



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZMĚNA MATERIÁLŮ DÍLŮ PRO VÝROBU ŘETĚZŮ HARVESTORŮ

MATERIALS CHANGE OF PARTS FOR HARVESTER CHAIN PRODUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Houdek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Marian Sigmund, Ph.D.,
IWE**

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Radim Houdek**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE**
Akademický rok: 2021/22

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:

Změna materiálů dílů pro výrobu řetězů harvestorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stávající díly řetězů harvestorů jsou vyráběny z Mn–Cr–B ocelí jejich kombinací i s ohledem na prokalitelnost a zvýšení tvrdosti a otěruvzdornosti povrchu řetězů. Vzhledem k použití Cr ocelí z pohledu svařitelnosti je nutný předehřev. V rámci složitého technologického postupu robotizovaného svařování a manipulace s obrobkem je daný technologický postup časově náročný a zdoluhavý. Možnou změnou použitých materiálů bez ovlivnění výsledných požadavků na kvalitu svaru, výslednou mikrostrukturu a dané mechanické vlastnosti materiálů a svarových spojů s vyloučením předehřevu by zrychlilo celý proces výroby řetězů harvestorů.

Cíle diplomové práce:

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

Popsat celý technologický postup výroby řetězů harvestorů.

Navrhnout možný nový technologický postup výroby řetězů harvestorů.

Na dodaných vzorcích provést kvalitativní vyhodnocení.

Výsledky návrhu i kvalitu vyhodnotil a ekonomicky zhodnotit.

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.

BÖHM, 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 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na článek kolopásu, konkrétně záměnu materiálu příčnicku z oceli 27MnCrB5-2 na ocel 30MnB5, ze které jsou vyrobeny ostatní části článku, tedy kostičky a céčka, a svařeny metodou MAG. Záměna materiálu a vypuštění fáze předehřevu by zkrátila čas výroby článku přibližně na poloviční dobu. Teoretická teplota předehřevu spočítaná dle příslušné normy u obou ocelí přesahovala teplotu 200 °C. Byly svařeny zkušební vzorky napodobující svar mezi příčnickem a kostičkou, na kterých bylo provedeno kvalitativní vyhodnocení. Jednalo se o svařence oceli 30MnB5 s předehřevem (vzorek 10), oceli 30MnB5 bez předehřevu (vzorek 11) a oceli 27MnCrB5-2 s předehřevem (vzorek 9). Z hlediska makrostruktury byly na všech vzorcích shledány neprůvary. Při mikrostrukturním pozorování byla ve všech oblastech shledána martenzitická struktura. Při měření tvrdosti metodou dle Vickerse vyšel ve všech oblastech svaru vzorku 10 a 11 přibližně stejný průběh tvrdosti. Nejvyšší hodnota dosahovala 450 HV1 a přesahuje maximální tvrdost doporučenou normou. Vzhledem k velice podobným výsledkům zkoušek pro svařence oceli 30MnB5 s předehřevem a bez předehřevu je možné předehřev neprovádět. Výsledky mohou být ovšem zkresleny poměrně malou velikostí zkušebních vzorků. Pro spolehlivé vyhodnocení a finální rozhodnutí je nutné provést zkoušky na reálném příčnicku po kompletní výrobě.

Klíčová slova

metoda MAG, bórová ocel, ocel 27MnCrB5-2, ocel 30MnB5, robotické svařování

ABSTRACT

The work is focused on the track element, namely the replacement of the crossbar material from steel 27MnCrB5-2 to steel 30MnB5 from which the other parts of the cell, the cubes, and the bar are made and welded by the GMAW method. Changing the material and omitting the preheating phase would reduce the production time of the cell by approximately half the time. The theoretical preheating temperature calculated according to the relevant standard for both steels exceeded 200 °C. Test specimens imitating the weld between the crossbar and the cube were welded on which a qualitative evaluation was performed. These were weldments of 30MnB5 steel with preheating (sample 10), 30MnB5 steel without preheating (sample 11) and 27MnCrB5-2 steel with preheating (sample 9). In terms of macrostructure, non-penetrations were found on all samples. Martensitic structure was found in all areas by microstructural observation. When measuring the hardness according to the Vickers method, approximately the same hardness profile was obtained in all weld areas of samples 10 and 11. The highest value reached 450 HV1 and exceeds the maximum hardness recommended by the standard. Due to very similar test results for 30MnB5 steel weldments with and without preheating, it is possible not to perform preheating. However, the results may be skewed by the relatively small size of the test specimens. For a reliable evaluation and final decision, it is necessary to perform tests on a real crossbar after complete production.

Key words

GMAW welding, boron steel, steel 27MnCrB5-2, steel 30MnB5, robotic welding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOUDEK, Radim. *Změna materiálů dílů pro výrobu řetězů harvesterů* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/136982>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Změna materiálů dílů pro výrobu řetězů harvesterů vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 19. 5. 2022

Radim Houdek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Marianu Sigmundovi, Ph.D., IWE za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni, rodině a blízkým za neustálou podporu, trpělivost a důvěru.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Variantní řešení	14
1.1.1 Postup výroby s předehřevem.....	14
1.1.2 Postup výroby bez předehřevu	16
2 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE	17
2.1 Metoda MAG ve spojení s robotickým svařováním	17
2.1.1 Zařízení a vybavení pro svařování metodou MAG a robotické svařování.....	18
2.1.2 Parametry svařování	20
2.1.3 Způsoby přenosu svarového kovu	21
2.1.4 Přídavné materiály	23
2.1.5 Ochranné plyny a jejich vliv.....	24
2.1.6 Metalurgické reakce	26
2.2 Svařitelnost ocelí	27
2.3 Tepelné zpracování svarových spojů.....	30
2.4 Bórové oceli	31
2.4.1 Ocel 30MnB5	32
2.4.2 Ocel 27MnCrB5-2	33
3 PRAKTICKÁ ČÁST	35
3.1 Výpočty teplot předehřevu pro svařované materiály.....	36
3.2 Metalografická příprava vzorků	38
3.3 Hodnocení makrostruktury	39
3.4 Hodnocení mikrostruktury	41
3.5 Měření tvrdosti	45
3.6 Měření zbytkového austenitu	49
3.7 Zkouška rozlomením	50
3.8 Zkouška rázem v ohybu	55
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	57
ZÁVĚR.....	58
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
SEZNAM PŘÍLOH	63

ÚVOD

Svařování je technologie pro tvorbu nerozebíratelných svarových spojení u dvou stejných, nebo rozdílných, především kovových materiálů vhodných ke svaření. Za dlouhou historii bylo vyvinuto velké množství rozličných modifikací vhodných pro různé aplikace. Všechny druhy spojuje stejný cíl a to vytvoření požadovaného kvalitního spojení materiálů splňující předepsané požadavky na funkčnost a trvanlivost vyrobené součásti. Všechny metody lze obecně rozdělit na dvě velké skupiny a to na metody tavné a metody tlakové. V praxi jsou nejpoužívanější metody řadící se mezi tavné, především s využitím elektrického oblouku. Stejně jako jiné výrobní technologie má i svařování řadu výhod a nevýhod. Obecně lze mezi výhody svarových spojů řadit jejich pevnost, trvanlivost, těsnost, a často také rychlost procesu. Nevýhodou procesu je nerozebíratelnost svarového spoje, časté je tepelné ovlivnění svařovaných materiálů a v důsledku toho jejich strukturní změny a vnášení nežádoucích pnutí a deformací. Mnoho metod je neekologických a zdraví škodlivých, z důvodu vzniku toxických výparů, a je potřeba speciální ochranné vybavení [1].

Při výrobě je snaha o dosažení co nejmenších výrobních nákladů při zachování nebo zlepšení kvality finálních výrobků. I malé úspory se, v případě výroby více kusů, mohou významně projevit a ušetřit firmě velké množství finančních prostředků. Snížení nákladů může být dosaženo mnoha způsoby, mezi které může být zařazeno snížení výrobního času, záměna materiálu, implementace automatizace, nebo vypuštění operace výrobního procesu. U každé výroby je tedy snaha neustálého vývoje s cílem zkrátit a zefektivnit výrobní proces.



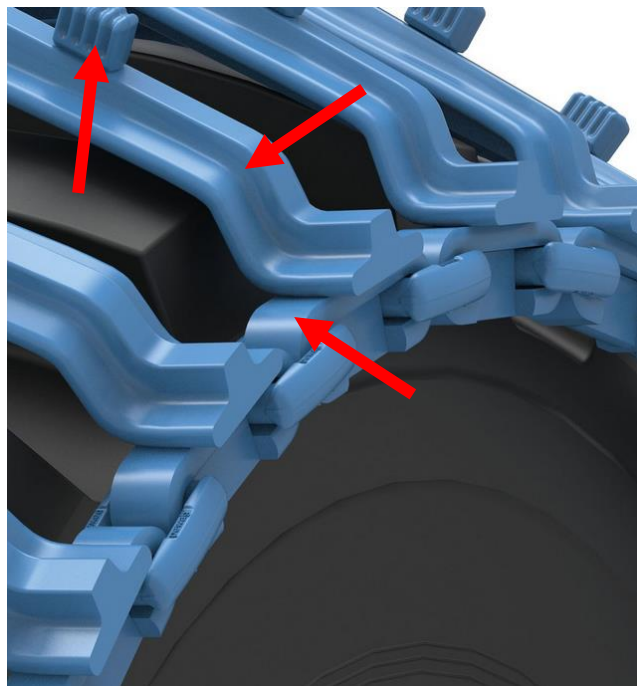
Obr. 1 Lesní technika osazená kolopásky [2].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Harvestory jsou lesnické pojízdné stroje, které jsou využívány pro těžbu dřeva. Často jsou nasazovány pro práci jak v těžkém lesním, svažitém kamenitém a zamrzlém terénu, tak i v mírnějších rovinných podmínkách. Pro zvýšení záběru na všech podkladech, stability, bezpečnosti, ale i ochrany lesní půdy se kola těchto strojů osazují ocelovými kolopásky. Ty mohou být nasazeny na jednotlivá kola, nebo na dvojce. Jednotlivé typy mírně se liší především tvarem příčnicku a počtem kostiček nacházející uplatnění v různých pracovních podmínkách. Širší příčnicky jsou vhodnější do promočeného a bahnitého terénu, naopak užší příčnicky jsou neefektivnější v kamenitých a příkrých svazích. Velmi oblíbené jsou u zákazníků univerzální kolopásky sestavené jak z užších, tak širších příčnicků, jsou to tedy univerzální hybridy. Vzhledem k pracovním podmínkám musí kolopásky splňovat vysoké nároky na vlastnosti potřebné pro jejich správnou funkci a trvanlivost, dosažené jak vhodnými konstrukčními materiály, tak vhodnou výrobní technologií [2].



Obr. 2 Kolo s kolopásem [2].



Obr. 3 Detail kolopásku [2].

Článek kolopásku, viz obr. 2 se skládá z příčnicku, 4 kostiček a 2 céček a zamykacího hranolku. Jednotlivé díly jsou k sobě přivařeny, jednotlivé články pospojovány ocelovými oky a po kompletaci jsou pojištěny přivařením zamykacích hranolků. V této práci bude pozornost věnována především příčnicku, kostičce a céčce, viz obr. 3. Kostička nacházející se na vnější straně příčnicku je důležitou součástí celé sestavy. Její funkce spočívá v zarývání se do podkladu, a tím zvýšení efektivity kolopásku. Céčka se nachází na obou koncích příčnicku a slouží jako mezičlánek ke spojení jednotlivých článků pásu prostřednictvím oka. Vzhledem k zachování firemního know – how nebudou uvedeny přesné výrobní výkresy žádné ze součástí. V přílohách je uveden pouze výkres svařence jednoho článku [3].

Výroba céčka začíná nařezáním pásovinu materiálu 30MnB5, tloušťky 18 mm a délce 6 m, pomocí pásové pily na polotovary délky 293 mm. Ty jsou následně operátorem vloženy do výrobního zařízení, kterým je ohýbačka. Polotovary jsou z důvodu lepší zpracovatelnosti v místě ohybu předehřáty pomocí indukčního ohřevu, viz obr. 4, a následně tvářeny do požadovaného tvaru. Dalším krokem je ruční aplikace pomocí štětce přípravku Condursal za

účelem ochrany budoucích svařovaných ploch před, v tomto případě nežádoucím, nauhličením. Příklad natřených vzorků je uveden na obr. 5 [3].



Obr. 4 Indukční přehřev pro výroku céček [4].



Obr. 5 Céčka natřená ochranným nátěrem.

Céčka jsou poté vloženy do průběžné cementační pece (na obr. 6), kde dochází nejprve k nauhličení povrchu. Požadavkem těchto režimů je získání nauhličené povrchové vrstvy do hloubky přibližně 0,8 až 1,0 mm. Z této teploty dochází k zakalení do chladicího média SERVISCOL. Následně prochází díly popuštěním v žihací peci (obr. 7). Tímto tepelným zpracováním je možné získat požadované vlastnosti tvrdosti, které jsou předepsány interním firemním požadavkem. Posledním krokem je otryskání, paletizace a připravení pro svařování [3].



Obr. 6 Průběžná cementační pec.

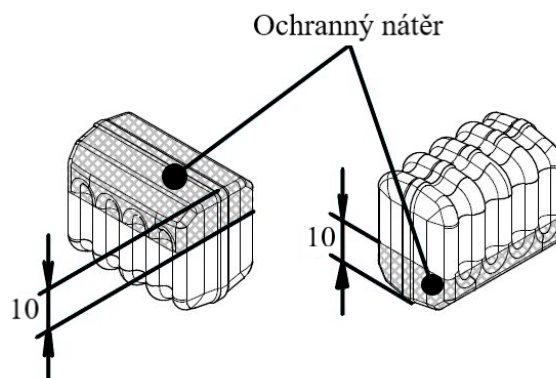


Obr. 7 Průběžná popouštěcí pec.

Kostičky, viz obr. 8, jsou dodávány jako výkovky externí firmou. Následně prochází podobným chemicko – tepelným zpracováním jako céčka. Nejprve dojde k ručnímu natření budoucích svařovaných ploch ochranným přípravkem Condursal do výšky přibližně 10 mm, viz obr. 9. Cementace probíhá ve stejné průběžné cementační peci, ovšem za mírně jiných podmínek. Tímto způsobem lze získat hloubku nacementované vrstvy 0,5 – 0,7 mm. Z cementační teploty jsou kostičky zakaleny. K popuštění dochází v průběžné popouštěcí peci, situované hned za cementační pecí. Získané hodnoty tvrdosti musí taktéž splňovat interní firemní požadavky [3].



Obr. 8 Kostička.



Obr. 9 Místa pro aplikaci ochranného nátěru pro kostičky [4].

Výroba příčnicku je součástí taktované robotizované linky pro kompletaci a spojení dílčích součástí článku kolopásu. Na začátku výroby jsou hutní polotovary ve formě tyčí o čtvercovém průřezu, rozměrů 50 x 50 mm a délce 6 m, rozřezány pásovou pilou na délku 1044 mm (obr. 10). Robotickými čelistmi jsou přesunuty před jednu z dvojic indukčních pecí, kam následně dochází k jejich nasunutí a předehřevu na kovací teplotu přibližně 1100 °C (obr. 11) [3].



Obr. 10 Automatická pásová pila na řezání polotovarů.



Obr. 11 Indukční pece pro předehřev polotovarů.

Po vysunutí z pece dalším dílcem jsou opět pomocí robotizovaných chlazených čelistí přesunuty do místa předání pro manipulačního robota, který předehřátý díl založí do zápustky kovacího lisu od firmy DIFFENBACHER, kde je tvářen do požadovaného tvaru příčnicku (obr. 12). Po vyjmutí dílu ze zápustky, kdy se jeho teplota pohybuje v blízkosti 870 °C, je robotem založen do přípravku, kde dojde k jeho výhodnějšímu přechytnutí a založení do jedné ze dvojice přípravků transportující díl do chladicí lázně, kterou je roztok vody a polymerového média SERVISCOL, kde dojde k jeho martenzitikému zakalení (obr. 13). Kontinuálně filtrovaná a chlazená lázeň je udržovaná na teplotě přibližně 25 °C a pro předejití vzniku vzduchového polštáře v okolí povrchu kalené součásti je neustále promíchávána. Po uplynulé době, potřebné k zakalení, vyjede přípravek se součástí z lázně ven a stejným robotem je vyjmut a položen na pás vjíždějící vždy se dvěma kusy do komory tryskacího zařízení, kde dochází k odstranění

okují abrazivem ve formě ocelového granulátu o velikosti zrn v rozsahu 710 až 850 μm . Po otryskání jsou již příčnky plně připraveny pro první a druhou fázi svařování, ve které se k příčniku přivařují kostičky a následně céčka [3].



