Joints. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena* 5. 2001 London. Str. 627 - 634.
- [55] COURTIN, S., ROBIN, V., GILLES, P., OHMS, C.: Residual Stress and Shrinkage Predictions on 14" Narrow Gap Dissimilar Metal Welds. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena* 9. 2010 Graz. Str. 651 - 665.
- [56] UNFRIED, J. S., FONSECA, E. B., AFONSO, C. M. R., RAMIREZ, A. J.: Numerical Modeling and Experimental Analysis During Weld Solidification of Ni-Cr-Fe Alloys with Hf Additions. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena* 9. 2010 Graz. Str. 983 - 996.
- [57] NOECKER, F.F., DUPONT, J. N.: Metallurgical Investigation into Ductility Dip Cracking in Ni-based Alloys. *Welding Journal* 2009. 88 (3). Str. 62 - 77.
- [58] COLLINS, M.G., RAMIREZ, A. J., LIPPOLD, J. C.: An Investigation of Ductility Dip Cracking in Ni-based Weld Metal. *Welding Journal* 2004. Vol. 83. Str. 39 - 49.
- [59] AGELARIDOU, A., DOUMANIDIS, C.: Infra-red Pyrometry-aided Adaptation in Microstructural Simulation of Stainless Steel Plasma Arc Welding. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena* 5. 2001 London. Str. 767 - 782.
- [60] HEROLD, H., STREITENBERGER, M., PCHENNIKOV, A.: Modeling of the PVR-test to Examine the Origin of Different Hot Cracking Types. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena* 5. 2001 London. Str. 783 - 792.
- [61] POKHODNYA, I. K., SHVACHKO, V. I., KOTRECHKO, S. A., MESHKOV, Y. Y.: A New Method for Quantitative Determination of Sensitivity of Steels to Hydrogen Embrittlement. *International Journal Material Science*, 1999, 34(4). Str. 538 - 543.
- [62] POKHODNYA, I. K., SHVACHKO, V. I., PORTNOV, O. M.: Computer Modelling of Hydrogen Absorption by Electrode Metal Drop Under Intensive Evaporation. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena* 6. 2002 London. Str. 895 - 902.
- [63] BOELLINGHAUS, T.: Modeling of Hydrogen Diffusion and Cracking in Steel Welds. *Mathematical Modeling of Weld Phenomena* 5. 2001 London. Str. 1019 - 1059.
- [64] SONG, M., KOVACEVIC, R.: Thermal Modeling of FSW in Moving Coordinate System and its Validation. *International Journal of Machine Tool and Manufacturing*. 2003,43(6) Str. 605 - 615.
- [65] ZHANG, H., ZHANG, Z.: Numerical Modeling of FSW Process by Using Rate-dependent Constitutive Model. *Journal of Materials Science and Technology*. 2007, 23(1). Str. 73 - 80.
- [66] ZHANG, J., MURAKAWA, H.: FEM Simulation of the Spot Welding Proces. *Transactions of JWRI* Vol. 27, No. 2. 1998. Str. 73 - 79.

- [67] ROBIN, V., SANCHEZ, A., DUPUY, T., SOIGNEUX, J., BERGHEAU, J. M.: Numerical Simulation of Spot Welding with Special Attention to Contact Condition. Mathematical Modeling of Weld Phenomena 6. 2002 London. Str. 997 - 1017.
- [68] MORAVEC, J., MORAVEC, M.: Modification of Double-ellipsoid Heat Source Model by Simplex Method. Recenzovaný časopis ACC Journal XVIII 2012. Str. 41-47. ISSN 1803-9782.
- [69] Reference Manual – SYSWELD 2006 – Isotropic Linear Elasticity, s. 1194-1198.
- [70] Reference Manual – SYSWELD 2006 – Anisotropic Linear Elasticity, s. 1199-1201.
- [71] MORAVEC, J., BRADAC, J.: Možnosti a využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů. TUL Liberec 2014. Odborná kniha, 105 s.
- [72] OGDEN, R.W.: Nonlinear Elastic Deformations, Ellis Horwood Ltd., West Sussex, England, 1984.
- [73] RICHTR, T., SLOVACEK, M., TEJC, J.: Materiálové modely - numerická predikce tvrdosti, meze kluzu a meze pevnosti. Technická zpráva č. M_Z_13_023_r01 projektu TA02010992. 2013 Brno. Str. 3 - 52.
- [75] Dostupné z: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/landing-pages/thermal-conductivity-diffusivity/lfa-method.html>
- [76] MORAVEC, J.: Influence and choice of heat transfer coefficient by welding simulations of temperature fields. Recenzovaný časopis ACC Journal XVI 2010. Str. 32 – 39. ISSN 1803-9782.
- [77] KVASNICA, J.: Termodynamika, SNTL/ALFA Praha, 1965.
- [78] DIVIŠ, V.: Numerické analýzy MKP v oblasti technologie svařování. Disertační práce, Fakulta strojního inženýrství, VUT Brno, 2007.
- [79] MORAVEC, J.: Analýza kritických míst programem MOVYPRO 07 na základě simulací v programu SYSWELD. Odb. Kniha, Liberec 2008, 101 s. ISBN 978-80-7372-403-0.
- [80] NOVÁ, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách. TUL Liberec, 2003.
- [81] MORAVEC, J.: Mesh Density Effect of 3D Models on the Temperature Fields Computation by Sysweld Programme. In. 6th International Conference. University of Miskoltz, Hungary 2007. s. 89 – 94. ISBN 978-963-661-783-7 O, ISBN 978-963-661-779-0.
- [82] HALD, J.: Development status and future possibilities for Martensitic creep resistant steels, Materials for Advanced Power Engineering, 2010, pp. 55–66.
- [83] ABSON, D. J., ROTHWELL J. S., CANE, B. J.: Advances in welded creep resistant 9-12%Cr steels. Dostupné z: <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/advances-in-welded-creep-resistant-9-12cr-steels-october-2007/>

- [84] MAENPAA, L., KLAUKE, F., TIGGES K.D.: Material Aspects of a 700°C Power Plant. Dostupné z: http://www.hitachipowersystems.us/supportingdocs/forbus/hpsa/technical_papers/Material_aspects_of_a_700_C_Power_Plant_4.pdf
- [85] Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/informace-o-typech-reaktoru/typy-reaktoru/>
- [86] NEUMANN, H.: Materiály pro energetické strojírenství, Technická zpráva TUL-Z-12-RČ-01. Liberec 2012. 48 stran.
- [87] IMOA (International Molybdenum Association). Dostupné z: http://www.imoa.info/moly_uses/moly_grade_alloy_steels/irons/high_temperature_steel.php
- [88] VISWANATHAN, R.: Boiler Materials for USC Plant. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/materials/Viswanathan.pdf>
- [89] Podklady firmy Arcraft Plasma. Dostupné z: <http://www.arcraftplasma.com/welding/weldingdata/filtermetal.htm>
- [90] CUI, S., ZHANG, Z., XU, Y., LI, J., XIAO, X., ZHU, CH.: Improvement of Stress-rupture Life for Modified Austenitic Stainless Steel-HR6W. Science Direct. J. Mater. Sci. Technol., 2011, 27(11), 1059-1064.
- [91] POUCHON, M. A., M. Döbeli, R. Schellendorfer, J. Chen, W. Hoffelner, C. Degueldre: ODS steel as Structural Material for High Temperature Nuclear Reactors. Dostupné z: http://people.web.psi.ch/pouchon/Conferences/20040906_XVI-ICPRP_Alushta/Paper/Pouchon_2004_ODS-steel-as-Structural-Material-for-High-Temperature-Nuclear-Reactors.pdf
- [92] Afrox Product Reference Manual - Welding Consumables - Low Alloy Steels. Dostupné z: http://www.afrox.co.za/internet.global.corp.zaf/en/images/Section_12_Welding_Low_Alloy266_27352.pdf
- [93] MORAVEC, J., ČERNOHORSKÝ, J., NOVÁKOVÁ, I.: Zařízení ke sledování stavu tepelně zpracovávaného výrobku v průběhu jeho zpracování. Užitečný vzor č. 25071, Datum zápisu: 14.3.2013.
- [94] PLUHAŘ, J., KORITTA, J.: Strojírenské materiály. Praha 1966. SNTL/SVTL.
- [95] HRIVŇÁK, I.: Teória zvariteľnosti kovov a zliatin. Bratislava 1989. VEDA. 343 s.
- [96] SÉFERIAN, D.: Nauka o kovech ve svařování ocelí. Praha 1962. SNTL. 423 s.
- [97] Kolektiv autorů.: Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava 1999. Zeross. 296 s.
- [98] Norma ČSN EN 1011-3 Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí.
- [99] FANG, Y., ZHAO, J., LI, X.: Precipitates in HR3C steel aged at high temperature. Acta metallurgica sinica 2010/46 :7 PP.844-849.
- [100] CHENG, S. CH. et al: Investigation of Bar-Like Carbides in HR3C Boiler Steel, Materials Science Forum (Volumes 638 - 642), pages 3105-3110, 2010.

- [101] BAI, X., PAN, J., CHEN, G., LIU, J., WANG, J., ZHANG, T., TANG, W.: Effect of high temperature aging on microstructure and mechanical properties of HR3C heat resistant steel, volume 30 Issue 2, 2014, pp. 205-210.
- [102] POMIKALEK, L., HERMANOVA, S., DOBROVODSKA, L.: Effect of welding on the properties of HR3C, S304H, TP347HFG and P92 steels. VÍTKOVICE POWER ENGINEERING.
- [103] PRABHA, B., SUNDARAMOORTHY, P., SURESH, S., MANIMOZHI, S., RAVISHANKAR, B.: Studies on Stress Corrosion Cracking of Super 304H Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. December 2009, Volume 18, Issue 9, pp 1294–1299.
- [104] TOHYAMA, A., HAYAKAWA, H., MINAMI, Y.: Development of high strength steel boiler tube (TEMPALLOY AA-1). NKK Technical review, No.84, 2001, p. 30-35.
- [105] SAWARAGI, Y., OGAWA, K., KATO, S., NATORI, A., HIRANO, S.: Development of the economical 18-8 stainless steel (SUPER 304H) having high elevated temperature strength for fossil fired boilers. The Sumitomo search, No. 48, 1992, pp. 50-58.
- [106] CENGYU, CH., HONGYAO, Y., JIANXIN, D., XISHAN, X., ZHENGGIANG, C., XIAOFANG, CH., FUSHENG, L.: Strengthening effect of Cu-rich phase precipitation in 8Cr9Ni3CuNbN austenitic heat-resisting steel. *Acta Metallurgica Sinica (Engl. Lett.)*Vol.24, April 2011, pp 141–147.
- [107] CENGYU, CH., HONGYAO, Y., XISHAN, X.: Advanced Austenitic Heat-Resistant Steels for Ultra-Super-Critical (USC) Fossil Power Plants. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/alloy-steel-properties-and-use/advanced-austenitic-heat-resistant-steels-for-ultra-super-critical-usc-fossil-power-plants>
- [108] ZHANG, N., et al.: Oxidation of austenitic steel TP347HFG exposé to supercritical water with different dissolved oxygen concentration. *Applied mechanics and materials*, 2012, pp 1179-1183.
- [109] Allegheny technologies: Technical data blue sheet, Stainless Steel Precipitation Hardening Alloy. ATI Properties, Inc. 2006
- [110] AZO Materials: Stainless Steel - Grade 630, AZoM.com - An AZoNetwork Site, 2014. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1025>.
- [111] Product data sheet 17-4 PH stainless steel. AK Steel Corporation. 2007.
- [112] Stainless steel AL 17-4 precipitation hardening alloy. Technical data blue sheetAK Steel Corporation. 2007. Dostupné z www.alleghenyludlum.com
- [113] MURAYAMA, M., KATAYAMA, Y., HONO, K.: Microstructural Evolution in a 17-4 PH Stainless Steel after Aging at 400°C. *Metall. Mater. Trans. A*. Vol. 30A, pp. 345-353. 1999.
- [114] MORAVEC, J., BRADÁČ, J., NEUMANN, H., NOVÁKOVÁ, I.: Grain Size Prediction of Steel P92 by Help of Numerical Simulations. In: 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Ostrava, 2013. s. 508 - 513. ISBN 978-80-87294-41-3.

- [115] HAYASHI, M.: Thermal fatigue behavior of thin walled cylindrical carbon steel specimens in simulated BWR environment. *Nuclear Engineering and Design*, 1998; 184, pp. 123 – 133.
- [116] SVOBODOVA, M., DOUDA, J., CMAKAL, J., SOPOUŠEK, J., DUBSKÝ, J.: Homogenní a heterogenní svarové spoje žárovevých ocelí. In *METAL 2009*.
- [117] KNEZEVIC, V., SUBANOVIC, M., HAMART, O., HEUSER, H., TAK, K.: Experiences in the production and welding of 9-12% Cr steels explained on grades 92 and VM-SHC for USC power plants. *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants*.
- [118] MOHYLA, P., KUBON, Z., CEP, R., SAMARDZIC, I.: Evaluation of creep properties of steel P92 and its welded joints. ISSN 0543-5846.
- [119] KADOYA, Y., GOTO, T., DATE, S., YAMAUCHI, T., SAIDA, T.: Assessment of remaining life of fossil power plant parts by means of miniature creep-rupture tests, *ISIJ Int.* 30, 1990, pp. 854-861.
- [120] ABE, F., KERN, T. U., WISVANATHAN, R.: *Creep-resistant steels*, Woodhead Publ. 2008.
- [121] 9–12% Chromium Steels: Part One. Dostupné z: <http://keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=272>
- [122] ČSN EN 10302 Žárovevne oceli, niklové a kobaltové slitiny.
- [123] HODIS, Z.: Difúze uhlíku a dusíku ve svarových spojích žárovevých feritických ocelí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 88 s.
- [124] DI GIANFRANCESCO, A., et al.: *Research Fund for Coal & Steel. Applications of Advanced Low-alloy Steels for New High-temperature Components*. Luxembourg, 2009, 142 s.
- [125] ZIFČÁK, P., BRZIAK, P., BALOG, M., BOŠANSKÝ, J., SRNKA, M.: Vývoj mikroštruktúry a návrh hodnotenia precipitačných zmien a oceli T24 vplyvom creepovej exploatácie. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2008, roč. 14, č. 2, s. 195-208.
- [126] BENDICK, W., GABREL, J., HAHN, B., VANDENBERGHE, B.: New low alloy heat resistant ferritic steels T/P23 and T/P24 for power plant application. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 84 (2007) 13–20.
- [127] *The T23/T24 Book. New Grades for Waterwalls and Superheaters*. Vallourec & Mannesmann, 2001.
- [128] MATOCHA, K., ČÍŽEK, P., KANDER, L., PUSTĚJOVSKÝ, P.: Resistance of 10GN2MFA-A Low Alloy Steel to Stress Corrosion Cracking in High Temperature Water. *Material & Metallurgical Research*. Dostupné z www.intechopen.com
- [129] KANDER, L., MATOCHA, K., KORČÁK, A.: Vliv interkritického žhání na vlastnosti oceli 10GN2MFA používané v jaderné energetice. In. *METAL 2007*. Hradec nad Moravicí.
- [130] MORAVEC, J., DIKOVITS, M., NOVÁKOVÁ, I., CALISKANOGLU, O.: A comparison of dilatometry results obtained by two different devices when generating CCT and in-situ diagrams. *Key Engineering Materials Vol. 669* (2016) pp 477-484.

- [131] Study and development of automatic narrow gap arc welding on AES-600 & WWER DN 850 primary coolant circuit. Dostupné z: http://www.polysoude.com/images/stories/products/orbitalwelding/DOC_Press_CNIITMASH-Study_EN.pdf
- [132] FÜRBAACHER, I., MACEK, K., STEIDL, J.: Lexicon of technical materials. 1. ed. Prague: Verlag Dashöfer, 2003.
- [133] HAGEN, I., BENDICK, W.: Creep Resistance Ferritic Steels for Power Plants. From Conference International Symposium on Niobium, Warrendale: 2001.
- [134] P235GH Pressure Vessel Steel, Masteel UK Ltd, Birmingham, UK, 2010.
- [135] MORAVEC, J., BRADÁČ, J., BERAN, D., NOVÁKOVÁ, I.: The Impact of Thermal Cycles of Superheated Steam on Pipes Material of By-Pass of Steam and Gas-Steam. In: Metal 2014, Brno, 2014. ISBN 978-80-87294-52-9.
- [136] ZDEBOROVÁ, I.: Statistická fyzika a barvení grafů. Čs. čas. fyz. 57 č. 5. Str. 311 až 317, 2007.
- [137] HOLM, E. A., GLAZIER, J. A., SROLOVITZ, D., GREY, G. S.: The effect of lattice anisotropy and temperature on grain growth in the two-dimensional Potts model. Physical Review A, 43:2662, 1991.
- [138] ZOLLNER, D., STREITENBERGER, P.: Normal grain growth: Monte Carlo Potts model simulation and mean-field theory. Micro-Macro-interaction. Springer 2008, pp. 3-18.
- [139] GLUMELLI, A. K., MILITZER, M., HAWBOLT, E. B.: Analysis of the austenite grain size distribution in plain carbon steels. The Iron and Steel Institute of Japan. Vol. 39, no. 3, pp. 271-280, 1989.
- [140] KHZOUZ, E.: Grain Growth Kinetics in Steels. Dostupné z: http://www.wpi.edu/Pubs/Eproject/Available/E-project-042211104204/unrestricted/MQP_Grain_Growth_Kinetics_in_Steels.pdf
- [141] SMITH, W. F.: Hashemi, Javad (2006), Foundations of Materials Science and Engineering (4th ed.), McGraw-Hill, ISBN 0-07-295358-6.
- [142] ABBASCHIAN, R., ABBASCHIAN, L., REED-HILL, R. E.: Physical Metallurgy Principles. Stamford, CT: Cengage Learning, 2009.
- [143] MANOHAR, P. A., DUNNE, D. P., CHANDRA, T., KILLMORE, C. R.: Grain Growth Predictions in Microalloyed Steels, The Iron and Steel Institute of Japan, vol. 36, no. 2, pp. 194-200, 1995.
- [144] MORAVEC, J.: Měření velikosti austenitického zrna u materiálu P24. Technická zpráva č. TUL-Z-12-VZ-01 projektu TA02010992. 2012 Plzeň. Str. 2 - 8.
- [145] MORAVEC, J.: Měření velikosti austenitického zrna u materiálu P92. Technická zpráva č. TUL-Z-12-VZ-02 projektu TA02010992. 2012 Plzeň. Str. 2 - 10.
- [146] MORAVEC, J.: Měření velikosti austenitického zrna u materiálu S304H. Technická zpráva č. TUL-Z-12-VZ-03 projektu TA02010992. 2012 Plzeň. Str. 2 - 8.

- [147] MORAVEC, J.: Měření velikosti austenitického zrna u materiálu HR3C. Technická zpráva č. TUL-Z-12-VZ-04 projektu TA02010992. 2012 Plzeň. Str. 2 - 8.
- [148] MORAVEC, J.: Měření velikosti austenitického zrna u materiálu TP347HFG. Technická zpráva č. TUL-Z-12-VZ-05 projektu TA02010992. 2012 Plzeň. Str. 2 - 8.
- [149] POMIKÁLEK, L., HERMANOVÁ, Š., DOBROVODSKÁ, L.: Effect of welding on the properties of HR3C, SUPER 304H, TP347HFG a P92 steel. In: METAL2013, Brno. ISBN 978-80-87294-41-3.
- [150] PLÁNIČKA, F., KULIŠ, Z.: Základy teorie plasticity. ČVUT Praha, 2004.
- [151] GUT, K., LÜLLING, H.: Internationale Aussprache über das Langzeitverhalten warmfester Stähle, Düsseldorf, VDEh, 1960.
- [152] PURMENSKÝ, J.: Tepelné zpracování vybraných kotlových ocelí. Sborník technické konference - Hrotovice 2011. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1841&h=111>
- [153] MORAVEC, J., DOBRÁNSKÝ, J., BRADÁČ, J. NOVÁKOVÁ, I.: New methods of obtaining input data of numerical computations by using heat treatment simulator. In: Operation and Diagnostics of Machines and Production Systems Operational States II. Switzerland: softcover, 2014, P. 167-174. ISBN 978-3-03835-201-3.
- [154] MORAVEC, J., NEUMANN, H., NOVÁKOVÁ, I.: Certifikovaná metodika pro stanovení teplotní závislosti součinitele přestupu tepla kalícího média s ohledem na typ ochlazovacího média, druh základního materiálu a velikost kaleného předmětu. Certifikovaná metodika č. KSP-2013-N/CM-01, TU v Liberci, 2013.
- [155] MORAVEC, J., NOVÁKOVÁ, I.: Způsob stanovení ochlazovací schopnosti média pro konkrétní zpracovávané materiály včetně možnosti simulace tepelného zpracování rozměrných dílů. Patent č. 305469. Zapsán 14.10.2015.
- [156] SLOVÁČEK, M. a kol.: Vývoj a validace materiálových modelů - rozbor stávajícího stavu. Technická zpráva č. M_Z_12_024_r01 projektu TA02010992. 2012 Plzeň. Str. 3 - 44.
- [157] SZTEFEK, R.: Numerická simulace kalení unášeče. Technická zpráva Vítkovice Heavy Machinery. 2014 Ostrava. Str. 2 - 23.
- [158] SLOVÁČEK, M.: Numerické simulace svařování, výpočet a hodnocení distorzí a zbytkových napětí, Disertační práce, Univerzita obrany Brno, 2005.
- [159] CENGL., Y. A.: Heat transfer, New York, McGraw-Hill Companies. United States, 2003, ISBN 0-07-245893-3.
- [160] MOHYLA, P.: Studium vlastností svarových spojů žárovevých ocelí T23 a T24. Habilitační práce. VŠB Ostrava 2013.
- [161] ŽÁK, J., NOVÁK, M.: Teorie svařování. Skripta VUT Brno, 1988. ISBN 55-573-88
- [162] The Ferrous Metals Data Book. Dostupné z: http://www.rewon.com.my/ferrous_data/appendix_5.htm

Přílohy

1. Materiály využívané v energetickém průmyslu (kapitola 4)

1.1.	Chemické složení martenzitických žárovevých ocelí ČSN EN 10088-1	3
1.2.	Chemické složení austenitických žárovevých ocelí ČSN EN 10088-1	4
1.3.	Chemické složení martenzitických žárovevých ocelí ČSN EN 10302	5
1.4.	Chemické složení austenitických žárovevých ocelí ČSN EN 10302	6
1.5.	Systém zařazení ocelí do skupin podle TNI CEN ISO/TR 15608	7
1.6.	Hodnota přehřevu a interpass teplota pro vybrané žárovevové oceli	8
1.7.	Ověřené teploty přehřevu a interpass pro vybrané Cr-Mo oceli	8
1.8.	Konstituční diagramy Schaefflerův, De Longův a WRC-1992	9

2. Vlastnosti a popis materiálů použitých pro experimentální měření (kapitola 6)

2.1.	Křivky meze pevnosti při tečení materiálu HR3C pro různé teploty	10
2.2.	Křivky meze pevnosti při tečení materiálu S304H pro různé teploty	11
2.3.	Křivky meze pevnosti při tečení materiálu TP347HFG pro různé teploty	11
2.4.	ARA diagram oceli P92	12
2.5.	Křivky meze pevnosti při tečení materiálu P92 pro teploty 600, 625 a 650°C	12
2.6.	ARA diagram oceli X22CrMoV12-1	13
2.7.	Informativní hodnoty meze tečení pro plastické prodloužení 1% a meze pevnosti při tečení oceli X22CrMoV12-1 pro 10 ⁴ a 10 ⁵ hodin	13
2.8.	ARA diagram oceli P24	14
2.9.	Křivky meze pevnosti při tečení materiálu P24 pro teploty 600, 625 a 650°C	14
2.10.	ARA diagram oceli 10GN2MFA	15

3. Numerické simulace velikosti austenitického zrna v TOO svarů (kapitola 7)

3.1.	Výsledky optimalizovaných hodnot poměru aktivační energie a plynové konstanty Q/R pro materiály HR3C, TP347HFG, P92 a P24	15
3.1.	Velikosti zrna materiálu HR3C pro vzorky připravené v programovatelné peci	16
3.2.	Velikosti zrna materiálu S304H pro vzorky připravené v programovatelné peci	17
3.3.	Velikosti zrna mat. TP347HFG pro vzorky připravené v programovatelné peci	18
3.4.	Velikosti zrna materiálu P92 pro vzorky připravené v programovatelné peci	19
3.5.	Velikosti zrna materiálu P24 pro vzorky připravené v programovatelné peci	20
3.6.	Údaje o velikosti zrna na materiálu P24 pro teploty 900 a 1000°C	21
3.7.	Údaje o velikosti zrna na materiálu P24 pro teploty 1100 a 1200°C	22
3.8.	Údaje o velikosti zrna na materiálu P92 pro teploty 900 a 1000°C	23
3.9.	Údaje o velikosti zrna na materiálu P92 pro teploty 1100 a 1200°C	24
3.10.	Údaje o velikosti zrna na materiálu HR3C pro teploty 900 a 1000°C	25

3.11.	Údaje o velikosti zrna na materiálu HR3C pro teploty 1100 a 1200°C	26
3.12.	Údaje o velikosti zrna na materiálu TP347HFG pro teploty 900 a 1000°C	27
3.13.	Údaje o velikosti zrna na materiálu TP347HFG pro teploty 1100 a 1200°C	28
3.14.	Průměrné hodnoty skutečné střední velikosti zrna $D_{\text{střední}}$ [mm] pro materiály HR3C, TP347HFG, P92 a P24	29
3.15.	Grafy s trendovými přímkami a rovnicemi jsou pro materiály HR3C, TP347HFG, P92 a P24	30
3.16.	Grafy pro stanovení aktivační energie růstu zrna Q a celkové konstanty úměrnosti K_0 , pro materiály HR3C, TP347HFG, P92 a P24	33
 4. Metodické postupy při návrhu a realizaci experimentů svařování s jasně definovanými okrajovými podmínkami (kapitola 8)		
4.1.	Vyhodnocené snímky konců svarových lázní pro housenky č. 2, 3, 4 a 5	35
4.2.	Vyhodnocené snímky řezů housenek č. 2, 4 a 5 s geometrickými údaji	37
4.3.	Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenky č. 2, 3, 4 a 5	38
4.4.	Výsledky měření tvrdosti pro Řady 2 až 5	40
4.5.	Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti pro Řady 2 až 5	41
4.6.	Teplotní cykly jednotlivých housenek 1 až 8 na vzorku z mat. 10GN2MFA	43
4.7.	Geometrické vyhodnocení housenek 3 až 8 na vzorku z mat. 10GN2MFA	47
4.8.	Teplotní cykly jednotlivých housenek 1 až 8 na vzorku z mat. X22CrMoV12-1	49
4.9.	Geometrické vyhodnocení housenek 3 až 8 na vzorku z materiálu X22CrMoV12-1	53

Příloha 1.1. Chemické složení (rozbor tavby)^{a)} martenzitických žárovevých ocelí zařazených podle normy ČSN EN 10088-1

Tabulka 8 – Chemické složení (rozbor tavby)^{a)} martenzitických žárovevých ocelí

Označení oceli		hmotnostní %													
Značka	Číselné označení	C	Si	Mn	P max.	S max.	N	Al	Cr	Mo	Nb	Ni	V	W	Ostatní
X10CrMoVNB9-1	1.4903	0,08 až 0,12	≤ 0,50	0,30 až 0,60	0,025	0,015	0,030 až 0,070	≤ 0,040	8,0 až 9,5	0,85 až 1,05	0,060 až 0,10	≤ 0,40	0,18 až 0,25	–	–
		0,09 až 0,13	0,10 až 0,50	0,30 až 0,60	0,020	0,010	0,050 až 0,090	≤ 0,040	8,5 až 9,5	0,90 až 1,10	0,060 až 0,10	0,10 až 0,40	0,18 až 0,25	0,90 až 1,10	B: 0,000 5 až 0,0050
X8CrCoNiMo10-6	1.4911	0,05 až 0,12	0,10 až 0,80	0,30 až 1,30	0,025	0,015	≤ 0,035	–	9,8 až 11,2	0,50 až 1,00	0,20 až 0,50	0,20 až 1,20	0,10 až 0,40	≤ 0,70	B: 0,005 až 0,015 Co: 5,0 až 7,0
X19CrMoNbVN11-1	1.4913	0,17 až 0,23	≤ 0,50	0,40 až 0,90	0,025	0,015	0,050 až 0,10	≤ 0,020	10,0 až 11,5	0,50 až 0,80	0,25 až 0,55	0,20 až 0,60	0,10 až 0,30	–	B: ≤ 0,0015
X20CrMoV11-1	1.4922	0,17 až 0,23	≤ 0,40	0,30 až 1,00	0,025	0,015	–	–	10,0 až 12,5	0,80 až 1,20	–	0,30 až 0,80	0,20 až 0,35	–	–
X22CrMoV12-1	1.4923	0,18 až 0,24	≤ 0,50	0,40 až 0,90	0,025	0,015	–	–	11,0 až 12,5	0,80 až 1,20	–	0,30 až 0,80	0,25 až 0,35	–	–
X20CrMoWV12-1	1.4935	0,17 až 0,24	0,10 to 0,50	0,30 až 0,80	0,025	0,015	–	–	11,0 až 12,5	0,80 až 1,20	–	0,30 až 0,80	0,20 až 0,35	0,40 až 0,60	–
X12CrNiMoV12-3	1.4938	0,08 až 0,15	≤ 0,50	0,40 až 0,90	0,025	0,015	0,020 až 0,040	–	11,0 až 12,5	1,50 až 2,00	–	2,00 až 3,00	0,25 až 0,40	–	–

³⁾ Prvky neuvedené v této tabulce se nesmí bez souhlasu odběratele úmyslně přidávat do oceli, výjimku tvoří prvky, které jsou nezbytné k dohotovení tavby. Je třeba provést všechna příměřená opatření, aby se zabránilo zanesení takových prvků do oceli ze šrotu a dalších surovin používaných během výroby, které by mohly ovlivnit mechanické vlastnosti a použití oceli.

^{a)} Prvky neuvedené v této tabulce se nesmí bez souhlasu odběratele úmyslně přidávat do oceli, výjimku tvoří prvky, které jsou nezbytné k dohotovení tavby. Je třeba provést všechna přiměřená opatření, aby se zabránilo zanesení takových prvků do oceli ze šrotu a dalších surovin používaných během výroby, které by mohly ovlivnit mechanické vlastnosti a použití oceli.

Příloha 1.2. Chemické složení (rozbor tavby)^{a)} austenitických žáropevných ocelí zařazených podle normy ČSN EN 10088-1

Označení oceli		hmotnostní %																	W	V	Ti	Ni	Nb	Mo	Cr	Al	N	S max.	P max.	Mn	Si	C	Číselné označení
Značka																																	
X3CrNiMoB17-13-3	1.4910	≤ 0,04	≤ 0,75	≤ 2,00	0,035	0,015	0,10 až 0,18	–	16,0 až 18,0	2,00 až 3,00	–	12,0 až 14,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	B: 0,0015 až 0,005 0		
X7CrNiNb18-10	1.4912	0,04 až 0,10	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	0,015	–	–	17,0 až 19,0	–	10×C až 1,20	9,0 až 12,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
X6CrNiMoB17-12-2	1.4919	0,04 až 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	0,015	≤ 0,11	–	16,5 až 18,5	2,00 až 2,50	–	10,0 až 13,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	B: 0,0015 až 0,005 0		
X6CrNiTiB18-10	1.4941	0,04 až 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	0,015	–	–	17,0 až 19,0	–	–	9,0 až 12,0	5×C až 0,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	B: 0,0015 až 0,005 0		
X6CrNiWbNb16-16	1.4945	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,035	0,015	0,06 až 0,14	–	15,5 až 17,5	–	10×C až 1,20	15,5 až 17,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,50 až 3,50		
X6CrNi18-10	1.4948	0,04 až 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	0,015	≤ 0,11	–	17,0 až 19,0	–	–	8,0 až 11,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
X6CrNi23-13	1.4950	0,04 až 0,08	≤ 0,70	≤ 2,00	0,035	0,015	≤ 0,11	–	22,0 až 24,0	–	–	12,0 až 15,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
X6CrNi25-20	1.4951	0,04 až 0,08	≤ 0,70	≤ 2,00	0,035	0,015	≤ 0,11	–	24,0 až 26,0	–	–	19,0 až 22,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
X5NiCrAlTi31-20	1.4958	0,03 až 0,08	≤ 0,70	≤ 1,50	0,015	0,010	≤ 0,030	0,20 až 0,50	19,0 až 22,0	–	≤ 0,10	30,0 až 32,5	0,20 až 0,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Co: ≤ 0,50 Cu: ≤ 0,50		
X8NiCrAlTi32-21	1.4959	0,05 až 0,10	≤ 0,70	≤ 1,50	0,015	0,010	≤ 0,030	0,25 až 0,65	19,0 až 22,0	–	–	30,0 až 34,0	0,25 až 0,65	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Co: ≤ 0,50 Cu: ≤ 0,50		
X8CrNiNb16-13	1.4961	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,035	0,015	–	–	15,0 až 17,0	–	10×C až 1,20	12,0 až 14,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
X12CrNiWbTiB16-13	1.4962	0,07 až 0,15	≤ 0,50	≤ 1,50	0,035	0,015	–	–	15,5 až 17,5	–	–	12,5 až 14,5	0,40 až 0,70	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,50 až 3,00		
X12CrCoNi21-20	1.4971	0,08 až 0,16	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	0,015	0,10 až 0,20	–	20,0 až 22,5	2,50 až 3,5	0,75 až 1,25	19,0 až 21,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Co: 18,5 až 21,0		
X6NiCrTiMoVB25-15-2	1.4980	0,03 až 0,08	≤ 1,00	1,00 až 2,00	0,025	0,015	–	≤ 0,35	13,5 až 16,0	1,00 až 1,50	–	24,0 až 27,0	1,90 až 2,30	0,10 až 0,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	B: 0,0030 až 0,010		
X8CrNiMoNb16-16	1.4981	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,035	0,015	–	–	15,5 až 17,5	1,60 až 2,00	10×C až 1,20	15,5 až 17,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
X10CrNiMoNbTiB15-10-1	1.4982	0,07 až 0,13	≤ 1,00	5,5 až 7,0	0,040	0,030	≤ 0,11	–	14,0 až 16,0	0,80 až 1,20	0,75 až 1,25	9,0 až 11,0	–	0,15 až 0,40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	B: 0,003 až 0,009		
X6CrNiMoTiB17-13	1.4983	0,04 až 0,08	≤ 0,75	≤ 2,00	0,035	0,015	–	–	16,0 až 18,0	2,00 až 2,50	–	12,0 až 14,0	5×C až 0,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	B: 0,0015 až 0,0060		
X7CrNiMoNb16-16	1.4986	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,045	0,030	–	–	15,5 až 17,5	1,60 až 2,00	Nb + Ta: 10×C až 1,20	15,5 až 17,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	B: 0,05 až 0,10		
X8CrNiMoNb16-13	1.4988	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,035	0,015	0,06 až 0,14	–	15,5 až 17,5	1,10 až 1,50	10×C až 1,20	12,5 až 14,5	–	0,60 až 0,85	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
X7CrNiTi18-10	1.4940	0,04 až 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,040	0,015	≤ 0,11	–	17,0 až 19,0	–	–	9,0 až 13,0	5×(C+N) až 0,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
X6CrNiMo17-13-2	1.4918	0,04 až 0,08	≤ 0,75	≤ 2,00	0,035	0,015	≤ 0,11	–	16,0 až 18,0	2,00 až 2,50	–	12,0 až 14,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		

Prvky neuvedené v této tabulce se nesmí bez souhlasu odběratele úmyslně přidávat do oceli, výjimku tvoří prvky, které jsou nezbytné k dohotovení tavby. Je třeba provést všechna příslušná opatření, aby se zabránilo zanesení lakových prvků do oceli ze šrotu a dalších surovin používaných během výroby. Které by mohly ovlivnit mechanické vlastnosti a použití oceli.

