



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HODNOCENÍ KVALITY SVARŮ ŘETĚZŮ HARVESTORŮ

EVALUATION OF QUALITY WELDS ON CHAINS FOR HARVESTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Teuer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marián Sigmund, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Tomáš Teuer
Studijní program:	Strojní inženýrství
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 diplomové práce:

Hodnocení kvality svarů řetězů harvestorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o stanovení a nastavení konkrétních požadavků (destruktivních i nedestruktivních) na kvalitu ručních a robotizovaných svarů řetězů pro lesnické stroje. Se zohledněním všech aspektů daných technologií svařování, konstrukčních možností částí řetězů a možností svařování ve spolupracující firmě. Vše po odborné stránce sepsat do návodky či instrukce, jak kvalitu svarů u těchto součástí posuzovat.

Cíle diplomové práce:

Vypracovat literární rešerši o daných materiálech a technologiích svařování částí řetězů harvestorů.

Popsat celý technologický postup výroby řetězů harvestorů.

Se zaměřením na svařování a tepelné zpracování jmenovat možná rizika.

Na dodaných vzorcích provést kvalitativní vyhodnocení.

Výsledky vyhodnocení zohlednit v návodce hodnocení kvality svarů.

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.

FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

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

BŮHM, Jiří. Svařovací roboty a manipulátory pro obloukové svařování pod ochrannými plyny. Praha: ČÚV komitétu pro svařování ČSVTS, 1981.

Termín odevzdání diplomové 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

TEUER Tomáš: Hodnocení kvality svarů řetězů harvesterů

V diplomové práci je zkoumán vliv nastavení parametrů svařování a postupu svařování na výslednou strukturu a pevnost svarového spoje řetězů harvesterů. V teoretické části je rozebrán problém svařitelnosti borových ocelí metodou 135 s možnostmi destruktivního či nedestruktivního zkoušení svarových spojů.

V praktické části je tento problém rozebrán na konkrétním svařenci, řetězu harvesteru. Příčník s kostičkou jsou svařovány dvěma způsoby metodou 135, s následným posouzením provedení svarů. Výsledky hodnocení jsou odborně sepsány do návodky.

Klíčová slova: borové oceli, svařování 135, destruktivní zkoušení, nedestruktivní zkoušení

ABSTRACT

TEUER Tomas: Evaluation of quality welds on chains for harvester

The diploma thesis examines the influence of setting welding parameters and welding process on the resulting structure and strength of the welded joint of harvester chains. The theoretical part discusses the problem of weldability of pine steels by using method "135" with the possibility of destructive or non-destructive testing of welded joints.

In the practical part, this matter is examined on a specific weldment, the harvester chain. Cross member with a cube welded in two ways by method 135, followed by an assessment of the performance of welds. The results of the evaluation are written down in the manual.

Keywords: boron steel, welding 135, destructive testing, non-destructive testing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TEUER, Tomáš. *Hodnocení kvality svarů řetězů harvesterů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124689>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marián Sigmund.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Hodnocení kvality svarů řetězů harvestorů** vypracoval samostatně na základě konzultací s vedoucím práce a za použití pramenů, které uvádím v příloženém seznamu.

V Brně dne 26.6. 2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou děkuji panu Ing. Mariánu Sigmundovi, Ph.D., vedoucímu diplomové práce, za přínosné poznatky. Dále děkuji všem asistentům Fakulty strojního inženýrství, kteří mi pomáhali při praktické části diplomové práce.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům za podporu a zázemí, které mi po dobu studia věnovali.

OBSAH:

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	11
1.1 Varianty řešení.....	12
2 SVAŘOVÁNÍ METODOU 135	13
2.1 Princip svařování metodou 135.....	13
2.2 Svařovací zařízení	14
2.3 Ochranné plyny	16
2.4 Přídavné materiály	17
2.5 Polohy svařování	17
2.6 Přenos kovu v oblouku.....	18
2.7 Metalurgické reakce.....	20
2.8 Robotické svařování	21
2.8.1 Svařovací robotizované pracoviště	21
3 PROBLEMATIKA SVAŘITELNOSTI	23
3.1 Charakteristika bórových ocelí.....	23
3.1.1 Vliv bóru.....	23
3.1.2 Svařitelnost bórových ocelí	24
3.2 Uhlíkový ekvivalent a přehřev ocelí	25
3.3 Vnesené teplo a jeho vliv na TOO	28
3.4 Tepelné zpracování	30
3.4.1 Kalení.....	30
3.4.2 Popouštění	33
4 KONSTROLA KVALITY SVARŮ.....	34
4.1 Nedestruktivní zkoušení	34
4.1.1 Vizuální kontrola	34

4.2 Destruktivní zkoušení	35
4.2.1 Zkouška mikrotvrlosti.....	35
4.2.2 Zkouška rozlomením	37
4.2.3 Metalografické zkoušky	37
4.2.4 Rentgenová difrakční analýza zbytkového austenitu	38
5 POSTUP VÝROBY SOUČÁSTI.....	39
5.1 První varianta (two step).....	39
5.1.1 Svařovací postup první varianty dle ČSN EN ISO 15609-1	43
5.2 Druhá varianta (one step)	45
5.2.1 Svařovací postup druhé varianty dle ČSN EN ISO 15609-1.....	46
6 ANALÝZA SVAROVÝCH SPOJŮ	47
6.1 Zkouška ohybem	47
6.2 Metalografická zkouška	49
6.2.1 Příprava vzorků.....	49
6.2.2 Vyhodnocení makrostruktury	51
6.2.3 Vyhodnocení mikrostruktury	53
6.3 Zkouška mikrotvrlosti.....	55
6.4 Analýza zbytkového austenitu	59
7 ZÁVĚRY	61
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých zkratk a symbolů	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

V technické praxi se můžeme setkat s mnoha způsoby spojování součástí, mezi něž řadíme i svařování. Podstatou je vytvoření nerozebíratelného spojení dvou a více dílců stejného, či podobného chemického složení za působení tepla, popř. tlaku s případným použitím přídavného materiálu. Součást vyhotovenou svařováním nazýváme svařenec nebo svarek. Výchozím materiálem pro vytvoření svařence bývají nejčastěji hutní polotovary (plechy, tyče, trubky), obrobky, výkovky, vylisky a odlitky.

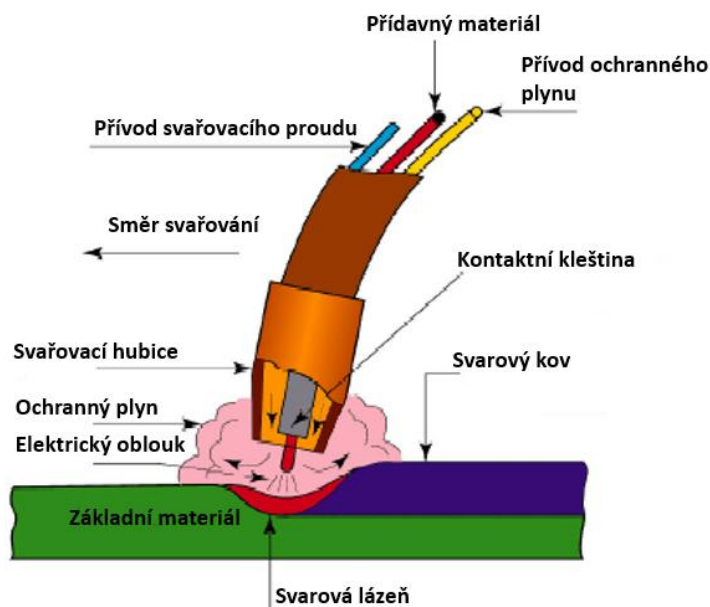
Technologie svařování je ve strojírenství hojně užívána. Obecně lze říci, že svařování má nespočet výhod, k níž řadíme především vysokou pevnost, trvanlivost, jednoduchost a úsporu materiálu v porovnání s jinými technologiemi výroby. Nevýhodami jsou tvorba napětí a deformací, změna struktury a mechanických vlastností. Z hlediska použití je svařování členité a setkáváme se s ním při výrobě velkých konstrukčních strojů (parních turbín, jaderných reaktorů, lodí, zemědělské techniky), ale také při opravách. Tato technologie byla po dlouhá staletí omezena pouze na kovářské svařování. Teprve v 19. století, s příchodem elektrické energie a znalosti prvků, byla rozvinuta o obloukové, odporové a plamenové svařování. Největší rozmach však našla v období válek, kdy bylo vkládáno mnoho času a financí do výzkumu a vývoje nových technologií.

V šedesátých letech minulého století byla vyvinuta i metoda poloautomatického svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu (GMAW), značená dle normy EN ISO 4063 číslem 135, jež je předmětem následující práce. Díky této technologii lze snadno svařovat ve všech polohách, rychleji a s menšími deformacemi, než je tomu u svařování obalenou elektrodou. Vzhledem k absenci obalu elektrody je svarová housenka čistší, a tudíž vyžaduje i nižší nároky na čištění.

V následujících kapitolách si podrobně rozebereme tuto metodu a její použití při realizaci konkrétní součásti.



Obr. 2 Svařovací zařízení pro metodu 135 (Fronius TPS 400i) [6]



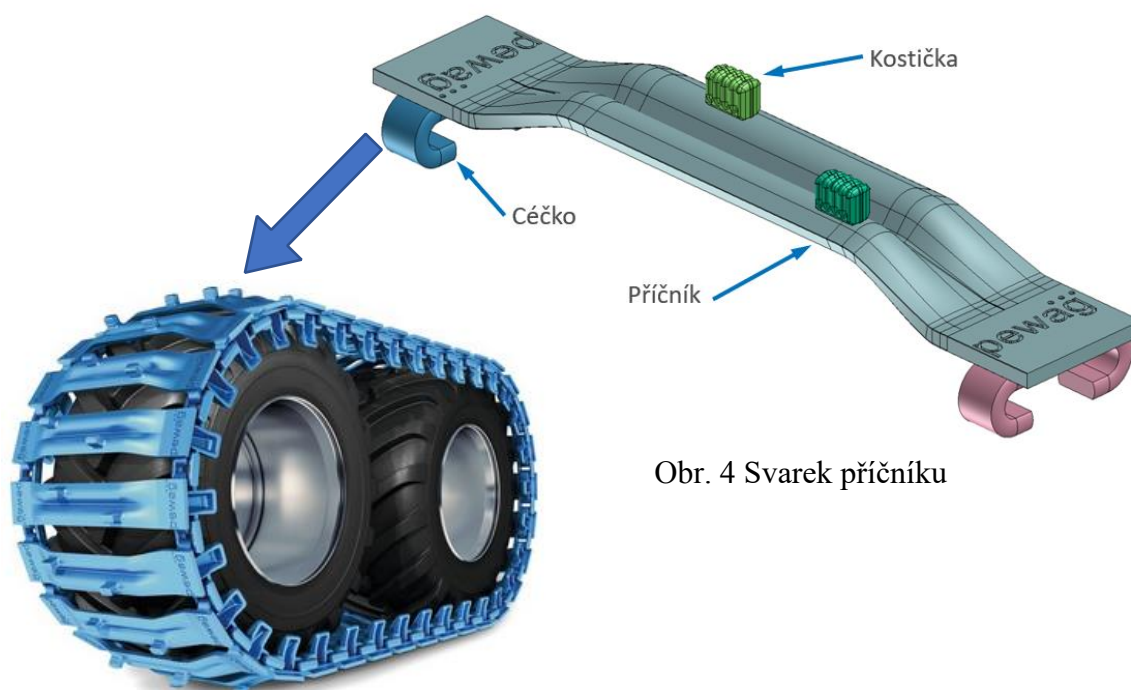
Obr. 1 Svařování metodou 135 [5]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [8], [9]

Neutuchající hlad po těžbě dřeva přivádí do lesa stále více těžebních strojů – harvestorů. Členitý povrch lesa představuje nelehký úkol pro pracovní stroje. Řešením takovýchto problému bývá opatření strojů řetězy zvyšující přilnavost s měkkým či skalnatým povrchem.

Jednou z takových firem, zabývajících se výrobou řetězů pro lesnické stroje, je firma Pewag, která využívá ke své výrobě několika set leté zkušenosti. Se sídly po celém světě je významným dodavatelem řetězů pro lesnické stroje, automobily aj. Stále zvyšující se požadavky zákazníků vedou firmu k technickým pokrokům, především robotizaci.

Řetězy pro harvestory (viz obr. 3) jsou velmi namáhané součásti a při výrobě je kladen velký důraz na kvalitu jejich zpracování. Použité materiály musí mít dostatečné konstrukční (pevnost, ořezuvzdornost) i technologické vlastnosti (svařitelnost). Z důvodu členitosti povrchu nelze příčník vyrobit jinou metodou než pomocí svařování, což vede k určitým úskalím při dodržení výše uvedených vlastností.



Obr. 4 Svarek příčníku

Obr. 3 Náprava harvestoru osazená řetězy [9]

Článek řetězu se skládá ze tří prvků, jež jsou na obr. 3. Předmětem práce bude pouze dílec kostička (Stummel) a příčník (P2). Výchozím materiálem pro výrobu a následné svaření je u obou součástí nízkouhlíková borová ocel. Její chemické složení není nikterak složité, čímž je i ekonomicky přijatelná. Svých výborných charakteristik dosahují tyto oceli až po tepelném zpracování. Nízký podíl uhlíku zaručuje velmi dobrou svařitelnost, což je v tomto případě zásadní.

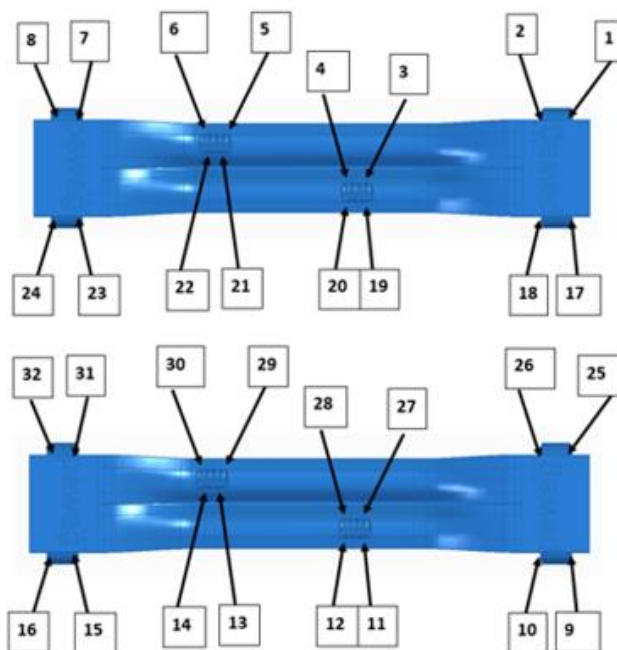
Výroba dílců prochází řezáním, kování, kalením a popouštěním. Následné cesty, které vedou ke svaření, jsou dvě. Obě budou v práci blíže popsány a na základě analýzy vyhodnoceny, jaký je jejich vliv na výslednou strukturu. Cílem je zajistit kvalitu svařenců při využití co možná nejkratších časů. První variantou je svaření „two-step“, neboli nadvakrát, kdy kostičky svařujeme k příčníku z každé strany dvěma kratšími housenkami s jejich překrytím. Druhá varianta je svařování „one-step“ (najednou), tedy z každé strany jednou delší housenkou. Další rozdíly ve výrobě budou upřesněny v průběhu práce.

1.1 Varianty řešení

Jak již bylo zmíněno, celá práce se zabývá dvěma variantami výroby řetězového článku s následnou analýzou a srovnáním. Spojením částí kostičky a příčnicku musí dojít k pevnému a spolehlivému spojení při dodržení mechanických vlastností materiálu. Pro přiblížení jsou tyto varianty popsány v následujících odstavcích.

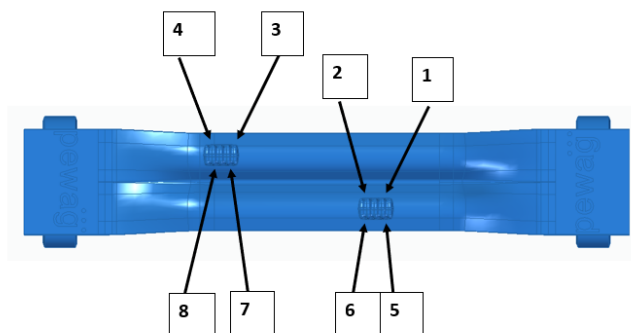
- V prvním případě je příčnick vyroben kovááním s následným kalením z kovací teploty v kalícím médiu. Po vychladnutí následuje popouštění s úplným ochlazením na pokojovou teplotu. Před svařením se celý příčnick předehřeje na 200 °C a upevní do přípravku ke svařování. Kostička je taktéž vyrobena kovááním. Po kováání následuje nauhličení a kalení v průběžné nauhličovací kalící peci. Po zakalení se díl již nepředehřívá a je vložen do přípravku ke svařování.

Samotné svařování vykonává robot. Ve svařovací lavičce jsou upnuty dva kusy současně. Kostička je nejprve k příčnicku stehována na čtyřech místech robotickým ramenem, viz obr. 5, osazeným svařovacím hořákem metodou 135 a postupně se svařují oba kusy nadvakrát, tedy s překrytím housenek (two step). Po svařování se článek řetězu popouští.



Obr. 5 Postup stehování v 1. variantě

- V druhé variantě je počáteční postup obdobný. Příčnick vyroben kovááním putuje do kalícího média a po úplném vychladnutí je upnut do přípravku ke svařování. Následně se dílec předehřívá lokálně indukčně. Upíná se v tomto případě pouze jeden díl a počet stehů se předpokládá stejný jako u první varianty, viz obr. 6. Samotné svaření probíhá z každé strany najednou (one step). Po vyjmutí z přípravku se předpokládá popouštění článku za účelem snížení zbytkového austenitu.



Obr. 6 Postup stehování v 2. variantě

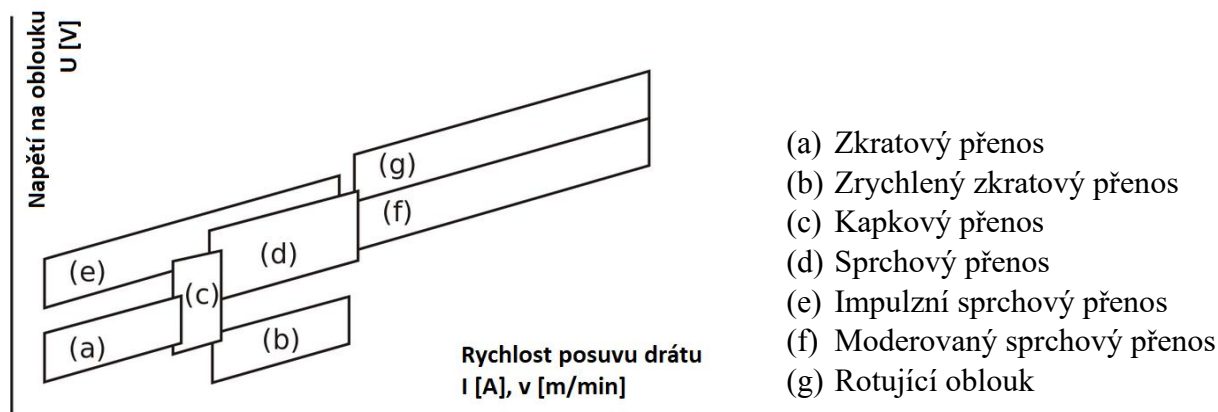
2 SVAŘOVÁNÍ METODOU 135 [1], [3], [4], [8], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [58]

Obdobně jako většina metod obloukového svařování má i metoda 135 svou historii v minulém století. V roce 1953 bylo oznámeno použití ocelových elektrod v ochranné atmosféře aktivního oxidu uhličitého (z toho plynoucí zkratka GMAW – Gas metal arc welding). Pro svůj kompromis mezi kvalitou a ekonomikou se metoda velmi rychle ujala a na konci padesátých let došlo k její inovaci. Dnes je nejrozšířenější metodou pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných i legovaných ocelí, a to vlivem růstu objemů svařovaných konstrukcí. Hlavním důvodem rozšíření je široký výběr přídavných materiálů, ochranných plynů, snadná mechanizace, robotizace a především charakteristika metody.

2.1 Princip svařování metodou 135

Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu využívá k roztavení materiálu teplo elektrického oblouku hořícího v prostředí ionizovaného plynu mezi holým drátem (elektrodou) a základním materiálem. Jedná se tedy o metodu tavného svařování s aktivací povrchu pomocí tepelné energie. Po natavení a přidání přídavného materiálu nastává adheze tekutého kovu k tuhému povrchu a vzniká svarová lázeň, která postupně tuhne a tvoří svarovou plochu. Oblast mezi lázní a svařovacím hořákem je chráněná před účinky vzdušné atmosféry aktivním plynem oxidu uhličitého, popřípadě směsí oxidu uhličitého a jiného inertního plynu.

Drát, nejčastěji o průměru 0,8 až 1,2 mm, je do lázně přiváděn podávacími kladkami umístěnými ve svařovacím zařízení nebo hořáku. Napájení elektrody je zajištěno třecím kontaktem umístěného v hořáku. Vzhledem k vysokým proudům je elektricky zatížená délka drátu volena co nejkratší. Proudová zatížení dosahuje až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$, což je desetinásobně vyšší než například u ručního obloukového svařování. Běžné svařovací proudy se volí v rozmezí od 30 do 800 A, a to v závislosti na svařované tloušťce základního materiálu. Z toho plyne i charakter přenosu kovu, přičemž nejběžnější je zkratový a sprchový.



Obr. 7 Oblasti přenosů kovů v oblouku [1]

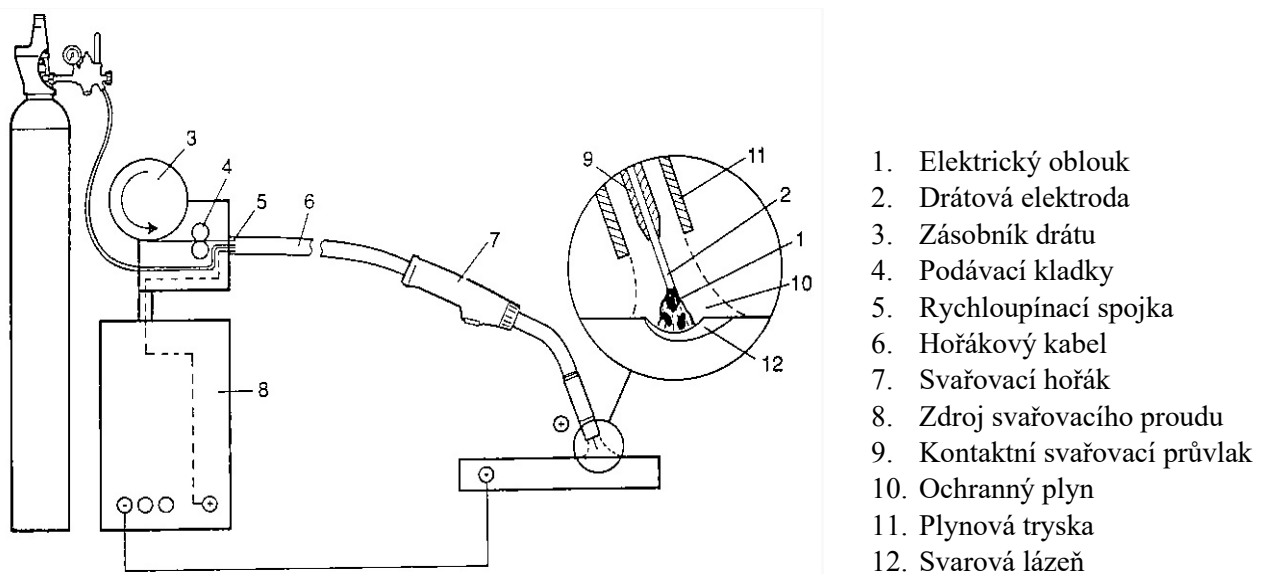
Teplota kapek se u svařování metodou 135 pohybuje mezi 1700 až 2500 °C, přičemž teplota lázně je o něco nižší, a to 1600 až 2100 °C.

2.2 Svařovací zařízení

Svařovací zařízení se skládá z mnoha komponentů, z nichž nejzákladnější jsou

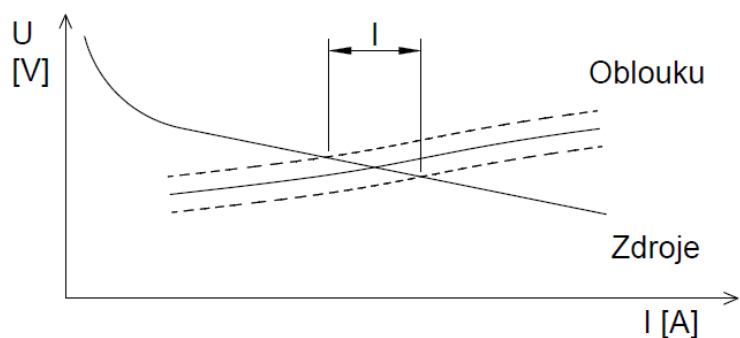
- zdroj svařovacího proudu s řídicí jednotkou,
- podavač drátové elektrody,
- svařovací hořák,
- multifunkční kabel hořáku,
- uzemňovací kabel,
- láhev ochranného plynu s redukčním ventilem.

Dále je možné zařízení osadit chladicí jednotkou pro chlazení hořáků a svařovacího kabelu, mezipodavačem elektrod, dálkovým ovladačem pro nastavení svařovacích parametrů, pamětí pro archivaci dat, pojízdným vozíkem, ramenem pro nesení hořáku a další. Základní svařovací modul je znázorněn v obr. 8.



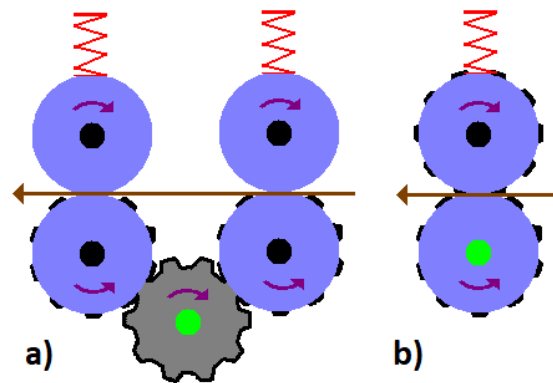
Obr. 8 Schéma svařovacího zařízení 135 [1]

Pro svařování se používá u většiny případů zdroj stejnosměrného proudu s přímou polaritou, kde kladný pól tvoří drátová elektroda. K usměrnění proudu dochází vlivem usměrňovače či invertoru. K regulaci délky oblouku dochází pomocí ploché voltampérové charakteristiky, viz obr. 9. To znamená, že při malé změně délky oblouku dochází k výrazné změně proudu, což má vliv na rychlost odtavování elektrody. Tento princip je možný jen za předpokladu konstantní rychlosti podávání drátu.



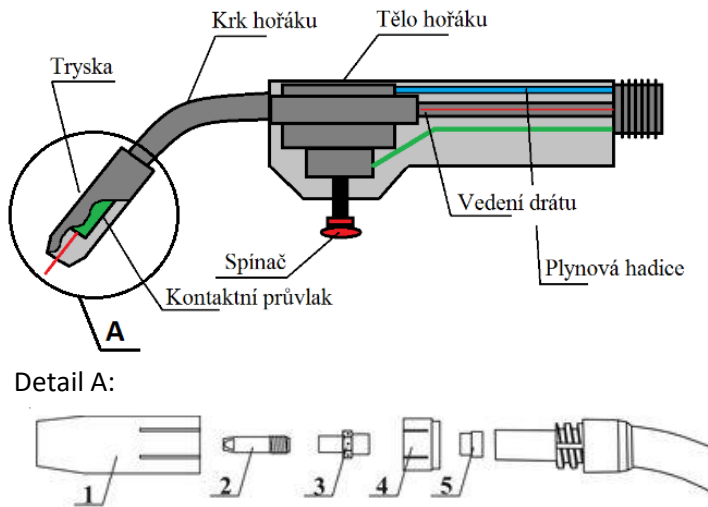
Obr. 9 Voltampérová charakteristika zdroje a oblouku [1]

Podavač drátové elektrody je u poloautomatické metody 135 důležitým komponentem pro úspěšné svařování. Drát musí být dodáván hladce, plynule a s konstantní rychlostí. Bude-li rychlost kolísat, negativně se to projeví na kresbě housenky, rozstříku a dalších vadách. Dodávání drátu je zajištěno podávacím mechanismem, na obr. 10, skládajícího se z jedné, dvou či čtyř kladek, z nichž minimálně jedna je poháněná elektromotorem. K ní je přitlačována silou pružiny druhá kladka, tzv. přitlačná kladka. Kladky mohou mít různý profil drážek dle podávaného drátu. V případě ocelového drátu se jedná o drážku ve tvaru V. Nejobvyklejší dodávání drátu je tlačné. Jedná se v principu o tlačení drátu v bovdenu na vzdálenost až několik metrů. Aby bylo možné tuto vzdálenost překlenout, musí být bovden dokonale průchozí, bez ostrých ohybů a zlomů. Proto se svařovací hořáky vyrábí v délce od 4 do 5 metrů.



Obr. 10 Princip čtyřkladkového (a) a dvoukladkového (b) podavače [14]

Dalším významným komponentem, bez něhož se zařízení neobejde, je svařovací hořák, který je viděn na obr. 11. Ten zajišťuje přívod drátu do svarové lázně, ochranného plynu a napájení elektrickým proudem. Jelikož jsou to velmi tepelně namáhané součásti, je nutno je chladit. Pro nízké výkony jsou chlazeny proudícím ochranným plynem a u vyšších výkonů jsou chlazeny kapalným médiem, nejčastěji destilovanou vodou, která proudí v uzavřeném okruhu.



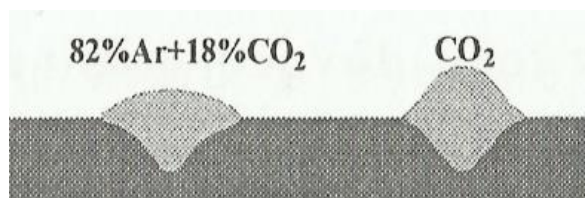
- 1 – kónická plynová tryska, 2 – vodící drátová trubička, 3 – pouzdro na rozváděcí plyn, 4 – kontaktní objímka, 5 – izolační kroužek

Obr. 11 Svařovací hořák [13]

Spuštění a vypínání svařovacího cyklu se provádí tlačítkem umístěným na rukojeti hořáku. Některé moderní zdroje mají na hořáku umístěno také ovládání intenzity svařovacího proudu či lokální odsávání zplodin z místa svařování. Provádí-li svařování robot, toto tlačítko odpadá a řízené spínání a vypínání zajišťuje řídicí jednotka robotu.