Obr. 12 Kování příčnicku.



Obr. 13 Kalení příčnicku.

Po kompletním svaření celého příčnicku (bude popsán dále v kapitole 1.1 Variantní řešení) jsou příčnky hromadně navedeny do vychladlé popouštěcí pece, která je na obr. 14. Zde dochází k jejich pomalému ohřátí na popouštěcí teplotu 350 $^{\circ}\text{C}$ a výdrže po dobu 4 hodin. Následně jsou pomalu ochlazeny z důvodu předejití vzniku nežádoucího pnutí. Cílem tohoto tepelného zpracování je popuštění martenzitu a dále, v co největší míře, rozpadu zbytkového austenitu na struktury bainitického typu [3].



Obr. 14 Popouštěcí pec [4].

Nejrychlejším a nejjednodušším způsobem posouzení svaru je pro firmu vizuální kontrola. Tímto způsobem jsou kontrolovány všechny svary na článku. Důležité je v tomto případě zhodnotit, zda je svar pohledově proveden správně, a zda nedošlo ke špatnému provedení svarové housenky. V případě robotického svařování a robotické manipulace by i přes jisté kontrolní mechanismy mohlo dojít, že bude svařenec nedokonale ustaven do přípravku, což má za následek špatné provedení svarové housenky [3].

Firma taktéž disponuje dobře vybavenou metalografickou laboratoří, umístěnou v blízkosti výrobní haly. Zde dochází k průběžné kvalitativní, destruktivní kontrole výrobků. Mimo jiné se zde měří například tvrdost jednotlivých oblastí (povrchová vrstva nebo jádro) na komponentech kolopásu (kostička, céčko, příčník) po projití chemické-tepelného nebo tepelného procesu. Naměřené hodnoty jsou dále porovnávány s hodnotami interních firemních kvalitativních požadavků.

1.1 Variantní řešení

V jednotlivých podkapitolách bude věnována pozornost především fázi svařování kostiček k příčniku, ale následně i svařování céček k příčniku. Důvodem je, že první jmenovaná bude možností vypuštění předehřevu nejvíce zkrácena. Výše uvedené postupy výroby kostičky, céčka i příčniku zůstanou nezměněny. Portfolio firmy obsahuje různé druhy kolopásů osazených 2 nebo 4 kostičkami. Předchozí výrobní postupy jsou pro všechny velice podobné, v některých případech naprosto stejné. I z toho důvodu bude pozornost věnována výrobě příčniku osazeného 4 kostičkami, protože v jeho případě by mohlo být možné časové zkrácení největší.

1.1.1 Postup výroby s předehřevem

Po vyjetí dvojice příčníků z tryskací komory dochází robotickým ramenem k přesunutí jednoho na odkládací stolek, a následně druhého do přípravku, kde dochází k lokálnímu předehřevu na 2 místech budoucího přivaření kostiček 1 a 3 prostřednictvím indukčního ohřevu, viz obr. 15. V lázni při kalení nedojde k úplnému ochlazení na teplotu lázně, proto mají příčnící při založení do indukčního předehřevu teplotu přibližně 100 °C a z této teploty jsou předehřívány přibližně za 13 s na rozsah teplot 190 až 200 °C, ve kterém dále setrvávají až do chvíle odejmutí robotem a ustavení do svařovacího přípravku, který je na obr. 16. Následuje postupné přiložení kostičky 1 a 3 k příčniku, její nastehování a přivaření prostřednictvím koutových svarů, provedených jednou housenkou na nejdelší straně kostičky, nejprve na jedné straně, a po natočení polohovadla i na druhé straně kostičky. Následně je příčník přenesen opět do předehřívacího přípravku pro lokální předehřev, a po předehřátí na svařovací přípravek, pro nastehování a přivaření kostiček 2 a 4. Tato první fáze svařování končí odložením příčniku na odkládací přípravek pro další předehřev [3].



Obr. 15 Zařízení pro indukční předehřev příčníků.



Obr. 16 Robotická sestava pro přivařování kostiček na příčník.

Manipulační a dvojice svařovacích robotů jsou od společnosti ABB, svařovací zdroje nesou označení *TPS 400 i* od renomovaného výrobce Fronius. Nastavené svařovací parametry jsou svařovací proud $I=265$ A, svařovací napětí $U=30,7$ V a posuv drátu 10 m·min⁻¹. Jako přídatný materiál je používán drát OK Autroid 12.51 o průměru 1,2 mm, vyráběný společností ESAB. Do svařovacího procesu je dopravován prostřednictvím podávacího zařízení z velkoobjemového balení o hmotnosti 250 kg. Jako ochranný plyn je využit Corgon 18, tedy směs Ar + 18 CO₂, od firmy Linde. Plyn je rozváděn z centrálních zásobníků. Jak je vidět na

obr. 16, svařovací prostor je umístěn do svařovací buňky, která je tvořena světlo nepropustnými zástěnami, ve kterých jsou umístěna červená kontrolní okna, vyplněná ochranným sklem proti záření. První fáze svařování je velice zdlouhavá, především z důvodu nutnosti dvojitého nahřívání a s ním spojených přesunů svařence. Doba je natolik dlouhá, že dochází k čekání robota ve druhé fázi, kde dochází k přivaření céček. V tabulce. 1 jsou uvedeny jednotlivé časy pohybů a operací v první fázi pro 2 příčnický. Celkový čas výroby v této fázi je přibližně 5,5 minuty. Poměrně velkou část tvoří právě předehřev a jednotlivé přesuny s ním spojené. Jeho odstraněním by tedy došlo k významnému zkrácení tohoto časového úseku [3].

Tab. 1 Jednotlivé pohyby robota při svařování s předehřevem příčnicku.

číslo příčnicku	Prováděná operace	Čas [min]
1	tryskač - odkládací stolek	00:13
2	tryskač - předehřev kostiček	00:10
2	předehřev kostiček	00:30
2	předehřev kostiček - vaření kostiček	00:12
2	svařování kostiček 1,2	00:25
2	svařování kostiček - předehřev kostiček	00:30
2	předehřev kostiček - svařování kostiček	00:12
2	svařování kostiček 3, 4	00:25
2	odložení	00:15
1	odkládací stolek - předehřev kostiček	00:13
1	předehřev kostiček	00:30
1	předehřev kostiček - svařování kostiček	00:12
1	svařování kostiček 1,2	00:25
1	svařování kostiček - předehřev kostiček	00:30
1	předehřev kostiček - svařování kostiček	00:12
1	svařování kostiček 3, 4	00:25
1	odložení	00:15
	celkem na dva ks	05:34

Ve druhé fázi svařování dochází na odkládacím přípravku k lokálnímu předehřevu příčnicku v oblasti jeho konců (obr. 17) na teplotní rozsah 210 až 230 °C. Doba ohřevu je přibližně 13 s, následně je již příčnick na této teplotě udržován do okamžiku odběru robotem. Po uchopení dochází před další manipulací ke kontrole vzdálenosti konců příčnicku, pomocí laserových měřících zařízení, z důvodu předejití problémů při upínání do svařovacího přípravku pro céčka. Po přenesení a upnutí příčnicku do svařovacího přípravku, kam byly již předem pomocí stejného robota zapozicovány 2 céčka, dochází k přetočení celého polohovadla do svařovací buňky (obr. 18) (zároveň z buňky dojde k vyjetí již svařeného předešlého dílce). Pracovní svařovací prostor je osazen dvojicí souběžně pracujících svařovacích robotů, kdy každý je situován na jeden konec příčnicku. Během svařovacího postupu dochází nejprve ke zhotovení delšího svaru na jednu housenku mezi céčkem a příčnickem na vnější straně a následně na vnitřní straně. Kratší svary jsou zhotoveny na 2 housenky, jak z přední, tak ze zadní strany příčnicku. Po dokončení se příčnick i s polohovadlem přetočí zpět vně buňky, kde dojde k jeho automatickému uvolnění z upínek a uložení manipulačním robotem na paletu [3].



Obr. 17 Indukční přehřev příčnicku a robotická sestava pro usazení céček na příčník.



Obr. 18 Robotická sestava pro přivaření céček.

Manipulační robot i dvojice svařovacích robotů v buňce jsou značky ABB, jako svařovací zdroj je využita dvojice Fronius *TPS 400 i*. Svařovací parametry jsou totožné jako v případě přivaření kostiček, a to: proud 265 A, napětí 30,7 V a posuv drátu $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Přidavným materiálem je také drát OK Autroid 12.51 od firmy ESAB o průměru 1,2 mm. Jako ochranný plyn Corgon 18 [3].

1.1.2 Postup výroby bez přehřevu

Po vyjetí dvojice příčnicku z tryskací komory by došlo k odložení jednoho z příčnicků na odkládací stůl. Druhý by byl následně odebrán z pásu a bez přehřevu zapozicován přímo do svařovacího polohovače. Následně by došlo k postupnému ustavení, nastehování a následnému oboustrannému přivaření jednotlivých kostiček, prostřednictvím jednohousenkových koutových svarů na nejdelších stranách kostičky. V tabulce 2 je rozepsán návrh časů jednotlivých pohybů ve fázi svařování.

Tab 2. Návrh jednotlivých pohybů robota bez přehřevu

číslo příčnicku	Prováděná operace	Čas [min]
1	tryskač - odkládací stůl	00:13
2	tryskač - svařování kostiček	00:10
2	svařování kostiček 1,2	00:25
2	svařování kostiček 3, 4	00:25
2	odložení	00:15
1	odkládací stůl - svařování kostiček	00:13
1	svařování kostiček 1,2	00:25
1	svařování kostiček 3, 4	00:25
1	odložení	00:15
	celkem	02:46

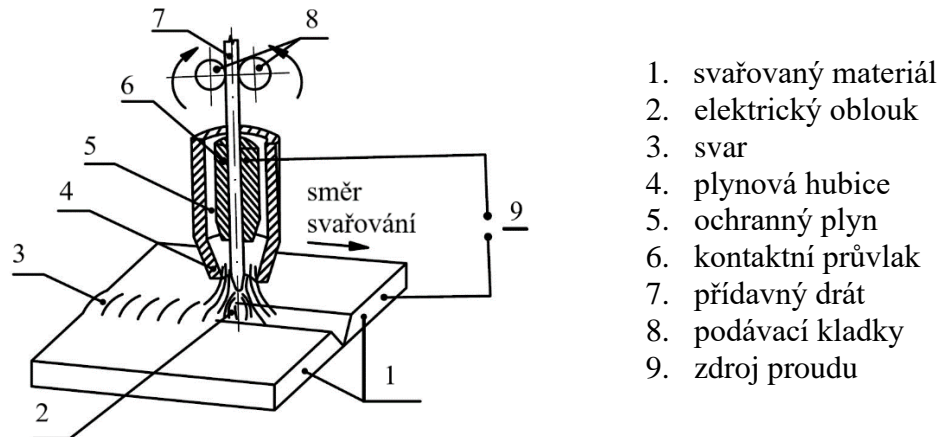
Poté by byl svařenec pomocí manipulačního robota přenesen a ustaven do předávacího přípravku. Odkud by byl odebrán druhým manipulačním robotem a po kontrole vzdálenosti konců příčnicku upnut do polohovače pro přivaření céček.

Jak jde vidět v porovnání výsledných časů uvedených v tabulkách 1 a 2, v této fázi by mohlo dojít k ušetření přibližně 3 min. I tak velká časová úspora by s největší pravděpodobností vedla, ale tentokrát již ke kratšímu čekání robota ve druhé fázi svařování.

2 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

2.1 Metoda MAG ve spojení s robotickým svařováním

Metoda MAG je jednou z nejpoužívanějších způsobů svařování především nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Potkat se s ní lze také pod označením GMAW, nebo dle normy ČSN EN ISO, metoda 135. Na obr. 19 je zakresleno její schéma [5; 6].



Obr. 19 Schéma metody MAG [5].

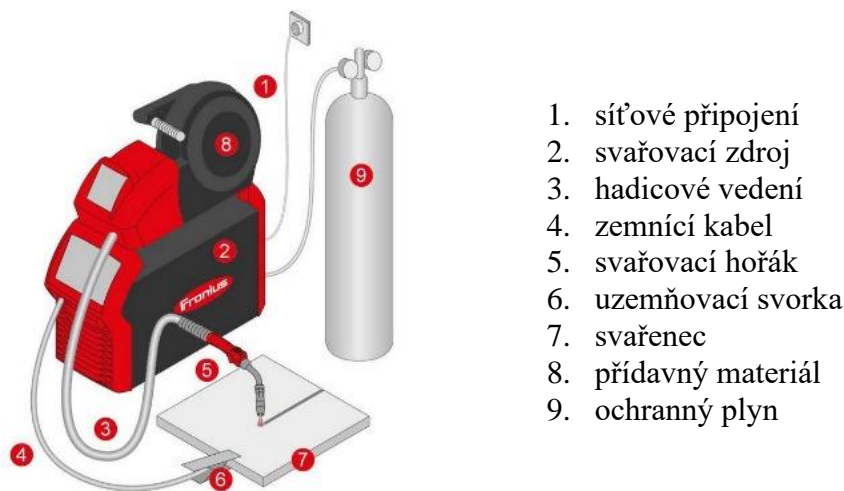
Z hlediska principu se řadí mezi tavné způsoby svařování. Teplo se získává z elektrického oblouku, který hoří v oblasti mezi koncem přídavného materiálu ve formě kontinuálně dopravovaného drátu kruhového průřezu a povrchem svařence, potažmo povrchem svarové lázně. Pro ochranu před okolní atmosférou je oblouk obklopen ochranným plynem, proudícím z ústí plynové hubice. Teplota kapek nataveného přídavného materiálu oblouku dosahuje teplot v rozmezí 1700 až 2500 °C, teplota svarové lázně je pak přibližně v intervalu mezi teplotami 1600 až 2100 °C. Při procesu se využívá stejnosměrného proudu s tzv. nepřímou polaritou, to znamená, že elektroda je připojena na kladný pól a svařovaný materiál na záporný pól [5]. Mezi její největší přednosti lze zařadit především [5]:

- svařování ve všech polohách od tloušťky materiálu přibližně 0,8 mm,
- minimální tvorba strusky,
- možnost přímé vizuální kontroly svařovacího oblouku a lázně,
- vysoká efektivita metody (například nejsou zbytky přídavného materiálu, který je ve formě drátu navinutého na cívce),
- snadný start oblouku bez kontaktu svařovacího drátu a povrchu svařence,
- příznivý tvar profilu svaru a možnost dosažení hlubokého závaru,
- malá šířka tepelně ovlivněné oblasti, především při uplatnění vysoké rychlosti svařování,
- vysoká proudová hustota a výkon odtavení,
- možnost nastavení proudu v poměrně širokém rozsahu pro jeden průměr drátu,
- stabilní plynová ochrana, prostřednictvím které se dá měnit charakter přenosu kovu v oblouku, kterým se mohou měnit vlastnosti svaru,
- možnost minimalizace rozstříku a pórovitosti,
- snadné uplatnění v robotizovaných a mechanizovaných svařovacích systémech.