^{a)} Prvky neuvedené v této tabulce se nesmí bez souhlasu odběratele přidávat do oceli. Výjimku tvoří prvky, které jsou nezbytné k dohotovení tavby. Je třeba provést všechna přiměřená opatření, aby se zabránilo zanesení takových prvků do oceli ze šrotu a dalších surovin používaných během výroby, které by mohly ovlivnit mechanické vlastnosti a použití oceli.

Příloha 1.3. Chemické složení (rozbor tavby)^{a)} martenzitických žárovevných ocelí zařazených podle normy ČSN EN 10302

Tabulka 1 – Chemické složení (rozbor tavby)^{a)} žárovevných ocelí

Označení oceli		Hmotnostní %														
Značka	Číselné označení	C	Si	Mn	P max.	S max.	N	Al	Cr	Mo	Nb	Ni	Ti	V	W	Ostatní
Martenzitické oceli																
X10CrMoVNb9-1	1.4903	0,08 až 0,12	≤ 0,50	0,30 až 0,60	0,025	0,015	0,030 až 0,070	≤ 0,030	8,0 až 9,5	0,85 až 1,05	0,060 až 0,10	≤ 0,40	–	0,18 až 0,25	–	–
X11CrMoWVNb9-1-1	1.4905	0,09 až 0,13	0,10 až 0,50	0,30 až 0,60	0,020	0,010	0,050 až 0,090	≤ 0,040	8,5 až 9,5	0,90 až 1,10	0,060 až 0,10	0,10 až 0,40	–	0,18 až 0,25	0,90 až 1,10	B: 0,0005 až 0,0050
X8CrCoNiMo10-6	1.4911	0,05 až 0,12	0,10 až 0,80	0,30 až 1,30	0,025	0,015	≤ 0,035	–	9,8 až 11,2	0,50 až 1,00	0,20 až 0,50	0,20 až 1,20	–	0,10 až 0,40	≤ 0,70	B: 0,0005 až 0,015, Co: 5,0 až 7,0
X19CrMoNbVN11-1	1.4913	0,17 až 0,23	≤ 0,50	0,40 až 0,90	0,025	0,015	0,050 až 0,10	≤ 0,020	10,0 až 11,5	0,50 až 0,80	0,25 až 0,55	0,20 až 0,60	–	0,10 až 0,30	–	B: ≤ 0,0015
X20CrMoV11-1	1.4922	0,17 až 0,23	≤ 0,50	≤ 1,00	0,025	0,015	–	–	10,0 až 12,5	0,80 až 1,20	–	0,30 až 0,80	–	0,25 až 0,35	–	–
X22CrMoV12-1	1.4923	0,18 až 0,24	≤ 0,50	0,40 až 0,90	0,025	0,015	–	–	11,0 až 12,5	0,80 až 1,20	–	0,30 až 0,80	–	0,25 až 0,35	–	–
X20CrMoWV12-1	1.4935	0,17 až 0,24	0,10 až 0,50	0,30 až 0,80	0,025	0,015	–	–	11,0 až 12,5	0,80 až 1,20	–	0,30 až 0,80	–	0,20 až 0,35	0,40 až 0,60	–
X12CrNiMoV12-3	1.4938	0,08 až 0,15	≤ 0,50	0,40 až 0,90	0,025	0,015	0,020 až 0,040	–	11,0 až 12,5	1,50 až 2,00	–	2,00 až 3,00	–	0,25 až 0,40	–	–

Příloha 1.4. Chemické složení (rozbor tavby)^{a)} austenitických žárovevých ocelí zařazených podle normy ČSN EN 10302

Tabulka 1 – Chemické složení (rozbor tavby)^{a)} žárovevých ocelí

Označení oceli		Hmotnostní %														
Značka	Číselné označení	C	Si	Mn	P max.	S max.	N	Al	Cr	Mo	Nb	Ni	Ti	V	W	Ostatní
Austenitické oceli																
X3CrNiMoBN17-13-3	1.4910	≤ 0,04	≤ 0,75	≤ 2,00	0,035	0,015	0,10 až 0,18	–	16,0 až 18,0	2,00 až 3,00	–	12,0 až 14,0	–	–	–	B: 0,0015 až 0,0050
X6CrNiMoB17-12-2	1.4919	0,04 až 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	0,015	≤ 0,10	–	16,5 až 18,5	2,00 až 2,50	–	10,0 až 13,0	–	–	–	B: 0,0015 až 0,0050
X6CrNiTiB18-10	1.4941	0,04 až 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	0,015	–	–	17,0 až 19,0	–	–	9,0 až 12,0	5×C až 0,80	–	–	B: 0,0015 až 0,0050
X6CrNiWNBn16-16	1.4945	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,035	0,015	0,060 až 0,14	–	15,5 až 17,5	–	10×C až 1,20	15,5 až 17,5	–	–	2,50 až 3,5	–
X6CrNi25-20	1.4951	0,04 až 0,08	≤ 0,70	≤ 2,00	0,035	0,015	≤ 0,10	–	24,0 až 26,0	–	–	19,0 až 22,0	–	–	–	–
X5NiCrAlTi31+20	1.4958	0,030 až 0,08	≤ 0,70	≤ 1,50	0,015	0,010	–	0,20 až 0,50	19,0 až 22,0	–	≤ 0,10	30,0 až 32,5	0,20 až 0,50	–	–	Cu: ≤ 0,50
X8NiCrAlTi32-21	1.4959	0,05 až 0,10	≤ 0,70	≤ 1,50	0,015	0,010	–	0,25 až 0,65	19,0 až 22,0	–	–	30,0 až 34,0	0,25 až 0,65	–	–	Cu: ≤ 0,50
X8CrNiNb16-13	1.4961	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,035	0,015	–	–	15,0 až 17,0	–	10×C až 1,20	12,0 až 14,0	–	–	–	–
X12CrNiWTiB16-13	1.4962	0,07 až 0,15	≤ 0,50	≤ 1,50	0,035	0,015	–	–	15,5 až 17,5	–	–	12,5 až 14,5	0,40 až 0,70	–	2,50 až 3,00	B: 0,0015 až 0,0060
X12CrCoNi21-20	1.4971	0,08 až 0,16	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	0,015	0,10 až 0,20	–	20,0 až 22,5	2,50 až 3,5	0,75 až 1,25	19,0 až 21,0	–	–	2,00 až 3,00	Co: 18,5 až 21,0
X6NiCrTiMoVB25-15-2	1.4980	0,030 až 0,08	≤ 1,00	1,00 až 2,00	0,025	0,015	–	≤ 0,35	13,5 až 16,0	1,00 až 1,50	–	24,0 až 27,0	1,90 až 2,30	0,10 až 0,50	–	B: 0,0030 až 0,010
X8CrNiMoNb16-16	1.4981	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,035	0,015	–	–	15,5 až 17,5	1,60 až 2,00	10×C až 1,20	15,5 až 17,5	–	–	–	–
X6CrNiMoTiB17-13	1.4983	0,04 až 0,08	≤ 0,75	≤ 2,00	0,035	0,015	–	–	16,0 až 18,0	2,00 až 2,50	–	12,0 až 14,0	5×C až 0,80	–	–	B: 0,0015 až 0,0060
X8CrNiMoVNB16-13	1.4988	0,04 až 0,10	0,30 až 0,60	≤ 1,50	0,035	0,015	0,060 až 0,14	–	15,5 až 17,5	1,10 až 1,50	10×C až 1,20	12,5 až 14,5	–	0,60 až 0,85	–	–

a) Prvky neuvedené v této tabulce se nesmí bez souhlasu odběratele úmyslně přidávat do oceli, výjimku tvoří prvky, které jsou nezbytné k dohotovení tavby. Je třeba provést všechna příslušná opatření, aby se zabránilo zanesení takových prvků do oceli ze šrotu a dalších surovin používaných během výroby, které by mohly ovlivnit mechanické vlastnosti a použití oceli.

^{a)} Prvky neuvedené v této tabulce se nesmí bez souhlasu odběratele úmyslně přidávat do oceli, výjimku tvoří prvky, které jsou nezbytné k dohlovení tavby. Je třeba provést všechna přiměřená opatření, aby se zabránilo zanesení takových prvků do oceli ze šrotu a dalších surovin používaných během výroby, které by mohly ovlivnit mechanické vlastnosti a použití oceli.

Příloha 1.5. Systém zařazení ocelí do skupin podle TNI CEN ISO/TR 15608.

4		Cr-Mo-(Ni) oceli legované nízkým obsahem vanadu s $Mo \leq 0,7 \%$ a $V \leq 0,1 \%$
	4.1	Oceli s $Cr \leq 0,3 \%$ a $Ni \leq 0,7 \%$
	4.2	Oceli s $Cr \leq 0,7 \%$ a $Ni \leq 1,5 \%$
5		Cr-Mo oceli bez vanadu s $C \leq 0,35 \%$
	5.1	Oceli s $0,75 \% \leq Cr \leq 1,5 \%$ a $Mo \leq 0,7 \%$
	5.2	Oceli s $1,5 \% < Cr \leq 3,5 \%$ a $0,7 \% < Mo \leq 1,2 \%$
	5.3	Oceli s $3,5 \% < Cr \leq 7,0 \%$ a $0,4 \% < Mo \leq 0,7 \%$
	5.4	Oceli s $7,0 \% < Cr \leq 10,0 \%$ a $0,7 \% < Mo \leq 1,2 \%$
6		Cr-Mo-(Ni) oceli legované vysokým obsahem vanadu
	6.1	Oceli s $0,3 \% \leq Cr \leq 0,75 \%$, $Mo \leq 0,7 \%$ a $V \leq 0,35 \%$
	6.2	Oceli s $0,75 \% < Cr \leq 3,5 \%$, $0,7 \% < Mo \leq 1,2 \%$ a $V \leq 0,35 \%$
	6.3	Oceli s $3,5 \% < Cr \leq 7,0 \%$, $Mo \leq 0,7 \%$ a $0,45 \% \leq V \leq 0,55 \%$
	6.4	Oceli s $7,0 \% < Cr \leq 12,5 \%$, $0,7 \% < Mo \leq 1,2 \%$ a $V \leq 0,35 \%$
7		Feritické, martenzitické nebo precipitačně vytvrzené korozivzdorné oceli s $C \leq 0,35 \%$ a $10,5 \% \leq Cr \leq 30 \%$
	7.1	Feritické korozivzdorné oceli
	7.2	Martenzitické korozivzdorné oceli
	7.3	Precipitačně vytvrzené korozivzdorné oceli
8		Austenitické korozivzdorné oceli, $Ni \leq 31 \%$
	8.1	Austenitické korozivzdorné oceli s $Cr \leq 19 \%$
	8.2	Austenitické korozivzdorné oceli $Cr > 19 \%$
	8.3	Manganové austenitické korozivzdorné oceli s $4 \% < Mn \leq 12 \%$
9		Oceli legované niklem s $Ni \leq 10,0 \%$
	9.1	Oceli legované niklem s $Ni \leq 3,0 \%$
	9.2	Oceli legované niklem s $3,0 \% < Ni \leq 8,0 \%$
	9.3	Oceli legované niklem s $8,0 \% < Ni \leq 10,0 \%$
10		Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli (duplexní)
	10.1	Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli $Cr \leq 24 \%$
	10.2	Austeniticko-feritické korozivzdorné oceli $Cr > 24 \%$

Příloha 1.6. Minimální hodnota předehřevu a interpass teplota pro vybrané žáropevné oceli

Typ oceli	Tloušťka	Minimální teplota předehřevu a minimální teplota interpass (°C)			Maximální teplota interpass (°C)
		Stupeň obsahu vodíku			
	(mm)	D ≤ 5 (ml/100 g)	C 5 až 10 (ml/100 g)	A > 15 (ml/100 g)	
0,3 Mo	≤ 15	20	20	100	250
	> 15 ≤ 30	75	75	100	
	> 30	75	100	nepoužitelné	
1 Cr 0,5 Mo	≤ 15	20	100	150	300
1,25 Cr 0,5 Mo	> 15	100	150	nepoužitelné	
0,5 Cr 0,5 Mo 0,25 V	≤ 15	100	150	nepoužitelné	300
	> 15	100	200	nepoužitelné	
2,25 Cr 1 Mo	≤ 15	75	150	200	350
	> 15	100	200	nepoužitelné	
5 Cr 0,5 Mo 7 Cr 0,5 Mo 9 Cr 1 Mo	všechny	150	200	nepoužitelné	350
12 Cr Mo V	≤ 8	150	nepoužitelné	nepoužitelné	300 ^a 450 ^b
	> 8	200 ^a	nepoužitelné	nepoužitelné	
		350 ^b			

a Martenzitická metoda, při které je teplota předehřevu nižší než teplota počátku martenzitické transformace M_s a transformace na martenzit nastává při svařování.

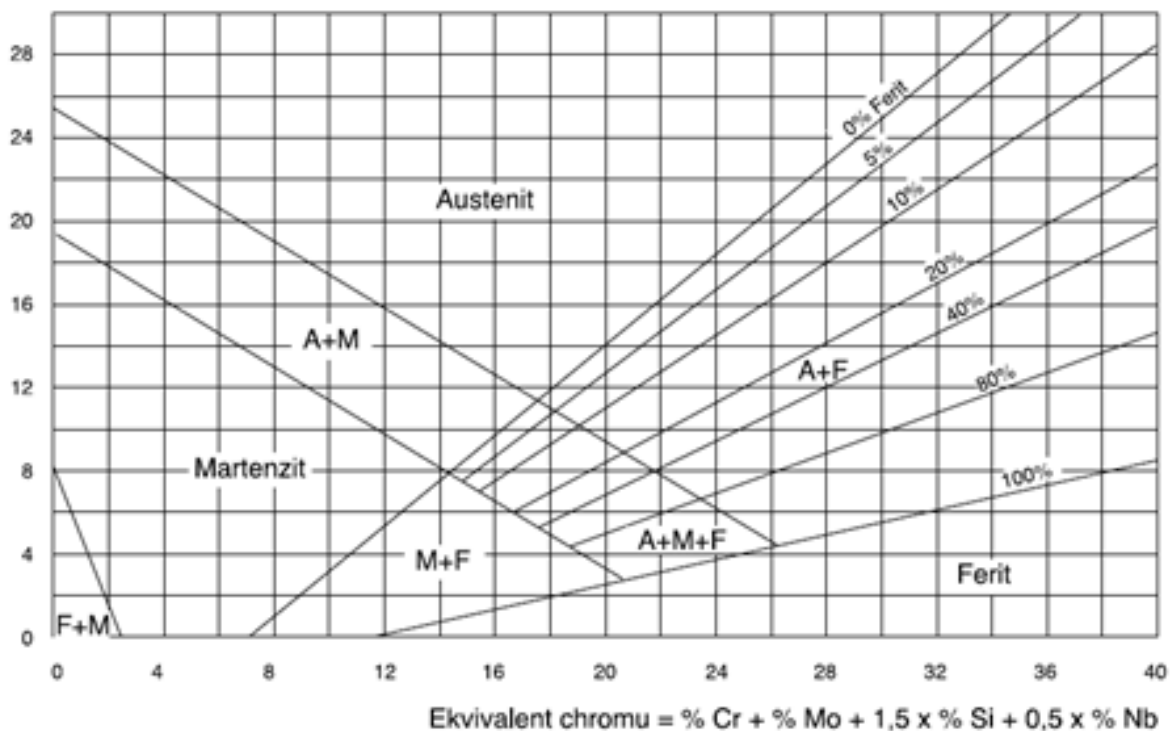
b Austenitická metoda, při které je teplota předehřevu vyšší než M_s a spoj musí být ochlazen pod M_s , aby bylo zajištěno, že transformace na martenzit nastane před tím, než je použito jakékoliv tepelné zpracování po svařování.

Příloha 1.7. Experimentálně ověřené teploty předehřevu a interpass pro vybrané Cr-Mo oceli [92]

Nominální chem. složení ocelí	Název ocelí	Předehřev (°C)	Interpass teplota (°C)	PWHT (°C)
0,5% Mo	P1	100 - 250	100 - 250	630 - 670 / 1 hod
1,25% Cr 0,5% Mo	P2, P11, P12	200 - 300	200 - 300	690 / 1 - 2 hod
1,25% Cr 0,5% Mo 0,25% V	CrMoV	200 - 300	200 - 300	690 / 1 - 2 hod
2,2% Cr 0,2% Mo 1,6% W Nb V N B Ni	P23	150 - 200	150 - 200	Není vždy vyžadováno 715-740 / 1 hod
2,5% Cr 1,0% Mo V Ti B	P24	150 - 200	150 - 200	Není vždy vyžadováno 715-740 / 1 hod
5,0% Cr 0,5% Mo	P5	min. 200	min. 200	732 - 760 / 1 hod 725 - 745 / 2 hod
9,0% Cr 1,0% Mo	T9	min. 200	min. 200	732 - 760 / 1 hod 740 - 780 / 2 hod
9,0% Cr 1,0% Mo Nb V, N	P91	min. 150	200 - 300	760 / 2 - 3 hod 770 / 2 - 3 hod
9,0% Cr 1,0% Mo 1,0% W Nb V N	P911	200 - 300	200 - 300	760 / 2 - 3 hod 770 / 2 - 3 hod
12,0% Cr 1,0% Mo 0,5% W 0,3% V	X20	max. 400 lépe 200 - 350	pod 500	Ochlazení pod 120°C výdrž 1 – 2 hod, poté 750 - 770 / 3 hod
9,0% Cr 1,0% Mo 1,7% W Nb V N	P92	min. 200	max. 350	Ochlazení pod 100°C poté 730-770 / 4 hod

Příloha 1.8. Schaefflerův konstituční diagram [97]

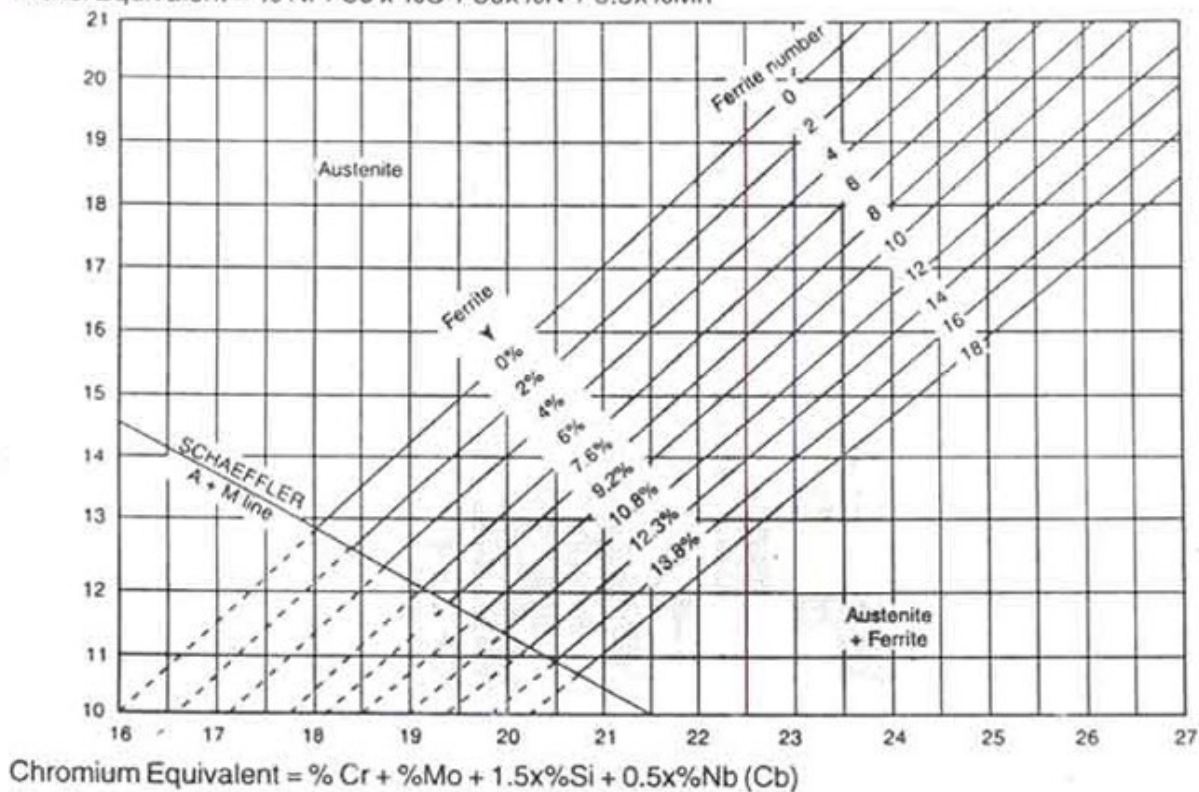
Ekvivalent niklu = $\% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0,5 \times \% \text{Mn}$



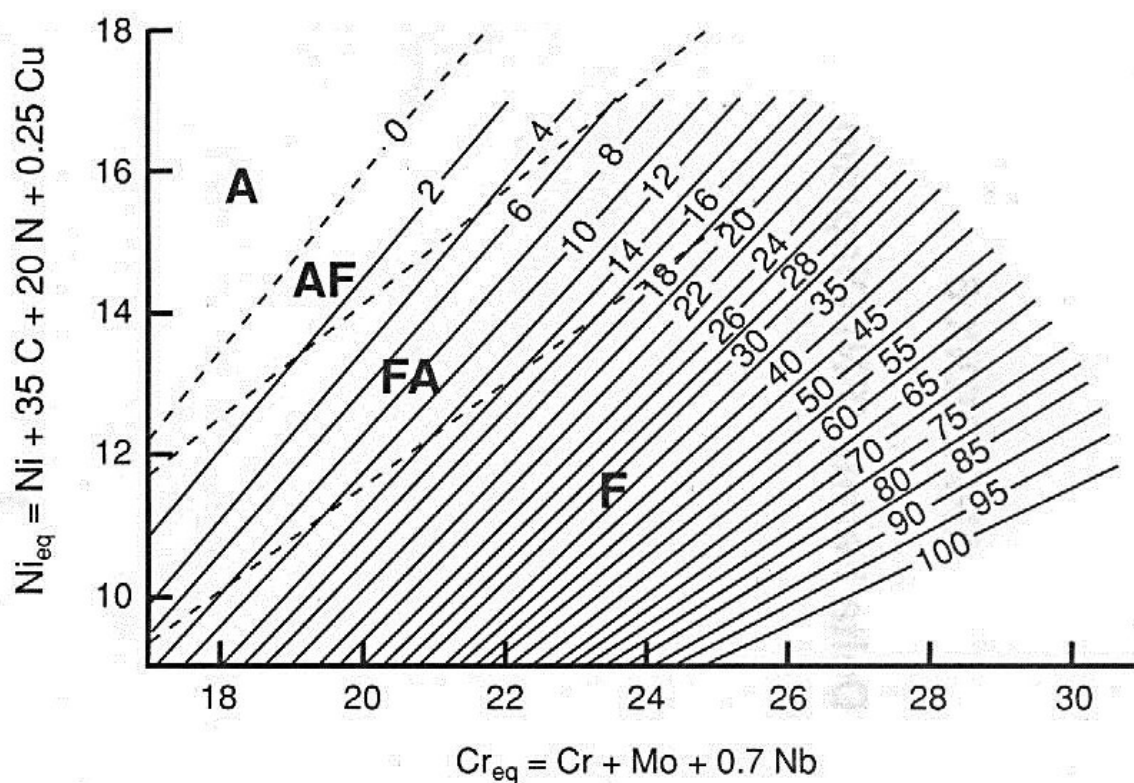
Příloha 1.8. De Longův konstituční diagram [89]

DeLong diagram

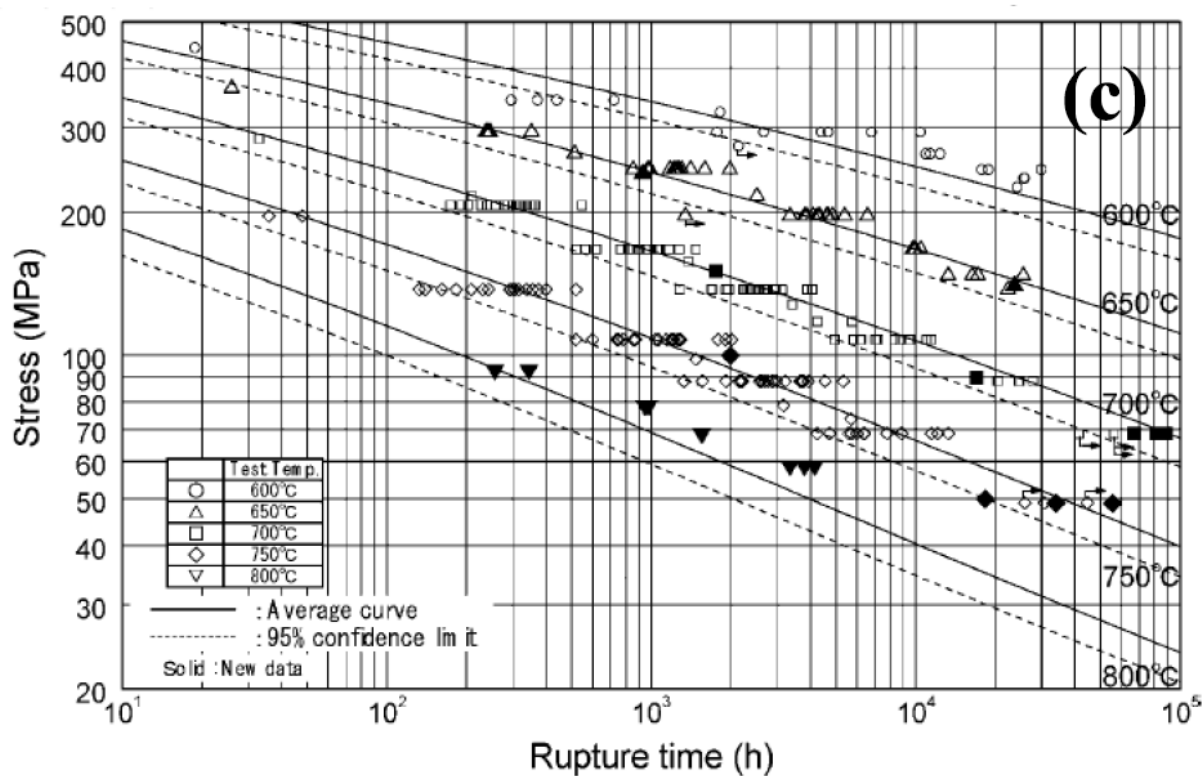
Nickel Equivalent = $\% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 30 \times \% \text{N} + 0,5 \times \% \text{Mn}$



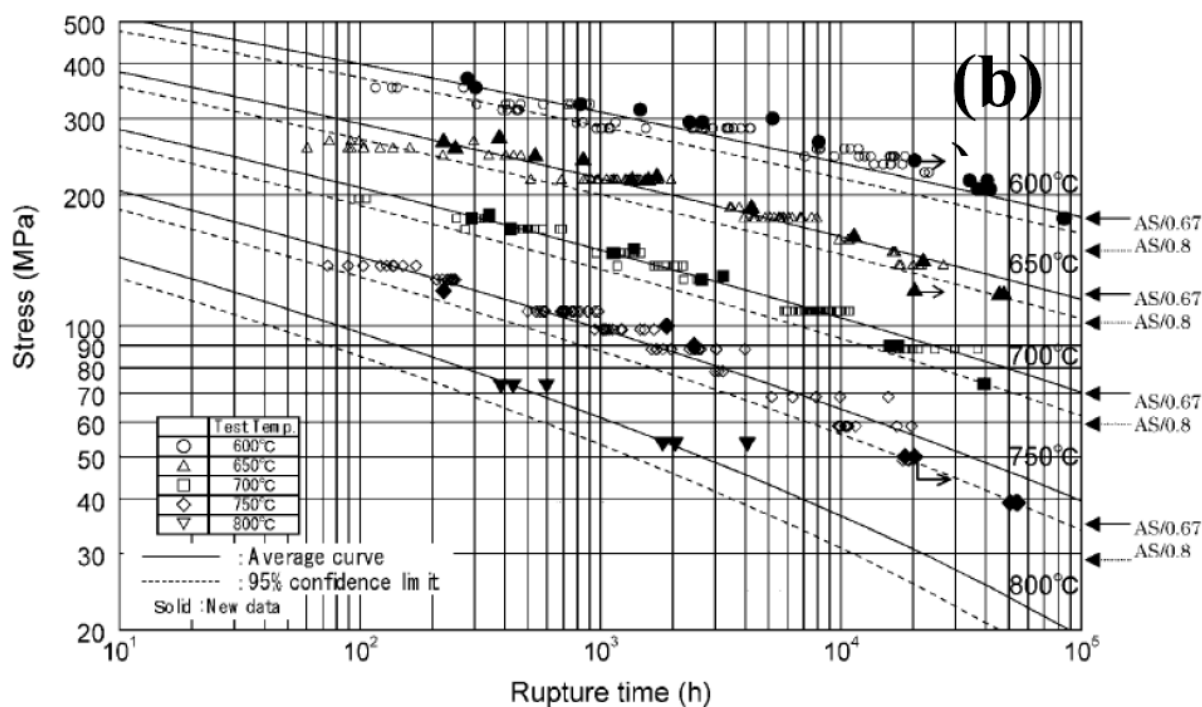
Příloha 1.8. WRC -1992 konstituční diagram [162]



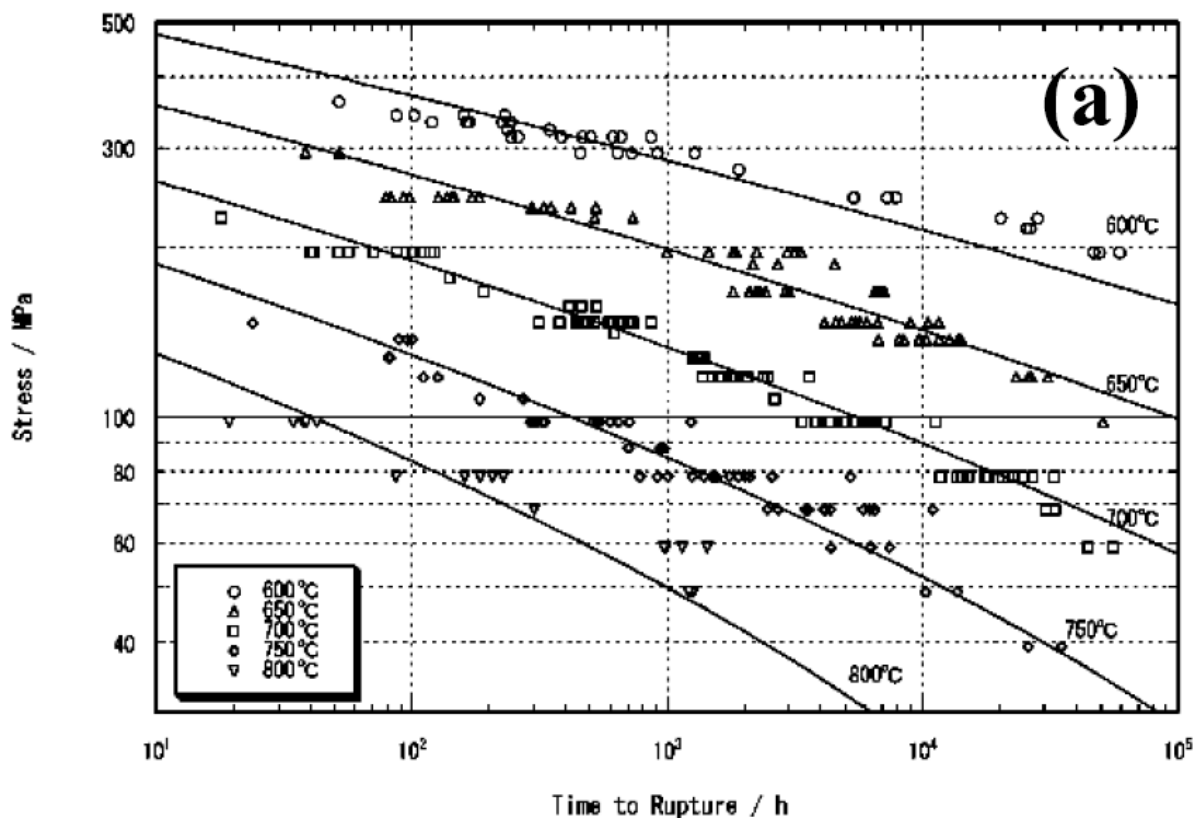
Příloha 2.1. Křivky meze pevnosti při tečení materiálu HR3C pro různé teploty [107]