2.3 Ochranné plyny

Při svařování tavící se elektrodou je potřeba oblast svarové lázně chránit ochranným plynem před účinky kyslíku a dusíku obsažených ve vzdušné atmosféře. Tyto konkrétní plyny způsobují oxidaci a nitridaci svarového kovu a tím značně zhoršují mechanické vlastnosti. Z hlediska

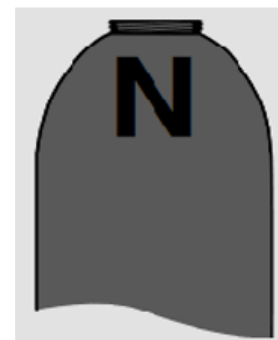


Obr. 12 Vliv obsahu CO₂ na hloubku průvaru [4]

Pro metodu 135 se používají aktivní plyny na bázi oxidu uhličitého. Čistý CO₂ je v současnosti používán jen zřídka. Častěji se zapojují směsné plyny ve složení CO₂ + Ar, Ar + O₂, popřípadě Ar + CO₂ + O₂. Vlivy jednotlivých plynů jsou popsány následně.

- **Oxid uhličitý** je základní složkou při svařování 135. Jedná se o snadno dostupný nehořlavý bezbarvý plyn s hustotou 1,976 kg.m³. Díky vysoké hustotě se snadno využívá při polohách PA, PB a PC, avšak má neblahý vliv na tvorbu kapek. Vysoká hustota způsobuje vysoké povrchové napětí, které se snaží kapku udržet na konci elektrody. Tím se do svarového kovu dostávají kuličky velkého poloměru a při dopadu na materiál se nataví a způsobují těžko odstranitelný rozstřík. Vlivem tepelného účinku elektrického oblouku a výborné vodivosti oxidu uhličitého mají však svary hluboký průvar s dobrým přechodem svarového kovu do základního materiálu. Povrch svarové housenky je nerovnoměrný s větším převýšením.

Čistota plynu CO₂ bývá minimálně 99,5 % s obsahem nečistot a vlhkostí maximálně 0,04 %. Barevné označení láhve je šedé, viz obr. 13.



Obr. 13 Oxid uhličitý [16]

- **Kyslík** je taktéž nehořlavý plyn, ale samotné hoření podporuje. Používá se zřídka ve směsích s argonem (0,03 až 3 %) a ve směsi s argonem, oxidem uhličitým a heliem v rozsahu 1 až 8 %. Vliv má zejména na zvýšení tekutosti svarové lázně a povrchového napětí kovu. Příznivě působí také na odplynění svarové lázně, profil svarové housenky a přechod mezi svarovým kovem a základním materiálem.
- **Směs Ar + CO₂** je universální směsný plyn pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Nejčastěji se používá směs Ar + 18 % CO₂. Tato směs se vyznačuje dobrými svařovacími vlastnostmi, hlubokým závarem, stabilitou elektrického oblouku a hladkým povrchem svaru. Lze svařovat zkratovým, impulzním i sprchovým přenosem kovu.

Při použití vysokých proudů se doporučuje směs Ar + 8 % CO₂. Rychlost svařování je vysoká a svar plochý s nízkým rozstříkem. Z hlediska napětí argon zvyšuje délku oblouku. Tedy platí, že při použití směsi bohatší na argon se napětí nastavuje o 4 až 10 V vyšší. Označení láhve je na obr. 14.



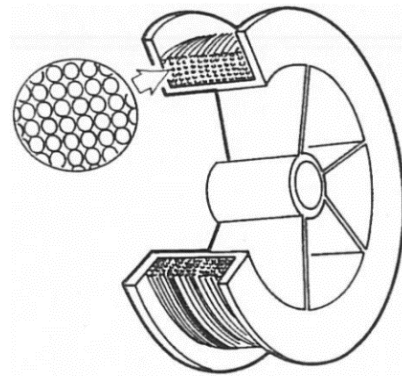
Obr. 14 Inertní směs plynů [16]

2.4 Přídavné materiály

Pro metodu 135 se používají přídavné materiály v podobě plného či plněného drátu, který se odvíjí z cívky umístěné v podavači. Kovový drát je posouván přes svařovací hořák do hořícího oblouku, kde je roztaven a v podobě kapiček přenesen do svarové lázně. Sortiment přídavných materiálů je široký a volba závisí na svařovaném materiálu, především na mechanických a chemických vlastnostech. Mez pevnosti a mez kluzu by měla být ekvivalentní, nebo vyšší, než je u základního materiálu.

Drát je navinut na drátěné či plastové cívce o hmotnosti 5 až 30 kg, viz obr. 15. Jedná-li se o sériovou robotizovanou výrobu, dodávají se dráty balené ve svitku v lepenkovém paketu o hmotnosti až 200 kg. Dráty jsou chráněny polyetylenovou fólií a musí být skladovány v prostředí o relativní vlhkosti do 50 %.

Dráty od výrobce ESAB jsou označovány dvěma hlavními číslicemi, tečkou, a dvěma pořadovými číslicemi. V případě použití elektrody OK 12.51 značí první číslice mechanizovaný způsob svařování a druhá číslice vinutý drát pro svařování konstrukčních ocelí.



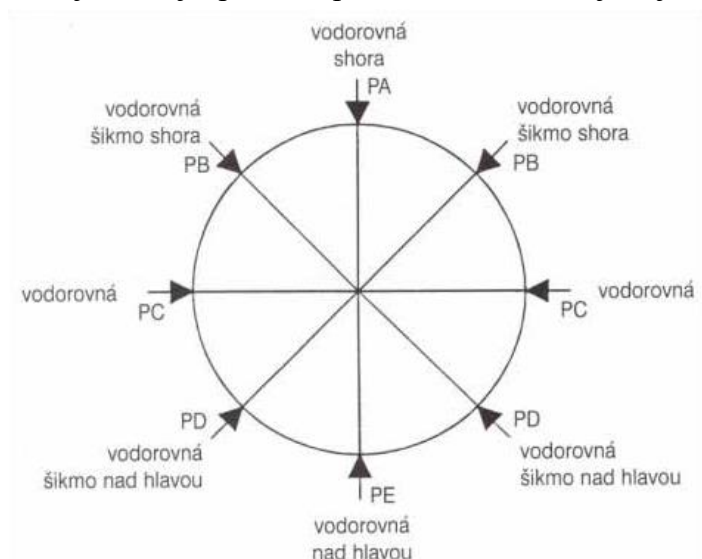
Obr. 15 Svařovací drát [1]

Tab. 1 Chemické složení elektrody ESAB OK 12.51

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	Ti Zr
0,078	0,85	1,46	0,013	0,012	0,03	0,04	0,01	0,07	0,004	0,005	0,01

2.5 Polohy svařování

Podle normy ČSN EN ISO 6947 existuje pět základních poloh svařování. Pro názornost jsou tyto polohy vykresleny do kruhu v obr. 16. Nejvhodnější polohou pro svářeče, která zajišťuje i komfort a nízké požadavky na kvalifikaci, je poloha vodorovná shora (PA). Při této poloze nemá roztavený kov tendenci stékat a příznivě se projevuje i na tvorbě a kresbě svarové lázně. Oproti tomu je nejnáročnější poloha vodorovná nad hlavou (PE). Rizikem je možné odkapávání roztaveného kovu a nepříznivý vliv na tvorbu svarového kovu.



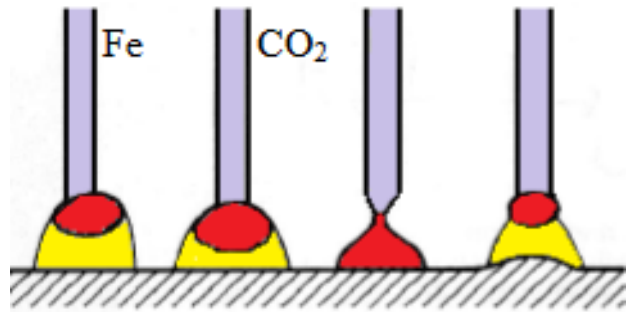
Obr. 16 Schéma poloh svařování [19]

2.6 Přenos kovu v oblouku

Přenos kovu ze svařovacího oblouku do svarové lázně může probíhat několika způsoby v závislosti na svařovacích parametrech, ochranném plynu a přídavném materiálu.

- **Zkratový přenos** je vhodný pro svařování tenkých plechů či kořenových vrstev ve všech polohách. Realizuje se při poměrně nízkém napětí v rozmezí 14 až 22 V. Při zkratovém přenosu dochází k přerušování oblouku zkratem a oddělení kapiček od elektrody (viz obr. 17). Je doprovázen rozstříkem kovu.

Při vysokém napětí a nízkých proudech je frekvence kapek malá a rozstřík velký. Naopak se snižujícím se napětí roste počet zkratů. Přenos je možný prakticky ve všech ochranných plynech.



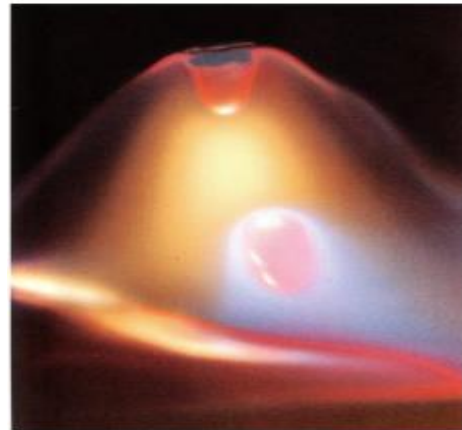
Obr. 17 Průběh zkratového přenosu [18]

- **Kapkový přenos** vzniká při vyšším napětí a delším oblouku, který neumožní vytvoření zkratu. Nazývá se také jako „přechodový oblouk s nepravidelnými zkraty“. Uplatňuje se u svařování středně velkých tlouštěk ve směsích Ar + CO₂. Napětí na oblouku je větší než u zkratového přenosu, přibližně 25 až 35 V, a proud od 200 do 300 A. Kapičky se odtavují s frekvencí 5 až 50 kapek za sekundu. Jejich velikost závisí na velikosti proudu. Se zvětšujícím se proudem velikost klesá. Vyznačuje se nestabilním hořením, velkým rozstříkem kovu a hrubou svarovou housenkou.
- **Sprchový přenos** na obr. 18 nastává při vysoké proudové hustotě svařovacího proudu a delším oblouku, obvykle 200 až 500 A. Nedochozí zde ke zkratu a kapky tekutého kovu jsou jemně rozptýleny. Používá se pro svařování větších tlouštěk za použití směsného plynu bohatého na argon. V čisté atmosféře CO₂ nelze přenos realizovat, jelikož nevznikají drobné kapky z důvodu vysokého povrchového napětí. Při směs Ar + 18 % CO₂ se díky snadné ionizaci plynu obklopuje plazma i konec tavící se elektrody, a tím se urychluje její ohřev. Proces je charakteristický velkou hloubkou závaru, úměrného se zvyšující se hodnotou proudu. Oblouk při přenosu nezhasíná a do základního materiálu se tak dostává velké množství tepla.

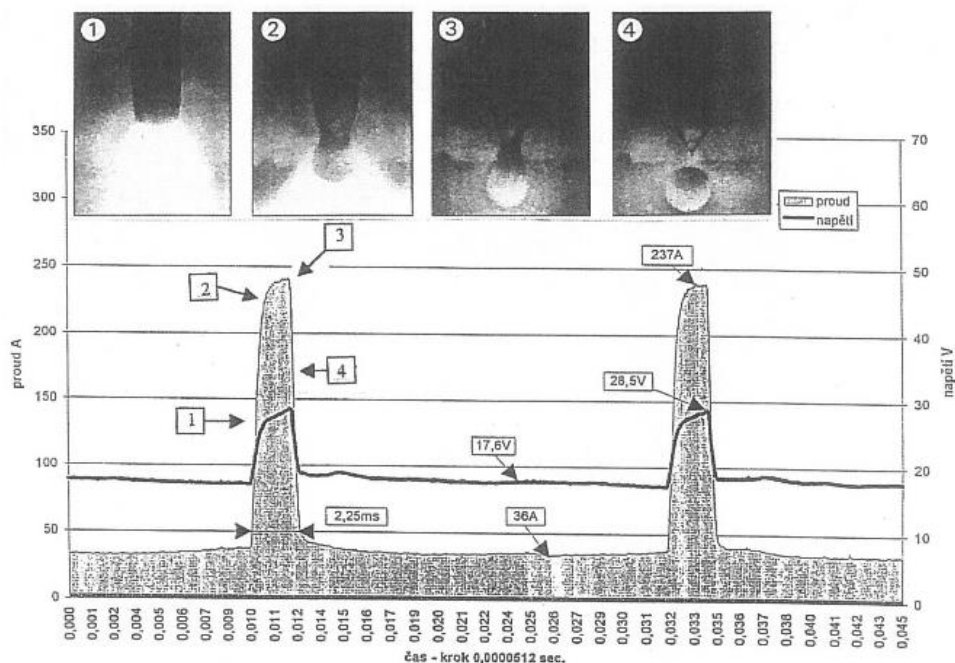


Obr. 18 Sprchový přenos kovu [22]

- **Impulsní přenos** je kombinace zkratového a sprchového oblouku, viz obr 19 a 20. Tvorba kapiček a oddělení od elektrody je řízeno elektronicky svařovacím zdrojem. Pulsující proud se pravidelně mění mezi hladinou základního (nižšího) proudu a impulsního (vyššího) proudu. Základní proud má jen 20 až 50 A a slouží k udržení ionizace sloupce oblouku. Impulsní proud je tvarově i časově řízený a má za následek odtavení kapek přídavného materiálu. Nejvýraznější přednost má však u svařování tenkých plechů a polohových svarů. Díky nastavení proudu, napětí, frekvence a amplitudy poskytuje zdroj široké aplikační možnosti. K ochraně svarové lázně u uhlíkových ocelí se používá směs argonu s příměsí 8 % oxidu uhličitého.



Obr. 19 Impulsní přenos kovu [22]



Obr. 20 Impulsní bezzkratový přenos [22]

- **Přenos rotujícím obloukem**, jež je viděn na obr. 21, se využívá především při strojním svařování ocelí velkých průřezů. Vysoký tepelný příkon oblouku a vysoké svařovací rychlosti zajišťují vysokou produktivitu. Vlivem vysoké proudové hustoty je konec drátu odporovým teplem nahřát téměř na teplotu tavení a elektromagnetickým polem roztáčen. Rotační oblouk umožňuje široký a hluboký závar s miskovým profilem. Ochranným plynem bývá argon s vysokým obsahem helia.



Obr. 21 Rotující oblouk [22]

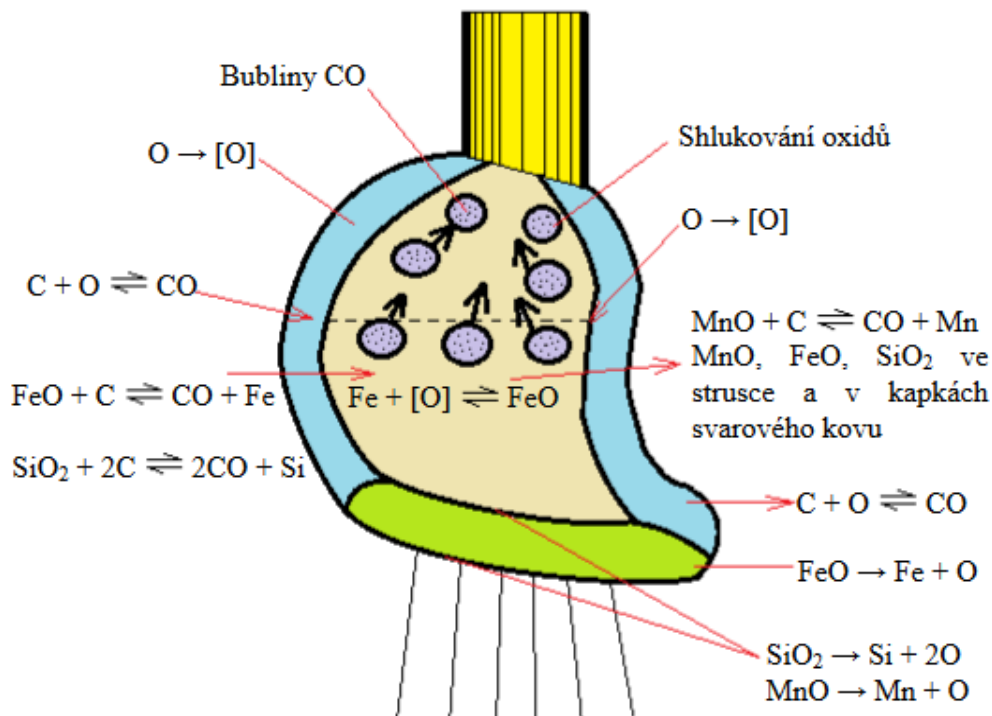
2.7 Metalurgické reakce

Při svařování v ochranných plynech s aktivní atmosférou dochází k reakci kovu a plynu, viz obr. 22. Tyto reakce jsou dle složení plynu trojího druhu: redukční, oxidační a nauhličující. Redukční účinek má vodík a směsi s vodíkem. Oxidaci tavné lázně způsobuje kyslík a nauhličený plyn s obsahem uhlíku.

Z hlediska metalurgických reakcí jsou nejdůležitější oxidační a desoxidační pochody probíhající v kapkách roztavené elektrody a svarového kovu. Reakce ovlivňují tvar a povrch svarové housenky, vnitřní čistotu svaru a přechod mezi svarovým kovem a základním materiálem. K hlavním činitelům se řadí disociovaný kyslík schopný slučovat se s prvky v tavenině. Kyslík se do taveniny dostává z ochranného plynu disociací molekul CO_2 rozpadem na $\text{CO} + \text{O}$ vlivem vysoké teploty.

Při přechodu do tavné lázně jsou vznikající kapky obohaceny kyslíkem vlivem exotermické reakce. Vzniklé teplo je difúzí vedeno do okolního materiálu, čímž vzniká hlubší a oválnější svarová lázeň než u argonu.

Vzhledem k slučování oxidu železa s uhlíkem se tvoří bubliny CO , které jsou hlavní příčinou pórovitosti svarů. Z toho důvodu je potřeba provést desoxidaci taveniny vazbou kyslíku na uhlík a prvky s vyšší afinitou ke kyslíku než železo. Desoxidačními prvky jsou Mn a Si obsažené v přídavném materiálu. Tyto legury vytvářejí s kyslíkem oxidy, které jsou okamžitě vyplaveny do strusky. Kyslík má mimo jiné pozitivní vliv i na odplynění, jelikož snižuje povrchové napětí a viskozitu svarové lázně. Při tuhnutí se na desoxidaci nejvíce podílí Si , V a Cr . Před další technologickou operací, nebo před navařením další housenky, je nutno strusku z povrchu svaru odstranit.



Obr. 22 Reakce ochranného plynu s natavenou elektrodou [1]

2.8 Robotické svařování

Základem robotizovaného pracoviště je průmyslový robot s příslušným řídicím systémem a ovládacím panelem.

Svařovací roboty jsou automatické, univerzální, programované manipulační zařízení, které představují výkonnou a přesnou svařovací techniku. Pomocí nich je možné vytvořit přesné, obtížně dostupné svary s vysokou produktivitou a spolehlivostí. Pro nastavení polohy a orientace nástroje podle požadavků slouží robotická ramena a klouby. Obvykle se průmyslové roboty vyrábějí s šesti stupni volnosti. V dnešní době jsou roboty poháněny elektrickými motory a někdy i v kombinaci s pomocnými pneumatickými pohony.

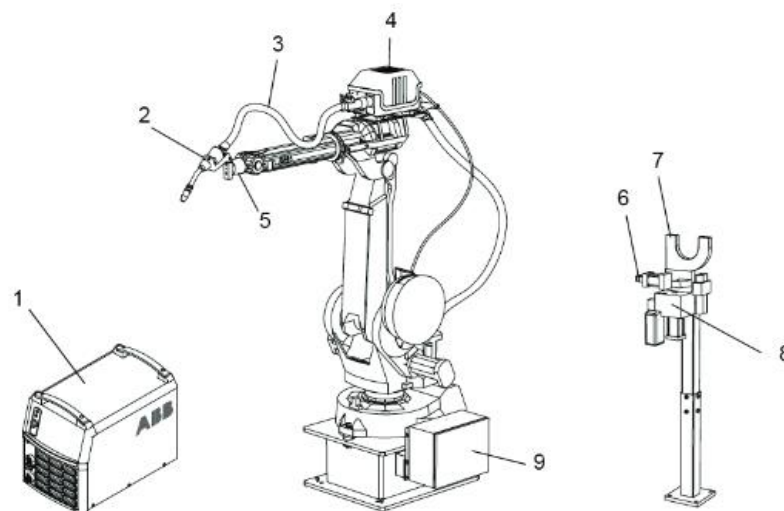
U svařovacích robotů se jednotlivé části odvíjí od metody svařování. U obloukového svařování musí být přídavné zařízení k podávání drátu. Důležitou částí je technologická hlavice robotu, jejíž konstrukce musí umožňovat dobrý přístup do místa svaru. Příklad svařovací hlavice upevněné na robotickém rameni je na obr. 23.



Obr. 23 Technologická výstupní hlavice pro obloukové svařování [24]

2.8.1 Svařovací robotizované pracoviště

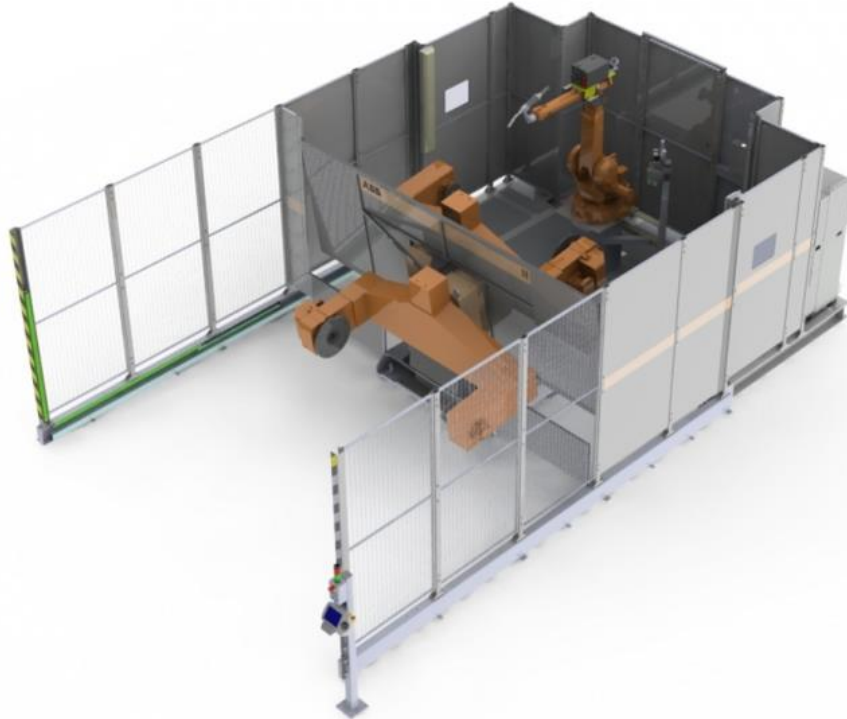
Vyjma základního příslušenství, jako je svařovací zdroj, hořák a podavač drátu, je pracoviště vybaveno doplňkovými prvky, které zvyšují automatizaci. Jedna z priorit při konstrukci je bezpečnost. Z toho důvodu je na přírubě robota používán kolizní senzor, který v případě kontaktu s překážkou ihned zastaví veškeré pohony. Tím se zamezí poškození nákladných prvků, jako je například hořák. Dalším doplňkovým prvkem bývá jednotka na čištění hořáku a zastřihávání drátu, viz obr. 24. K této jednotce robot najíždí automaticky po několika svařovacích cyklech a dojde k automatické údržbě. Je tomu tak z důvodu zamezení chyb, které vznikají při zanášení hlavice hořáku během svařování a tím zhoršení kvality svarů.



Obr. 24 Příslušenství pro obloukové svařování: 1 – svařovací zdroj, 2 – svařovací hořák, 3 – svazek hadic, 4 – jednotka na podávání drátu, 5 – kolizní senzor, 6 až 8 – jednotka na čištění hořáku a zastřihávání drátu, 9 - příslušenství pro řízení procesu [24]

Velmi často se u robotizovaných svařovacích pracovišť setkáváme také s různými typy polohovadel, jejichž pohyb je svázán s pohybem robotu. Robot tak svařuje při současném pohybu svařované součástky uchycené v polohovadle.

Svařovací pracoviště robota bývá obvykle ohrazeno tzv. kabinou, kde jsou všechny prvky, včetně polohovadel a senzorů integrovány do jedné buňky, viz obr. 25.



Obr. 25 Svařovací kabina [25]

Výhodou je ochrana obsluhy před škodlivým zářením. Kabiny bývají s otočným stolem, polohovadlem a se dvěma pracovními stanovišti. Z jedné strany obsluha ustavuje dílce k svaření, na druhé straně dochází ve stejnou chvíli k svařování.

3 PROBLEMATIKA SVAŘITELNOSTI [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [38], [43], [59], [60]

Z obecného hlediska vyjadřuje svařitelnost komplexní charakteristiku ocelí, ovlivňovanou procesem svařování, s cílem získání nerozebíratelného spoje předepsané kvality. Očekávají se požadované vlastnosti spoje a spolehlivý a bezpečný provoz včetně životnosti za daných provozních podmínek.

Technologická svařitelnost, která je předmětem práce, vyjadřuje důsledek procesu svařování s ohledem na vlastnosti svarových spojů. Zahrnuje metodu svařování charakterizovanou tepelným výkonem, přídatný materiál, parametry svařování, proces umístění a kladení housenek svaru a tepelné zpracování po svařování.

Svařitelnost jednotlivých kovových materiálů a jejich slitin je velmi rozličná, a to především z hlediska jejich chemického složení – obsahu uhlíku, nečistot, legujících prvků, povrchové aktivních prvků, vodíku a tloušťky svařované součásti. Některé oceli lze tak svařovat bez jakýchkoliv omezení, v jiných případech je potřeba použít předehřev, omezit teplený příkon či svarový spoj tepelně zpracovat.

3.1 Charakteristika bórových ocelí

Bórové oceli jsou nízkolegované oceli určené k zušlechťování. Chemické složení ocelí je velice podobné uhlíkovým nelegovaným ocelím. Obsahují okolo 0,3 hm. % uhlíku, takže bez větších problémů jsou svařitelné. Nejvýznamnějšími prvky jsou mangan v množství 1 až 2 hm. % a bór, který je zde zastoupen v nepatrném měřítku, několika tisícin hm. %. Byť se jedná o stopové množství tohoto prvku, má to obrovský vliv na mechanické vlastnosti dané oceli. Ocel je výrobcem dodávána po válcování za tepla tak, aby ji bylo možné vhodným způsobem tepelně zpracovat dle konkrétních požadavků.

3.1.1 Vliv bóru

Bór se pro svou příznivou cenu a schopnost vytvrzovat strukturu nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí při kalení stal velice rozšířeným legujícím prvkem. Vysokých mechanických hodnot se dosahuje zušlechtěním, kdy mez pevnosti dosahuje až 1800 MPa a úměrně roste i mez kluzu a tvrdost. Při legování bórem dosahují nízkouhlíkové oceli také lepší prokalitelnosti, přibližně stonásob větší než u ocelí obsahujících uhlík nad 0,4 hm. % v kombinaci s nízkými obsahy Cr, V, Mn a Ni. Při použití vyšších obsahů bóru se však prokalitelnost snižuje vlivem vylučování karbidů boru $Fe_{23}(BC)$ na hranici austenitických zrn.

Tab. 2 Chemické složení (hm. %) použitých borových ocelí

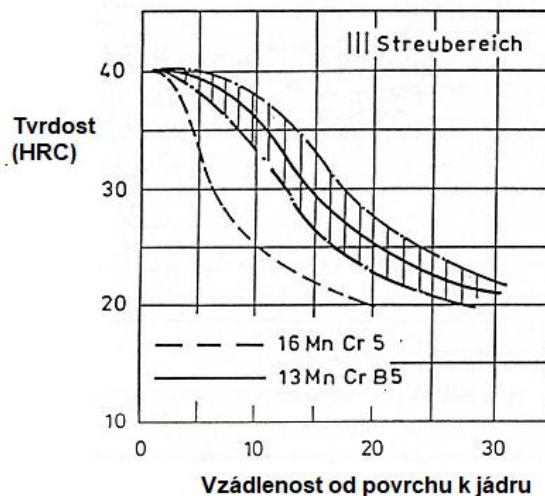
Typ oceli	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	B	Ti
30MnB5	0,33	0,29	1,28	0,01	0,004	0,21	0,07	0,03	0,01	0,11	0,027	0,0029	0,023
27MnCrB5-2	0,28	0,25	1,23	0,013	0,009	0,47	0,08	0,02	0,01	0,15	0,022	0,0045	0,030

Účinnost boru je spjata s obsahem uhlíku v oceli. Nejlepších vlastností se dosahuje při obsahu uhlíku do 0,35 hm. %. Při obsahu 0,8 hm. % je již jeho účinek zanedbatelný a při hodnotách 1,6 hm. % vliv uhlíku zcela zaniká. Kalitelnost bórové oceli je rovněž závislá na obsahu kyslíku, uhlíku a dusíku. Bór reaguje s kyslíkem za vzniku oxidu boritého B_2O_3 , s uhlíkem za vzniku borokarbidu železa $Fe_{23}(BC)_6$ a s dusíkem na nitrid boritý BN. Je tedy nezbytné použití dostatečného množství prvků jako je hliník, křemík, titan a zirkon. Ty mají vyšší afinitu ke kyslíku, dusíku a uhlíku, a vytváří tak snadněji sloučeniny s již zmíněnými prvky. Tím je zabráněno ochuzování oceli o bór.

