



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ TŘENÍM ČÁSTÍ ŘETĚZŮ LESNICKÝCH STROJŮ

FRICION WELDING OF PART CHAINS FOR FOREST MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Houdek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marián Sigmund, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

| | |
|-------------------|-----------------------------------|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Student: | Radim Houdek |
| Studijní program: | Strojírenství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie |
| Vedoucí práce: | Ing. Marián Sigmund, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2019/20 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Svařování třením částí řetězů lesnických strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařování třením patří do nekonvenčních metod svařování. Nekonvenční metody svařování obecně mohou v mnoha aplikacích nahradit metody konvenčního svařování. Tento požadavek bude řešen i v této bakalářské práci a to nahradit konvenční robotizované svařování metodou GMAW částí řetězů pro lesnické stroje, nekonvenčním třecím svařováním. Zohlednění všech výhod i nevýhod, které by vlastní třecí svařování konkrétních dílů přinesly spolupracující firmě.

Cíle bakalářské práce:

Vypracovat literární rešerši o svařování třením.

Vypracovat literární rešerši o vhodných materiálech pro svařování třením.

Případně kvalitativně vyhodnotit svařené vzorky.

Zohlednit poznatky literárních rešerší a experimentu při svařování třením částí řetězů.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

PLÍVA, Ladislav a Jiří KAHOUN. Svařování třením v praxi. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1973.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1

MANDAUS, Jan. Svařování třením. Praha: SNTL, 1961. Knižnice strojírenské výroby.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

HOUDEK Radim: Svařování třením částí řetězů lesnických strojů

Bakalářská práce je zaměřena na stav svařence části kolopásu, konkrétně přivaření kostičky na příčník vyrobené z oceli 50CrV4 a 27MnCrB5-2. Dílce byly svařeny lineárním třecím svařováním. První část práce je literární rešerše na téma lineární svařování třením a spojovaným materiálům. V druhé části práce jsou uvedeny výsledky bližšího zkoumání svařenců. Byla zkoumána jejich makrostruktura, mikrostruktura, mikrotvrдость ve všech oblastech svarového spoje, pomocí RTG difrakční analýzy bylo zjišťováno množství zbytkového austenitu, materiály prošly zkouškou chemického složení a svařenec byl podroben zkoušce rozlomením.

Klíčová slova: lineární svařování třením, ocel 27MnCrB5-2, ocel 50CrV4, ocel 51CrV4

ABSTRACT

HOUDEK Radim: Friction welding of part chains for forest machines

The bachelor's thesis is focused on the condition of the weldment of the part of the track, specifically the welding of the cube to the crossbar made of steel 50CrV4 and 27MnCrB5-2. The parts were welded by linear friction welding. The first part of the work is a literature search on the topic of linear friction welding and joined materials. The second part of the work presents the results of a closer examination of weldments. Their macrostructure, microstructure, microhardness were examined in all areas of the welded joint, the amount of residual austenite was determined by X-ray diffraction analysis, the materials were tested for chemical composition and the weldment was tested for breakage.

Keywords: linear friction welding, steel 27MnCrB5-2, steel 50CrV4, steel 51CrV4

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOUDEK, Radim. *Svařování třením částí řetězů lesnických strojů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124688>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marián Sigmund.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 24. 6. 2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Mariánu Sigmundovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Zástupcům firmy za odbornou konzultaci. Panu Romanu Kratochvílovi a Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za pomoc při řezání a přípravě vzorků. Pracovníkům ústavu materiálového inženýrství prof. Ing. Rudolfu Foretovi, CSc., Mgr. Janu Čuperovi, Ing. Soňi Pantůčkové, Ing. Zdeňku Spotzovi, Ph.D. a Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za zprostředkování a pomoc při zkoumání vzorků. Panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za pomoc při zkoušce rozlomením. Dále bych chtěl poděkovat především své rodině a blízkým za neustálou podporu, trpělivost a důvěru.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

| | |
|--|----|
| ÚVOD | 10 |
| 1 ROZBOR SOUČÁSTI | 11 |
| 2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TŘENÍM | 12 |
| 2.1 Úvod | 12 |
| 2.2 Historie | 12 |
| 2.3 Druhy svařování třením | 12 |
| 2.4 Podstata spojení | 13 |
| 2.5 Postup svařování | 13 |
| 2.6 Parametry a proměnné procesu | 14 |
| 2.6.1 Koeficient tření | 15 |
| 2.6.2 Teplota | 16 |
| 2.7 Možnosti svařování | 17 |
| 2.8 Svařitelnost materiálů třením | 18 |
| 2.9 Oblasti svařence | 19 |
| 2.10 Svařování třením za sníženého tlaku | 20 |
| 2.11 Svařování třením za snížené teploty | 20 |
| 2.12 Výhody, nevýhody a použití svařování třením | 21 |
| 3. SVAŘOVANÉ MATERIÁLY | 22 |
| 3.1 Ocel 50CrV4/51CrV4 (ČSN 15 260) | 22 |
| 3.2 Ocel 27MnCrB5-2 | 24 |
| 4. NÁVRH A PROVEDENÍ EXPERIMENTU | 27 |
| 4.1 Metalografické zkoušky svarového spoje | 27 |
| 4.1.1 Makrostruktura | 27 |
| 4.1.2 Mikrostruktura | 28 |
| 4.2 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse | 28 |
| 4.3 Zkouška rozlomením | 29 |
| 4.4 Zkouška množství zbytkového austenitu | 30 |
| 4.5 Měření chemického složení | 31 |
| 4.6 Příprava vzorků | 31 |

| | |
|---|----|
| 4.7 Hodnocení makrostruktury..... | 33 |
| 4.8 Hodnocení mikrostruktury | 34 |
| 4.9 Provedení a vyhodnocení mikrotvrlosti dle Vickerse | 35 |
| 4.10 Provedení a vyhodnocení zkoušky rozlomením..... | 37 |
| 4.11 Vyhodnocení množství zbytkového austenitu..... | 38 |
| 4.12 Provedení a vyhodnocení měření chemického složení ocelí..... | 38 |
| 5. ZÁVĚR..... | 41 |
| Seznam použitých zdrojů | |
| Seznam použitých symbolů a zkratk | |
| Seznam obrázků | |
| Seznam tabulek | |
| Seznam příloh | |

ÚVOD

Spojování materiálů je stále aktuální problematikou ve většině průmyslových odvětví. Zvětšující se trh, rychlý vývoj technologie a velká konkurence si vyžadují jakostní spojování stejných, podobných a mnohdy i naprosto odlišných typů materiálů za přijatelných ekonomických podmínek a v co nejkratším čase. Současný celosvětový trend klade také čím stáále větší nároky na bezpečnost a ekologičnost procesu.

Mezi technologiemi tvořícími nerozebíratelné spoje nachází vedle lepení a pájení největší uplatnění svařování. To se díky dlouhému vývoji rozdělilo na spoustu typů. V praxi se nejčastěji používají obloukové metody, a to díky jejich nenáročnosti a cenové dostupnosti. Přesto obloukové metody nemusí být vždy optimální volbou a mnohdy mohou být nahrazeny jiným typem například z důvodu levnější a rychlejší výroby, nebo zajištění kvalitnějšího svarového spoje.

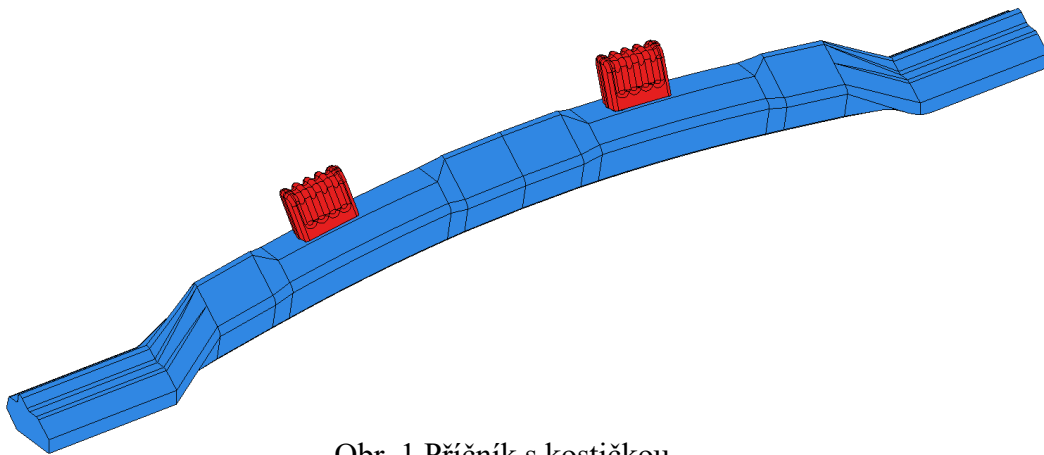
Svařování třením je nekonvenční metoda, která nabízí mnoho specifických výhod a v některých případech může ostatní technologie plnohodnotně nahradit. Není to metoda, která je v průmyslu masově využívána, spíše nachází uplatnění ve speciálních případech.

1 ROZBOR SOUČÁSTI [1], [2]

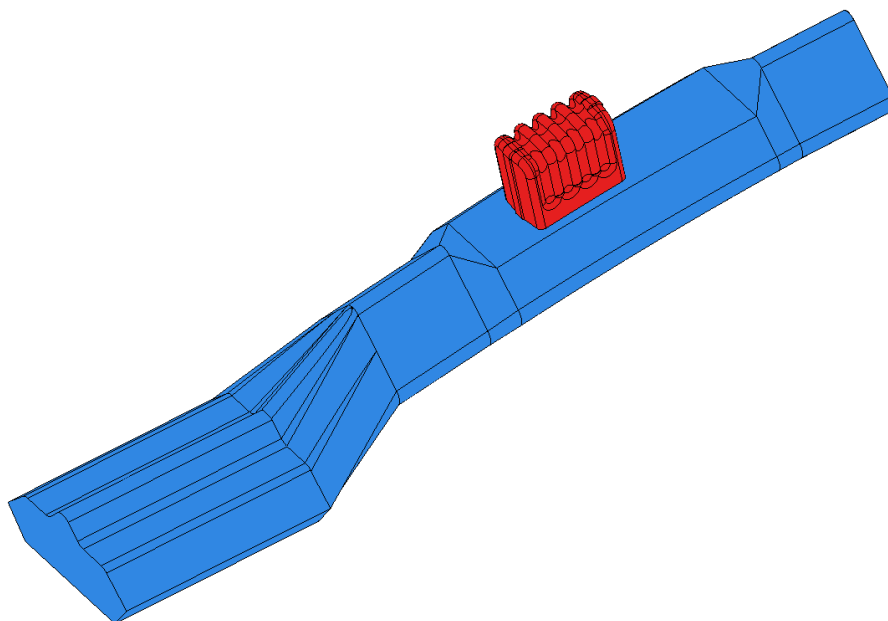
Součást, která je předmětem této práce je článek pásu na kola těžebních lesnických strojů. Kolopásky, mají za úkol zvýšit průchodnost strojů v případě svažitého a kamenitého terénu, ve sněhu, nebo v blátě. Aby pás lépe plnil svoji funkci přivařují se na jeho příčnicky výstupky tvaru kvádrů, tzv. kostičky, viz obr. 1 a 2. Ty mají za úkol zaklesnout se do země a zvýšit tak efektivitu pásu. Vzhledem k jejich funkci a zatížení, musí být svar dostatečně kvalitní, aby nedocházelo k jejich utržení.

Kostičky se na příčníc přivařují metodou 135. V důsledku jejich tloušťky se ovšem pravidelně objevují neprůvary, které sice provozu nevadí a nezpůsobují předčasné odpadávání, ale do budoucna by mohly být nežádoucí hlavně z důvodu rizika vzniku koroze. V místě těchto svarů bude metoda 135 nahrazena metodou 42.

Obě svařované součásti jsou zhotoveny jako výkovky. Jejich přesné výrobní výkresy nebudou z důvodu firemního know-how zveřejněny. Materiál kostičky je ocel 50CrV4/51CrV4 (ČSN 15 260). Je to Mn–Cr ocel vhodná k zušlechťování. Její využití je na výrobu velmi namáhaných strojních součástí, čepů nebo pružin. Materiál příčnicku je ocel 27MnCrB5-2, bórová ocel vhodná k zušlechťování.



Obr. 1 Příčníc s kostičkou



Obr. 2 Detail příčnicku s kostičkou

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TŘENÍM

2.1 Úvod [3], [4]

Svařování třením je technologie svařování řazená mezi metody tlakového svařování. Je založena na vzájemném pohybu dvou součástí, kdy se jejich povrchy vzájemně třou o sebe a následně na jejich stlačení, kdy mezi součástmi vznikne svarový spoj. Největší využití je při spojování součástí rotačních tvarů jako například hřídele nebo trubky. Lze ovšem spojovat i součásti čtvercového, nebo jiného přesně definovaného tvaru. Metoda nevyžaduje žádný přídavný materiál. Vytvoření svaru se docílí za pomoci plastické deformace, která je podporována axiálním tlakem a místním ohřevem. Teplo vzniká v důsledku tření mezi povrchy svařovaných součástí. Zvýšená teplota se vyskytuje převážně v úzkém pásmu mezi svařovanými povrchy a dosahuje hodnot 0,8 – 0,85 % teploty tavení základního materiálu, v případě oceli se tedy teplota pohybuje okolo 1200-1300 °C. Metodou svařování třením lze získat kvalitní svary s malou tepelně ovlivněnou oblastí a velice dobrými mechanickými vlastnostmi, dokonce srovnatelnými s vlastnostmi základního materiálu.

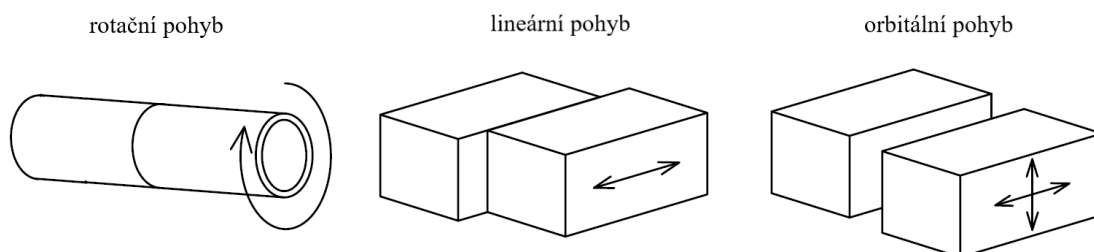
2.2 Historie [3], [5]

Počátky technologie svařování třením mohou být datovány do konce 19. století, kdy byl vydán patent na rotační svařování třením konců ohebných tyčí. Metoda byla dále rozvíjena a mezi lety 1920 až 1944 bylo v Evropě vydáno několik patentů, ale velkého využití se metoda nedočkala. Po druhé světové válce se osvědčila při svařování termoplastických trubek. K většímu rozvoji došlo od 60. let 20. století po vydání patentu A. I. Čudíkova v roce 1956. V roce 1957 byl v ČSSR úpravou revolverového soustruhu postaven první svařovací stroj sloužící hlavně pro výzkum. Další postavené stroje se s úspěchem testovaly v továrnách a postupně se technologie hlavně díky kvalitním svarům a přívětivé ekonomické stránce čím dál více zapojovala do běžné výroby. Postupně byla snaha o možnost svařování i nerotačních dílů nerotačního tvaru. Od 70. let se začalo aplikovat orbitální svařování třením a následně v 80. letech lineární svařování třením.

2.3 Druhy svařování třením [3], [6], [7]

Jak již bylo uvedeno, v počátku byly svařovány hlavně rotační součásti, a to především díky možnosti využití upravených již existujících strojů (soustruhy). Jako každá metoda svařování byla i technologie svařování třením dále podle potřeby rozvíjena. Byly kladeny požadavky na možnost svařování součástí i jiných než rotačních tvarů. Třecí proces může být rozdělen na (viz obr. 3):

- rotační
- lineární
- orbitální



Obr. 3 Druhy pohybů [7]

2.4 Podstata spojení [5]

Spojování třením dvou povrchů má molekulární a mechanický charakter. Molekulární je způsoben vzájemnou interakcí atomů a mechanický vzájemným prolínáním povrchů. Není ovšem jasné, zda je pro svar důležitější difuze, nebo vzájemné mechanické promixování obou materiálů.

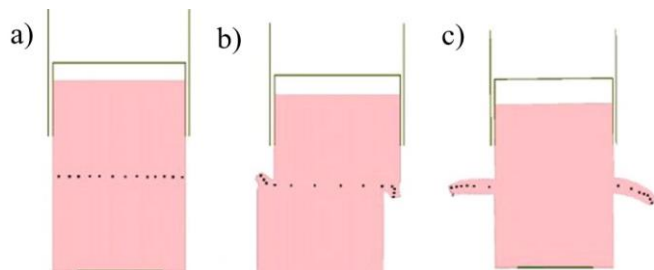
V důsledku zvýšené teploty v místě kontaktu povrchů třecích se těles je za hlavní mechanismus zajišťující spojení materiálu považována difuze. Ta je podpořena čistícími pochody způsobenými vzájemným pohybem a přitlakem obou součástí. Při svařování součástí ze stejného materiálu není problém a v důsledku dobré vzájemné rozpustnosti difuze funguje dobře a je možné vytvořit svar dobré kvality. Při svařování rozdílných materiálů ale může mít difuze dobrý i špatný vliv na svarový spoj. Například při svařování dvou ocelí s velkým rozdílem obsahu uhlíku dochází k oduhličení oceli s větším obsahem, což může způsobit zvýšení tažnosti svaru. Naopak například při svařování oceli s hliníkem, mědí, nebo titanem mohou vznikat intermetalické a tvrdé fáze, které mohou vést ke křehnutí svaru.

Naopak existují i výzkumy, které vylučují difuzi jako primární mechanismus tvorby svaru, a to na základě velice ostrého přechodu například ve spoji mezi titanem a hliníkem, nebo různorodými titanovými slitinami. Právě při zkoumání svaru dvou rozdílných titanových slitin bylo zjištěno, že v důsledku rychlého teplotního cyklu nedošlo k velké difuzi mezi materiály a vytvoření spoje bylo spíše přisuzováno vzájemnému mechanickému promixování v úzké zóně okolí svaru.

2.5 Postup svařování [8], [9], [11], [12], [13]

Před začátkem svařování by povrchy měly být kovově čisté, bez okují, oxidů a mastnoty, naopak jejich drsnost nemá na proces velký vliv. Součásti se nejčastěji upravují soustružením, frézováním, řezáním, stříháním, popřípadě se neupravují a nechávají se ve stavu z výroby. Postup u lineárního svařování třením lze obecně rozdělit do několika kroků.

- Prvním krokem je upnutí svařovaných součástí. To musí být pevné a přesné, proto se pro upínání používají nástroje konstruované speciálně pro určitý tvar spojovaných dílů. Nástroje zároveň musí být schopny vydržet používané tlaky a namáhání.