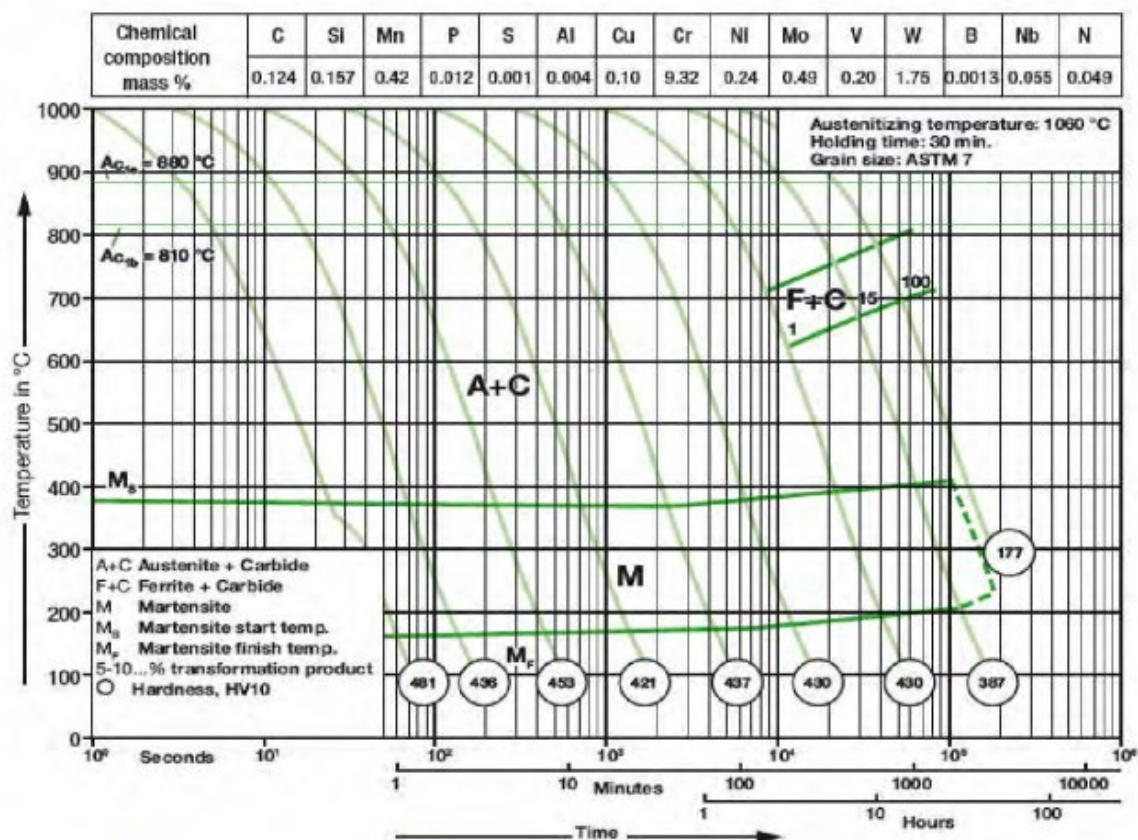
Příloha 2.2. Křivky meze pevnosti při tečení materiálu S304H pro různé teploty [107]



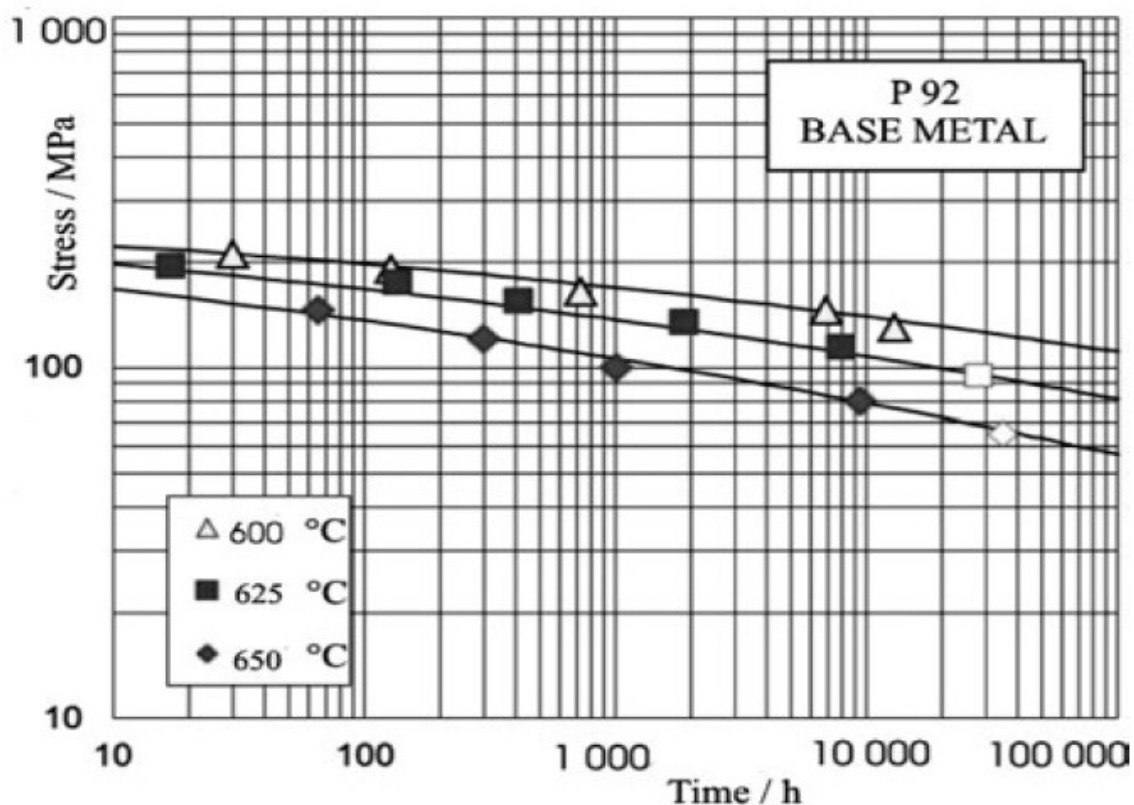
Příloha 2.3. Křivky meze pevnosti při tečení materiálu TP347HFG pro různé teploty [107]



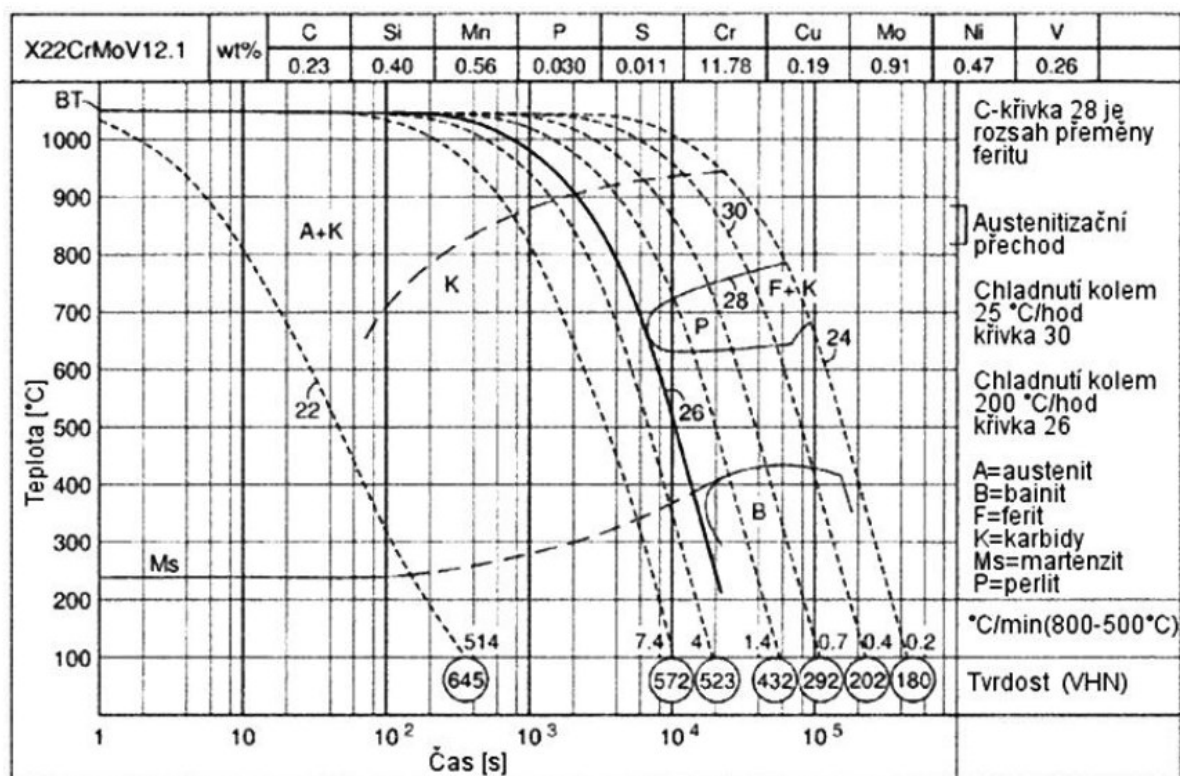
Příloha 2.4. ARA diagram oceli P92 [117]



Příloha 2.5. Křivky meze pevnosti při tečení materiálu P92 pro teploty 600, 625 a 650 °C [118]



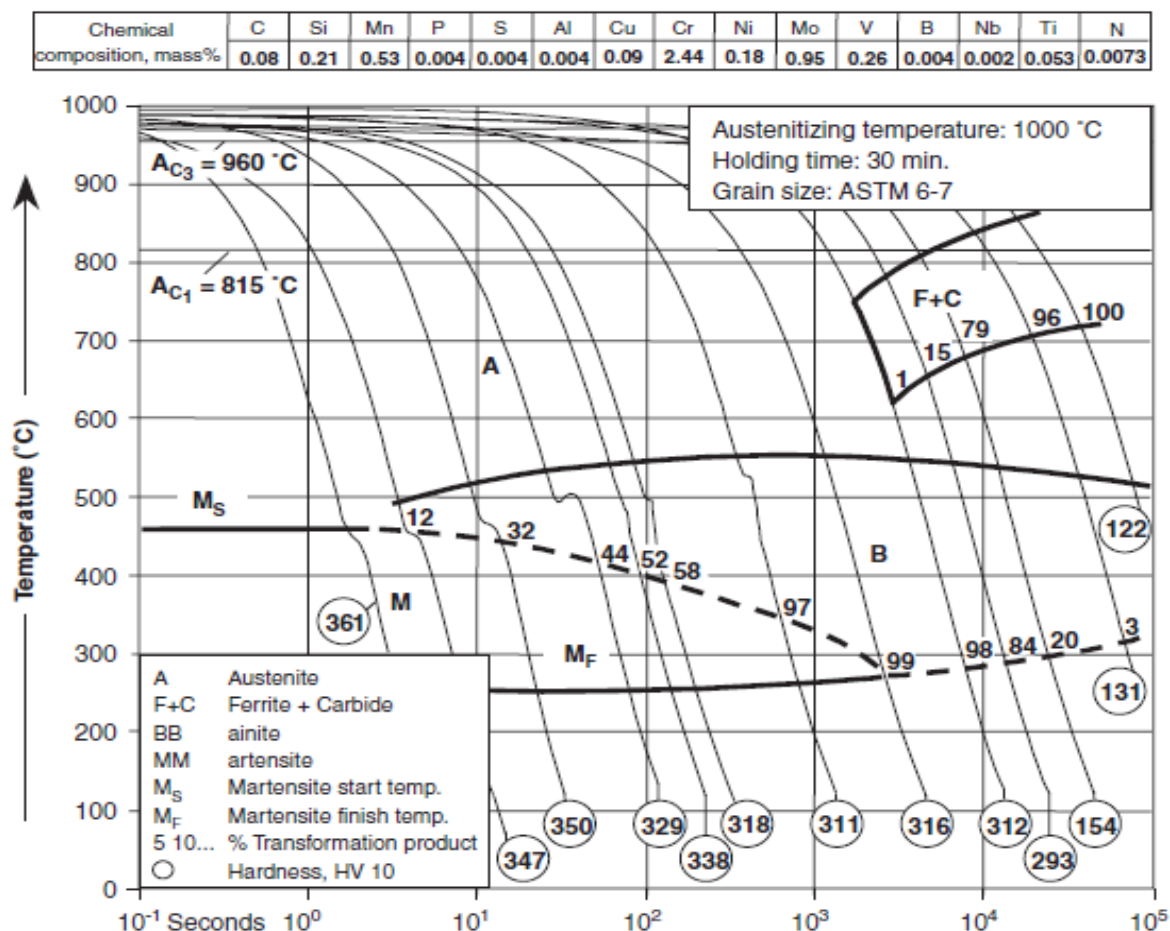
Příloha 2.6. ARA diagram oceli X22CrMoV12-1 [121]



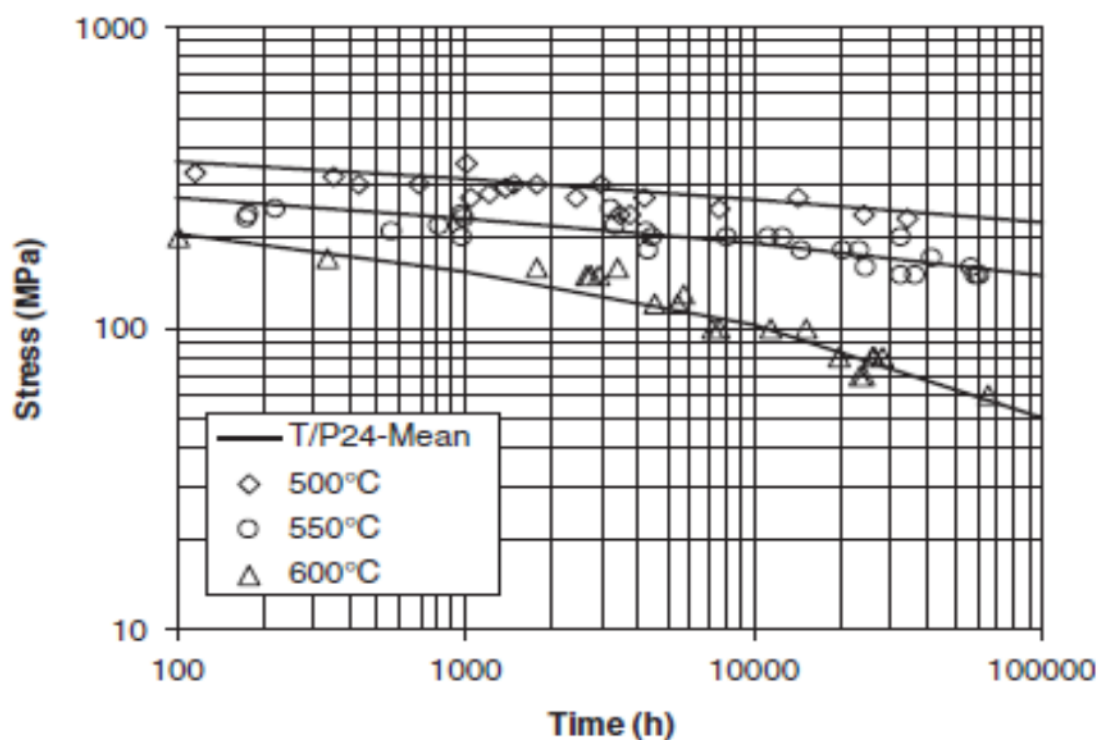
Příloha 2.7. Informativní hodnoty meze tečení pro plastické prodloužení 1% a meze pevnosti při tečení oceli X22CrMoV12-1 pro 10^4 a 10^5 hodin [122]

Označení oceli		Teplota [°C]	Mez tečení pro plastické prodloužení 1%		Mez pevnosti při tečení	
Značka	Číselné označ.		10 000 hod [MPa]	100 000 hod [MPa]	10 000 hod [MPa]	100 000 hod [MPa]
X22CrMoV12-1	1.4923	450	436	373	480	432
		460	405	341	451	397
		470	375	308	422	368
		480	344	278	394	336
		490	316	248	366	306
		500	289	221	338	275
		510	262	195	312	245
		520	235	170	286	216
		530	211	148	261	187
		540	187	127	235	161
		550	165	108	211	137
		560	144	91	187	118
		570	126	77	165	99
		580	108	64	143	83
		590	92	53	122	70
		600	79	44	103	59

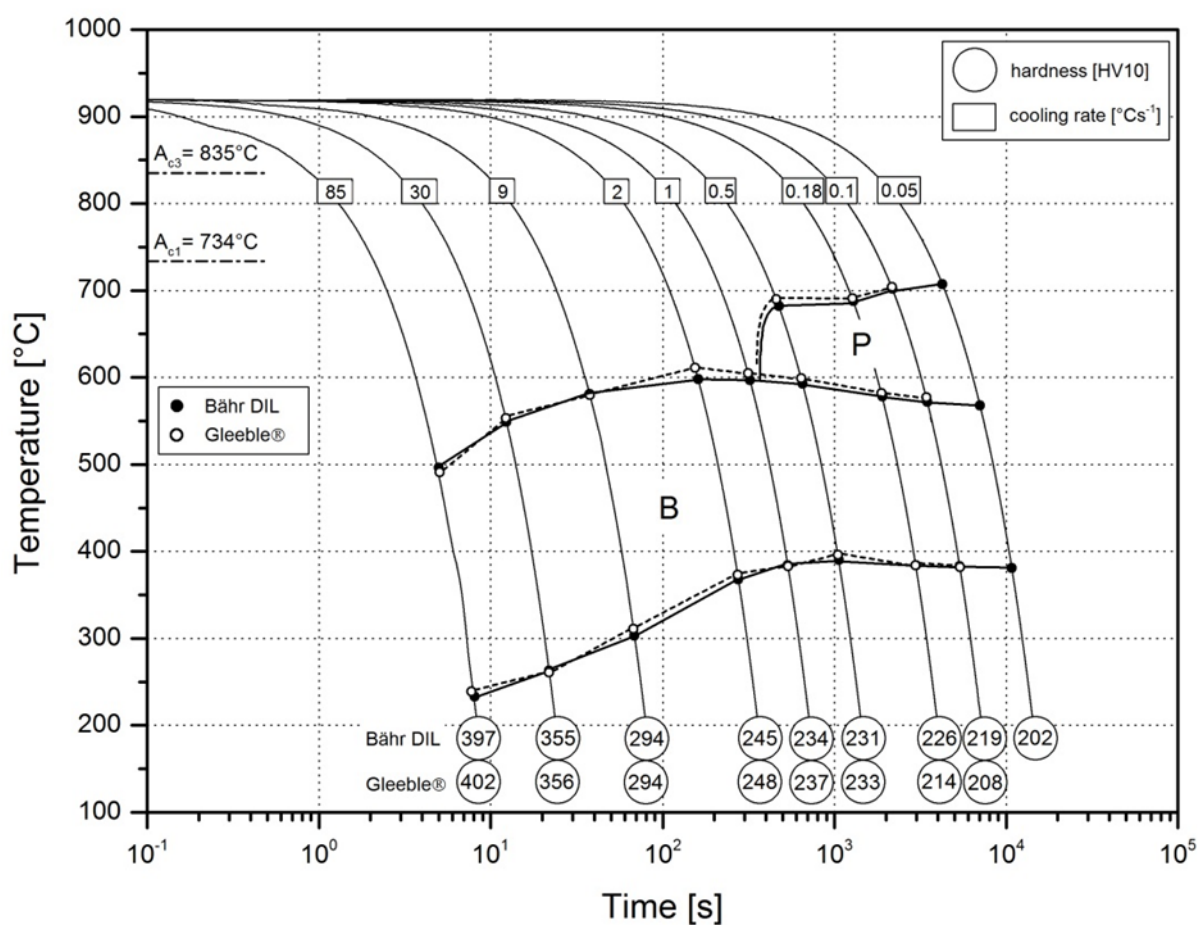
Příloha 2.8. ARA diagram oceli P24 [126]



Příloha 2.9. Křivky meze pevnosti při tečení materiálu P24 pro teploty 600, 625 a 650°C [126]



Příloha 2.10. ARA diagram oceli 10GN2MFA [130]



Příloha 3.1. Výsledky optimalizovaných hodnot poměru aktivační energie a plynové konstanty Q/R pro materiály HR3C, TP347HFG, P92 a P24 [156]

Expoziční teplota	Stanovení poměru Q/R [K] pro různé expoziční teploty			
	HR3C	TP347HFG	P92	P24
1000 [°C]	70500	72080	72800	70800
1100 [°C]	71200	76650	69800	71000
1179 [°C]	-	-	68000	-
Průměrná hodnota Q/R [K]	70850	74365	70200	70900

Poznámka: Poměry Q/R byly optimalizovány pro koef. $m = 4$ a konstantu $K_0 = 0,4948 \cdot 10^{14}$

Příloha 3.2. Velikosti zrna materiálu HR3C pro vzorky připravené v programovatelné peci [147]

HR 3 C			Lineární průsečíková metoda						Planimetrická metoda			Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna dle normy [mm]
			N _{Lx}	N _{Ly}	N _{Lz}	N _L	I	G1	Počet zrn na mm ²	Střední plocha zrna [mm ²]	G2		
Tepelně nezprac.	Podélně	2 - PO	13,44	14,00	11,33	12,873	0,07768	4	174,8	0,00571950	4	0,08840	0,07563
	Příčně	2- PŘ	13,33	14,29	10,20	12,480	0,08013	4	181,6	0,00550540	4	0,08840	0,07420
1000°C 4 hod	Podélně	II - 2 - PO	19,04	10,50	10,67	12,870	0,07770	4	184,9	0,00540940	4	0,08840	0,07355
			20,16	15,75	16,00	17,191	0,05817	5	167,0	0,00598600	4	0,08840	0,07737
	Příčně	II - 2 - PŘ	16,80	13,13	11,43	13,608	0,07349	4-5	210,9	0,00474070	5	0,06250	0,06885
			15,60	18,75	24,29	19,223	0,05202	5	240,3	0,00416080	5	0,06250	0,06450
	Podélně	III - 2 - PO	19,20	16,88	15,71	17,203	0,05813	5	231,4	0,00432167	5	0,06250	0,06574
			15,60	15,00	14,29	14,952	0,06688	5	222,4	0,00449553	5	0,06250	0,06705
1000°C 8 hod	Podélně	II - 2 - PŘ	16,80	16,88	18,57	17,397	0,05748	5	242,9	0,00411696	5	0,06250	0,06416
			15,60	15,00	17,14	15,889	0,06294	5	230,1	0,00434568	5	0,06250	0,06592
	Příčně	III - 2 - PO	15,60	15,00	14,29	14,952	0,06688	5	181,5	0,00550861	4	0,08840	0,07422
			14,40	13,13	12,86	13,444	0,07438	4-5	203,3	0,00491964	5	0,06250	0,07014
	Podélně	III - 2 - PŘ	10,80	15,00	15,71	13,654	0,07324	4-5	156,0	0,00641166	4	0,08840	0,08007
			14,40	16,88	14,29	15,142	0,06604	5	200,7	0,00498231	5	0,06250	0,07059
1100°C 4 hod	Podélně	III - 2 - PO	10,80	13,13	17,14	13,444	0,07438	4-5	201,6	0,00495958	5	0,06250	0,07042
			15,60	11,25	21,43	15,551	0,06430	5	235,2	0,00425121	5	0,06250	0,06520
	Příčně	III - 2 - PŘ	12,00	15,00	17,71	14,142	0,07071	4-5	237,8	0,00420550	5	0,06250	0,06485
			8,40	11,25	11,43	10,260	0,09746	4	130,4	0,00766900	4	0,08840	0,08757
	Podélně	II - 2 - PŘ	12,00	9,38	10,00	10,400	0,09615	4	127,8	0,00782200	4	0,08840	0,08844
			14,40	16,80	12,86	14,597	0,06861	5	145,7	0,00686200	4	0,08840	0,08284
1100°C 8 hod	Příčně	III - 2 - PO	13,20	16,88	12,88	14,200	0,07040	5	125,3	0,00798000	4	0,08840	0,08933

Poznámky:

N_{Lx}, N_{Ly}, N_{Lz} - Počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry v jednotlivých směrech,

NL - Průměrný počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry,

I - Průměrná délka přímkového úseku,

G1 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené průsečíkovou metodou,

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Poznámky: NL_x, NL_y, NL_z - Počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry v jednotlivých směrech, NL - Průměrný počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry, I - Průměrná délka přímkového úseku, G1 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené průsečíkovou metodou, G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Příloha 3.3. Velikosti zrna materiálu S304H pro vzorky připravené v programovatelné peci [146]

S 304 H		Lineární průsečíková metoda						Planimetrická metoda			Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna dle normy [mm]
		N _{Lx}	N _{Ly}	N _{Lz}	N _L	I	G1	Počet zrn na mm ²	Střední plocha zrna [mm ²]	G2		
Tepelně neprac.	Podélně	44,40	50,87	63,43	52,326	0,01911	8	2131,3	0,000469200	8	0,02210	0,02166
	Příčně	42,92	50,87	47,57	47,007	0,02127	8	2325,7	0,000429970	8	0,02210	0,02074
1000°C 4 hod	Podélně	36,00	65,63	28,57	40,716	0,02456	8	2045,5	0,000488889	8	0,02210	0,02211
	Příčně	36,00	65,63	64,29	53,353	0,01874	8	1949,6	0,000512933	8	0,02210	0,02265
1000°C 8 hod	Podélně	48,00	28,13	71,43	45,857	0,02181	8	1917,6	0,000521480	8	0,02210	0,02284
	Příčně	66,00	65,63	71,43	67,634	0,01479	9	2365,1	0,000422823	8	0,02210	0,02056
1100°C 4 hod	Podélně	35,52	50,87	38,76	41,222	0,02426	7-8	847,8	0,001179459	7	0,03120	0,03434
	Příčně	35,52	37,00	35,24	35,911	0,02785	7	949,0	0,001053779	7	0,03120	0,03246
1100°C 8 hod	Podélně	41,44	50,87	45,81	45,880	0,02180	8	1011,2	0,000988931	7	0,03120	0,03145
	Příčně	59,20	50,87	45,81	51,672	0,01935	8	1337,9	0,000747448	7	0,03120	0,02734
1100°C 8 hod	Podélně	26,64	18,50	21,14	21,842	0,04578	6	591,2	0,001691592	6	0,04420	0,04113
	Příčně	38,48	37,00	35,24	36,882	0,02711	7	544,5	0,001836586	6	0,04420	0,04286

Poznámky: N_{Lx}, N_{Ly}, N_{Lz} - Počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry v jednotlivých směrech, NL - Průměrný počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry,
I - Průměrná délka přímkového úseku, G1 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené průsečíkovou metodou, G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Příloha 3.4. Velikosti zrna mat. TP347HFG pro vzorky připravené v programovatelné peci [148]

TP 347 HFG			Lineární průsečíková metoda						Planimetrická metoda			Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna dle normy [mm]
			N _{Lx}	N _{Ly}	N _{Lz}	N _L	I	G1	Počet zrn na mm ²	Střední plocha zrna [mm ²]	G2		
Tepelně neprac.	Podélně	Nez_VO_PO	42,00	46,88	57,14	48,274	0,02071	8	2173,3	0,000460130	8	0,02210	0,02145
			44,40	46,25	35,24	41,671	0,02400	8	1555,7	0,000642800	8	0,02210	0,02535
			47,36	46,25	42,29	45,245	0,02210	8	1812,4	0,000551760	8	0,02210	0,02349
	Příčně	Nez_VO_PŘ	54,00	70,31	42,86	54,595	0,01832	8-9	1821,7	0,000548960	8	0,02210	0,02343
			60,00	56,25	50,00	55,260	0,01810	8-9	2141,3	0,000467000	8	0,02210	0,02161
1000°C 4 hod	Podélně	II_1000_PO	50,32	46,25	47,57	48,017	0,02083	8	1547,9	0,000646040	8	0,02210	0,02542
			41,44	39,31	44,05	41,555	0,02406	7-8	1299,0	0,000769830	7	0,03120	0,02775
			48,00	60,94	57,14	55,084	0,01815	8	1534,1	0,000651852	7-8	0,02700	0,02553
	Příčně	II_1000_PŘ	51,80	50,88	42,29	48,122	0,02078	8	1337,9	0,000747450	7	0,03120	0,02734
			48,00	46,88	50,00	48,274	0,02071	8	1566,0	0,000638549	7-8	0,02700	0,02527
1000°C 8 hod	Podélně	III_1000_PO	37,00	48,56	35,24	39,875	0,02509	7,8	1197,9	0,000834810	7	0,03120	0,02889
			47,36	41,63	42,29	43,684	0,02289	8	1143,4	0,000874560	7	0,03120	0,02957
			54,00	37,50	50,00	46,608	0,02146	8	1374,3	0,000727649	7	0,03120	0,02697
	Příčně	III_1000_PŘ	44,40	46,25	38,76	43,016	0,02325	8	1174,5	0,000851400	7	0,03120	0,02918
			42,00	37,50	42,86	40,716	0,02456	7-8	1406,3	0,000711110	7	0,03120	0,02667
1100°C 4 hod	Podélně	II_1100_PO	35,52	46,25	38,76	39,933	0,02504	7-8	1065,6	0,000938400	7	0,03120	0,03063
			44,40	41,63	42,29	42,754	0,02339	8	1151,2	0,000868660	7	0,03120	0,02947
			41,44	37,00	42,29	40,173	0,02489	7-8	1221,2	0,000818860	7	0,03120	0,02862
	Příčně	II_1100_PŘ	34,04	27,75	45,81	35,108	0,02848	7	902,3	0,001108280	7	0,03120	0,03329
			32,56	41,63	35,24	36,281	0,02756	7	949,0	0,001053780	7	0,03120	0,03246
1100°C 8 hod	Podélně	III_1100_PO	34,04	37,00	33,48	34,805	0,02873	7	933,4	0,001071340	7	0,03120	0,03273
	Příčně	III_1100_PŘ	35,52	32,38	42,29	36,500	0,02740	7	894,50	0,001117922	7	0,03120	0,03344

Poznámky: N_{Lx}, N_{Ly}, N_{Lz} - Počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry v jednotlivých směrech, NL - Průměrný počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry, I - Průměrná délka přímkového úseku, G1 - Číslo velikostí zrna vyhodnocené průsečíkovou metodou, G2 - Číslo velikostí zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Poznámky: N_{Lx}, N_{Ly}, N_{Lz} - Počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry v jednotlivých směrech, NL - Průměrný počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry,
I - Průměrná délka přímkového úseku, G1 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené průsečíkovou metodou, G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Příloha 3.5. Velikosti zrna materiálu P92 pro vzorky připravené v programovatelné peci [145]

P92		Lineární průsečková metoda						Planimetrická metoda			Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna dle normy [mm]
		N _{Lx}	N _{Ly}	N _{Lz}	N _L	I	G1	Počet zrn na mm ²	Střední plocha zrna [mm ²]	G2		
Tepelně nezprac.	Podélné	174,00	187,50	200,00	186,865	0,00535	12	18185,4	0,0000549890	11	0,00780	0,00742
	Příčné	156,00	174,50	189,34	177,860	0,00562	12	16555,4	0,0000604030	11	0,00780	0,00777
1000°C 4 hod	Podélné	144,00	150,00	135,71	143,118	0,00699	11	17068,8	0,0000585934	11	0,00780	0,00765
	Příčné	136,50	139,00	168,95	120,916	0,00827	11	15724,4	0,0000635953	11	0,00780	0,00797
1000°C 8 hod	Podélné	78,00	93,75	78,57	83,134	0,01203	10	4953,8	0,0002018640	9	0,01560	0,01421
	Příčné	102,00	93,75	114,29	103,004	0,00971	10	6296,2	0,0001588268	10	0,01100	0,01260
1100°C 4 hod	Podélné	60,00	84,38	85,71	75,708	0,01321	9	4762,1	0,0002099925	9	0,01560	0,01449
	Příčné	72,00	84,38	82,14	79,318	0,01629	9	4442,5	0,0002250999	9	0,01560	0,01500
1100°C 8 hod	Podélné	48,00	75,00	64,29	61,396	0,01629	8-9	2429,0	0,0004116958	8	0,02210	0,02029
	Příčné	66,91	45,44	79,04	62,174	0,01608	8-9	3314,9	0,0003016667	9	0,01560	0,01737
1100°C 4 hod	Podélné	84,00	65,63	64,29	70,766	0,01413	9	3867,2	0,0002585785	9	0,01560	0,01608
	Příčné	63,00	65,63	67,86	65,464	0,01528	9	3259,9	0,0003067537	9	0,01560	0,01751
1100°C 8 hod	Podélné	22,40	17,50	20,00	19,866	0,05034	5	320,2	0,0031233360	5	0,06250	0,05589
	Příčné	15,79	17,24	17,07	16,688	0,05992	5	337,7	0,0029613748	5	0,06250	0,05442
1100°C 1 hod	Podélné	16,80	17,50	23,33	19,001	0,05263	5	306,2	0,0032653100	5	0,06250	0,05714
	Příčné	22,22	28,57	27,03	25,793	0,03880	6	298,6	0,0033486736	5	0,06250	0,05787
1179°C 1 hod	Podélné	14,40	12,86	16,80	14,597	0,06861	5	167,5	0,0059708265	4	0,08840	0,07727
	Příčné	17,76	18,50	14,10	16,668	0,05999	5	124,5	0,0080350620	4	0,08840	0,08964
1179°C 4 hod	Podélné	14,80	18,50	17,62	16,897	0,05918	5	116,7	0,0085707328	4	0,08840	0,09258
	Příčné	17,76	13,87	14,10	15,144	0,06603	5	119,6	0,0083587481	4	0,08840	0,09143
1179°C 1 hod	Podélné	6,00	5,63	7,14	6,224	0,16088	2	32,0	0,0312888900	2	0,17700	0,17689
	Příčné	4,80	7,50	5,71	5,903	0,16940	2	34,5	0,0289712000	2	0,17700	0,17021
1179°C 4 hod	Podélné	6,00	3,75	4,29	4,586	0,21807	1	16,6	0,0601710000	1	0,25000	0,24530
	Příčné	5,63	4,80	7,50	5,874	0,17024	2	23,8	0,0420233390	1	0,25000	0,20500
1179°C 8 hod	Podélné	10,80	5,63	8,57	8,045	0,12430	3	37,1	0,0269731790	2	0,17700	0,16424
	Příčné	4,80	3,75	4,29	4,257	0,23491	1	19,2	0,0521480000	1	0,25000	0,22836
1179°C 1 hod	Podélné	4,80	3,75	7,14	5,047	0,19813	1-2	17,9	0,0558730100	1	0,25000	0,23637
	Příčné	4,29	5,63	7,14	5,566	0,17966	1-2	20,9	0,0477372540	1	0,25000	0,21849
1179°C 4 hod	Podélné	5,71	4,80	5,63	5,364	0,18644	1-2	23,7	0,0421666930	1	0,25000	0,20535
	Příčné	4,80	6,00	4,29	4,981	0,20078	1	18,4	0,0542564150	1	0,25000	0,23293
1179°C 8 hod	Podélné	5,40	5,63	5,71	5,578	0,17927	1-2	17,9	0,0558730100	1	0,25000	0,23637
	Příčné	9,60	9,38	5,71	8,012	0,12481	3	21,7	0,0460130000	1	0,25000	0,21451
1179°C 4 hod	Podélné	3,75	4,80	4,96	4,469	0,22374	1	15,0	0,0667423070	1	0,25000	0,25835
	Příčné	4,29	5,63	5,71	5,167	0,19355	1-2	19,5	0,0513821800	1	0,25000	0,22668
1179°C 8 hod	Podélné	6,00	9,38	4,29	6,224	0,16068	2	26,8	0,0372486760	2	0,17700	0,19300
	Příčné	4,80	3,75	9,38	5,527	0,18093	1-2	21,7	0,0460002760	1	0,25000	0,21448