Pro zlepšení kalitelnosti musí být bór v atomárním stavu, na což je potřeba dát pozor už při výrobě. Ocel může přijít o své účinky bóru nesprávným tepelným zpracováním, především vysokými teplotami nad 1000 °C. Teplota austenitizace u těchto ocelí je zpravidla o 100 °C nižší než u stejných ocelí bez použití bóru.

Tvrdość ocelí na povrchu součásti neovlivňuje bór, ale pouze martenzit. Není tedy žádný rozdíl v tvrdosti na povrchu oceli obsahující bór a oceli se stejným chemickým složením bez bóru. Rozdíl tvrdosti se projevuje až v hloubce pod povrchem, z čehož lze vyvodit, že bór pouze zvyšuje prokalitelnost, nikoliv tvrdost.

Na obr. 26 jsou znázorněny křivky prokalitelnosti nízkolegované oceli s obsahem bóru (13MnCrB5) ve srovnání s ocelí bez bóru (16MnCr5).



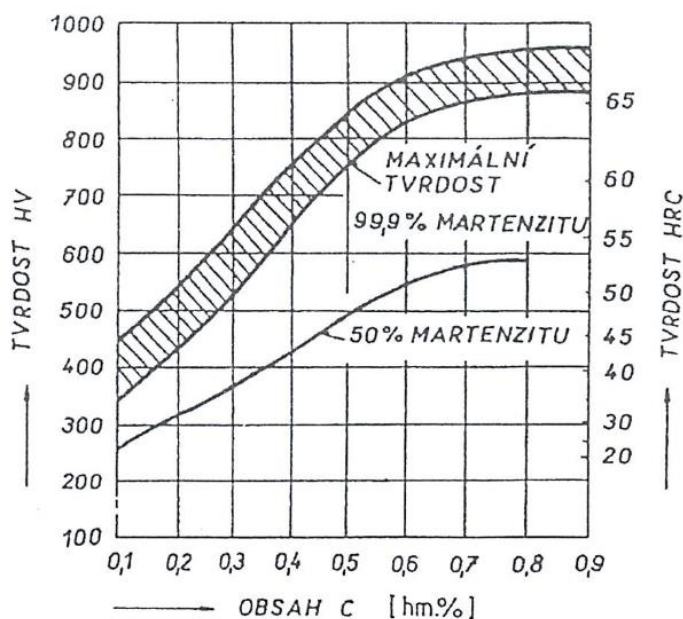
Obr. 26 Diagram prokalitelnosti oceli s bórem a bez bóru [31]

3.1.2 Svařitelnost bórových ocelí

Bórové oceli jsou vhodné pro svařování všemi známými svařovacími postupy, ať už ručně nebo automatizovaně. Zvláště výhodné je svařovat odporovým bodovým svařováním, elektrickým obloukem s ochrannou atmosférou nebo laserem. Problém není ani se svařováním různých tloušťek či s rozdílnými materiály. Kvalita spoje však závisí na postupu svařování, podmínkách a přídavném materiálu, který by měl mít nízký obsah vodíku.

Při svařování ocelí v kaleném a popuštěném stavu je třeba dát pozor na možnost popouštění TOO. To může snížit pevnost spoje ve srovnání se základním materiálem, který byl vytvrzen předchozím procesem tváření za tepla. Z pohledu obsahu prvků je důležité hlídat u bórových ocelí obsah síry a fosforu.

Ty by měly být v ocelích zastoupeny v co nejmenší míře, jelikož způsobují zkrěhnutí materiálu. Obecně platí, že se zvyšujícím se obsahem uhlíku v ocelích stoupá pevnost a tím i tvrdost. Při svařování ocelí o vyšším obsahu uhlíku, konkrétně nad 0,25 hm.%, tak v TOO narůstá tvrdost vlivem martenzitické struktury, viz obr. 27. Současně se snižuje plasticita a vzniká vnitřní pnutí, které může vést až ke vniku trhlin. Proto se v TOO požaduje maximální tvrdost 350 HV, která odpovídá 50 % martenzitu ve struktuře u oceli s obsahem 0,25 % uhlíku.



Obr. 27 Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku a martenzitu [28]

Hlavním kritériem pro stanovení svařitelnosti je tedy zmíněný uhlík.

Obsahuje-li ocel méně než 0,25 hm. % uhlíku, pak není nutné zajišťovat zvláštní podmínky. Překročí-li obsah 0,25 hm. %, je nutné použít opatření k zamezení vzniku trhlin. K hlavním opatřením se řadí předehřev, který má za následek snížení rychlosti ochlazování a zabránění tvorby martenzitické struktury.

Další z možností, jak dodat materiálu teplotu, je svařovat s vysokým tepelným příkonem. Tím se dostane do materiálu více vneseného tepla, ohřeje se okolí svaru a ochlazování probíhá pomaleji. Je však potřeba použít elektrody větších průměru, což ne vždy vyhovuje podmínkám svařování. Není výhodné svařovat ani mohutné svařence, kdy s tloušťkou stěny vzrůstá i rychlost ochlazování.

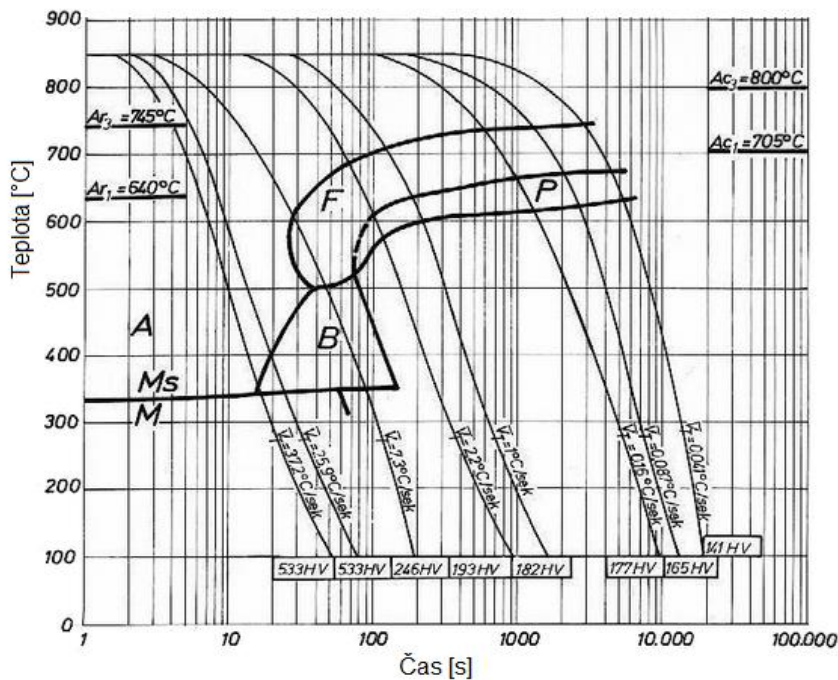
Svarové spoje bórových ocelí se obvykle tepelně zpracovávají. Jelikož je materiál svařován v kaleném a popuštěném stavu, žihá se na snížení vnitřního pnutí při teplotách nižších, než je teplota A_{c1} .

Na svařitelnost má velký vliv i podíl ostatních prvků v materiálu zmíněných níže. Pro zaručenou svařitelnost je potřeba toto množství dodržet.

- **Křemík** je feritotvorný desoxidační prvek. Jeho rozpustnost ve feritu je až 14 % a zvyšuje jeho pevnost. Je-li podíl křemíku pod 0,1 hm. %, ocel je neuklidněná. Maximální množství pro zaručenou svařitelnost je 0,45 hm. % Si.
- **Mangan** patří mezi austenitotvorné prvky. Při použití manganu se zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti, aniž by byla snížena plasticita. Obvykle se dosahuje obsahu 0,3 až 1,7 hm. % manganu. Pro své desoxidační účinky a nízkou cenu se používá k výrobě uklidněných ocelí. Nevýhodou je malá difúzní rychlost.
- **Fosfor** zvyšuje mez kluzu, mez pevnosti a odolnost proti atmosférické korozi. Řadí se mezi škodlivé prvky, jelikož způsobuje zkřehnutí za studena a snižuje plasticitu ocelí. Proto se jeho obsah omezuje na max. 0,03 hm. %.
- **Dusík** je doprovodný prvek, který se vyskytuje vždy v závislosti na použité technologii výroby. Způsobuje vznik nitridů, které zvyšují pevnost a tvrdost, ovšem razantně snižují plastické vlastnosti. Nejčastěji se setkáme s křehkostí v oblasti 100 až 350 °C. Dusík se eliminuje přidáním Al, Ti nebo Zr.
- **Vodík** je nežádoucím prvkem, který se dostává do svaru ze vzdušné vlhkosti při tavení, tedy i při svařování. Vodík se vyskytuje v kovu v atomárním stavu nebo v sloučeninách s kovem. Vyznačuje se vysokou difúzní rychlostí a dokáže difundovat i při pokojových teplotách. Při svařování způsobuje oduhličení a vznik pórů ve svarovém kovu, tvorbu trhlin v tepelně ovlivněné oblasti i ve svarovém kovu. Zdrojem vodíku při tavném svařování je především vlhkost obalu elektrod, povrchu základního materiálu a přídavného materiálu, zbytky maziva či vlhkost ochranného plynu. Obsah vodíku v oceli lze snadno snížit ohřevem na 200 až 600 °C.

3.2 Uhlíkový ekvivalent a předehřev ocelí

Předehřev materiálu v oblasti svařování je jedna z důležitých prevencí před vznikem nežádoucích struktur a s tím spojenými trhlinami. Při předehřevu dochází k ohřevu základního materiálu na určitou teplotu před samotným svařováním. Tím se docílí zpomalení ochlazování svarové lázně a tepelně ovlivněné oblasti. V diagramu ARA, jenž je viděn na obr. 28, to znamená posunutí křivky vpravo a nárůstu času $t_{8/5}$, který udává dobu chladnutí z teploty 800 °C na 500 °C.



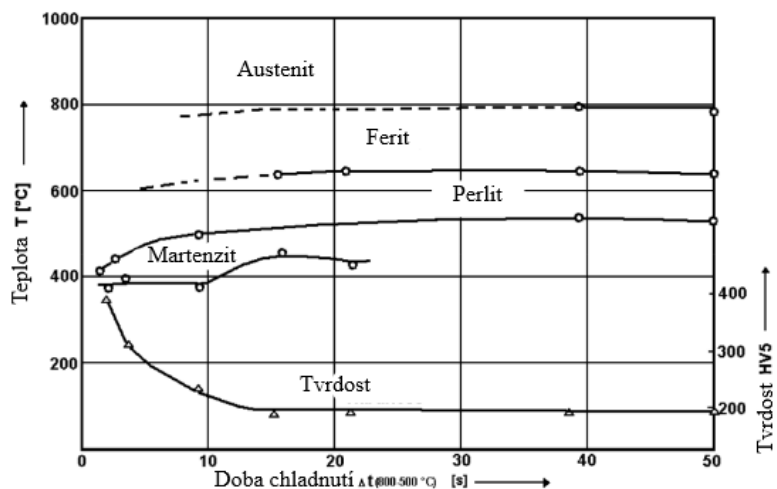
Obr. 28 ARA diagram oceli 27MnCrB5-2 [32]

Tyto křivky v ARA diagramu zaznamenávají přeměnu fází při ochlazování z austenitizační teploty. Výsledná struktura závisí na rychlosti ochlazování, tedy i na ochlazovacím médiu. Feriticko-perlitické struktury se u bórových ocelí dosahuje velmi pomalým ochlazováním. V praxi však dochází spíše ke strukturám martenziticko-feritickým. Vznik této nežádoucí základné struktury je ovlivněn především množstvím uhlíku v oceli. Vzniká především v TOO z důvodu rychlého ochlazování dané oblasti, a tedy zastoupení martenzitu v matici.

V praxi se využívá modifikovaný ARA diagram, zvaný jako ARA diagram „in situ“ na obr. 29. Od klasického diagramu se liší vodorovnou osou, na které je v tomto případě hodnota času $t_{8/5}$. Diagram se využívá pro přesnější odhad výsledné struktury svarového spoje, ovšem pro každé konkrétní svařovací podmínky musí být zhotoven jeden diagram.

Mimo vznik výsledné struktury se předehřev podílí i na dalších vlastnostech svarů. Pomalé chladnutí má příznivý dopad na difuzi vodíku ze svarového kovu při teplotách 300 °C až 100 °C. Tím se zamezí vzniku studených trhlin.

Teplota předehřevu závisí především na chemickém složení oceli, jenž charakterizuje uhlíkový ekvivalent. Je třeba brát v potaz i očekávaný obsah vodíku, či příkon svařování. Výpočet těchto teplot je pak odvozen ze zkoušek praskavosti. Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu existuje v praxi celá škála vzorců. Zahrnují vliv chemického složení a tloušťku svařovaného materiálu.



Obr. 29 Diagram ARA "in situ" [33]

- Uhlíkový ekvivalent C_e

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad [hm. \%] \quad (3.1)$$

kde s je tloušťka plechu (mm)

Výpočet C_e ze vzorce 3.1 nesmí přesáhnout 0,50 %, aby bylo možno považovat ocel za svařitelnou bez opatření. Horní hranice obsahu prvků v ZM je uvedena v tab. 3.

Tab. 3 Maximální obsahy prvků pro uhlíkový ekvivalent C_e [28]

Prvek	C	Mn	Cr	Ni	V	Cu
Max. obsah [%]	0,22	1,60	1,00	3,00	0,14	0,30

- Pro oceli s obsahem uhlíku vyšší než 0,18 hm. % byl zaveden mezinárodním svářečským institutem (IIW/IIS) vzorec 3.2. Je využíván pro oceli nelegované, jemnozrné a nízkolegované.

$$C_e(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad [hm. \%] \quad (3.2)$$

Tento vztah lze použít pro oceli s maximálním množstvím prvků uvedených v tab. 4.

Tab. 4 Maximální množství prvků obsažených v oceli pro výpočet $C_e(IIW)$ [28]

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni	V
Max. obsah [%]	0,25	0,80	1,70	0,90	1,00	0,75	2,50	0,20

- Uhlíkový ekvivalent CET ve vzorci 3.3 se používá pro nízkolegované vysokopevnostní oceli a je prakticky nepoužívanějším výpočtem.

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [hm. \%] \quad (3.3)$$

Mezní hodnoty legujících prvků jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Maximální množství prvků obsažených v oceli pro výpočet CET [28]

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Ti	B
Max. obsah [%]	0,25	0,8	1,7	1,50	0,7	0,75	2,5	0,18	0,12	0,005

U výpočtu ekvivalentu CE musí být splněno: $CE \leq 0,45 hm. \%$, $C \leq 0,20 hm. \%$ a svařovaná tloušťka $s \leq 0,25 mm$. Potom není potřeba provádět žádné opatření včetně předehřevu. Samotná hodnota uhlíkového ekvivalentu má vypovídající hodnotu o sklonu zkoumaného materiálu ke tvorbě zákalné struktury ve svarovém kovu či TOO. Z této hodnoty se následně počítá teplota předehřevu.

Teplotu předehřevu je možno určit výpočtem nebo experimentálně. Mezi experimentální způsoby určení řadíme zkoušku praskavosti dle Tekkena, CTS test a další. Vzhledem k náročnosti experimentu, ceně a omezení na jeden testovaný kus, je v praxi volena spíše

výpočtová metoda za pomoci empirických vztahů a diagramů. Jednou z možností je výpočet teploty přehřevu dle Séferiána ve vzorci 3.4.1.

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{C_P - 0,25} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.4.1)$$

kde T_P je teplota přehřevu

$$C_P = C_C + C_S \quad (3.4.2)$$

$$C_C = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad (3.4.3)$$

$$C_S = 0,005 \cdot s \cdot C_C \quad (3.4.4)$$

a s prezentuje tloušťku plechu v mm.

Tento výpočet přehřevu je určen pro uhlíkové oceli s obsahem $C > 0,10$ hm. %.

3.3 Vnesené teplo a jeho vliv na TOO

Vlivem zdroje tepla při svařování dojde k lokálnímu krátkodobému nahřátí materiálu na vysokou teplotu. Pro zajištění dostatečné velikosti natavení se zavádí pojem vnesené teplo, které určuje množství dodaného tepla na jednotku délky svaru.

Množství vneseného tepla se stanoví dle rovnice 3.5:

$$Q_s = \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} \cdot \eta \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

Q_s .. specifické vnesené teplo [kJ.mm⁻¹],

η tepelná účinnost přenosu tepla [-],

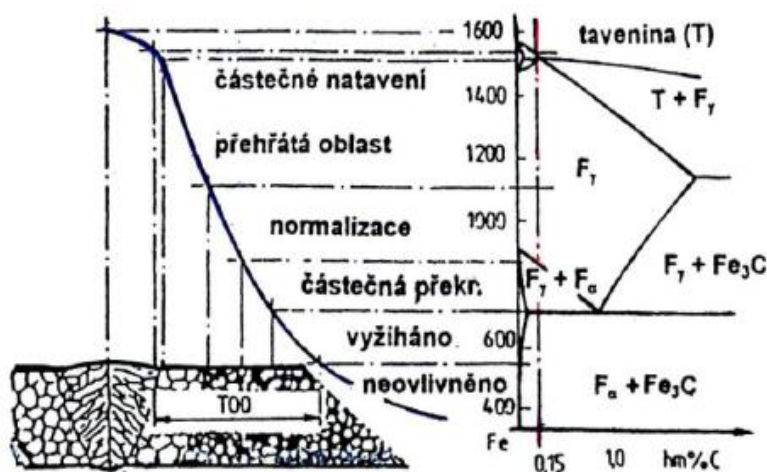
U ... svařovací napětí [V],

I svařovací proud [I],

v rychlost svařování [mm.s⁻¹], (3.5)

kde účinnost η pro metodu 135 považujeme v rozmezí 0,66 až 0,75.

V důsledku vodivosti kovu však dochází k ohřevu blízkého okolí oblasti. Oblast teplem zasaženou nazýváme teplem ovlivněná oblast (TOO), v níž dochází ke změnám mikrostruktury. V kovech s polymorfní přeměnou (oceli) dochází v TOO k výrazným strukturálním změnám, které mají vliv na kvalitu a vlastnosti spojů. Při svařování ocelí můžeme TOO rozdělit na charakteristická pásma dle obr. 30.



Obr. 30 Teplotní účinky na strukturu svarového spoje [28]

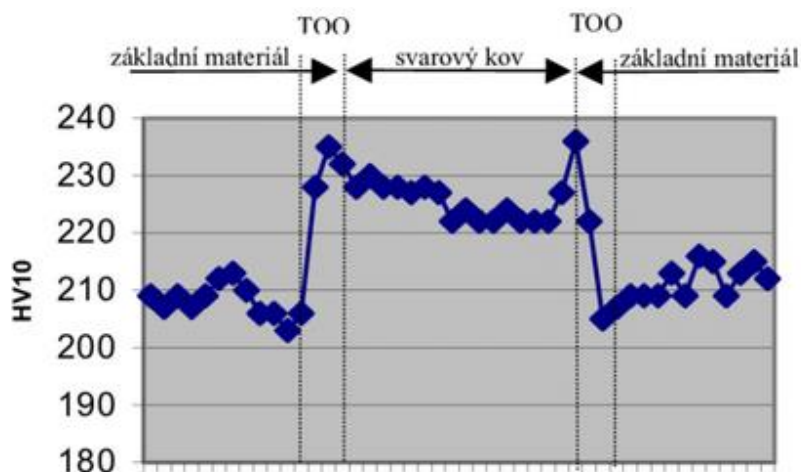
1. Oblast částečného natavení je oblast přechodu ze svarového kovu do TOO. Většinou se tato oblast redukuje na plochu (je zde minimální rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu).
2. V přehřáté oblasti s teplotami nad A_3 dochází k intenzivnímu růstu primárních zrn (teploty nad $1250\text{ }^\circ\text{C}$).
3. Část s úplnou transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.
4. Oblast s neúplnou polymorfni přeměnou mezi teplotami A_1 a A_3 .
5. Změny tuhého roztoku Fe_α pod teplotou A_1 .

Pro různé technologie se šířka TOO liší a je závislá na svařovacích parametrech. U svařování metodou 135 je šířka jednotlivých pásem charakterizovaná tab. 6.

Tab. 6 Orientační šířka jednotlivých pásem TOO [28]

Technologie svařování	Šířka TOO [mm]		
	nad A_1	nad A_3	přehřátá oblast
135	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3

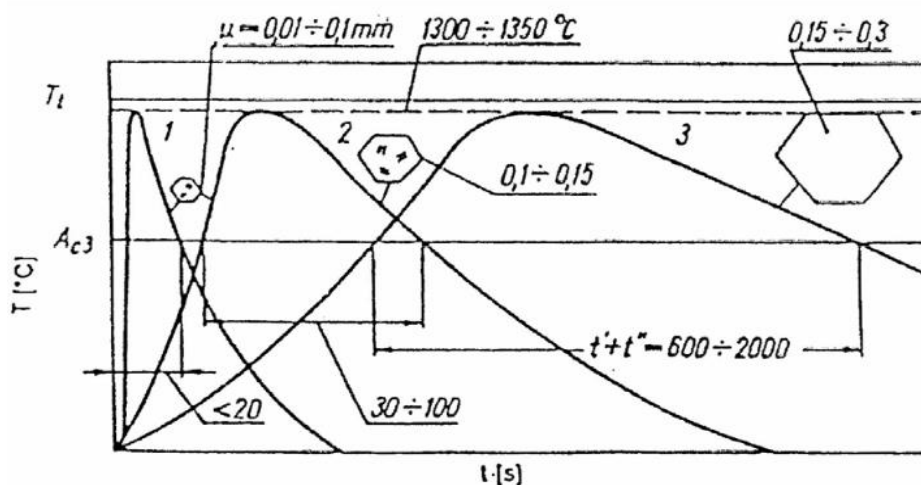
Tepelně deformační cykly svařování vedou k poklesu pevnosti v TOO zejména při svařování legovaných, zušlechťených a termomechanicky zpracovaných ocelí. Doporučuje se tedy minimalizovat vnesené teplo tak, aby šířka popuštěné oblasti byla co nejmenší. Pevnost pásem TOO se s ohledem na malou šířku zkouší na vzorcích se simulovaným svařovacím cyklem nebo nepřímo měřením tvrdosti, viz obr. 31. Z obrázku je patrné výrazné zvýšení tvrdosti v oblasti nad teplotou přehřátí a pokles v okolí teplot A_1 . Průběh tvrdosti a její maximální hodnota závisí na chemickém složení oceli, použitém příkonu či předehřevu, které ovlivňují dobu chladnutí $\Delta t_{8/5}$. S ohledem na maximální tvrdost svarových spojů se požadují hodnoty tvrdosti v rozmezí HV 340 až 450.



Obr. 31 Charakteristický průběh tvrdosti svarovým spojem [36]

V průběhu svařování dochází v pásmu přehřátí k růstu zrn. Velikost růstu zrn závisí na chemickém složení oceli a na teplotním ovlivnění vlivem měrného příkonu svařování. Malý růst zrn se očekává při svařování elektrickým obloukem obalovanou elektrodou a naopak, extrémně velká zrna se předpokládají u elektrostruskového svařování viz obr. 32.

Hrubé zrna razantně zhoršuje plasticitu oceli, brzdí kinetiku rozpadu austenitu za vzniku Widmannstättenovy struktury a zvyšuje náchylnost k praskání. U korozivzdorných ocelí vlivem vysokého prohřátí dochází ke ztrátě korozní odolnosti vlivem vylučování precipitátu chromu.



Obr. 32 Růst zrna při svařování; 1 – svařování obalovanou elektrodou, 2 – svařování automatem pod tavidlem, 3 – elektrostruskové svařování [28]

3.4 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování je technologická operace, při níž se řízeně využívá fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu s cílem získat požadované mechanické, technologické či jiné vlastnosti oceli. Při tepelném zpracování se nejčastěji využívá řízených změn teploty (tepelné zpracování – TZ) nebo změn chemického složení povrchových vrstev a teploty (chemicko-tepelné zpracování – CHTZ). Technologie tepelného zpracování se odráží o teorii fázových přeměn, které jsou závislé na změně teploty a času.

3.4.1 Kalení

Kalení je tepelné zpracování s cílem dosažení nerovnovážného stavu v oceli. Smyslem kalení je tedy zvýšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení.

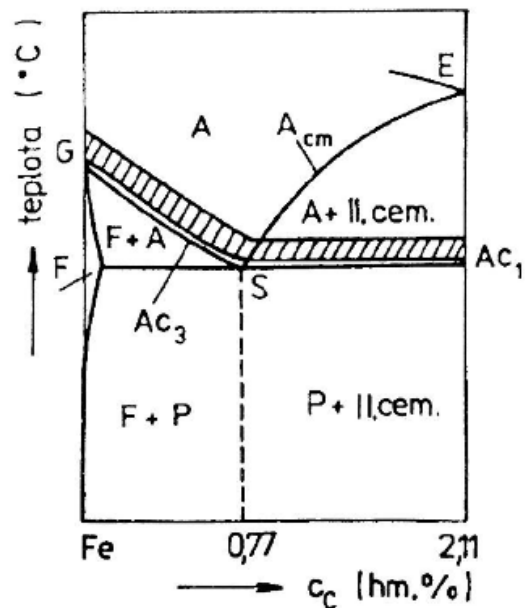
Proces kalení spočívá v přeměně výchozí feriticko-perlitické struktury na strukturu martenzitickou nebo bainitickou. Z toho vyplývá, že oceli vhodné pro kalení musí mít alespoň 0,3 % uhlíku. U ocelí s obsahem uhlíku méně než 0,2 % se vytváří jen malé množství martenzitu, který se v tvrdosti finální struktury příliš neprojeví. Takové oceli označujeme jako nekalitelné.

Postup kalení prochází třemi fázemi, a to fází ohřevu, prohřátí a ochlazení. Teplota prohřátí vyplývá z požadavku na zvýšení tvrdosti materiálu. Pásmo teplot ohřevu pro kalení je vyznačeno v diagramu na obr. 33.

Při kalení podeutektoidní oceli se teplota ohřevu obvykle pohybuje nad křivkou A_{c3} , přibližně 30 až 50 °C. To odpovídá dosažení homogenního austenitu v co nejkratším čase při zachování jemného austenitického zrna. Hrubé původní austenitické zrna by mělo za následek hrubou strukturu martenzitu po zakalení, což způsobí vzrůst vnitřních pnutí a vznik mikrotrhlin. Tato změna stavu struktury se projeví především poklesem houževnatosti

a zvýšením pravděpodobností vzniku předčasných a zbrzděných lomů. Pokud by teplota ohřevu byla v rozmezí teplot A_{c1} a A_{c3} , zůstal by v martenzitické struktuře zbylý, netransformovaný ferit s nižší tvrdostí a s větším vnitřním pnutím, který je opět nežádoucí.

Optimální teplota pro kalení nadeutektoidních ocelí je 30 až 50 °C nad křivkou A_{c1} , tak aby nedošlo k rozpuštění sekundárního cementitu. Při ochlazení je vzniklá struktura tvořena martenzitem a sekundárním cementitem o ještě vyšší tvrdosti. Pokud by teplota při ohřevu překročila křivku A_{cm} do oblasti austenitu, došlo by k zhrubnutí zrna a zvýšení koncentrace uhlíku v austenitu vlivem rozpuštění sekundárního cementitu, což má za následek větší obsah uhlíku v martenzitu, větší strukturní pnutí a výskyt mikrotrhlin. Výsledná struktura je zároveň měkčí a křehčí, což je nežádoucí.



Obr. 33 Pásmo kalicích teplot v diagramu Fe-Fe₃C [29]

Ochlazení oceli musí být dostatečně rychlé, aby došlo k přeměně austenitu na martenzit. Avšak, při rychlém ochlazení dochází ke značnému rozdílu teplot mezi povrchem a jádrem součástí a v důsledku teplotních dilatací vzniká vnitřní pnutí. Proto je potřeba volit ochlazovací rychlost na dobu bezpodmínečně nutnou ke vzniku martenzitické struktury.

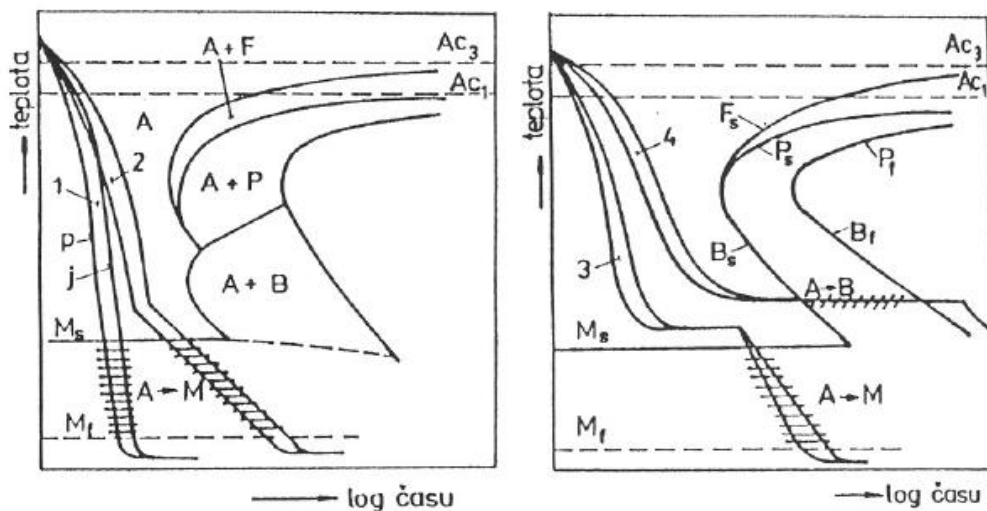
Rychlost ochlazování se reguluje vhodnou volbou kalicího prostředí. Ochlazovací účinnost závisí na tepelné vodivosti, měrném a výparném teple a na viskozitě kalicího prostředí. Podle těchto vlastností je možné chladicí prostředí seřadit od nejúčinnějšího k nejmírnějšímu: vodní sprcha, proudící voda, klidná voda, voda s přísadou oleje, minerální oleje, roztavené soli, roztavené kovy, proudící vzduch a klidný vzduch. Oceli, jež jsou kalitelné na vzduchu se nazývají samokalitelné. Obvykle jsou to oceli s vysokým obsahem legur.