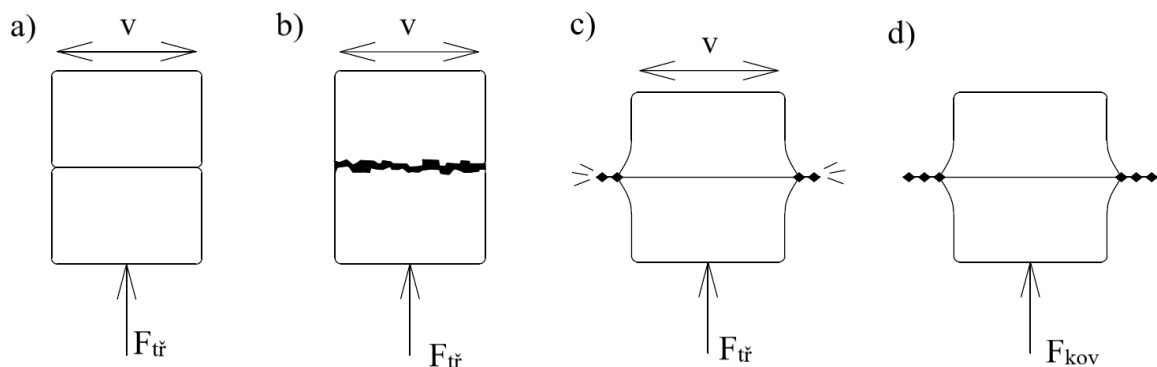


Obr. 4 Čistící pochody [11]

- Následuje nastavení upnutých součástí do požadované vzájemné polohy tak jak budou spojovány. Svařované povrchy jsou přiblíženy těsně k sobě.
- Jedna součást je rozpořehována a dochází k vzájemnému lehkému přitlačování.
- Až je dosaženo plného rozkyvu, zvětší se třecí přitlačná síla na požadovanou hodnotu, což společně s lineárním pohybem vede ke zvyšování teploty mezi třecími se povrchy. To má za následek plastizaci materiálu a jeho postupné vytlačování do výronku. viz. obr. 4. Třecí pohyb je zastavený po:
 - určitém zkrácení součásti,
 - uplynutí určitého časového úseku,
 - určitém počtu rozkyvů
- Zastavení pohybu je stejně jako rozpořehování poměrně rychlý proces a součást musí být zastavena v konečné poloze pro svaření. Je nastavena kovací síla a dochází k vytvoření svaru.
- V posledním kroku je uvolnění kovací síly a vyjmutí součástí.

Proces tření může být dále rozdělen na několik fází, které jsou zobrazeny na obr. 5:

- Fáze 1 - Při prvním kontaktu rozpohybovaných součástí dochází ke kontaktu pouze vrcholků nerovností. Vlivem suchého tření se teplota v místě styku zvětšuje a postupně také dochází k rozrušování nerovností a následnému zvětšování styčné plochy. Nedochází k žádnému promísení, ani významnějšímu zkrácení součásti.
- Fáze 2 – Teplota mezi povrchy dále roste a materiál je zplastizován. Postupně je stále méně schopný odolávat působící síle.
- Fáze 3 – Dochází k vylučování materiálu do výronku, což vede ke zkrácení součásti.
- Fáze 4 – Pohyb je zastaven a je aplikována kovací síla.



Obr. 5 Fáze tření: a) Fáze 1, b) Fáze 2, c) Fáze 3, d) Fáze 4 [12]

2.6 Parametry a proměnné procesu [4], [8], [9], [10], [16], [17], [18]

Na svařovací proces má vliv několik parametrů a proměnných. Průběhy některých jsou na obr. 6. Firmou byly prozrazeno pouze několik aplikovaných parametrů a to frekvence, amplituda, přítlačná síla a celkové zkrácení (upset).

- Frekvence kmitavého pohybu - vyjadřuje počet kmitů za sekundu. Nejčastěji používané jsou frekvence v intervalu 25 – 125 Hz. S frekvencí a amplitudou úzce souvisí třecí rychlost, ta se nejčastěji pohybuje v intervalu 0,1 – 1,5 m/s. Při svařování kostičky k příčniku byla použita frekvence v rozsahu 50 – 100 Hz. Společně s amplitudou a tlakem jsou tyto parametry považovány za nejdůležitější.
- Amplituda – maximální rozkyv, běžně se pohybuje v intervalu 1 – 3,5 mm, v procesu svařování se amplituda pohybovala v intervalu 1 – 3 mm.
- Tlak – hodnota tlaku se spočítá jako poměr velikosti působící síly a velikosti kontaktní plochy při klidovém stavu součástí. Během procesu jsou nejčastěji používány 2 druhy tlaků, a to:
 - třecí tlak – aplikovaný v třecí fázi,
 - kovací tlak – aplikovaný v kovací fázi, obvykle bývá větší než třecí tlak

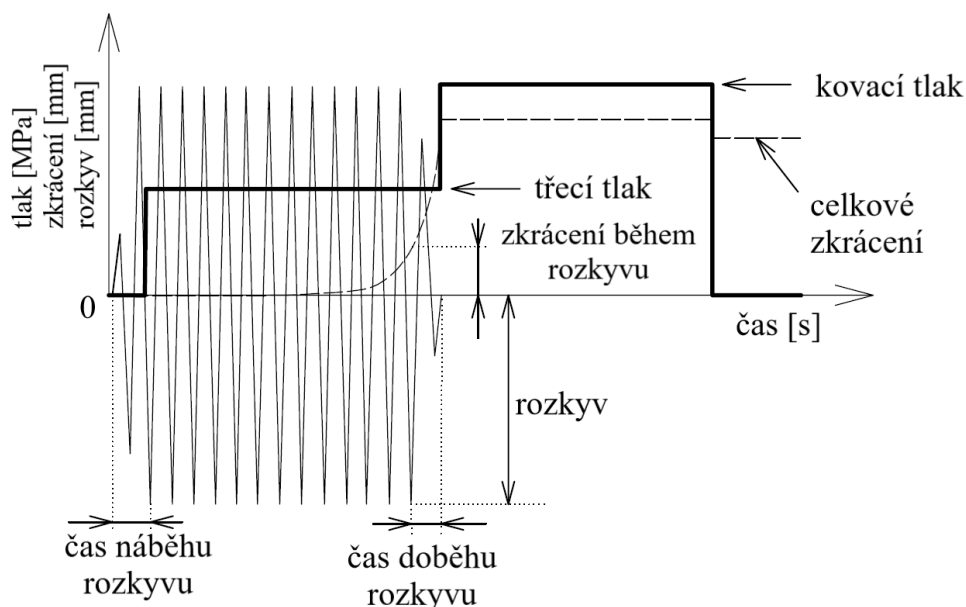
Aplikovaná přítlačná síla byla přibližně 40 kN, vyvozený tlak tedy vzhledem ke svařované ploše kostičky, která je 1500 mm² byl asi 26,7 MPa.

- Čas náběhu rozkyvu (ramp-up time) – čas potřebný k dosažení maximálního rozkyvu z klidového stavu.
- Zkrácení součásti během třecí fáze (burn-off distance), čas tření, počet cyklů – parametry popisující trvání třecí fáze po které následuje kovací fáze.
- Čas doběhu rozkyvu (decay time) – je to čas potřebný k zastavení lineárního frekvenčního pohybu. Vyskytuje se na konci třecí fáze a přechodu na kovací fázi.
- Čas kovací fáze – doba, kdy je aplikován kovací tlak.

Během procesu se vyskytuje několik dalších parametrů, jejichž velikost je především ovlivněna výše uvedenými. Jsou to:

- Zkrácení součásti (upset) – celkové zkrácení součásti během procesu, je složeno ze zkrácení během třecí fáze (burn-off distance) a zkrácení během kovací fáze. Celkové zkrácení součásti činilo přibližně 8 mm.
- Střížná síla – síla rovnoběžná s lineárním pohybem.
- Svařovací čas – celkový čas svařování.

Aby bylo možné vytvořit kvalitní svar, je potřeba místo svaru dostatečně zahřát. Vytvořené teplo má přímou souvislost s frekvencí pohybu, amplitudou a přítlačnou silou. Velikosti těchto parametrů je možné kombinovat. Například zvýšením frekvence pohybu, při zachování dané amplitudy, je možné snížit velikost přítlačné síly. Toho se dá s výhodou využít u součástí, u kterých by bylo riziko ohnutí následkem použitého tlaku. U součástí, jež jsou vyrobeny z materiálů náchylných na oxidaci, je možné snížení velikosti amplitudy, a tudíž snížení velikosti plochy vystavené okolní atmosféře. Aby se zachovala velikost vytvořeného tepla, je nutné zvýšení frekvence pohybu za předpokladu, že tlak zůstane nezměněn.



Obr. 6 Průběh parametrů svařovacího procesu [10]

2.6.1 Koeficient tření [3], [4], [23]

Dvě pevná tělesa, jejichž povrchy jsou ve fyzickém kontaktu se ve skutečnosti dotýkají pouze vrcholky jejich nerovností, viz obr 7. Pokud jsou obě tělesa k sobě přítlačována, vrcholky nerovností se plasticky deformují a vznikají drobné svarové spoje. Aby se tělesa po sobě mohla smýkat je potřeba takové síly, která je schopná překonat sílu tření. Ta vzniká v důsledku vzájemných deformací nerovností na povrchu, doprovázeným navazováním a rozrušováním mikrosvarů spolu se zvýšením teploty v místě styku. Při určitém rozdílu v pevnosti povrchů může dojít i k rozrývání měkčího materiálu. Třecí síla působí vždy proti pohybu obou těles a její velikost je ovlivněna velikostí kolmé přítlačné síly a koeficientem tření.

Koeficient tření f je bezrozměrná veličina a je definován jako poměr tečné síly tření ke kolmé tlakové síle (při konstantní velikosti plochy), viz vztah (2.1).

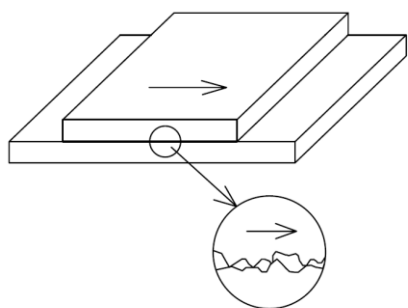
$$f = \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} \quad (2.1)$$

kde: f - koeficient tření [-]

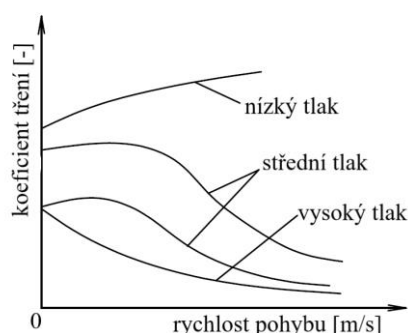
$\bar{\tau}$ - tečná síla tření [N]

$\bar{\sigma}$ - kolmá tlaková síla [N]

Velikost koeficientu tření obecně není konstantní hodnota a je závislá na mnoha parametrech jako je čistota a stav povrchu, jeho geometrie, vlastnostech materiálů a v neposlední řadě také na procesu tření, například tlaku, rychlosti vzájemného pohybu nebo teplotě. Vrstvy oxidů kovů bývají často tvrdší fáze, než je základní materiál. Pokud jsou vrstvičky tlusté, hodnotu koeficientu zvyšují, naopak tenké jeho hodnotu snižují. V tabulce 1 jsou příklady koeficientů tření materiálů s oxidickou vrstvou a bez ní. Koeficient se také průběžně mění s rychlostí pohybu, jednotlivé průběhy jsou uvedené na obr. 8.



Obr. 7 Skutečný dotyk dvou těles [23]



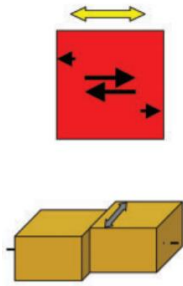
Obr. 8 Závislost velikosti koeficientu tření na rychlosti pohybu [4]

Tab. 1. Koeficienty tření kovů s oxidickou vrstvou a bez ní [3].

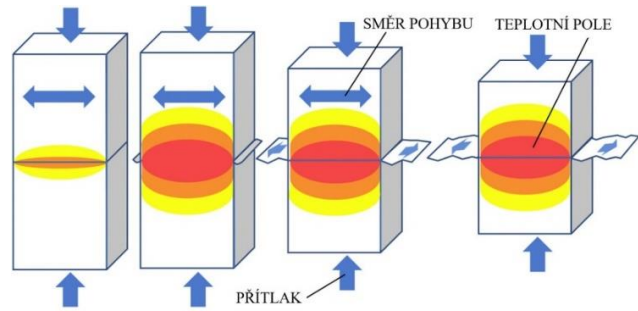
| | Kov | Au | Ag | Sn | Al | Zn | Cu | Fe | Cr |
|--------|--------------|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Povrch | s oxidy | - | 0,6 | 1 | 0,8 | 1,2 | 0,6 | 1 | 0,4 |
| | kovově čisté | 2 | 1 | 1 | 1,2 | 0,8 | 1,6 | 0,6 | - |

2.6.2 Teplota [5], [19], [20]

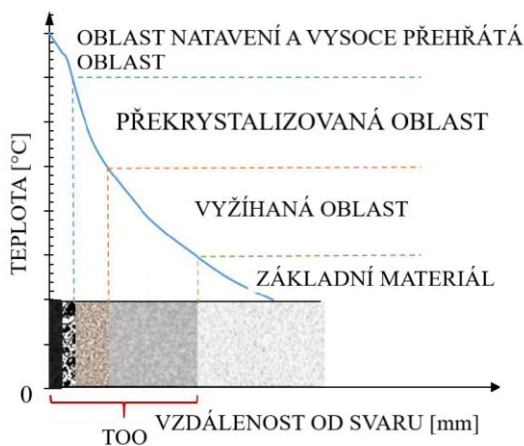
Teplu mezi materiály vzniká díky tření, může být ovšem podpořeno i externím zdrojem. Během procesu musí dojít vlivem teploty k optimální plastizaci materiálu a jeho částečné vyloučení do výronku. Jak naznačují šipky, na obr. 9, k největšímu tření, a tím pádem vývinu tepla dochází uprostřed průřezu a směrem ke kraji se snižuje. S tím souvisí i rozložení teplotních polí na svařovaných součástech při lineárním pohybu, které vyobrazeno na obr. 10. Velkou výhodou svařování třením oproti obloukovým metodám je poměrně malý vstup tepla do materiálu a tím podstatně menší tepelně ovlivněná oblast v okolí svaru. Porovnání velikosti tepelně ovlivněné oblasti s obloukovými metodami je znázorněno ve schématech na obr. 11 a obr. 12.



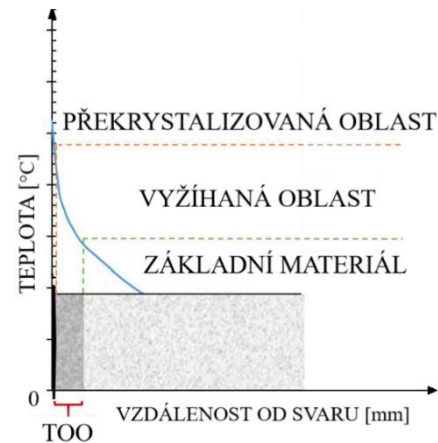
Obr. 9 Místa na průřezu s největším třením [5]



Obr. 10 Rozložení teplotních polí při lineárním svařování třením [19]



Obr. 11 Schéma velikosti TOO u obloukových metod [20]

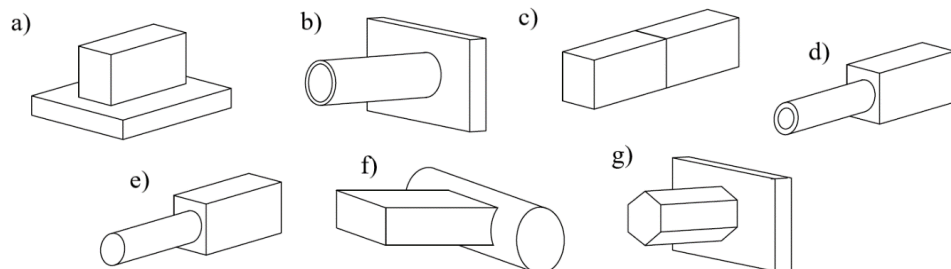


Obr. 12 Schéma velikosti TOO u svařování třením [20]

2.7 Možnosti svařování [15]

V případě lineárního třecího svařování může být tvar svařované součásti téměř jakýkoliv. Musí být ovšem možné je upnout a alespoň jednu svařovanou součást rozpohybovat lineárním frekvenčním pohybem. Na obr. 13 jsou uvedeny některé možné kombinace svařovaných tvarů a to:

- Trubka x plát,
- Kvádr x kvádr,
- Tyč x kvádr,
- Trubka x kvádr,
- Kvádr x plát,
- Kvádr s konkávně vyříznutou stěnou x trubka/tyč,
- Tyč libovolném tvaru průřezu x plát

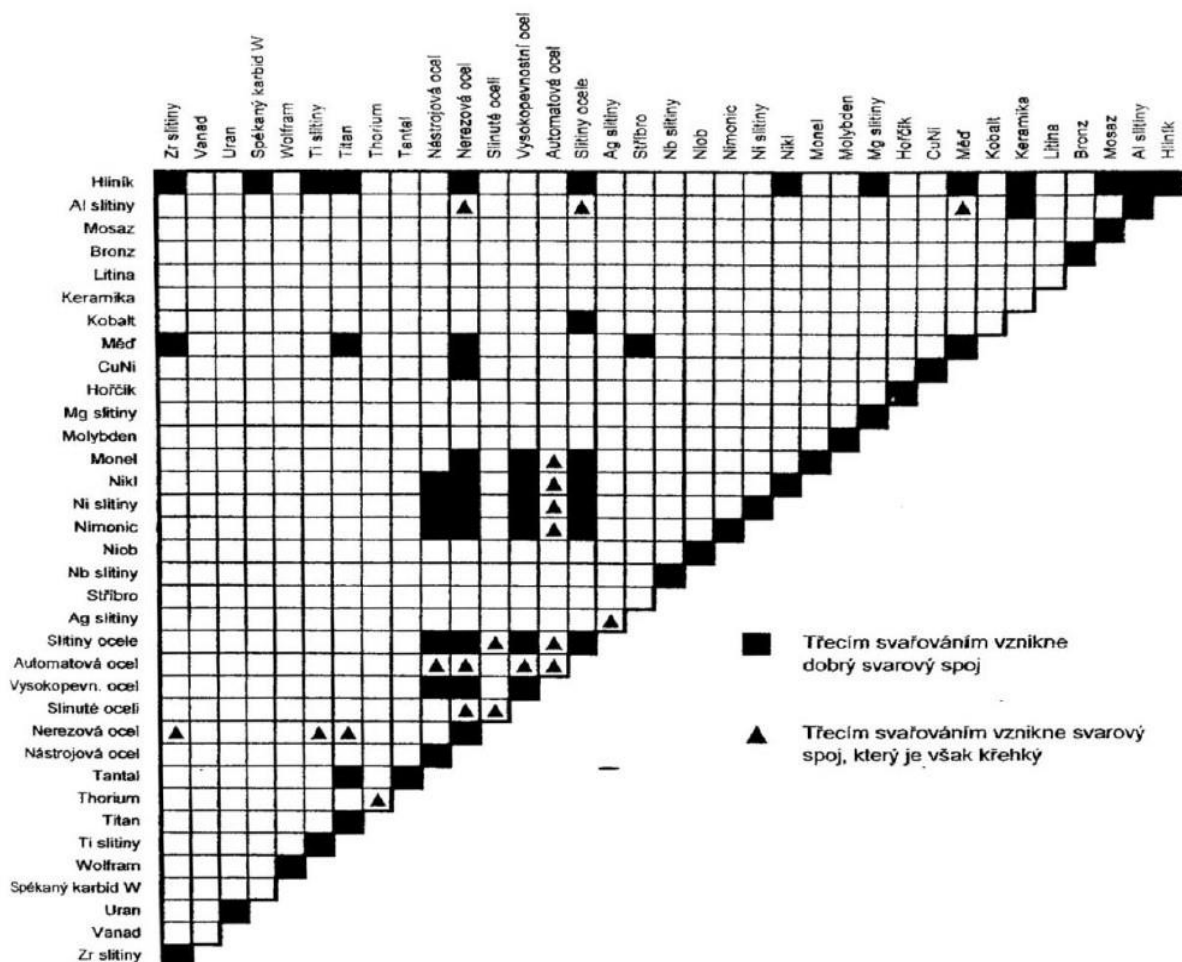


Obr. 13 Používané možnosti svařování: a) Kvádr x plát, b) Trubka x plát, c) Kvádr x kvádr, d) Trubka x kvádr, e) Tyč x kvádr, f) Kvádr s konkávně vyříznutou stěnou x trubka/tyč, g) Tyč o libovolném tvaru průřezu x plát [15]

2.8 Svařitelnost materiálů třením [3], [4], [6], [13]

Technologie svařování třením nabízí velké množství kombinací materiálů, které je možné spojovat. Svařitelnost závisí především na chemickém složení materiálu, fyzikálních vlastnostech, geometrii a velikosti průřezu svařovaných dílů a parametrech svařování. Metoda není významně citlivá na rozdílnost chemického složení spojovaných materiálů a platí pro ni specifická pravidla pro určování jejich svařitelnosti. Lze spojovat mnoho kombinací materiálů, které jinými metodami spojovat nelze, to platí především u materiálů s velmi rozdílnou teplotou tavení, chemickým složením a typu mikrostruktury. Je možné svařovat železné i neželezné kovy, plastické hmoty a za určitých podmínek i keramiku nebo sklo. Mezi dobře svařitelné materiály patří ocel, hliník, měď, nikl, molybden, titan, monel, nimonic, dále pak hliník s různými kovy jako například se zirkonem, wolframem, titanem, niklem, hořčíkem, mědí, mosazí a uhlíkovou ocelí. V dnešní době se touto metodou svařují především titanové a niklové slitiny. Na obr. 14 jsou uvedeny známé kombinace svařitelných materiálů.