Poznámky: N_{Lx}, N_{Ly}, N_{Lz} - Počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry, NL - Průměrný počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry,
I - Průměrná délka přímkového úseku, G1 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené průsečkovou metodou, G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Příloha 3.6. Velikosti zrna materiálu P24 pro vzorky připravené v programovatelné peci [144]

P24		Lineární průsečková metoda						Planimetrická metoda			Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna dle normy [mm]
		N _{Lx}	N _{Ly}	N _{Lz}	N _L	I	G1	Počet zrn na mm ²	Střední plocha zrna [mm ²]	G2		
Tepelně nezprac.	Podélné	62,35	64,90	56,38	61,100	0,01640	9	3764,7	0,000265620	9	0,01560	0,01630
	Příčné	41,44	83,25	66,95	61,356	0,01629	9	3687,0	0,000271226	9	0,01560	0,01647
1000°C 4 hod	Podélné	82,88	69,37	81,05	77,528	0,01290	9	3998,1	0,000251200	9	0,01560	0,01585
	Příčné	89,74	65,52	84,38	79,163	0,01263	9	3593,6	0,000279000	9	0,01560	0,01670
1000°C 8 hod	Podélné	20,72	18,50	28,19	22,108	0,04523	6	451,1	0,002216600	6	0,04420	0,04708
	Příčné	29,60	18,50	28,19	24,899	0,04010	6	801,2	0,001248165	7	0,03120	0,03533
1000°C 8 hod	Podélné	34,04	27,75	31,71	31,057	0,03220	6	871,2	0,001147866	7	0,03120	0,03388
	Příčné	50,32	32,37	37,00	39,209	0,02550	7	793,4	0,001260400	7	0,03120	0,03550
1100°C 4 hod	Podélné	4,80	7,50	8,57	6,757	0,14799	2	26,8	0,037248678	2	0,17700	0,19300
	Příčné	11,84	18,50	10,57	13,230	0,07559	4	140,0	0,007142200	4	0,08840	0,08451
1100°C 4 hod	Podélné	10,80	7,50	7,14	8,333	0,12001	3	43,5	0,023100000	2	0,17700	0,15199
	Příčné	6,00	1,88	2,86	3,177	0,31472	0	22,4	0,044698300	1	0,25000	0,21142
1100°C 8 hod	Podélné	14,00	17,50	13,33	14,838	0,06739	5	167,0	0,005986390	4	0,08840	0,07737
	Příčné	15,79	18,86	15,79	16,451	0,06079	5	181,0	0,005525900	4	0,08840	0,07434
1100°C 8 hod	Podélné	19,60	17,50	16,67	17,881	0,05593	5	194,9	0,005131195	5	0,06250	0,07163
	Příčné	25,20	21,88	13,33	19,443	0,05140	5	181,0	0,005525900	4	0,08840	0,07434
1100°C 8 hod	Podélné	11,84	18,50	14,10	14,561	0,06868	4-5	132,2	0,007562411	4	0,08840	0,08696
	Příčné	11,84	13,87	21,14	15,144	0,06603	5	140,0	0,007142277	4	0,08840	0,08451
1100°C 8 hod	Podélné	17,76	13,87	10,57	13,759	0,07268	4	108,9	0,009182928	4	0,08840	0,09583
	Příčné	14,80	13,87	14,10	14,254	0,07017	4-5	217,80	0,004591464	5	0,06250	0,06776

Poznámky: N_{Lx}, N_{Ly}, N_{Lz} - Počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry v jednotlivých směrech, NL - Průměrný počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry, I - Průměrná délka přímkového úseku, G1 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené průsečkovou metodou, G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Poznámky: N_{Lx}, N_{Ly}, N_{Lz} - Počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry v jednotlivých směrech, NL - Průměrný počet zrn zachycených na jednotkovou délku čáry,
I - Průměrná délka přímkového úseku, G1 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené průsečkovou metodou, G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Příloha 3.7. Údaje o velikosti zrna na materiálu P24 pro zákl. materiál a teploty 900 a 1000°C

P24			Počet zrn na mm ² [-]	Střední plocha zrna [mm ²]	G2	Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna [mm]	D _{střední} [mm]
Základ. mat.	Podél.	4 - Po	3764,7	0,000265620	9	0,01560	0,01630	0,01633
			3687,0	0,000271226	9	0,01560	0,01647	
	Příčné	4 - Př	3998,1	0,000251200	9	0,01560	0,01585	
			3593,6	0,000279000	9	0,01560	0,01670	
900°C 30 min	Podél.	I - 4 - Po	3659,3	0,000273276	9	0,01560	0,01653	0,01763
			3098,7	0,000322716	9	0,01560	0,01796	
	Příčné	I - 4 - Př	3463,9	0,000288692	9	0,01560	0,01699	
			2757,4	0,000362660	8-9	0,01885	0,01904	
900°C 120 min	Podél.	I - 4 - Po	2486,0	0,000402253	8-9	0,01885	0,02006	0,02113
			2117,5	0,000472255	8	0,02210	0,02173	
	Příčné	I - 4 - Př	1893,1	0,000528234	8	0,02210	0,02298	
			2563,8	0,000390046	8-9	0,01885	0,01975	
900°C 240 min	Podél.	I - 4 - Po	1573,6	0,000635486	7-8	0,02665	0,02521	0,02624
			1431,7	0,000698470	7-8	0,02665	0,02643	
	Příčné	I - 4 - Př	1376,2	0,000726639	7-8	0,02665	0,02696	
			1439,7	0,000694589	7-8	0,02665	0,02636	
900°C 480 min	Podél.	I - 4 - Po	1198,3	0,000834516	7-8	0,02665	0,02889	0,02845
			1163,8	0,000859254	7	0,03120	0,02931	
	Příčné	I - 4 - Př	1361,8	0,000734322	7-8	0,02665	0,02710	
			1231,0	0,000812348	7-8	0,02665	0,02850	
1000°C 30 min	Podél.	II - 4 - Po	1173,2	0,000852370	7	0,03120	0,02920	0,03203
			936,5	0,001067810	7	0,03120	0,03268	
	Příčné	II - 4 - Př	879,3	0,001137270	7	0,03120	0,03372	
			946,1	0,001056970	7	0,03120	0,03251	
1000°C 120 min	Podél.	II - 4 - Po	793,1	0,001260880	6-7	0,03770	0,03551	0,03732
			531,9	0,001880050	6	0,04420	0,04336	
	Příčné	II - 4 - Př	796,7	0,001255180	6-7	0,03770	0,03543	
			817,6	0,001223090	6-7	0,03770	0,03497	
1000°C 240 min	Podél.	II - 4 - Po	815,4	0,001226390	6-7	0,03770	0,03502	0,03491
			801,2	0,001248165	6-7	0,03770	0,03533	
	Příčné	II - 4 - Př	871,2	0,001147866	6-7	0,03770	0,03388	
			798,6	0,001252190	6-7	0,03770	0,03539	
1000°C 480 min	Podél.	II - 4 - Po	312,7	0,003197950	5-6	0,05335	0,05655	0,05779
			293,6	0,003405990	5	0,06250	0,05836	
	Příčné	II - 4 - Př	307,4	0,003253090	5-6	0,05335	0,05704	
			285,3	0,003505080	5	0,06250	0,05920	

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou
D_{střední} – Průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna

Příloha 3.8. Údaje o velikosti zrna na materiálu P24 pro teploty 1100 a 1200°C

P24			Počet zrn na mm ² [-]	Střední plocha zrna [mm ²]	G2	Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna [mm]	D _{střední} [mm]
1100°C 30 min	Podél.	III - 4 - Po	338,1	0,002957705	5-6	0,05335	0,05438	0,05379
			349,3	0,002862869	5-6	0,05335	0,05351	
	Příčné	III - 4 - Př	341,7	0,002926544	5-6	0,05335	0,05410	
			353,9	0,002825657	5-6	0,05335	0,05316	
1100°C 120 min	Podél.	III - 4 - Po	281,4	0,003553660	5	0,06250	0,05961	0,05892
			290,7	0,003439972	5	0,06250	0,05865	
	Příčné	III - 4 - Př	294,3	0,003397893	5	0,06250	0,05829	
			286,1	0,003495281	5	0,06250	0,05912	
1100°C 240 min	Podél.	III - 4 - Po	167,0	0,005986411	4-5	0,07545	0,07737	0,07442
			183,4	0,005452563	4-5	0,07545	0,07384	
	Příčné	III - 4 - Př	194,9	0,005131205	4-5	0,07545	0,07163	
			178,6	0,005599104	4-5	0,07545	0,07483	
1100°C 480 min	Podél.	III - 4 - Po	132,2	0,007562411	4	0,08840	0,08696	0,08912
			140,0	0,007142277	4	0,08840	0,08451	
	Příčné	III - 4 - Př	108,9	0,009182928	4	0,08840	0,09583	
			125,8	0,007949126	4	0,08840	0,08916	
1200°C 30 min	Podél.	IV - 4 - Po	32,4	0,030864198	2	0,17700	0,17568	0,18041
			29,1	0,034364261	2	0,17700	0,18538	
	Příčné	IV - 4 - Př	27,4	0,036496350	2	0,17700	0,19104	
			34,8	0,028735632	2	0,17700	0,16952	
1200°C 120 min	Podél.	IV - 4 - Po	27,2	0,036764706	2	0,17700	0,19174	0,19833
			24,8	0,040322581	1-2	0,21350	0,20080	
	Příčné	IV - 4 - Př	23,7	0,042194093	1-2	0,21350	0,20541	
			26,2	0,038167939	1-2	0,21350	0,19537	
1200°C 240 min	Podél.	IV - 4 - Po	19,9	0,050251256	1	0,25000	0,22417	0,21492
			22,4	0,044642857	1	0,25000	0,21289	
	Příčné	IV - 4 - Př	21,2	0,047169811	1	0,25000	0,21719	
			23,7	0,042194093	1-2	0,21350	0,20541	
1200°C 480 min	Podél.	IV - 4 - Po	17,4	0,057471264	1	0,25000	0,23973	0,23450
			18,2	0,054945055	1	0,25000	0,23440	
	Příčné	IV - 4 - Př	19,1	0,052356021	1-2	0,21350	0,22881	
			18,1	0,055248619	1	0,25000	0,23505	

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

D_{střední} – Průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna

Příloha 3.9. Údaje o velikosti zrna na materiálu P92 pro zákl. materiál a teploty 900 a 1000°C

P92			Počet zrn na mm ² [-]	Střední plocha zrna [mm ²]	G2	Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna [mm]	D _{střední} [mm]
Základ. mat.	Podél.	3 - Po	18185,4	0,000054989	11	0,00780	0,00742	0,00770
			16555,4	0,000060403	11	0,00780	0,00777	
	Příčné	3 - Př	17066,8	0,000058593	11	0,00780	0,00765	
			15724,4	0,000063595	11	0,00780	0,00797	
900°C 30 min	Podél.	I - 3 - Po	13143,2	0,000076085	10-11	0,00940	0,00872	0,00896
			12211,8	0,000081888	10-11	0,00940	0,00905	
	Příčné	I - 3 - Př	11784,3	0,000084859	10-11	0,00940	0,00921	
			12749,7	0,000078433	10-11	0,00940	0,00886	
900°C 120 min	Podél.	I - 3 - Po	11736,1	0,000085207	10-11	0,00940	0,00923	0,00942
			10693,6	0,000093514	10-11	0,00940	0,00967	
	Příčné	I - 3 - Př	11508,0	0,000086896	10-11	0,00940	0,00932	
			11180,9	0,000089438	10-11	0,00940	0,00946	
900°C 240 min	Podél.	I - 3 - Po	7438,2	0,000134441	10	0,01100	0,01159	0,01194
			7107,4	0,000140698	10	0,01100	0,01186	
	Příčné	I - 3 - Př	6638,9	0,000150627	9-10	0,01330	0,01227	
			6908,9	0,000144741	10	0,01100	0,01203	
900°C 480 min	Podél.	I - 3 - Po	5273,0	0,000189645	9-10	0,01330	0,01377	0,01351
			5738,1	0,000174274	9-10	0,01330	0,01320	
	Příčné	I - 3 - Př	5549,8	0,000180187	9-10	0,01330	0,01342	
			5371,6	0,000186164	9-10	0,01330	0,01364	
1000°C 30 min	Podél.	II - 3 - Po	8893,3	0,000112444	10	0,01100	0,01060	0,01038
			9312,9	0,000107378	10	0,01100	0,01036	
	Příčné	II - 3 - Př	9545,7	0,000104759	10	0,01100	0,01024	
			9392,2	0,000106741	10	0,01100	0,01032	
1000°C 120 min	Podél.	II - 3 - Po	7036,6	0,000142114	10	0,01100	0,01192	0,01197
			6828,1	0,000146454	10	0,01100	0,01210	
	Příčné	II - 3 - Př	7173,8	0,000139396	10	0,01100	0,01181	
			6886,5	0,000145212	10	0,01100	0,01205	
1000°C 240 min	Podél.	II - 3 - Po	4953,8	0,000201864	9-10	0,01330	0,01421	0,01457
			4705,7	0,000212508	9	0,01560	0,01458	
	Příčné	II - 3 - Př	4762,1	0,000209992	9	0,01560	0,01449	
			4442,5	0,000225100	9	0,01560	0,01501	
1000°C 480 min	Podél.	II - 3 - Po	2869,2	0,000348529	8-9	0,01885	0,01867	0,01741
			3314,9	0,000301667	8-9	0,01885	0,01737	
	Příčné	II - 3 - Př	3867,2	0,000258586	9	0,01560	0,01608	
			3259,9	0,000306754	8-9	0,01885	0,01751	

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou
D_{střední} – Průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna

Příloha 3.10. Údaje o velikosti zrna na materiálu P92 pro teploty 1100 a 1200°C

P92			Počet zrn na mm ² [-]	Střední plocha zrna [mm ²]	G2	Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna [mm]	D _{střední} [mm]
1100°C 30 min	Podél.	III - 3 - Po	403,7	0,002477087	5-6	0,05335	0,04977	0,04879
			442,8	0,002258356	6	0,04420	0,04752	
	Příčné	III - 3 - Př	428,3	0,002334812	6	0,04420	0,04832	
			407,3	0,002455193	5-6	0,05335	0,04955	
1100°C 120 min	Podél.	III - 3 - Po	359,1	0,002784740	5-6	0,05335	0,05277	0,05379
			299,8	0,003335557	5-6	0,05335	0,05775	
	Příčné	III - 3 - Př	378,4	0,002642706	5-6	0,05335	0,05141	
			352,9	0,002833664	5-6	0,05335	0,05323	
1100°C 240 min	Podél.	III - 3 - Po	320,2	0,003123336	5-6	0,05335	0,05589	0,05787
			272,5	0,003669725	5	0,06250	0,06058	
	Příčné	III - 3 - Př	306,2	0,003265310	5-6	0,05335	0,05714	
			298,6	0,003348674	5-6	0,05335	0,05787	
1100°C 480 min	Podél.	III - 3 - Po	168,2	0,005945303	4-5	0,07545	0,07711	0,07727
			182,7	0,005473454	4-5	0,07545	0,07398	
	Příčné	III - 3 - Př	159,8	0,006257822	4-5	0,07545	0,07911	
			160,7	0,006222775	4-5	0,07545	0,07888	
1200°C 30 min	Podél.	IV - 3 - Po	23,7	0,042194093	1-2	0,21350	0,20541	0,21092
			21,3	0,046948357	1-2	0,21350	0,21668	
	Příčné	IV - 3 - Př	20,9	0,047846890	1-2	0,21350	0,21874	
			24,3	0,041152263	1-2	0,21350	0,20286	
1200°C 120 min	Podél.	IV - 3 - Po	19,8	0,050505051	1-2	0,21350	0,22473	0,21655
			22,1	0,045248869	1-2	0,21350	0,21272	
	Příčné	IV - 3 - Př	20,7	0,048309179	1-2	0,21350	0,21979	
			22,9	0,043668122	1-2	0,21350	0,20897	
1200°C 240 min	Podél.	IV - 3 - Po	19,7	0,050761421	1-2	0,21350	0,22530	0,22269
			18,9	0,052910053	1-2	0,21350	0,23002	
	Příčné	IV - 3 - Př	21,3	0,046948357	1-2	0,21350	0,21668	
			20,9	0,047846890	1-2	0,21350	0,21874	
1200°C 480 min	Podél.	IV - 3 - Po	20,4	0,049019608	1-2	0,21350	0,22140	0,22571
			19,2	0,052083333	1-2	0,21350	0,22822	
	Příčné	IV - 3 - Př	18,7	0,053475936	1-2	0,21350	0,23125	
			20,3	0,049261084	1-2	0,21350	0,22195	

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

D_{střední} – Průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna

Příloha 3.11. Údaje o velikosti zrna materiálu HR3C pro zákl. materiál a teploty 900 a 1000°C

HR3C			Počet zrn na mm² [-]	Střední plocha zrna [mm²]	G2	Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna [mm]	D_{střední} [mm]
Základ. mat.	Podél.	2 - Po	280,3	0,005719500	5	0,06250	0,05973	0,06074
			273,1	0,005505395	5	0,06250	0,06051	
	Příčné	2 - Př	262,9	0,005409400	5	0,06250	0,06167	
			268,5	0,005986000	5	0,06250	0,06103	
900°C 30 min	Podél.	I - 2 - Po	257,2	0,003888025	5	0,06250	0,06235	0,06411
			234,8	0,004258944	5	0,06250	0,06526	
	Příčné	I - 2 - Př	242,3	0,004127115	5	0,06250	0,06424	
			239,8	0,004170142	5	0,06250	0,06458	
900°C 120 min	Podél.	I - 2 - Po	239,4	0,004177109	5	0,06250	0,06463	0,06453
			248,1	0,004030633	5	0,06250	0,06349	
	Příčné	I - 2 - Př	229,7	0,004353505	5	0,06250	0,06598	
			244,0	0,004098361	5	0,06250	0,06402	
900°C 240 min	Podél.	I - 2 - Po	232,6	0,004299226	5	0,06250	0,06557	0,06574
			241,5	0,004140787	5	0,06250	0,06435	
	Příčné	I - 2 - Př	224,7	0,004450378	5	0,06250	0,06671	
			227,3	0,004399472	5	0,06250	0,06633	
900°C 480 min	Podél.	I - 2 - Po	206,9	0,004833253	4-5	0,07545	0,06952	0,06885
			217,4	0,004599816	5	0,06250	0,06782	
	Příčné	I - 2 - Př	199,2	0,005020080	4-5	0,07545	0,07085	
			221,4	0,004516712	5	0,06250	0,06721	
1000°C 30 min	Podél.	II - 2 - Po	231,1	0,004327131	5	0,06250	0,06578	0,06705
			217,8	0,004591368	5	0,06250	0,06776	
	Příčné	II - 2 - Př	224,3	0,004458315	5	0,06250	0,06677	
			217,0	0,004608295	5	0,06250	0,06788	
1000°C 120 min	Podél.	II - 2 - Po	188,7	0,005299417	4-5	0,07545	0,07280	0,07042
			204,6	0,004887586	4-5	0,07545	0,06991	
	Příčné	II - 2 - Př	211,2	0,004734848	5	0,06250	0,06881	
			203,1	0,004923683	4-5	0,07545	0,07017	
1000°C 240 min	Podél.	II - 2 - Po	210,9	0,004740741	5	0,06250	0,06885	0,07243
			181,3	0,005515720	4-5	0,07545	0,07427	
	Příčné	II - 2 - Př	194,4	0,005144033	4-5	0,07545	0,07172	
			178,4	0,005605381	4-5	0,07545	0,07487	
1000°C 480 min	Podél.	II - 2 - Po	150,8	0,006631300	4-5	0,07545	0,08143	0,08251
			143,5	0,006968641	4	0,08840	0,08348	
	Příčné	II - 2 - Př	139,1	0,007189073	4	0,08840	0,08479	
			154,9	0,006455778	4-5	0,07545	0,08035	

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou
D_{střední} – Průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna

Příloha 3.12. Údaje o velikosti zrna na materiálu HR3C pro teploty 1100 a 1200°C

HR3C			Počet zrn na mm² [-]	Střední plocha zrna [mm²]	G2	Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna [mm]	D_{střední} [mm]
1100°C 30 min	Podél.	III - 2 - Po	198,3	0,005042864	4-5	0,07545	0,07101	0,07155
			191,7	0,005216484	4-5	0,07545	0,07222	
	Příčné	III - 2 - Př	188,2	0,005313496	4-5	0,07545	0,07289	
			203,7	0,004909180	4-5	0,07545	0,07007	
1100°C 120 min	Podél.	III - 2 - Po	163,4	0,006119951	4-5	0,07545	0,07823	0,07841
			153,1	0,006531679	4-5	0,07545	0,08082	
	Příčné	III - 2 - Př	159,3	0,006277464	4-5	0,07545	0,07923	
			176,1	0,005678592	4-5	0,07545	0,07536	
1100°C 240 min	Podél.	III - 2 - Po	143,8	0,006954103	4	0,08840	0,08339	0,07984
			151,7	0,006591958	4-5	0,07545	0,08119	
	Příčné	III - 2 - Př	165,2	0,006053269	4-5	0,07545	0,07780	
			168,8	0,005924171	4-5	0,07545	0,07697	
1100°C 480 min	Podél.	III - 2 - Po	130,4	0,007668847	4	0,08840	0,08757	0,08933
			118,9	0,008410429	4	0,08840	0,09171	
	Příčné	III - 2 - Př	123,8	0,008077544	4	0,08840	0,08988	
			128,7	0,007770008	4	0,08840	0,08815	
1200°C 30 min	Podél.	IV - 2 - Po	186,6	0,005359057	4-5	0,07545	0,07321	0,07420
			173,4	0,005767013	4-5	0,07545	0,07594	
	Příčné	IV - 2 - Př	189,1	0,005288207	4-5	0,07545	0,07272	
			178,1	0,005614823	4-5	0,07545	0,07493	
1200°C 120 min	Podél.	IV - 2 - Po	162,5	0,006153846	4-5	0,07545	0,07845	0,07936
			151,3	0,006609385	4-5	0,07545	0,08130	
	Příčné	IV - 2 - Př	164,2	0,006090134	4-5	0,07545	0,07804	
			157,6	0,006345178	4-5	0,07545	0,07966	
1200°C 240 min	Podél.	IV - 2 - Po	132,1	0,007570023	4	0,08840	0,08701	0,08843
			126,8	0,007886435	4	0,08840	0,08881	
	Příčné	IV - 2 - Př	129,8	0,007704160	4	0,08840	0,08777	
			123,1	0,008123477	4	0,08840	0,09013	
1200°C 480 min	Podél.	IV - 2 - Po	114,3	0,008748906	4	0,08840	0,09354	0,09462
			110,8	0,009025271	4	0,08840	0,09500	
	Příčné	IV - 2 - Př	116,2	0,008605852	4	0,08840	0,09277	
			105,9	0,009442871	4	0,08840	0,09717	

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

D_{střední} – Průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna

Příloha 3.13. Údaje o velikosti zrna mat. TP347HFG pro zákl. materiál a teploty 900 a 1000°C

TP347HFG			Počet zrn na mm² [-]	Střední plocha zrna [mm²]	G2	Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna [mm]	D_{střední} [mm]
Základ. mat.	Podél.	5 - Po	1812,4	0,000551760	8	0,02210	0,02349	0,02347
			1555,7	0,000642800	8	0,02210	0,02535	
	Příčné	5 - Př	1821,7	0,000548960	7-8	0,02665	0,02343	
			2141,3	0,000467000	8	0,02210	0,02161	
900°C 30 min	Podél.	I - 5 - Po	1804,5	0,000554170	8	0,02210	0,02354	0,02382
			1751,2	0,000571037	8	0,02210	0,02390	
	Příčné	I - 5 - Př	1776,4	0,000562936	8	0,02210	0,02373	
			1719,4	0,000581598	8	0,02210	0,02412	
900°C 120 min	Podél.	I - 5 - Po	1782,9	0,000560884	8	0,02210	0,02368	0,02384
			1708,7	0,000585240	8	0,02210	0,02419	
	Příčné	I - 5 - Př	1824,1	0,000548216	8	0,02210	0,02341	
			1725,8	0,000579441	8	0,02210	0,02407	
900°C 240 min	Podél.	I - 5 - Po	1672,5	0,000597907	7-8	0,02665	0,02445	0,02403
			1743,2	0,000573658	8	0,02210	0,02395	
	Příčné	I - 5 - Př	1709,6	0,000584932	8	0,02210	0,02419	
			1806,0	0,000553710	8	0,02210	0,02353	
900°C 480 min	Podél.	I - 5 - Po	1692,1	0,000590982	8	0,02210	0,02431	0,02448
			1734,7	0,000576469	8	0,02210	0,02401	
	Příčné	I - 5 - Př	1654,8	0,000604303	7-8	0,02665	0,02458	
			1597,8	0,000625861	7-8	0,02665	0,02502	
1000°C 30 min	Podél.	II - 5 - Po	1672,4	0,000597943	7-8	0,02665	0,02445	0,02451
			1608,2	0,000621813	7-8	0,02665	0,02494	
	Příčné	II - 5 - Př	1734,9	0,000576402	8	0,02210	0,02401	
			1646,8	0,000607238	7-8	0,02665	0,02464	
1000°C 120 min	Podél.	II - 5 - Po	1439,1	0,000694879	7-8	0,02665	0,02636	0,02583
			1484,7	0,000673537	7-8	0,02665	0,02595	
	Příčné	II - 5 - Př	1563,2	0,000639713	7-8	0,02665	0,02529	
			1512,3	0,000661244	7-8	0,02665	0,02571	
1000°C 240 min	Podél.	II - 5 - Po	1329,0	0,000752445	7-8	0,02665	0,02743	0,02647
			1534,1	0,000651852	7-8	0,02665	0,02553	
	Příčné	II - 5 - Př	1377,9	0,000725742	7-8	0,02665	0,02694	
			1481,8	0,000674855	7-8	0,02665	0,02598	
1000°C 480 min	Podél.	II - 5 - Po	1197,9	0,000834810	7-8	0,02665	0,02889	0,02865
			1143,4	0,000874560	7	0,03120	0,02957	
	Příčné	II - 5 - Př	1374,3	0,000727649	7-8	0,02665	0,02697	
			1176,1	0,000850268	7	0,03120	0,02916	

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

D_{střední} – Průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna

Příloha 3.14. Údaje o velikosti zrna na materiálu TP347HFG pro teploty 1100 a 1200°C

TP347HFG			Počet zrn na mm² [-]	Střední plocha zrna [mm²]	G2	Jmenovitá střední velikost zrna [mm]	Skutečná střední velikost zrna [mm]	D_{střední} [mm]
1100°C 30 min	Podél.	III - 5 - Po	1435,2	0,000696767	7-8	0,02665	0,02640	0,02664
			1508,5	0,000662910	7-8	0,02665	0,02574	
	Příčné	III - 5 - Př	1381,9	0,000723641	7-8	0,02665	0,02690	
			1320,8	0,000757117	7-8	0,02665	0,02752	
1100°C 120 min	Podél.	III - 5 - Po	1284,1	0,000778756	7-8	0,02665	0,02791	0,02821
			1356,8	0,000737028	7-8	0,02665	0,02715	
	Příčné	III - 5 - Př	1211,3	0,000825559	7-8	0,02665	0,02873	
			1184,7	0,000844096	7	0,03120	0,02905	
1100°C 240 min	Podél.	III - 5 - Po	1405,1	0,000711693	7-8	0,02665	0,02668	0,02885
			1065,6	0,000938438	7	0,03120	0,03063	
	Příčné	III - 5 - Př	1151,2	0,000868659	7	0,03120	0,02947	
			1221,2	0,000818867	7-8	0,02665	0,02862	
1100°C 480 min	Podél.	III - 5 - Po	902,3	0,001108279	7	0,03120	0,03329	0,03328
			949,0	0,001053741	7	0,03120	0,03246	
	Příčné	III - 5 - Př	933,4	0,001071352	7	0,03120	0,03273	
			833,6	0,001199616	6-7	0,03770	0,03464	
1200°C 30 min	Podél.	IV - 5 - Po	1415,7	0,000706364	7-8	0,02665	0,02658	0,02773
			1278,1	0,000782411	7-8	0,02665	0,02797	
	Příčné	IV - 5 - Př	1324,5	0,000755002	7-8	0,02665	0,02748	
			1197,8	0,000834864	7-8	0,02665	0,02889	
1200°C 120 min	Podél.	IV - 5 - Po	1148,5	0,000870701	7	0,03120	0,02951	0,02998
			1083,9	0,000922594	7	0,03120	0,03037	
	Příčné	IV - 5 - Př	1034,2	0,000966931	7	0,03120	0,03110	
			1194,2	0,000837381	7	0,03120	0,02894	
1200°C 240 min	Podél.	IV - 5 - Po	943,7	0,001059659	7	0,03120	0,03255	0,03275
			1028,4	0,000972384	7	0,03120	0,03118	
	Příčné	IV - 5 - Př	859,3	0,001163738	7	0,03120	0,03411	
			909,9	0,001099022	7	0,03120	0,03315	
1200°C 480 min	Podél.	IV - 5 - Po	671,3	0,001489647	6-7	0,03770	0,03860	0,03946
			638,2	0,001566907	6-7	0,03770	0,03958	
	Příčné	IV - 5 - Př	617,9	0,001618385	6-7	0,03770	0,04023	
			643,2	0,001554726	6-7	0,03770	0,03943	

G2 - Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou
D_{střední} – Průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna

Příloha 3.15. Průměrné hodnoty skutečné střední velikosti zrna $D_{\text{střední}}$ [mm] pro materiály HR3C, TP347HFG, P92 a P24Tabulka průměrných hodnot skutečné střední velikosti zrna $D_{\text{střední}}$ [mm] pro materiál HR3C

Teplota expozice	Délka výdrže na příslušné teplotě			
	1800 [s]	7200 [s]	14400 [s]	28800 [s]
900 [°C]	0,06411	0,06453	0,06574	0,06885
1000 [°C]	0,06705	0,07042	0,07243	0,08251
1100 [°C]	0,07155	0,07841	0,07984	0,08933
1200 [°C]	0,0742	0,07936	0,08843	0,09462

Tabulka průměrných hodnot skutečné střední velikosti zrna $D_{\text{střední}}$ [mm] pro materiál TP347HFG

Teplota expozice	Délka výdrže na příslušné teplotě			
	1800 [s]	7200 [s]	14400 [s]	28800 [s]
900 [°C]	0,02382	0,02384	0,02403	0,02448
1000 [°C]	0,02451	0,02583	0,02647	0,02865
1100 [°C]	0,02664	0,02821	0,02885	0,03328
1200 [°C]	0,02773	0,02998	0,03275	0,03946

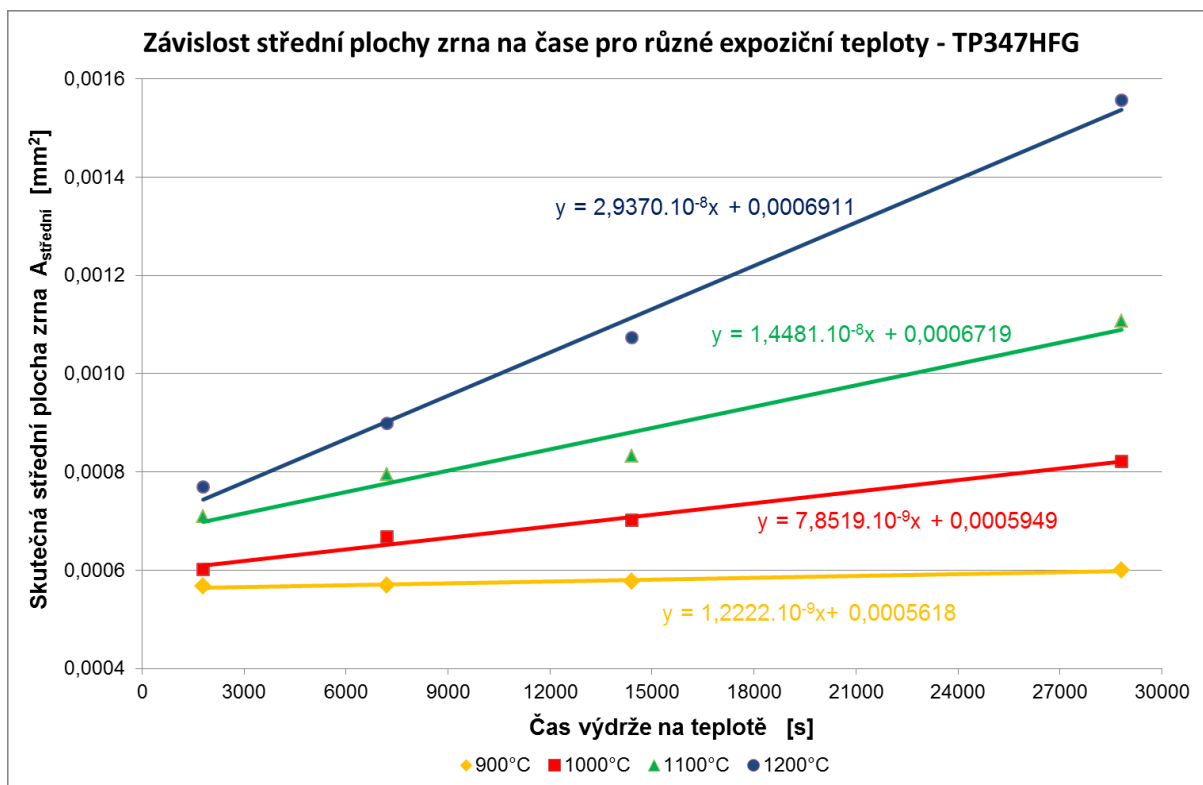
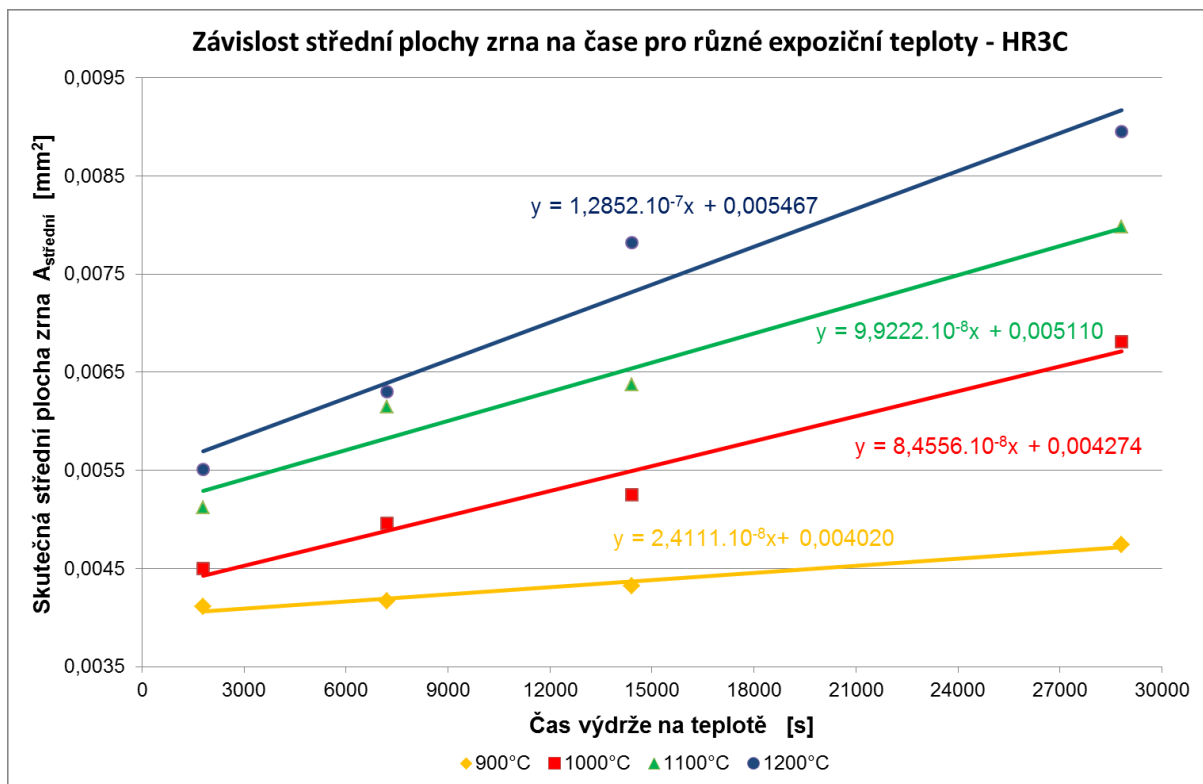
Tabulka průměrných hodnot skutečné střední velikosti zrna $D_{\text{střední}}$ [mm] pro materiál P92