2.1.1 Zařízení a vybavení pro svařování metodou MAG a robotické svařování

Robotické pracoviště pro svařování metodou MAG je rozsáhlý systém navzájem spojených zařízení často, umístěných do tzv. svařovacích buněk. Příklad takové buňky je na obr. 21. Celkovou sestavu lze rozdělit do několika skupin. Zařízení pro samotné svařování metodou MAG (obr. 20), základní systém robotu a další doplňkové, automatizaci zvyšující a ochranné prvky [7]. Mezi základní svařovací zařízení pro svařování metodou MAG, kterým je osazen robot a jeho okolí, patří [7; 8]:

- zdroje svářecího proudu,
- svařovací hořák – je upnut v technologické hlavici na konci svařovacího robota,
- mechanismus pro podávání drátu – plní funkci dopravy přídatného materiálu ze zásobníku ve formě cívky. Důležité je dodržení přesné a rovnoměrné rychlosti podávání drátu, která během procesu není stabilní, ale dynamicky se mění vzhledem ke svařovacím podmínkám,
- systémy kabelového, powderového a hadicového propojení jednotlivých částí svařovacích zařízení,
- programovací jednotka svařovacích parametrů,
- lahve, nebo zásobníky jako zdroje ochranného plynu,
- chladicí jednotka svařovacího hořáku – využívá se v případě svařování vyššími hodnotami svařovacího proudu, přibližně od hodnoty 250 A, kdy již není možné hořák uchlazením proudícím plynem,
- čistící jednotka svařovacího hořáku – pro udržení kvality svaru je nutné v určitých intervalech vyčistit především hubici hořáku od nánosů z rozstříku svarového kovu. Často je jednotka také osazena zastříhovačem drátu a případně také automatickou kalibrací.



Obr. 20 Svařovací sestava metody MAG [9].

TPS/i jsou svařovací systémy vyvíjené a vyráběné společností Fronius. V dnešní době patří mezi nejmodernější, a díky enormní výkonnosti jsou schopny splnit nejvyšší požadavky. Z hlediska využití se dají aplikovat při ručním, ale i robotickém svařování. Řada TPS/i obsahuje několik výkonnostních tříd a to 270 A, 320 A, 400 A, 500 A a 600 A, s chlazením plynem nebo vodou. Pro svařování částí příčnicku jsou firmou na všech robotech využívány systémy TPS 400i, které jsou schopny dosažením maximálního svařovacího proudu o velikosti 400 A spolehlivě plnit funkci a plně pokryjí výkonové parametry, potřebné pro bezchybné svaření jednotlivých komponent sestavy článku kolopásu. Díky modulární konstrukci těchto systémů je možná jejich poměrně snadná integrace do robotizovaných systémů [10].

Dalšími částmi sestavy, vedle vlastního svařovacího zařízení podporujícího robotizované svařování, jsou [7; 8; 11]:

- průmyslový robot, včetně řídicího a senzorového systému – zastává funkci manipulátoru se svařovacím zařízením, především hořáku. Nejčastěji se jedná o 6-ti osé robotické rameno o rozměrech dostatečných pro provedení požadované svařovací operace. Vzhledem k váze hořáku musí být nosnost robota přibližně v rozmezí 5 až 10 kg a jeho přesnost by měla dosahovat alespoň 0,5 až 1 mm.
- polohovadlo – jeho funkcí je přidržovat a pohybovat se svařencem ve spojení s pohyby svařovacího robota. Napomáhá jeho nastavení do, pokud možno, nejvýhodnější polohy pro svařování. Ve většině případů je osazeno přípravkem pro upnutí jednotlivých částí k nastehování a následnému svařování, za současného zajištění dobrého přístupu robota ke všem částem svaru.
- pomocné zařízení, mezi které může být zařazeno:
 - dopravní a manipulační zařízení – v buňce může být ustaven druhý robot, jehož funkcí může být ustavení části svařence do polohovadla, přenášení dílčích součástí z míst předehřevů nebo přenesení hotového svařence na další operace. Dopravu a manipulaci může taktéž provádět obslužný personál.
 - palety s materiálem, dílci svařenců a hotovými svařenci – z důvodu jednodušší manipulace může být materiál uložen uvnitř buňky, v takovém případě je dostupnější, jak pro manipulačního robota, tak i pro obslužný personál.
 - bezpečnostní zařízení – při procesu je nutné chránit obsluhu, jak před riziky spojenými se samotnou technologií svařování, tak i s riziky plynoucími z automatizace procesu. Mezi bezpečnostní prvky, chránící obsluhu, mohou být zařazeny mechanické a optické zábrany, nášlapné desky, zabráňující nepovolenému vstupu do prostoru buňky, ochranné stěny a skla sloužící k odstínění nebezpečného záření, odsávací a filtrační zařízení, zachycující zdraví škodlivé výpary, vznikající během procesu.
 - energetické a signálové propojení pracoviště, rozvaděče, aj.
 - řídicí systém pracoviště jako celku – zabezpečuje součinnost s jinými pracovišti v rámci celé pracovní linky,
 - ovládací pulty a panely.



Obr. 21 Příklad svařovací buňky [12].

Mezi cíle zařazení robotizovaného svařování do výroby patří především [8]:

- zvýšení produktivity práce – je dosahováno především zkrácením vedlejších časů a prostojů, díky významným zrychlením manipulačních časů, ale i samotného procesu svařování, kdy je možné podstatné zvýšení svařovací rychlosti v porovnání s ručním vedením. Svařování se většinou realizuje v poloze PA, tedy vodorovně shora a do úžlabí, čehož se dá poměrně snadno dosáhnout vhodným nastavením svařence, prostřednictvím polohovadla,
- sjednocení a zvýšení kvality svarových spojů – po naprogramování robot koná pořád stejné pohyby, tedy i kvalita svařenců by měla být rovnoměrná. Stejně tak, pokud se v procesu vyskytne chyba, je neustále opakována,
- odstranění fyzicky namáhavé, monotónní a zdraví škodlivé práce – obsluha se nemusí přímo podílet na procesu a je chráněna před zdravím škodlivými vlivy, jako je nebezpečné záření a zplodiny,
- snížení ekonomické náročnosti výroby svařenců – výsledný zisk z produkce převyšuje náklady na pořízení a provozování svařovacího robota,
- eliminace nedostatku kvalifikovaného personálu, svářečů,
- vytvoření předpokladů pro další automatizaci - například automatizaci manipulace a další rozšíření bezobslužných pracovišť,
- realizace pružných výrobních systémů.

2.1.2 Parametry svařování

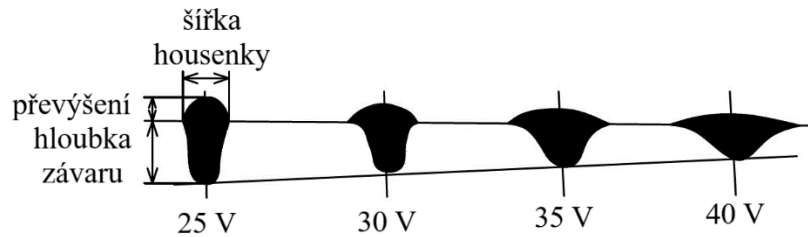
Aby byl vytvořen kvalitní a spolehlivý svar, je nutné použití správně nastavených jednotlivých proměnných, které ve větší či menší míře ovlivňují proces. Proměnné, které jsou zásadní pro výsledný charakter svarové housenky se nazývají jako základní parametry[8]. Mezi ty mohou být zařazeny především [8]:

- svařovací proud,
- svařovací napětí,
- rychlost svařování.

Mezi ostatní podmínky, které více či méně taktéž ovlivňují charakter a výsledek svařování může být zařazeno [8]:

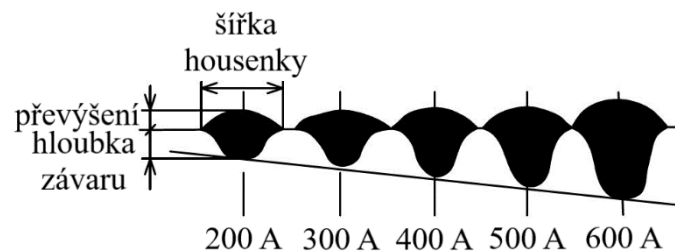
- druh a průměr drátu,
- polarita elektrody,
- výlet drátu,
- sklon drátu a hubice,
- druh a velikost průtoku ochranného plynu,
- tvar a rozměr svarových ploch,
- charakter přenosu kovu v oblouku,
- teplota předehřevu svařovaného základního materiálu,
- poloha svařování.

Svařovacím napětím se rozumí potenciál mezi elektrodou ve formě drátu a povrchem svarové lázně. Rozsah se při MAG svařování pohybuje v intervalu přibližně 14 až 40 V, v některých případech i 65 V. V procesu ovlivňuje především při kombinaci se svařovacím proudem a ochranným plynem, způsob přenosu svarového kovu v oblouku. Dále významně působí na tvar a rozměry oblouku, na jehož délce je velikostně závislé. Ve svarové housence působí především na její šířku, jak lze vidět na obr. 22. V případě vysoké hodnoty napětí může docházet ke vzniku pórů a značnému rozstříku svarového kovu. Výsledný svar je spíše široký a mělký. Naopak při příliš nízkých hodnotách je proces nestabilní [5].



Obr. 22 Závislost tvaru průřezu svarové housenky na velikosti napětí [8].

Hodnota svařovacího proudu má největší vliv především na hloubku závaru a je tedy jejím hlavním regulačním nástrojem. Především u robotizovaného svařování se jeho hodnota volí právě podle požadované hloubky. Naopak šířku housenky a její převýšení ovlivňuje spíše v menší míře. Na obr. 23 je schematicky znázorněn vliv velikosti proudu na průřez svarové housenky [5; 8].



Obr. 23 Závislost tvaru průřezu svarové housenky na velikosti proudu [8].

Zvyšování rychlosti má na svar opačné účinky než napětí a proud. Vlivem rychlejšího průjezdu se sníží množství vneseného tepla, a tím se zvýší rychlost ochlazování svařence. V případě robotického svařování může rychlost dosahovat velikosti až $1200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [8].

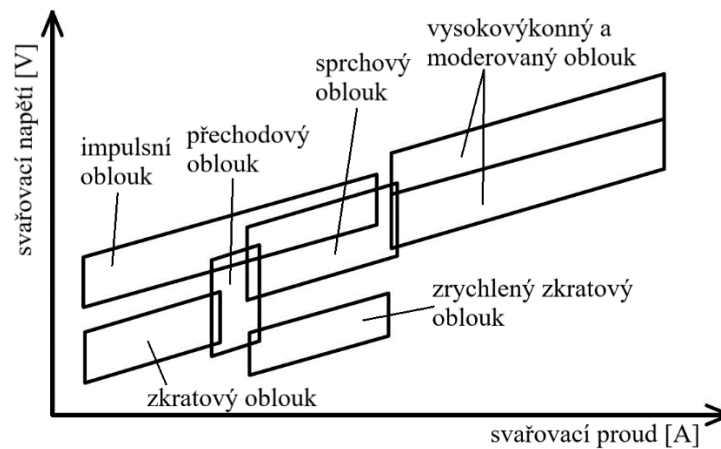
Proudová hustota je parametr ovlivněný dvěma faktory, a to velikostí proudu, a průřezem drátu jako odtavovací elektrody. Metoda MAG je charakteristická využitím největší proudové hustoty, která může dosahovat až hodnoty $600 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$. Běžně používané velikosti se ale pohybují v závislosti na nejvíce používaných průměrech drátu 0,8 až 1,2 mm, v rozsahu přibližně 80 až $350 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$. Při svařování daných svařenců dosahuje hodnoty přibližně $234 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$. Zvětšením proudové hustoty se dosahuje větší hloubky závaru a zvýšení výkonu odtavení [5; 8].

Charakter svařování v neposlední řadě také ovlivňuje druh proudu a použitá polarita. Jak již bylo uvedeno výše, u metody MAG se využívá stejnosměrného proudu a nepřímé polaritu. Tím se dosahuje větší hloubky závaru, malého převýšení a větší šířky svarové housenky [5].

2.1.3 Způsoby přenosu svarového kovu

Způsob natavování konce elektrody vlivem působení oblouku, pohyb kapek kovu a jejich splynutí se svarovou lázní, se nazývá přenos kovu. Je řazen mezi základní charakteristiky metody MAG a je ovlivňován velikostí napětí, proudu, proudové hustoty, polaritou elektrody, ale i technikou svařování, typem ochranného plynu, druhem a průměrem přídavného materiálu. Ovlivňuje operativnost svařování, způsob formování svaru, průběh metalurgických jevů, ale v neposlední řadě také například i velikost rozstříku. Základní rozdělení může být, dle napětí, na zkratový, polozkratový a přenos volným letem. Poslední zmiňovaný lze následně dále rozdělit podle velikosti proudové hustoty na kapkový, kombinovaný, sprchový a impulzní přenos svarového kovu. Každý ze způsobu je specifický a nachází své uplatnění v jiné oblasti.

Předpokládaný přenos, lze vzhledem k parametrům napětí a proudu, předpovědět z diagramu, který je uveden na obr. 24, další schematické zobrazení přenosů je na obr. 25 [5; 8].



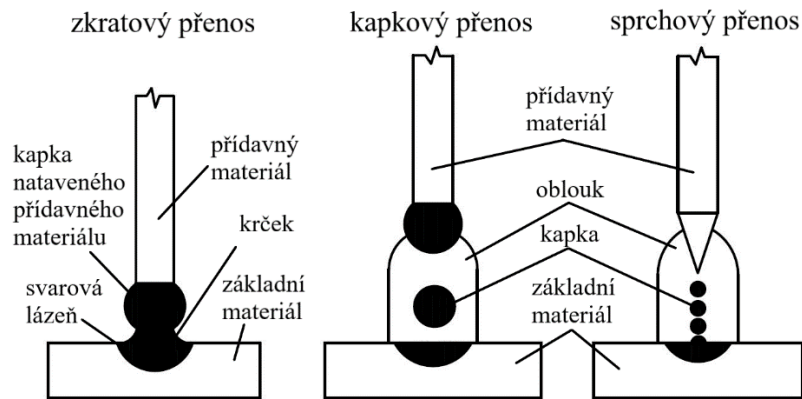
Obr. 24 Diagram svarového přenosu [5].

Zkratový přenos je charakteristický pro krátký oblouk a nízké hodnoty napětí a proudu, v přibližném rozsahu 14 až 22 V a 60 až 180 A. Taktéž i pro přídavné materiály do průměru 1,2 mm, kde se dosahuje spíše menší hodnoty proudové hustoty. Je možné jej dosáhnout při použití všech typů ochranných plynů. Cyklus přenosu má několik fází. Nejprve se na konci elektrody začne tvořit kapka s postupně zvětšujícím se průměrem až do momentu, kdy dojde k dotyku se svarovou lázní. Tehdy dojde ke zkratu a vlivem zvyšujícího se proudu následně k oddělení kapky od drátu, až splyne se svarovou lázní. Nevýhodou je poměrně vysoký rozstřík, především při nižších proudech a vyšším napětí. Tento typ přenosu je aplikován převážně pro svařování tenkých plechů, kořenových vrstev u tupých svarů, svařování v polohách a spojování vysokolegovaných ocelí [5; 8].

Kapkový přenos leží na hranici přechodu mezi zkratovým a bezzkratovým přenosem. Napětí bývá v rozsahu 22 až 28 V a svařovací proud 190 až 300 A. Na konci přídavného materiálu se vytvoří kapka, která se následně oddělí a letí do svarové lázně. Oproti zkratovému přenosu je možno dosáhnout vyššího tepelného výkonu oblouku, širší svarové lázně a příznivější formování svarové housenky. Často se využívá při svařování středních tloušťek v poloze vodorovné shora [5; 8].

Sprchový přenos je charakteristický pro rozsahy napětí 28 až 40 V a proudy 200 až 500 A, při ochranné atmosféře Ar + CO₂, Ar + O₂ nebo čistém Ar. Naopak v atmosféře CO₂ ho nelze z důvodu velkého povrchového napětí dosáhnout. Přenos kovu je ve formě drobných kapiček, uvolňujících se vysokou frekvencí z konce elektrody, tvořící na konci ostrý hrot. Typické vlastnosti tohoto přenosu jsou velká hloubka závaru, spolu s velkým přenosem tepla do svaru, klidné hoření, vysoký výkon navaření. Využívá se pro výplňové housenky materiálů o středních a větších tloušťkách převážně ve vodorovné poloze shora [5; 8].

Impulzní přenos je ve své podstatě tvořen kombinací kapkového a sprchového přenosu při aplikaci parametrů z oblasti zkratové, ale i sprchové. Je specifický především průběhem svařovacího impulzního proudu, který má 2 hladiny. Funkcí základního proudu o rozsahu 20 až 50 A je udržení ionizace oblouku. Během impulzního proudu dochází ke tvorbě a následnému oddělení kapky přídavného materiálu [5].