Svary mají velmi dobré mechanické vlastnosti. Díky principu svařování a teplotě pod teplotou tavení mají jemné zrno (10x až 30x oproti základnímu materiálu) a nevznikají vady jako propal, trhliny za tepla a plynové dutiny. Naopak při špatně provedené fázi kování mohou vznikat studené spoje nebo trhliny za studena. Proces svařování je většinou zautomatizovaný, v důsledku toho je dobrá reprodukovatelnost svarů, ty jsou vhodné na staticky i dynamicky zatížené součásti.

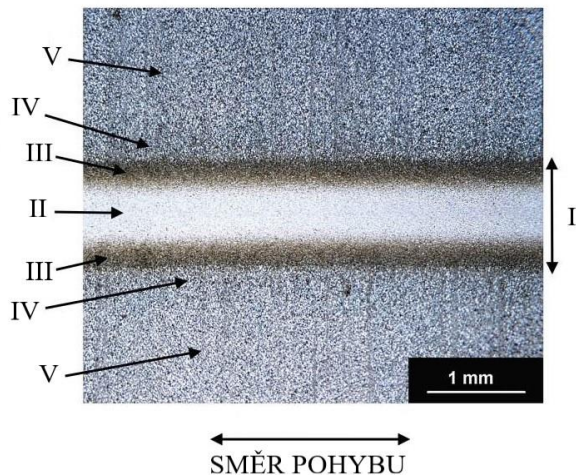


Obr. 14 Svařitelnost materiálů třením [6]

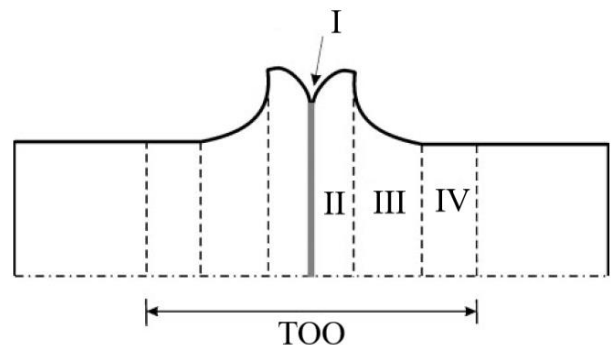
2.9 Oblasti svařence [5], [14]

Při svařování třením jsou spojované součásti ovlivňovány nejen tepelně, ale ve velké míře i plasticky. Jednotlivé oblasti vyskytující se na svařenci jsou souhrnně zobrazeny na obr. 15. Nachází se zde:

- Centrální oblast svaru,
- Tepelně-mechanicky ovlivněná oblast,
- Tepelně ovlivněná oblast,
- Základní materiál



Obr. 15 Oblasti svařence: I - Plasticky ovlivněná oblast, II – Centrální oblast svaru, III – Tepelně-mechanicky ovlivněná oblast, IV – Tepelně ovlivněná oblast, V – Základní materiál [14]



Obr. 16 Rozdělení TOO podle velikosti plastické deformace: I – Kontaktní zóna, II – Plně zplastizovaná zóna, III – Částečně deformovaná zóna, IV – Nedeformovaná zóna [5]

Tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti svařence mohou být dále rozděleny podle velikosti plastické deformace, ty jsou blíže znázorněny na obr. 16.

- Oblast I se nazývá kontaktní zóna. V této zóně dochází k tření a vzájemnému mixování obou materiálů, které jsou významně plasticky deformovány. Struktura zde se vyznačuje velice jemným zrnem v důsledku mechanického namáhání a úplné rekrytalizace.
- Oblast II se nazývá plně zplastizovaná zóna. Ta je opět významně ovlivněná plastickou deformací, ale už se neúčastní třecího kontaktu a mixování materiálu. Plastické deformování spolu s vysokou teplotou vede k dynamické rekrytalizaci, zrno v této oblasti je v důsledku toho jemné a zrovnoměrné.
- Oblast III se nazývá částečně deformovaná zóna. Míra plastické deformace a teplota je zde nižší než v předešlých oblastech. V důsledku toho zde dochází k mírnému zvětšení velikosti zrna.
- Oblast IV se nazývá nedeformovaná zóna a je nejvzdálenější oblastí od svaru v rámci tepelně ovlivněné oblasti. Nevyskytuje se zde již žádná plastická deformace a zóna je ovlivněná pouze tepelně. V důsledku toho může docházet k růstu velikosti zrna.

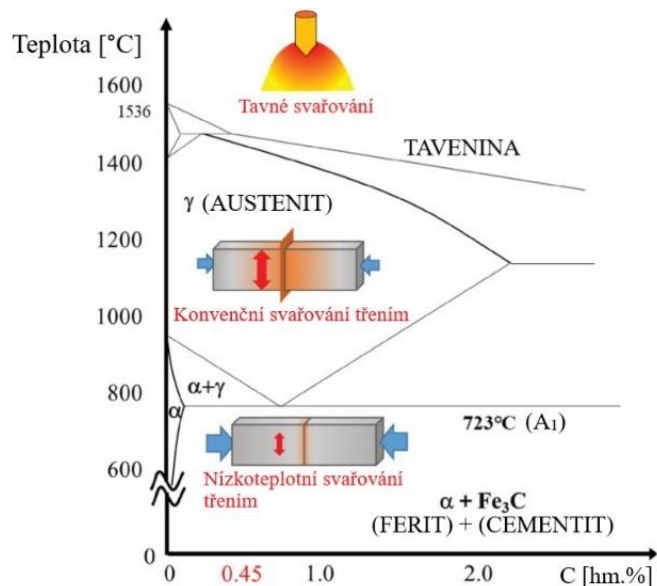
2.10 Svařování třením za sníženého tlaku [21], [22]

Svařování třením za sníženého tlaku je úprava, která rozšiřuje stávající možnosti lineárního a rotačního svařování třením vyvinuté americkou firmou Manufacturing Technology, Inc. Spojuje metodu třecího svařování se svařováním pomocí difuze. Během procesu je využíváno externího zdroje tepla, které napomáhá s ohřevem součástí, což umožňuje použití menšího tlaku a zkrácení času potřebného pro ohřev. Tato modifikace nabízí několik výhod, mezi které patří:

- Zmenšení výkonu – kvalita svarů není snížena, protože nedochází k odstranění čistících pochodů.
- Možnost svařování součástí, běžným svařováním třením obtížně svařitelné – například součásti a materiály citlivé na velké zatížení které je aplikováno při běžném režimu svařování třením. Dále součásti, které běžným způsobem nejdu, a to z důvodu příliš velké plochy, na kterou nestačí velikost přitlačné síly pro vytvoření dostatečného tlaku. Při této modifikaci je navíc možné snížení šířky tepelně ovlivněné oblasti.
- Využití menších strojů – díky využití externího tepelného zdroje není nutné vyvíjet tak velkou přitlačnou sílu, takže ke svaření součástí jsou potřeba menší stroje. Navíc na dané velikosti stroje je možné svařit součásti s větší svařovanou plochou.
- Zkrácení doby svařování – při běžném svařování třením se součásti postupně zahřívají ze stavu za studena. Díky přídavnému ohřevu je potřeba menšího počtu třecích cyklů což vede ke snížení času potřebnému k ohřevu, ale i ke snížení množství ztraceného materiálu.

2.11 Svařování třením za snížené teploty [38]

Technologie nízkoteplotního svařování třením, viz obr. 17, je modifikace svařování třením aplikovatelná především na spojování ocelí. Při svařování oceli konvenčním svařováním třením nedochází k tavení materiálů, ale ty jsou zahřáty na teplotu dosahující až 80 - 85 % teploty tavení, tedy přibližně 1200 – 1300 °C. Taková teplota odpovídá zahřátí do oblasti austenitu. Po zchlazení se často ve svarech vyskytuje tvrdá martenzitická struktura. Ta se obecně považuje za nežádoucí. Martenzitické transformaci se dá předejít tak, že nedojde k ohřevu až do oblasti austenitu, tedy maximální teplota musí ležet pod rekrystalizační teplotou. Jak je uvedeno dříve, teplota je ovlivněná parametry svařováním a popřípadě externím ohřívacím zdrojem. Snížení teploty a zároveň zachování kvality svarového spoje je možné docílit snížením frekvence ohybu a významným zvýšením přitlačné síly. Byly provedeny experimenty, kdy se úspěšně podařilo svařit ocel o obsahu 0,48 hm% C při frekvenci 15 Hz a tlaku 400 MPa.



Obr. 17 Nízkoteplotní svařování třením [38]

2.12 Výhody, nevýhody a použití svařování třením [4], [6], [13], [14], [25]

Metoda svařování třením má tyto výhody:

- ohřev svařovaných materiálů probíhá v úzké zóně,
- nedochází k vypalování legur,
- základní materiály se netaví, nevznikají trhliny za tepla,
- po svaření dochází k zjemnění zrna,
- použitelné pro široké spektrum i různorodých materiálů, které se nedaří svařit klasickým způsobem (např. možnost spojování keramiky s kovem),
- vlivem termomechanického způsobu zpracování ve svařovacím procesu vykazuje spoj velmi dobré mechanické vlastnosti,
- oproti jiným způsobům svařování spotřebuje tento proces menší množství energie,
- ekologičnost, čistota a hygiena práce, nevznikají výpary jako u obloukových metod,
- svařování probíhá za nepřístupu vzduchu ke stykovým plochám, nedochází k oxidaci,
- proces se dá snadno automatizovat,
- nízká svařovací teplota,
- vysoká produktivita práce a krátké výrobní časy,
- nedochází k velkým deformacím svařence jako u obloukového svařování,
- není potřeba přídavného materiálu a ochranné atmosféry

Naopak mezi nevýhody se může řadit například:

- svařovací zařízení bývají poměrně drahá,
- kvalita spoje může být ovlivněna množstvím a rozdělením nekovových vměstků (např. neuklidněná ocel, automatová ocel),
- možnost tvorby nežádoucích nízkotavitelných a intermetalických fází,
- možnost poklesu tvrdosti v okolí svaru při svařování zakalených nebo vytvrzených materiálů,

Lineární svařování třením se v největší míře používá pro svařování lopatek turbín dopravních letadel, viz obr. 18. Technologie se ovšem dá využít i na další aplikace.



Obr. 18 Turbína s navařenými lopatkami [14]

3. SVAŘOVANÉ MATERIÁLY

Jak už bylo uvedeno dříve, spojované materiály jsou ocel 50CrV4/51CrV4 (ekvivalent dle ČSN 15 260) jako materiál kostiček a ocel 27MnCrB5-2 jako materiál příčnicku.

3.1 Ocel 50CrV4/51CrV4 (ČSN 15 260) [2], [4], [24], [25], [26], [27]

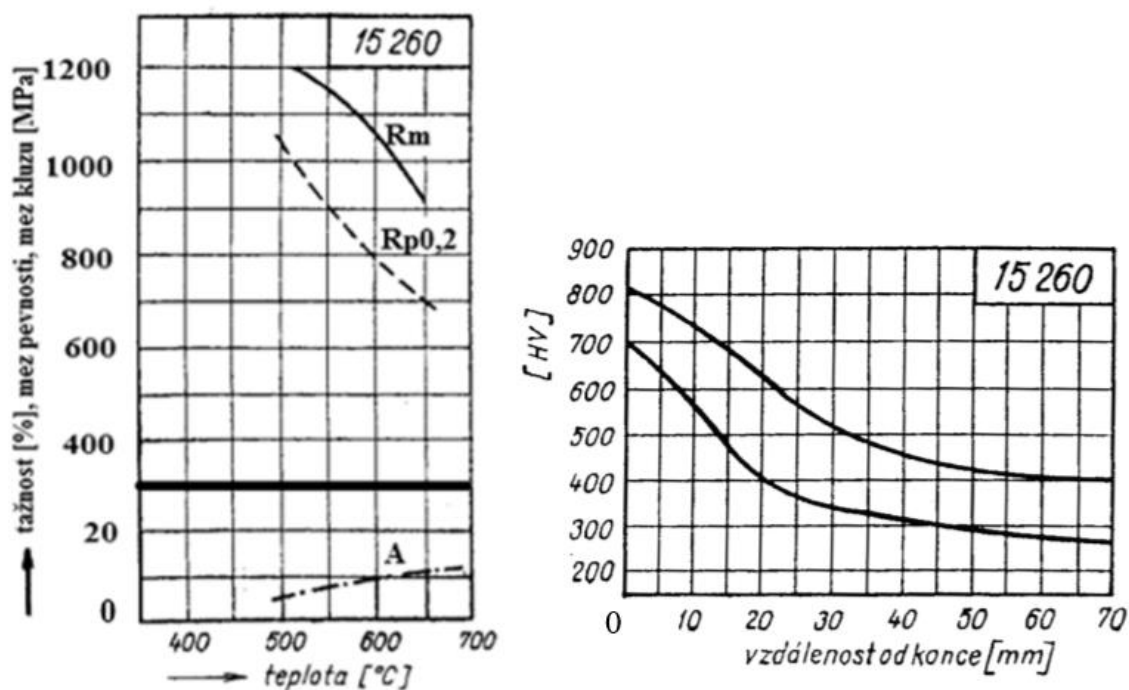
Tato Mn-Cr ocel je vhodná k zušlechťování a na výrobu velmi namáhaných strojních součástí jako čepy, hřídele, poloosy a pružiny. Je obtížně svařitelná. Chemické složení oceli 15 260 je uvedeno v tabulce 2. K tomuto materiálu nebyl dodán atest, proto je uveden pouze rozsah hm. % určitých prvků. Podmínky tepelného zpracování jsou uvedeny v tabulce 3. Na obr. 19 je uveden zušlechťovací diagram a pás prokalitelnosti oceli 15 260.

Tab. 2 Chemické složení oceli 15 260 [26].

| Značka prvku | C | Si | Mn | Cr | V |
|--------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| Obsah v % | 0,47 – 0,55 | max 0,40 | 0,70 – 1,00 | 0,90 – 1,20 | 0,10 – 0,20 |

Tab. 3 Podmínky tepelného zpracování oceli 15 260 [26].

| Kování | Normalizační žihání | | Žihání naměkko | | | Kalení | | Popouštění | |
|------------|---------------------|--------|----------------|---------|------------|------------------------|--------------|------------|---------|
| | °C | °C | °C | ochlaz. | tvrdost | °C | ochlaz. | °C | ochlaz. |
| 1150 - 850 | 850 - 890 | vzduch | 680 - 720 | pec | max 225 HB | 810 – 830 830 - 880 | voda olej | 530 - 670 | voda |



Obr. 19 Zušlechťovací diagram (vlevo) a pás prokalitelnosti oceli 15 260 (vpravo) [26], [27]

Pro materiál bylo spočítáno několik variant uhlíkových ekvivalentů a teplota předehřevu. Hodnoty jednotlivých prvků v tabulce 2 jsou uvedeny v intervalech, pro výpočet tedy byla použita střední hodnota:

- Uhlíkový ekvivalent pro svařování třením:

$$C_{E(tř)} = C + 0,04 \cdot Si + 0,02 \cdot Ni + 0,2 \cdot Cr + 0,25 \cdot Mo + 0,17 \cdot Mn \quad (3.1)$$

Po dosazení:

$$C_{E(tř)} = 0,51 + 0,04 \cdot 0,4 + 0,02 \cdot 0 + 0,2 \cdot 1,05 + 0,25 \cdot 0 + 0,17 \cdot 0,85 = 0,88$$

kde: $C_{E(tř)}$ – uhlíkový ekvivalent pro svařování třením [-]

Uhlíkový ekvivalent $C_{E(tř)}$ leží v intervalu nad 0,8 %, je tedy nutné provést tepelné zpracování ihned po ochlazení na teplotu okolí.

- Uhlíkový ekvivalent navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS), pro oceli $C > 0,18$ hm. %

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (3.2)$$

Po dosazení:

$$C_E = 0,51 + \frac{0,85}{6} + \frac{1,05 + 0 + 0,15}{5} + \frac{0 + 0}{15} = 0,89$$

kde: C_E – uhlíkový ekvivalent navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS), pro oceli $C > 0,18$ hm. % [-]

Teplota předehřevu pro tloušťku materiálu 30 mm by měla být v intervalu 200 – 300 °C.

Pro daný materiál byla spočítána i teplota doporučeného předehřevu, a to podle Séferiána:

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{C_P - 0,25} \quad (3.3)$$

$$C_P = C_C + C_S \quad (3.4)$$

$$C_C = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad (3.5)$$

$$C_S = 0,005 \cdot t \cdot C_C \quad (3.6)$$

Po dosazení:

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{0,83 - 0,25} = 266,55 \text{ °C}$$

$$C_P = 0,72 + 0,11 = 0,83$$

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,51 + 40 \cdot (0,85 + 1,05) + 20 \cdot 0 + 28 \cdot 0}{360} = 0,72$$

$$C_s = 0,005 \cdot 30 \cdot 0,72 = 0,11$$

kde: T_p – teplota předehřevu dle Séferiána [°C]
 C_c – uhlíkový ekvivalent [-]
 C_s – koeficient [-]
 C_p – koeficient [-]

Tloušťka t byla volena jako tloušťka kostičky, tedy 30 mm.

Teplota předehřevu pro kostičku vyšla 266,55 °C, tato hodnota by se v praxi špatně měřila, proto by bylo výhodné zaokrouhlit teplotu na 300°C.

3.2 Ocel 27MnCrB5-2 [4], [24], [25], [28]

V tabulce 4 je uvedeno chemické složení oceli 27MnCrB5-2. K té byl dodán atest od firmy ŠTORE STEEL, který je v příloze 2, takže by mělo být uvedeno přesné chemické složení. Vzhledem k obsahu bóru může být řazena mezi bórové oceli. Díky tomuto prvku, a to už při obsahu několika tisícín hmotnostních procent, je možno zušlechťením vytvářet strukturu nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí, tím získávají prokalitelnost obdobnou jako při obsahu uhlíku nad 0,4 % a několika desetín Cr, Ni, Mn, V, nebo Mo. Největšího účinku se dosahuje u nízkolegovaných a nízkouhlíkových ocelí s obsahem uhlíku v intervalu 0,1 – 0,35 hm. %.