Teplota expozice	Délka výdrže na příslušné teplotě			
	1800 [s]	7200 [s]	14400 [s]	28800 [s]
900 [°C]	0,00896	0,00942	0,01194	0,01351
1000 [°C]	0,01038	0,01197	0,01457	0,01741
1100 [°C]	0,04879	0,05379	0,05787	0,07727
1200 [°C]	0,21092	0,21655	0,22269	0,22571

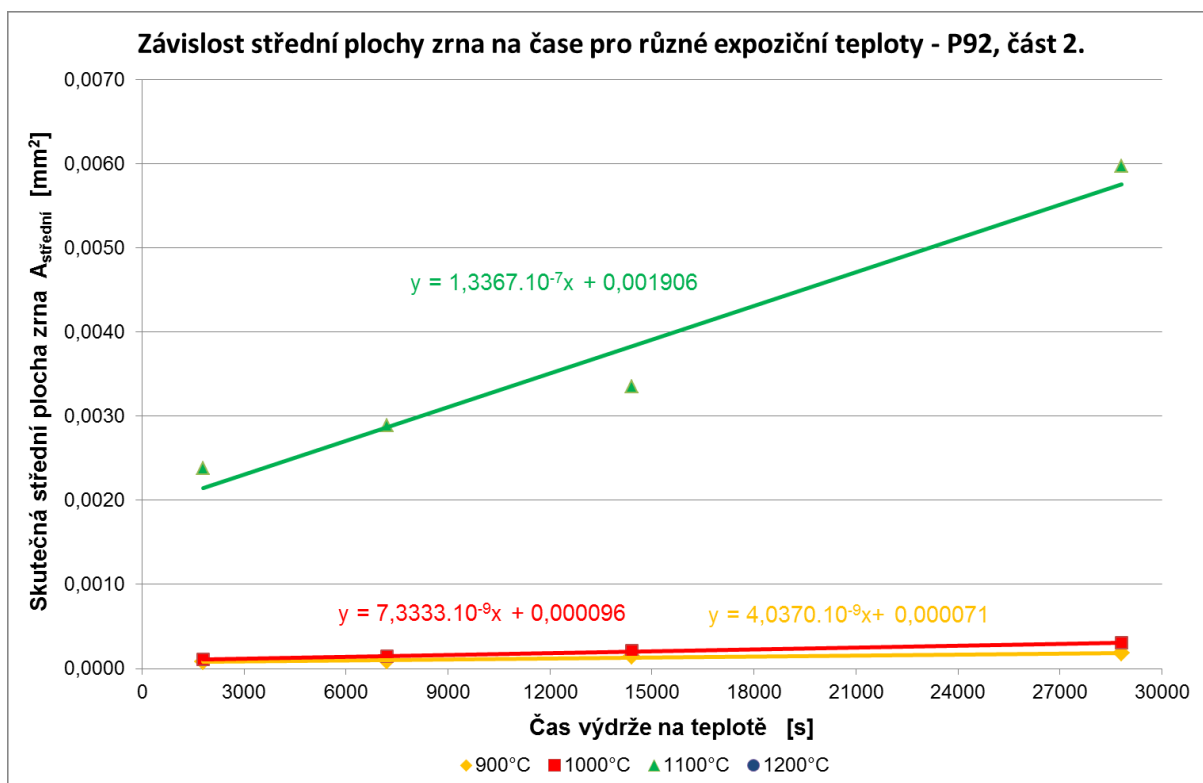
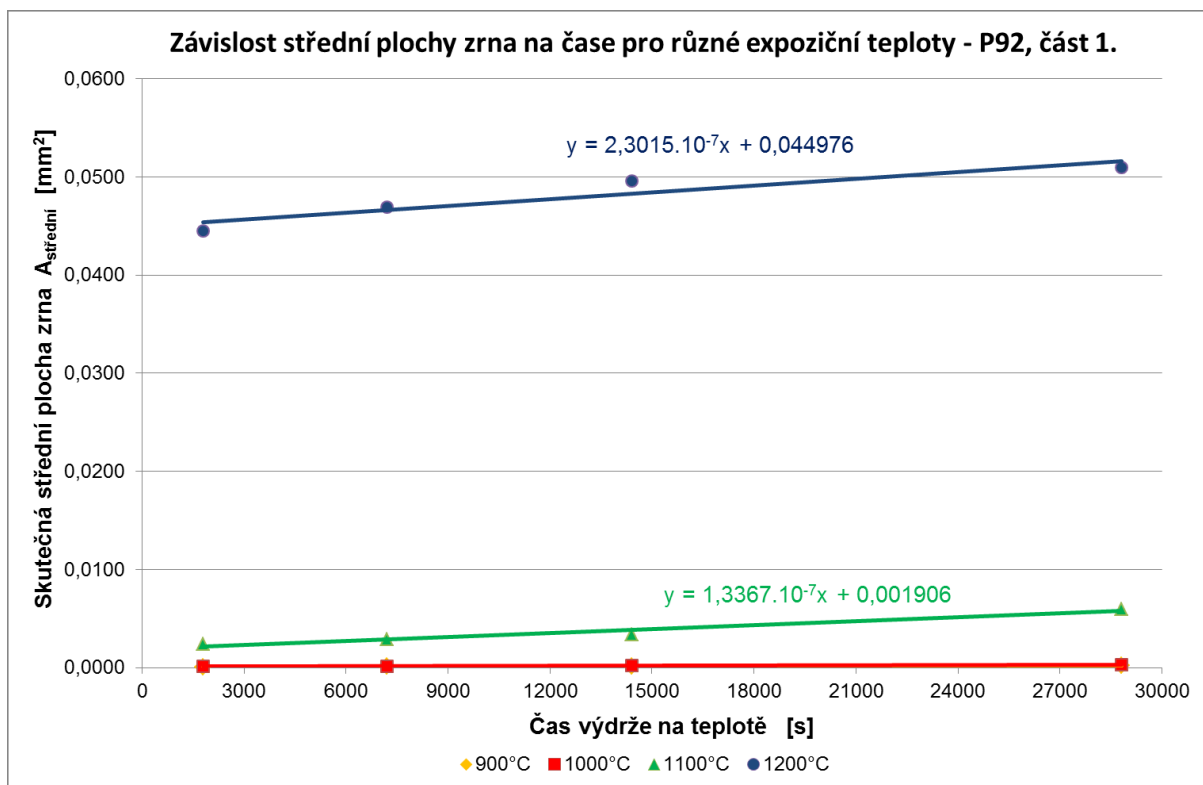
Tabulka průměrných hodnot skutečné střední velikosti zrna $D_{\text{střední}}$ [mm] pro materiál P24

Teplota expozice	Délka výdrže na příslušné teplotě			
	1800 [s]	7200 [s]	14400 [s]	28800 [s]
900 [°C]	0,01763	0,02113	0,02624	0,02845
1000 [°C]	0,03203	0,03732	0,03491	0,05779
1100 [°C]	0,05379	0,05892	0,07442	0,08912
1200 [°C]	0,18041	0,19833	0,21492	0,23450

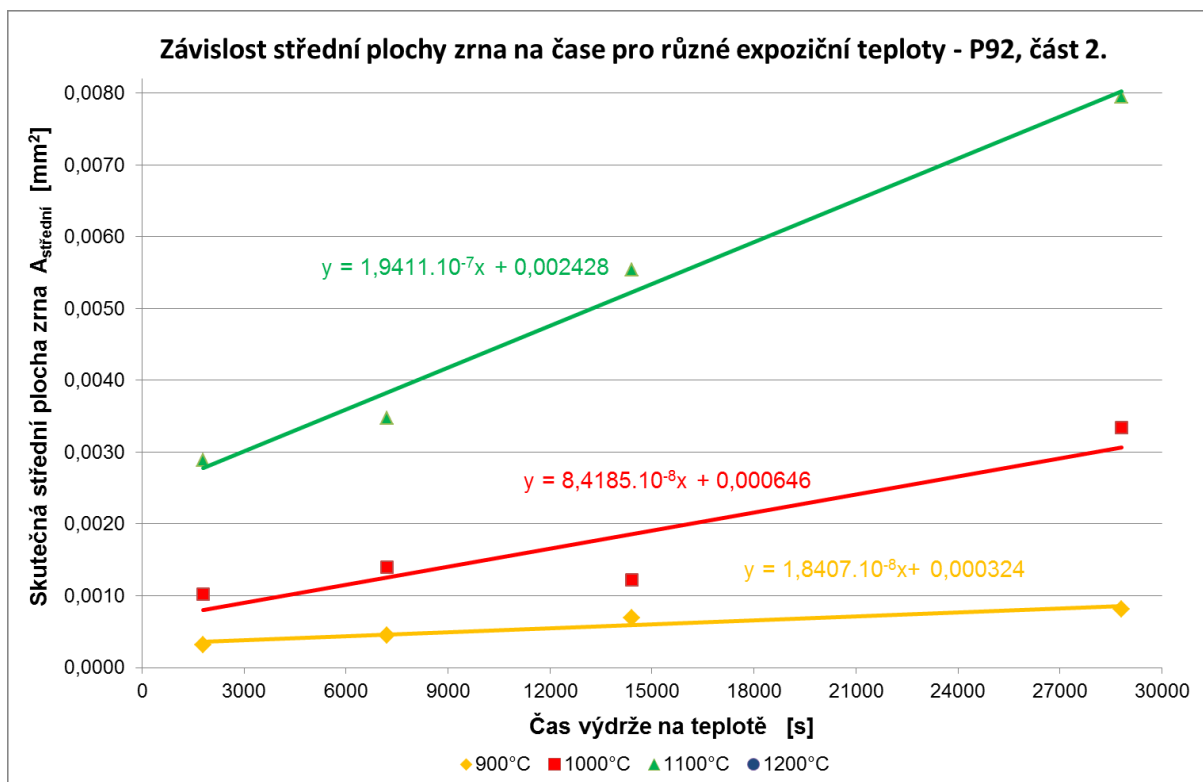
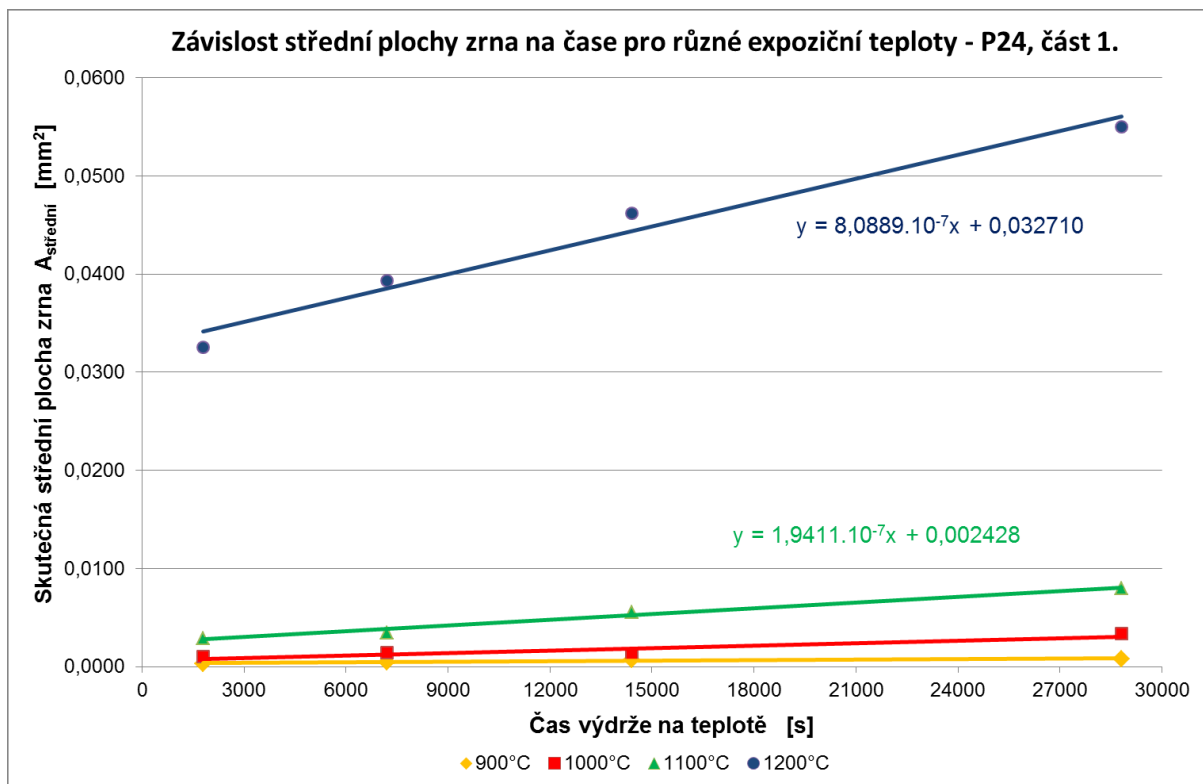
Příloha 3.16. Grafy s trendovými přímkami a rovnicemi pro materiály HR3C, TP347HFG



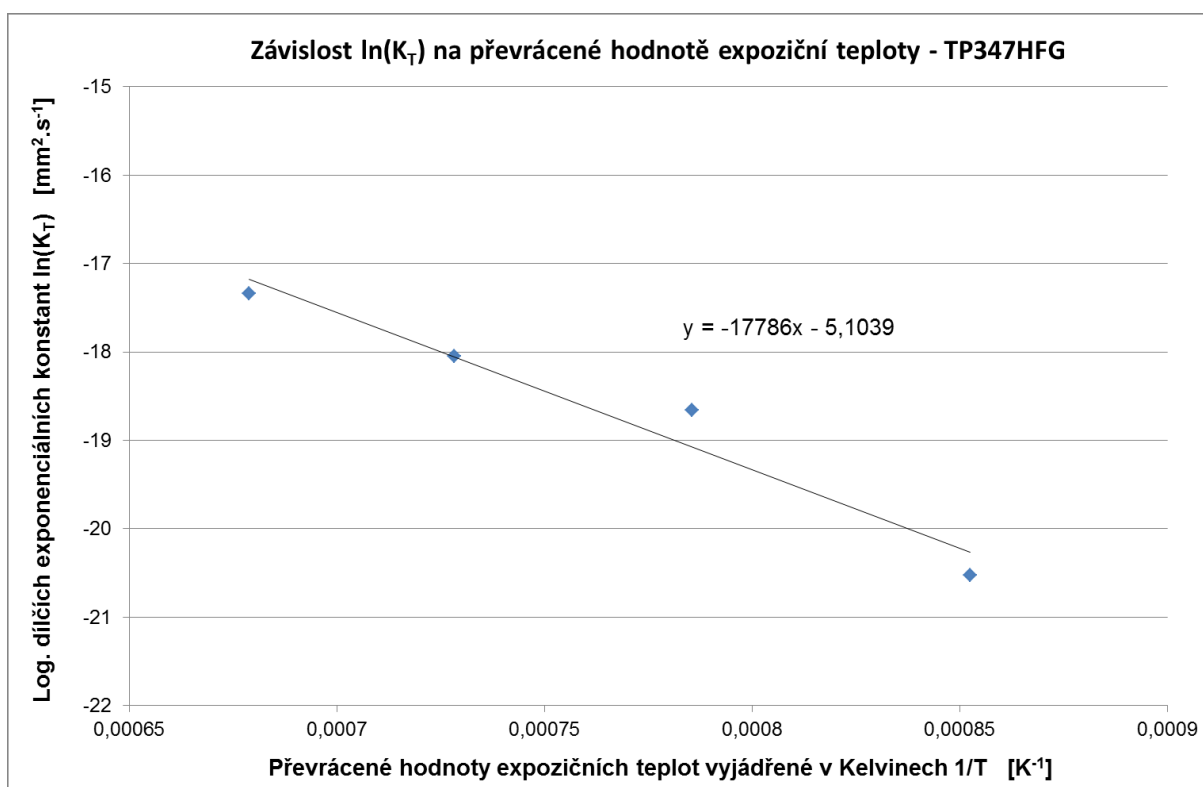
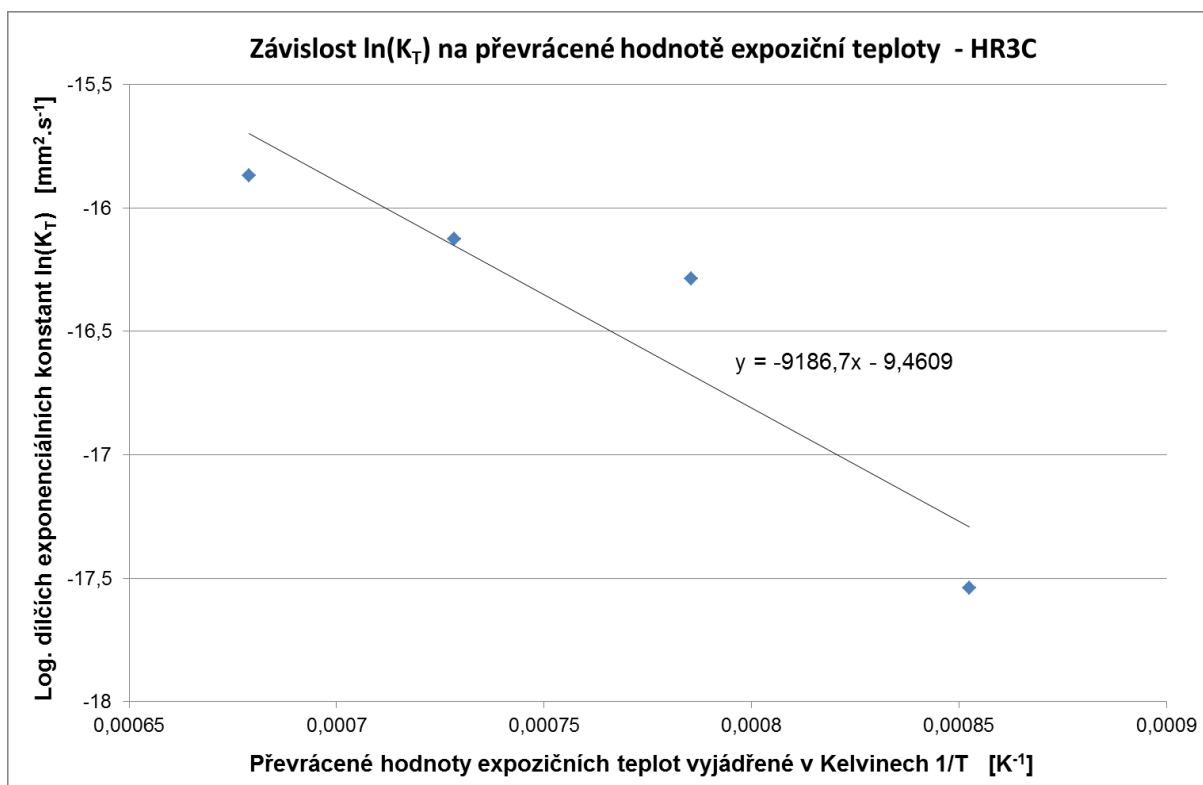
Příloha 3.16. Grafy s trendovými přímkami a rovnicemi pro materiál P92 – první a druhá část



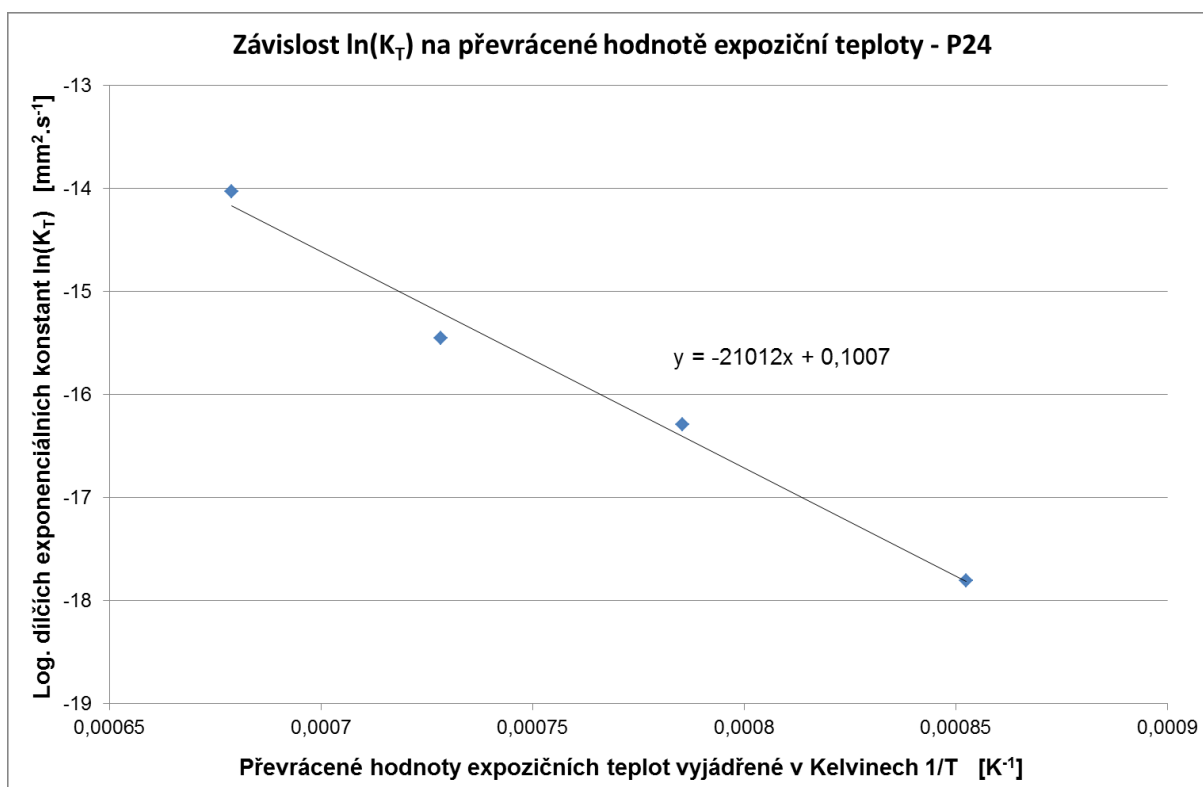
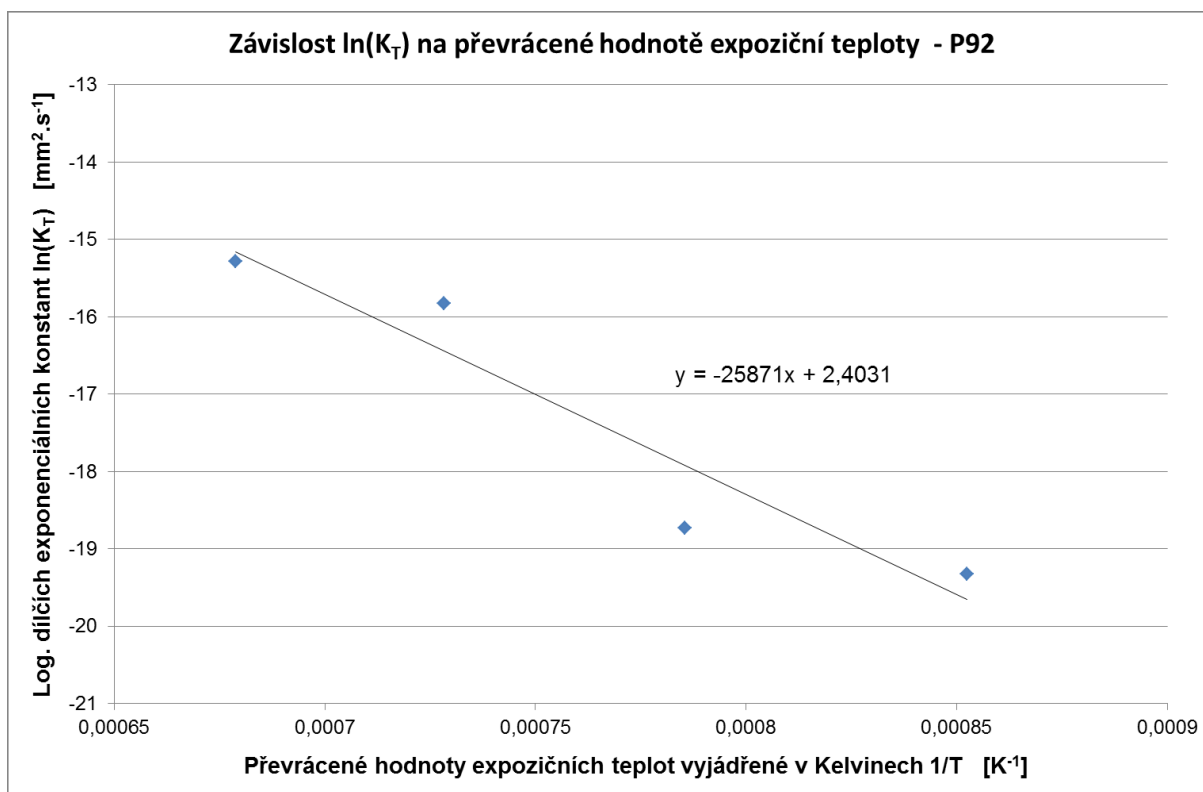
Příloha 3.16. Grafy s trendovými přímkami a rovnicemi pro P24 – první a druhá část



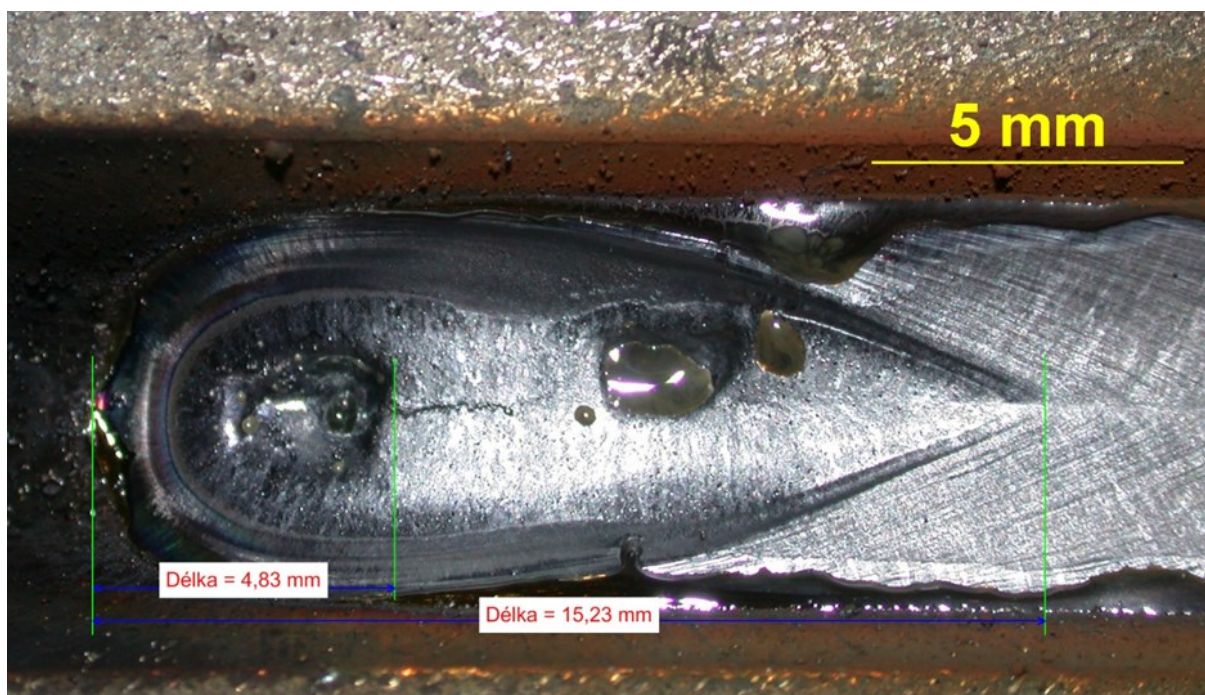
Příloha 3.17. Grafy pro stanovení aktivační energie růstu zrna Q a celkové konstanty úměrnosti K_0 , pro materiály HR3C, TP347HFG



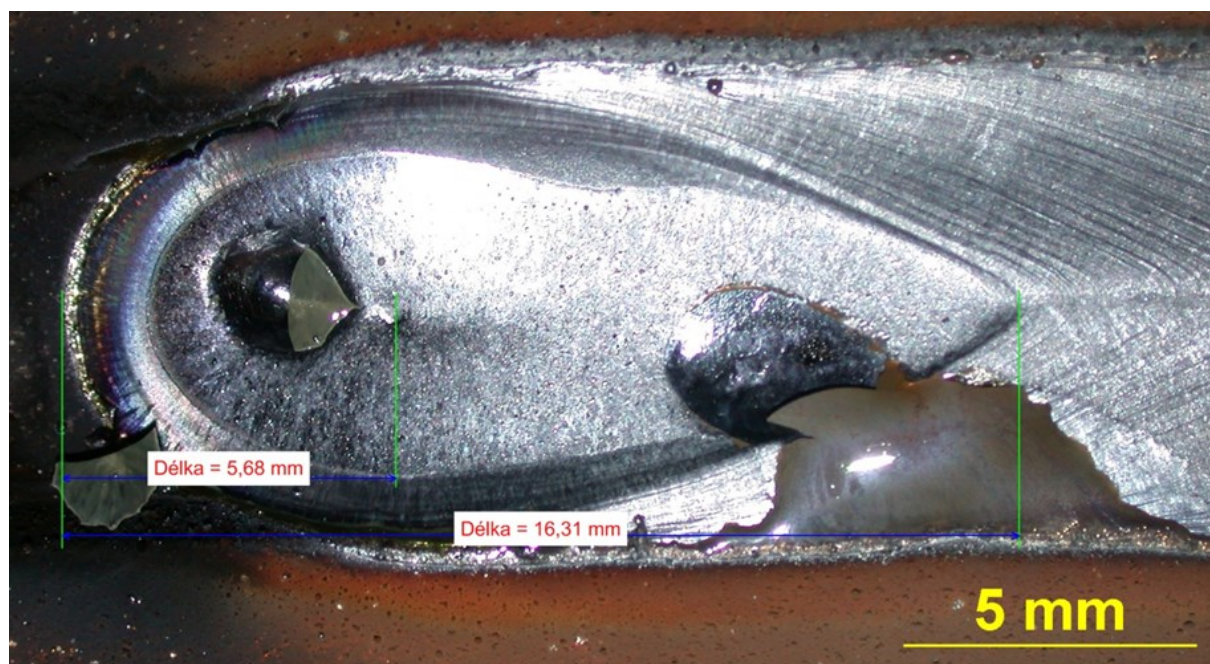
Příloha 3.17. Grafy pro stanovení aktivační energie růstu zrna Q a celkové konstanty úměrnosti K_0 , pro materiály P92 a P24