V případě bórové oceli s obsahem uhlíku 0,3 % je vhodným kalicím médiem voda. Je levná, nehořlavá a nejběžněji používána. K regulaci ochlazovacího účinku vody se používají příměsi rozpustných polymerů. Ty zpomalí velice rychlý a nerovnoměrný ochlazovací účinek vody, což zamezí vzniku defektů jako jsou měkká místa, deformace a trhliny. Nevýhodou je nízká teplota bodu varu vody, což se projeví při ponoření součástí, kolem níž se vytvoří vzduchový polštář. Ten izoluje součást od kalicího media a snižuje kalicí účinek. Tomu se dá zabránit pohybem součástí ve vodě. Podle konečné struktury a průběhu ochlazování je možné způsoby kalení rozdělit na několik způsobů.

Volba způsobu kalení závisí na požadovaných vlastnostech kalené součásti a na druhu použité oceli.

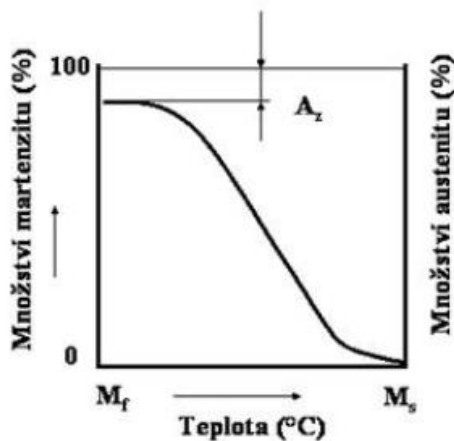
- Martenzitické kalení (viz obr. 34) do studené lázně (voda, olej, vzduch) je nejjednodušší a nejvíce rozšířený způsob kalení. Výhodou je technologická nenáročnost a nízká cena, avšak vznikají vysoká pnutí uvnitř součástí, zejména při použití vody.
- Přerušované (lomené) kalení na obr. 34 spočívá v rychlém ochlazování na teplotu těsně nad M_s , a následně se předmět přemístí do mírnějšího ochlazovacího média, ve kterém proběhne martenzitická přeměna. Tím se docílí snížení strukturního pnutí v materiálu. Používá se pro rozměrově a tvarově složité výrobky.

- Termální kalení je posledním způsobem, kdy výslednou strukturu tvoří martenzit. Předmět se ochlazuje v lázni, jejíž teplota leží obvykle těsně nad teplotou M_s kalené oceli (viz obr. 34). Dostatečně dlouhá prodleva na této teplotě vede k vyrovnání teplot mezi povrchem a jádrem součásti. Tím je potlačena tendence ke vzniku pnutí. Prodleva však nesmí být příliš dlouhá, jinak by ve struktuře začala transformace bainitu. Po vyrovnání teplot následuje ochlazení, zpravidla na vzduchu, při kterém proběhne martenzitická přeměna. Důležité je zdůraznit, že po všech typech martenzitického kalení je nutné součásti popouštět ke snížení vnitřních pnutí.
- Další možnosti kalení je izotermické zušlechťování. Obdobně jako u termálního kalení se předmět rychle přenesse z pece do termální lázně, kterou tvoří obvykle roztavené soli nebo slitiny kovů. Teplota lázně je v oblasti bainitické přeměny, asi 300 až 400 °C. V lázni předmět setrvá až do konce bainitické přeměny a následně se ochladí na vzduchu. Zakalené součásti se již nepopouštějí, neboť pnutí není tak drastické a křehkost je podstatně nižší než u martenzitu.
- Kalení se zmrazením se využívá pro výrobky s požadavkem rozměrové stability, jako jsou ložiska, měřidla apod. Spočívá v přenesení zakaleného předmětu do prostředí s teplotou nižší, než je M_f . Používá se kapalný dusík o teplotě -196 °C. Tím dojde k téměř úplné transformaci zbytkového austenitu na martenzit.

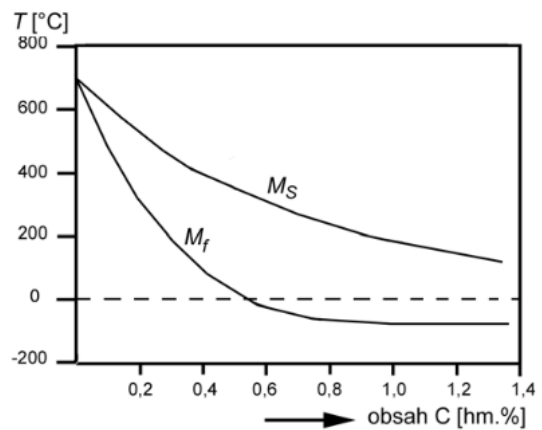


Obr. 34 Způsoby kalení: 1 – do studené lázně, 2 – lomené, 3 – termální, 4 – izotermické zušlechťování [29]

Při každém martenzitickém kalení zůstane ve struktuře určitý podíl zbytkového austenitu, viz obr. 35. Jedná se o austenit, který nestihl transformovat na martenzit. Zbytkový austenit je převážně považován za nežádoucí, neboť snižuje tvrdost zakalené oceli a může dojít k samovolné přeměně na feriticko-karbidickou směs. Množství zbytkového austenitu roste s klesající velikostí austenitických zrn a s rostoucím obsahem uhlíku, který posouvá křivky M_s a M_f k nižším teplotám, viz obr. 36.



Obr. 35 Schéma martenzitické křivky oceli [60]



Obr. 36 Vliv obsahu uhlíku v austenitu na teplotu M_s a M_f [59]

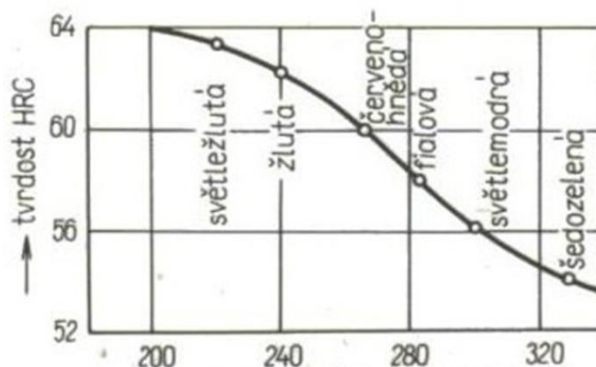
Tato přeměna je doprovázena změnou vlastností, rozměrů a lokálním nárůstem vnitřního pnutí s možným vznikem trhlin. Proto se po kalení zařazuje popouštění, které má za cíl snížit podíl zbytkového austenitu, relaxaci vnitřních napětí a transformaci martenzitu.

3.4.2 Popouštění

Cílem popouštění je snížit vnitřní pnutí a křehkost vzniklou po martenzitickém kalení. Skládá se z ohřevu na teplotu nižší, než je teplota překrystalizace A_{c1} , výdrže na teplotě po dobu zhruba dvou hodin, a následným pomalým ochlazováním vhodnou rychlostí. Protože vnitřní pnutí po martenzitickém kalení může vést k praskání, mělo by popouštění následovat ihned po zakalení. Nežádoucím jevem je však pokles tvrdosti na úkor zvýšení houževnatosti.

Podle popouštěcích teplot se rozlišuje popouštění při nízkých a vyšších teplotách.

- Popouštění při nízkých teplotách (napouštění) se provádí v rozmezí teplot 100 až 300 °C. Tato teplota je dostačující pro snížení vnitřních pnutí, zmenšení obsahu zbytkového austenitu a stabilizování rozměrů při zachování tvrdosti, viz obr. 37. Používá se u nástrojových ocelí či po povrchovém kalení. Popouštění může probíhat ve vařící vodě, v teplé olejové lázni, v elektrických pecích atd.
- Probíhá-li popouštění při teplotách vyšších, hovoříme o anizotermickém zušlechťování. Teploty popouštění jsou v rozmezí 400 až 650 °C. Používá se k dosažení optimální kombinaci pevnosti, houževnatosti a plasticity. Uvedenou kombinaci zaručuje sorbitická struktura, což je směs feritu a cementitu.



Obr. 37 Závislost tvrdosti uhlíkové oceli na teplotě popouštění [59]

4 KONSTROLA KVALITY SVARŮ [37], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [55], [56], [57]

Kontrola svarů, neboli zkoušky svarů, rozdělujeme podle vlivu na svarový spoj na destruktivní a nedestruktivní. V prvním případě mluvíme o nutném porušení svaru za získání výsledků. U nedestruktivního zkoušení svar zůstává nedotčený.

Nedestruktivní zkoušení svarových spojů jsou nejrozšířenější skupina zkoušek, protože svary po zkoušce nejsou nijak deformovány či jinak ovlivněny. Východiskem zkoušky je jednoduchá kontrola vad. Zakládá se na názoru, že pokud se ve spoji nevyskytnou vady, bude svarový spoj provozu schopný. To je ovšem pravdivé jen částečně, jelikož není možnost zcela prokazatelně ověřit všechny vlastnosti svarového spoje, např. pevnost, plasticitu, tvrdost aj. Proto je potřeba vzít v potaz, že nedestruktivní zkoušení prokáže jen částečné užití vlastnosti spoje.

Možností, jak rozšířit vlastnosti spoje, je destruktivní zkoušení na zvláštních kusech určených pouze ke zkouškám. Vychází se z předpokladu, že pokud všechny zkoušky zkušební vzorku vyhoví požadavkům, pak vyhoví i další vyrobené kusy. Je však potřeba dostatečně přesně opakovat technologii svařování i na vyráběnou součást.

4.1 Nedestruktivní zkoušení

Nedestruktivní zkoušky představují důležitý pilíř při zjišťování jakosti ve všech etapách výroby. Základní nedestruktivní metody používané pro kontrolu jakosti svarů se dělí dle identifikace, a to na povrchu svaru, či uvnitř svaru. Při zjišťování povrchových vad se používají metody vizuální, kapilární, penetrační a magnetická prášková. Pro zjištění vnitřních vad slouží ultrazvuk či rentgenové záření.

4.1.1 Vizuální kontrola

Zkouška pohledem je základní a nejpoužívanější kontrola, při níž se odhalují povrchové vady a odchylky od předepsaného tvaru výrobku. Vizuální zkouška stojí na začátku, tedy provádí se jako první zkouška, a to pouhým okem. Je možno použít zobrazovací techniku v podobě čoček, optických vláken, endoskopů či jiné, viz obr.38.

U svarových spojů se provádí přímá i nepřímá vizuální kontrola.

- Přímá kontrola se provádí pouhým okem a dráha mezi kontrolovaným povrchem a okem není ničím přerušena. Je však možné použít jednoduché optické pomůcky, jako je lupa, která objekt zvětší 3 až 6x, či zrcadlo. Požadavkem je dobrá zraková schopnost pracovníka ověřená zrakovým testem a dostatečné osvětlení o intenzitě minimálně 500 luxů. Lze provádět místní vizuální zkoušení, pokud je oko umístěno do 600 mm od zkoušeného povrchu a v úhlu minimálně 30°.
- Nepřímá kontrola je prováděna pomocí optických nebo optoelektronických přístrojů, např. endoskopů, v místech, které nejsou přímou kontrolou pozorovatelné z důvodu geometrie. Jedná se především o vnitřní povrch nádob.

Základem zkoušky je dobře připravený a očištěný povrch, zbaven mastnot, strusky, nátěrů apod. Povrch vzorku je detailně prozkoumán za vhodných podmínek na osvětlení. Provedení zkoušky se řídí dle všeobecné normy ČSN EN ISO 13018, která zahrnuje maximální pozorovanou vzdálenost od povrchu, zorný úhel a intenzitu osvětlení, viz odstavec výše. Pro svarové spoje se kontrola řídí dle normy ČSN EN ISO 17637. Tato kontrola bývá doplněna kontrolou vnějších rozměrů svaru, jako je převýšení svaru, kořene, velikost koutového svaru, měření úhlu přechodu svaru a povrchu základního materiálu, měření hloubky a délky povrchových vad, měření úchylek svaru apod.

Výsledky této zkoušky jsou velmi důležité a předchází všem ostatním kontrolám. Řídí se normou ČSN EN ISO 5817, která určuje stupeň kvality svarového spoje a zohledňuje možnosti přípustných vad. Každá vada, ať už převýšení kořene, pórovitost aj., musí být zkontrolována, aby se zjistilo, zda splňují příslušná kritéria přípustnosti.

Vizuální hodnocení má následovat po každém svařování. V případě pochybností je možné vizuální zkoušku doplnit magnetickou či kapilární zkouškou.



Obr. 38 Základní vybavení pro vizuální zkoušení [40]

4.2 Destruktivní zkoušení

Destruktivní zkoušky mají nezastupitelnou roli při testování kvality svarů, neboť pouze tak je možné kvantitativně určit mechanické vlastnosti svaru, hloubku provaření aj. Destruktivního zkoušení materiálu se využívá pro ověření užitečných vlastností na počátku zavádění sériové výroby nového dílu, tak i pro ověření vlastností v průběhu výroby. Požadavky na destruktivní zkoušení jsou obsaženy v příslušných normách, směrnících a materiálových specifikacích.

Provádí se na zkušebních vzorcích, které se odebírají z místa svarového spoje určeného ke zkoušce a následné likvidaci. Musí tedy vykazovat stejné vlastnosti jako svarový spoj. Mezi základní zkoušky se řadí zkoušky mechanických vlastností, kde spadá zkouška tahem, ohybem a tvrdosti, a dále zkoušky metalografického šetření, kde se provádí makroskopický a mikroskopický rozbor.

4.2.1 Zkouška mikrotvrdoti

Patří spolu se zkouškou v tahu k základním zkouškám mechanických vlastností svarových spojů. Spočívá na vnikání cizího tělesa do zkoušeného materiálu. Stupněm tvrdosti je stanovena jako velikost odporu proti tomuto vniknutí. Vnikání může být statické či dynamické.

Účelem zkoušky je určení nejnižších a nejvyšších hodnot tvrdosti napříč svarovým kovem a základním materiálem. Pro zkoušení mikrotvrdoti slouží norma ČSN EN 9015-2. Nejčastěji se pro svarové spoje používá statická zkouška dle Vickerse.

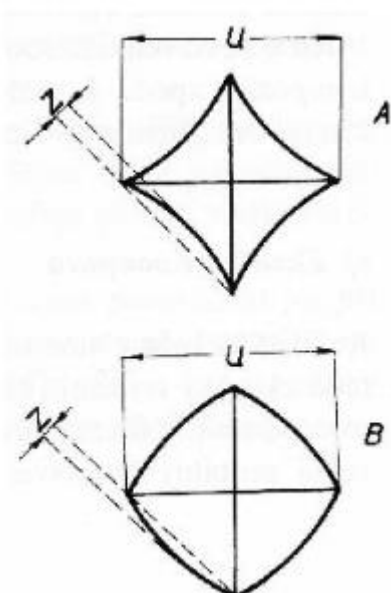
Do materiálu se pomalu vtlačuje indentor, což je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° , viz obr. 40. Doba zkušebního zatížení je v rozmezí 10 až 15 sekund. Síla se volí

v závislosti na zkušebním materiálu v rozmezí 9,8 až 490 N. Provádí se na hladkém a rovném povrchu, bez okujené vrstvy a mazidel. Podobně jako u zkoušky dle Brinella je tvrdost vyjádřena poměrem působícího zatížení ku ploše vtisku dle vzorce 4.2.

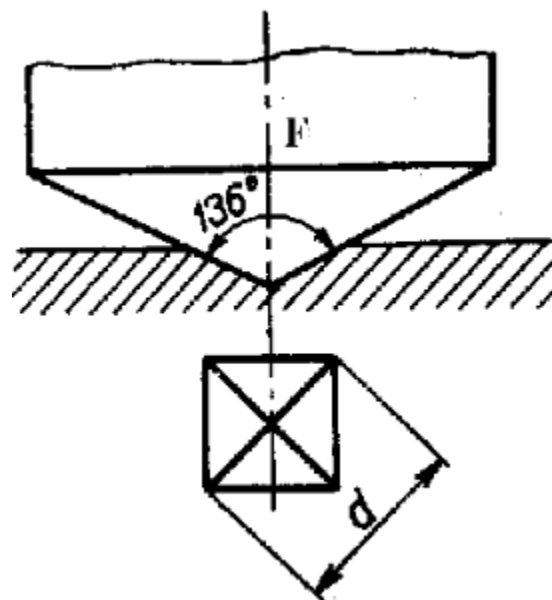
$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2}$$

kde F ... zatěžující síla [N]
 u ... průměrná hodnota vtisku [mm]

Podrobně zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6507-1. Vickersova zkouška se spíše používá pro hodnocení materiálů vyšších tvrdostí, ale není to pravidlem. Jako jediná totiž splňuje všechny teoretické požadavky. Dává jednotnou stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrdší kalené oceli. Hodnoty tvrdosti jsou na velikosti zatížení nezávislé. Vždy je potřeba uvést velikost zatížení spolu s naměřenou hodnotou, např HV 0,1 – zatížení 0,1 kp. Následkem rozdílného zpevnění materiálu nemusí být průmět vtisku vždy pravidelným čtvercem. U měkkých materiálů (obr. 39A) dochází k vydutí, nebo naopak vypouknutí u materiálu tvrdých (obr. 39B). Výhodou této zkoušky je přesné měření tvrdosti a poměrně malé vtisky, které tolik nepoškozují obrobenu plochu.

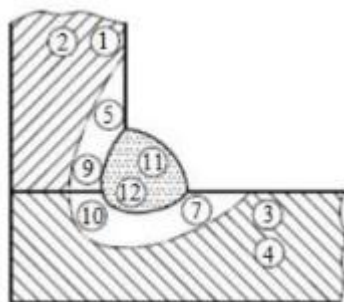


Obr. 40 Deformace vtisku [47]

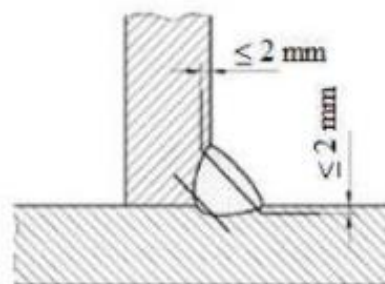


Obr. 39 Schéma zkoušky dle Vickerse [47]

Norma ČSN EN 9015-2, tedy měření mikrotvrdosti, předepisuje pro svarové kovy zkoušky HV 0,1 až HV 5, tedy zatížení 0,1 až 5 kp (0,98 až 49 N). Norma dále definuje dvě možnosti provádění vpichů. Buď to s označením písmene R (řada vpichů), nebo písmenem E (jednotlivé vpichy). V případě provedení řady vpichů norma definuje vzdálenost mezi jednotlivými vpichy, v závislosti na tvrdosti materiálu, a umístění a tvar linie vpichů dle obr. 42. V případě jednotlivých vpichů, obr. 41, norma opět udává jejich umístění a vzdálenost mezi jednotlivými vpichy, přičemž v každé zóně (základní materiál, TOO, svarový kov) musí být proveden dostatečný počet vpichů tak, aby výsledky měření byly vypovídající. Výsledky tvrdosti se společně s dalšími informacemi o provedení zkoušky zapíší do zkušebního protokolu.



Obr. 41 Měření tvrdosti jednotlivými vpichy [46]



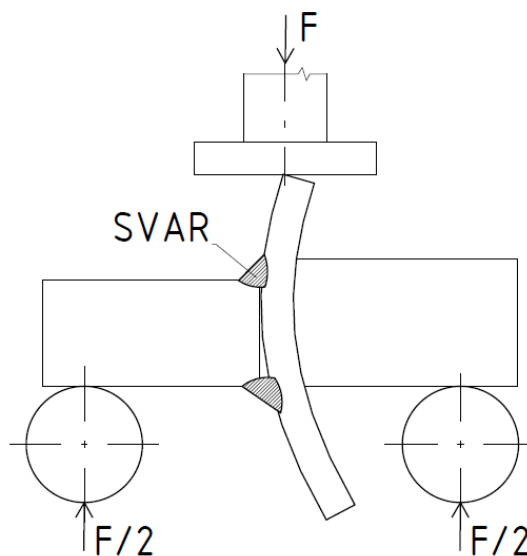
Obr. 42 Měření tvrdosti řadou vpichů [46]

Alternativou zkoušky dle Vickerse je zkouška tvrdosti dle Hannemanna (HM). Měří se mikrotvrdot jednotlivých strukturních fází. Jako vnikající tělísko je použit Vickersův jehlan usazený do přípravku v objektivu optického mikroskopu. Zjištění jednotlivých strukturních fází pomocí mikrotvrdoti je pro svářeče význačné zejména při vývoji optimálních přídavných materiálů a vhodných technologií svařování, nebo tepelného zpracování po svaření.

4.2.2 Zkouška rozlomením

Tato zkouška je alternativou zkoušky ohybu. Patří do skupiny statických mechanických zkoušek.

Zkouška je prováděna za pokojové teploty. Během zkoušky je vzorek položen na dvou podpěrných válečkách. Pomalým postupným zatěžováním uprostřed rozteče podpor, tedy nad swarem, působí ohybový trn či deska kolmo na povrch zkušební vzorku a dochází k plastické deformaci. Při průhybu dochází k největším tahovým napětím na spodním svaru. Zkouška probíhá až do plného rozlomení, a výstupními hodnotami jsou zatěžující síla a dráha. Schéma provedení ohybové zkoušky ohybovou deskou je na obr. 43.



Obr. 43 Zkouška rozlomením ohybovou deskou

4.2.3 Metalografické zkoušky

Běžně používaným doplňkem testů při posouzení mechanických vlastností svarových spojů je metalografické šetření sloužící k hodnocení struktury. Podle použitého zvětšení se metalografické zkoušky dělí na makroskopické a mikroskopické. Ať už se jedná o makro nebo mikro analýzu, vždy je nezbytné před vlastním pozorováním provést dokonalou přípravu zkušební vzorku. Odběr vzorku musí být z vhodného místa a nesmí být při mechanickém dělení tepelně ovlivněn. Povrch odebraného vzorku se postupně brousí na metalografických papírech s klesající zrnitostí, poté leští (mechanicky nebo elektrolyticky) a nakonec leptá (chemicky nebo elektrolyticky). Obě zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 17639.

- Makroskopická zkouška slouží k posouzení vnitřní struktury svaru. Vzorky jsou odebrány mechanickým dělením příčně na osu svaru. Musí obsahovat základní materiál, SK a TOO. Následně se brousí a leptají pro zviditelnění makrostruktury. Provádí se vizuálně bez zvětšení pouhým okem, nebo pomocí lupy či mikroskopu do zvětšení do 50x. V případě svaru se hodnotí především tvar svaru, kvalita spoje (přítomnost vad), způsob kladení svarových vrstev, tvar, šířka, hranice natavení a rozsah tepelně ovlivněné oblasti.

Zředění se určí ze vztahu:

$$Z_{pz} = \frac{S_p}{S_p + S_z} \cdot 100 [\%] \quad (4.2)$$

kde: S_p ... celková plocha roztaveného kovu svarového spoje [mm^2]

S_z ... celková plocha roztaveného základního materiálu [mm^2]

- Mikroskopická zkouška se provádí pomocí mikroskopu při zvětšení 50x až 500x. Používají se také elektronové mikroskopy se zvětšením až 50000x. Je zde zkoumána mikrostruktura materiálu na zkušebních vzorcích orientovaných příčně k ose svaru. Mikrostrukturní rozbor zahrnuje složitou přípravu zkušebních vzorků, neboť je velmi citlivý na drobné chyby při přípravě, jež můžou mít za následek nesprávné vyhodnocení. Příprava je obdobná jako u zkoušky makrostruktury s možným leptáním vzorku. Vzorek může být do leptadla ponořen, nebo potřen jen povrch vzorku. Případně se používá elektrolytické leptání. Následně je potřeba vzorek opláchnout a vysušit. Mikroskopickou zkouškou lze pozorovat velikost jednotlivých zrn materiálu, hranice zrn, strukturní složky ve všech oblastech apod. Pro svou obtížnost se tato zkouška zařazuje jen pro náročné výrobky.

4.2.4 Rentgenová difrakční analýza zbytkového austenitu

Metoda rentgenové difrakce spočívá v interakci rentgenového záření s krystalickou mřížkou materiálu, kovu. Vlnová délka elektromagnetického (rentgenového) záření odpovídá většinou meziatomovým vzdálenostem struktur pevných látek. Tím může docházet k difrakci (ohybu) paprsku na elektronech jednotlivých atomů.

Při analýze na strukturu dopadá primární svazek pod úhlem θ , který je rozptýlen atomy do všech směrů. Při splnění Braggovy difrakční podmínky dojde k zesílení intenzity v některých směrech, fotony jsou zachyceny detektorem a výsledkem je difrakční obrazec.

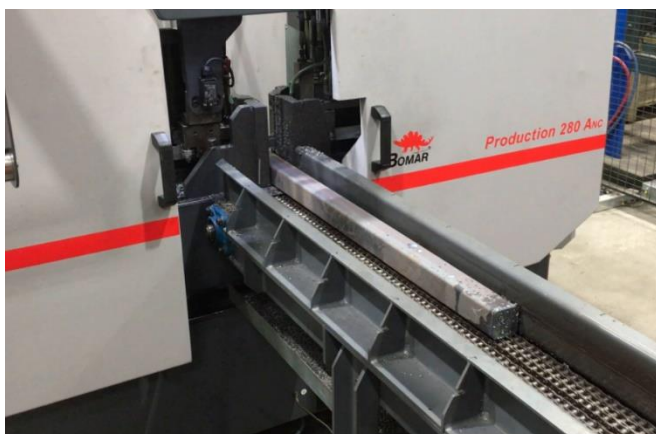
Z tohoto difrakčního obrazce krystalické látky získáme vzdálenost atomů neboli parametry mřížky, které jsou charakteristické pro každou krystalickou fázi. Hojně se tato metoda používá pro zjišťování zbytkového austenitu ve struktuře.

5 POSTUP VÝROBY SOUČÁSTI [61]

Cílem kapitoly je detailně přiblížit postup výroby příčnicku. Z úvodu práce je zřejmé, že se jedná o dva různé postupy. Rozdíly ve výrobě byly zavedeny za účelem zvýšení produkce a zkvalitnění svarových spojů. První oddíl je zaměřen na postup výroby příčnicku dle starého technologického postupu daného firmou, tedy svařováním „two-step“. V druhém oddílu je popsán postup výroby dle nového technologického postupu, který má za cíl právě zvýšení produkce výroby s ohledem na kvalitu provedených svarových spojů.

5.1 První varianta (two step)

V první variantě, pod firemním označením H16, výroba začíná nákupem polotovaru. Budoucí svařenec je tvořen třemi dílci, z nichž každý má jiné chemické složení, což lehce komplikuje výrobu. Rozdílné složení bylo voleno v důsledku dosažení potřebných mechanických vlastností jednotlivých částí řetěze. Všechny polotovary jsou dodávány v délce šesti metrů a uskladněny na skladě. Postupné operace s materiálem při výrobě hlavního dílu, příčnicku, jsou následující.



Obr. 44 Řezání polotovaru na pásové pile

materiál na teplotu 1050 °C. Čas potřebný k ohřevu na tuto teplotu jsou dvě minuty. Z toho důvodu jsou pece dvě, aby byla zajištěna kontinuální výroba bez prodlevy. Indukční pec pracuje na principu vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, které indukují vířivé proudy v ohřívaném materiálu. V důsledku vlastního elektrického odporu se tyto proudy mění na teplo. Výhodou indukční pece je vysoká účinnost.

Po dosažení teploty je polotovar z pece vytlačen nově zaváděnou tyčí. Pro následnou manipulaci s ohřátým materiálem slouží 6-osý robot od firmy COMAU. Uchopení probíhá pomocí pneumaticky ovládaných kalených čelistí s chlazením. Materiál přesune do hydraulického kovacího lisu s následným tvářením. Kovací lis je české výroby, DIEFFENBACHER.

V případě výroby příčnicku se jedná o bórem dopovanou ocel s označením 27MnCrB5-2 s přesným složením uvedeným v tabulce 2. Hutní polotovar je tyč čtvercového průřezu řezána na pásové pile z obr. 44, kde dochází k dělení na kratší polotovary, jejichž délka je vypočtena ze zákona zachování objemu při tvářením.

Následně je řetězovým dopravníkem v kombinaci s pneumatickou linkou polotovar dopraven k indukční peci z obr. 45, do které je zasunut pneumatickým pístem. Pec ohřeje



Obr. 45 Indukční pec pro ohřev polotovarů

Při kování se počítá s teplotou 1000 °C, tedy že materiál během transportu vychladne o 50 °C. Doba tváření je zhruba 30 sekund.

Z hlediska provozu je nezbytné, aby řetězy byly kaleny z důvodu mechanického opotřebení při provozu. Proto je chlazení výkovku provedeno kalícím médiem bezprostředně po kování, kdy se jeho teplota odhaduje na 860 °C. Robot vyjme výkovek z lisu a vloží jej do přípravku, kde vlivem stlačeného vzduchu dochází k ofoukání hrubých okují. Dále jej týž robot přesune do zavážecího vozíku, který se ponoří do kalící lázně s teplotou média 25 °C. Tím je docíleno základní struktury – martenzitické. Médium tvoří voda s kalícím prostředkem pod názvem SERVISCOL 98SK-F1 na bázi polymerů. Technické orientační údaje roztoku jsou zaznačeny v tab. 7.

Tab. 7 Technické údaje kalícího prostředku SERVISCOL

Technické údaje	SERVISCOL 98SK-F1
Barva	Bezbarvý se žluto fialovým mírným zákalem
Zápach	Mírný
Hustota při 20 °C (DIN 51 757)	1,08 g/ml
Viskozita při 50 °C (DIN 51 562)	120 mm ² /s
Refrakční faktor (TESTRÖ)	2,08
pH (10% roztok) (DIN 51 369)	9,6

Kalící médium je kontinuálně filtrováno a chlazeno tak, aby teplota nepřesahovala přípustnou mez. Chlazení média probíhá ve výměníku mimo vnitřní prostory budovy. Okuje jsou odstraněny pomocí magnetu ve filtračním zařízení.

Po uplynutí třiceti sekund je příčník dostatečně vychlazený a připravený k další operaci výroby. Vozík tedy vyjede z lázně a robot přesune již zakalený příčník na válečkový dopravník, který jej dopraví do průběžného tryskacího zařízení. Abrasivem je ocelový granulát s velikostí zrn 710 až 850 µm. Je vhodný pro čištění odlitků, výkovků, svarů aj. Zároveň je šetrný ke všem součástkám tryskacího zařízení, což z něj dělá nejpoužívanější granulát. Zpětná recyklace a čištění abraziva je nedílnou součástí zařízení tak, aby bylo možné co nejekonomičtěji využít veškeré abrazivo.