Obr. 25 Schématické znázornění zkratového, kapkového a sprchového přenosu svarového kovu [8].

2.1.4 Přídavné materiály

U metody MAG se používají přídavné materiály ve formě plného drátu, taženého za studena, nebo plněného drátu, který slouží zároveň jako odtavující se elektroda. Vzhledem k širokým možnostem svařovaných materiálů, existuje i velké množství druhů. Plné dráty se pro metodu MAG vyrábí v průměrech 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 a 2,4 mm. V praxi jsou nejčastěji využívané především průměry 0,8 až 1,6 mm. Vzhledem k využití v poloautomatickém svařovacím procesu jsou dráty navinuté na drátěných nebo plastových cívkách, které jsou následně vkládány do zásobníku drátu. Cívky drátů od společnosti ESAB se běžně vyrábí v hmotnostech od 5 do 18 kg, ale pro automatické robotické svařování existují pro určité typy drátů i větší balení 200 kg, 250 kg i 500 kg. Samotný drát je proti oxidaci chráněn poměděním, které zlepšuje i jeho kluzné vlastnosti při procesu podávání, zároveň se tím snižuje riziko vzniku povrchové oxidace. Při přepravě a skladování je cívka neprodyšně zatavena do polyethylenové folie a vložena do krabice [5; 13; 8; 14]. Vhodný přídavný materiál je volen především podle vstupních požadavků, mezi které lze zařadit [8]:

- chemické složení a tloušťka svařovaných materiálů,
- mechanické vlastnosti svařovaných materiálů,
- požadované užitkové vlastnosti svarových spojů,
- typ svarového spoje,
- druh použitého ochranného plynu.

V praxi se získávají doporučené přídavné materiály z katalogu, popřípadě prostřednictvím konzultace přímo s dodavatelem nebo výrobcem přídavných materiálů. Mezi požadavky, které by měl přídavný materiál splňovat, patří především čistota a přesné chemické složení, které je vedle železa tvořeno i dalšími prvky, mezi které mohou patřit [13]:

- C – jeho vliv spočívá ve zvýšení pevnosti, ale i křehkosti oceli, za současného snížení její houževnatosti, v důsledku čehož se zvyšuje riziko trhlin za studena,
- Mn a Si – ve svarové lázni plní desoxidační funkci, mangan navazuje nežádoucí síru, křemík zvyšuje tekutost strusky a zvyšuje pevnost svaru,
- P a S – ve svaru nežádoucí prvky, zvyšují riziko trhlin za horka,
- Ti, Nb, Zr a Al – plní desoxidační funkci a snižují pórovitost svaru,
- Mo a V - zvyšují pevnost a houževnatost především u vysoce legovaných ocelí za zvýšené teploty - žáruvzdorné a žárupevné oceli,
- Cr – zvyšuje korozivzdornost,
- Ni - základní legura pro feriticko-austenitické korozivzdorné oceli.

Pro kvalitnější svar je lepší využití drátů menších průřezů, kdy je možné při přenosu svarového kovu dosáhnout většího počtu menších kapek, prostřednictvím vysoké proudové hustoty. Silnější dráty jsou výhodnější, jak z důvodu jejich nižší ceny, tak v případě využití pulzního proudu, kdy je charakter kapek řízen [5].

Pro svařování částí kolopásů je využit svařovací drát OK Autroid 12.51 o průměru 1,2 mm, vyráběný firmou ESAB. Je vhodný pro svařování nelegovaných konstrukčních ocelí a jemnozrných ocelí s mezí kluzu do 420 MPa. Jeho chemické složení dle atestu dodaného firmou ESAB (uveden v příloze 6), je uvedeno v tabulce 3. Dále jsou v tabulce 4 shrnuty mechanické vlastnosti svarového kovu, pocházející z materiálových listů. Nevztahují se tedy na konkrétní tavbu [14].

Tab. 3 Chemické složení přídavného materiálu OK Autroid 12.51 dle doloženého atestu.

Značka prvku	C	Si	Mn	P	S	Cr
Obsah v hm. %	0,078	0,85	1,46	0,013	0,012	0,03
Značka prvku	Ni	Mo	Cu	V	Al	Ti + Zr
Obsah v hm. %	0,04	0,01	0,07	0,004	0,005	0,01

Tab. 4 Mechanické vlastnosti svarového kovu po svaření, při použití plynu M21.

Pevnost			Zkouška rázem v ohybu				
Re	Rm	Tažnost	Teplota	+ 20 °C	- 20 °C	-30 °C	-40 °C
470 MPa	560 MPa	26 %	KV	130 J	120 J	100 J	90 J

2.1.5 Ochranné plyny a jejich vliv

V případě tavných svařovacích procesů je jednou z podmínek, pro dosažení kvalitního svaru, zamezení přístupu vzduchu z okolní atmosféry ke svarové lázni. V opačném případě dochází u svaru k negativním vlivům jako je oxidace, nitridace a naplynění svarové lázně, dále pak například k nežádoucí pórovitosti nebo velkému propalu prvků [5]. Kromě funkce ochranné, ovlivňuje samotný plyn i další specifika procesu, pro MAG především [5]:

- způsob přenosu svarového kovu obloukem,
- hloubka závaru a profil svaru,
- množství rozstříku,
- rychlost svařování,
- stabilita elektrického oblouku.

U metody MAG se ochranný plyn získává z tlakových lahví, které jsou součástí svařovací soupravy, popřípadě z centrálního zásobníku. Do místa svaru je dopravován hadicemi nebo potrubím a následně usměrňován pomocí plynové hubice. Oblast roztaveného svarového kovu musí být ochranným plynem dokonale obklopena, toho nemusí být dosaženo například při svařování v nepříznivých podmínkách, mezi kterými může být například foukání větru, které strhává ochranný plyn od svarového oblouku a lázeň není chráněna. V takovém případě je nutné buď zvýšení průtoku plynu, nebo přenést svařovací proces do závětrí [11 ; 15].

Název metody MAG byl vytvořen ze slov Metal Activ Gas. Významem toho je svařování tavící se kovovou elektrodou v aktivním plynu, který má chemický účinek na svarový kov, není tedy pouze inertní. Správná volba ochranného plynu je velice důležitá. Každý typ má své specifické vlastnosti, kterými ovlivňuje technologické procesy, a tím výsledné charakteristiky svaru. Rozdělení plynů dle chemického charakteru blíže určuje norma ČSN EN 439, kde jsou

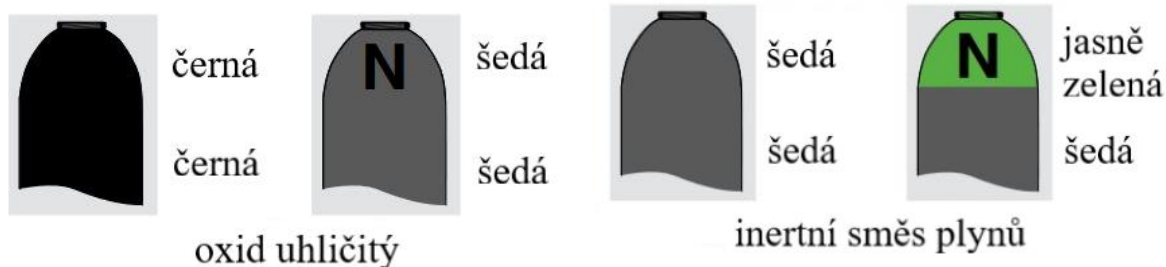
jednotlivé plyny rozděleny do skupin a identifikačních čísel podle jejich chemického složení, a s tím související vliv na svarový kov. Účinek může být redukční, oxidační a nauhličující. Jako ochranný plyn se používá jednak jednosložkový oxid uhličitý CO₂ (dle normy ČSN EN 439 skupina C) nebo častěji využívané vícesložkové směsi plynů, kde je hlavní složka argon doplněna dalšími plyny: Ar + CO₂, Ar + O₂, Ar + CO₂ + O₂ (dle normy ČSN EN 439 skupiny M1, M2, M3) [15; 16].

Jednosložkový plyn CO₂ je nejstarší typ využívaného plynu pro metodu MAG. Pro tento typ ochranné atmosféry je charakteristický vysoký přenos tepla do svarové lázně, a to díky jeho vysoké tepelné vodivosti a exotermickým metalurgickým procesům, probíhajícím v oblouku. Výsledkem je velké natavení svarových hran, hluboký průvar s oválným tvarem a vysoké převýšení housenky s hrubou kresbou spolu s množstvím oxidů na povrchu. U svarového kovu dochází ke kvalitnímu odplynění. Typický je ostrý přechod housenky do materiálu, který může mít až vrubový účinek. Během procesu je běžný vysoký rozstřík. Vzniklé kuličky je pak nutné z povrchu svařence odstranit. Vzhledem k hustotě CO₂, která je vyšší než vzduch, se využití tohoto plynu hodí spíše pro polohy svařování shora až vodorovně [5; 17].

Směsné plyny Ar + CO₂ jsou považovány za další vývojové stádium ochranných plynů pro MAG svařování. Hlavní složkou je zde inertní plyn Ar, který má nízké potřebné napětí k ionizaci oblouku, zajišťující snadné zapálení a dobrou stabilitu oblouku. Doplnění o CO₂ bývá v rozsahu od 1 % do 50 %. Dvosložkové plyny jsou charakteristické lepšími vlastnostmi, než jednosložkový CO₂ ochranný plyn. Zlepšení je především v dosažení vyšších odtavovacích výkonů, a díky tomu dosažení vyšší rychlosti svařování, a tím možné zmenšení deformací, zlepšení stability oblouku a snížení rozstříku. Pro svary na silně namáhaných konstrukcích, kde jsou požadovány dobré mechanické vlastnosti a celková pevnost a spolehlivost konstrukce, je lepší využití plynů s vyšší podílem CO₂ v Ar, pro zajištění dobrého průvaru, i za cenu horšího povrchu housenky a nutnosti dalšího opracování svaru z důvodu rozstříku. V této kategorii je v praxi často využívaný směsný plyn Ar + 18 % CO₂ (označení např. Corgon 18). V případě svarů méně namáhaných konstrukcí, často menších tlouštěk, kde je žádoucí spíše vizuální efekt jako je jemná kresba housenky a malý rozstřík, je lepší využívat plyny s menším podílem CO₂. Pro tento účel jsou často využívány plyny Ar + (8 – 10) % CO₂ [5; 16; 17].

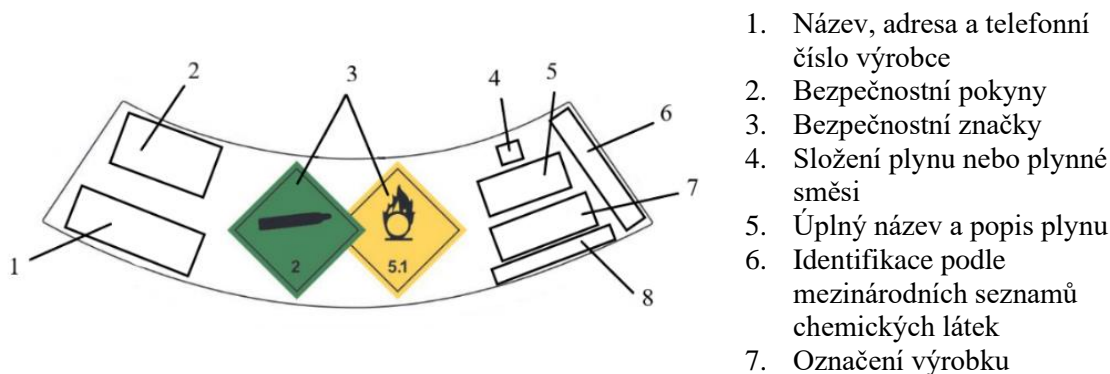
Směsné plyny Ar + CO₂ + O₂ obsahují složku kyslíku, která se do směsného plynu dodává především z důvodu snížení rozstříku a zvýšení hladkosti povrchu svarové housenky. I malé příměsi snižují viskozitu svarové lázně, a díky tomu je možné zvýšit rychlost svařování, a tím docílit zmenšení tepelného ovlivnění materiálu a snížení deformací. Vysoký obsah kyslíku zaručuje navíc výborné odplynění. Velkou nevýhodou je, že při zvýšení obsahu kyslíku dochází ke snižování vhodnosti svařování v určitých polohách, a při použití tříložkové směsi s malým podílem CO₂ je důležité držet správný sklon hořáku, jinak dojde ke špatnému provaření kořene. Tříložkové směsi neztídka nahrazují dvousložkové směsi s vyšším i nižším podílem CO₂ především u robotického svařování, kde je možné udržet správný sklon hořáku po celou dobu procesu [5; 17].

Ochranné plyny jsou uchovávány v tlakových lahvích, které mají specifické barevné značení pro možnou rychlou identifikaci jejího obsahu, viz obr. 26 a 27. Každá láhev je navíc označena štítkem obsahujícím dodatečné informace. Příklad štítku od firmy Linde Gas je uveden na obr. 28 [18].



Obr. 26 Barevné značení lahví oxidu uhličitého [18].

Obr. 27 Barevné značení lahví s inertní směsí plynů [18].



Obr. 28 Příklad označovacího štítku lahve [18].

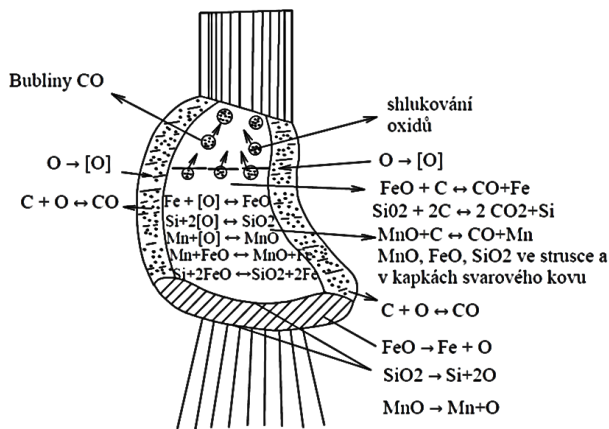
2.1.6 Metalurgické reakce

Mezi významné činitele procesu tvorby svaru patří metalurgické reakce v tavenině svarového kovu a kapkách nataveného přídavného materiálu. Jejich charakter je ve velké míře ovlivněn složením ochranné atmosféry, přídavného materiálu, ale i svařovaných základních materiálů. Metalurgické reakce ovlivňují tvar oblouku, povrch výsledné svarové housenky, přechod svarové housenky do základního materiálu a celkovou vnitřní čistotu svaru. Nejvýznamnější jsou oxidace a desoxidace, tedy pochody, ve kterých hraje roli především kyslík a jeho množství. Jejich významem při svařování je snížení množství rozpuštěného kyslíku ve svarovém kovu a vyloučení jeho oxidů na povrch housenky [5; 19].

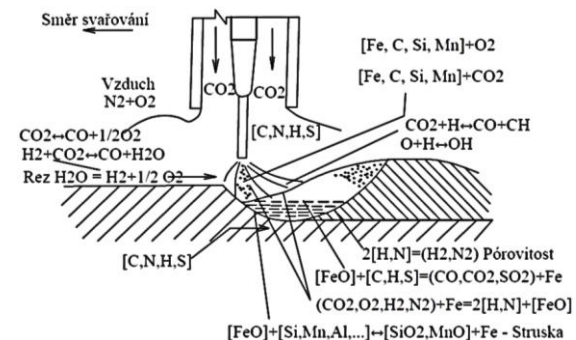
Kyslík se do svařovacího oblouku může dostat jako jedna ze složek ochranného plynu, jehož jsou často součástí, nebo rozkladem molekul CO_2 , pocházejících taktéž z ochranného plynu, které jsou vysokou teplotou disociovány a rozkládají se na CO a O . Kyslík reaguje oxidačními reakcemi, které jsou exotermické již v oblouku, kde se slučuje s prvky Fe , Mn a Si za vzniku jejich oxidů FeO , MnO , SiO_2 . Díky těmto exotermickým reakcím se zvyšuje celková teplota kapek taveniny obohacených o kyslík a proudících od konce elektrody do svarové lázně. V důsledku toho je při svařování s využitím CO_2 jako ochranného plynu možné dosáhnout hlubších a oválnějších svarových lázní, než při použití směsných plynů, kde je hlavní nebo jedinou složkou inertní argon [5].