Příloha 4.1. Vyhodnocené snímky konců svarových lázní pro housenky č. 2 a 3

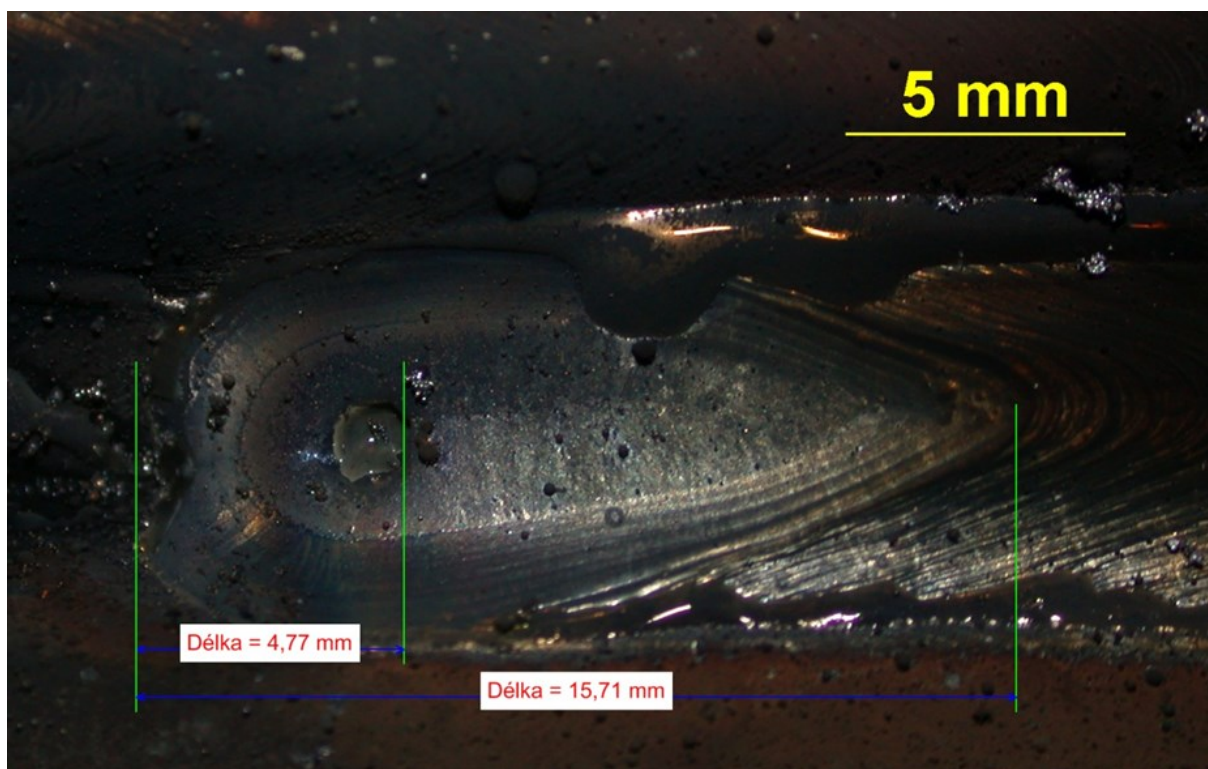


Konec první výplňové housenky, včetně údajů pro definování modelu dvojitého elipsoidu

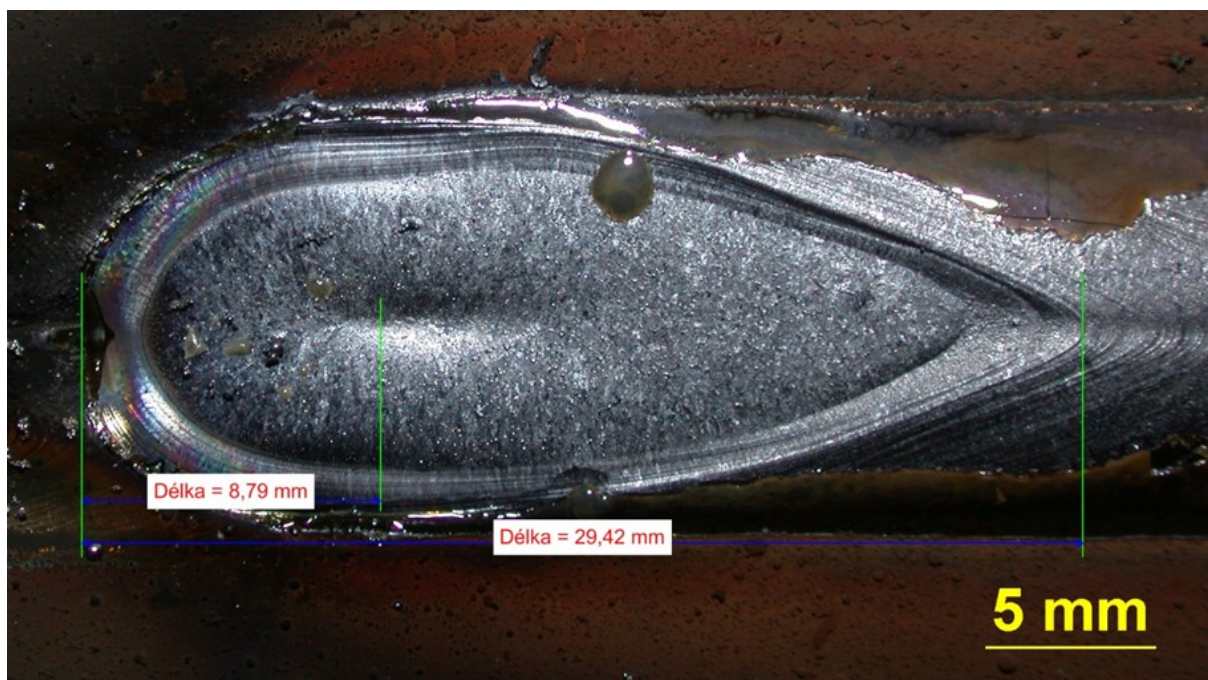


Konec druhé výplňové housenky, včetně údajů pro definování modelu dvojitého elipsoidu

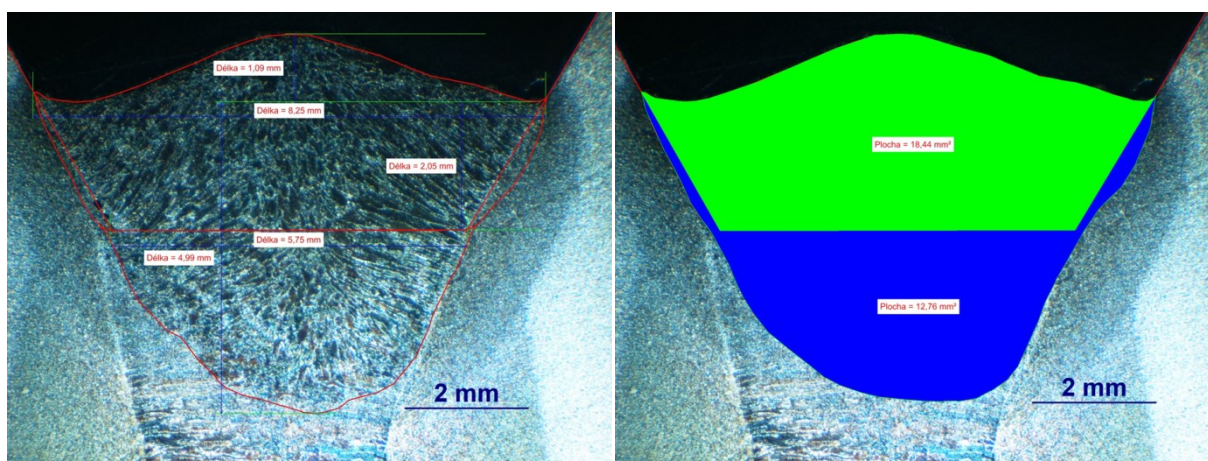
Příloha 4.1. Vyhodnocené snímky konců svarových lázní pro housenky č. 4 a 5



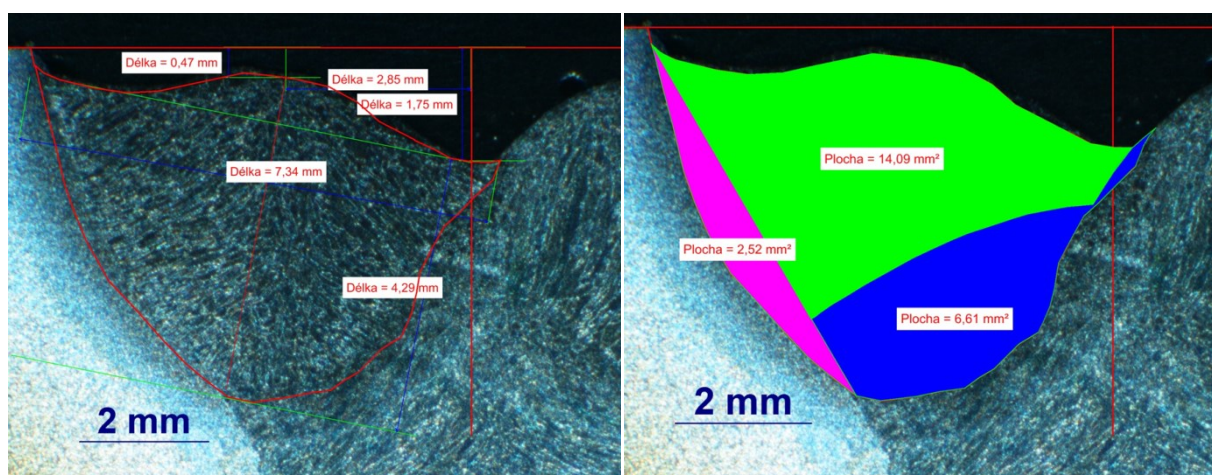
Konec druhé výplňové housenky, včetně údajů pro definování modelu dvojitého elipsoidu



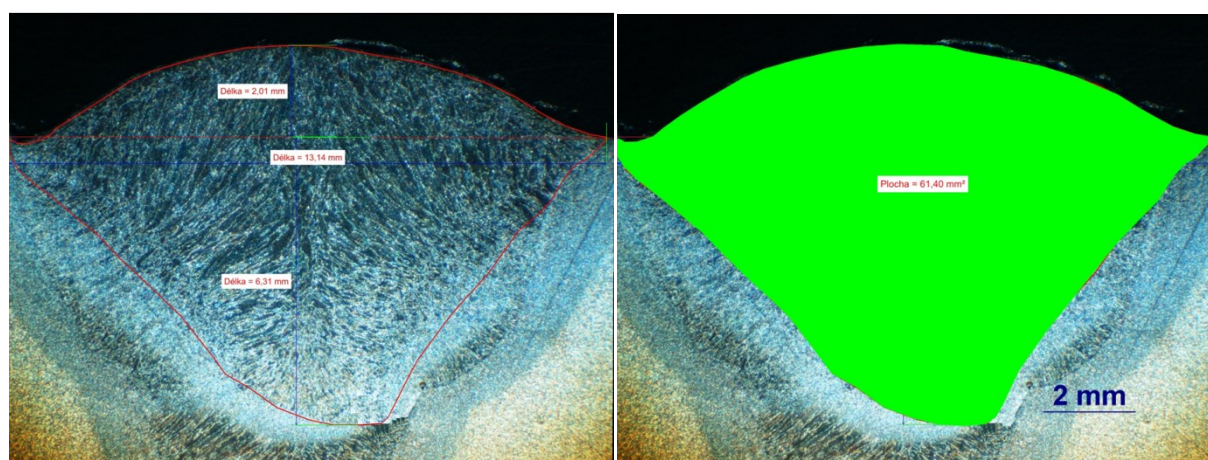
Konec krycí housenky, včetně údajů pro definování modelu dvojitého elipsoidu

Příloha 4.2. Vyhodnocené snímky řezů housenek č. 2, 4 a 5 s geometrickými údaji

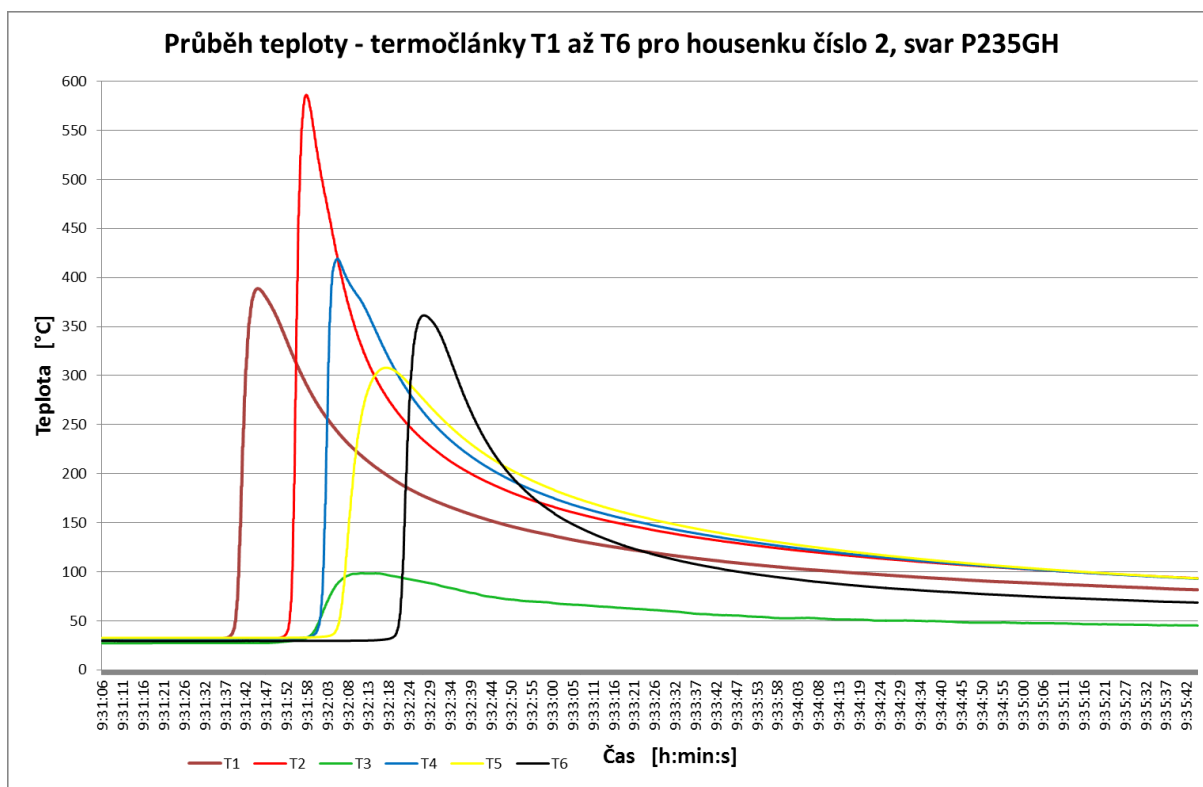
Makrovýbrus první výplňové housenky, včetně údajů pro definování dvojitého elipsoidu a ploch definujících přídavný materiál (zelená barva) a přetavený zákl. mat. (modrá barva)



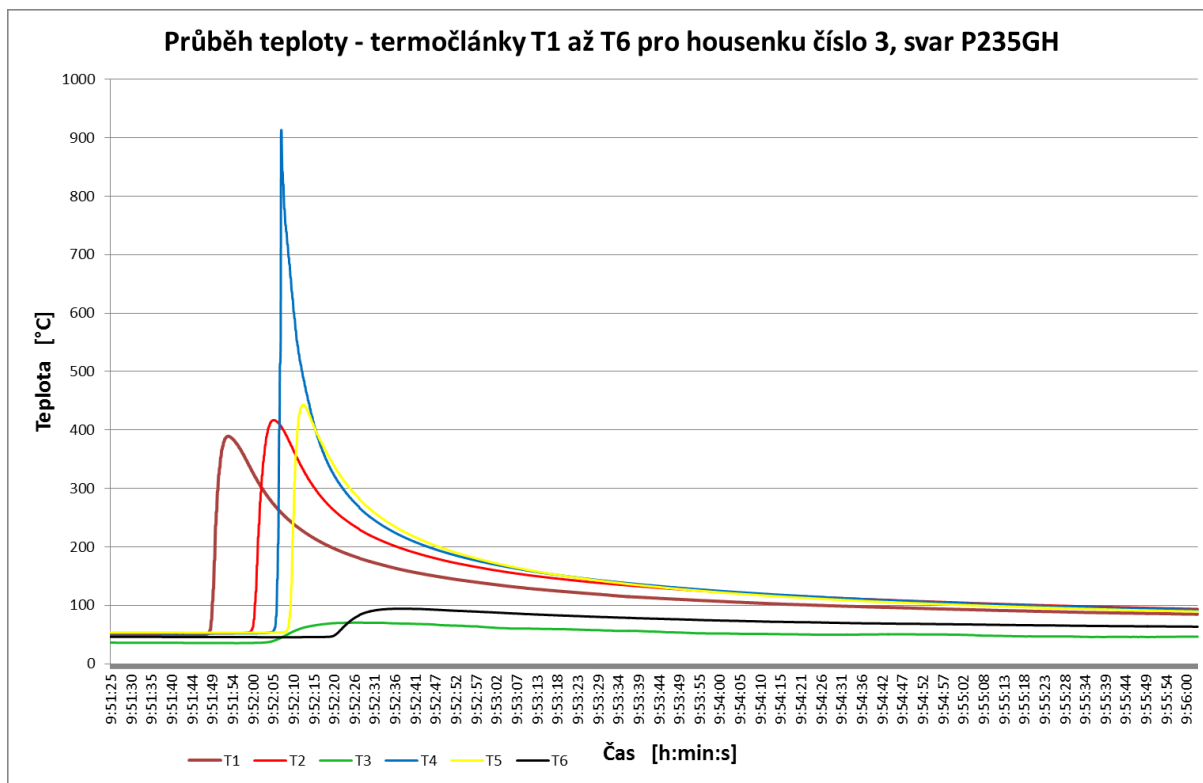
Makrovýbrus třetí výplňové housenky, včetně údajů pro definování dvojitého elipsoidu a údajů definujících jednotlivé plochy (přetavený ZM – růžová; přetavená housenka – modrá)



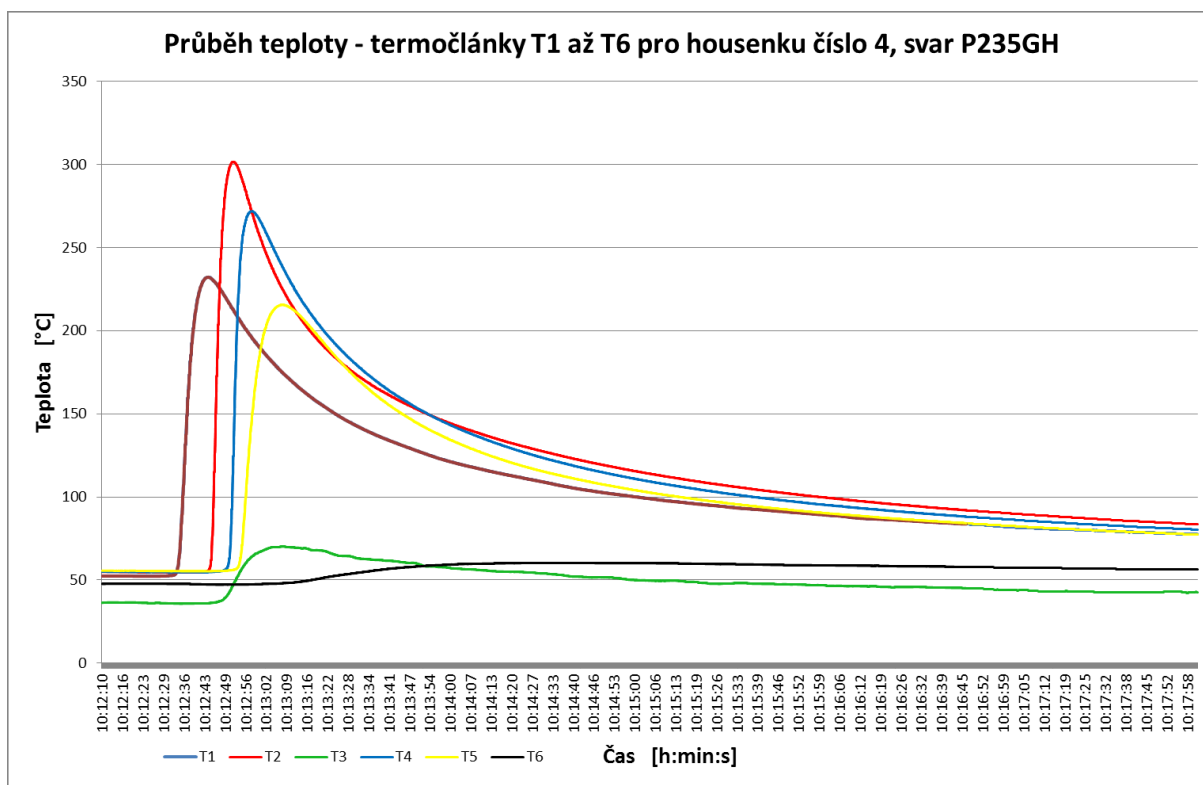
Makrovýbrus krycí housenky, včetně údajů pro definování dvojitého elipsoidu a údajů definujících celkovou plochu svaru

Příloha 4.3. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenky č. 2 a 3

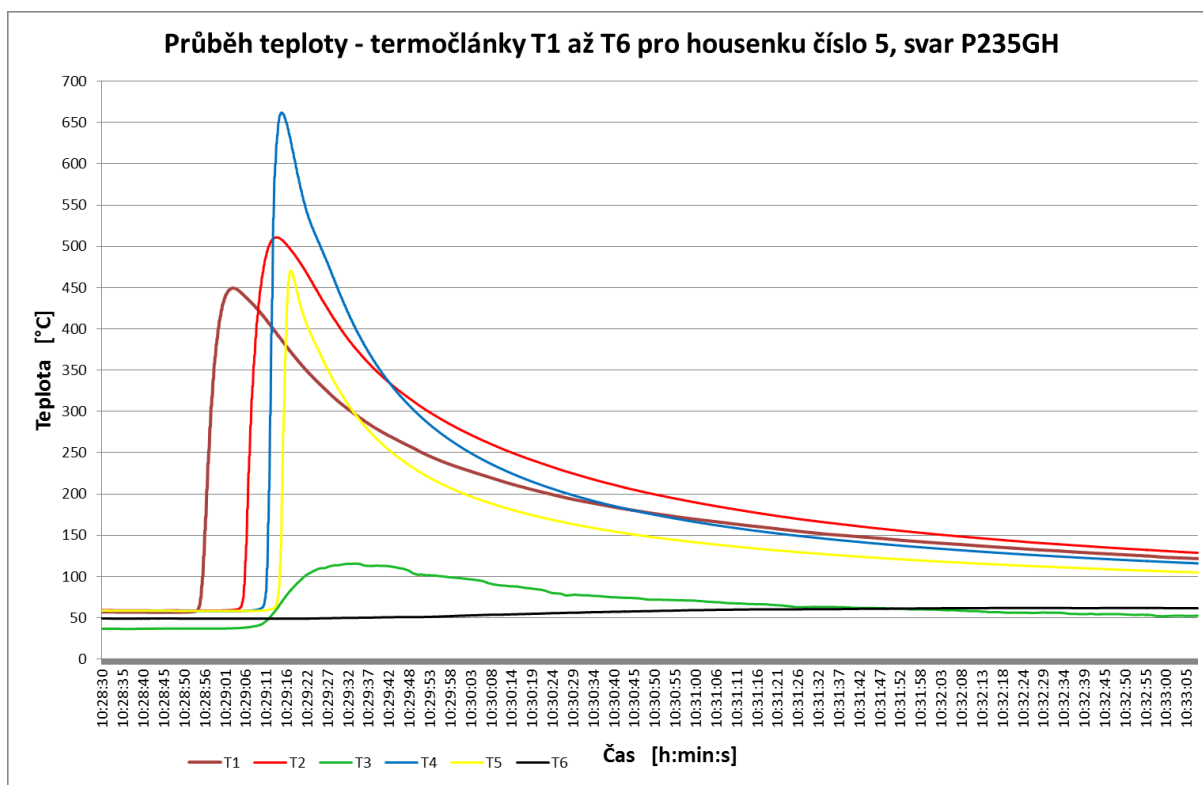
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro první výplňovou housenku



Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro druhou výplňovou housenku

Příloha 4.3. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenky č. 4 a 5

Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro třetí výplňovou housenku



Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro krycí housenku

Příloha 4.4. Výsledky měření tvrdosti pro Řady 2 až 5

Tabulka změřených hodnot tvrdosti HV10 pro Řadu 2 provedené na vzorcích č. 2, 3, 4 a 5

Osa x	-7,8	-6,8	-5,8	-4,8	-3,8	-2,8	-1,8	-0,8	0,2	1,2	2,2
Řada 2 vz. 2	169	166	174	168	172	179	197	229	231	249	250
Řada 2 vz. 3	168	172	171	175	178	186	187	206	243	251	249
Řada 2 vz. 4	173	166	171	183	190	197	193	219	222	225	228
Řada 2 vz. 5	170	174	171	179	194	193	196	221	219	239	243
Osa x	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	11,2	12,2	13,2
Řada 2 vz. 2	252	233	240	212	199	192	184	176	171	179	170
Řada 2 vz. 3	253	241	241	205	197	187	187	178	170	171	171
Řada 2 vz. 4	226	231	227	220	196	189	178	173	167	163	163
Řada 2 vz. 5	241	235	228	194	190	193	182	179	166	165	167

POZNÁMKA: Osa x značí vzdálenost středů vpichů od hranice ztavení z pravé strany svaru

Tabulka změřených hodnot tvrdosti HV10 pro Řadu 3 provedené na vzorcích č. 2, 3, 4 a 5

Osa x	-6,5	-5,5	-4,5	-3,5	-2,5	-1,5	-0,5	0,5	1,5	2,5	3,5
Řada 3 vz. 2	160	168	163	164	171	183	219	232	245	245	253
Řada 3 vz. 3	163	166	172	189	197	201	212	251	243	248	241
Řada 3 vz. 4	162	166	171	181	188	191	199	209	264	271	273
Řada 3 vz. 5	170	173	176	178	182	186	209	207	205	206	213
Osa x	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5
Řada 3 vz. 2	246	252	239	225	194	186	177	169	172	165	168
Řada 3 vz. 3	241	255	254	243	214	188	183	173	172	174	167
Řada 3 vz. 4	256	254	258	209	198	194	182	180	174	167	165
Řada 3 vz. 5	204	194	221	220	191	194	186	168	170	174	168

POZNÁMKA: Osa x značí vzdálenost středů vpichů od hranice ztavení z pravé strany svaru

Tabulka změřených hodnot tvrdosti HV10 pro Řadu 4 provedené na vzorcích č. 3, 4 a 5

Osa x	-5,4	-4,4	-3,4	-2,4	-1,4	-0,4	0,6	1,6	2,6	3,6	4,6
Řada 4 vz. 3	166	170	173	184	194	261	255	255	266	259	261
Řada 4 vz. 4	166	181	181	189	192	263	251	259	258	247	252
Řada 4 vz. 5	174	172	176	177	194	195	205	213	226	217	218
Osa x	5,6	6,6	7,6	8,6	9,6	10,6	11,6	12,6	13,6	14,6	15,6
Řada 4 vz. 3	262	175	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Řada 4 vz. 4	280	257	268	269	260	215	186	179	169	162	163
Řada 4 vz. 5	214	225	217	217	213	220	179	173	174	171	171

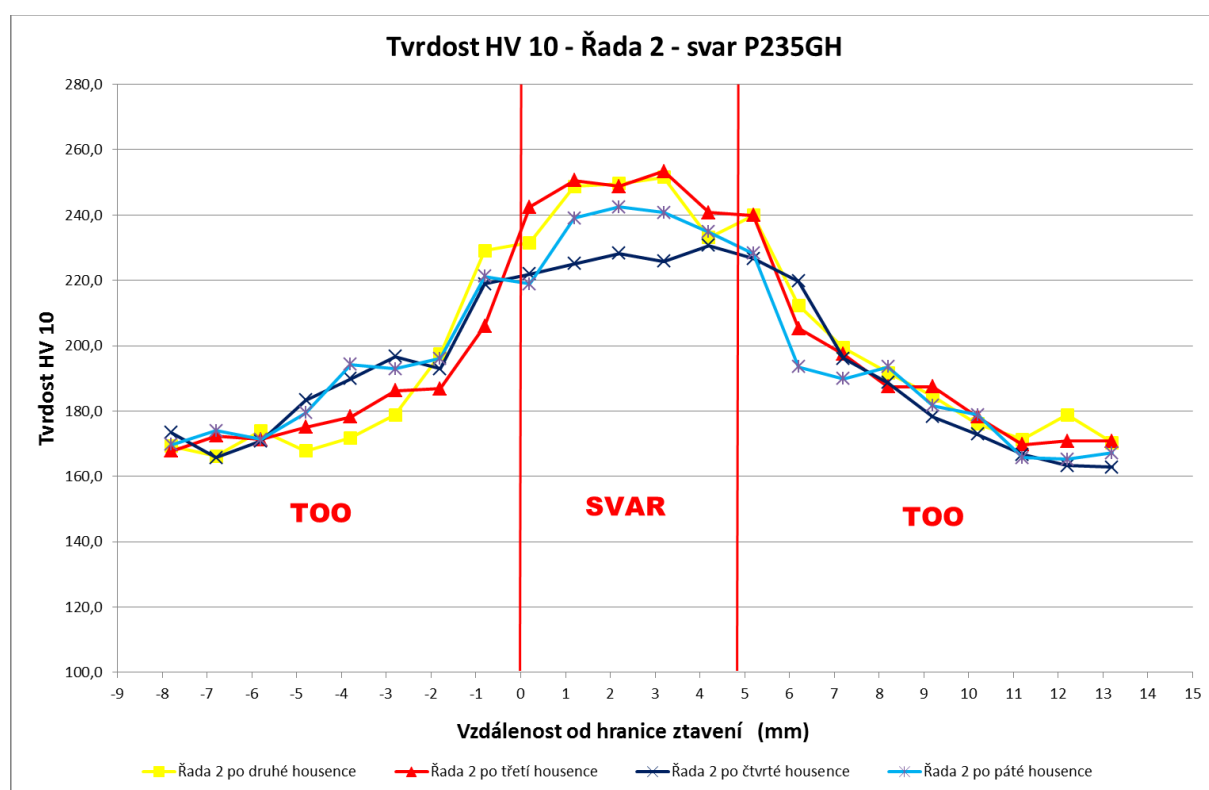
POZNÁMKA: Osa x značí vzdálenost středů vpichů od hranice ztavení z pravé strany svaru

Tabulka změřených hodnot tvrdosti HV10 pro Řadu 4 provedené na vzorcích č. 4 a 5

Osa x	-4,6	-3,6	-2,6	-1,6	-0,6	0,4	1,4	2,4	3,4	4,4	5,4
Řada 4 vz. 4	172	177	183	192	240	248	261	250	252	225	256
Řada 4 vz. 5	170	174	177	188	220	221	225	222	220	231	236
Osa x	6,4	7,4	8,4	9,4	10,4	11,4	12,4	13,4	15,4	16,4	17,4
Řada 4 vz. 4	266	262	271	283	281	267	224	182	169	160	162
Řada 4 vz. 5	232	231	227	224	222	211	192	177	171	173	171

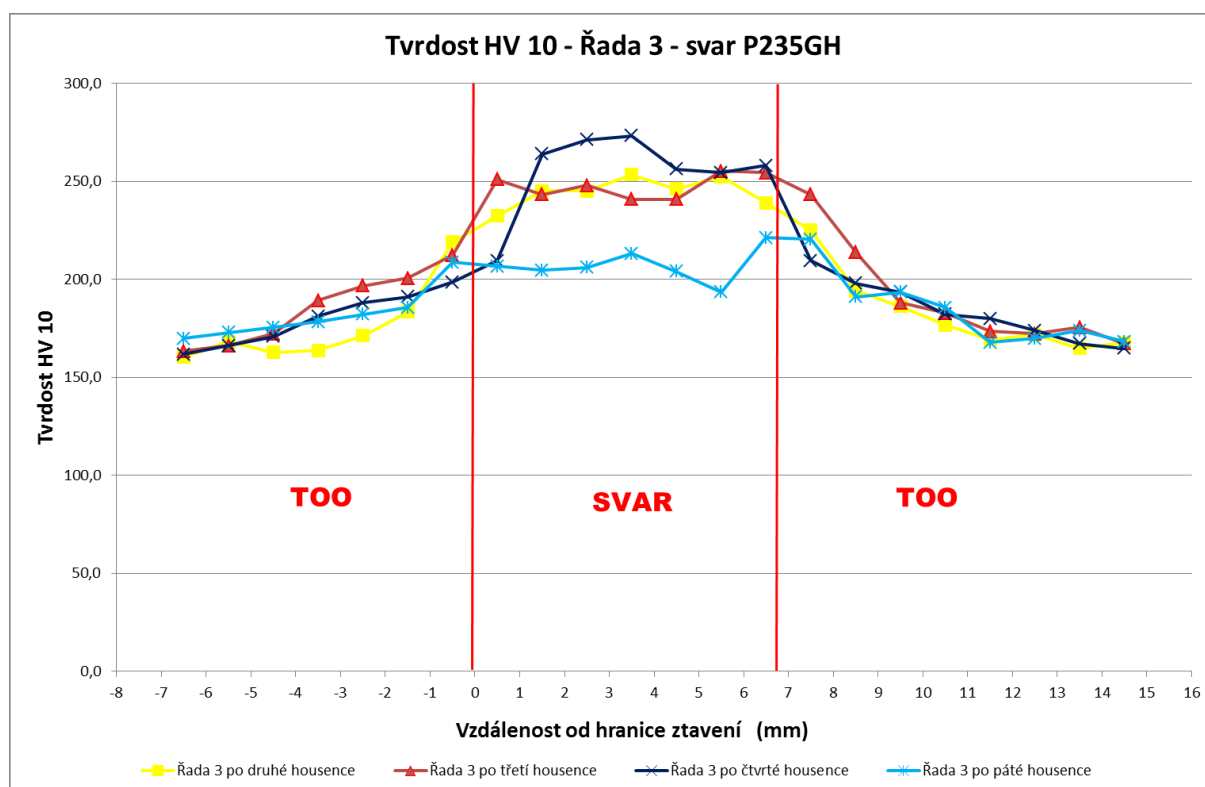
POZNÁMKA: Osa x značí vzdálenost středů vpichů od hranice ztavení z pravé strany svaru