Následně očištěný, připravený příčník je ručně pracovníkem rovnán na paletu a uskladněn za účelem úplného vychladnutí na pokojovou teplotu. Teprve poté je zavážecím vozíkem paleta

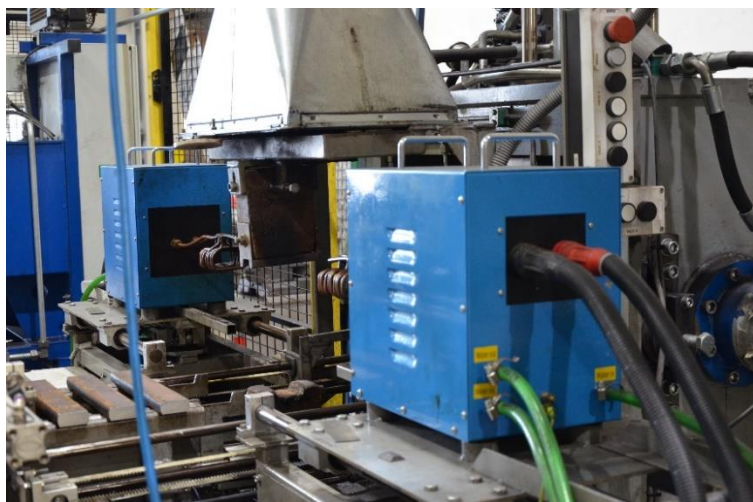


Obr. 46 Popouštěcí pec

zavezena do vychladlé popouštěcí pece na obr. 46. Postupným zahříváním na teplotu 250 °C dochází k rovnoměrnému ohřevu v celém průřezu materiálu. Během následujících 180 minut je teplota konstantní, při níž dochází k popuštění martenzitu a snížení obsahu zbytkového austenitu. Následným pomalým ochlazením dílců na pokojovou teplotu se zamezí dalšímu pnutí. Pro úplné vyhladnutí jsou vzorky z pece přesunuty do skladu.

Další operací je svařování kompletního příčnicku. Z důvodu vysokouhlíkové oceli je potřeba materiál příčnicku přehřát. Používá se k tomu tatáž popouštěcí pec, kde se příčník během dvaceti minut ohřeje na teplotu 180 °C v celém průřezu. Přehřátý materiál je pracovníkem přemístěn ke svařovací komoře a ručně ustaven do svařovacího přípravku (upínací lavice) společně s ostatními díly – „céčkem“ a kostičkou.

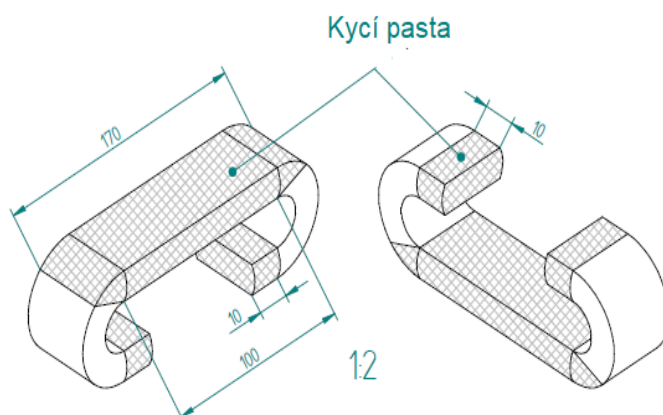
Díl „céčko“ je vyroben rovněž z bórové oceli s označením 30MnB5. Přesné chemické složení je v tab. 2. „Céčko“ je spojovacím článkem řetězu a příčnicku. Jeho výroba je poměrně jednoduchá. Výchozím polotovarem je pásovina v délce šesti metrů. Pásovou pilou je rozřezána na kratší celky, konkrétně 293 mm. Tyto polotovary jsou jednotlivě ručně pracovníkem vloženy do ohýbačky. Jelikož se jedná o materiál s tloušťkou 18 mm, disponuje stroj indukčním ohřevem v místě ohybu pro snížení potřebné tvářecí síly, viz obr. 47. Po ohnutí do



Obr. 47 Ohýbačka s indukčním ohřevem

požadovaného tvaru se dále ohybek cementuje pro zvýšení tvrdosti po kalení. „Céčko“ je nauhličeno v průběžné kalící peci při teplotě 830 až 920 °C. Požadavek na hloubku cementace je 0,5 až 0,7 mm, což odpovídá při této teplotě času 150 minut. Z důvodu další technologie, svařování, je nutné oblast, jež bude vystavena svarové housence, opatřit krycím nátěrem, aby nedocházelo k difuzi uhlíku během nauhličování, viz obr. 48.

Po ukončení nauhličení se ihned kalí do vody s podílem kalicího prostředku SERVISCOL 98SK-F1. Již vychladlý komponent je bez přehřevu a popouštění připraven k ustavení do upínací lavice ke svařování.

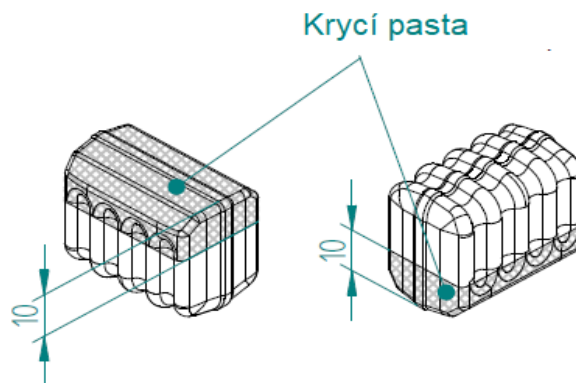


Obr. 48 Krycí nátěr na „céčku“

Posledním dílcem je záběrová kostička, která plní funkci trakčního elementu při sestupu harvestoru v obtížném, příkrém terénu. Je vyrobena z oceli legované borem s označením 30MnB5. Jedná se tedy o stejný materiál, jako při výrobě „céčka“. Kostička, jako jediný dílec celého příčnicku, je vyráběna externí firmou. Vyrábí se tvářecí metodou, kováním, a dodávána

je v tepelně nezpracovaném stavu. Jelikož se jedná o část řetězu vystavenou vysokému opotřebení, je nutné tento stav pozměnit. Kostička se cementuje v průběžné nauhličovací kalící peci, čímž se zvýší ve struktuře podíl uhlíku, a tím se dosáhne vyšší tvrdosti po kalení. Je však potřeba brát v úvahu, že kostička je po tepelném zpracování svařována, a vysoký podíl uhlíku je v rozporu se svařováním. Proto tato oblast kostičky určená k svařování je před nauhličením opatřena krycí pastou, která zamezí difuzi uhlíku do materiálu, dle obr. 49.

Teplota nauhličení se mění v závislosti na zóně v peci, a to z teploty 830 °C na 920 °C. Požadavek na hloubku cementace je 0,5 až 0,7 mm. Jakmile je dosaženo této hloubky nauhličení, což odpovídá času 150 minut, je kostička vyjmuta a kalena ve vodě s kalícím médiem SERVISCOL 98SK-F1, tedy ve stejném médiu jako je používán u příčníku a „céčka“. Zde však po kalení nedochází k popouštění ani přehřevu, a kostička je tedy ustavena prakticky ihned po kalení do svařovacího přípravku společně s příčníkem a „céčkem“



Obr. 49 Krycí nátěr na Stummelu

Po ustavení všech tří dílců, „céčka“, kostičky a příčníku, do svařovací upínací lavice, viz obr. 50, dochází k svařování. Je nutné podotknout, že do lavice se ustavují dva příčníky najednou, jak je vidět na obrázku.



Obr. 50 Upínací lavice

Otočný stůl, který odděluje svařovací komoru od obsluhy, disponuje dvěma svařovacími lavicemi, z každé strany jednou. Tedy že z jedné strany ustavuje obsluha do přípravku dva kusy příčníků, a z druhé strany ve stejnou dobu dochází k svařování v komoře. Tento důmyslný způsob šetří čas a zároveň chrání obsluhu před účinky škodlivého záření.

Svařování probíhá technologií obloukového svařování v ochranné atmosféře metodou 135, popsanou již dříve, v kombinaci se svařovacím robotem firmy ABB.

5.1.1 Svařovací postup první varianty dle ČSN EN ISO 15609-1

Svářecí zdroj Fronius TransPuls Synergic 4000 je umístěn ve svařovací kabině. Parametry svařování a postup se řídí dle specifikace postupu svařování (WPS). Tento dokument se vytváří na základě kvalifikace postupu svařování (WPQR), což je dokument o provedení zkoušek svarových spojů. Dokument WPS je doložen v příloze diplomové práce.

Svařuje se sprchovým přenosem při proudu 300 A. Pro stehování je proud snižen na 240 A. Polarita svařovacího drátu je plusová. Přídavný materiál tvoří drát o průměru 1,2 mm s označením ESAB OK Autrod 12.51 s přesným chemickým složením uvedeným v tab. 1. Jedná se o drát určený k svařování nelegovaných konstrukčních ocelí a jemnozrných ocelí v ochranné atmosféře argonu s příměsí CO₂. Rychlost podávání drátu pro svařování je 9,5 m/min. Dodáván je v sudech o hmotnosti 250 kg. Mez pevnosti drátu je 560 MPa. Poloha pro svařování byla zvolena vodorovná shora (PA). Rychlost svařování není přesně určená, asi 60 cm/min. Použitý ochranný plyn je směs argonu a 18 % oxidu uhličitého s průtokem 14 l/min. Velikost svaru je konstrukcí stanovena na 5 mm a délka 50 mm. Podstatné parametry jsou zapsány do tab. 8.

Množství vneseného tepla, které má značný vliv na výslednou strukturu a velikost tepelně ovlivněné oblasti, je vypočteno ze vzorce 3.5:

$$Q_s = \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} \cdot \eta$$

$$Q_s = \frac{29 \cdot 300}{10^3 \cdot 9,5} \cdot 0,75 = 0,69 \text{ KJ/mm}$$

kde za hodnotu v je dosazena rychlost podávání drátu.

Tab. 8 Parametry svařování „two step“

Housenka	Polarita	Svařovací proud I [A]	Napětí U [V]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Tepelný příkon Q _s [kJ/mm]
Steh	+	230	27	N/A	N/A
1	+	300	29	9,5	0,69

Jak již bylo zmíněno, příčník se přehřívá z důvodu vysokého obsahu legur, především chromu a manganu. Dle chemického složení ocelí 30MnB5 a 27MnCrB5-2 v tab. 2 a vzorce 3.4.1. je teplota přehřevu pro oba materiály dle Seferiána vypočtena následovně:

- teplota přehřevu pro materiál 30MnB5

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

$$C_C = \frac{360 \cdot 0,33 + 40 \cdot (1,28 + 0,21) + 20 \cdot 0,07 + 28 \cdot 0,03}{360} = 0,50178$$

$$C_S = 0,005 \cdot s \cdot C_C = 0,005 \cdot 30 \cdot 0,50178 = 0,07527$$

$$C_P = C_C + C_S = 0,50178 + 0,07527 = 0,57705$$

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{C_P - 0,25} = 350 \cdot \sqrt{0,57705 - 0,25} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- teplota předehřevu pro materiál 27MnCrB5-2

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

$$C_C = \frac{360 \cdot 0,28 + 40 \cdot (1,23 + 0,47) + 20 \cdot 0,08 + 28 \cdot 0,02}{360} = 0,47489$$

$$C_S = 0,005 \cdot s \cdot C_C = 0,005 \cdot 16 \cdot 0,47489 = 0,03799$$

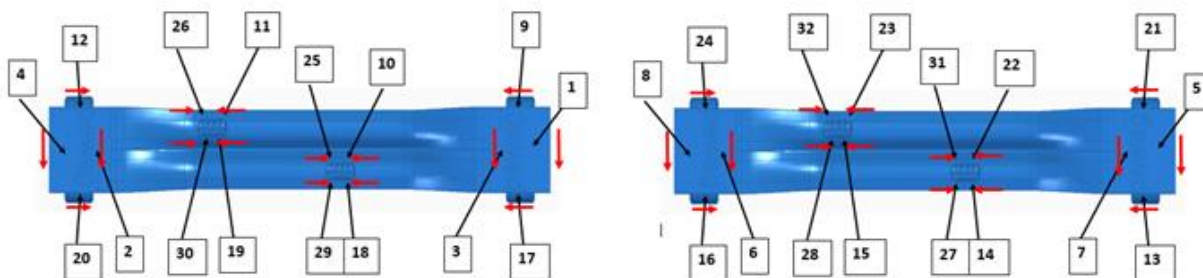
$$C_P = C_C + C_S = 0,47489 + 0,03799 = 0,51288$$

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{C_P - 0,25} = 350 \cdot \sqrt{0,51288 - 0,25} = 179 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Vypočtená teplota předehřevu je teoreticky vyšší pro materiál 30MnB5, rovných 200 °C. Z tohoto materiálu je vyrobena kostička. V praxi se však předehřívá pouze příčník na teplotu 180 °C, jelikož má vyšší obsah chromu. Chrom se při chladnutí vylučuje a vytváří s uhlíkem tvrdé karbidy Cr₂₃C₆.

Během přepravy příčníku z předehřívací pece je potřeba počítat s poklesem teploty. Proto je příčník předehříván na teplotu o 40 °C vyšší, než je vypočtena teplota předehřevu, tedy na 220 °C.

Průběh stehování příčníku s kostičkou a „céčkem“ je prováděno robotem na dvou kusech zároveň dle obr. 5. Následné svařování se provádí postupně dle obr. 51. Je zde patrné, že každá kostička je přivařena celkem čtyřmi svary. Z každé strany kostičky dvěma. Svařuje se z jednoho konce do středu a následně z druhého konce do středu. Kvůli tomuto postupu byl ve výrobě zaveden pojem „two step“, což ve významu znamená „na dva kroky“.



Obr. 51 Postup svařování příčníku, kostičky a „céčka“

Je nutné brát v potaz hlavně způsob svařování kostiček s příčníkem, které jsou předmětem diplomové práce.

Po svaření celého kompletu jsou příčníky vloženy do studené pece a pomalým ohřevem ohřáty na teplotu 320 °C. Na této teplotě setrvají 240 minut, kdy dochází ke snížení zbytkového austenitu po svařování. Poté následuje pomalé ochlazování na vzduchu tak, aby nedošlo k následnému pnutí či změně struktury. Po úplném vychlazení je svarek příčníku paletizován a připraven na kompletaci.

5.2 Druhá varianta (one step)

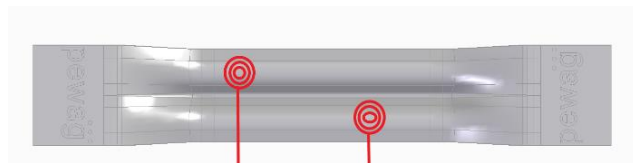
Druhá varianta výroby svařence příčnicku, pod firemním označením H7, se příliš neliší od varianty první. Příčnick, kostička i „céčko“ jsou vyrobeny ze stejného materiálu stejným technologickým postupem na stejné lince. Rozdíl přichází až po kalení a otryskání příčnicku, kdy nedochází k paletizaci a popouštění, ale přímo k svařování.

Bez prodleně za tryskacím zařízením se nachází robotické svařovací pracoviště osazeno dvěma roboty, z nich jeden slouží k přepravě materiálu (obr. 54), a druhý k svařování (obr. 55). V dosahu robotického ramene je umístěn indukční ohřev pro předehřev materiálu.

Bez prodleně po otryskání je příčnick prvním robotem uchopen a přemístěn k indukčnímu ohřevu, viz obr. 52, který lokálně předehřeje příčnick na teplotu 210 °C. Teplota je zde volena záměrně o něco nižší, neboť čas manipulace s předehřátým příčnickem je podstatně kratší než v předchozí variantě. Vzhledem k vysoké účinnosti indukčního ohřevu je dosaženo této teploty za 30 s. Jsou nahřata pouze ta místa, ve kterých dochází ke svařování příčnicku s kostičkami, viz obr. 53.



Obr. 52 Indukční předehřev pro příčnick



Obr. 53 Místa indukčního ohřevu

Po nahřátí na teplotu předehřevu je příčnick robotem umístěn do polohovací lavice (viz obr. 55) společně s dvěma kostičkami. Stejně jako v předchozí variantě je předehříván pouze příčnick. Svařují se pouze kostičky s příčnickem. Po ustavení následuje svařování.



Obr. 54 Manipulační robot



Obr. 55 Svařovací robotické pracoviště

5.2.1 Svařovací postup druhé varianty dle ČSN EN ISO 15609-1

Svářecí zdroj Fronius TPS 400i Pulse je umístěn vedle svařovacího robotu, viz obr. 55. Parametry svařování se řídí dle WPS, která je totožná pro obě varianty výroby. Je to dáno tím, že WPS je stanovena na základě použitých materiálů, nikoliv technologie svařování.

Svařování probíhá sprchovým přenosem při proudu 235 A. Pro stehování je proud téměř stejný, 230 A. Polarita svařovacího hořáku je plusová. Pokud se jedná o přídavný materiál, shoduje se s předchozí variantou. Stejně tak je tomu i s ochranným plynem čili je použita směs argonu a CO₂ s průtokem 20 l/min. Rychlost podávání drátu je 9,1 m/min. Rychlost svařování mm/s. Velikost svaru je shodná, 5 mm. Délka je taktéž 50 mm.

Množství vneseného tepla pro variantu „one step“ je vypočteno rovněž ze vztahu 3.5:

$$Q_s = \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} \cdot \eta$$

$$Q_s = \frac{26,8 \cdot 235}{10^3 \cdot 9,1} \cdot 0,75 = 0,52 \text{ kJ/mm.}$$

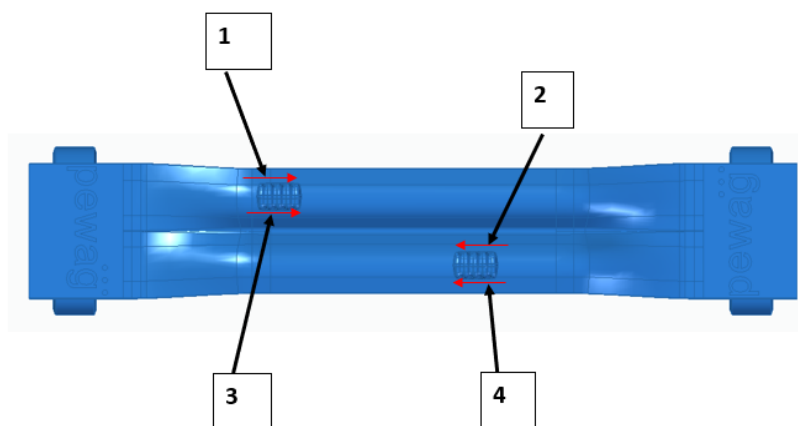
Tab. 9 Parametry svařování „one step“

Housenka	Polarita	Svařovací proud I [A]	Napětí U [V]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Tepelný příkon Q _s [kJ]
Steh	+	230	27	N/A	N/A
1	+	235	26,8	9,1	0,52

Jelikož se jedná o stejné materiály, teplota předehřevu je teoreticky rovna vypočtené teplotě. Praxí však byla teplota navýšena na již zmíněných 210 °C, jelikož dochází k rychlému prostupu tepla do zbylých částí příčnicku.

Průběh stehování příčnicku s kostičkou je proveden robotem dle obr. 6. Následný postup svařování je zobrazen na obr. 56. Svarový kov je kladen jedním tahem, po celé délce kostičky. Z toho důvodu se ve výrobě ujal pojem „one step“, v překladu znamená „na jeden krok“.

„Céčka“ jsou k příčnicku přivařeny až posléze na ručním svářecím pracovišti. Po jejich přivaření je svařenec příčnicku vložen do pece a pomalým ohřevem tři hodiny žihán při teplotě 350 °C. Účelem je snížit podíl zbytkového austenitu. Následně pomalu chladnou na vzduchu až na pokojovou teplotu.



Obr. 56 Postup svařování příčnicku s kostičkami

6 ANALÝZA SVAROVÝCH SPOJŮ

Požadavkem firmy PEWAG je se zohledněním na postup výroby zhodnotit kvalitu provedených svarů. Vzorky pro experimentální část byly vyrobeny přesně dle předchozích postupů. Analyzovanou oblastí svařenců je spoj příčnicku s kostičkou. Svarový spoj příčnicku s „Céčkem“ nebyl předmětem analýzy a nebude tedy dále prezentován.

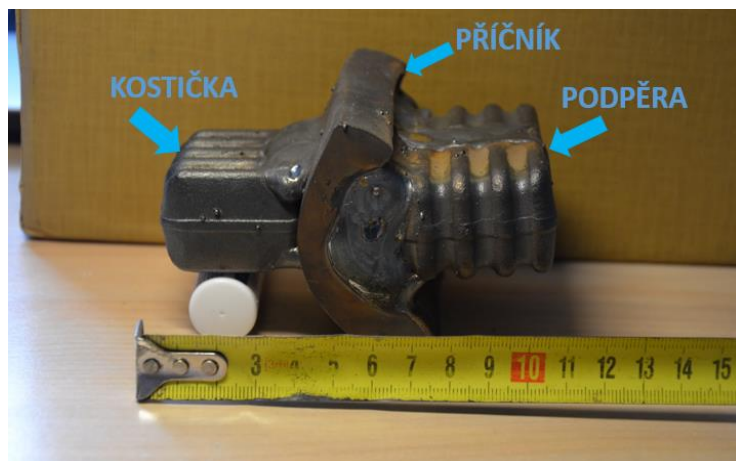
6.1 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem byla provedena za účelem porovnání meze pevností dvou vzorků mezi sebou. Jelikož vzorky neodpovídaly normativnímu zkoušení, byly výsledky pouhým ukazatelem rozdílných technologií výroby.

Zkoušení probíhalo na hydraulickém trhacím stroji ZD40 v laboratořích Ústavu strojírenské technologie FSI, viz obr. 57. Stroj je určen k tahové, talkové a ohybové zkoušce s maximálním zatížením 400 kN. Dovybaven je snímačem polohy příčnicku a snímačem síly. Veškerá data ze zkoušek se zaznamenávají do počítače, kde jsou programem M-TEST v.1.7 vyhodnoceny a graficky zpracovány.

Vzorky byly odebrány z hotového příčnicku tak, aby byla zkouška co nejvíce věrohodná. Celkem se zkoušely dva vzorky, z nich jeden byl svařený technologií „one step“ a druhý technologií „two step“. Aby bylo možné zkoušku provést, byla z druhé strany příčnicku přivařena podpěra, která sloužila jako opěrný článek při zkoušce, viz obr 58.

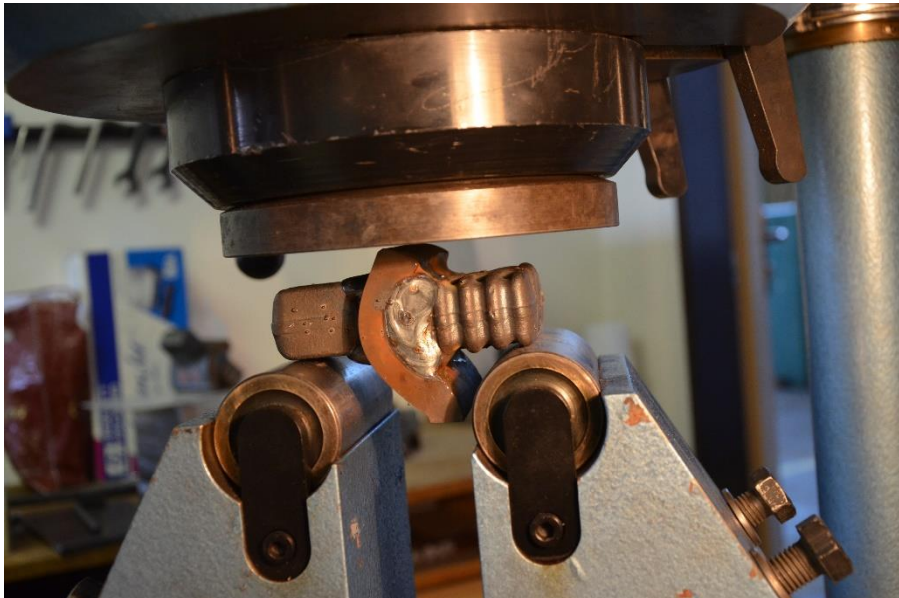
Každý ze vzorků byl položen na dva opěrné válce a shora zatěžován tlakovou silou, viz obr 59. Rychlost zatěžování byla nastavena na 10 mm/min. Průběhy síly a dráhy obou vzorků byly zapisovány do počítače a následně z hodnot zkonstruován graf, který je na obr. 60.



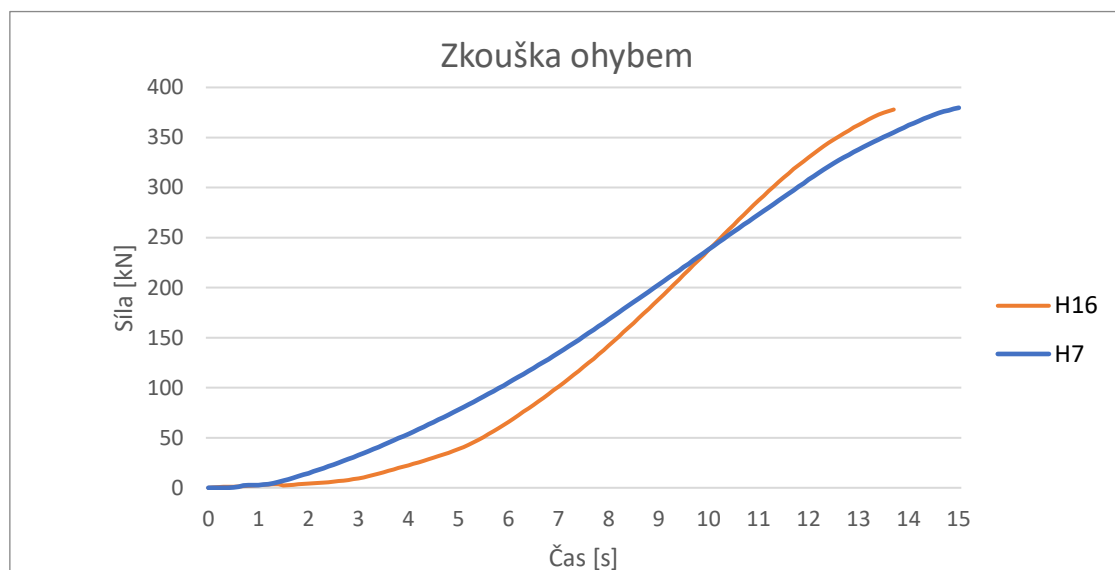
Obr. 58 Zkušební vzorek pro zkoušku ohybem



Obr. 57 Trhací stroj ZD40



Obr. 60 Ustavení vzorku při zkoušce ohybem



Obr. 59 Graf zkoušky pevnosti v ohybu pro vzorky H7, H16

Výsledek zkoušky byl z hlediska destrukce neuspokojivý, jelikož ani po vyvození maximální síly stroje nedošlo k porušení vzorků. Zároveň však můžeme říci, že zkoušené vzorky vydržely sílu 380 kN a při tomto zatížení v praxi nedojde k destrukci. Při síle asi 350 kN začíná postupně docházet k plastické deformaci vzorků. Ovšem ani po ukončení zkoušky nebyly vzorky nijak viditelně porušeny, tedy bez trhlin.

Z této oblasti plastické deformace v grafu můžeme také vyčíst, že k rozlomení vzorku je potřeba síly jen o něco větší, než je síla vyvozená strojem ZD40.

Pro uspokojivý výsledek s rozlomením vzorku je navrženo použít výkonnější lis, který dokáže vzorky rozlomit a docílit tak jednoznačných závěrů.

6.2 Metalografická zkouška

Zkoušky makrostruktury a mikrostruktury byly rovněž realizovány v laboratořích FSI. Ke zkouškám byly odebrány celkem čtyři vzorky. Dva vzorky z příčniku vyrobeného technologií „one step“ (H7), a dva z příčniku „two step“ (H16).

6.2.1 Příprava vzorků

Příčník byl dodán firmou PEWAG ve formě plátků v nařezaném stavu, viz obr. 61. Z důvodu požadované vysoké jakosti povrchu za účelem další přípravy a nulového tepelného ovlivnění materiálu byly vzorky nařezány elektroerozivním řezáním. Vybrány byly, jak již bylo zmíněno, pouze čtyři vzorky. Z obou příčníků dva, umístěné ve středu kostičky. Zde se totiž u technologie „two step“ překrývají dvě svarové housenky.

Vzorky je dále potřeba nařezat na menší části o maximálních rozměrech 30 x 30 mm tak, aby je bylo možné zalisovat do pryskyřice. Pro nařezání bylo použito manuální řezací zařízení STRUERS Labotom – 5, jež je vidět na obr. 62, osazeno dělicím kotoučem Struers 50A20 určeného pro řezání tvrdých materiálu. Jedná se prakticky o kotoučovou pilu s intenzivním chlazením řezaného vzorku, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění. Pro upnutí byl použit speciální přípravek z obr. 63.

Následně byly na vzorcích zabroušeny ostré hrany, odmaštěny technickým lihem a připraveny k zalisování do pryskyřice.



Obr. 61 Nařezaný příčník k odběru vzorků



Obr. 62 Řezací zařízení Struers Labotom - 5



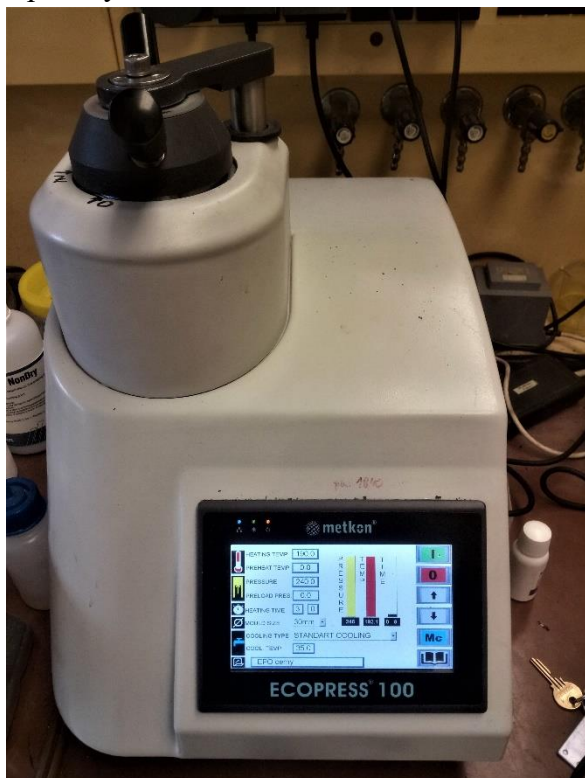
Obr. 63 Upnutí vzorků do přípravku

Připravený vzorek se umístí do válce lisovacího zařízení Metkon Ecompress 100 na obr. 66. Tento lis se využívá k zalévání vzorků do pryskyřice. Před samotným zalisováním je potřeba oba pístky lisu (vrchní i spodní) potřít separátorem zamezující přilepení vzorku k pístu. Následně je vzorek zasypan epoxidovým pryskyřicovým granulátem Metkon EPO a při teplotě 190 °C zalisován. Doba lisování včetně chlazení je přibližně 15 minut. Po vyjmutí je potřeba obrousit přebytečné otřepty na hranách vzorku. Zalisovaný vzorek je viděn na obr. 64.