Z důvodu snížení pravděpodobnosti vzniku vad jako je znečištění svarového kovu nevhodnými oxidickými vměstkami, propalu legur, zkřehnutím svarového kovu, nebo vzniku bublin a pórů, vznikajících slučováním FeO s uhlíkem, za vzniku CO ve formě bublin, je nutná desoxidace taveniny, tedy snížení množství rozpuštěného kyslíku. Provádí se pomocí vhodných desoxidáčnických prvků, které mají ke kyslíku vyšší afinitu než železo a vytvoří s ním stabilní oxidy, které následně vyplavou na povrch ve formě snadno odstranitelné strusky, kterou je

nezbytné před začátkem svařování další vrstvy odstranit. Vhodnými desoxidáčnými prvky jsou v tomto případě Mn a Si, které jsou dolegovány do přídatného materiálu ve formě drátu. Při teplotě tuhnutí fungují desoxidáčně převážně Si, V, Cr a Mn. U vyšších teplot pak především Al, Ti, C a Mn. Schematicky jsou metalurgické reakce shrnuty na obr. 29 a 30 [5; 19].



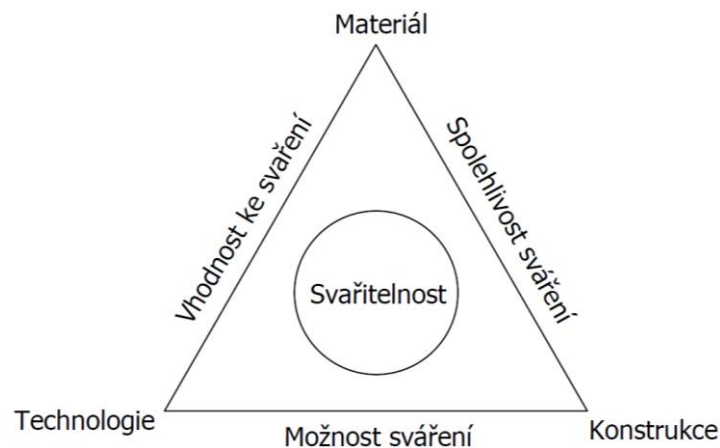
Obr. 29 Metalurgické reakce v oblouku [5].



Obr. 30 Metalurgické reakce ve svarové lázni [5].

2.2 Svařitelnost ocelí

Svařitelnost ocelí je velice komplexní a je závislá na mnoha faktorech, mezi které patří vlastnosti základních materiálů a svarového kovu, použitá metoda svařování včetně vytvořených podmínek procesu a v neposlední řadě hraje svou roli také konstrukce svařence. Graficky toto znázorňuje obr. 31. Jako kritérium mohou být považované vlastnosti svarového spoje, které jsou vyhovující pro danou konstrukci plnící určitou funkci [20].



Obr. 31 Schematické znázornění jednotlivých vlivů na svařitelnost materiálu [8].

Během procesu svařování obloukovými metodami dochází k lokálnímu velmi rychlému ohřevu materiálu až na teploty jeho tavení. Vlivem přenosu tepla je ovšem postupně ovlivněno i okolí svarové lázně směrem do základních materiálů [21]. Velikost a charakter změn je dán především [21]:

- svařovaným materiálem – jeho chemickým složením, fyzikálními vlastnostmi a geometrickými rozměry,
- metodou svařování – způsob, parametry technologie, postup svařování,
- množstvím tepla vneseného do svaru vztaženého na jednotku délky.

Výpočet množství vneseného tepla dle provést vztahu [21]:

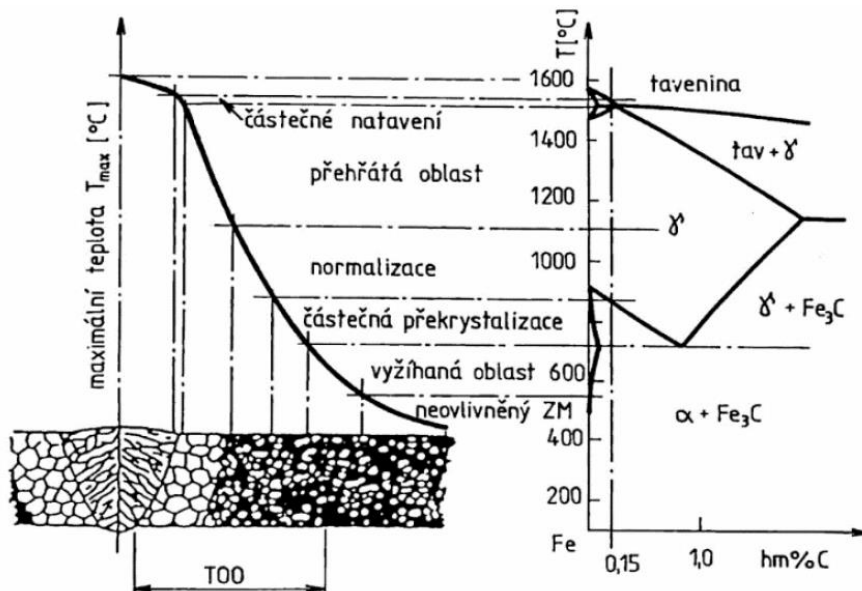
$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v \cdot 10^3} \quad (2.1)$$

kde: η - koeficient účinnosti svařování [-]
 U - svařovací napětí [V]
 I - svařovací proud [A]
 v - svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

K popisu tepelného režimu, kterému je materiál ve specifických místech vystaven, slouží teplotní cyklus. Ten udává změny teploty v čase v určitém bodě na svařenci, kterým obvykle bývá tepelně ovlivněná oblast. U jednotlivých metod svařování se v závislosti na jejich parametrech mění také průběhy těchto cyklů, které následně vedou i k rozdílným změnám v tepelně ovlivněné oblasti [21]. Mezi charakteristiky teplotního cyklu, a od toho odvíjející se změny, jsou především [21]:

- rychlost ohřevu,
- maximální teplota cyklu T_{\max} ,
- doba výdrže na dané teplotě,
- rychlost ochlazování.

Tepelně ovlivněná oblast je materiál v blízkosti svaru, ve kterém došlo ke změně mikrostruktury v důsledku zvýšené teploty, vyvolané tepelným zdrojem a následným ochlazením. Od svaru směrem k základnímu materiálu se teplota, a tím ovlivnění svařovaných materiálů v okolí, postupně snižuje. Její šířka je pro jednotlivé technologie a použité parametry rozdílná. Pro metodu MAG je šířka nad teplotou A_1 přibližně 3 až 8 mm, nad A_3 0,3 až 1 mm a přehřátá oblast 0,1 až 0,3 mm. Lze ji tedy dle charakteru změn rozdělit na několik oblastí, které jsou komplexně vyobrazeny na obr. 32 [21].



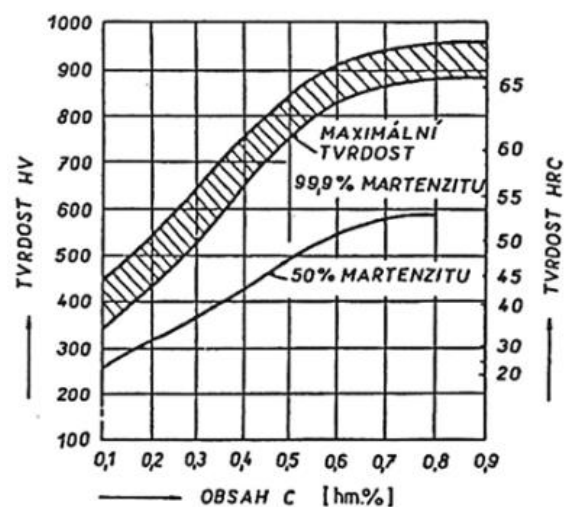
Obr. 32 Jednotlivé zóny v tepelně ovlivněné oblasti [5].

V centrální oblasti svaru se vyskytuje svarový kov, tvořený směsí základního a přídavného materiálu. Přechodovou hranici do vlastní tepelně ovlivněné oblasti tvoří poměrně úzká oblast částečného natavení, která je vzhledem ke své šířce spíše linií. Na ni navazuje přehřátá oblast. Ta je vlivem velkého překročení teploty překrystalizace charakteristická vysokým růstem primárního zrna, což je problém nejen v případě jemnozrnných ocelí. Následkem je snížení plasticity, podpora tvorby Widmannstättenovy struktury a celková náchylnost k praskání. Proto

je považována za nejvíce nebezpečnou. Dalším pásmem, vyznačujícím se změnou struktury vlivem nižší teploty je oblast normalizace, které je posledním pásmem, kde ještě dochází k úplné transformaci materiálu na austenitickou strukturu. Zde dochází stejně jako při stejnojmenném tepelném zpracování ke zrovnoměnění zrna. Na toto pásmo navazuje oblast částečné překrystalizace, ve které se vlivem nedostatečné teploty dosahuje pouze neúplné polymorfnní transformace a významnému poklesu tvrdosti. Pod teplotou A_1 již dochází jen ke změnám substrukturních, nebo probíhajících v rámci tuhého roztoku [5; 20; 22].

Pro popis vzniku struktur takových ocelí jsou nápomocny ARA diagramy, pomocí kterých je možné určení přibližné výsledné struktury dané oceli při anizotermickém rozpadu austenitu. Pro případy svařování a změny struktury v tepelně ovlivněné oblasti byly ARA diagramy modifikovány na speciální ARA diagramy označené "In situ", nabízející o něco přesnější popis [5].

Svařitelnost nejen bórových ocelí úzce souvisí s jejich chemickým složením. Vedle prvků jako je síra a fosfor, jež by měly být zastoupeny v co nejmenším množství z důvodu zkřehčení, je u ocelí významný obsah uhlíku. Obecně se za dobře svařitelné oceli považují ty s obsahem menším než je 0,25 hm.%. Přibližně nad touto hranicí jsou již oceli po tepelném zpracování, tedy i v místech tepelně ovlivněné oblasti, schopny tvořit základnou martenzitickou strukturu. Se zvyšujícím se množstvím postupně roste i maximální tvrdost a pevnost. Přibližnou závislost mezi množstvím uhlíku a dosahovanou tvrdostí znázorňuje diagram na obr. 33. Pro obsah uhlíku 0,25 hm. % zde při 50% množství martenzitu odpovídá hodnota tvrdosti přibližně 350 HV, což je i hodnota, která je často uvažovaná jako maximální přípustná hodnota tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti [20; 22].



Obr. 33 Graf závislosti tvrdosti materiálu na množství uhlíku [5].

Pro předejití vzniku nežádoucí martenzitické struktury je nutné snížit rychlost ochlazování především v tepelně ovlivněné oblasti. K tomuto účelu slouží předehřev, díky kterému se sníží rychlost ochlazování odvodem tepla v rámci materiálu. K výpočtu teploty předehřevu bylo navrženo mnoho vztahů od různých autorů, aplikovatelných na různé materiály, především vzhledem k jejich chemickému složení. Teplota předehřevu dle normy ČSN EN ISO 1011 – 2 metoda B je komplexní výpočet, který zahrnuje množství vlivů, jako je chemické složení svařovaného materiálu, jeho tloušťku i vliv samotné metody [20; 23]. Jeho výpočet je dle následujících vztahů [23]:

- Teplota předeřevu:

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad (2.2)$$

kde: T_{pCET} – dílčí teplota vlivu chemického složení [°C]

T_{pd} – dílčí teplota vlivu tloušťky svařovaných materiálů [°C]

T_{pHD} – dílčí teplota vlivu obsahu difuzního vodíku HD ve SK [°C]

T_{pQ} – dílčí teplota vlivu tepelného příkonu [°C]

- Uhlíkový ekvivalent CET dle normy ČSN EN ISO 1011-2 - metoda B se spočítá dle vztahu [23]:

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (2.3)$$

- Vliv chemického složení svarového kovu dle vztahu [23]:

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad (2.4)$$

- Vliv tloušťky svařovaných materiálů dle vztahu [23]:

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \quad (2.5)$$

kde: d – tloušťka svařované součásti [mm]

- Vliv obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu dle vztahu [23]:

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad (2.6)$$

kde: HD – obsah difuzního vodíku pro metodu svařování [$\text{ml} \cdot (100\text{g})^{-1}$]

- Vliv tepelného příkonu dle vztahu [23]:

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \quad (2.7)$$

kde: Q – množství tepla vneseného do svaru [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

2.3 Tepelné zpracování svarových spojů

Vedle chemického složení je výrazným faktorem ovlivnění vlastností nejen svarového kovu, ale i základního materiálu, s cílem zlepšit užité vlastnosti dané součásti. Obecný postup tepelného zpracování se skládá z ohřevu na danou teplotu, časové prodlevě na této teplotě, při které se dosáhne požadovaných přeměn, a nakonec z ochlazení vhodnou rychlostí. Pokud je to možné, prochází tepelným zpracováním celé svařence [20]. Důvody aplikace jsou především [20]:

- snížení zbytkového napětí,
- zlepšení vlastností spoje (struktury, mechanických vlastností, tvrdosti),
- snížení rizika vzniku zbrzděných lomů,
- snížení množství difuzního vodíku,
- zlepšení rozměrové stability svařované konstrukce.

Popouštění svarových spojů se uplatňuje při teplotách v rozmezí přibližně od teploty 200°C po teploty těsně pod A_{C1} . Cílem tohoto tepelného zpracování je snížení zbytkového napětí a obnova struktury degradované teplotními cykly ve svarovém kovu, ale i v tepelně ovlivněné oblasti. Při nízkých teplotách okolo teplot 200°C dochází k transformaci zbytkového austenitu na struktury bainitického typu. Od teploty přibližně 300°C dochází k difuzi intersticiálních prvků za postupného snížení přesycení mřížky uhlíkem. V této fázi vzniká přechodový ϵ karbid

železa $Fe_{2,4}C$, který se s dalším zvýšením teploty transformuje na cementit, který s dalším zvýšením teploty již dále jen roste a hrubne [20].

2.4 Bórové oceli

Lze je zařadit do kategorie jemnozrnné nízkouhlíkové oceli. Mezi jejich charakteristické vlastnosti patří poměrně nízká cena, a po správném tepelném zpracování vysoké hodnoty tvrdosti a pevnosti. Dosahované hodnoty jsou tak vysoké, že tyto oceli lze řadit mezi vysokopevnostní. Díky poměrně nízkému obsahu uhlíku je možno tyto oceli svařovat [24; 25].

Z hlediska chemického složení obsahují, vedle dalších prvků, uhlík nejčastěji v rozsahu 0,1 až 0,3 hm. %, mangan v rozsahu přibližně 1 až 2 hm. % a bór v řádu jednotek tisícín hm. %. Právě u nízkouhlíkových ocelí s rozsahem množství uhlíku 0,1 a 0,35 hm. % je bór při již zmíněném malém množství schopen mimořádně zvyšovat strukturu prostřednictvím procesu kalení. Tyto oceli pak dosahují hodnot prokalitelnosti porovnatelných s hodnotami ocelí s obsahem uhlíku nad 0,4 hm. % a několika jednotkami desetin hm. % legujících prvků jako je Cr, Ni, Mn, V, nebo Mo. Ovšem při jeho vyšších koncentracích nebo s vyšším obsahem uhlíku se mimořádné schopnosti bóru vytrácejí. Stejně tak je důležité hlídat maximální teplotu ohřevu při zušlechtní, která by neměla přesáhnout 1000 °C. Nad touto teplotou taktéž vliv bóru zaniká. Vzhledem k tomu, že je účinnost bóru podmíněna jeho atomárním stavem, je nezbytné zamezit jeho vyvázání s kyslíkem, uhlíkem a dusíkem. K tomuto účelu by ocel měla obsahovat dostatečné množství prvků jako je titan, hliník, křemík a zirkon, které mají k výše zmíněným prvkům vyšší afinitu než bór [24; 25].