Příloha 4.5. Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti pro Řadu 2

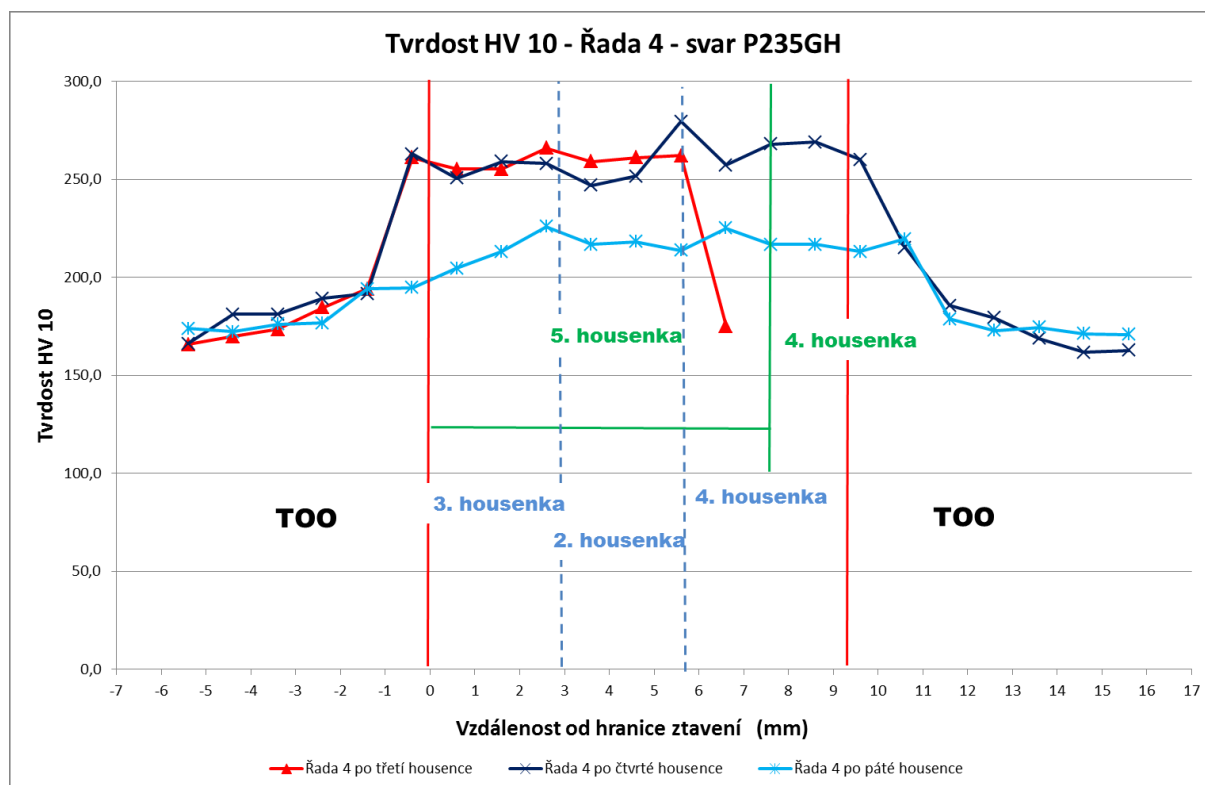


Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti HV10 pro Řadu 2 a vzorky 2, 3, 4 a 5

Příloha 4.5. Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti pro Řadu 3 a 4

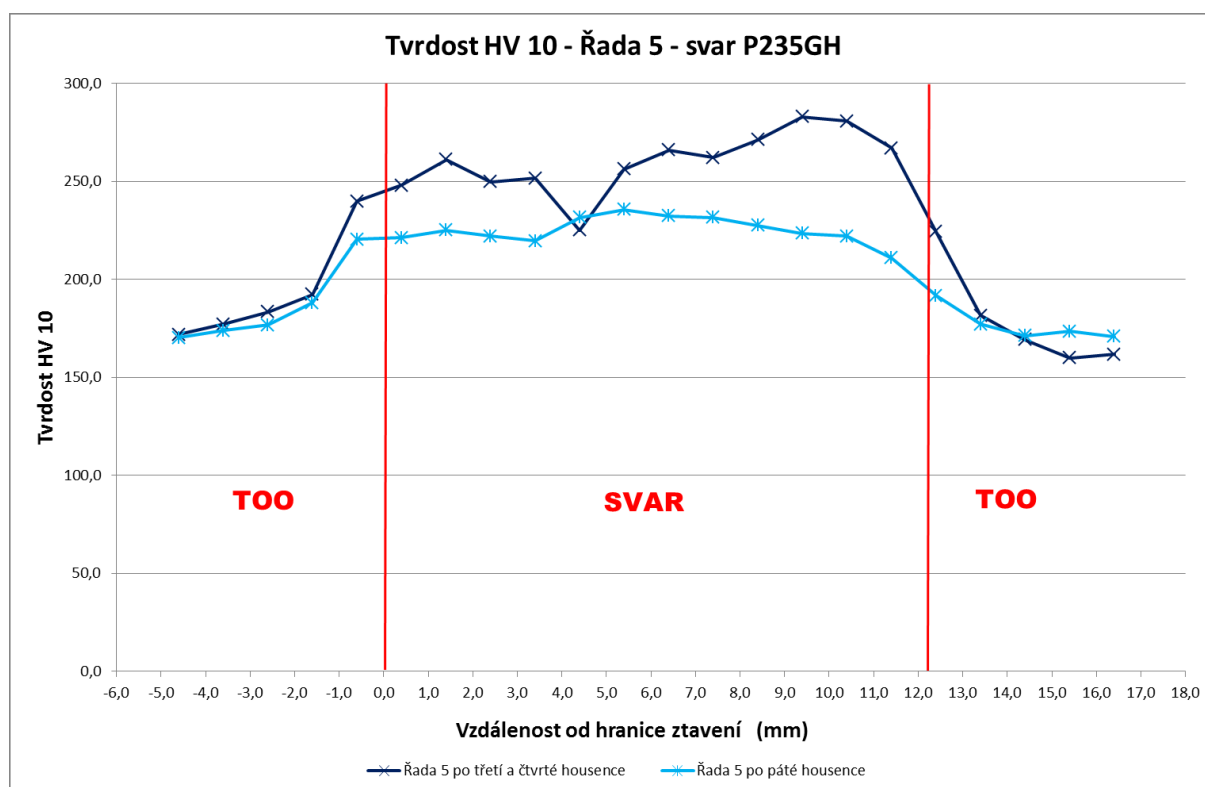


Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti HV10 pro Řadu 3 a vzorky 2, 3, 4 a 5



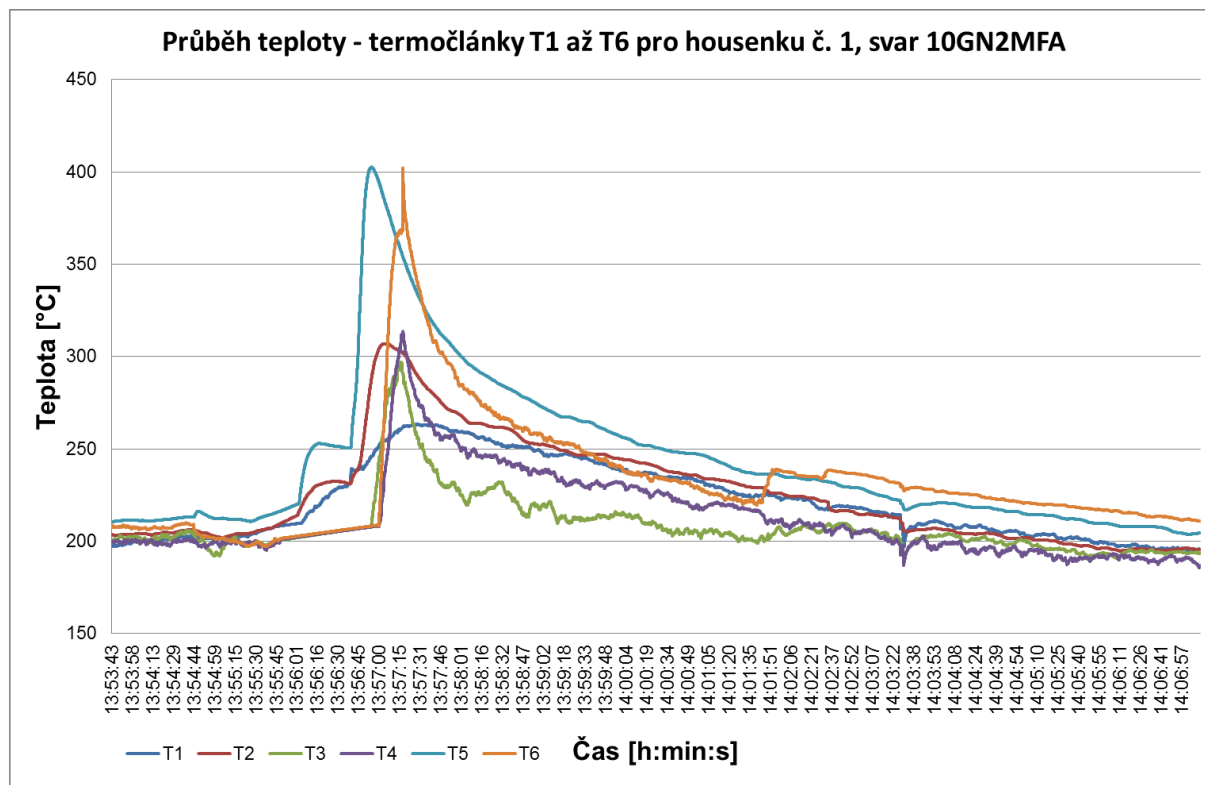
Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti HV10 pro Řadu 4 a vzorky 3, 4 a 5

Příloha 4.5. Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti pro Řadu 5

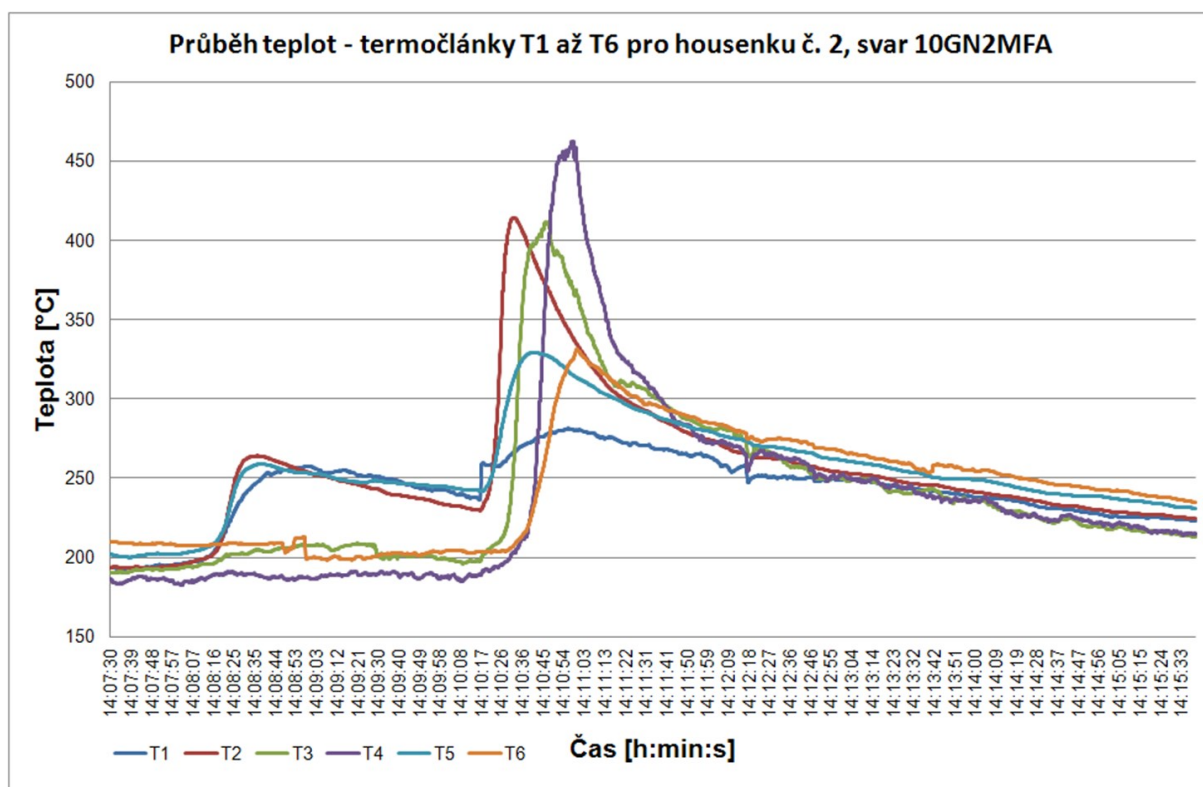


Grafické zpracování výsledků měření tvrdosti HV10 pro Řadu 5 a vzorky 4 a 5

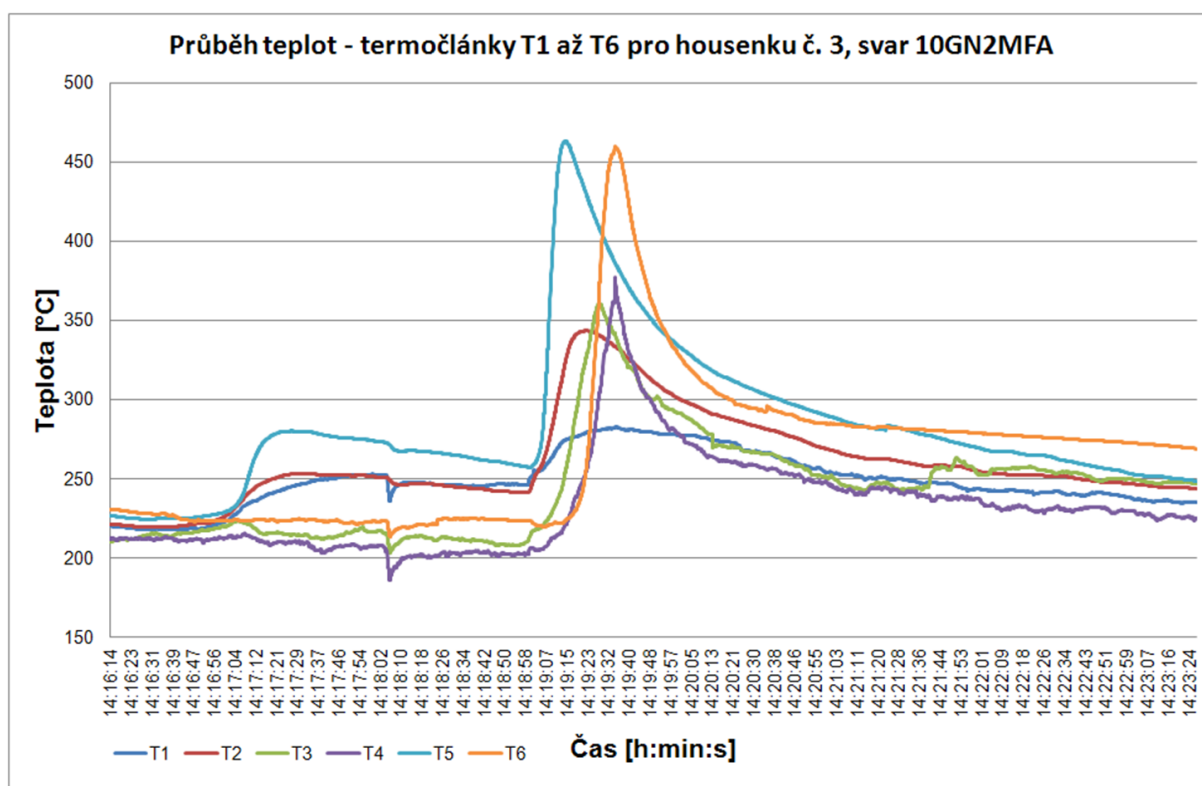
Příloha 4.6. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 1



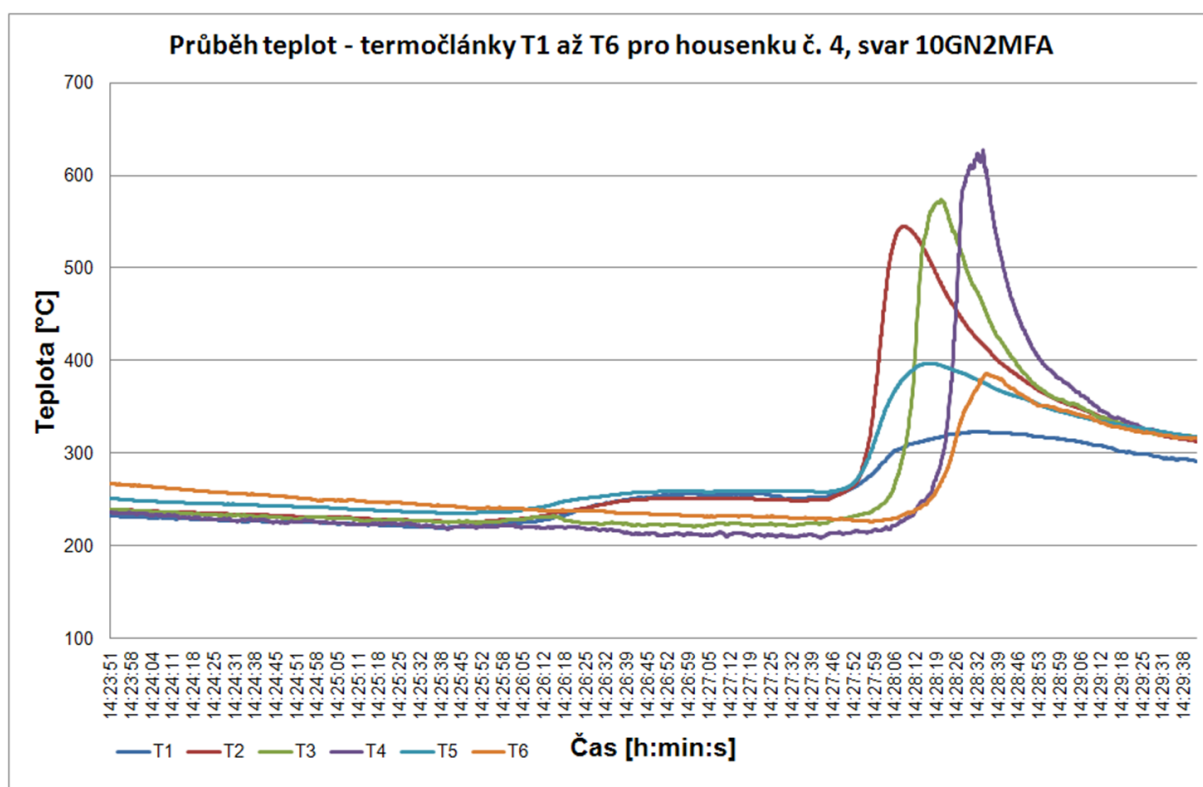
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 1 – materiál 10GN2MFA

Příloha 4.6. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 2 a 3

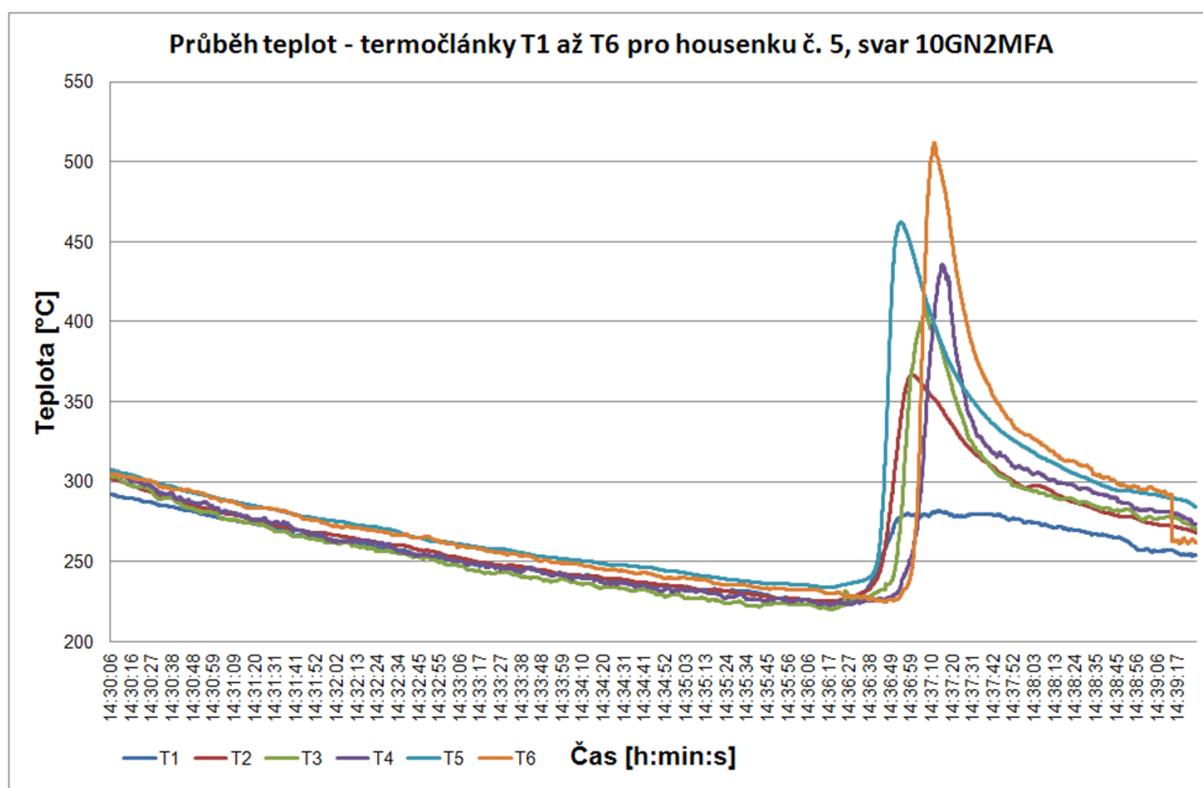
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 2 – materiál 10GN2MFA



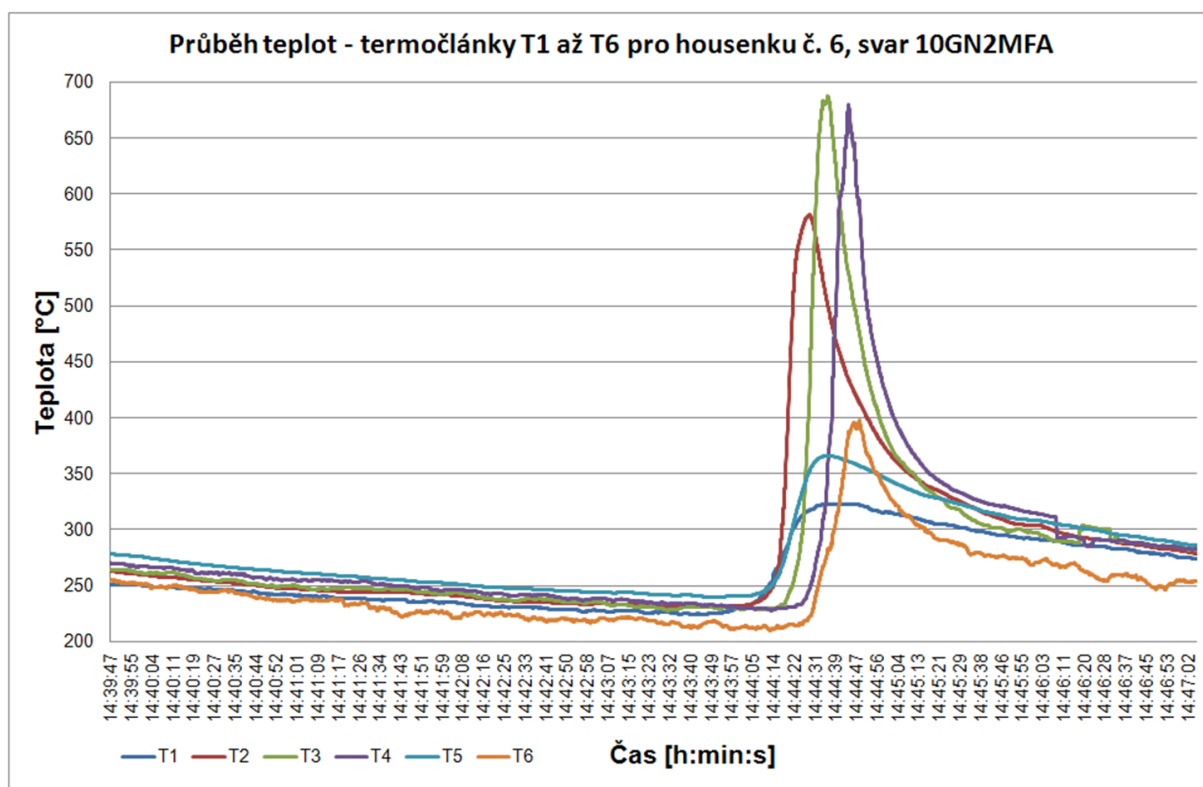
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 3 – materiál 10GN2MFA

Příloha 4.6. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 4 a 5

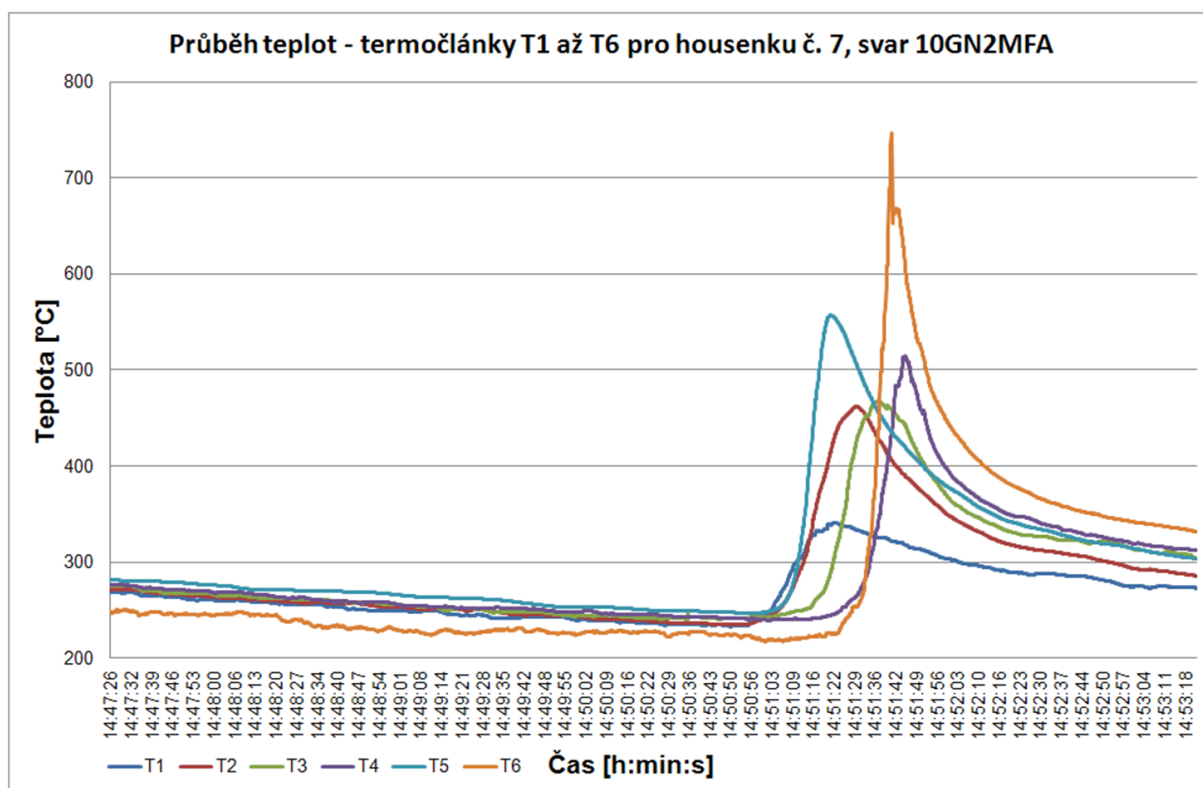
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 4 – materiál 10GN2MFA



Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 5 – materiál 10GN2MFA

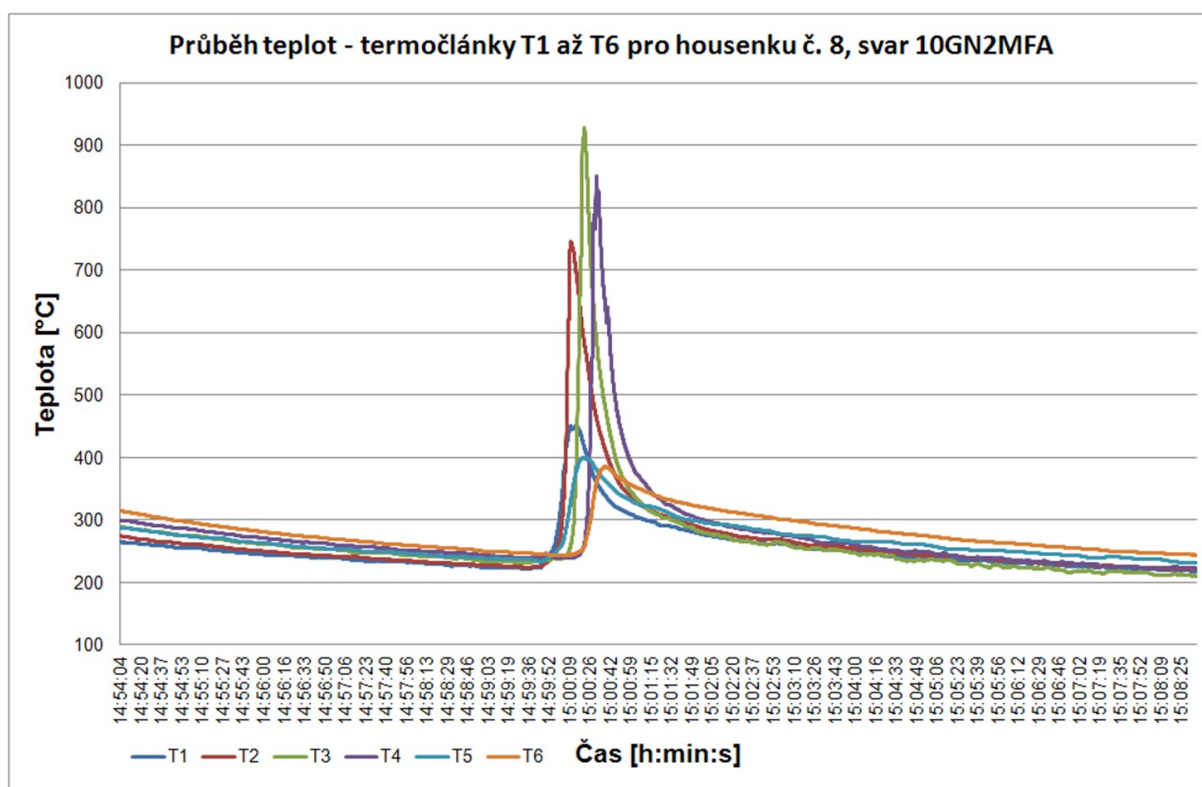
Příloha 4.6. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 6 a 7

Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 6 – materiál 10GN2MFA



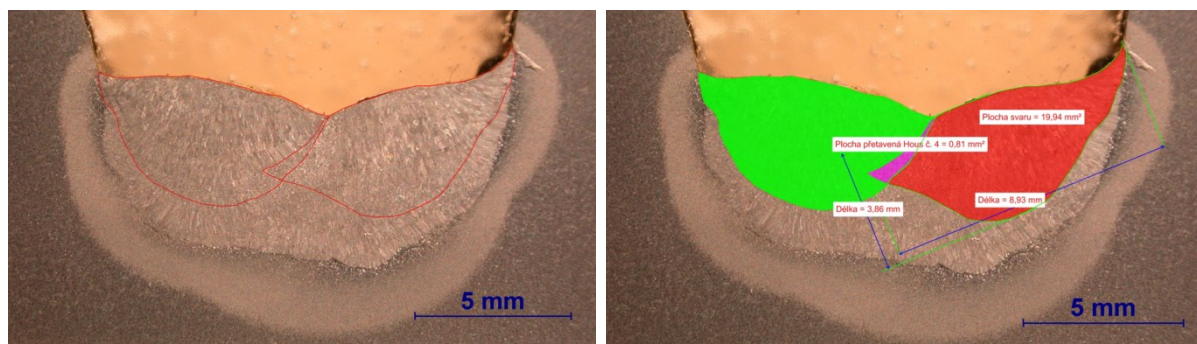
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 7 – materiál 10GN2MFA

Příloha 4.6. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 8

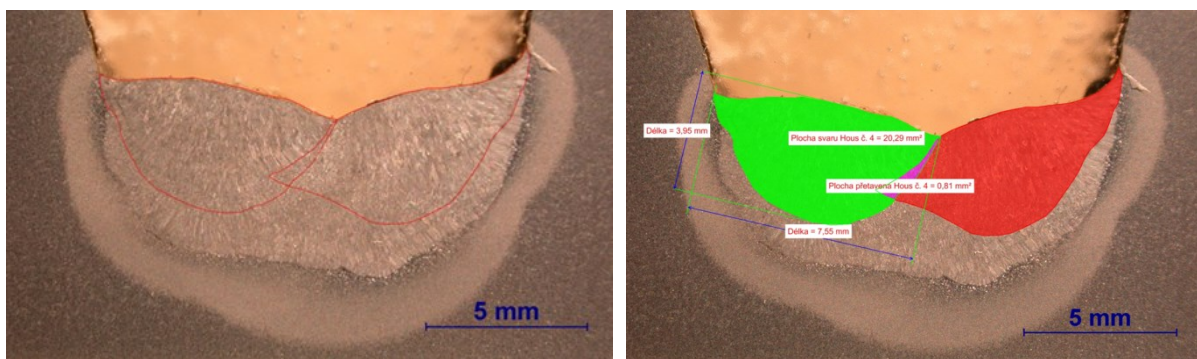


Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 8 – materiál 10GN2MFA

Příloha 4.7. Geometrické vyhodnocení housenek 3 a 4 na vzorku z materiálu 10GN2MFA

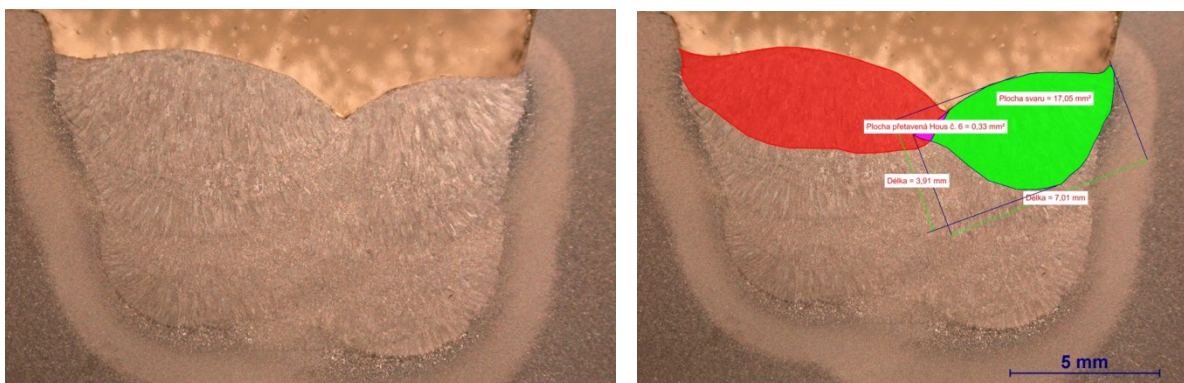


Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení housenky č. 3 – materiál 10GN2MFA