Obr. 64 Zalisovaný vzorek

K broušení a leptání vzorků se využil stroj Struers LaboPol – 5 na obr. 65. Do rotující hlavy se umístí tři vzorky a postupně se brousí. Použity byly kotouče se třemi stupni hrubosti – 220, 800 a 1200. K dosažení zrcadlového lesku byla použita kombinace diamantové suspenze s plstěnými kotouči.



Obr. 66 Metkon Ecompress 100



Obr. 65 Struers LaboPol – 5

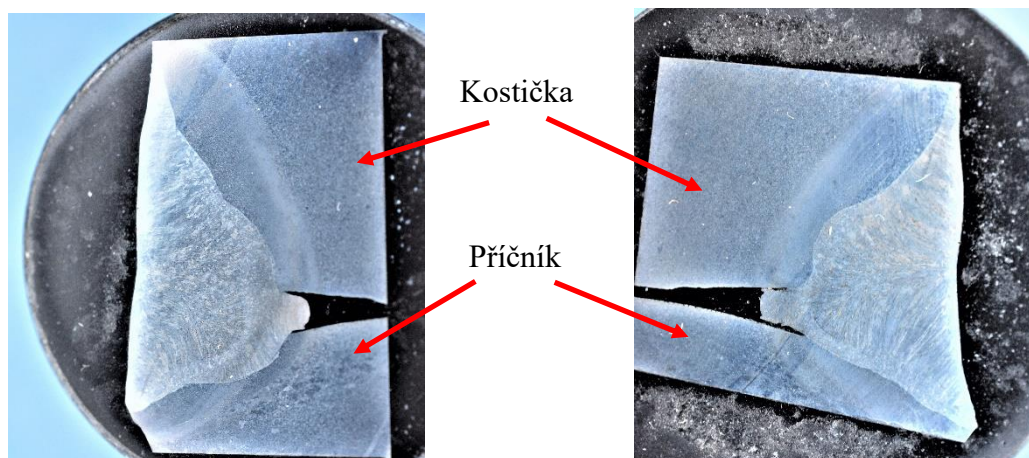
Pro zviditelnění struktury se posléze použilo leptadlo. Struktura svarového kovu a TOO byla naleptána nitalem, což je 3 % roztok kyseliny dusičné v etanolu, a závěrem opláchnuta technickým lihem. Tím byla ukončena příprava vzorků k pozorování mikro a makrostruktury.

6.2.2 Vyhodnocení makrostruktury

Snímky makrostruktury byly pro všechny vzorky pořízeny stereomikroskopem SSM-3EC2 s USB kamerou, při zvětšení 53x. Zobrazování struktury proběhlo při LED osvětlení, které je součástí mikroskopu. Vytvořené fotografie byly následně upraveny v programu DINO Capture 2.0 pro měření vzdáleností. U makrostruktury se vyhodnocovala velikost TOO a neprůvarů kořene svaru.

Dále byly vzorky fotografovány makro objektivem a pořízené snímky byly použity pro zakreslení míst odběrů mikro a makrostruktury a znázornění místa měření tvrdosti.

- Vzorek 16 – makrostruktura obou vzorků svařovaných metodou „two step“ je na obr. 67 a 68.



Obr. 67 Makrostruktura vzorku 16 - levý

Obr. 68 Makrostruktura vzorku 16 - pravý

Vzorky byly odebrány ze středové části kostičky, aby bylo možné identifikovat překrytí svarových housenek. Na levém i pravém vzorku jsou tak patrné dvě TOO, které se překrývají.

Velikost TOO je u levého vzorku v materiálu kostičky 4,3 mm. U vzorku pravého je velikost TOO v materiálu kostičky 3,7 mm. Pokud se jedná o velikosti TOO v základním materiálu příčníku, nebyly tyto hodnoty měřeny, jelikož vzorek neobsahoval celou oblast TOO. Byly však zde měřeny velikosti překrytí dvou housenek. U levého vzorku je velikost překrytí 2,4 mm a u vzorku pravého 0,8 mm.

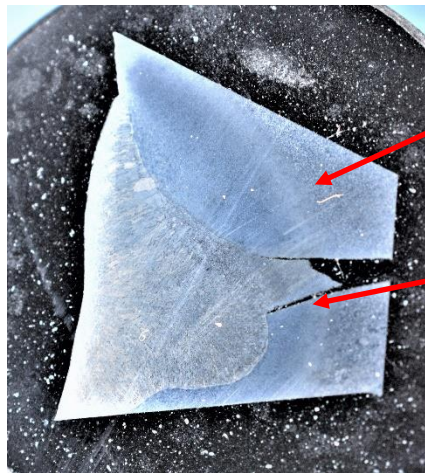
Dalším zkoumaným místem je kořen svaru. Již z fotek je patrné neprovaření a převýšení kořene v této oblasti. Neprovařený kořen lze považovat jako místo iniciace trhliny. Tuto vadu lze posoudit dle normy ČSN EN ISO 5817, která určuje stupeň kvality svarových spojů, viz tab. 10. Stupeň kvality B odpovídá nejvyššímu požadavku na kvalitu zhotoveného svaru a stupeň kvality D nejnižšímu.

Tab. 10 Mezní hodnoty vad dle normy ČSN EN ISO 5817 [56]

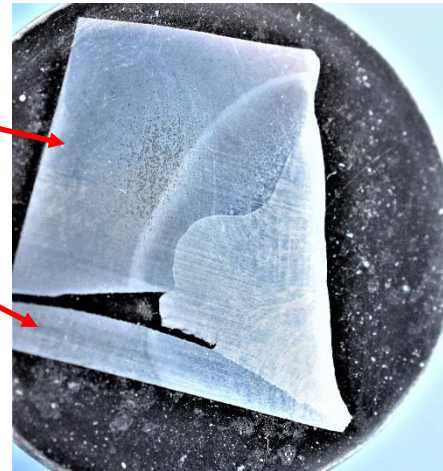
Název vady	Poznámka	t [mm]	Mezní hodnoty vad pro stupeň kvality		
			D	C	B
Neprovařený kořen	Pouze tupé svary	$\geq 0,5$	Krátké vady: $H \leq 0,2 t$, ale max. 2 mm	Nepřípustné	Nepřípustné

Velikost neprovařeného kořene je u levého vzorku 1,4 mm a u pravého vzorku 2,4 mm. Z hlediska stupně kvality C a B je tato vada v kořeni nepřipustná. Pro stupeň kvality D vyhovuje pouze vzorek levý, pravý nikoliv. Detailní foto makrostruktury, velikosti TOO a vad vzorků 16 jsou v příloze 1.

- Vzorek 7 – makrostruktura levého i pravého vzorku svařovaných metodou „one step“ je na obr. 69 a 70.



Obr. 69 Makrostruktura vzorku 7-levý



Obr. 70 Makrostruktura vzorku 7 - pravý

U vzorku 7 – pravý i 7 – levý jsou vidět nepravidelnosti v promísení svarového kovu se základním materiálem. U pravého vzorku je větší promísení se ZM kostičky, kdežto u vzorku levého je tomu se ZM příčníku.

TOO jsou znatelně větší v materiálu kostičky. TOO příčníku není ve vzorcích kompletní, jelikož velikost preparovaných vzorků byla limitována lisovacím strojem. Velikost TOO je u levého vzorku v materiálu kostičky 5,6 mm a u vzorku pravého 4,2 mm. Je tedy větší TOO u technologie „one step“ než u technologie „two step“, byť množství vneseného tepla je právě u této technologie nižší.

Dalším zkoumaným místem byl rovněž kořen svaru, který je taktéž patrně neprovařen. Velikost neprovařeného kořene u vzorku levého je 3,7 mm a u vzorku pravého 3,3 mm. Z hlediska stupně kvality C a B, viz tab. 10, je tato vada v kořeni nepřipustná a rovněž tak je nepřipustná pro stupeň kvality D, neboť délka neprovařeného kořene je větší než 2 mm. Mimo to je u pravého vzorku vidět rozvíjející se trhlinka ve svarovém kovu pocházející právě z neprovařeného kořene svarového kovu s příčníkem.

Detailní fotografie makrostruktury, velikosti TOO a vad vzorků 7 jsou v příloze 1.

6.2.3 Vyhodnocení mikrostruktury

U všech čtyřech svařovaných vzorků se zkoumala mikrostruktura v oblasti svarového kovu, TOO a základního materiálu. Cílem pozorování je získat bližší informace o jednotlivých strukturních fázích, popř. mikrotrhlinách.

Vzorky byly pozorovány na světelném trinokulárním mikroskopu se zvětšením 200x. Jedná se o mikroskop se dvěma tubusy určenými pro pozorování očima a třetí slouží k připojení fotoaparátu, viz obr. 71.

K znázornění určení místa focení mikrostruktury byly použity makro fotografie. Z každého vzorku bylo pořízeno 5 snímků – základní materiál příčnicku a kostičky, TOO příčnicku a kostičky a svarový kov.



Obr. 71 Trinokulární mikroskop

Při zkoumání mikrotrhlin, vměstků apod. nebylo nalezeno žádných vad. Občas lze na fotografiích v příloze 2 vidět černé tečky, což jsou nejspíše póry vzniklé leptáním, které nemají zásadní vliv na pevnost svarového spoje. Dále byla zkoumána samotná mikrostruktura oceli.

- Vzorek 16 – fotografie mikrostruktury všech oblastí levého i pravého vzorku jsou dále, v příloze 2.

Struktura svarového kovu levého i pravého vzorku je tvořena feritem a perlitem. Dalším místem je základní materiál kostičky a příčnicku. U obou vzorků se v kostičce i příčnicku vyskytuje bainit. V materiálu kostičky je však vidět jemnější struktura bainitu.

V místě teplem ovlivněné oblasti, kde došlo ke strukturním změnám vlivem svařování, je struktura u levého i pravého vzorku tvořena martenzitem. Opět lze vidět jemnější strukturu v materiálu kostičky.

Struktury všech oblastí obou vzorků 16 jsou v tab. 11.

Tab. 11 Struktury vzorků 16

Vzorek	Místo určení	Materiál	Struktura
16 - levý	Svarový kov	OK Autrod 12.51	Feriticko-perlitická
	ZM kostičky	30MnB5	Bainit
	TOO kostičky	30MnB5	Martenzit
	ZM příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit
	TOO příčnicku	27MnCrB5-2	Martenzit
16 – pravý	Svarový kov	OK Autrod 12.51	Feriticko-perlitická
	ZM kostičky	30MnB5	Bainit
	TOO kostičky	30MnB5	Martenzit
	ZM příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit
	TOO příčnicku	27MnCrB5-2	Martenzit

- Vzorek 7 – fotografie mikrostruktury všech oblastí levého i pravého vzorku jsou rovněž v příloze 2.

Struktura svarového kovu u obou vzorků je velmi podobná vzorkům 16 a je tvořena taktéž feritem a perlitem. Základní materiály příčnicku i kostičky u obou vzorků v blízkosti TOO jsou tvořeny bainitem. TOO u vzorku pravého vlivem strukturních změn obsahují převážně martenzitickou strukturu, kdežto u vzorku levého se jedná o bainit.

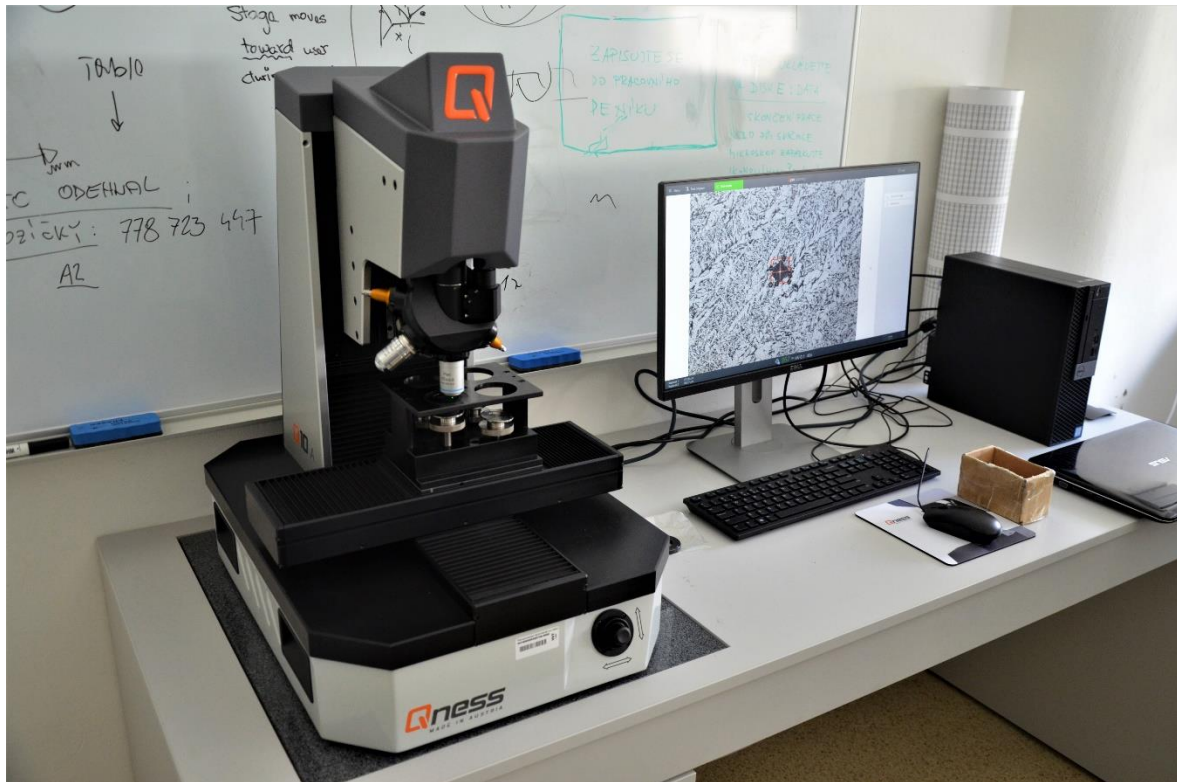
Struktury všech oblastí vzorků 7 jsou vyneseny do tab. 12.

Tab. 12 Struktury vzorků 7

Vzorek	Místo určení	Materiál	Struktura
7 - levý	Svarový kov	OK Autrod 12.51	Feriticko-perlitická
	ZM kostičky	30MnB5	Bainit
	TOO kostičky	30MnB5	Bainit
	ZM příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit
	TOO příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit
7 – pravý	Svarový kov	OK Autrod 12.51	Feriticko-perlitická
	ZM kostičky	30MnB5	Bainit
	TOO kostičky	30MnB5	Martenzit
	ZM příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit
	TOO příčnicku	27MnCrB5-2	Martenzit

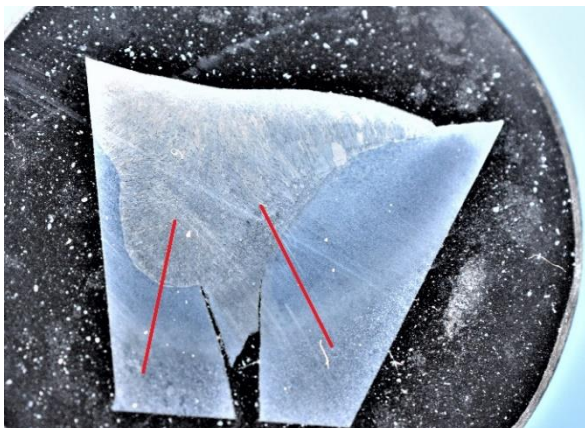
6.3 Zkouška mikrotvrlosti

Průběh zkoušky mikrotvrlosti dle Vickerse probíhal podle normy ČSN EN ISO 6507-2. Měření mikrotvrlosti probíhalo v prostorách FSI na mikrotvrdoměru Qness Q10A s maximálním zatížením 10 kg. Tento plně automatický mikrotvrdoměr je vybaven joystickem a integrovanou kamerou určenou pro měření délky úhlopříček (obr. 72).

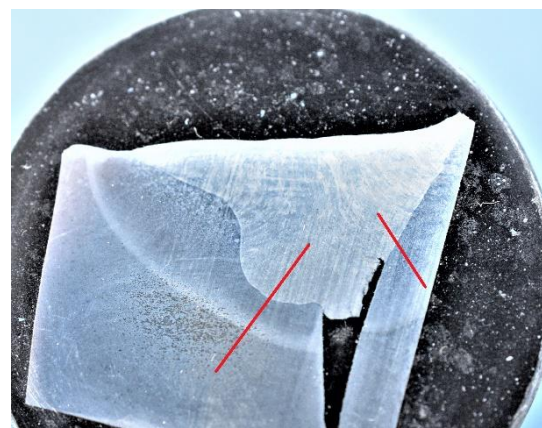


Obr. 72 Tvrdoměr Qness Q10A v kombinaci s počítačovou sestavou

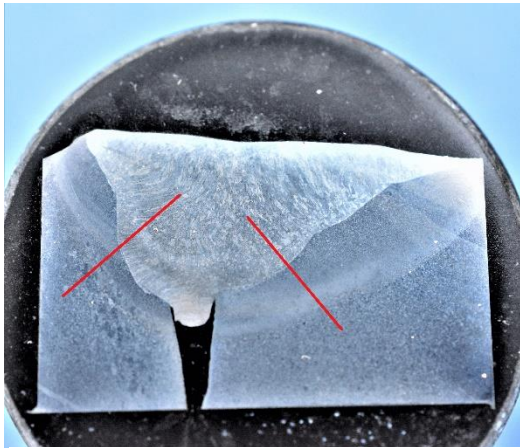
Vtisky podél celého svaru byly vytvořeny v automatickém režimu dle zadaných parametrů obsluhou. Po dobu cca 20 minut probíhalo měření a následujících 20 minut probíhal výpočet mikrotvrlosti, kterou software automaticky vypočte na základě velikosti změřených úhlopříček. Byla použita zkouška mikrotvrlosti HV0,1, tedy zatížení 0,1 kp v kroku 0,25 mm. U všech vzorků byla tvrdost měřena ve dvou liniích, každá s 33 vpichy. Linie vpichů pro jednotlivé vzorky jsou v obr. 73 až obr. 76. Měření probíhalo zleva doprava.



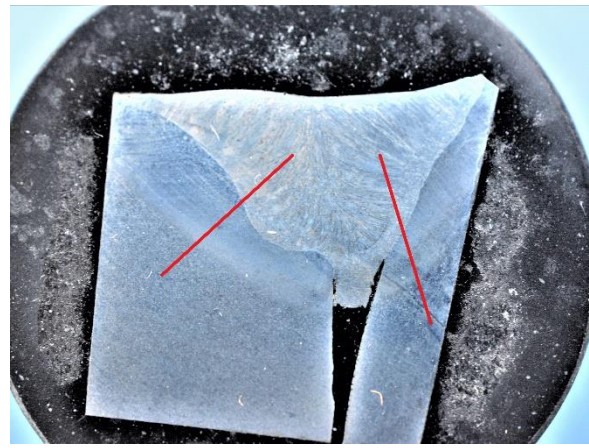
Obr. 74 Linie vpichů vzorku 7 - levý



Obr. 73 Linie vpichů vzorku 7 - pravý



Obr. 76 Linie vpichů vzorku 16 - levý



Obr. 75 Linie vpichů vzorku 16 - pravý

Výsledky měření mikrotvrdomosti jsou zaneseny do příslušných grafů, ve kterých jsou jednotlivé oblasti vpichů popsány. Zkouška sloužila k ověření výsledných struktur ve svarovém kovu, TOO a základním materiálu.

- Vzorek 16 – tvrdosti vzorků 16 levý a pravý napříč svarem jsou zobrazeny v grafech na obr. 77 a obr. 78.



Obr. 77 Průběh tvrdosti vzorku 16 - levý

V případě levého vzorku na obr. 77 je maximální tvrdost v TOO kostičky, a to 520 HV_{0,1}. Z této hodnoty a obr. 26 lze usoudit, že pro materiál 30MnB5 s obsahem uhlíku 0,3 % se jedná o martenzitickou strukturu. Rovněž se jedná o martenzitickou strukturu v TOO příčnicku, kde je tvrdost o něco nižší než v kostičce z důvodu nižšího podílu uhlíku v ZM příčnicku.

Tvrdomost svarového kovu se pohybuje v rozmezí 250 až 300 HV_{0,1}. Tato tvrdost je typická pro feriticko-perlitickou strukturu, což odpovídá chemickému složení přídavného materiálu.

V základním materiálu příčnicku i kostičky je naměřená tvrdost 300 až 350 HV0,1, což odpovídá martenziticko-bainitické struktuře.



Obr. 78 Průběh tvrdosti vzorku 16 - pravý

U pravého vzorku na obr. 78 je průběh tvrdosti podobný levému vzorku. Nejvyšší tvrdost vykazují TOO kostičky, 440 až 470 HV0,1. To svědčí o převážném výskytu martenzitu ve struktuře. Tvrdość svarového kovu je rovněž v rozmezí 250 až 300 HV0,1, tedy feriticko-perlitická struktura. Základní materiál kostičky i příčnicku vykazují tvrdost v blízkosti TOO 300 až 350 HV0,1, což potvrzuje výskyt martenziticko-bainitické struktury. Detailní hodnoty tvrdosti vzorků 16 levý i pravý s příslušnými grafy jsou dále v příloze 3.

- Vzorek 7 – tvrdosti vzorků 7 levý a pravý napříč svarem jsou zobrazeny v grafech na obr. 79 a obr. 80.



Obr. 79 Průběh tvrdosti vzorku 7 - levý

U vzorku 7 – levý na obr. 79 jsou tvrdosti v oblasti TOO zřetelně nižší než u předchozích vzorků. Maximální tvrdost je v TOO kostičky, 375 HV_{0,1}. Dle obr. 27 tato tvrdost odpovídá podílu 50 % martenzitu ve struktuře. V TOO příčniku je tvrdost přibližně stejná v rozmezí 340 až 370 HV_{0,1}.

Tvrdost svarového kovu je v rozmezí 230 až 270 HV_{0,1}. Opět se jedná o feriticko-perlitickou strukturu, čemuž odpovídají hodnoty tvrdosti.

Základní materiál příčniku i kostičky vykazuje tvrdost v rozmezí 270 až 320 HV_{0,1}. Tato hodnota odpovídá tvrdosti bainitu.



Obr. 80 Průběh tvrdosti vzorku 7 - pravý

U vzorku 7 – pravý, viz obr. 80, je tvrdost v TOO kostičky v rozmezí 440 až 460 HV_{0,1}. Je tedy vyšší než u vzorku levého přibližně o 100 HV_{0,1}. Tato tvrdost odpovídá struktuře 70 % martenzitu. V případě TOO příčniku je tvrdost nižší, což je způsobeno již zmíněným nižším obsahem uhlíku.

Svarový kov zde vykazuje tvrdost v rozmezí 250 až 270 HV_{0,1}. Jedná se rovněž o feriticko-perlitickou strukturu.

Základní materiál kostičky dosahuje na rozhraní TOO tvrdosti 320 HV_{0,1}. Tedy bainiticko-martenzitická struktura.

Detailní hodnoty tvrdosti vzorků 7 levý i pravý s příslušnými grafy jsou k nahlédnutí v příloze 3.

6.4 Analýza zbytkového austenitu

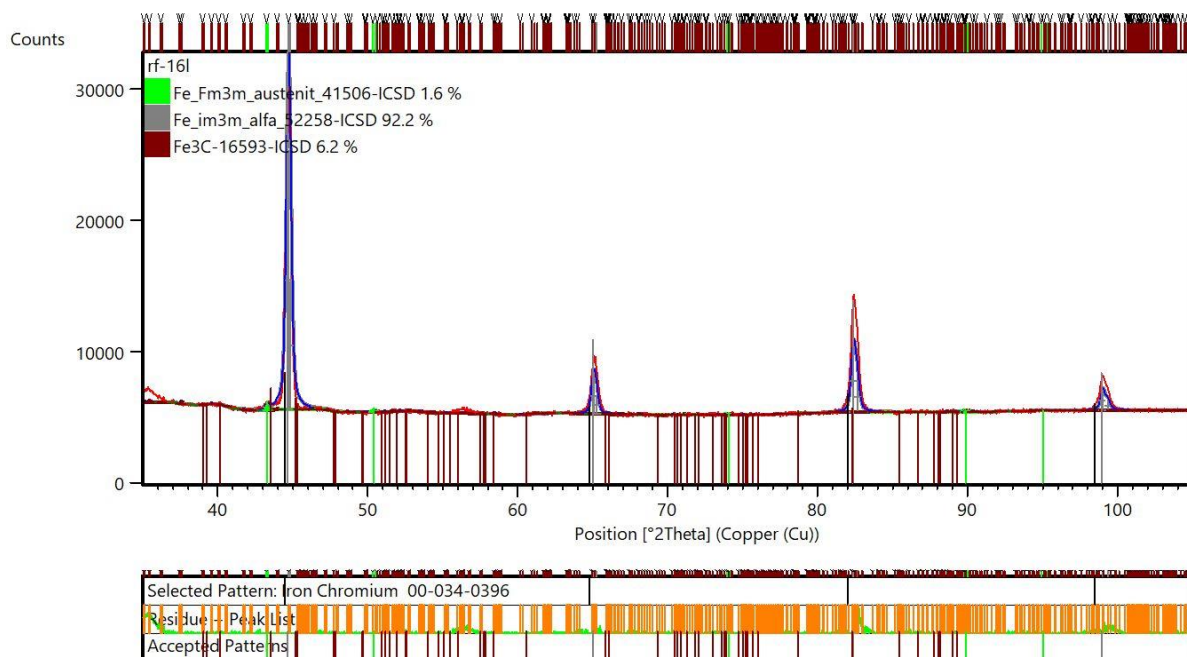
Cílem analýzy je zjistit množství zbytkového austenitu ve struktuře, popřípadě i jiné fáze. Tato struktura, jak již bylo zmíněno v teoretické části, snižuje tvrdost, vede ke změně vlastností a nárůstu vnitřního pnutí. Je tedy vhodné podíl zbytkového austenitu snížit na co nejnižší množství a to popouštěním.



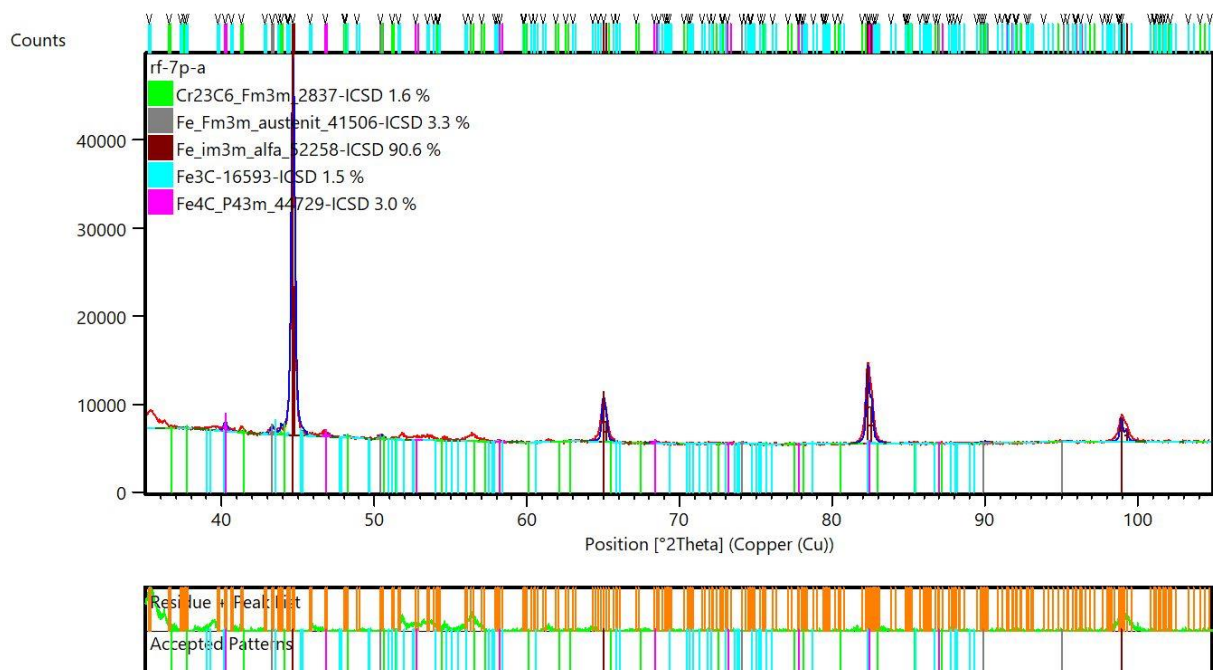
Obr. 81 Philips X'Pert

Pro zjištění přítomného množství zbytkového austenitu byl použit rentgenový difraktometr Philips X'Pert, viz obr. 81. Analýza byla provedena pouze na dvou vzorcích. Na vzorku 7 – pravý, a vzorku 16 – levý.

Výsledky analýzy jsou v následujících grafech na obr. 82 a obr. 83.



Obr. 82 Graf rentgenové difrakce vzorku 16 - levý



Obr. 83 Graf rentgenové difrakce vzorku 7 - pravý

U obou vzorků je přítomnost zbytkového austenitu v poměrně malém množství.

Vzorek 16 obsahuje 1,6 % austenitu. U vzorku 7 je podíl dvojnásobný, a to 3,3 % zbytkového austenitu. Jedná se o stopové množství, které nemá zásadní vliv na mechanické vlastnosti spoje. Po správném kalení a popouštění by oba vzorky měli mít nulový obsah zbytkového austenitu.