Tyto oceli nachází uplatnění patří především mezi součástmi opotřebovávanými abrazi, nebo je u kterých vyžadována pevnost. Mezi takové mohou být zařazeny například čepele lopat, rýče, nože, nebo výztužné sloupky v autech. Časté je využití například i v případě pluhů, sloužících v zemědělství k orbě půdy (obr. 34). Tento materiál je tedy vhodný pro výrobu kolopásů používaných v lesnictví [26].



Obr. 34 Pluh během orby [27].

2.4.1 Ocel 30MnB5

Vhledem k chemickému složení a jejím vlastnostem může být řazena mezi bórové oceli. Dle TNI CEN ISO/TR 15608 (050323) Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin lze tuto ocel zařadit do skupiny 4, tedy oceli s nízkým obsahem vanadu, legované Cr-Mo-(Ni) s $Mo \leq 0,7 \%$ a $V \leq 0,1 \%$ a podskupiny 4.1, tedy oceli s $Cr \leq 0,3 \%$ a $Ni \leq 0,7 \%$. Popřípadě do skupiny 11, tedy oceli zahrnuté do skupiny 1 s obsahem $0,25 \% < C \leq 0,5 \%$, a podskupiny 11.1, tedy oceli skupiny 11 s $0,25 \% < C \leq 0,35 \%$ [28].

Její přesné chemické složení dle atestu je uvedeno v tabulce 5. Tento atest se vztahuje přímo k tavbě použité na výrobu vzorků (to i v případě oceli 27MnCrB5-2). Uvedení přesného chemického složení je velice výhodné především z důvodu ucelení představy o materiálu, ale i z důvodu zpřesnění teoretického výpočtu například teploty předehřevu. Takový výpočet může být poté více vypovídající, než například výpočet pouze z materiálových listů, kde často nejsou uvedeny všechny důležité prvky. Navíc je zde uveden jejich dovolený rozsah. Jak je vidět v tabulce 5, množství uhlíku se pohybuje spíše na horní hranici bórových ocelí, mangan leží v nejčastější rozsahu 1 až 2 hm. %. Bór je zastoupen v jednotkách tisícín procent [24].

Doporučené rozsahy teplot pro tepelné zpracování jsou v tabulce 6. Jak je možno vidět, přibližná kalící teplota používaná ve firmě, tedy přibližně $870 \text{ }^\circ\text{C}$, leží v rozsahu teoretických kalících teplot. Naopak popouštění oceli probíhá o $50 \text{ }^\circ\text{C}$ níže, než je dolní hranice doporučených teplot.

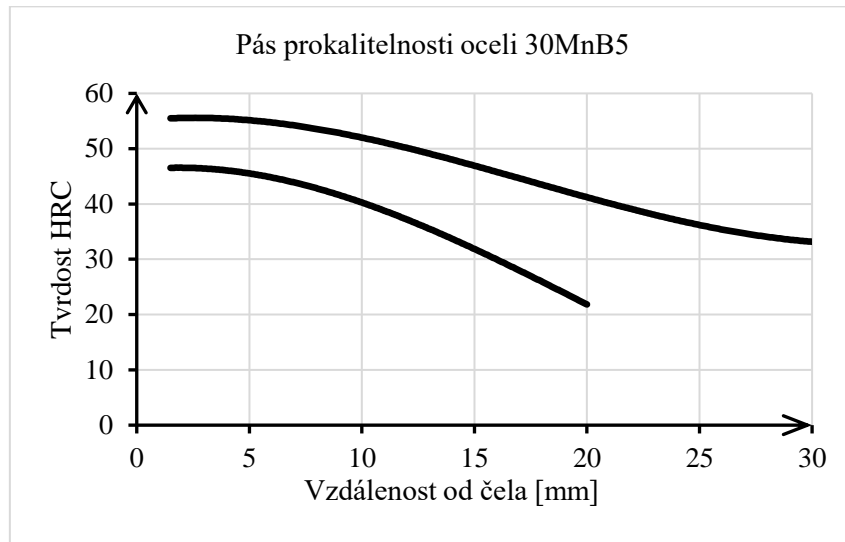
Tab. 5 Chemické složení 30MnB5 z atestu [3].

Značka prvku	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Obsah v hm. %	0,32	0,29	1,26	0,011	0,007	0,14	0,08
Značka prvku	Mo	V	Cu	Al	B	Ti	N
Obsah v hm. %	0,03	0,00	0,19	0,021	0,0037	0,020	0,009

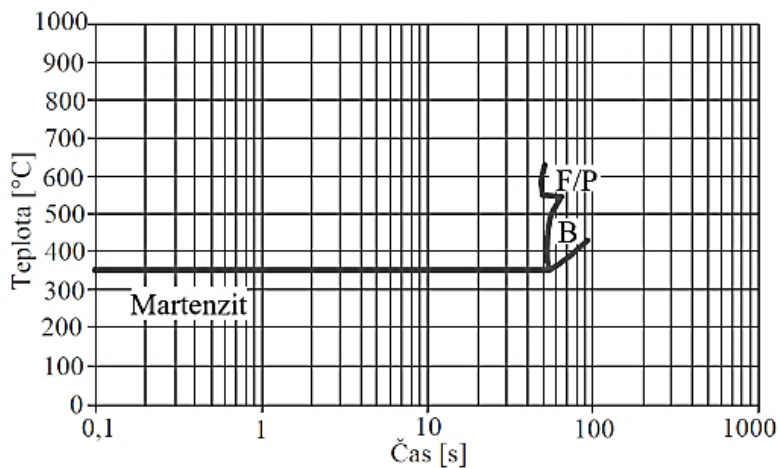
Tab. 6 Rozsahy teplot pro tepelné zpracování 30MnB5 [3].

Způsob tepelného zpracování	Rozsah teplot
Kalení	$860 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$
Popouštění	$400 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$

Na obr. 35 je uveden pás prokalitelnosti této oceli. V hloubce 5 mm pod povrchem lze tedy dle toho diagramu dosáhnout přibližné tvrdosti v rozmezí tvrdostí 45 až 55 HRC. Při velice přibližném přepočtu v interní literatuře odpovídá tento rozsah tvrdostem 595 až 447 HV. Dle ARA diagramu vyobrazeného na obr. 36 je možné u této oceli získat martenzitickou strukturu i při poměrně pomalých rychlostech ochlazování [3].



Obr. 35 Pás prokalitelnosti oceli 30MnB5 [3].



Obr. 36 ARA diagram oceli 30MnB5 [29].

2.4.2 Ocel 27MnCrB5-2

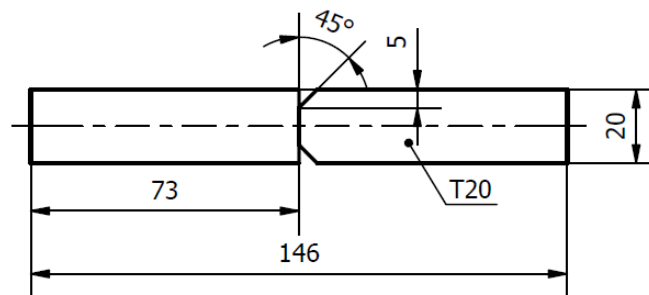
Ocel 27MnCrB5-2 je taktěž řazená mezi bórové oceli. Dle TNI CEN ISO/TR 15608 (050323) Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin, lze tuto ocel zařadit do skupiny 4, tedy oceli s nízkým obsahem vanadu, legované Cr-Mo-(Ni) s $Mo \leq 0,7 \%$ a $V \leq 0,1 \%$ a podskupiny 4.2, tedy oceli s $Cr \leq 0,7 \%$ a $Ni \leq 1,5 \%$. Popřípadě do skupiny 11, tedy oceli zahrnuté do skupiny 1 s obsahem $0,25 \% < C \leq 0,5 \%$, a podskupiny 11.1, tedy oceli skupiny 11 s $0,25 \% < C \leq 0,35 \%$ [28].

Její chemické složení z atestu je uvedeno v tabulce 7. Jak lze vidět, od oceli 30MnB5 se liší především nižším množstvím uhlíku, ale i přibližně čtyřnásobným množstvím chrómu. Uhlík i mangan se opět pohybují v rozsazích běžných u bórových ocelí, stejně tak jako bór, který je opět zastoupen v jednotkách tisícín hm.% a množstvím téměř identickým jako u oceli 30MnB5 [24].

V tabulce 8. jsou uvedeny doporučené rozsahy teplot pro tepelné zpracování. Při výrobě příčníku je ohřátí materiálu v indukčních pecích na přibližně 1100°C , což je teplota uvnitř doporučeného rozsahu, stejně tak i přibližná kalící teplota 870°C . Na obr. 37 je uveden ARA diagram této oceli, jak je vidět, tvrdost martenzitické struktury této oceli může při martenzitickém kalení dosahovat tvrdosti až 533 HV.

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Aby bylo možné vyhodnotit, zda lze materiál 30MnB5 plnohodnotně zaměnit za materiál 27MnCrB5 – 2, byl návrh provést řadu zkoušek, rozdělených do 2 skupin. V první byly zkoušeny vzorky základních materiálů, jejichž stav korespondoval se stavem příčnicku výroby kolopásu, tedy kování a tepelném zpracování. Takto by bylo možné zjistit a porovnat reálné mechanické vlastnosti obou materiálů po celkové výrobě. V druhé části experimentu byly zjišťovány vlastnosti svarů všech kombinací ocelí, a to jak s předehřevem přibližně 200°C, tak i bez předehřevu. Cílem bylo zjistit stav jednotlivých svarových spojů. Svary byly provedeny tak, aby vzhledem k možnostem co nejvíce napodobovaly svar na příčnicku, proto vždy na jednom ze svařenců byl vytvořen úkos. Výsledný typ svaru je tedy oboustranný $\frac{1}{2}$ V tupý svar s částečným provařením z obou stran. Podobným typem svaru je spojen i příčník s kostičkou, kdy se jedná o koutový $\frac{1}{2}$ V svar s úkosem na kostičce bez úplného provaření kostičky. Schematické znázornění základních materiálů pro zkušební svary je na obr. 38.



Obr. 38 Schematické znázornění rozměrů základních materiálů pro vzorky svařenců.

Všechny zkoušky jak základních materiálů, tak svařenců nebyly prováděny dle norem, ale v souladu s požadavky firmy, které byly stanoveny na základě konzultací se zástupci společnosti. Jednotlivé zkoušky a vytvořené vzorky, včetně jejich charakteristik, jsou přehledně shrnuty v tabulkách 9 a 10.

Tab. 9 Zkoušky na vzorcích základního materiálu.

Číslo vzorku	Počet vzorků	Materiál	Stav vzorku	Rozměry vzorku	Zkouška
1	3	27MnCrB5-2	zušlechtěný	10 x 10 x 55	Zkouška rázem v ohybu
2a,b	2	27MnCrB5-2	zušlechtěný	20 x 20 x 100	Zkouška rozlomením,
2	1	27MnCrB5-2	zušlechtěný	20 x 20 x 100	Hodnocení makrostruktury, hodnocení mikrostruktury, měření mikrotvrdosti
3	3	30MnB5	zušlechtěný	10 x 10 x 55	Zkouška rázem v ohybu
4a,b	2	30MnB5	zušlechtěný	20 x 20 x 100	Zkouška rozlomením
4	1	30MnB5	zušlechtěný	20 x 20 x 100	Hodnocení makrostruktury, hodnocení mikrostruktury, měření mikrotvrdosti

Tab. 10 Zkoušky na svařencích.

Číslo vzorku	Počet vzorků	Materiál	Materiál	Předehřev před svařováním	Zkouška
5a,b	2	30MnB5	30MnB5	Ano	Zkouška rozlomením
6a,b	2	27MnCrB5-2	30MnB5	Ne	Zkouška rozlomením
7a,b	2	27MnCrB5-2	30MnB5	Ano	Zkouška rozlomením
8a,b	2	30MnB5	30MnB5	Ne	Zkouška rozlomením
9	1	27MnCrB5-2	30MnB5	Ano	Hodnocení makrostruktury, hodnocení mikrostruktury, měření mikrotvrdosti
10	1	30MnB5	30MnB5	Ano	Hodnocení makrostruktury, hodnocení mikrostruktury, měření mikrotvrdosti
11	1	30MnB5	30MnB5	Ne	Hodnocení makrostruktury, hodnocení mikrostruktury, měření mikrotvrdosti
12	2	30MnB5	30MnB5	Ne	Měření zbytkového austenitu

3.1 Výpočty teplot předehřevu pro svařované materiály

Pro představu o svařitelnosti materiálů je výhodné, aby byla spočítána potřebná teplota předehřevu. K tomuto účelu bylo uveřejněno mnoho vztahů. Pro daný účel byl vybrán výpočet dle normy ČSN EN ISO 1011-2 metoda B. Jako tloušťka materiálu ve výpočtu byla uvažována tloušťka příčnicku v místě přivaření kostičky, tedy $d = 57$ mm. Dále se ovšem k příčnicku přivařuje i céčko. V daném místě má příčnick tloušťku menší, teplota předehřevu by tedy vyšla menší a mohla by být pokryta teplotou vypočítanou pro větší tloušťku [23].

Výpočet uhlíkového ekvivalentu dle normy ČSN EN ISO 1011-2 - metoda B pro součást příčnicku, vyrobeného z oceli 27MnCrB5-2 a svařovanou metodou MAG s přidávným materiálem ve formě plného drátu lze provést dle vztahů uvedených v kapitole 2.2 Svařitelnost ocelí.

- Teplota předehřevu se spočítá ze vztahu (2.2):

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} = \\ = 178,50 + 38,14 + 0,72 + (-4,67) = 212,69 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Uhlíkový ekvivalent dle normy ČSN EN ISO 1011-2 - metoda B spočítaný dle vztahu (2.3):

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} = \\ = 0,28 + \frac{1,23 + 0,02}{10} + \frac{0,47 + 0,15}{20} + \frac{0,08}{40} = 0,44$$

- Vliv chemického složení svarového kovu spočítaný dle vztahu (2.4):

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 = 750 \cdot 0,44 - 150 = 178,50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Vliv tloušťky svařovaných materiálů, spočítaný dle vztahu (2.5):

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 = 160 \cdot \tanh\left(\frac{57}{35}\right) - 110 = 38,14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Vliv obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu, spočítaný dle vztahu (2.6)

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 = 62 \cdot 4^{0,35} - 100 = 0,72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Hodnota tepelného příkonu se spočítá ze vztahu (2.1):

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v \cdot 10^3} = 0,8 \cdot \frac{30,7 \cdot 265}{4,25 \cdot 10^3} = 1,53 \text{ } \text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Vliv tepelného příkonu se spočítá ze vztahu (2.7):

$$\begin{aligned} T_{pQ} &= (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 = \\ &= (53 \cdot 0,44 - 32) \cdot 1,53 - 53 \cdot 0,44 + 32 = -4,67 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Výpočet uhlíkového ekvivalentu dle normy ČSN EN ISO 1011-2 - metoda B pro součást příčnick vyrobeného z oceli 30MnB5 a svařovanou metodou MAG s přídatným materiálem ve formě plného drátu lze provést dle vztahů uvedených v kapitole 2.2 Svařitelnost ocelí.