Tab. 4. Chemické složení oceli 27MnCrB5-2.

| Značka prvku | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V | Cu | Al | B | Ti |
|--------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|
| Obsah v % | 0,28 | 0,25 | 1,23 | 0,013 | 0,009 | 0,47 | 0,08 | 0,02 | 0,010 | 0,15 | 0,022 | 0,0045 | 0,030 |

Pro materiál 27MnCrB5-2 bylo taktéž spočítáno několik variant uhlíkových ekvivalentů, a to:

- Uhlíkový ekvivalent pro svařování třením

$$C_{E(tř)} = C + 0,04 \cdot Si + 0,02 \cdot Ni + 0,2 \cdot Cr + 0,25 \cdot Mo + 0,17 \cdot Mn \quad (3.1)$$

Po dosazení:

$$C_{E(tř)} = 0,28 + 0,04 \cdot 0,25 + 0,02 \cdot 0,08 + 0,2 \cdot 0,47 + 0,25 \cdot 0,02 + 0,17 \cdot 1,23 = 0,60$$

kde: $C_{E(tř)}$ – uhlíkový ekvivalent pro svařování třením [-]

Uhlíkový ekvivalent leží v intervalu 0,5 - 0,8 %, je tedy nutné provést tepelné zpracování.

- Uhlíkový ekvivalent navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS), pro oceli s $C > 0,18$ hm. %

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (3.2)$$

Po dosazení:

$$C_E = 0,28 + \frac{1,23}{6} + \frac{0,47 + 0,02 + 0,01}{5} + \frac{0,08 + 0,15}{15} = 0,60$$

kde: C_E – Uhlíkový ekvivalent navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS), pro oceli s $C > 0,18$ hm. % [-]

Teplotě předehřevu pro materiál tloušťky 50 mm a uhlíkový ekvivalent $C_E = 0,60$ přísluší teplota předehřevu 200 – 300 °C.

- Uhlíkový ekvivalent obsahující bór pro oceli s $C < 16$ hm. % od autorů Ito-Bessyo

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B \quad (3.7)$$

Po dosazení:

$$P_{CM} = 0,28 + \frac{0,25}{30} + \frac{1,23 + 0,15 + 0,47}{20} + \frac{0,08}{60} + \frac{0,02}{15} + \frac{0,01}{10} + 5 \cdot 0,0045 = 0,41$$

kde: P_{CM} - Uhlíkový ekvivalent obsahující bór pro oceli s $C < 16$ hm. % [-]

Teplota předehřevu podle Séferiána:

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{C_P - 0,25} \quad (3.3)$$

$$C_P = C_C + C_S \quad (3.4)$$

$$C_C = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn+Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad (3.5)$$

$$C_S = 0,005 \cdot t \cdot C_C \quad (3.6)$$

Po dosazení:

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{0,60 - 0,25} = 207,06 \text{ °C}$$

$$C_P = 0,48 + 0,12 = 0,60$$

$$C_C = \frac{360 \cdot 0,28 + 40 \cdot (1,23 + 0,47) + 20 \cdot 0,08 + 28 \cdot 0,02}{360} = 0,48$$

$$C_S = 0,005 \cdot 50 \cdot 0,48 = 0,12$$

kde: T_P – teplota předehřevu dle Séferiána [°C]
 C_C – uhlíkový ekvivalent [-]

C_S – koeficient [-]

C_P – koeficient [-]

Tloušťka t byla volena jako tloušťka příčnicku, tedy 50 mm.

Teplota předehřevu pro příčník vyšla 207,06 °C.

Teplota pro předehřev vyšla po mírném zaokrouhlení vyšší u kostičky, a to 300 °C. Bylo by výhodné na stejnou teplotu předehřát i příčník.

4. NÁVRH A PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Aby se dalo určit, zda technologie svařování třením může v tomto případě nahradit obloukovou metodu svařování je potřeba bližšího zkoumání a vyhodnocení svařenců. To je předmětem experimentální části této práce. Jeden svařenec byl rozřezán a byla hodnocena jeho makrostruktura a mikrostruktura. Dále byl zkoumán rentgenovou difrakční analýzou na přítomnost zbytkového austenitu, na jeho povrchu proběhlo měření mikrotvrdomosti a zjišťování chemického složení. Na dalším svařenci byla provedena zkouška rozlomením. Žádná ze zkoušek nebyla prováděna podle normy, ale na základě konzultací s vedoucím práce, laboratorními pracovníky a zástupci firmy.

4.1 Metalografické zkoušky svarového spoje [29]

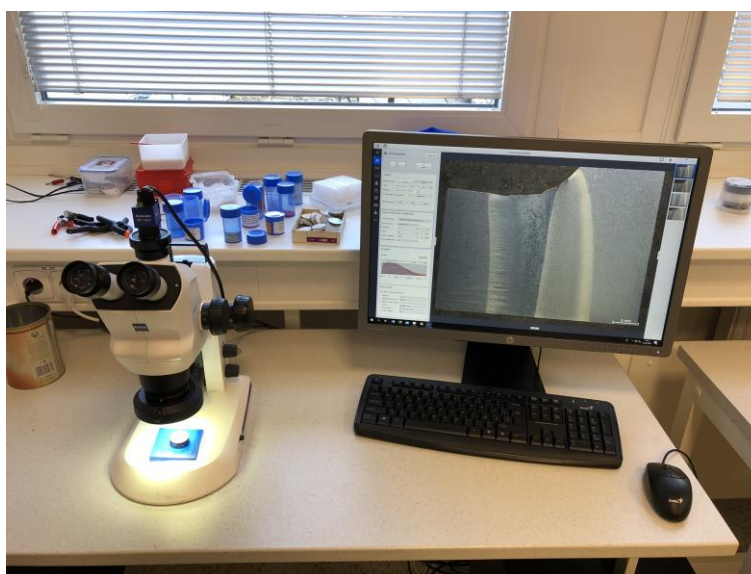
Metalografické zkoušky se řadí mezi destruktivní metody zkoušení materiálů a jejich výsledkem je dokumentace makrostruktury a mikrostruktury materiálů. K pozorování je využíváno optického (světelného), nebo elektronového mikroskopu.

4.1.1 Makrostruktura [29], [30]

Hodnocení makrostruktury často předchází hodnocení mikrostruktury, nežádka je rozhodující při potvrzení nebo vyvrácení kvality. Zkouška se provádí na vybroušeném a naleptaném povrchu pouhým okem, lupou, nebo světleným mikroskopem. Vzorek by při posuzování makrostruktury měl obsahovat všechny důležité oblasti, v případě svaru tedy oba základní materiály, tepelně ovlivněné oblasti a svarový kov. U makrostruktury se posuzuje několik charakteristik, a to:

- tvar svaru,
- způsob kladení jednotlivých vrstev,
- provaření kořene svaru,
- výskyt defektů (póry, vměstky, studené spoje, trhliny atd.),
- šířka tepelně ovlivněné oblasti

K tomu byl využit stereomikroskop Carl Zeiss Stemi 508, který je na obr 20.

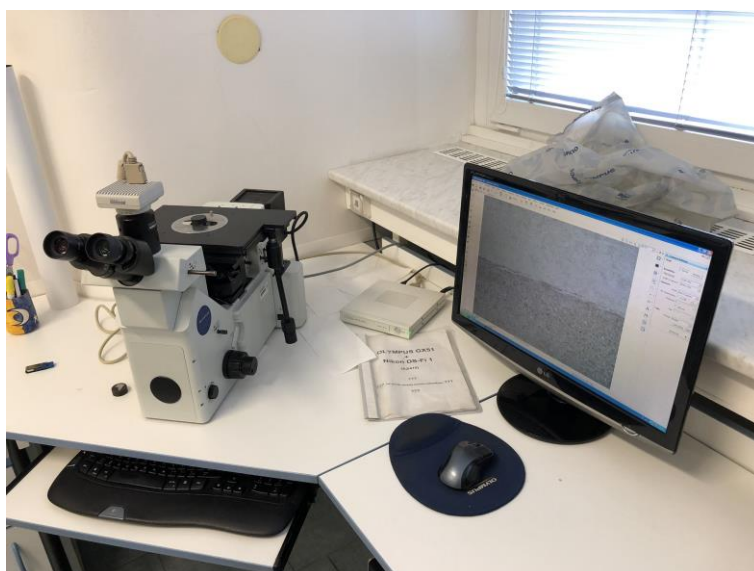


Obr. 20 Stereomikroskop Carl Zeiss Stemi 508

4.1.2 Mikrostruktura [29]

Cílem pozorování mikrostruktury je posouzení vzhledu a získání bližších informací o mikrostruktuře ve všech oblastech svaru a jeho okolí (svar, tepelně ovlivněná oblast, základní materiál). Zkoumá se množství a rozložení základních strukturních fází (ferit, austenit, cementit, martenzit) a složek (perlit, bainit), dále rozložení vměstků, nečelistvosti a vady.

K tomu byl využit světelný mikroskop Olympus GX51 a jako fotoaparát k pořízení snímků Nikon DS-Fi 1. Celá soustava je na obr. 21. Rozsah zvětšení mikroskopu byl 50x, 100x, 200x, 500x, 1000x.



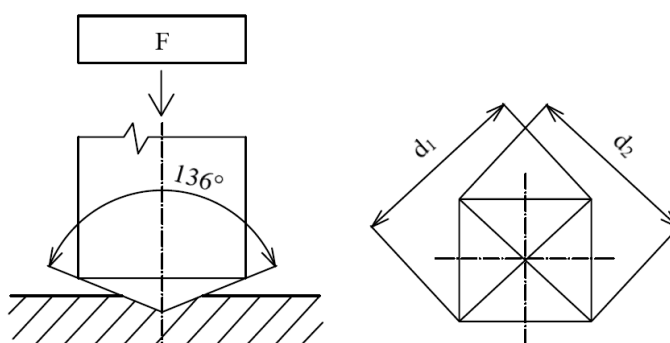
Obr. 21 Světelný mikroskop Olympus GX51

4.2 Zkouška mikrotvrlosti dle Vickerse [29], [31], [32]

Tvrдость by se dala definovat jako schopnost materiálu odolávat vniknutí cizího tělesa a její mírou je konkrétní velikost plastické deformace na měřeném tělese.

Nejpoužívanější metody měření tvrdosti kovových materiálů jsou vnikací (indentační) metody, které se řadí mezi statické zkoušky. V principu jde o vtlačování tělíska (indentoru) o určité geometrii, danou silou a po určitý časový interval do povrchu zkoušeného tělesa. Po uvolnění se měří rozměry vtisku a je dopočítána hodnota tvrdosti dle příslušné metody. Mezi tyto metody může být řazeno měření podle Rockwella, Brinella, Vickerse a Knoppa.

Indentor u Vickersovy zkoušky tvoří diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136° , viz obr. 22. Ten je vtlačován do zkoušeného tělesa a po odlehčení se měří úhlopříčka na vtisku.



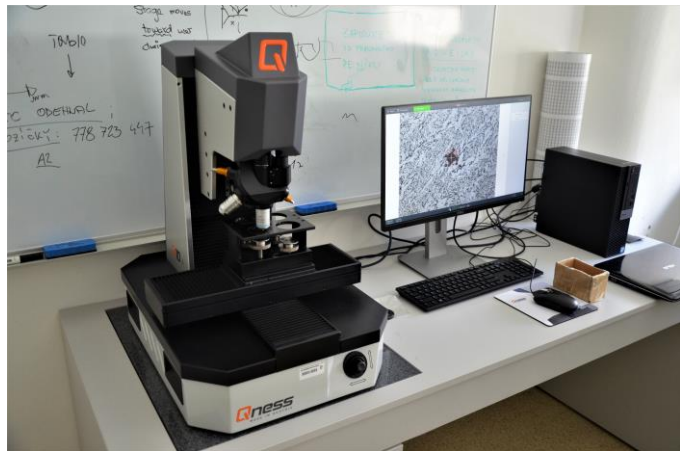
Obr. 22 Schéma indentoru používaného pro měření tvrdosti dle Vickerse [32]

Tvrдость je následně vyhodnocena ručně nebo automaticky. Při měření mikrotvrlosti je indentor do povrchu vtlačován silami od 0,09807 N (1g) až po 9,807 N (1000g). Aby bylo měření přesné musí dojít k přesnému změření úhlopříček vtisku, dalším požadavkem je velice čistý povrch měřeného

materiálu, který by měl být bez okují, mastnot a dalších nečistot dále by neměl být nijak tepelně, ani deformačně ovlivněn. Povrch se běžně předpřipravuje broušením a následným leštěním. Vtisky jsou poměrně malé, a proto jsou vhodné pro měření v některých speciálních případech, kterými jsou:

- malé a tenké součásti,
- malé oblasti na vzorcích,
- měření mikrotvrdosti strukturních složek a fází,
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování,
- mikrotvrdost povlaků,
- svarové spoje,
- měření křehkých materiálů

U svarových spojů se zkoušky provádějí na příčných řezech metodou podle Vickerse se zatížením v rozsahu HV0,1 až HV5. Pro jednotlivá zatížení jsou doporučené kroky mezi vpichy, aby bylo možno naměřit rozdíly v tvrdosti mezi jednotlivými oblastmi ve svaru a jeho okolí.

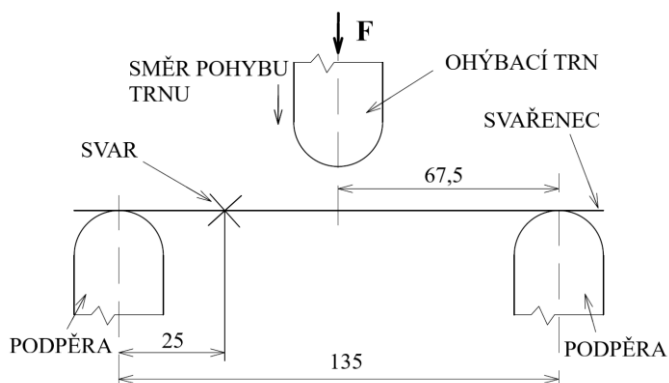


Obr. 23 Soustava zařízení pro měření mikrotvrdosti

Pro měření mikrotvrdosti byl využit plně automatický tvrdoměr a mikrotvrdoměr Qness Q10 A, který je na obr. 23.

4.3 Zkouška rozlomením

Další částí experimentálního úseku je zkouška rozlomením, která je realizována prostřednictvím třibodového ohybu. Cílem zkoušky bylo zjistit, při jak velkém zatížení dojde k rozlomení vzorku v místě svaru mezi příčnickem a kostičkou. Aby bylo možné zkoušku uskutečnit, bylo potřeba svařenec k tomuto účelu speciálně upravit (vzorek byl upraven již ve firmě). Na pozici naproti kostičce byly k příčnicku přivařeny 2 destičky, tak, aby byly připevněny pevněji než samotná kostička, viz obr. 25. Tím bylo zajištěno, že k rozlomení dojde v požadovaném místě. K provedení zkoušky byl využit hydraulický zkušební stroj ZD40. Jeho popis a parametry jsou uvedeny v příloze 1. Schéma umístění svařence v lise je na obr. 24. Vzdálenost podpěr byla 135 mm a svar byl od podpěry vzdálen 25 mm. Ohýbací trn byl zapozicován do poloviny vzdálenosti mezi podpěrami.



Obr. 24 Schéma uspořádání při zkoušce rozlomením



Obr. 25 Úprava svařence pro zkoušku rozlomením

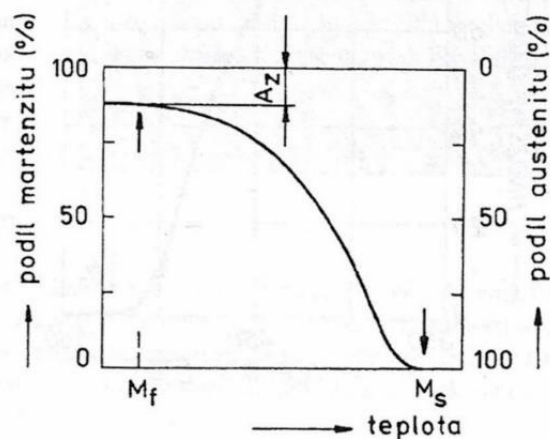
4.4 Zkouška množství zbytkového austenitu [33], [34], [36]

Zbytkový austenit se vyskytuje ve struktuře zakalené oceli. Je to netransformovaná část austenitu, který zůstal po martenzitické transformaci, viz obr. 27. Množství zbytkového austenitu roste s klesající velikostí austenitických zrn a s rostoucím obsahem uhlíku a legur, které ovlivňují křivky M_s a M_f , viz obr. 28. Největšího podílu se dosáhne při kritické rychlosti kalení, při jejímž dalším zvyšování podíl klesá. Obecně je snaha se přítomnosti zbytkového austenitu spíše vyhnout, protože jeho vlivem dochází ke snižování tvrdosti zakalené oceli a může docházet k jeho samovolné přeměně na feriticko – karbidickou směs, která vede ke změně vlastností, rozměrů, lokálnímu nárůstu vnitřního pnutí a případnému vzniku trhlin. Naopak v některých případech může příznivě ovlivňovat tvárnost a houževnatost. Zbytkový austenit se odstraňuje popouštěním.

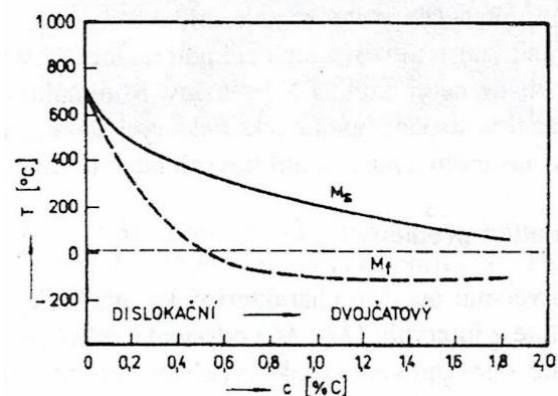
Metoda, pomocí které se měřilo množství zbytkového austenitu na vzorcích se nazývá rentgenová difraktometrie. V principu se jedná o ozařování vzorku rentgenovým zářením s následným rozptýlením paprsků a jejich interferenci. Rentgenové záření rozkmitá elektronové obaly atomů a ty se stanou dalším zdrojem rentgenového sekundárního záření. Při splnění tzv. Braggovy difrakční podmínky dojde k zesílení intenzity v některých směrech a tím vzniká difrakční obrazec. Následně dochází k vyhodnocení s využitím Millerových indexů.



Obr. 26 Rentgenový difraktometr Philips X'Pert



Obr. 27 Schéma martenzitické křivky oceli [33]



Obr. 28 Vliv obsahu uhlíku v austenitu na teploty M_s a M_f uhlíkových ocelí [33]

4.5 Měření chemického složení [39], [40]

Identifikace prvků a jejich množství v materiálu je využívána například v případě, kdy je potřeba ověření, zda dodaný materiál splňuje chemické složení stanovené normou, nebo koresponduje s dodaným atestem. Pro tento účel existují rentgenové spektrometry využívající takzvanou Energiově Disperzní Rentgenovou Fluorescenci (ED-XRF). Princip měření spočívá v ozařování materiálu rentgenovým zářením, kdy vysoce energetický primární foton s dostatečnou energií vyrazí elektron z nejnižších orbitů atomu měřeného materiálu. Elektrony v těchto orbitech mají menší energii než elektrony ve vnějších orbitech. Po vyrazení elektronu se do volného místa přesune elektron z vnějšího orbitu a emituje při tom energii formou fotonu sekundárního rentgenového záření. Tento jev se nazývá fluorescence. Velikost emitované energie je tedy rozdílem energií mezi počátečním a konečným orbitem. Každý prvek má tento rozdíl specifický a lze jej proto rozpoznat.