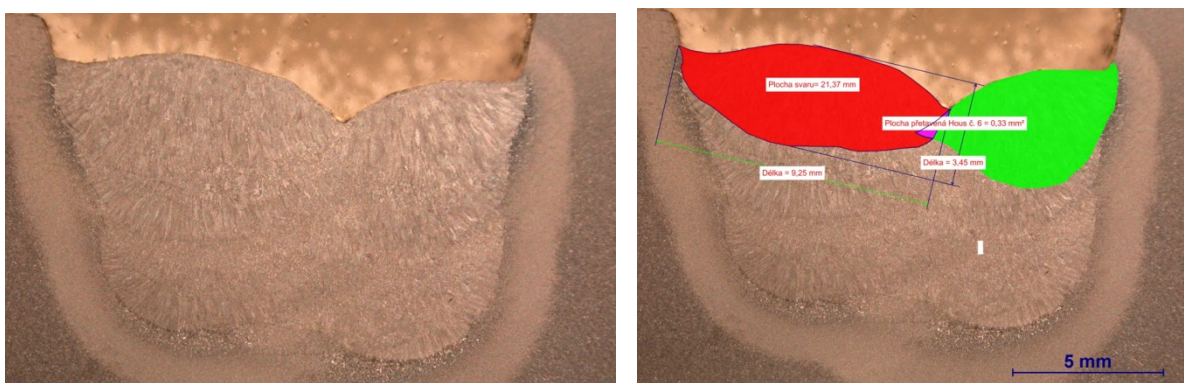


Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení housenky č. 4 – materiál 10GN2MFA

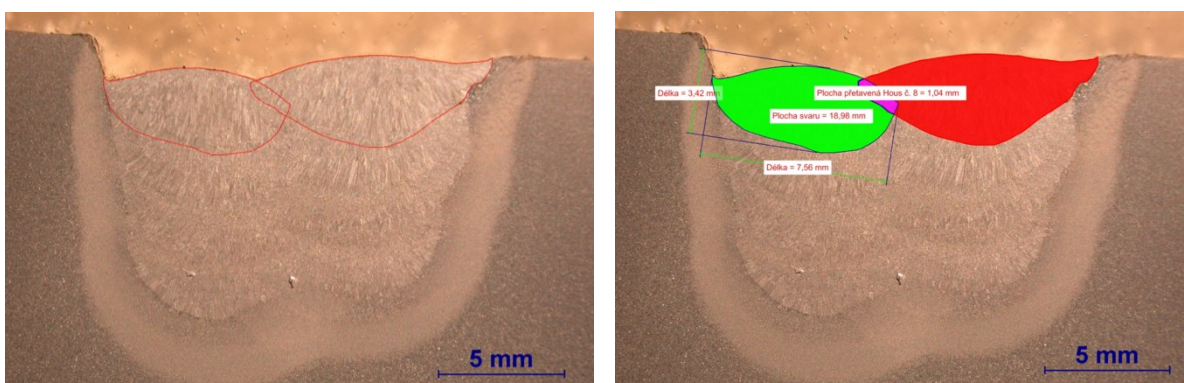
Příloha 4.7. Geometrické vyhodnocení housenek 5, 6, 7, a 8 na vzorku z materiálu 10GN2MFA



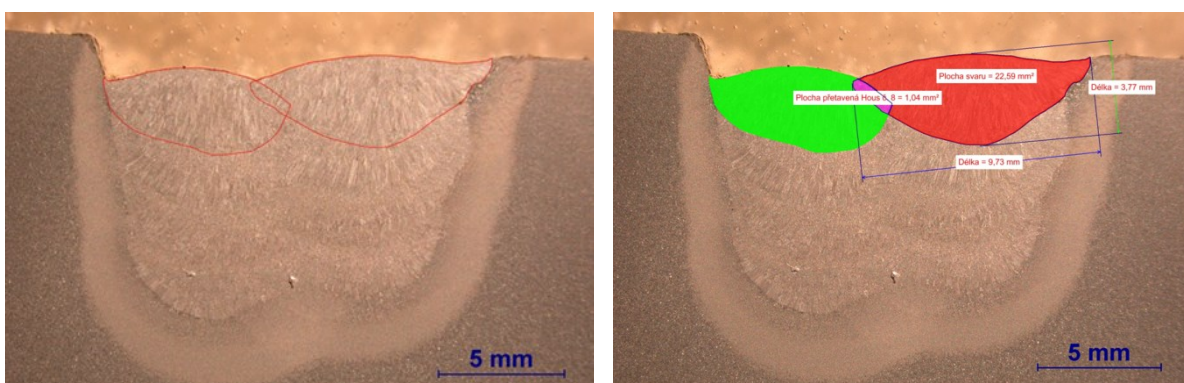
Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení housenky č. 5 – materiál 10GN2MFA



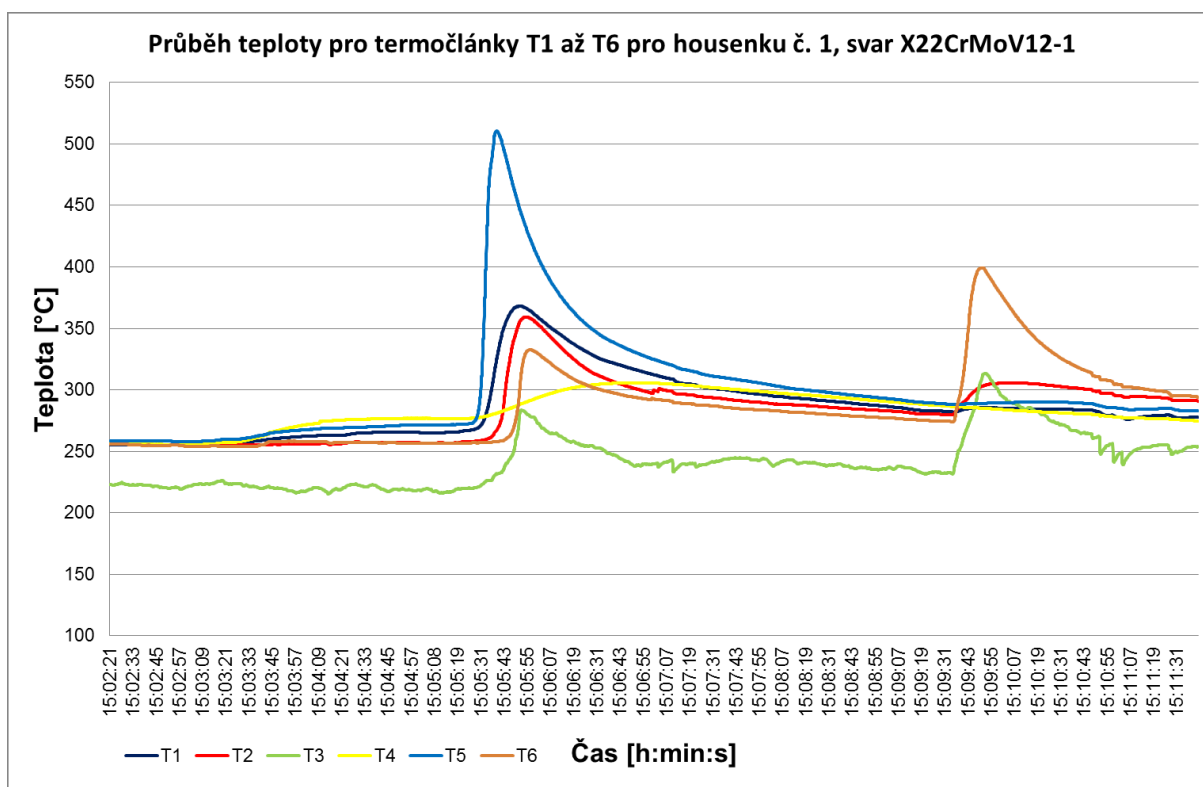
Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení housenky č. 6 – materiál 10GN2MFA



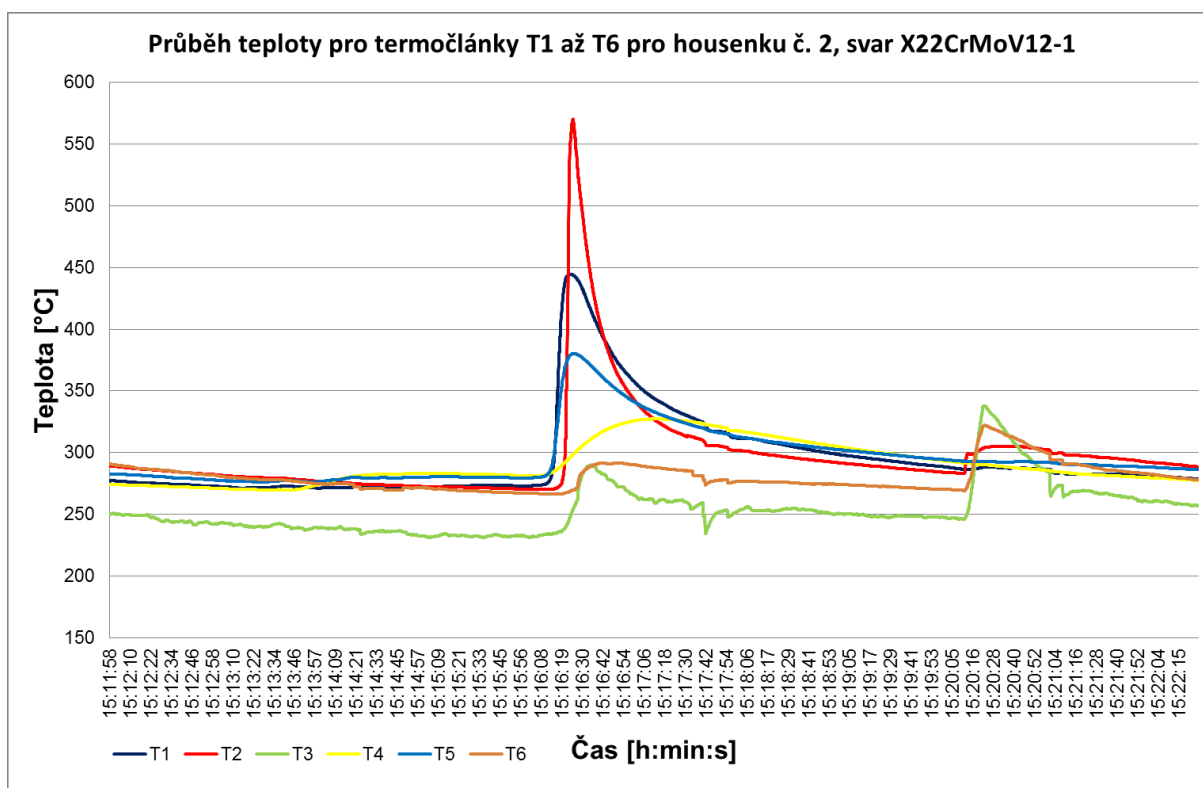
Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení housenky č. 7 – materiál 10GN2MFA



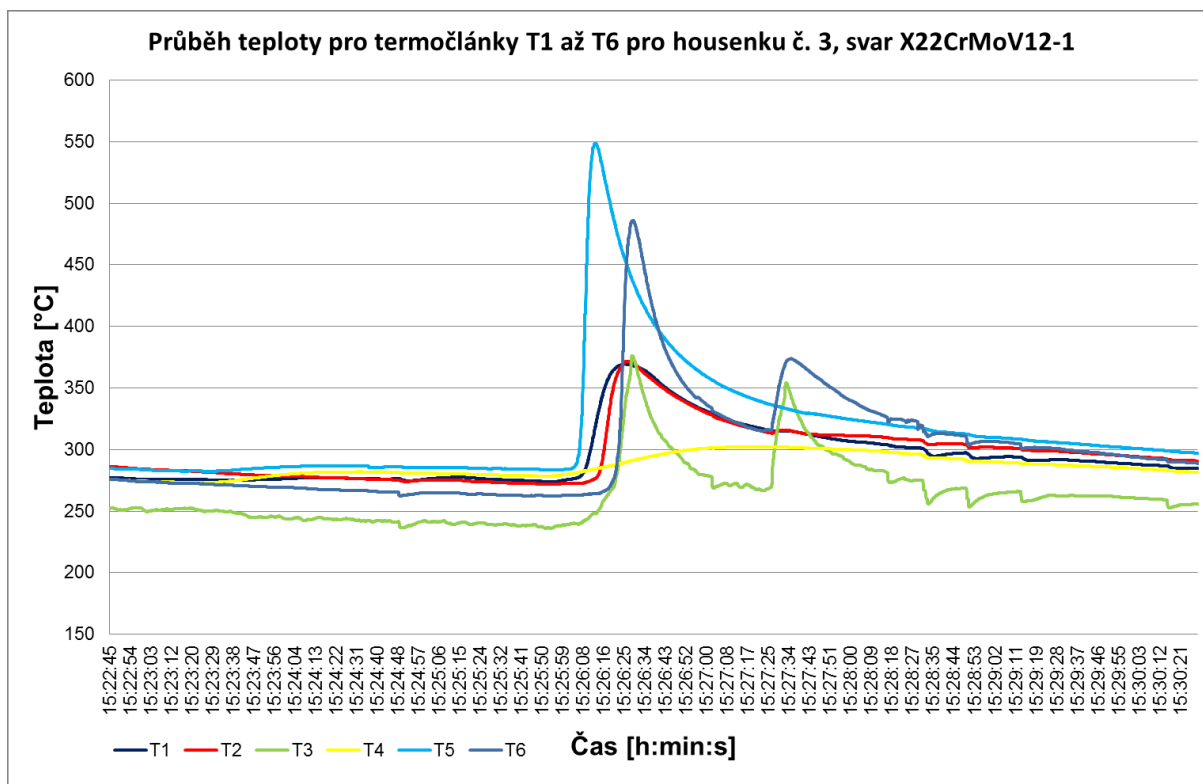
Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení housenky č. 8 – materiál 10GN2MFA

Příloha 4.8. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 1 a 2

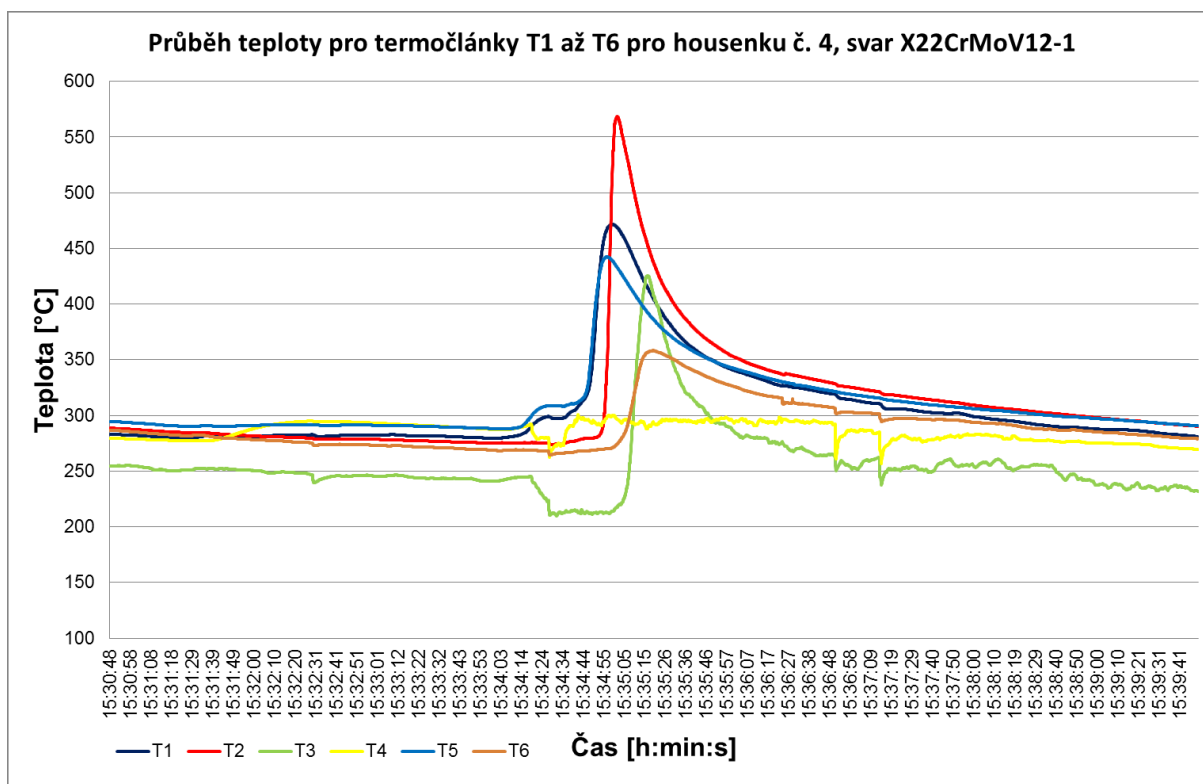
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 1 – materiál X22CrMoV12-1



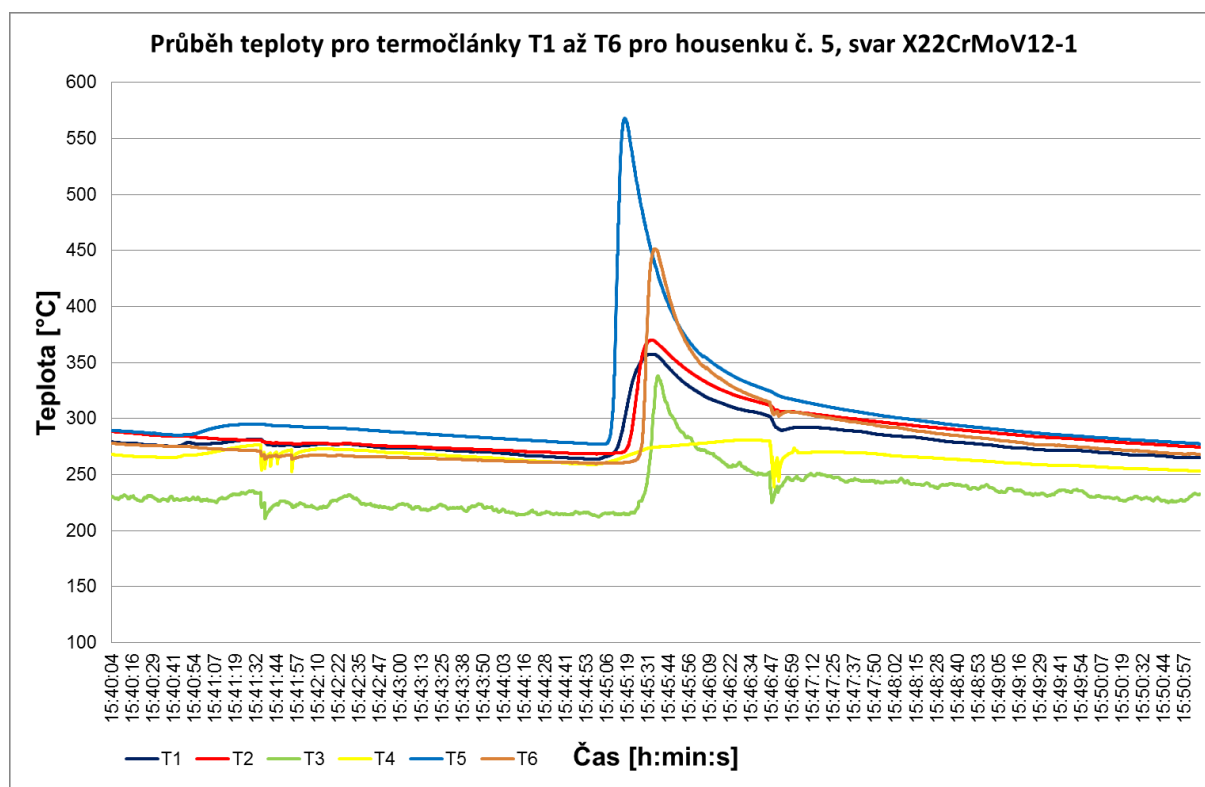
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 2 – materiál X22CrMoV12-1

Příloha 4.8. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 3 a 4

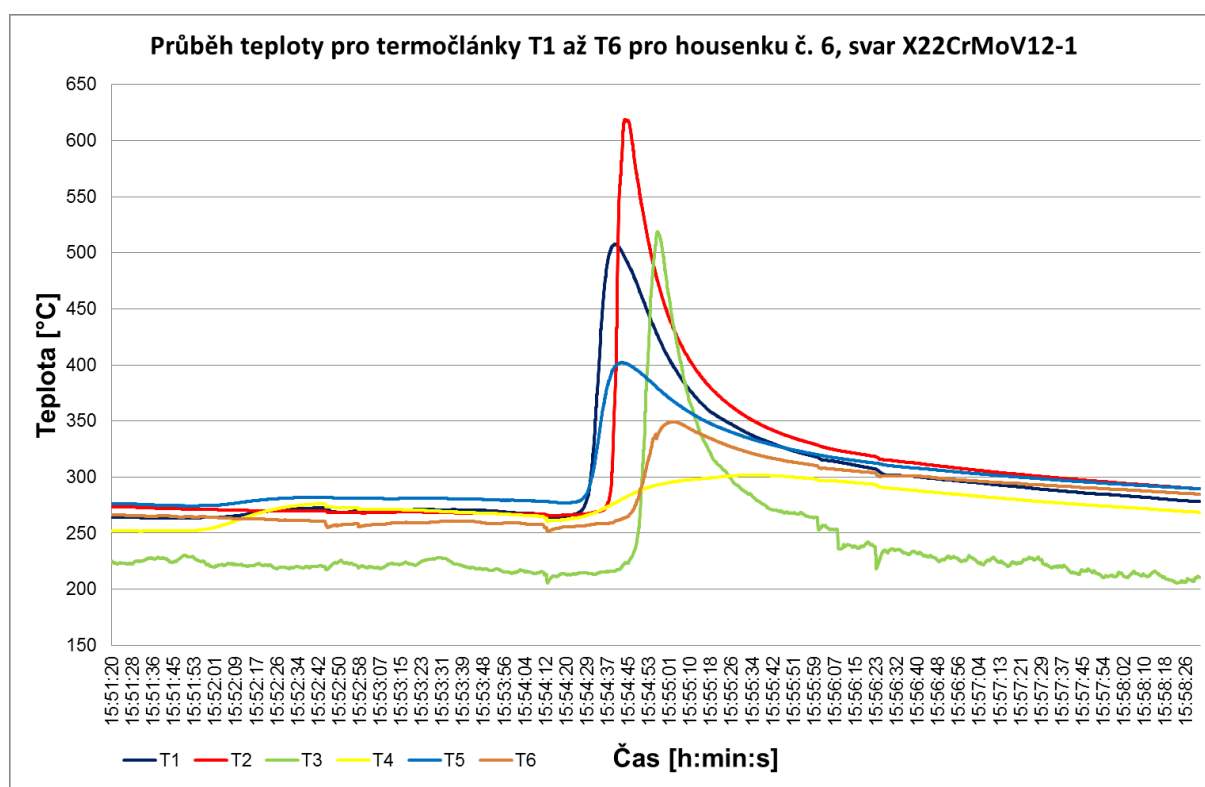
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 3 – materiál X22CrMoV12-1



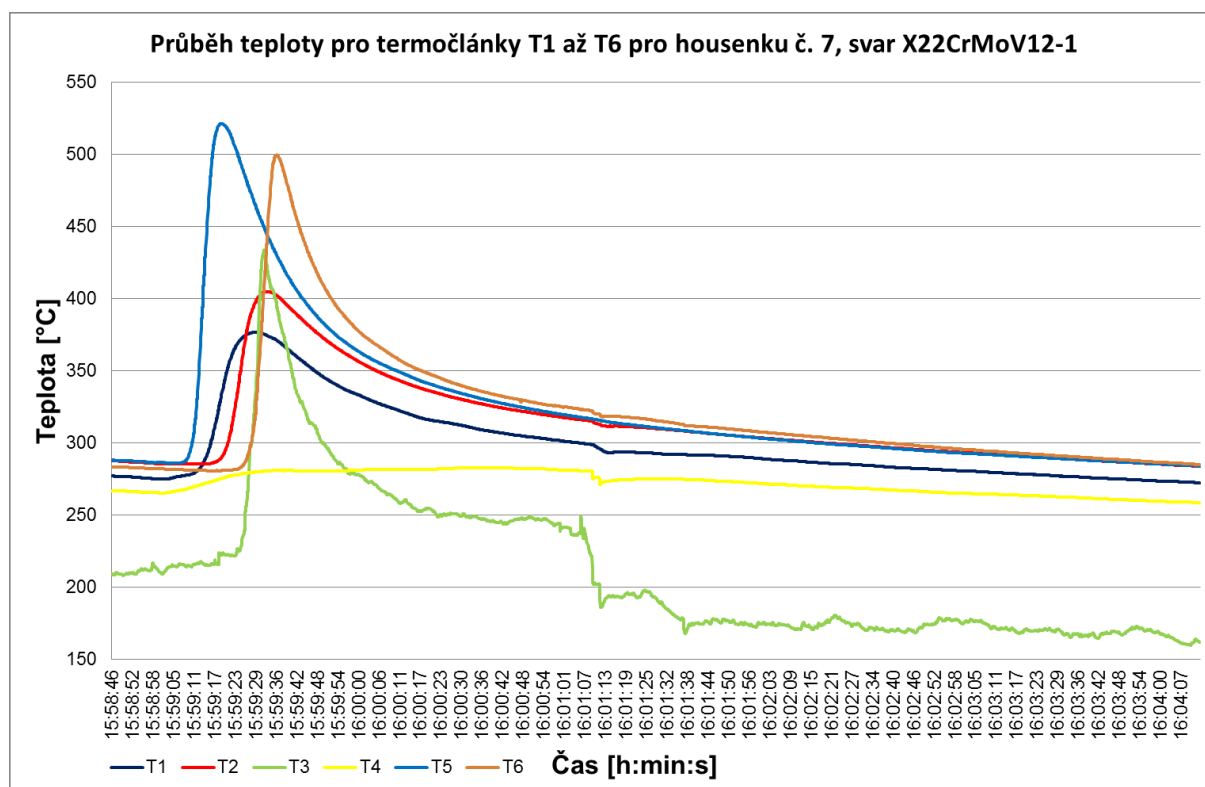
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 4 – materiál X22CrMoV12-1

Příloha 4.8. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 5 a 6

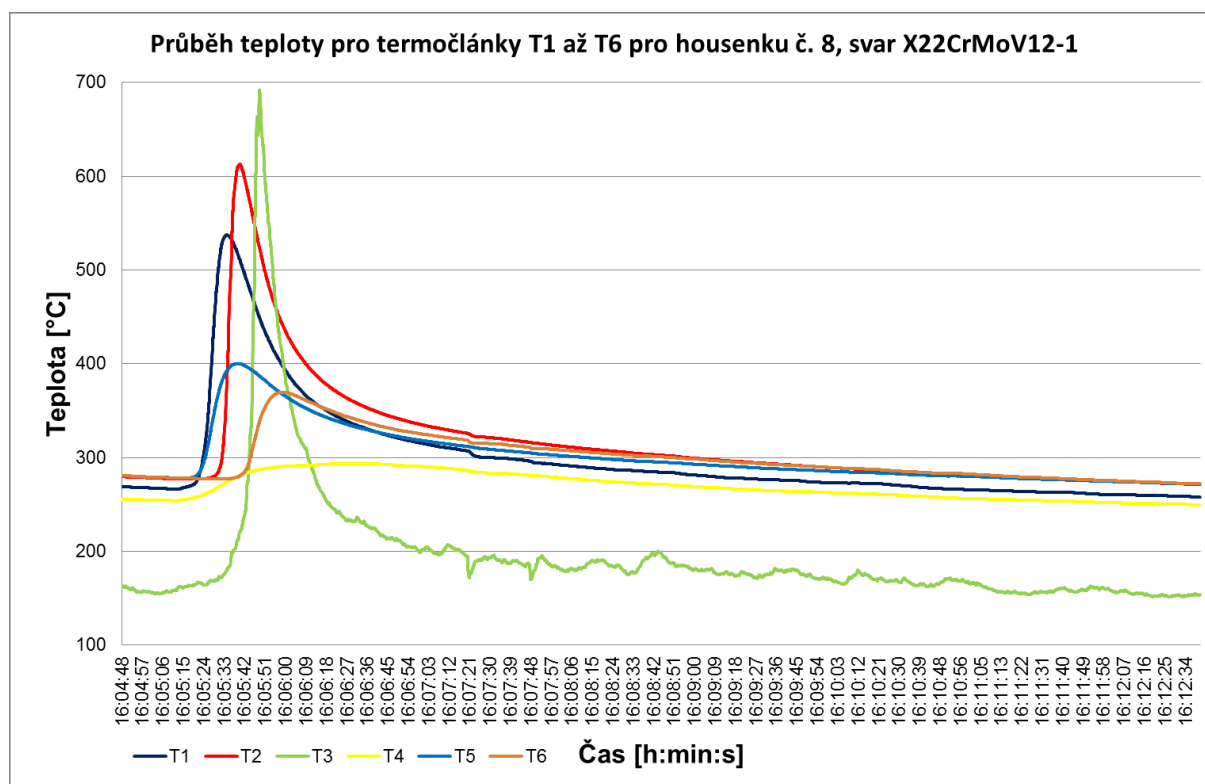
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 5 – materiál X22CrMoV12-1



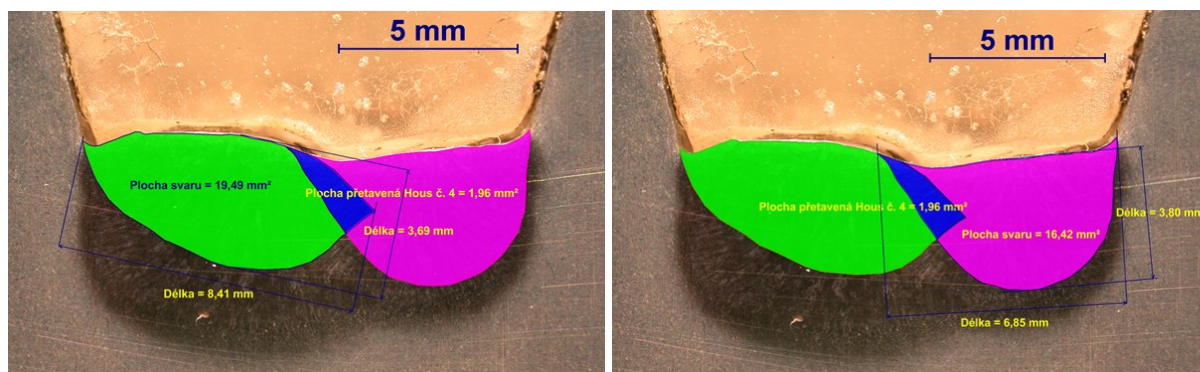
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 6 – materiál X22CrMoV12-1

Příloha 4.8. Detailní průběhy teploty změřené termočlánky pro housenku č. 7 a 8

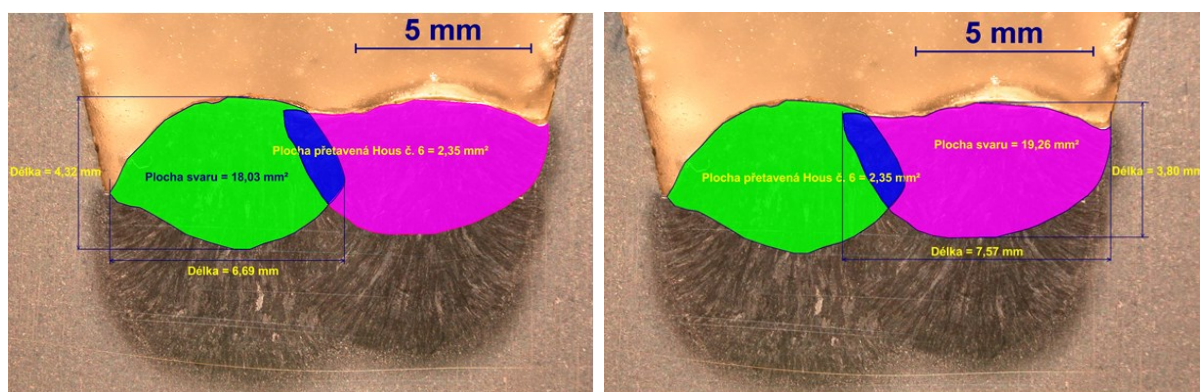
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 7 – materiál X22CrMoV12-1



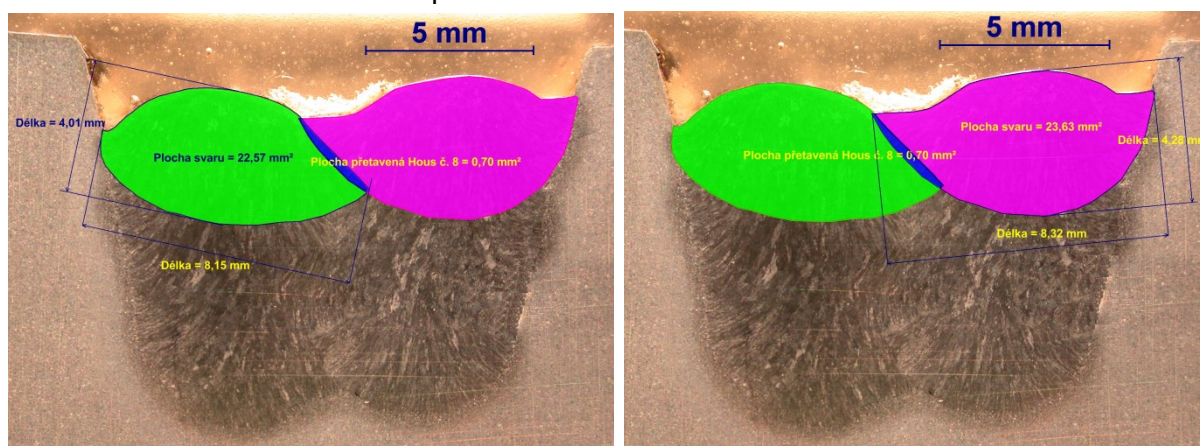
Teplotní průběhy pro všech 6 termočlánků pro housenku č. 8 – materiál X22CrMoV12-1

Příloha 4.9. Detaily geometrického vyhodnocení housenek 3 až 8 na vzorcích z materiálu X22CrMoV12-1

a) b)
Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení: a) housenky č. 3; b) housenky č. 4
pro materiál X22CrMoV12-1



a) b)
Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení: a) housenky č. 5; b) housenky č. 6
pro materiál X22CrMoV12-1



a) b)
Makrovýbrus a geometrické vyhodnocení: a) housenky č. 7; b) housenky č. 8
pro materiál X22CrMoV12-1