- Teplota přehřevu se spočítá ze vztahu (2.2):

$$\begin{aligned} T_p &= T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} = 200,63 + 38,14 + 0,72 + (-3,84) \\ &= 235,64 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

- Uhlíkový ekvivalent dle normy ČSN EN ISO 1011-2 - metoda B, spočítaný dle vztahu (2.3):

$$\begin{aligned} CET &= C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \\ &= 0,32 + \frac{1,26 + 0,03}{10} + \frac{0,14 + 0,19}{20} + \frac{0,08}{40} = 0,47 \end{aligned}$$

- Vliv chemického složení svarového kovu, spočítaný dle vztahu (2.4):

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 = 750 \cdot 0,47 - 150 = 200,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Vliv tloušťky svařovaných materiálů, spočítaný dle vztahu (2.5):

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 = 160 \cdot \tanh\left(\frac{57}{35}\right) - 110 = 38,14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Vliv obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu, spočítaný dle vztahu (2.6)

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 = 62 \cdot 4^{0,35} - 100 = 0,72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Hodnota tepelného příkonu se spočítá ze vztahu (2.1):

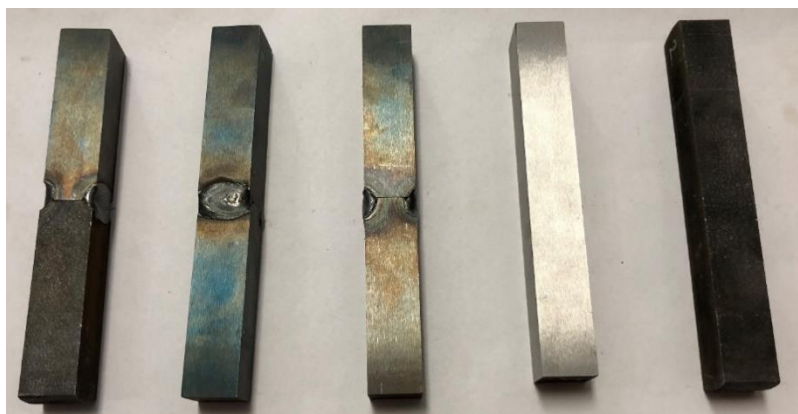
$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v \cdot 10^3} = 0,8 \cdot \frac{30,7 \cdot 265}{4,25 \cdot 10^3} = 1,53 \text{ } \text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Vliv tepelného příkonu se spočítá ze vztahu (2.7):

$$\begin{aligned} T_{pQ} &= (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 = \\ &= (53 \cdot 0,47 - 32) \cdot 1,53 - 53 \cdot 0,47 + 32 = -3,84 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

3.2 Metalografická příprava vzorků

Firmou byly dodány předpřipravené a označené vzorky pro metalografické zkoušky a měření zbytkového austenitu. Vybrané vzorky jsou exemplárně ukázány na obr. 39. Dalším krokem přípravy byl výběr vhodného místa, které by představovalo reprezentativní oblast, obsahující všechny pro vyhodnocení důležitá místa, ale zároveň byla maximální velikost vzorku limitována rozměry pryskyřicové tablety o průměru 30 mm. Pro svařence 9, 10, 11 a 12 byly vybrány oblasti přibližně vyznačené na obr. 40. Vzorky 10 i 11 jsou tvořeny ze 2 stejných materiálů, proto byla z každého svařence vybrána jen jedna strana, která reprezentuje strany obě. Vzorek 9 byl odebrán z původního vzorku 7 po zkoušce rozlomením. Pro hranolky základních materiálů 2 a 4 byly vybrány oblasti přibližně z poloviny jejich délky, viz obr. 41. Pro lepší identifikaci orientace vzorků základních materiálů, byl roh tvořený dvěma hranami z vnitřní části materiálu sražen.



Obr. 39 Příklady předpřipravených vzorků dodaných firmou.

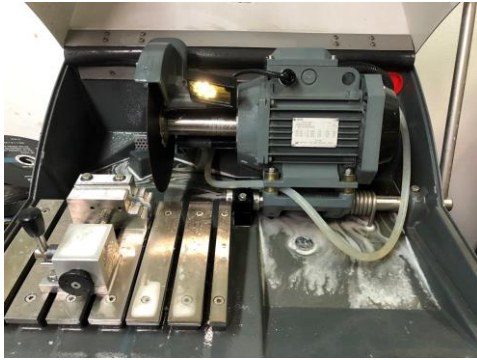


Obr. 40 Místo odběru vzorku ze svařenců.



Obr. 41 Místo odběru vzorků na základních materiálech.

K rozřezání materiálů na vzorky byla použita metalografická pila Labotom – 5 od firmy Struers (obr. 42). Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění, byl celý proces dělení doprovázen intenzivním chlazením místa řezu chladicí kapalinou. Pomocí tlakového lisu ECOPRESS 100 (obr. 44) byly zalisovány do tablet tvořených průhlednou nebo černou pryskyřicí a pomocí rytí důkladně označeny pro jejich snadnou identifikaci. Vzorky byly do tablety napozicovány tak, aby bylo možné pozorovat plochu kolmou ke směru svařování. Následně byly broušeny pomocí metalografické brusky (obr. 43) na brusném kotouči o zrnitosti 220 a papírech o zrnitostech 800 a 1200. Poté leštěny prostřednictvím leštících pláten a leštících past o velikosti diamantových zrn 3 μm a 1 μm . Pro vyvolání mikrostruktury bylo pro naleptání o přibližném trvání 3 s využito Nitalu o koncentraci 3 %.



Obr. 42 Metalografická pila.



Obr. 43 Metalografická bruska.

Obr. 44 Lis
ECOPRESS 100.

3.3 Hodnocení makrostruktury

Pozorování a vizuální vyhodnocení makrostruktury se provádí do 50x zvětšení, což v praxi znamená pozorování předpřipraveného vzorku pomocí oka, lupy, nebo optického mikroskopu. Ty bývají často osazeny digitálním fotoaparátem, kterým se pořídí fotozáznamy pro následné vyhodnocení [20]. Na makrosnímčích se posuzují převážně [20]:

- tvar svaru,
- způsob kladení jednotlivých vrstev,
- provaření kořene svaru,
- výskyt defektů jako jsou póry, vměstky, studené spoje nebo trhliny, šířka tepelně ovlivněné oblasti.

Pro potřeby vytvoření vzorků pro metalografické zkoušky bylo se zástupci firmy domluveno vytvoření zkušebních svařenců a základních materiálů. V tabulkách 9 a 10 se jedná o vzorky s označením *2a*, *4a*, *9*, *10* a *11*. U svařenců se jednalo především o kombinaci základních materiálů o přibližných rozměrech 20 mm x 20 mm x 50 mm z ocelí 30MnB5 a 27MnCrB5-2, které byly svařovány na tupo s předehřevem a bez předehřevu (svařence *9*, *10* a *11*). Materiály prošly před i po svaření stejným tepelným svařováním jako reálné součásti kolopásu. Měly se tedy lišit pouze v aplikaci předehřevu. Na těchto svařencích bylo v plánu především zkoumání svarových kovů a tepelně ovlivněných oblastí.

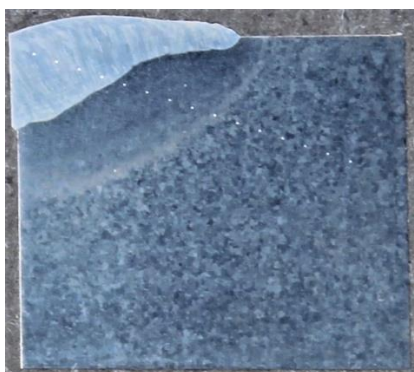
Pro metalografické zkoušky základních materiálů po tepelném zpracování, jako prochází reálné součásti, bylo navrženo vytvoření hranolků s označením *2a* a *4a*. Jejich rozměr je přibližně 20 mm x 20 mm x 100 mm. Cílem zkoušek mělo být posouzení a zhodnocení struktury, v případě svaru navíc vzájemné porovnání jednotlivých struktur okolí svaru, vytvořených za různých podmínek.



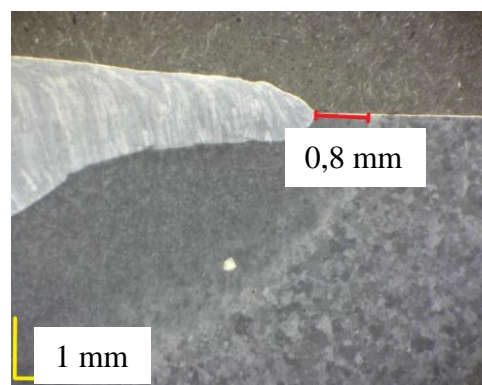
Obr. 45 Detail vzorku 10 svařence oceli 30MnB5.



Obr. 46 Detail vzorku 11 svařence oceli 30MnB5.

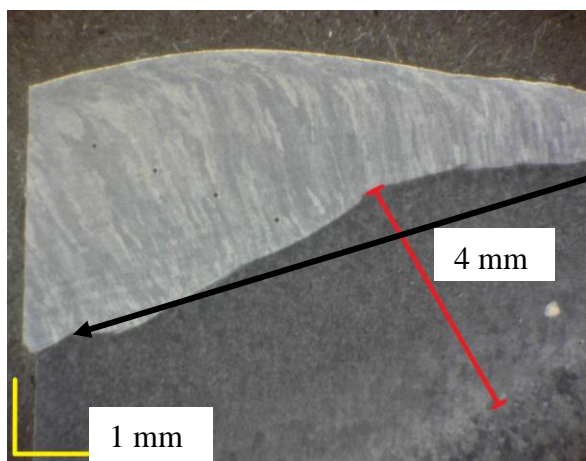


Obr. 47 Detail vzorku 9 svařence oceli 27MnCrB5-2.

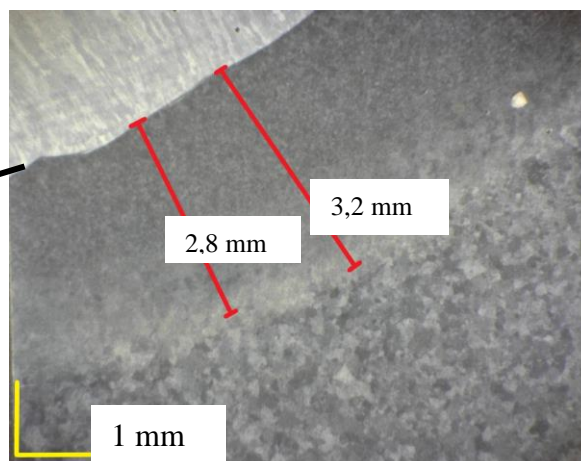


Obr. 48 Makrosnímek 1 vzorku 9.

Na obr. 45, 46 a 47 jsou uvedeny detailní fotografie vzorků, 10, 11 a 9 po vyvolání mikrostruktury leptáním. Vzorky obsahují všechny důležité oblasti jako jsou svarový kov, tepelně ovlivněná oblast i základní materiály. Při lisování vzorku 10 došlo k neúplnému přilnutí kraje k pryskyřici. Tyto mezery nebylo následně možné důkladně vymýt, což mělo za následek vznik mírné koroze na okrajích.



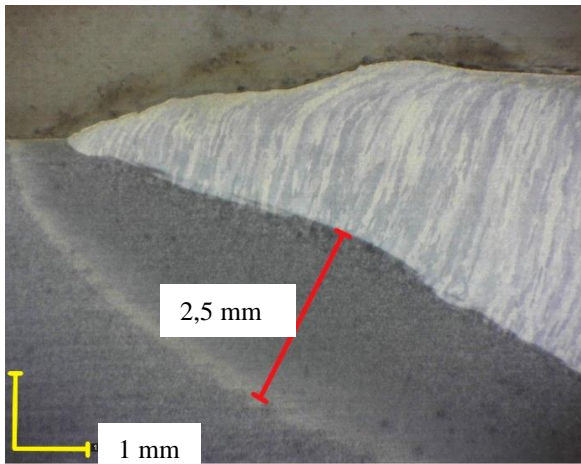
Obr. 49 Makrosnímek 2 vzorku 9.



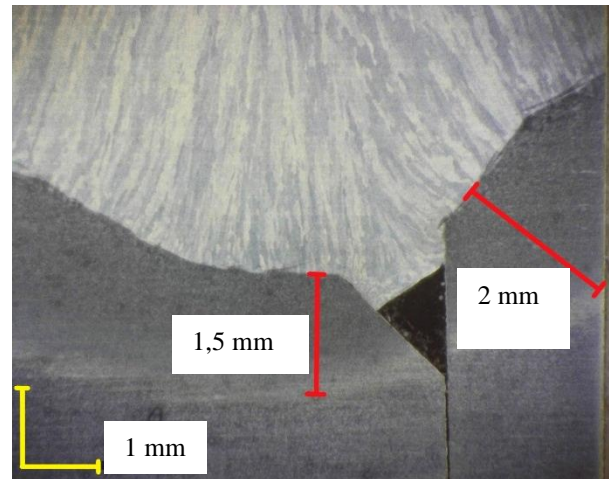
Obr. 50 Makrosnímek 3 vzorku 9.

Na obr. 48, 50 a 51 jsou uvedeny fotografie makrostruktury vzorku 9. Tento vzorek byl vyřezán z rozlomeného vzorku 7, není tedy zde vidět zda se u vzorku vyskytl neprůvar v kořenové části. U tohoto svaru provedeného na jednu housenku nebyly nalezeny žádné trhliny. Tečky ve svarovém kovu jsou vtisky od měření tvrdosti dle Vickerse.

Na vzorku 10, který obsahuje svařené materiály 30MnB5 s předehřevem, nebyly na makrosnímčích (obr. 51 a 52) shledány žádné trhliny. V důsledku velkého úkosu vznikl mezi materiály neprůvar. Svar byl proveden na jednu housenku s mírným převýšením svarového kovu. Tvar závaru je přibližně lineární. Největší šířka tepelně ovlivněné oblasti je přibližně 2,5 mm a nachází se kolmo k pásmu částečného natavení, přibližně v polovině hloubky svarového kovu. U kořene svaru je šířka přibližně 1,5 mm.

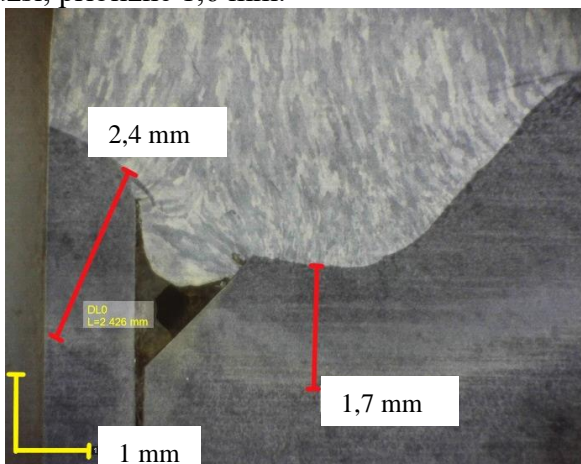


Obr. 51 Makrosnímek vzorku 10 v levé části.

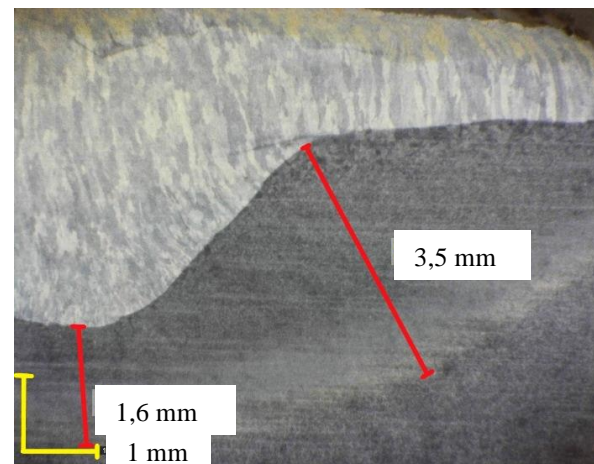


Obr. 52 Makrosnímek vzorku 10 v pravé části.

Na vzorku 11 svařených materiálů 30MnB5 a 30MnB5 bez předehřevu nebyly při pozorování makrosnímčků (53 a 54) shledány trhliny. Stejně jako v předešlém případě došlo k neprůvaru z důvodu rozdílných tvarů úkosů. Oproti vzorku 10 lze pozorovat rozdílný tvar závaru, kdy zde je spíše vydutý. Největší šířka tepelně ovlivněné oblasti je v kolmé vzdálenosti k ose natavení právě v místě největšího vydutí a její rozměr je přibližně 3,5 mm. U kořene svaru je již o něco užší, přibližně 1,6 mm.



Obr. 53 Makrosnímek vzorku 11 v levé části.



Obr. 54 Makrosnímek vzorku 11 v pravé části.

3.4 Hodnocení mikrostruktury

Při zvětšení více jak 50x, je pozorování povrchu předpřipravených metalografických vzorků již považované za mikrostrukturní. Často se k tomuto účelu používají světelné mikroskopy se zvětšením až 2000x. Výhodné je pro pozdější získávání informací pozorovanou strukturu fotografovat například pomocí kvalitního digitálního fotoaparátu, integrovaného již v mikroskopu, popřípadě externě dodaného. Cílem pozorování při tak velkých zvětšeních je získání a posouzení informací o strukturních fázích, jako je martenzit, ferit, cementit, nebo

austenit, dále pak strukturních složek jako je perlit, nebo bainit. Předmětem zájmu jsou u svařenců všechny oblasti svařového spoje a tepelně ovlivněné přilehlé oblasti, ale i neovlivněný základní materiál [20].