Pro měření chemického složení byl využit ruční ED-XRF spektrometr VANTA, pomocí kterého lze analyzovat prvky v rozsahu Mg – U.

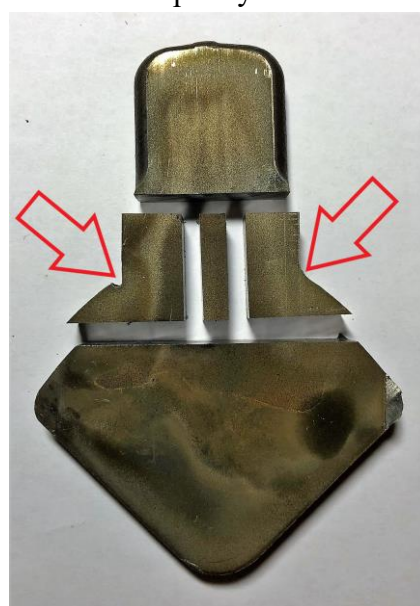
4.6 Příprava vzorků [30]

Aby mohl být vzorek zkoumán, je potřeba jej řádně připravit. Prvním úkonem je vybrat místo pro odběr budoucího vzorku, který by měl být reprezentativní a charakterizovat materiál a použitou technologii, zároveň by měl být co nejméně tepelně a deformačně ovlivněn. Svařenec příčnicku a kostičky byl firmou dodán v již rozřezaném stavu na drátové elektroerozivní řezačce v místě svaru na plátky číslo 2 a 3, viz obr. 29. Řez byl proveden kolmo na příčnick a svar, příčně na směr lineárního pohybu při svařování. Pro další zkoumání byly vybrány plátky 2 a 3. Jak je vidět na obrázku 29, výronek v oblasti svaru byl odstraněn, nejspíše broušením, tím zde na jedné straně dokonce vznikl vrub a zároveň výronek nelze nijak hodnotit.



Obr. 29 Svařenec rozřezaný na plátky

Plátek 2 byl dále rozřezán, viz obr. 30, protože velikost tablet pro zalisování vzorků je omezená. K tomu byla použita metalografická pila Struers Labotom – 5 (na obr. 31) a řezný kotouč 50A25 také od značky Struers, viz obr. 32, který je vhodný pro dělení tvrdých materiálů. Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění, byl proces aktivně chlazen kapalinou. Ke zkoumání byly vybrány části vyznačené červenými šipkami na obr. 30. Ty obsahují všechny důležité oblasti (základní materiály, tepelně ovlivněné oblasti, svar i část okrajů obou svařovaných součástí).

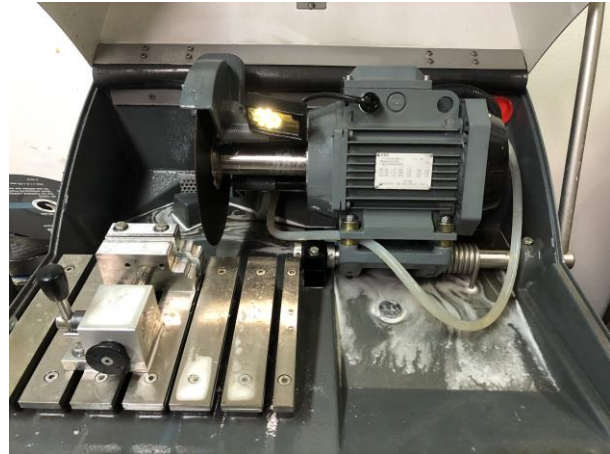


Obr. 30 Rozřezaný plátek 2

Jako další fáze přípravy následovala preparace (uchycení) vzorků. Velikost obou vzorků byla ještě jednou upravena na metalografické pile Labotom – 3 od firmy Struers za neustálého chlazení kapalinou. Vzorky byly důkladně opláchnuty vodou a lihem a položeny na separátorem potřený vyhřívaný válec tlakového lisu ECOPRESS 100 od firmy Metkon, viz obr. 33, a zasypaný vhodným množstvím pryskyřice. Následně byl lis zavřen a spuštěn několikaminutový program při kterém za vysokého

tlaku a teploty došlo k zalisování vzorků do tablet. Po vyjmutí z lisu byly oba vzorky pro lepší identifikaci označeny pomocí vibračního rytí a byly jim sraženy hrany, aby při broušení a leštění nedocházelo k poškození brusných papírů a leštících pláten.

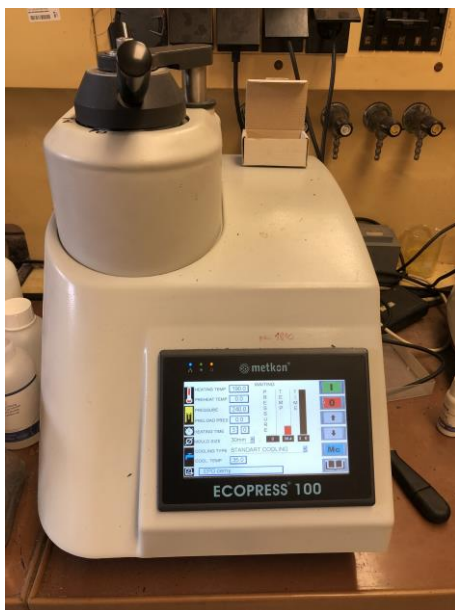
Oba vzorky byly nejprve broušeny. K tomu byla využita metalografická bruska od firmy Struers, která je na obr. 34. Vzorky byly upnuty do unašeče a broušeny podle potřeby v několikaminutových intervalech, za stálého přísunu vody. Papíry byly měněny postupně od nejmenší zrnitosti po největší. Byly využívány papíry o zrnitostech 220, 800, 1200, 2400 a 4000. Mezi každou výměnou papíru byly vzorky důkladně umyty vodou, aby byly očištěny od zbytků brusných zrn. Po broušení následovalo leštění na stejném zařízení, jen místo brusných papírů bylo využito leštících pláten a místo vody se dávkovala leštící pasta s obsahem částecek diamantu o zrnech velikosti 3 μm a následně 1 μm . Doby leštění byly opět v několikaminutových intervalech podle potřeby. Stejně jako při broušení bylo mezi změnou leštící pasty potřeba vzorky důkladně opláchnout vodou, následně lihem a usušit fénem. Proces leštění skončil, jakmile na povrchu nebyly vidět žádné rýhy. Pro zvýraznění struktury byly oba vzorky následně leptány, k tomu byl využit Nital (2 % roztok kyseliny dusičné v ethanolu). Doba máčení v roztoku byla volena podle potřeby v řádu sekund.



Obr. 31 Metalografická pila Labotom-3



Obr. 32 Řezný kotouč 50A25



Obr. 33 Tlakový lis ECOPRESS 100



Obr. 34 Metalografická bruska

4.7 Hodnocení makrostruktury [35]

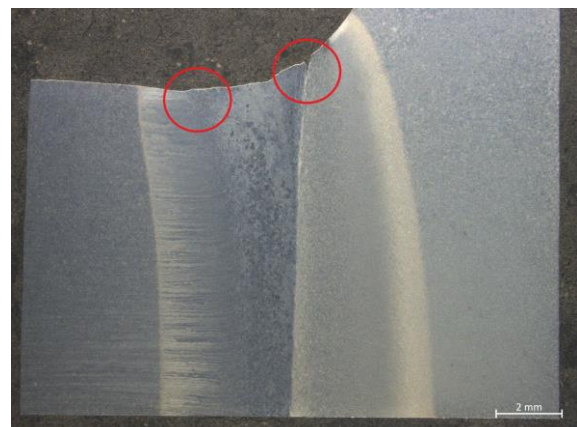
Již po rozřezání vzorků na plátky bylo vidět, že došlo k provaření v celé ploše. Oba vzorky byly po naleptání podrobeny zkoušce makrostruktury, ta byla pozorována a následně focena. Na obr. 35 a 36 jsou přehledy makrostruktury obou vzorků při 6 ti násobném zvětšení.

Na obr. 35 vzorku 1 je na pravé straně základní materiál kostičky, na levé základní materiál příčníku. V centrální oblasti je vidět samotný svar. Dále se směrem od svaru k základnímu materiálu v obou směrech nacházejí tepelně-mechanicky ovlivněná oblast a tepelně ovlivněná oblast, jejich šířky byly měřeny od svaru. Na kostičce je největší šířka tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti 3,6 mm a tepelně ovlivněné oblasti 4,8 mm. Největší šířka se nachází na vnějším okraji svařence a směrem ke středu se postupně snižuje. Tento tvar ovlivněných oblastí je následek kovací fáze. Po zastavený pohybu jsou svařence k sobě přitlačeny kovací tlakem, v jehož důsledku dochází k vytlačování zplastizovaného materiálu směrem od středu ke krajům kostičky do výronku. Na příčníku je největší šířka tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti přibližně 3,2 mm a tepelně ovlivněné oblasti přibližně 4,4 mm. Jak je vidět, tvar ovlivněných oblastí je jiný než na kostičce. Jejich šířka je nejmenší na kraji a směrem ke středu se postupně rozšiřuje. Dle tvaru lze předpokládat, že šířka oblastí se směrem ke středu dále rozšiřuje, vzorek ovšem střed svařence neobsahuje z důvodu omezené velikosti zalisovací tablety. Tento tvar vznikl nejspíše z důsledku toho, že vlivem tření dochází ke vzniku nejvyšší teploty uprostřed svařence a v průběhu kovací fáze k vytlačování zplastizovaného materiálu přes vnější hranu kostičky ven do výronku. Na vzorku 1 je na přechodu mezi ovlivněnými oblastmi kostičky ve vzdálenosti 3,6 mm od svaru vidět trhlina vyznačená červeně na obr. 35. Na obr. 37 je dále vyfotografována při větším zvětšení.

Na obr. 36 vzorku 2 se základní materiál kostičky nachází na levé straně a příčníku na pravé straně. Tvar šířek všech oblastí je stejný jako na vzorku 1. Největší šířka tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti na kostičce je 3,6 mm a tepelně ovlivněné oblasti 5,2 mm. Na příčníku je největší šířka tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti přibližně 3,2 mm a tepelně ovlivněné oblasti 4,4 mm. Šířky byly měřeny od svaru. Stejně jako na vzorku 1 se na vnější části svařence na přechodu mezi tepelně-mechanicky a tepelně ovlivněnou oblastí nachází trhlina. Další se nachází na vnějším okraji přímo v oblasti svarového spoje, tato trhlina je ve větším zvětšení vyfotografována na obr. 38.



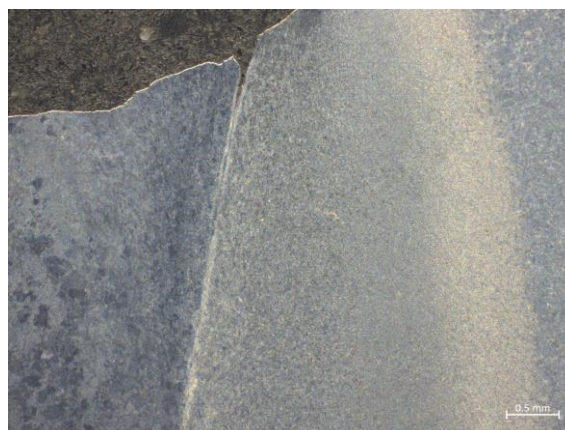
Obr. 35 Makrostruktura vzorku 1
(zvětšeno 6x)



Obr. 36 Makrostruktura vzorku 2
(zvětšeno 6x)



Obr. 37 Detail trhliny vzorku 1
(zvětšeno 20x)



Obr. 38 Detail trhliny vzorku 2
(zvětšeno 20x)

4.8 Hodnocení mikrostruktury

Oba vzorky prošly hodnocením mikrostruktury. Byly pozorovány pod různými zvětšeními a následně fotografovány. Pozornost byla věnována především strukturám v jednotlivých oblastech a vadám, které by mohly mít za následek porušení svařence při namáhání. Trhliny byly pro lepší vizualizaci fotografovány při větším zvětšení. Struktury v jednotlivých oblastech při 1000x zvětšení jsou souhrnně znázorněny v příloze 3. Trhliny jsou souhrnně zobrazeny v příloze 4.

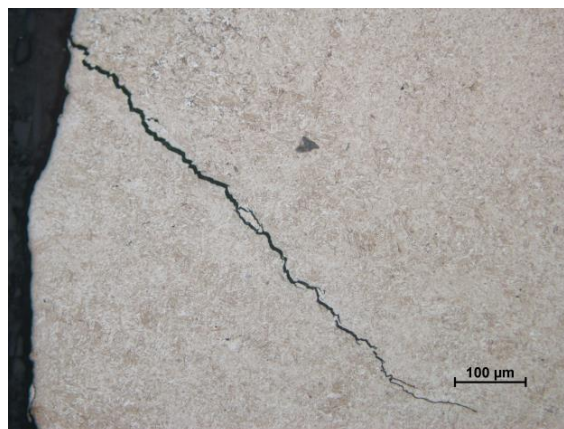
Z provedených pozorování mikrostruktury bylo usouzeno, že základní materiály a tepelně ovlivněné oblasti příčnicku i kostičky jsou tvořeny bainitickou strukturou. V oblasti svaru a přilehlých tepelně-mechanicky ovlivněných oblastech se vyskytuje martenzitická struktura.

Na vzorku 1 byla při hodnocení makrostruktury nalezena 1 trhlina v tepelně ovlivněné oblasti kostičky. Ta je vyobrazena na obr. 39. Její délka je přibližně 2,7 mm.

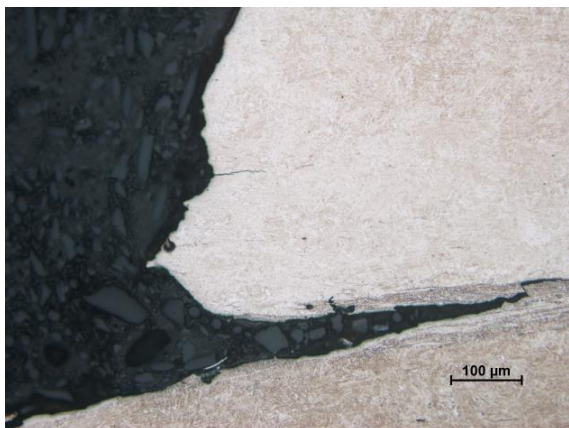
Na vzorku 2 byly při vyhodnocování snímků z makrostruktury objeveny 2 trhliny. Na obr. 41 je trhlina v místě svarového spoje. Nad ní ve vzdálenosti přibližně 0,185 μm byla díky většímu zvětšení objevena další, mnohem menší trhlina dlouhá přibližně 75 μm , viz obr. 41 a 42. Na obr. 40 je zobrazena trhlina z tepelně ovlivněné oblasti kostičky délky přibližně 0,8 mm.



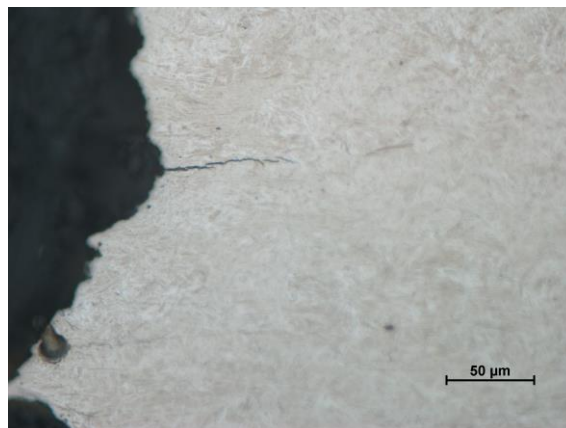
Obr. 39 Trhlina na vzorku 1 na přechodu
mezi TMOO a TOO kostičky (zvětšeno
50x)



Obr. 40 Trhlina na vzorku 2 na přechodu
mezi TMOO a TOO kostičky (zvětšeno
200x)



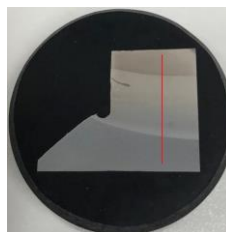
Obr. 41 Trhlina v místě svaru na vzorku 2 (zvětšeno 200x)



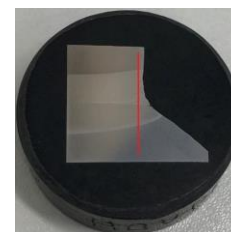
Obr. 42 Detail trhliny na vzorku 2 (zvětšeno 500x)

4.9 Provedení a vyhodnocení mikrotvrdości dle Vickerse [24]

Mikrotvrdość byla měřena na obou vzorcích řadou vtisků, které procházely všemi oblastmi od základního materiálu kostičky po základní materiál příčnicku, aby bylo možné pozorovat změny tvrdosti v jednotlivých oblastech. Tvrdość se měřila dle Vickerse zatížením 100 g (HV0,1) v kroku 0,2 mm. V obou případech je v řadě 73 vtisků v délce přibližně 14,6 mm. Na obou vzorcích se měřilo od základního materiálu kostičky přes všechny oblasti až po základní materiál příčnicku. Na vzorku 1 proběhlo měření přibližně 8 mm od vnějšího kraje, na vzorku 2 asi 1 mm od vnějšího kraje. Oblasti měření jsou červeně vyznačeny na obr. 43 a 44. Na obr. 45 a 46 jsou do grafů vyneseny naměřené hodnoty tvrdosti v závislosti na vzdálenosti měření včetně přibližného vyznačení polohy jednotlivých ovlivněných oblastí.