7 ZÁVĚRY

Diplomová práce se zabývá svařováním borových ocelí metodou 135. Konkrétně se jedná o svařování řetězů harvestorů. V teoretické části je podrobně popsána metoda svařování 135 a s ní spojena problematika svařitelnosti borových ocelí. Také zde byly vypsány základní metody jak destruktivního, tak nedestruktivního zkoušení svarových spojů.

Praktická část byla vyhotovena ve spolupráci s firmou PEWAG, jež dodala vzorky k analýze. Na základě známých parametrů svařování byly provedeny zkoušky rozlomením, makrostruktury, mikrostruktury, tvrdosti a vyhodnocení zbytkového austenitu. Výsledky jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v kapitole 6.

Pevnost obou vzorků, zkoušena rozlomením, byla pro oba vzorky shodná, a to bez porušení i při maximálním zatížení stroje. Hodnocení makrostruktury a mikrostruktury nevykazovaly mezi technologií „one step“ a „two step“ žádné podstatné rozdíly. Oba vzorky měly přibližně stejné vady v kořeni svaru. U měření mikrotvrdosti byly rozdíly v tepelně ovlivněných oblastech, přičemž vyšší tvrdost byla naměřena u technologie „two step“. Množství zbytkového austenitu je vyšší u vzorku 7 s obsahem 3,3 hm. %.

Závěrem tak doporučuji upravit konstrukční řešení kostičky, popřípadě příčnicku, tak aby součásti k sobě před svařením doléhaly po celé ploše, eventuelně upravit polohování robota, aby nedocházelo k vadám v kořeni svaru. Dále je důležité se zaměřit na tepelné zpracování po svaření, kdy je v TOO příliš vysoká tvrdost především u vzorků 16, tedy technologie „two step“, a vysoký obsah zbytkového austenitu u vzorku 7.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
2. *Svařování* [online]. [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1802>
3. TEUER, Tomáš. *Kvalifikace postupů svařování kobaltových a nerezových žáruvzdorných slitin*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Marián Sigmund, Ph.D.
4. *MIG nebo MAG? Jaký je rozdíl* [online]. 06.02.2008 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007101501>
5. *MIG/MAG welding – GMAW Process* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://eswipquestions.blogspot.com/2014/07/migmag-welding-gmaw-process.html>
6. *TPS/i* [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyroby/ručni-svařování/migmag/tpsi/tpsi/tps-400i>
7. ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha, 2011.
8. *Bórové oceli - oceli budoucnosti* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/5320-borove-oceli-oceli-budoucnost>
9. Profil společnosti. *Pewag* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.pewag.cz/o-spolecnosti/profil-spolecnosti/>
10. *Historie svařování* [online]. 14.06.2006 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006061401>
11. BENEŠ, Libor. *Svařování* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
12. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II: část svařování* [online]. , 118 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubic_ek.pdf
13. *MIG welding or Stick welding?* [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://www.hgcodedwelding.com/Articles/mig-welding-or-stick-welding>
14. *Mechanismy podávání drátu u MIG/MAG svářeček* [online]. 22.11.2008 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008020702>
15. VIŇÁŠ, Ján. *Volba prídavných materiálov pre zvaranie v ochranných atmosférach plynov* [online]. 06/2003, [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/6-2003/pdf/79-83.pdf>
16. *Nové barevné značení tlakových láhví* [online]. 05/2001 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/barevne_lahve.pdf
17. *Ověření materiálových vlastností prídavných svařovacích materiálů – při svařování ocelových konstrukcí* [online]. 18.8.2017 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z:

- <http://www.kovoklastr.cz/overeni-materialovych-vlastnosti-pridavnych-svarovacich-materialu-pri-svarovani-ocelovych-konstrukci/>
18. BARTÁK, Jiří. *Způsoby přenosu kovu v oblouku při svařování MIG / MAG* [online]. 1.11.2012 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/33/zpusoby-prenosu-kovu-v-oblouku-pri-svarovani-mig-mag-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EpFjcViRfZmLv1Mqpw5FSOI/?uri_view_type=44&uid=12BWqrYaKoQJz-RG0ZCbDVA&e=1dq-6kbMoBPF3-q0Y7NaPscj0PGJKzesh
 19. *Polohy svařování* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: http://bahr.kahstudio.cz/met_polohy.php
 20. *Svařování MIG-MAG* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.siad.com/cs/odvetvi/chemicky-a-farmaceuticky/pouziti/mig-mag-svarovani>
 21. MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*. 2., aktualiz. vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 2003. ISBN 80-718-3285-5.
 22. MORAVEC, Jaromír. *Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu metody MIG/MAG* [online]. , 67 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41120960-Svarovani-tavici-se-elektrodou-v-ochrannem-plynu-metody-mig-mag.html>
 23. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování* [online]., 42 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf
 24. BLECHA, Petr, Zdeněk KOLÍBAL, Radek KNOFLÍČEK, Aleš POCHYLÝ, Tomáš KUBELA, Radim BLECHA a Tomáš BŘEZINA. *Mechatronika Modul 10: Robotika - Učebnice* [online]., 98 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8054951-Mechatronika-modul-10-robotika.html>
 25. *Svařovací kabiny* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://enetextechnology.eu/web/produkty/tryskani/svarovaci-kabiny/>
 26. *Porovitost svarů oceli svařovaných metodou MIG/MAG* [online]. 10.02.2016, , 94 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/porovitost-svaru-oceli-svarovanych-metodou-mig-mag.html>
 27. OPLETAL, Jan, Petr KADRŇKA, Václav PILOUS a Jan OPLETAL. *Svařitelnost ocelí*. Brno: TESYDO, 2017. ISBN 978-80-87102-17-6.
 28. FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Ivo HLAVATÝ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
 29. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
 30. *Mangan-borové oceli* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <http://www.bilstein-cee.cz/produkty/sortiment-bilstein-group/mangan-borove-oceli/>
 31. *Boron in Steel: Part Two* [online]. 12/2007 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=CZ&site=kts&NM=214>
 32. *VMB Steel* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: https://steelselector.sij.si/steels_cct/vmb.html
 33. OCHODEK, Vladislav. *Stanovení teploty předehřevu* [online]. 03/2012, 60 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z:

- http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/stanoveni_teploty_predehrevu_2012.pdf
34. SIGMUND, Marián. *Soubor přednášek*.
 35. *Základy tepelného zpracování kovů* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
 36. JANDOVÁ, Dagmar. *Makrostruktura svarového spoje* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Macrostructure-of-a-weld-joint-and-the-Vickers-hardness-dependency-on-distance-of_fig2_229041240
 37. *Hodnocení kvality svarového spoje* [online]. ČVUT Praha, 10 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>
 38. KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0870-6.
 39. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
 40. *VT měřky a měřidla, VT příslušenství* [online]. [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/prodej/vt-zkouseni-vizualni/vt-merky-a-meridla/535-vt-prislusenstvi>
 41. TREJTNAR, Josef. *Destruktivní zkoušky svarových spojů* [online]. 18.9.2017 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EuvDzS7ep4R2shHvEcodyGA/>
 42. *Destruktivní zkoušky svarových spojů* [online]. , 30 [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149104/2_cast.pdf?sequence=21&isAllowed=y
 43. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-720-4283-1.
 44. PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, 2005. ISBN 80-903-3864-X.
 45. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Svařování. ISBN 80-857-7172-1.
 46. ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
 47. *Zkoušky tvrdosti* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, , 12 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
 48. *Zkoušení tvrdosti svarových spojů* [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/zkouseni-tvrlosti-svarovych-spoju>
 49. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
 50. ČSN EN ISO 17637. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha, 2018.
 51. ČSN EN ISO 13018. *Nedestruktivní zkoušení - Vizuální zkoušení - Obecné zásady*. Praha, 2016.

52. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha, 2014.
53. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2623-1.
54. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
55. ČSN EN ISO 9015-2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška tvrdosti – Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svařových spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
56. ČSN EN ISO 5817. *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality*. Praha, 2014.
57. PALA, Zdenek a Andrea ŠTĚPÁNKOVÁ. *Rentgenová difrakce pomáhá poznávat materiály a struktury* [online]. 05/2012 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://jaderka.fjfi.cvut.cz/uploaded/files/ptrtgkipl.pdf>
58. ČSN EN ISO 6947. *Svařování a příbuzné procesy - Polohy svařování*. Praha, 2011.
59. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
60. *Přeměny austenitu* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2863734/>
61. ČSN EN ISO 15609-1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 1: Obloukové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2020.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
Al	Hliník	[-]
Ar	Argon	[-]
A _{c1}	Překrystalizační teplota	[°C]
A _{c3}	Překrystalizační teplota	[°C]
A _{cm}	Segregační teplota	[°C]
ARA	Anizotermický rozpad austenitu	[-]
BN	Nitrid boritý	[-]
B ₂ O ₃	Oxid boritý	[-]
CO ₂	Oxid uhličitý	[-]
Cr	Chrom	[-]
Cr ₂₃ C ₆	Karbidy chromu	[-]
Fe ₂₃ (BC)	Borkarbid železa	[-]
Fe ₂₃ (BC) ₆	Borkarbid železa	[-]
FSI	Fakulta strojního inženýrství	[-]
GMAW	Gas metal arc welding	[-]
HV	Tvrдость dle Vickerse	[-]
I	Svařovací proud	[A]
Mn	Mangan	[-]
M _s	Teplota začátku martenzitické přeměny	[°C]
N	Dusík	[-]
Ni	Nikl	[-]
O ₂	Kyslík	[-]
PA	Poloha vodorovná shora	[-]
PB	Poloha vodorovná šikmo shora	[-]
PC	Poloha vodorovná	[-]
Q _s	Vnesené teplo	[kJ.mm ⁻¹]
Si	Křemík	[-]
SK	Svarový kov	[-]
Ti	Titan	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
t _{8/5}	Doba ochlazování	[s]
U	Svařovací napětí	[V]
v	Rychlost svařování	[mm.s ⁻¹]
V	Vanad	[-]
WPQR	Kvalifikace postupu svařování	[-]
WPS	Specifikace postupu svařování	[-]

ZM	Základní materiál	[-]
Z_{pz}	Zředění svarového kovu	[%]
Zr	Zirkon	[-]
η	Účinnost	[%]
τ	Čas	[s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařovací zařízení pro metodu 135 (Fronius TPS 400i) [6]	10
Obr. 2 Svařování metodou 135 [5]	10
Obr. 3 Svarek příčnicku	11
Obr. 4 Náprava harvestoru osazená řetězy [9]	11
Obr. 5 Postup stehování v 1. variantě	12
Obr. 6 Postup stehování v 2. variantě	12
Obr. 7 Oblasti přenosů kovů v oblouku [1]	13
Obr. 8 Schéma svařovacího zařízení 135 [1]	14
Obr. 9 Voltampérová charakteristika zdroje a oblouku [1]	14
Obr. 10 Princip čtyřkladkového (a) a dvoukladkového (b) podavače [14]	15
Obr. 11 Svařovací hořák [13]	15
Obr. 12 Vliv obsahu CO ₂ na hloubku průvaru [4]	16
Obr. 13 Oxid uhlíčitý [16]	16
Obr. 14 Inertní směs plynů [16]	16
Obr. 15 Svařovací drát [1]	17
Obr. 16 Schéma poloh svařování [19]	17
Obr. 17 Průběh zkratového přenosu [18]	18
Obr. 18 Sprchový přenos kovu [22]	18
Obr. 19 Impulsní přenos kovu [22]	19
Obr. 20 Impulsní bezzkratový přenos [22]	19
Obr. 21 Rotující oblouk [22]	19
Obr. 22 Reakce ochranného plynu s natavenou elektrodou [1]	20
Obr. 23 Technologická výstupní hlavice pro obloukové svařování [24]	21
Obr. 24 Příslušenství pro obloukové svařování [24]	21
Obr. 25 Svařovací kabina [25]	22
Obr. 26 Diagram prokalitelnosti oceli s bórem a bez bóru [31]	24
Obr. 27 Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku a martenzitu [28]	24
Obr. 28 ARA diagram oceli 27MnCrB5-2 [32]	26
Obr. 29 Diagram ARA "in situ" [33]	26
Obr. 30 Teplotní účinky na strukturu svarového spoje [28]	28
Obr. 31 Charakteristický průběh tvrdosti svarovým spojem [36]	29
Obr. 32 Růst zrna při svařování [29]	31
Obr. 34 Způsoby kalení [29]	32
Obr. 35 Schéma martenzitické křivky oceli [60]	33
Obr. 36 Vliv obsahu uhlíku v austenitu na teplotu M _s a M _f [59]	33
Obr. 37 Závislost tvrdosti uhlíkové oceli na teplotě popouštění [59]	33
Obr. 38 Základní vybavení pro vizuální zkoušení [40]	35
Obr. 39 Deformace vtisku [47]	36
Obr. 40 Schéma zkoušky dle Vickerse [47]	36
Obr. 41 Měření tvrdosti jednotlivými vpichy [46]	37
Obr. 42 Měření tvrdosti řadou vpichů [46]	37
Obr. 43 Zkouška rozlomením ohýbací deskou	37
Obr. 44 Řezání polotovaru na pásové pile	39

Obr. 45 Indukční pec pro ohřev polotovarů	39
Obr. 46 Popouštěcí pec.....	40
Obr. 47 Ohýbačka s indukčním ohřevem.....	41
Obr. 48 Krycí nátěr na „céčku“	41
Obr. 49 Krycí nátěr na Stummelu	42
Obr. 50 Upínací lavice	42
Obr. 51 Postup svařování příčnicku, kostičky a „céčka“	44
Obr. 52 Indukční předehřev pro příčník.....	45
Obr. 53 Místa indukčního ohřevu	45
Obr. 54 Manipulační robot.....	45
Obr. 55 Svařovací robotické pracoviště	45
Obr. 56 Postup svařování příčnicku s kostičkami.....	46
Obr. 57 Trhací stroj ZD40.....	47
Obr. 58 Zkušební vzorek pro zkoušku ohybem	47
Obr. 59 Ustavení vzorku při zkoušce ohybem	48
Obr. 60 Graf zkoušky pevnosti v ohybu pro vzorky H7, H16	48
Obr. 61 Nařezaný příčník k odběru vzorků.....	49
Obr. 62 Řezací zařízení Struers Labotom - 5	49
Obr. 63 Upnutí vzorků do přípravku.....	49
Obr. 64 Zalisovaný vzorek.....	50
Obr. 65 Struers LaboPol – 5.....	50
Obr. 66 Metkon Ecopress 100.....	50
Obr. 67 Makrostruktura vzorku 16 - levý	51
Obr. 68 Makrostruktura vzorku 16 - pravý	51
Obr. 69 Makrostruktura vzorku 7- levý	52
Obr. 70 Makrostruktura vzorku 7 - pravý	52
Obr. 71 Trinokulární mikroskop	53
Obr. 72 Tvrdoměr Qness Q10A v kombinaci s počítačovou sestavou	55
Obr. 73 Linie vpichů vzorku 7 - levý	55
Obr. 74 Linie vpichů vzorku 7 - pravý.....	55
Obr. 75 Linie vpichů vzorku 16 - levý	56
Obr. 76 Linie vpichů vzorku 16 - pravý.....	56
Obr. 77 Průběh tvrdosti vzorku 16 - levý	56
Obr. 78 Průběh tvrdosti vzorku 16 - pravý.....	57
Obr. 79 Průběh tvrdosti vzorku 7 - levý	57
Obr. 80 Průběh tvrdosti vzorku 7 - pravý.....	58
Obr. 81 Philips X'Pert.....	59
Obr. 82 Graf rentgenové difrakce vzorku 16 - levý	59
Obr. 83 Graf rentgenové difrakce vzorku 7 - pravý	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení elektrody ESAB OK 12.51	17
Tab. 2 Chemické složení (hm. %) použitých borových ocelí	23
Tab. 3 Maximální obsahy prvků pro uhlíkový ekvivalent C_e [25].....	27
Tab. 4 Maximální množství prvků obsažených v oceli pro výpočet C_e (IIW) [28]	27
Tab. 5 Maximální množství prvků obsažených v oceli pro výpočet CET [28].....	27
Tab. 6 Orientační šířka jednotlivých pásem TOO [28].....	29
Tab. 7 Technické údaje kalícího prostředku SERCISCOL.....	40
Tab. 8 Parametry svařování „two step“	43
Tab. 9 Parametry svařování „one step“	46
Tab. 10 Mezní hodnoty vad dle normy ČSN EN ISO 5817 [56]	51
Tab. 11 Struktury vzorků 16	53
Tab. 12 Struktury vzorků 7	54

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Makrostruktura vzorků 16 a 7
Příloha 2	Mikrostruktura vzorků 16 a 7
Příloha 3	Grafy měření tvrdosti
Příloha 4	Výkres sestavy svarku
Příloha 5	Atesty

Příloha 1 Makrostruktura vzorků 16 a 7

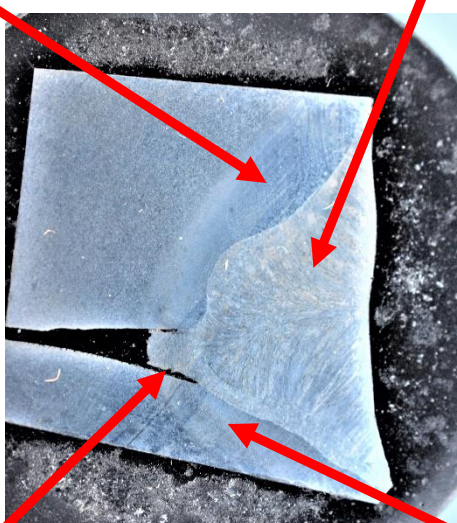
Makrostruktura vzorku 16 – pravý



Obr. 1 Velikost TOO kostičky



Obr. 2 Makrostruktura SK



Obr. 3 Vzorek 16 pravý

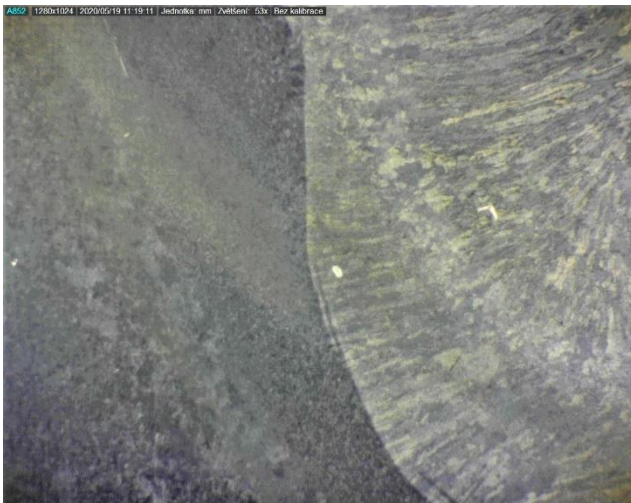


Obr. 4 Vady v kořeni svaru



Obr. 5 Velikost TOO příčnicku

Makrostruktura vzorku 16 – levý



Obr. 1 Překrytá TOO příčnicku



Obr. 2 Velikost TOO kostičky



Obr. 3 Vzorek 16 levý

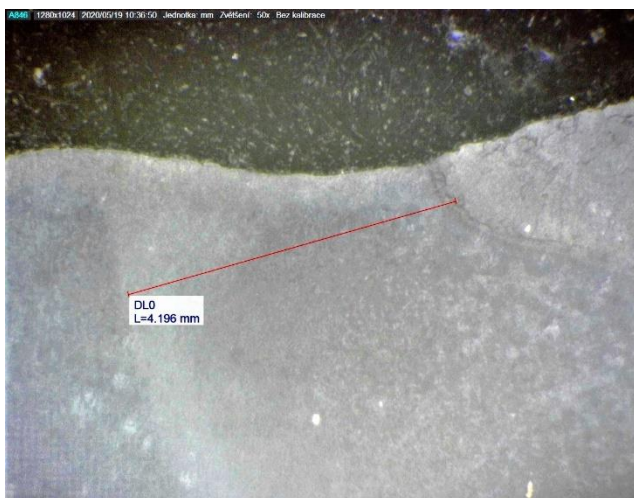


Obr. 4 Velikost překrytí SK

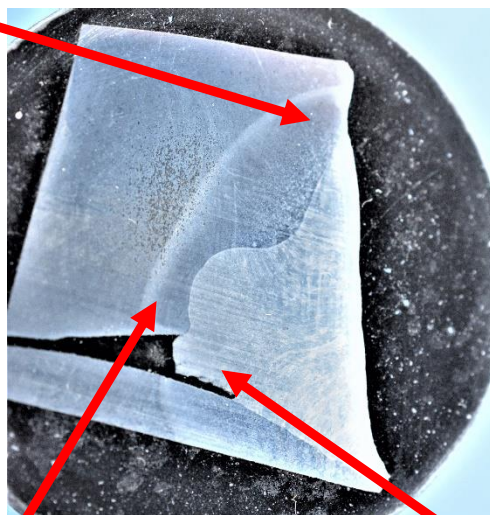


Obr. 5 Vady v kořeni svaru

Makrostruktura vzorku 7 – pravý



Obr. 1 Velikost TOO kostičky



Obr. 2 Vzorek 7 pravý

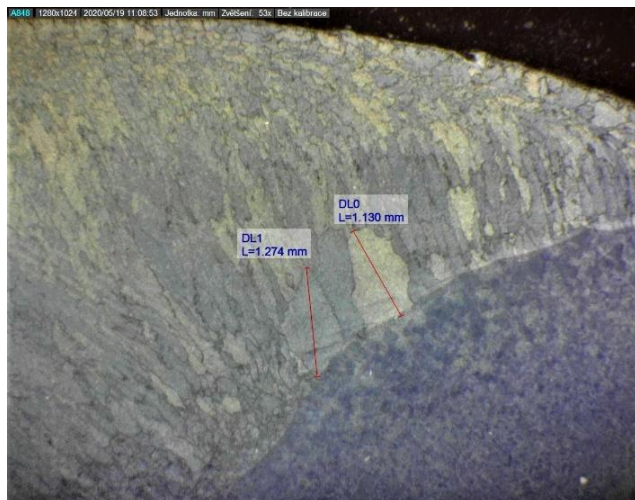


Obr. 3 Velikost TOO kostičky u kořene



Obr. 4 Vady v kořeni svaru

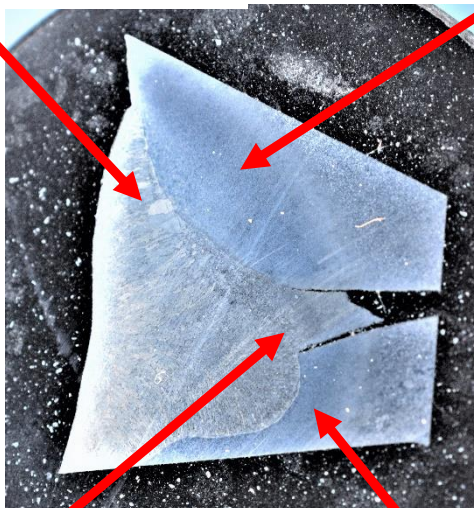
Makrostruktura vzorku 7 – levý



Obr. 1 Velikost dendritů SK



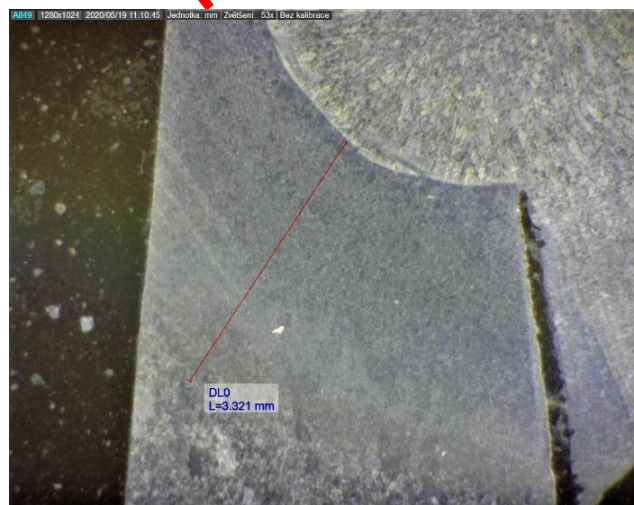
Obr. 2 Velikost TOO kostičky



Obr. 3 Vzorek 7 levý



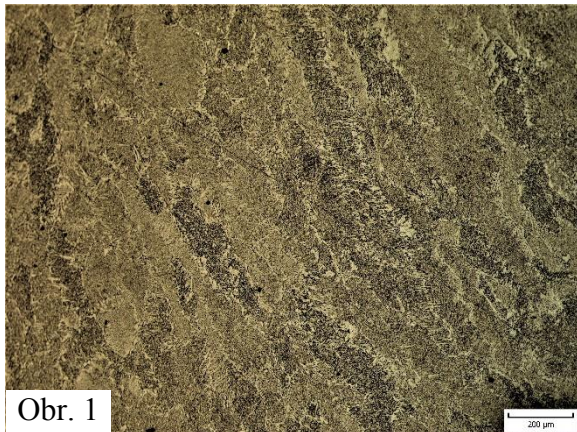
Obr. 4 Vady v kořeni svaru



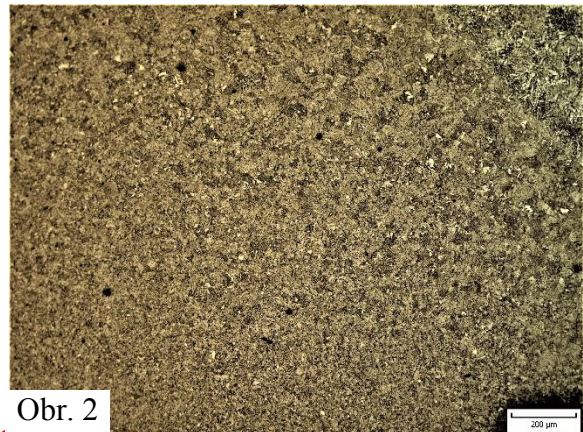
Obr. 5 Velikost TOO příčnicku

Příloha 2 Mikrostruktura vzorků 16 a 7

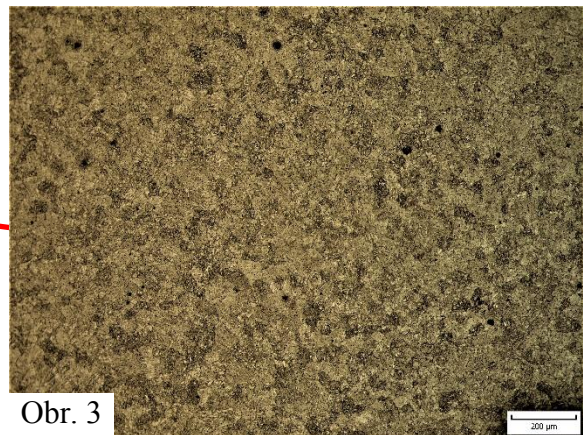
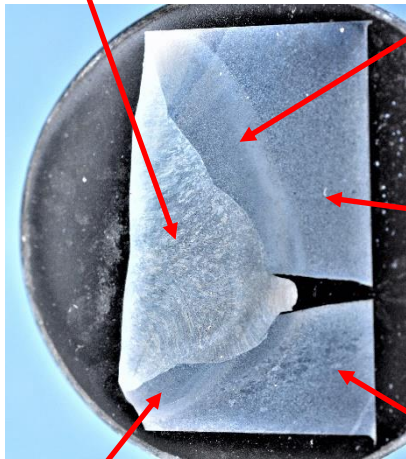
Mikrostruktura vzorku 16 - levý



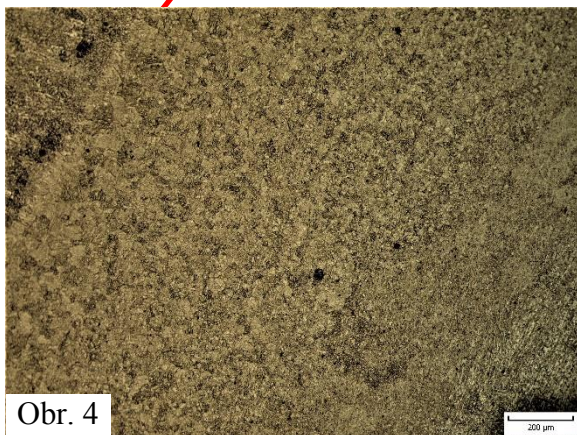
Obr. 1



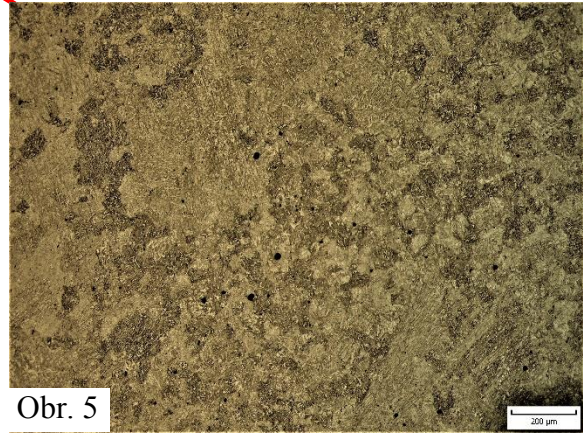
Obr. 2



Obr. 3



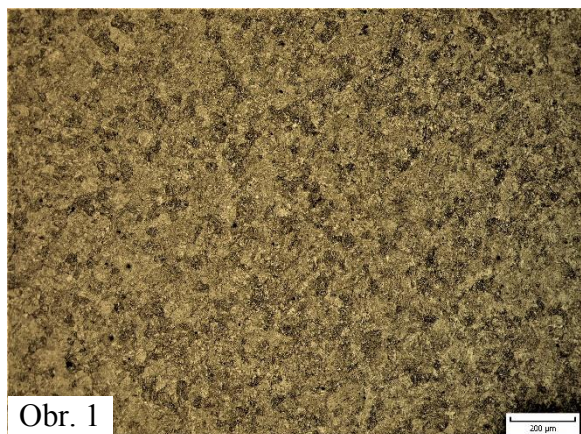
Obr. 4



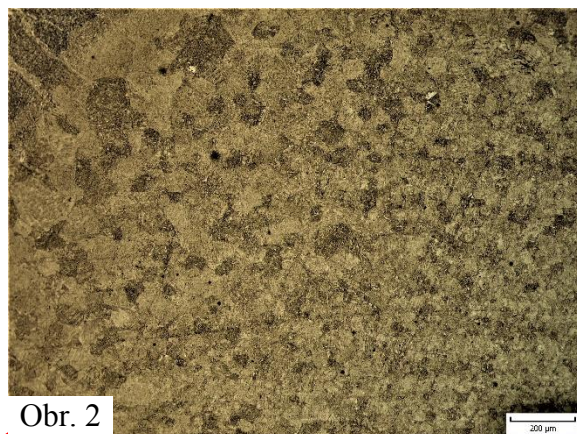
Obr. 5

Obrázek	Místo určení	Material	Struktura
Obr. 1	Svarový kov	OK Autrod 12.51	Feriticko-perlitická
Obr. 2	TOO kostičky	30MnB5	Martenzit
Obr. 3	ZM kostičky	30MnB5	Bainit
Obr. 4	TOO příčnicku	27MnCrB5-2	Martenzit
Obr. 5	ZM příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit