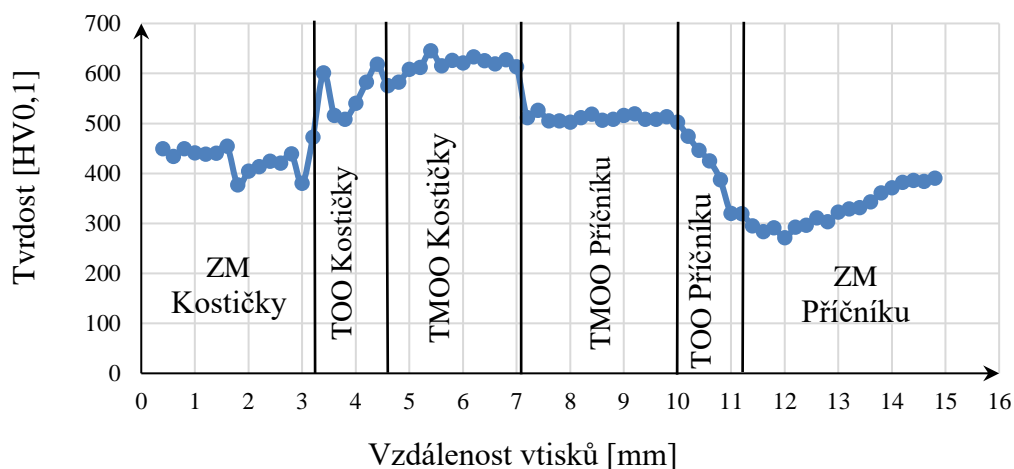


Obr. 43 Linie měření mikrotvrdości na vzorku 1



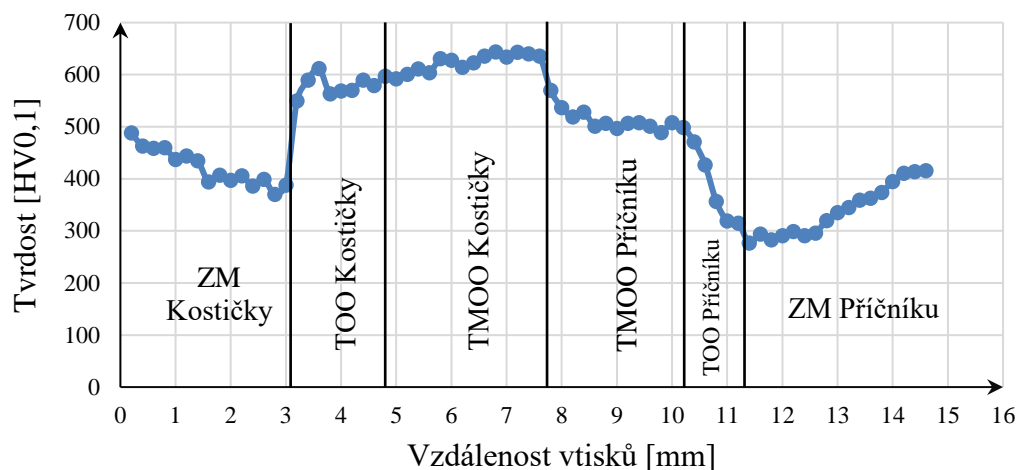
Obr. 44 Linie měření mikrotvrdości na vzorku 2

Mikrotvrdość na vzorku 1



Obr. 45 Graf mikrotvrdości na vzorku 1

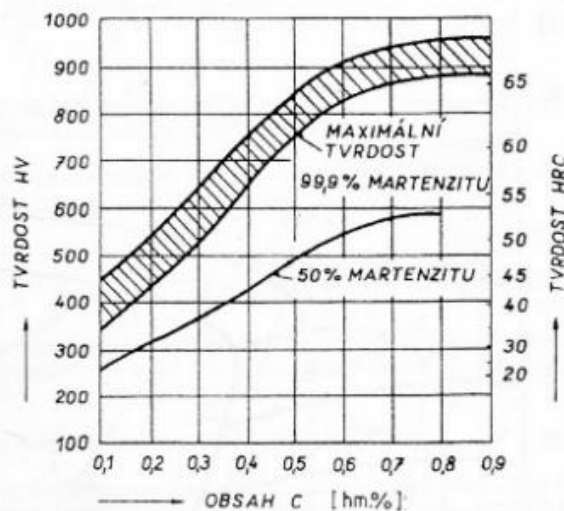
Mikrotvrдость na vzorku 2



Obr. 46 Graf mikrotvrđosti na vzorku 2

Pomocí znalosti tvrdosti a chemickému složení oceli, a hlavně znalosti množství obsahu uhlíku je možné pomocí diagramu na obr. 47 a grafů průběhů mikrotvrđosti napříč svarem odhadnout množství martenzitické struktury v jednotlivých oblastech. Problematická je především struktura, ve které se nachází více než 50 % martenzitu.

Materiál kostičky obsahuje přibližně 0,50 hm. % uhlíku. Dle diagramu struktura obsahuje 50 % martenzitu přibližně při tvrdosti 500 HV. Tvrđost základního materiálu se pohybuje v intervalu od 400 – 500 HV0,1, obsahuje tedy 40 - 50 % martenzitu. Vznik takové struktury je předpokládán po tepelném zpracování před samotným procesem svařování. Mikrotvrđost v tepelně ovlivněné oblasti vzrostla, a to až na hodnoty 550 – 600 HV0,1. Tomu přibližně odpovídá 60 - 70 % podíl martenzitu. V tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti hodnoty mikrotvrđosti dále směrem ke svaru mírně rostou a dosahují hodnoty 640 HV0,1, taková mikrotvrđost odpovídá přibližně 80 % obsahu martenzitu.



Obr. 47 Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobená přítomností martenzitu [24]

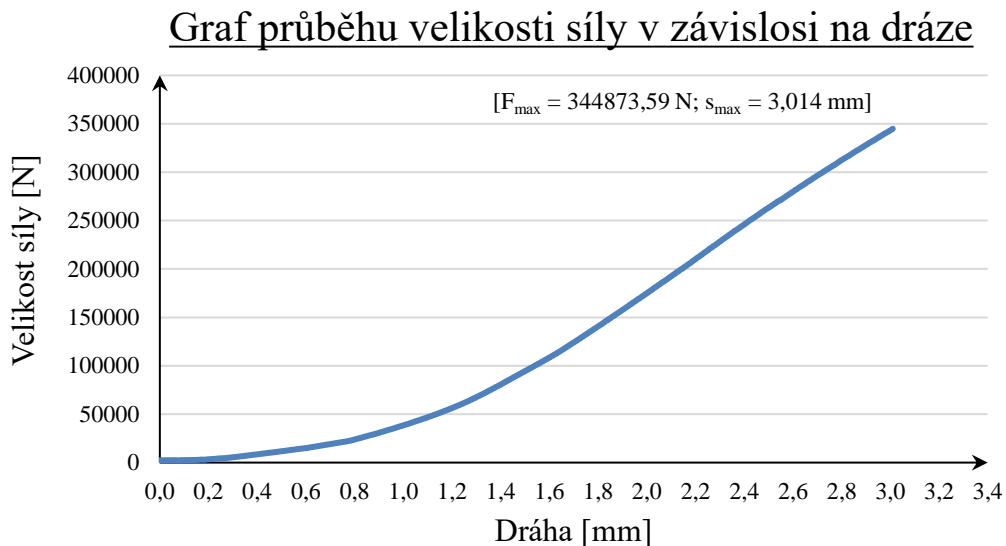
Materiál přičníku obsahuje dle dodaného atestu 0,28 hm. % uhlíku. Dle diagramu tedy struktura obsahuje 50 % martenzitu při tvrdosti 350 HV. Mikrotvrđost základního materiálu se pohybuje v intervalu od 300 HV0,1 do 400 HV0,1. Struktura tedy obsahuje přibližně 40 až 60 % martenzitu. V tepelně ovlivněné oblasti mikrotvrđost rapidně roste od hodnoty 300 HV0,1 až po 500 HV0,1. Pro takové hodnoty vychází v diagramu, že struktura se poměrně rychle změní z 40 % martenzitu na přibližně 95 % martenzitu. V tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti si materiál drží stejnou tvrdost a to 500 HV0,1. V místě svaru a jeho těsné blízkosti ještě hodnoty mikrotvrđosti mírně rostou na hodnotu až 550 HV0,1. V tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti se tedy dá předpokládat až maximální podíl martenzitu.

4.10 Provedení a vyhodnocení zkoušky rozlomením

Vzorek byl založen do zkušebního stroje, viz obr. 48. Po spuštění sjížděl trn rychlostí 9,99 mm/min. Na obr. 49 je v grafu uvedena závislost síly vyvinuté lisem na dráze pohybu. K rozlomení v předpokládaném místě došlo při síle 344873,59 N, což odpovídá zatížení přibližně 34,5 tuny. Lomu nepředcházela významnější plastická deformace, a po dosažení maximální síly došlo k rychlému křehkému rozlomení. Po bližším prohlédnutí místa lomu na příčniku a kostičce, viz obr. 50 a 51 je patrné, že k lomu došlo v tepelně ovlivněné oblasti příčniku. Pravděpodobně v místě s tvrdostí 500 HV0,1. Tato oblast je specifická tím, že dle diagramu na obr. 47 je zde martenzitická struktura zastoupena přibližně v 95 %.



Obr. 48 Založení vzorku ve stroji



Obr. 49 Graf průběhu velikosti síly v závislosti na dráze



Obr. 50 Kostička po rozlomení



Obr. 51 Příčník po rozlomení

4.11 Vyhodnocení množství zbytkového austenitu [37]

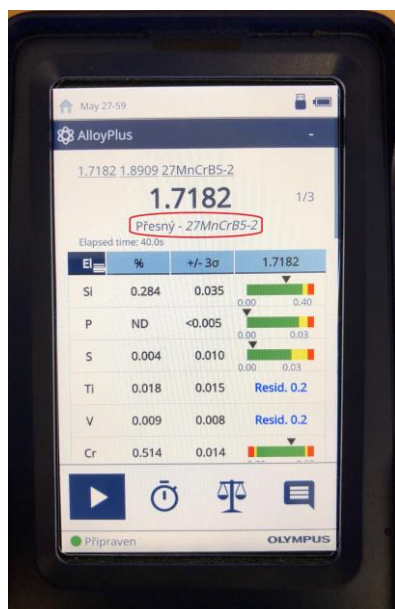
Úplné vyhodnocení vzorku nebylo možné uskutečnit. V důsledku technologie svařování došlo k výraznému zjemnění struktury a takzvané výrazné přednosti orientace, tedy že zrna nemají náhodný tvar, ale jsou deformována stejným směrem. To způsobuje poměrně velký problém pro kvantitativní, a v tomto případě i kvalitativní analýzu. Tento problém by šel obejít například takzvaným napráškovaním vzorku, kdy se napiluje materiál ze zkoumaných míst. Ten se pak umístí na destičku a jednotlivá zrna se nahodile rozmístí, čímž dojde k odstranění přednosti orientace, nebo využití EDX analýzy. Ze získaných dat ovšem šel vyvodit předpoklad, že materiál obsahoval pod 2 % zbytkového austenitu.

4.12 Provedení a vyhodnocení měření chemického složení ocelí

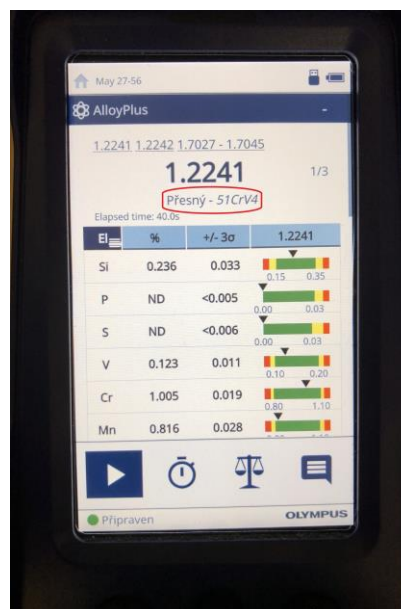
Jak již bylo uvedeno, pro určení chemického složení byl využit ED-XRF spektrometr VANTA. Měřenou plochu plátku 3 bylo nutné před samotným měřením očistit od povrchových nečistot a oxidů. K tomu bylo využito speciálního lamelového brusného kotouče a ruční úhlové brusky. Na plátku proběhlo celkem 6 měření, vždy po třech měřeních v obou místech neovlivněného základního materiálu svařence. Příklad uspořádání při měření je na obr. 52. Délka jednoho měření byla 40 sekund. Jak je vidět na obr. 53 a 54 oba materiály byly analyzovány a přístrojem nalezeny v databázi. V tabulkách v přílohách 7 a 8 jsou kompletně uvedeny prvky nalezené v materiálech a jejich naměřený podíl v hm. %.



Obr. 52 ED-XRF spektrometr VANTA při měření



Obr. 53 Display spektrometru po zanalyzování oceli 27MnCrB5-2



Obr. 54 Display spektrometru po zanalyzování oceli 51CrV4

Tab. 2 Chemické složení oceli 15 260. [26]

| Značka prvku | C | Si | Mn | Cr | V |
|---------------|-------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| Obsah [hm. %] | 0,47 – 0,55 | max 0,40 | 0,70 – 1,00 | 0,90 – 1,20 | 0,10 – 0,20 |

Tab. 5 Naměřené chemické složení oceli 51CrV4.

| Kostička – ocel 51CrV4 | | | | | | |
|------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Značka prvku | Měření 1 | | Měření 2 | | Měření 3 | |
| | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] |
| C | | | | | | |
| Si | 0,2477 | 0,0100 | 0,2081 | 0,0105 | 0,2363 | 0,0109 |
| Mn | 0,8337 | 0,0093 | 0,8193 | 0,0092 | 0,8156 | 0,0092 |
| Cr | 0,9986 | 0,0063 | 1,0036 | 0,0063 | 1,0047 | 0,0063 |
| V | 0,1264 | 0,0037 | 0,1252 | 0,0037 | 0,1225 | 0,0037 |

V tabulce 2 je uvedeno koncentrační rozpětí hlavních prvků v oceli 15 260. V tabulce 5 jsou pro porovnání uvedeny naměřené hodnoty koncentrací, a to včetně chyby měření 1 σ . Pro přehlednost jsou uvedeny pouze prvky uvedené v tabulce 2. Jak je vidět, všechny koncentrace naměřením prvků leží v příslušných intervalech.

Tab. 4. Chemické složení oceli 27MnCrB5-2.

| Značka prvku | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V | Cu | Al | B | Ti |
|--------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|
| Obsah v % | 0,28 | 0,25 | 1,23 | 0,013 | 0,009 | 0,47 | 0,08 | 0,02 | 0,010 | 0,15 | 0,022 | 0,0045 | 0,030 |

Tab. 6 Naměřené chemické složení oceli 27MnCrB5-2.

| Příčník – ocel 27MnCrB5 -2 | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Značka prvku | Měření 1 | | Měření 2 | | Měření 3 | |
| | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] |
| C | | | | | | |
| Si | 0,2809 | 0,0115 | 0,2860 | 0,0116 | 0,2836 | 0,0116 |
| Mn | 1,2863 | 0,0103 | 1,2518 | 0,0102 | 1,2674 | 0,0103 |
| P | Nedetkováno | 0,0045 | Nedetkováno | 0,0047 | Nedetkováno | 0,0046 |
| S | Nedetkováno | 0,0071 | 0,0037 | 0,0035 | 0,0039 | 0,0035 |
| Cr | 0,5147 | 0,0047 | 0,5092 | 0,0047 | 0,5142 | 0,0047 |
| Ni | 0,1477 | 0,0046 | 0,1504 | 0,0047 | 0,1562 | 0,0047 |
| Mo | 0,0382 | 0,0008 | 0,0367 | 0,0007 | 0,0367 | 0,0008 |

| | | | | | | |
|----|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| V | 0,0097 | 0,0026 | 0,0093 | 0,0026 | 0,0088 | 0,0025 |
| Cu | 0,1656 | 0,0047 | 0,1815 | 0,0048 | 0,1741 | 0,0048 |
| Al | Nedetekováno | 0,0376 | Nedetekováno | 0,0373 | Nedetekováno | 0,0375 |
| B | | | | | | |
| Ti | 0,0268 | 0,0052 | 0,0248 | 0,0052 | 0,0179 | 0,0051 |

V tabulce 6 jsou uvedeny naměřené hodnoty prvků vyskytujících se v tabulce 4. Jak je vidět při porovnání hodnot v obou tabulkách, naměřené hodnoty a hodnoty uvedené v atestu se mírně liší. V případě Si, Mn, Cr, Ni, Mo a Cu jsou naměřené hodnoty větší v jednotkách setin hm. %, než hodnoty uvedené v atestu. V případě S, V a Ti jsou naměřené hodnoty v řádu jednotek tisícín menší než hodnoty uvedené v atestu. Prvky uhlík a bór nebyly naměřeny, protože neleží v měřitelném rozsahu zařízení. U prvků fosforu a hliníku nebyla detekována jejich koncentrace. Tyto čtyři prvky tedy nebyly nijak porovnávány.

5. ZÁVĚR

Po prohlédnutí plátku a snímků z makrostruktury bylo zjevné, že došlo k úplnému provaření v celé šířce kostičky. Po zkoumání snímků z makrostruktury bylo objeveno několik trhlin na vnější straně svařence. Ty se objevily přibližně v přechodu mezi tepelně-mechanicky ovlivněnou oblastí a tepelně ovlivněnou oblastí a dále v místě svarového spoje v přechodu mezi materiály. Trhliny by mohly mít za následek utržení kostičky při provozu.

Na snímcích z mikrostruktury bylo shledáno velké množství martenzitické struktury převážně v obou tepelně-mechanicky ovlivněných oblastech. V místech tepelně ovlivněných a základních materiálech byla vyhodnocena bainitická struktura.

Po vyhodnocení mikrotvrdomosti napříč svarem bylo potvrzeno velké množství martenzitické struktury především v tepelně-mechanicky ovlivněných oblastech, kde se vyskytovala i v 95 % podílu struktury.

Při zkoušce rozlomením došlo k rozlomení svařence při zatěžování třibodovým ohybem v daném uspořádání při zatížení přibližně 34,5 tuny. K lomu došlo dle vizuálního hodnocení přibližně v místech tepelně-mechanicky ovlivněné oblasti příčnicku. Rozlomené součásti nebyly dále nijak metalograficky zkoumány, nelze tedy vyloučit ani potvrdit, zda se na kostičce také vyskytovaly trhliny, a přesto došlo k rozlomení v ovlivněné oblasti příčnicku, nebo na kostičce žádné trhliny nebyly. Provedená zkouška se řadí mezi statické zkoušky, nedá se tedy hodnotit kdy a v jakém místě by došlo k rozlomení při dynamickém zatěžování. Nejlepší by nejspíše bylo testování v reálném provozu.

Spolehlivé vyhodnocení množství zbytkového austenitu nebylo možné uskutečnit z důvodu výrazné zjemnění struktury a významné přednosti orientace. Z naměřených hodnot byl vyvozen předpoklad, že množství zbytkového austenitu by se mělo pohybovat pod 2 %.

Při měření chemického složení ocelí došlo ke správné identifikaci a nalezení obou materiálů v databázi měřícího zařízení. Po porovnání naměřené hodnoty korespondovaly s hodnotami předpokládanými.

Martenzitická struktura ve svaru je nežádoucí. K jejímu odstranění by mohlo být využito předeřevu a dohřevu svařovaných součástí. Jako další možnost odstranění by mohlo být využití technologie svařování třením za snížené teploty. V tomto případě by nejspíše bylo nutné vzhledem k velkému potřebnému přítlačnému tlaku pozměnění geometrie kostičky, konkrétně zmenšení kontaktní plochy mezi kostičkou a příčnickem dle možností svařovacího zařízení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [41]

1. ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Český normalizační institut, 2001. Třídící znak 05 0011.
2. Materiálové normy. *Ferona* [online]. Praha: Ferona, 2017 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>
3. PLÍVA, L. a J. KAHOUN. *Svařování třením v praxi*. 1 vyd. Praha: SNTL, 1973, 109 s.
4. AMBROŽ, O., B. KANDUS a J. KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
5. MAALEKIAN, M. Friction welding - critical assessment of literature. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. Taylor & Francis, 2007, **12**(8), 738-759 [cit. 2020-05-13]. DOI: 10.1179/174329307X249333. ISSN 1362-1718. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/174329307X249333>
6. MRŇA, L. Svařování třením. In: *Ústav strojírenské technologie VUT v Brně* [online]. Brno [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_trenim_mrna.pdf
7. HATTINGH, D.G., L. VON WIELLIGH, W. THOMAS a M.N. JAMES. Friction processing as an alternative joining technology for the nuclear industry. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* [online]. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2015, **115**(10), 903-912 [cit. 2020-05-29]. DOI: 10.17159/2411-9717/2015/v115n10a2. ISSN 2411-9717. Dostupné z: http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532015001000004&lng=en&tlng=en
8. VAIRIS, A. a M. FROST. High frequency linear friction welding of a titanium alloy. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 1998, **217**(1), 117-131 [cit. 2020-04-26]. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00145-8. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0043164898001458>
9. BHAMJI, I., M. PREUSS, P. L. THREADGILL a A. C. ADDISON. Solid state joining of metals by linear friction welding: a literature review. *Materials Science and Technology* [online]. Taylor & Francis, 2011, **27**(1), 2-12 [cit. 2020-04-26]. DOI: 10.1179/026708310X520510. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/026708310X520510>
10. BHAMJI, I., M. PREUSS, P. L. THREADGILL, R. J. MOAT, A. C. ADDISON a M. J. PEEL. Linear friction welding of AISI 316L stainless steel. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 2010, **528**(2), 680-690 [cit. 2020-04-11]. DOI: 10.1016/j.msea.2010.09.043. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0921509310010737>
11. TURNER, R, J.-C. GEBELIN, R.M. WARD a R.C. REED. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: Modelling and validation. *Acta Materialia* [online]. Elsevier, 2011, **59**(10), 3792-3803 [cit. 2020-04-11]. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.02.028. ISSN 1359-6454. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1359645411001224>
12. VAIRIS, A a M FROST. On the extrusion stage of linear friction welding of Ti 6Al 4V. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 1999, **271**(1-2), 477-484 [cit. 2020-04-26]. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00449-9. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0921509399004499>
13. KOVARÍK, R. a F. ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 185 s. ISBN 80-7082-697-5.

14. Linear friction welding. In: *TWI* [online]. Cambridge: TWI, 2017 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/linear-friction-welding-146>
15. Linear friction welding. *Manufacturing Technology Inc.* [online]. South Bend: Manufacturing Technology Inc, 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.mtiwelding.com/technologies/linear-friction-welding/>
16. KELLY, M. R., S. R. SCHMID, D. C. ADAMS, J. FLETCHER a R. HEARD. Experimental investigation of linear friction welding of AISI 1020 steel with pre-heating. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. Elsevier, 2019, **39**, 26-39 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.01.038. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1526612518304377>
17. KUBÍČEK, J. Technologie II část svařování- 2. In: *Ústav strojírenské technologie* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_II_kubicek.pdf
18. LI, W., A. VAIRIS, M. PREUSS a T. MA. Linear and rotary friction welding review. *International Materials Reviews* [online]. Taylor & Francis, 2016, **61**(2), 71-100 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.1080/09506608.2015.1109214. ISSN 0950-6608. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09506608.2015.1109214>
19. JEDRASIÁK, P., H.R. SHERCLIFF, A.R. MCANDREW a P.A. COLEGROVE. Thermal modelling of linear friction welding. *Materials & Design* [online]. Elsevier, 2018, **156**, 362-369 [cit. 2020-04-15]. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.06.043. ISSN 0264-1275. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0264127518305100#f0065>
20. SCHEIBNER, M. *Zkušební zpráva: Stummely svárené třením*. Kapfenberg, 2019. Interní materiál používaný ve spolupracující firmě.
21. ADAMS, D. Low Force, Low Upset. In: *Manufacturing Technology Inc.* [online]. South Bend: Manufacturing Technology Inc, 2019 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://blog.mtiwelding.com/low-force-low-upset>
22. SIMON, J. Low Force Friction Welding -- What is it? In: *Blog.mtiwelding.com* [online]. South Bend: Manufacturing Technology, 2018, 15. prosince 2017 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://blog.mtiwelding.com/low-force-friction-welding>
23. HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER. *Fyzika. Svazek 1*. 2. přepracované vydání. Brno: VUTIUM, 2013. ISBN 978-80-214-4123.
24. FOLDYNA, V., K. HENNHOFFER, I. HLA VATÝ, J. KOUKAL, F. KRISTOFORY, V. OCHODEK, V. PILOUS, J. PURMENSKÝ, D. SCHWARZ a J. VESELKO. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
25. SIGMUND, M. *9 Svařování elektrickým odporem a třením: prezentace do předmětu ETV*. Brno, 2019.
26. JECH, J. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. Praha: SNTL, 1969, 342 s. : il., tabulky, grafy. + příloha (5 l.).
27. HORČÍČKA, M. *Modernizace podkladů pro cvičení z předmětu Technologie výroby letadel* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66938>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav. Vedoucí práce Josef Klement.
28. MACHEK, V. a L. BENEŠ. Bórové oceli - oceli budoucnosti. In: *Engineering.sk* [online]. Žilina: MEDIA/ST, 2019, 4. února 2019 [cit. 2020-04-15].

- Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravu/5320-borove-oceli-oceli-budoucnosti>
29. KOUKAL, J. a T. ZMYDLENÝ. *Svařování I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-0870-3.
 30. HRIVŇÁKOVÁ, D. a I. HRIVŇÁK. *Materiálografia*. 2. vyd. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2018, 363 s. ISBN 978-80-227-4773-8.
 31. Měření tvrdosti. *MEDUNA* [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, 2018 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/36-mereni-tvrdosti.html>
 32. PACAL, B. a P. DOLEŽAL. Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů. *Ústav materiálových věd a inženýrství VUT v Brně* [online]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství VUT v Brně [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
 33. PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
 34. Rentgenová digraktometrie. In: *Ústav analytické chemie VŠCHT Praha* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2010 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/anl/matejka/05-RTG-difrakce-09.pdf>
 35. SU, Y., W. LI, X. WANG, T. MA, L. MA a X. DOU. The sensitivity analysis of microstructure and mechanical properties to welding parameters for linear friction welded rail steel joints. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V., 2019, **764** [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138251. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0921509319310378>
 36. Rozpad austenitu. In: *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009 [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Tepelne%20zpracovani%2009_10.pdf
 37. SPOTZ, Zdeněk. *Re: Konzultace* [e-mailová komunikace]. 3. června 2020 [cit. 2020-06-03].
 38. KUROIWA, R., H. LIU, Y. AOKI, S. YOON, H. FUJII, G. MURAYAMA a M. YASUYAMA. Microstructure control of medium carbon steel joints by low-temperature linear friction welding. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. Taylor & Francis, 2020, **25**(1), 1-9 [cit. 2020-06-07]. DOI: 10.1080/13621718.2019.1600771. ISSN 1362-1718. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13621718.2019.1600771>
 39. RENTGENOVÉ SPEKTROMETRY ED-XRF - PRINCIP. In: *Bas Rudlice s.r.o.* [online]. Blansko: BAS Rudlice spol. s r.o., 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.bas.cz/rentgenove-spektrometry/xrf-rentgenove-spektrometry.php>
 40. RUČNÍ SPEKTROMETR VANTA. In: *Bas Rudlice s.r.o.* [online]. Blansko: BAS Rudlice spol. s r.o., 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.bas.cz/xrf-vanta-rucni-spektrometr/vanta-rucni-rtg-analyzator.php>
 41. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení | Legenda | Jednotka |
|--------------------|---|----------|
| 1σ | Chyba měření | [hm. %] |
| A | Tažnost | [%] |
| A ₁ | Teplota 723 °C | [°C] |
| C _C | Uhlíkový ekvivalent | [-] |
| C _{E(tř)} | Uhlíkový ekvivalent pro svařování třením | [-] |
| C _E | Uhlíkový ekvivalent navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS), pro oceli C > 0,18 hm. % | [-] |
| C _P | Koeficient | [-] |
| C _S | Koeficient | [-] |
| ED-XRF | Energiově Disperzní Rentgenová Fluorescence | [-] |
| F | Síla | [N] |
| f | Koeficient tření | [-] |
| F _{kov} | Kovací síla | [N] |
| F _{tř} | Síla ve fázi tření | [N] |
| Fe ₃ C | Cementit | [-] |
| HB | Tvrdost dle Brinella | [-] |
| HV | Tvrdost dle Vickerse | [-] |
| HV0,1 | Tvrdost dle Vickerse při zatížení 100 g | [-] |
| hm. % | Hmotnostní procento | [%] |
| M _f | Martenzit finiš | [-] |
| M _s | Martenzit start | [-] |
| Obr. | Obrázek | [-] |
| Ochl. | Ochlazování | [-] |
| P _{CM} | Uhlíkový ekvivalent obsahující bór pro oceli s C <16 hm. % od autorů Ito-Bessyo | [-] |
| R _m | Mez pevnosti | [MPa] |
| R _{p0,2} | Mez kluzu | [MPa] |
| RTG | Rentgen, rentgenová | [-] |
| S _{max} | Maximální dráha | [mm] |
| T _P | Teplota přehřevu dle Séferiána | [°C] |
| TMOO | Tepelně-mechanicky ovlivněná oblast | [-] |
| TOO | Tepelně ovlivněná oblast | [-] |
| t | Tloušťka součásti | [mm] |
| V | Směr lineárního pohybu | [-] |
| XRF | Fluorescenční rentgenová | [-] |
| ZM | Základní materiál | [-] |
| α | Ferit | [-] |
| γ | Austenit | [-] |
| $\bar{\sigma}$ | Kolmá tlaková síla | [N] |
| $\bar{\tau}$ | Tečná síla tření | [N] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Příčník s kostičkou | 11 |
| Obr. 2 Detail příčníku s kostičkou | 11 |
| Obr. 3 Druhy pohybů [7] | 12 |
| Obr. 4 Čistící pochody [11] | 13 |
| Obr. 5 Fáze tření [12] | 14 |
| Obr. 6 Průběh parametrů svařovacího procesu [10] | 15 |
| Obr. 7 Skutečný dotyk dvou těles [23] | 16 |
| Obr. 8 Závislost velikosti koeficientu tření na rychlosti pohybu [4] | 16 |
| Obr. 9 Místa na průřezu s největším třením [5] | 17 |
| Obr. 10 Rozložení teplotních polí při lineárním svařování třením [19] | 17 |
| Obr. 11 Schéma velikosti TOO u obloukových metod [20] | 17 |
| Obr. 12 Schéma velikosti TOO u svařování třením [20] | 17 |
| Obr. 13 Používané možnosti svařování [15] | 17 |
| Obr. 14 Svařitelnost materiálů třením [6] | 18 |
| Obr. 15 Oblasti svařence [14] | 19 |
| Obr. 16 Rozdělení TOO podle velikosti plastické deformace [5] | 19 |
| Obr. 17 Nízkoteplotní svařování třením [38] | 20 |
| Obr. 18 Turbína s navařenými lopatkami [14] | 21 |
| Obr. 19 Zušlechťovací diagram (vlevo) a pás prokalitelnosti oceli 15 260 (vpravo) [26], [27] | 22 |
| <hr/> | |
| Obr. 20 Stereomikroskop Carl Zeiss Stemi 508 | 27 |
| Obr. 21 Světelný mikroskop Olympus GX51 | 28 |
| Obr. 22 Schéma indentoru používaného pro měření tvrdosti dle Vickerse [32] | 28 |
| Obr. 23 Soustava zařízení pro měření mikrotvrdosti | 29 |
| Obr. 24 Schéma uspořádání při zkoušce rozlomením | 29 |
| Obr. 25 Úprava svařence pro zkoušku rozlomením | 29 |
| Obr. 26 Rentgenový difraktometr Philips X'Pert | 30 |
| Obr. 27 Schéma martenzitické křivky oceli [33] | 30 |
| Obr. 28 Vliv obsahu uhlíku v austenitu na teploty M_s a M_f uhlíkových ocelí [33] | 30 |
| Obr. 29 Svařenec rozřezaný na plátky | 31 |
| Obr. 30 Rozřezaný plátek 2 | 31 |
| Obr. 31 Metalografická pila Labotom-3 | 32 |
| Obr. 32 Řezný kotouč 50A25 | 32 |
| Obr. 33 Tlakový lis ECOPRESS 100 | 32 |
| Obr. 34 Metalografická bruska | 32 |
| Obr. 35 Makrostruktura vzorku 1 (zvětšeno 6x) | 33 |
| Obr. 36 Makrostruktura vzorku 2 (zvětšeno 6x) | 33 |
| Obr. 37 Detail trhliny vzorku 1 (zvětšeno 20x) | 34 |
| Obr. 38 Detail trhliny vzorku 2 (zvětšeno 20x) | 34 |
| Obr. 39 Trhlina na vzorku 1 na přechodu mezi TMOO a TOO kostičky (zvětšeno 50x) .. | 34 |

| | | |
|---------|---|----|
| Obr. 40 | Trhlina na vzorku 2 na přechodu mezi TMOO a TOO kostičky (zvětšeno 200x) | 34 |
| Obr. 41 | Trhlina v místě svaru na vzorku 2 (zvětšeno 200x) | 35 |
| Obr. 42 | Detail trhliny na vzorku 2 (zvětšeno 500x) | 35 |
| Obr. 43 | Linie měření mikrotvrdosti na vzorku 1 | 35 |
| Obr. 44 | Linie měření mikrotvrdosti na vzorku 2 | 35 |
| Obr. 45 | Graf mikrotvrdosti na vzorku 1 | 35 |
| Obr. 46 | Graf mikrotvrdosti na vzorku 2 | 36 |
| Obr. 47 | Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobená přítomností martenzitu [24] | 36 |
| Obr. 48 | Založení vzorku ve stroji | 37 |
| Obr. 49 | Graf průběhu velikosti síly v závislosti na dráze | 37 |
| Obr. 50 | Kostička po rozlomení | 37 |
| Obr. 51 | Příčník po rozlomení | 37 |
| Obr. 52 | ED-XRF spektrometr VANTA při měření | 38 |
| Obr. 53 | Display spektrometru po zanalyzování oceli 27MnCrB5-2 | 38 |
| Obr. 54 | Display spektrometru po zanalyzování oceli 51CrV4 | 38 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|--------|---|--------|
| Tab. 1 | Koeficienty tření kovů s oxidickou vrstvou a bez ní [3] | 16 |
| Tab. 2 | Chemické složení oceli 15 260 [26] | 22, 39 |
| Tab. 3 | Podmínky tepelného zpracování oceli 15 260 [26] | 22 |
| Tab. 4 | Chemické složení oceli 27MnCrB5-2 | 24, 39 |
| Tab. 5 | Naměřené chemické složení oceli 51CrV4 | 39 |
| Tab. 6 | Naměřené chemické složení oceli 27MnCrB5-2 | 39 |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Informace o hydraulickém zkušebním stroji ZD40/400kN/ |
| Příloha 2 | Atest oceli 27MnCrB5 – 2 |
| Příloha 3 | Struktury v jednotlivých oblastech |
| Příloha 4 | Trhliny na vzorcích |
| Příloha 5 | Naměřené hodnoty mikrotvrdosti na vzorku 1 |
| Příloha 6 | Naměřené hodnoty mikrotvrdosti na vzorku 2 |
| Příloha 7 | Naměřené chemické složení kostičky – ocel 51CrV4 |
| Příloha 8 | Naměřené chemické složení příčníku - ocel 27MnCrB5-2 |

Příloha č.1 Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropské výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60



Podjetje za proizvodnjo jekel d.o.o.

Železarska cesta 3, 3220 Štore, Slovenija

tel.: +386 3 7805 100, fax: +386 3 7805 384

Date: 31.05.2019

INSPECTION CERTIFICATE

EN 10204/3.1

No.: ATK1907364

Purchaser

Order No.: 4500026518

Our order No.: 03-18-02064/002

Delivery note: 30-19-03028

Delivery date: 31.05.2019

Transport: By truck 6H56487 5E74743

Product: ROLLED SQUARE STEEL EN 10059 EN 10083-3 - 27MnCrB5-2 / SB27M12CB (Wnr.:1.7182)

| Cast No. | Quality | Dim (mm) | Weight (kg) | Bundle | Melting furnace | Dim. of billet |
|----------|------------|----------|-------------|--------|-----------------|----------------|
| 80188 | 27MnCrB5-2 | 50 | 21.750 | 16 | E | #180 |

CHEMICAL COMPOSITION OF CAST (%)

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | V | Cu | Al | B | Ti |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|
| 0,28 | 0,25 | 1,23 | 0,013 | 0,009 | 0,47 | 0,08 | 0,02 | 0,010 | 0,15 | 0,022 | 0,0045 | 0,030 |

MECHANICAL PROPERTIES

Hardness in as delivered condition: 200 HB;

Heat treatment of samples: QUENCHED AND TEMPERED

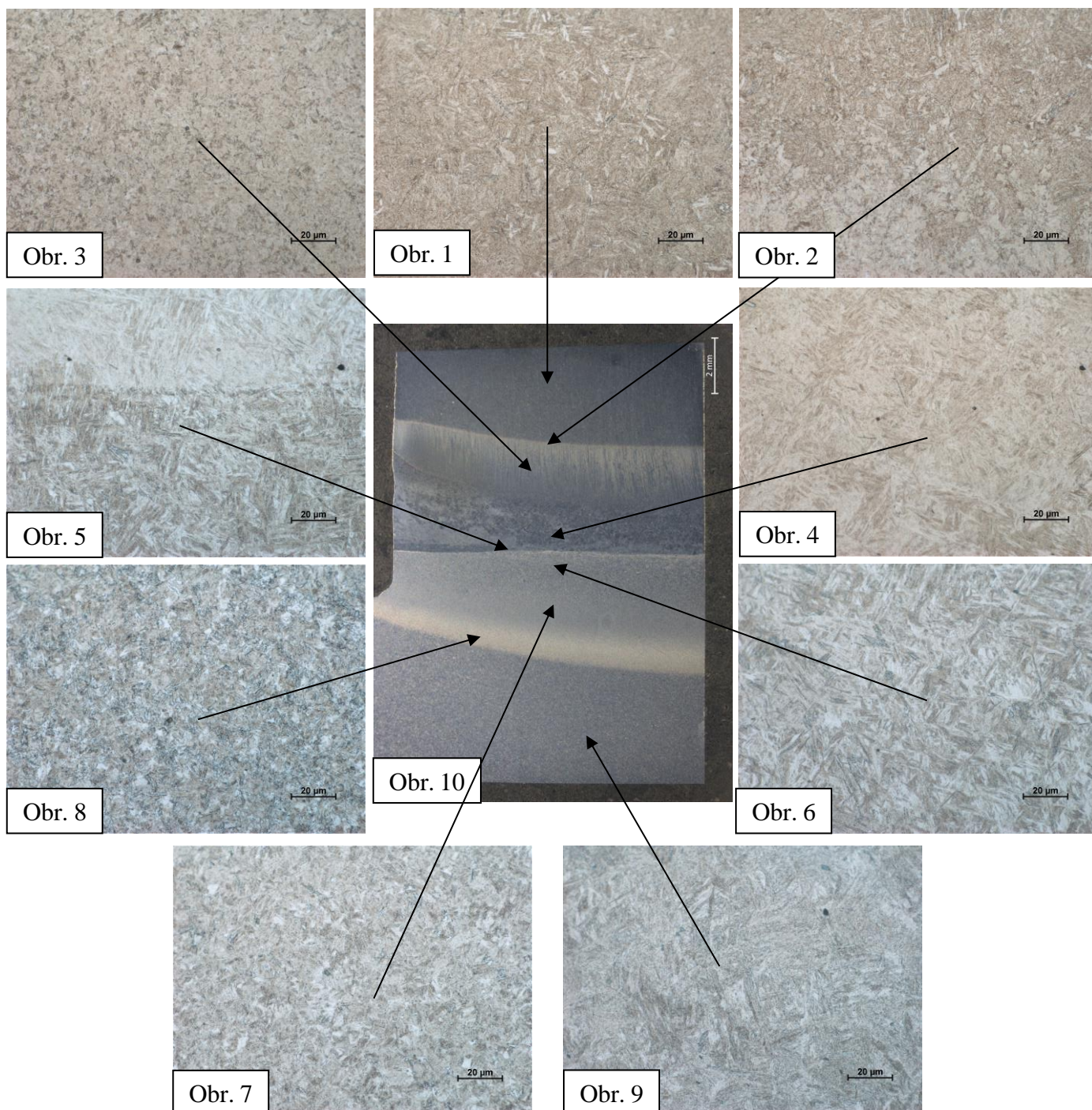
Temperature (°C): 900(+20-20)/500(+100-100)