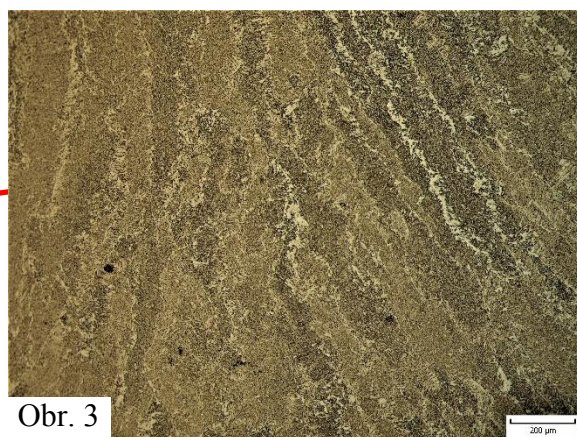
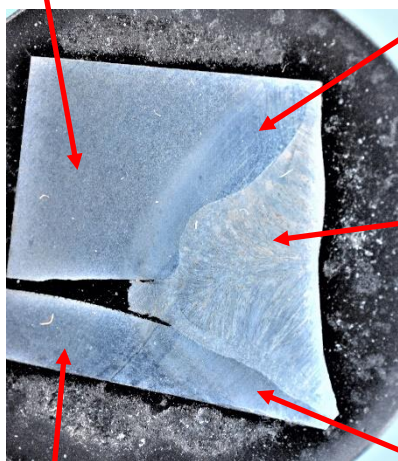
Mikrostruktura vzorku 16 - pravý



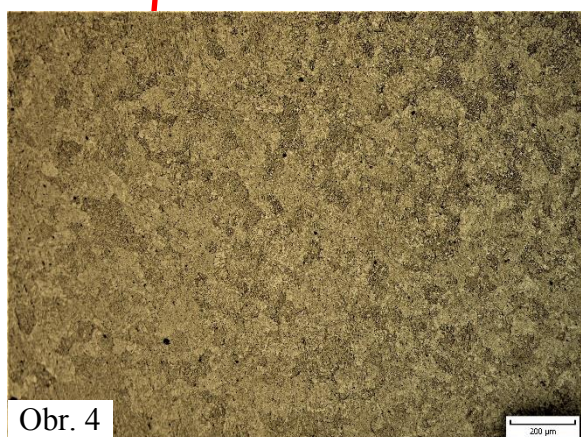
Obr. 1



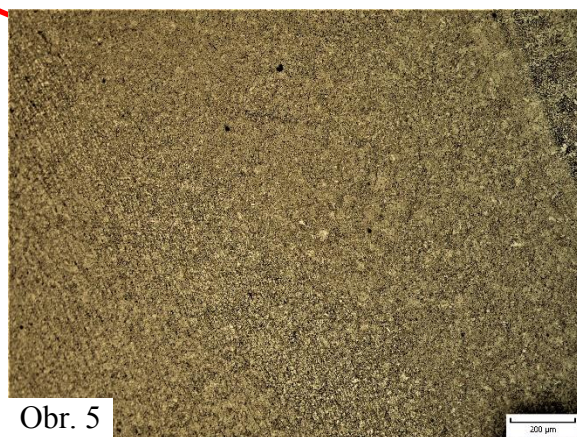
Obr. 2



Obr. 3



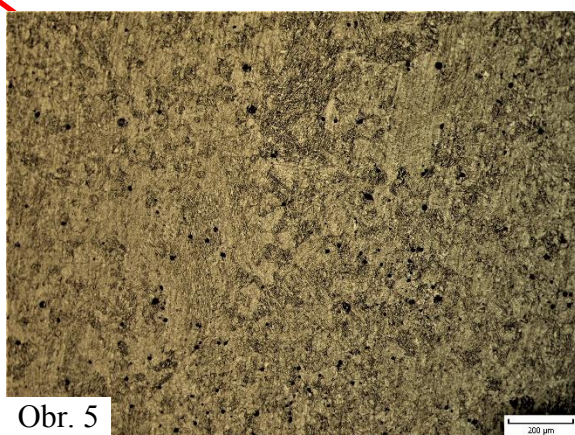
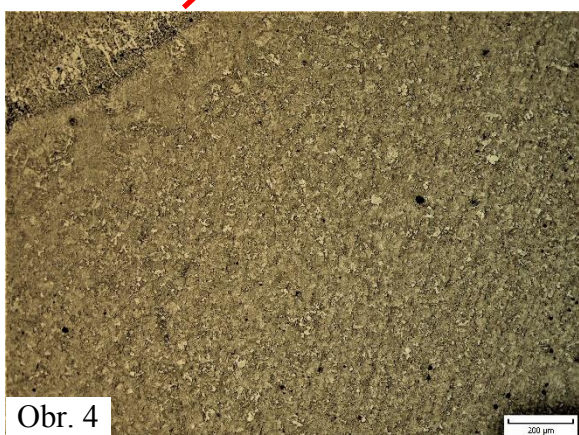
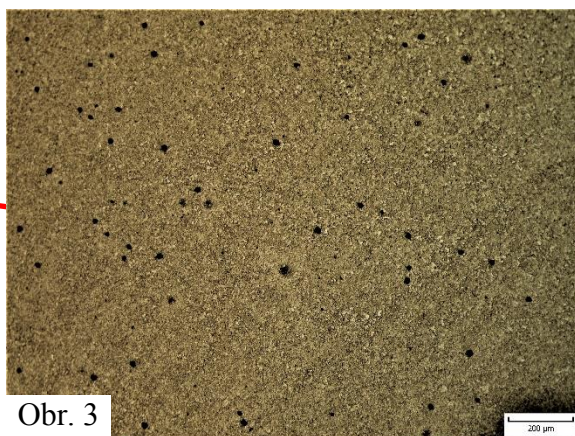
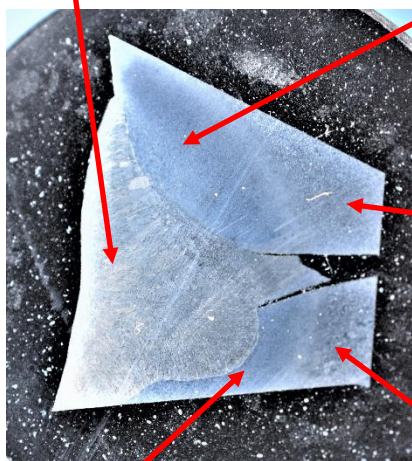
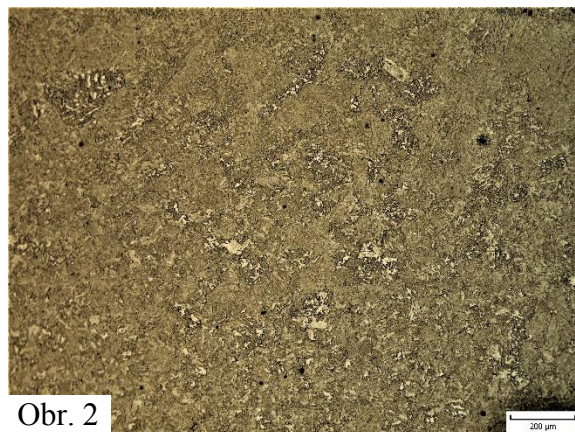
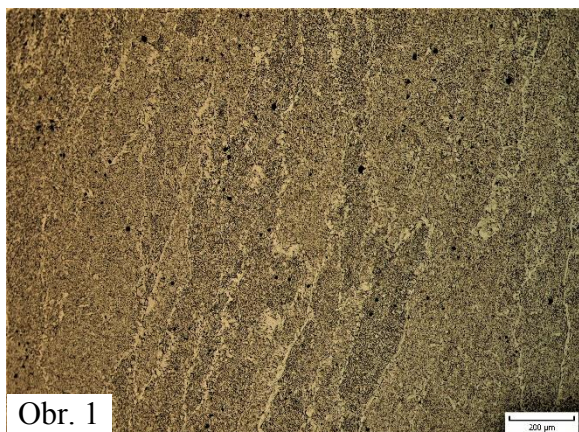
Obr. 4



Obr. 5

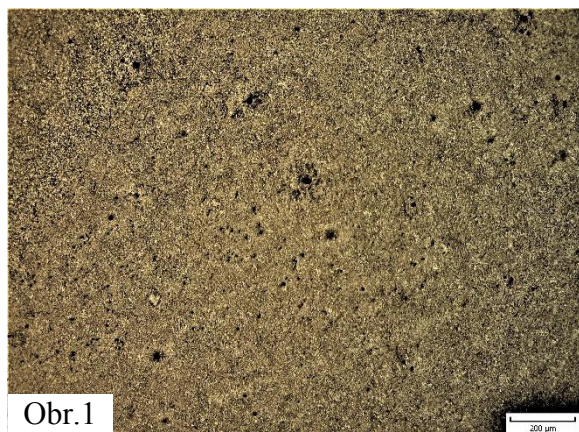
Obrázek	Místo určení	Materiál	Struktura
Obr. 1	ZM kostičky	30MnB5	Bainit
Obr. 2	TOO kostičky	30MnB5	Martenzit
Obr. 3	Svarový kov	OK Autrod 12.51	Feriticko-perlitická
Obr. 4	ZM příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit
Obr. 5	TOO příčnicku	27MnCrB5-2	Martenzit

Vzorek 7 levý

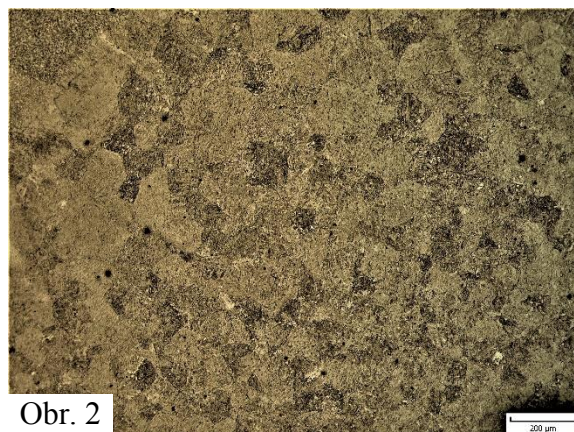


Obrázek	Místo určení	Material	Struktura
Obr. 1	Svarový kov	OK Autrod 12.51	Feriticko-perlitická
Obr. 2	TOO kostičky	30MnB5	Bainit
Obr. 3	ZM kostičky	30MnB5	Bainit
Obr. 4	TOO příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit
Obr. 5	ZM příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit

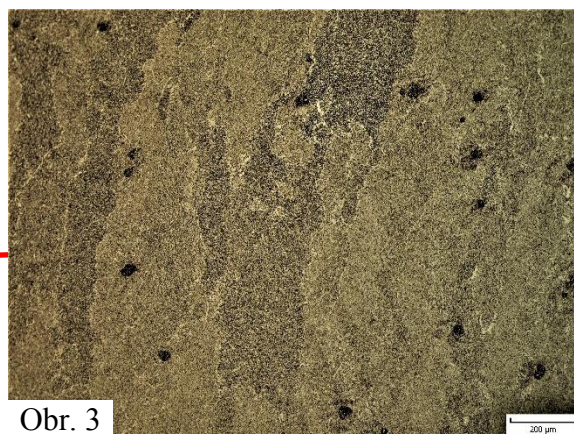
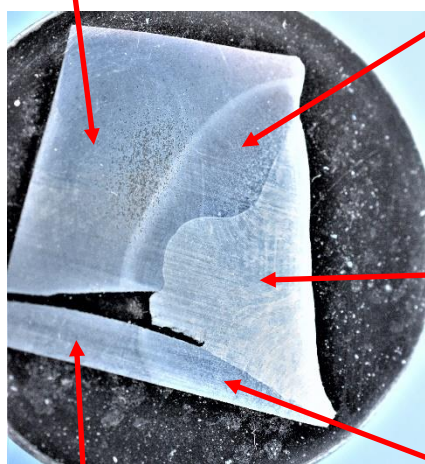
Vzorek 7 pravý



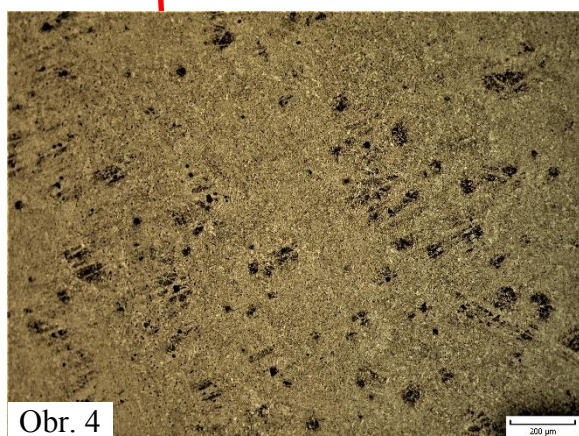
Obr. 1



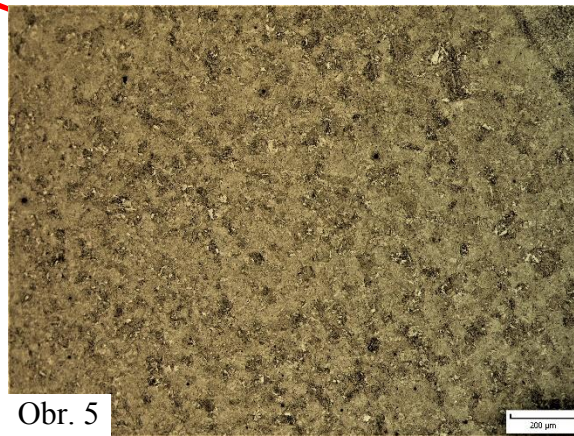
Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4

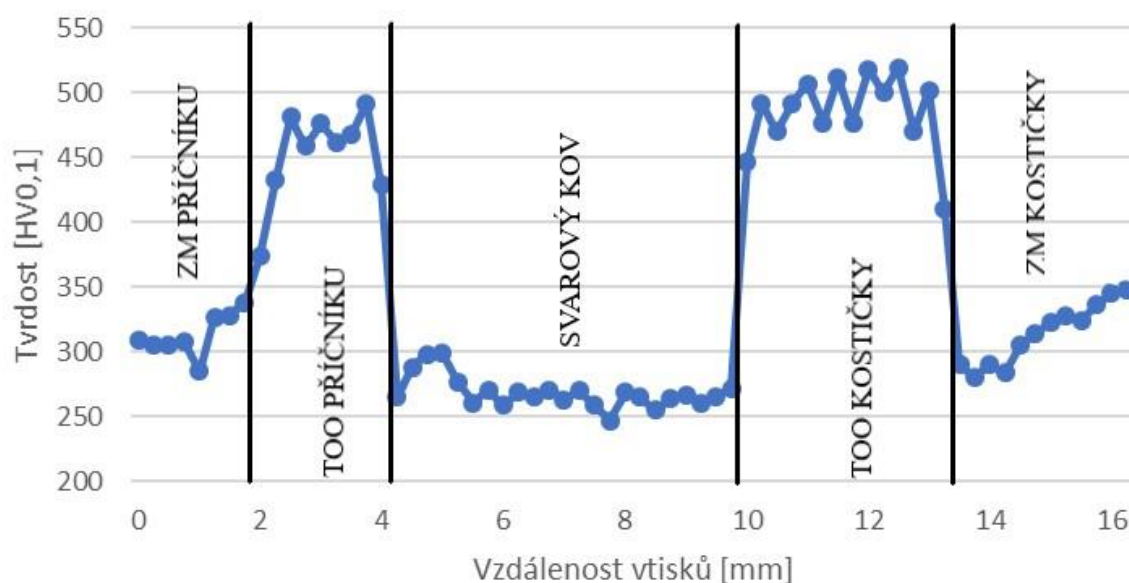


Obr. 5

Obrázek	Místo určení	Material	Struktura
Obr. 1	ZM kostičky	30MnB5	Bainit
Obr. 2	TOO kostičky	30MnB5	Martenzit
Obr. 3	Svarový kov	OK Autrod 12.51	Feriticko-perlitická
Obr. 4	ZM příčnicku	27MnCrB5-2	Bainit
Obr. 5	TOO příčnicku	27MnCrB5-2	Martenzit

Příloha 3 Grafy měření tvrdosti

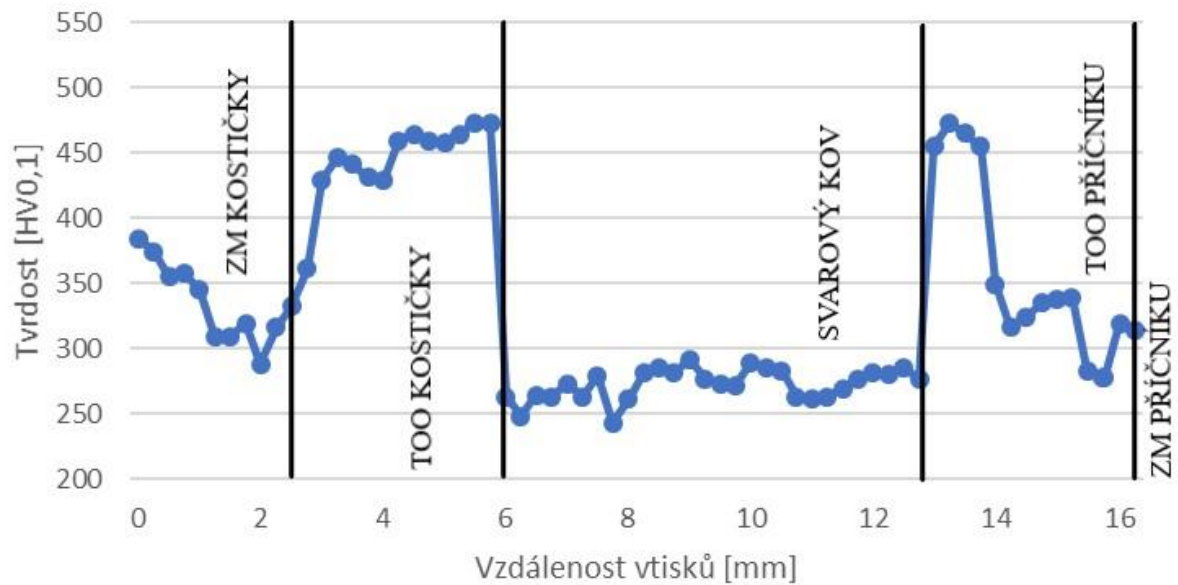
Tvrdość svarového spoje vzorku 16L



Tab. Tvrdość vzorku 16 levý

Vzdáleność [mm]	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
Tvrdość [HV0,1]	309	306	305	308	285	327	328	338	374	433	481	459
Vzdáleność [mm]	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75
Tvrdość [HV0,1]	476	462	468	492	429	265	288	298	299	277	261	271
Vzdáleność [mm]	6	6,25	6,5	6,75	7	7,25	7,5	7,75	8	8,25	8,5	8,75
Tvrdość [HV0,1]	259	269	265	271	263	270	259	247	269	265	255	264
Vzdáleność [mm]	9	9,25	9,5	9,75	10	10,25	10,5	10,75	11	11,25	11,5	11,75
Tvrdość [HV0,1]	267	261	265	272	447	492	470	492	507	477	512	477
Vzdáleność [mm]	12	12,25	12,5	12,75	13	13,25	13,5	13,75	14	14,25	14,5	14,75
Tvrdość [HV0,1]	518	500	519	470	502	410	290	281	290	284	306	314
Vzdáleność [mm]	15	15,25	15,5	15,75	16							
Tvrdość [HV0,1]	323	328	324	336	345							

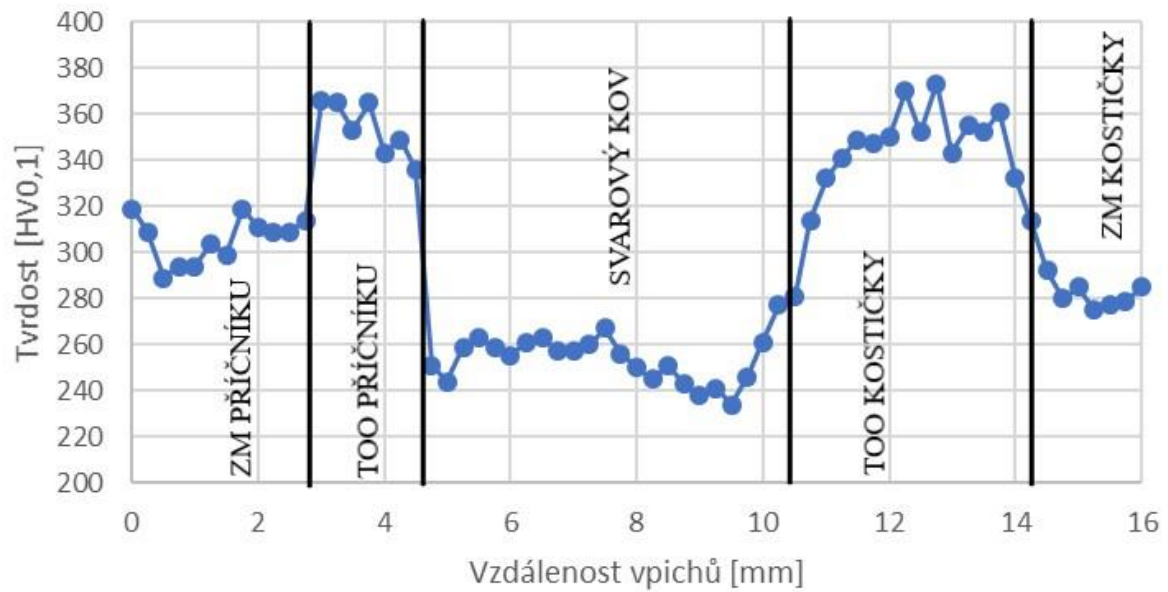
Tvrdość svarového spoje vzorku 16P



Tab. Tvrdość vzorku 16 pravý

Vzdálenost [mm]	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
Tvrdość [HV0,1]	384	374	355	358	345	309	309	319	288	316	332	361
Vzdálenost [mm]	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75
Tvrdość [HV0,1]	429	446	441	431	429	459	464	459	458	464	473	473
Vzdálenost [mm]	6	6,25	6,5	6,75	7	7,25	7,5	7,75	8	8,25	8,5	8,75
Tvrdość [HV0,1]	263	248	264	263	273	263	279	243	261	281	285	281
Vzdálenost [mm]	9	9,25	9,5	9,75	10	10,25	10,5	10,75	11	11,25	11,5	11,75
Tvrdość [HV0,1]	292	277	273	271	289	285	283	263	262	263	269	276
Vzdálenost [mm]	12	12,25	12,5	12,75	13	13,25	13,5	13,75	14	14,25	14,5	14,75
Tvrdość [HV0,1]	281	280	285	277	455	473	465	455	349	316	324	335
Vzdálenost [mm]	15	15,25	15,5	15,75	16							
Tvrdość [HV0,1]	338	339	283	278	319							

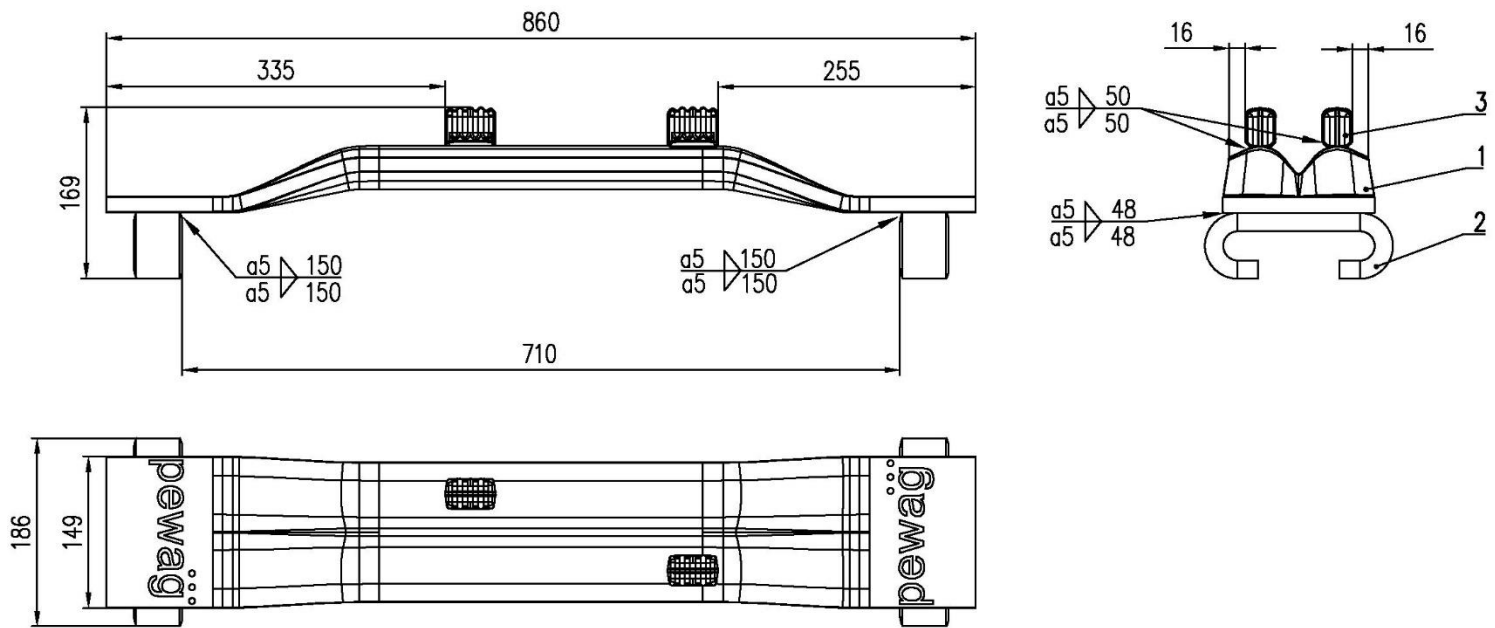
Tvrđost svarového spoje vzorku 7L



Tab. Tvrđost vzorku 7 levý

Vzdálenost [mm]	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
Tvrđost [HV0,1]	319	309	289	294	294	304	299	319	311	309	309	314
Vzdálenost [mm]	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75
Tvrđost [HV0,1]	366	365	353	365	343	349	336	251	244	259	263	259
Vzdálenost [mm]	6	6,25	6,5	6,75	7	7,25	7,5	7,75	8	8,25	8,5	8,75
Tvrđost [HV0,1]	255	261	263	257	257	260	267	256	250	245	251	243
Vzdálenost [mm]	9	9,25	9,5	9,75	10	10,25	10,5	10,75	11	11,25	11,5	11,75
Tvrđost [HV0,1]	238	241	234	246	261	277	281	314	332	341	349	347
Vzdálenost [mm]	12	12,25	12,5	12,75	13	13,25	13,5	13,75	14	14,25	14,5	14,75
Tvrđost [HV0,1]	350	370	352	373	343	355	352	361	332	314	292	280
Vzdálenost [mm]	15	15,25	15,5	15,75	16							
Tvrđost [HV0,1]	285	275	277	279	285							

Příloha 4 Výkres sestavy svarku



3	Kostička	2	30MnB5	123-043-4/1
2	Céčko	2	30MnB5	123-011-3/1
1	Příčník	1	27MnCrB5-2	123-XXX-3/1
Pozice	Název	Ks	Materiál	Výkres
Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko
				1:5
				Přesnost ISO2768-MH
				Tolerování ISO8015
				Promítání
Materiál		Polotovar	Hmotnost 21,7 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
		Druh dokumentu	Název	
		VÝROBNÍ_VÝKRES	SVAREK_PŘÍČNÍKU	
		Kreslil	Číslo dokumentu	
		TOMÁŠ_TEUER	A3_123_050	
		Schválil	List /	
		Datum vydání 26.6.2020		

VYTVORENO VE STUDENTSKÉ VERZI PRODUKTU AUTODESK

VYTVORENO VE STUDENTSKÉ VERZI PRODUKTU AUTODESK

Příloha 5 Atesty



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

RETEZARNA CESKA TREBOVA S.R.O.
SMETANOVO NABREŽI 934
CZ-51754 VAMBERK
CZECH REPUBLIC

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 strenght 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 VELJKO, dipl.inž.

INSPECTION CERTIFICATE

EN 10204/3.1

No.: ATK1907363**Purchaser**RETEZARNA CESKA TREBOVA S.R.O.
SMETANOVO NABREŽI 934
CZ-51754 VAMBERK
CZECH REPUBLIC**Order No.:** 4500023814**Our order No.:** 03-18-01733/004**Delivery note:** 30-19-03028**Delivery date:** 31.05.2019**Transport:** By truck 6H56487 5E74743**Product:** ROLLED FLAT STEEL EN 10092-1-B EN 10083-3 - 30MnB5 (Wnr.:1.5531) / SB30M12CB

Cast No.	Quality	Dim (mm)	Weight (kg)	Bundle	Melting furnace	Dim. of billet
79262	30MnB5	48x18	1.705	2	E	#180

CHEMICAL COMPOSITION OF CAST (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	B	Ti
0,33	0,29	1,28	0,010	0,004	0,21	0,07	0,03	0,010	0,11	0,027	0,0029	0,023

MECHANICAL PROPERTIES**Hardness in as delivered condition:** 220 HB;**Jominy** DIN EN ISO 642

mm	1	1,5	2	3	3,5	4	5	6	6,5	7	8	9	10	11	12	13	15	20
HRc		54		52			50			48		45		43		40	39	35
mm	25	30	35	40	45	50												
HRc	33	29																

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

Inspection supervisor
ZEC VEJJKO, dipl.inž.