Media: Oil, Water

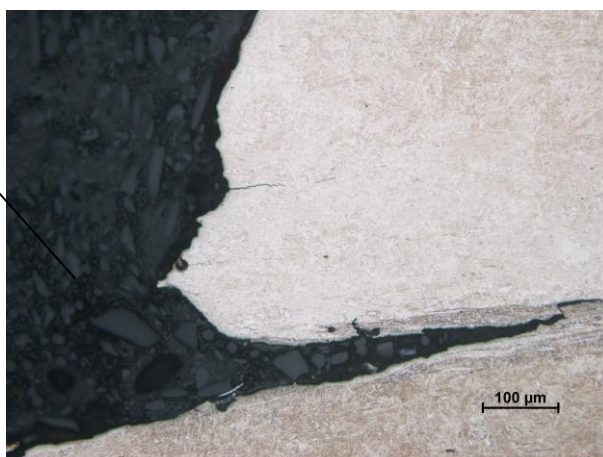
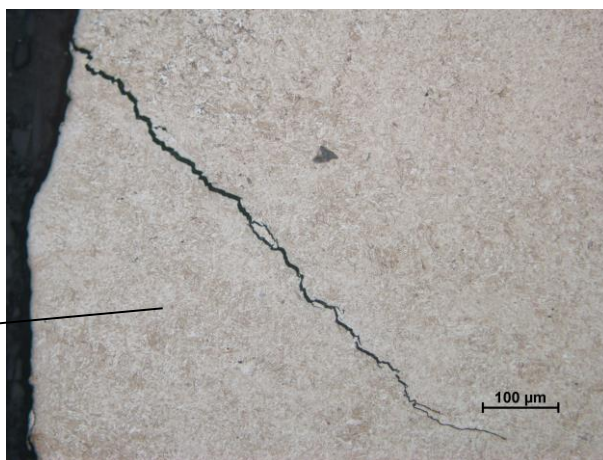
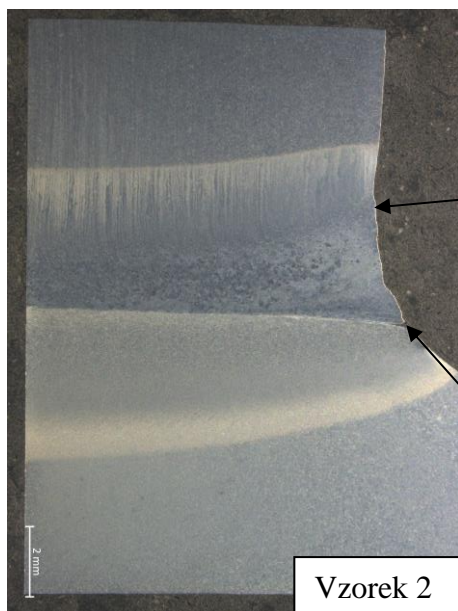
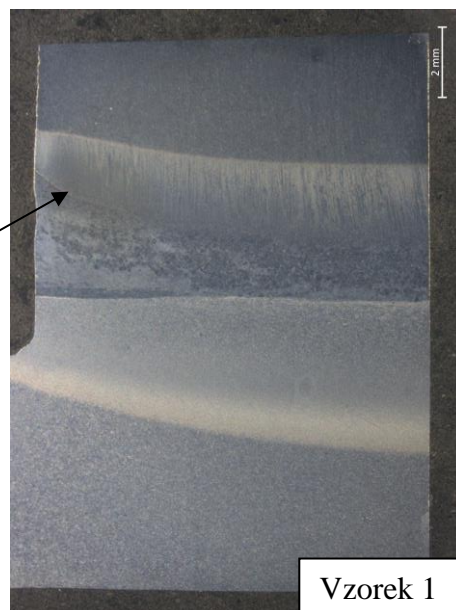
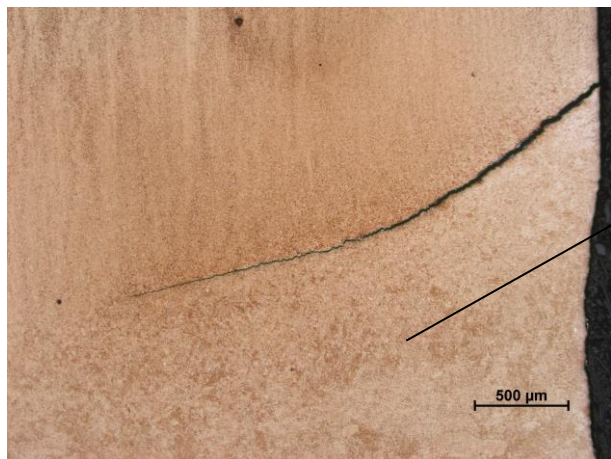
| Yield stress N/mm ² | Tensile strength N/mm ² | Elongation % | Reduction of area | Impact test | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------|----------------------|-------------|---------|---------|-----|----|
| | | | | Joule 1 | Joule 2 | Joule 3 | Tip | °C |
| 794 | 925 | 15,9 | 59,8 | 105 | 109 | 113 | KV | 20 |

We hereby certify, that the material described above complies with the terms of the order contract.

Inspection supervisor
 ZEC VEJJKO, dipl.inž.



| Obrázek | Místo na svařenci | Materiál | Struktura |
|---------|----------------------------------|------------------------|---------------|
| Obr. 1 | ZM kostičky | 51CrV4 | Bainitická |
| Obr. 2 | Přechod ze ZM do TOO kostičky | 51CrV4 | Bainitická |
| Obr. 3 | TOO kostičky | 51CrV4 | Bainitická |
| Obr. 4 | TMOO kostičky | 51CrV4 | Martenzitická |
| Obr. 5 | Svar | 51CrV4 + 27MnCrB5-2 | Martenzitická |
| Obr. 6 | TMOO příčnicku | 27MnCrB5-2 | Martenzitická |
| Obr. 7 | TMOO příčnicku | 27MnCrB5-2 | Bainitická |
| Obr. 8 | TOO příčnicku | 27MnCrB5-2 | Bainická |
| Obr. 9 | ZM příčnicku | 27MnCrB5-2 | Bainitická |
| Obr. 10 | Makrostruktura vzorku 1 | - | - |



| Číslo měření | Tvrdomost HV 0,1 | Vzdálenost vtisků [mm] | Číslo měření | Tvrdomost HV 0,1 | Vzdálenost vtisků [mm] | Číslo měření | Tvrdomost HV 0,1 | Vzdálenost vtisků [mm] |
|--------------|------------------|------------------------|--------------|------------------|------------------------|--------------|------------------|------------------------|
| 1 | 449 | 0,4 | 34 | 613 | 7,0 | 67 | 343 | 13,6 |
| 2 | 434 | 0,6 | 35 | 511 | 7,2 | 68 | 361 | 13,8 |
| 3 | 449 | 0,8 | 36 | 526 | 7,4 | 69 | 371 | 14,0 |
| 4 | 441 | 1,0 | 37 | 505 | 7,6 | 70 | 382 | 14,2 |
| 5 | 438 | 1,2 | 38 | 505 | 7,8 | 71 | 386 | 14,4 |
| 6 | 440 | 1,4 | 39 | 502 | 8,0 | 72 | 384 | 14,6 |
| 7 | 454 | 1,6 | 40 | 511 | 8,2 | 73 | 390 | 14,8 |
| 8 | 377 | 1,8 | 41 | 518 | 8,4 | | | |
| 9 | 404 | 2,0 | 42 | 506 | 8,6 | | | |
| 10 | 413 | 2,2 | 43 | 508 | 8,8 | | | |
| 11 | 424 | 2,4 | 44 | 516 | 9,0 | | | |
| 12 | 420 | 2,6 | 45 | 519 | 9,2 | | | |
| 13 | 439 | 2,8 | 46 | 508 | 9,4 | | | |
| 14 | 380 | 3,0 | 47 | 508 | 9,6 | | | |
| 15 | 472 | 3,2 | 48 | 513 | 9,8 | | | |
| 16 | 601 | 3,4 | 49 | 502 | 10,0 | | | |
| 17 | 516 | 3,6 | 50 | 474 | 10,2 | | | |
| 18 | 508 | 3,8 | 51 | 446 | 10,4 | | | |
| 19 | 540 | 4,0 | 52 | 425 | 10,6 | | | |
| 20 | 582 | 4,2 | 53 | 387 | 10,8 | | | |
| 21 | 618 | 4,4 | 54 | 320 | 11,0 | | | |
| 22 | 575 | 4,6 | 55 | 319 | 11,2 | | | |
| 23 | 582 | 4,8 | 56 | 295 | 11,4 | | | |
| 24 | 608 | 5,0 | 57 | 283 | 11,6 | | | |
| 25 | 612 | 5,2 | 58 | 291 | 11,8 | | | |
| 26 | 645 | 5,4 | 59 | 271 | 12,0 | | | |
| 27 | 615 | 5,6 | 60 | 292 | 12,2 | | | |
| 28 | 626 | 5,8 | 61 | 296 | 12,4 | | | |
| 29 | 621 | 6,0 | 62 | 311 | 12,6 | | | |
| 30 | 633 | 6,2 | 63 | 303 | 12,8 | | | |
| 31 | 625 | 6,4 | 64 | 322 | 13,0 | | | |
| 32 | 619 | 6,6 | 65 | 329 | 13,2 | | | |
| 33 | 627 | 6,8 | 66 | 331 | 13,4 | | | |

| Číslo měření | Tvrdost HV 0,1 | Vzdálenost vtisků [mm] | Číslo měření | Tvrdost HV 0,1 | Vzdálenost vtisků [mm] | Číslo měření | Tvrdost HV 0,1 | Vzdálenost vtisků [mm] |
|--------------|----------------|------------------------|--------------|----------------|------------------------|--------------|----------------|------------------------|
| 1 | 488 | 0,2 | 34 | 644 | 6,8 | 67 | 359 | 13,4 |
| 2 | 463 | 0,4 | 35 | 634 | 7,0 | 68 | 363 | 13,6 |
| 3 | 459 | 0,6 | 36 | 643 | 7,2 | 69 | 374 | 13,8 |
| 4 | 460 | 0,8 | 37 | 640 | 7,4 | 70 | 395 | 14,0 |
| 5 | 437 | 1,0 | 38 | 636 | 7,6 | 71 | 411 | 14,2 |
| 6 | 444 | 1,2 | 39 | 570 | 7,8 | 72 | 414 | 14,4 |
| 7 | 435 | 1,4 | 40 | 537 | 8,0 | 73 | 416 | 14,6 |
| 8 | 394 | 1,6 | 41 | 519 | 8,2 | | | |
| 9 | 407 | 1,8 | 42 | 528 | 8,4 | | | |
| 10 | 397 | 2,0 | 43 | 501 | 8,6 | | | |
| 11 | 406 | 2,2 | 44 | 507 | 8,8 | | | |
| 12 | 386 | 2,4 | 45 | 497 | 9,0 | | | |
| 13 | 399 | 2,6 | 46 | 507 | 9,2 | | | |
| 14 | 370 | 2,8 | 47 | 508 | 9,4 | | | |
| 15 | 388 | 3,0 | 48 | 501 | 9,6 | | | |
| 16 | 550 | 3,2 | 49 | 489 | 9,8 | | | |
| 17 | 590 | 3,4 | 50 | 508 | 10,0 | | | |
| 18 | 612 | 3,6 | 51 | 499 | 10,2 | | | |
| 19 | 563 | 3,8 | 52 | 471 | 10,4 | | | |
| 20 | 569 | 4,0 | 53 | 427 | 10,6 | | | |
| 21 | 570 | 4,2 | 54 | 357 | 10,8 | | | |
| 22 | 590 | 4,4 | 55 | 319 | 11,0 | | | |
| 23 | 579 | 4,6 | 56 | 315 | 11,2 | | | |
| 24 | 597 | 4,8 | 57 | 277 | 11,4 | | | |
| 25 | 592 | 5,0 | 58 | 294 | 11,6 | | | |
| 26 | 601 | 5,2 | 59 | 283 | 11,8 | | | |
| 27 | 611 | 5,4 | 60 | 291 | 12,0 | | | |
| 28 | 604 | 5,6 | 61 | 299 | 12,2 | | | |
| 29 | 631 | 5,8 | 62 | 291 | 12,4 | | | |
| 30 | 628 | 6,0 | 63 | 296 | 12,6 | | | |
| 31 | 614 | 6,2 | 64 | 320 | 12,8 | | | |
| 32 | 623 | 6,4 | 65 | 335 | 13,0 | | | |
| 33 | 636 | 6,6 | 66 | 345 | 13,2 | | | |

| Kostička – ocel 51CrV4 | | | | | | |
|------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
| Značka prvku | Měření 1 | | Měření 2 | | Měření 3 | |
| | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1σ [hm. %] | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1σ [hm. %] | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1σ [hm. %] |
| C | | | | | | |
| Mg | Nedetekováno | 0,2938 | Nedetekováno | 0,2993 | Nedetekováno | 0,2942 |
| Al | Nedetekováno | 0,0377 | Nedetekováno | 0,0380 | Nedetekováno | 0,0385 |
| Si | 0,2477 | 0,0110 | 0,2081 | 0,0105 | 0,2363 | 0,0109 |
| P | Nedetekováno | 0,0048 | Nedetekováno | 0,0048 | Nedetekováno | 0,0046 |
| S | Nedetekováno | 0,0064 | Nedetekováno | 0,0062 | Nedetekováno | 0,0063 |
| Ti | Nedetekováno | 0,0156 | Nedetekováno | 0,0155 | Nedetekováno | 0,0155 |
| V | 0,1264 | 0,0037 | 0,1252 | 0,0037 | 0,1225 | 0,0037 |
| Cr | 0,9986 | 0,0063 | 1,0036 | 0,0063 | 1,0047 | 0,0063 |
| Mn | 0,8337 | 0,0093 | 0,8193 | 0,0092 | 0,8156 | 0,0092 |
| Fe | 97,2069 | 0,0180 | 97,2798 | 0,0177 | 97,4647 | 0,0172 |
| Co | Nedetekováno | 0,0603 | Nedetekováno | 0,0604 | Nedetekováno | 0,0604 |
| Ni | 0,0608 | 0,0033 | 0,0624 | 0,0033 | 0,0630 | 0,0033 |
| Cu | 0,4209 | 0,0069 | 0,4015 | 0,0064 | 0,2426 | 0,0054 |
| Zn | 0,0704 | 0,0025 | 0,0674 | 0,0025 | 0,0253 | 0,0018 |
| Sr | Nedetekováno | 0,0007 | Nedetekováno | 0,0007 | Nedetekováno | 0,0007 |
| Zr | Nedetekováno | 0,0009 | Nedetekováno | 0,0009 | Nedetekováno | 0,0009 |
| Nb | Nedetekováno | 0,0012 | Nedetekováno | 0,0012 | Nedetekováno | 0,0012 |
| Mo | 0,0108 | 0,0005 | 0,0108 | 0,0006 | 0,0118 | 0,0006 |
| Pd | Nedetekováno | 0,0084 | Nedetekováno | 0,0084 | Nedetekováno | 0,0083 |
| Ag | Nedetekováno | 0,0094 | Nedetekováno | 0,0094 | Nedetekováno | 0,0095 |
| Cd | Nedetekováno | 0,0108 | Nedetekováno | 0,0106 | Nedetekováno | 0,0107 |
| Sn | 0,0090 | 0,0024 | 0,0086 | 0,0024 | Nedetekováno | 0,0177 |
| Sb | 0,0147 | 0,0022 | 0,0133 | 0,0022 | 0,0135 | 0,0022 |
| Hf | Nedetekováno | 0,0104 | Nedetekováno | 0,0105 | Nedetekováno | 0,0086 |
| Ta | Nedetekováno | 0,0054 | Nedetekováno | 0,0055 | Nedetekováno | 0,0048 |
| W | Nedetekováno | 0,0062 | Nedetekováno | 0,0063 | Nedetekováno | 0,0059 |
| Re | Nedetekováno | 0,0046 | Nedetekováno | 0,0048 | Nedetekováno | 0,0047 |
| Pb | Nedetekováno | 0,0108 | Nedetekováno | 0,0108 | Nedetekováno | 0,0109 |
| Bi | Nedetekováno | 0,0105 | Nedetekováno | 0,0107 | Nedetekováno | 0,0107 |

| Příčnick – ocel 27MnCrB5 -2 | | | | | | |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Značka prvku | Měření 1 | | Měření 2 | | Měření 3 | |
| | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] | Koncentrace [hm. %] | Chyba 1 σ [hm. %] |
| C | | | | | | |
| Mg | Nedetekováno | 0,2852 | Nedetekováno | 0,2690 | Nedetekováno | 0,2757 |
| Al | Nedetekováno | 0,0376 | Nedetekováno | 0,0373 | Nedetekováno | 0,0375 |
| Si | 0,2809 | 0,0115 | 0,2860 | 0,0116 | 0,2836 | 0,0116 |
| P | Nedetekováno | 0,0045 | Nedetekováno | 0,0047 | Nedetekováno | 0,0046 |
| S | Neměřeno | 0,0071 | 0,0037 | 0,0035 | 0,0039 | 0,0035 |
| Ti | 0,0268 | 0,0052 | 0,0248 | 0,0052 | 0,0179 | 0,0051 |
| V | 0,0097 | 0,0026 | 0,0093 | 0,0026 | 0,0088 | 0,0025 |
| Cr | 0,5147 | 0,0047 | 0,5092 | 0,0047 | 0,5142 | 0,0047 |
| Mn | 1,2863 | 0,0103 | 1,2518 | 0,0102 | 1,2674 | 0,0103 |
| Fe | 97,5022 | 0,0184 | 97,5117 | 0,0187 | 97,5114 | 0,0187 |
| Co | Nedetekováno | 0,0596 | Nedetekováno | 0,0594 | Nedetekováno | 0,0595 |
| Ni | 0,1477 | 0,0046 | 0,1504 | 0,0047 | 0,1562 | 0,0047 |
| Cu | 0,1656 | 0,0047 | 0,1815 | 0,0048 | 0,1741 | 0,0048 |
| Zn | Nedetekováno | 0,0013 | Nedetekováno | 0,0013 | Nedetekováno | 0,0013 |
| Sr | Nedetekováno | 0,0007 | Nedetekováno | 0,0007 | Nedetekováno | 0,0007 |
| Zr | Nedetekováno | 0,0009 | Nedetekováno | 0,0009 | Nedetekováno | 0,0009 |
| Nb | Nedetekováno | 0,0012 | Nedetekováno | 0,0012 | Nedetekováno | 0,0012 |
| Mo | 0,0382 | 0,0008 | 0,0367 | 0,0007 | 0,0367 | 0,0008 |
| Pd | Nedetekováno | 0,0082 | Nedetekováno | 0,0082 | Nedetekováno | 0,0083 |
| Ag | Nedetekováno | 0,0093 | Nedetekováno | 0,0094 | Nedetekováno | 0,0093 |
| Cd | Nedetekováno | 0,0106 | Nedetekováno | 0,0107 | Nedetekováno | 0,0106 |
| Sn | 0,0135 | 0,0024 | 0,0169 | 0,0025 | 0,0109 | 0,0024 |
| Sb | 0,0145 | 0,022 | 0,0182 | 0,0023 | 0,0149 | 0,0022 |
| Hf | Nedetekováno | 0,0083 | Nedetekováno | 0,0079 | Nedetekováno | 0,0083 |
| Ta | Nedetekováno | 0,0049 | Nedetekováno | 0,0047 | Nedetekováno | 0,0046 |
| W | Nedetekováno | 0,0056 | Nedetekováno | 0,0056 | Nedetekováno | 0,0058 |
| Re | Nedetekováno | 0,0050 | Nedetekováno | 0,0049 | Nedetekováno | 0,0049 |
| Pb | Nedetekováno | 0,0109 | Nedetekováno | 0,0109 | Nedetekováno | 0,0110 |
| Bi | Nedetekováno | 0,0106 | Nedetekováno | 0,0106 | Nedetekováno | 0,0107 |