Mikrostruktura vzorků základních materiálů i svařenců byla z důvodu získání co největšího množství informací důkladně pozorována při různých zvětšeních na dvou různých světelných mikroskopech, schopných dosáhnout zvětšení 1000x a 2000x. Na určitých místech byla mikrostruktura fotografována. Vybrané fotografie při 800x zvětšení jsou uvedeny na obrázcích. V komentářích k obrázkům jsou informace o struktuře, které je nejen vyobrazena na obrázku, ale i v jeho blízkém okolí. V hlavní části diplomové práce bylo pro vysvětlení vybráno jen několik mikrostrukturních fotografií. V přílohách jsou pro doplnění uvedeny komplexněji i s přímým odkazem do místa v oblasti svařového spoje, kde byla přibližně fotografie pořízena.



Obr. 55 Mikrostruktura svařového kovu vzorku 9.



Obr. 56 Mikrostruktura ve vysoce přehřáté oblasti vzorku 9



Obr. 57 Mikrostruktura z pásma normalizace vzorku 9.



Obr. 58 Mikrostruktura z částečné překrystalizace vzorku 9.

Vzorek 9 je zástupce materiálu 27MnCrB5-2 svařovaného bez přehřevu. Na obr. 55 je vidět mikrostruktura svařového kovu. Při pozorování byla v horní oblasti svařové housenky vyhodnocena martenziticko bainitická struktura, směrem blíže k hranici natavení přecházela ve feriticko-bainitickou směs s feritem v acikulárním tvaru. Na obr. 56 je vidět martenzitická struktura vysoce přehřáté oblasti, vyskytující se v tepelně ovlivněné oblasti v blízkosti hranice natavení. Tmavé jehlice představují martenzit, stejně jako světlé jehlice, které jsou jen rozříznuté v jiném směru. Fotografie obr. 57 pochází přibližně z pásma normalizace. Zde byla pozorována čistě martenzitická struktura. Obr. 58 pochází z oblasti částečné překrystalizace až vyžíhané oblasti. Zde se vyskytují martenzitické nebo bainitické jehlice, acikulární ferit, ale i ostrůvky troostitu. Na všech fotografiích i na dalších vzorcích se vyskytují černé tečky, ty by

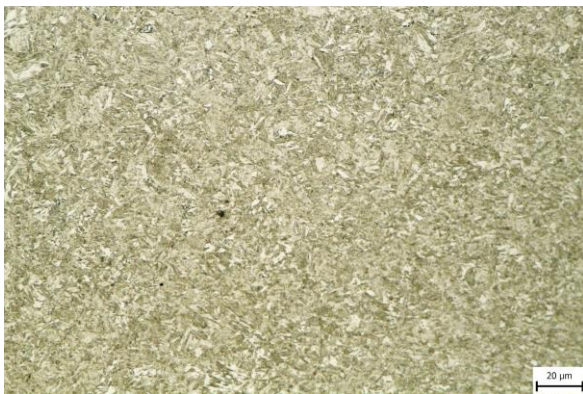
neměly souviset s mikrostrukou, jedná se nejspíše o smetí, které se nedopatřením dostalo na pozorovaný povrch, popřípadě chyba při naleptání [31].



Obr. 59 Mikrostruktura svarového kovu vzorku 10.



Obr. 60 Mikrostruktura ve vysoce přehřáté oblasti vzorku 10.



Obr. 61 Mikrostruktura z pásma normalizace vzorku 10.

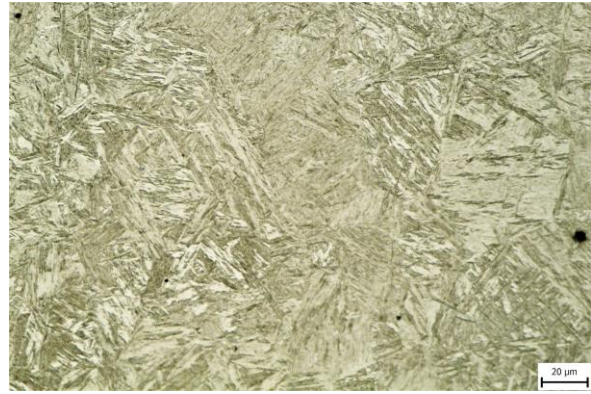


Obr. 62 Mikrostruktura z částečné překrystalizace vzorku 10.

Na obr. 59 je vyobrazena mikrostruktura svarového kovu vzorku 10. Rozložení fází bylo velice podobné mikrostruktuře svarového kovu vzorku 9. V horní části, u povrchu svarové housenky, byla pozorována martenziticko-bainitická struktura a směrem k hranici natavení dále přecházela ve feriticko-bainitickou směs s feritem ve tvaru acikulárního feritu. Toto rozložení feritu je poměrně nevýhodné, především z hlediska snížené houževnatosti. Obr. 60 byl vyfotografován v přehřáté oblasti, zde byla pozorována téměř výhradně martenzitická struktura. Zrno zde bylo typicky hrubější než v základním materiálu. Obr. 61 pochází z oblasti normalizace. Zde byla pozorována opět čistě martenzitická struktura. Fotografie na obr. 62 reprezentuje oblast částečné překrystalizace. V této oblasti se vyskytovala směs martenzitu nebo bainitu, bílé ostrůvky feritu a tmavé ostrůvky troostitu. Ferit se zde vyskytoval jak v ostrůvcích, což je ferit co se nepřetransformoval na austenit, tak i ve formě jehlic [31].



Obr. 63 Mikrostruktura svarového kovu vzorku 11.



Obr. 64 Mikrostruktura ve vysoce přehřáté oblasti vzorku 11.



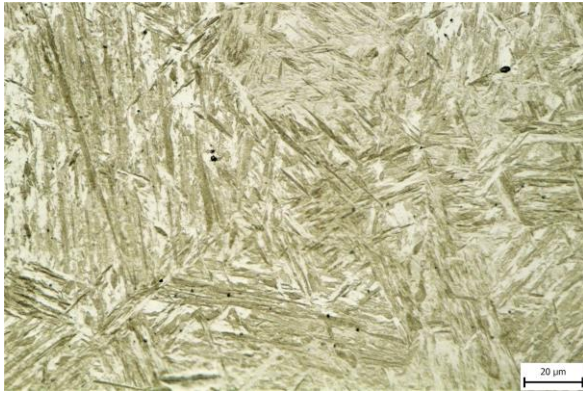
Obr. 65 Mikrostruktura z pásma normalizace vzorku 11.



Obr. 66 Mikrostruktura z částečné překrystalizace vzorku 11.

Na obr. 63 je fotografie z oblasti svarového kovu vzorku 11, tedy svařence z oceli 30MnB5, svařovaného bez předehřevu. Při pozorování se zde vyskytovaly stejné charakteristické rysy jako v předešlém případě vzorku 10, ze stejného materiálu, ale svařovaného s předehřevem. Tedy martenziticko-bainitická struktura u povrchu svarové housenky i martenziticko-feritická v oblasti blíže k ose natavení. Toto rozložení změny struktury, mimo jiné, nejspíše souvisí jak s rozdílem rychlostí ochlazování, tak i s chemickým složením. Na povrchu housenky se lázeň ochlazuje velice rychle a u hranice natavení o něco pomaleji. Stejně tak povrch housenky tvoří materiál o jiném chemickém složení, které je blízké chemickému složení přídavného materiálu. Směrem k hranici natavení dochází k většímu promísení se základním materiálem a chemické složení se tedy mění. Na obr. 64 je vyfotografována přehřátá oblast. I zde bylo pozorováno zhrublé zrno s martenzitickou strukturou. V pásmu normalizace (obr. 65) je taktéž vidět základní martenzitická struktura. V oblasti částečné překrystalizace (obr. 66) je struktura tvořená martenziticko-feritickou nebo bainiticko-feritickou strukturou. Ferit je ve tvaru acikulárního. Taktéž zde byl pozorován troosit [31].

Jak tedy bylo uvedeno, ve všech oblastech svaru byla pozorována základní struktura, tvořená martenzitem nebo bainitem. Ve svarovém kovu v kombinaci s acikulárním feritem, stejně tak na okrajích tepelně ovlivěné oblasti, kde se navíc vyskytoval místy i troosit. Ve struktuře se s jistotou vyskytovalo i jisté minimální množství zbytkového austenitu, jehož přítomnost se pojí se vznikem martenzitu. Jeho množství by ovšem mělo být zanedbatelné [31].



Obr. 67 Mikrostruktura základního materiálu vzorku 2 (oceli 27MnCrB5-2).



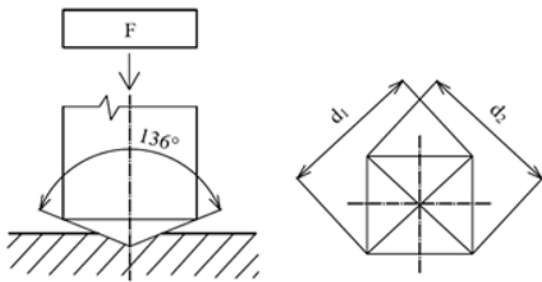
Obr. 68 Mikrostruktura základního materiálu vzorku 4 (oceli 30MnB5).

Na obr. 67 je uvedena mikrostruktura vzorku 2, tedy základního materiálu oceli 27MnCrB5-2, při 800x zvětšení. Při bližším zkoumání mikrostruktury pod různými zvětšeními byla pozorována martenzitická struktura s viditelným obsahem zbytkového austenitu. Dále byly pozorovány poměrně velká zrna (i v základním materiálu svařenců), ty byly vidět i pouhým okem již po naleptání. Jejich velikost nemá významný vliv na naměřenou tvrdost, ale především na houževnatost tohoto materiálu, která by měla být významně snížena. Taktéž zde byla pozorována pruhovitost z výroby polotovaru válcováním. Po konzultaci s firemními zástupci bylo shledáno, že vzorek tohoto materiálu neprošel stejným procesem zpracování jako reálný příčník, konkrétně byla vynechána fáze kování. Hutní polotovar ve formě tyče kruhového průřezu prošel požadovaným tepelným zpracováním (kalení a popuštění), a následně z něj byl pomocí elektroerozivního obrábění vytvořen příslušný hranolek pro tento vzorek, který byl odebrán z jádra této tyče. Vzhledem k historii tohoto materiálu, který neprošel normalizačním žíháním, ani kováním, které může žíhání částečně suplovat je větší velikost zrn charakteristická, stejně jako známky pruhovitosti [31].

Na obr. 68 je fotografie mikrostruktury vzorku oceli 30MnB5, při 800x zvětšení. Zde byla pozorována martenzitická struktura ve formě jehlic, které jsou podle směru řezu jak tmavé tak i světlé. V této struktuře by se měl vyskytovat i jistý malý podíl zbytkového austenitu. Vzorek 4 pochází z reálného příčníku, který prošel příslušným procesem výroby, tedy tepelným zpracováním, ale i kováním. Následně byl z tohoto příčníku plochého tvaru, pomocí příčného řezu, zhotoven vzorek tohoto materiálu. Právě vlivem kování se ve vzorku vyskytuje poměrně malé zrno, které je oproti vzorku oceli 27MnCrB5-2 podstatně menší. Stejně jako v opačném případě, tato malá velikost zrna nebude mít významný vliv na tvrdost, ale především na houževnatost tohoto materiálu, která bude výrazně větší [31].

3.5 Měření tvrdosti

Princip této statické metody spočívá v kolmém vtláčování diamantového indentoru, tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° , do povrchu vzorku měřeného materiálu (obr. 69). Po odlehčení zkušebního zatížení se měří úhlopříčka vzniklého vtisku a následným dopočtem se vyhodnotí naměřená tvrdost. Zkouška se nejčastěji provádí za pokojové teploty, a dle charakteru se hodí spíše pro hodnocení materiálů o vyšších pevnostech. Rovný povrch vzorku musí být očištěn od okují nebo jiných nečistot, jako jsou maziva, a musí být předpřipraven leštěním. Při vícenásobném měření na jednom povrchu vzorku je důležité použít minimální předepsané vzdálenosti mezi vtisky, aby nedošlo k jejich vzájemnému ovlivnění [32 ; 33].



Obr. 69 Schéma metody měření tvrdosti dle Vickerse [33].

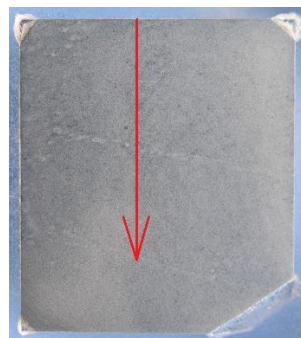


Obr. 70 Mikrotvrdoměr Qness Q10A

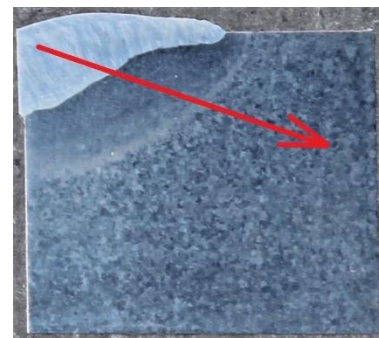
Měření hodnot tvrdosti bylo navrženo jak pro vzorky svarů (vzorky 9, 10 a 11), tak i pro základní materiály (vzorky 2 a 4). Na vzorcích obsahujících svar prostřednictvím jedné linie vtisků přes všechny oblasti svaru, tedy svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast i základní materiál. Jako způsob měření byla vybrána metoda dle Vickerse při zatížení 1 kg, tedy HV1. Měření probíhalo na mikrotvrdoměru Qness Q10A s maximální hodnotou zatížení dosahující 10 kg (obr. 70). Ve všech případech byla provedena linie 15 vtisků na vzdálenosti 12 mm. U vzorků 9, 10 a 11 je cílem posouzení tvrdosti v jednotlivých oblastech v mikrostrukturu a určení, zda je tvrdost v jednotlivých místech přípustná (obr. 73). V případě vzorků základního materiálu byla navržena linie vtisků od povrchu směrem ke středu (obr. 71 a 72). Cílem bylo zjistit a ověřit reálnou tvrdost materiálu po tepelném zpracování. Vzhledem k požadavkům na povrch bylo možné provést měření na vzorcích předpřipravených pro metalografické pozorování.



Obr. 71 Schematické znázornění linie vtisků na vzorku 2.

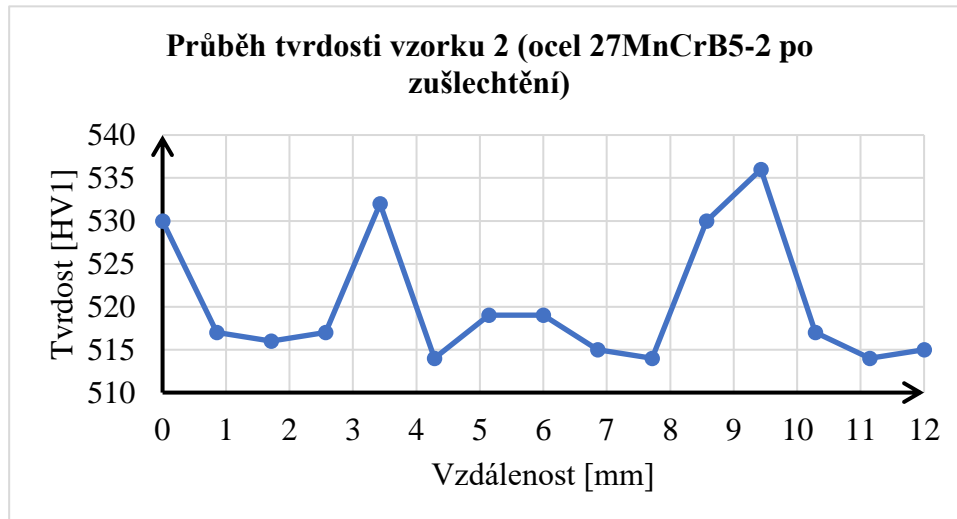


Obr. 72 Schematické znázornění linie vtisků na vzorku 4.



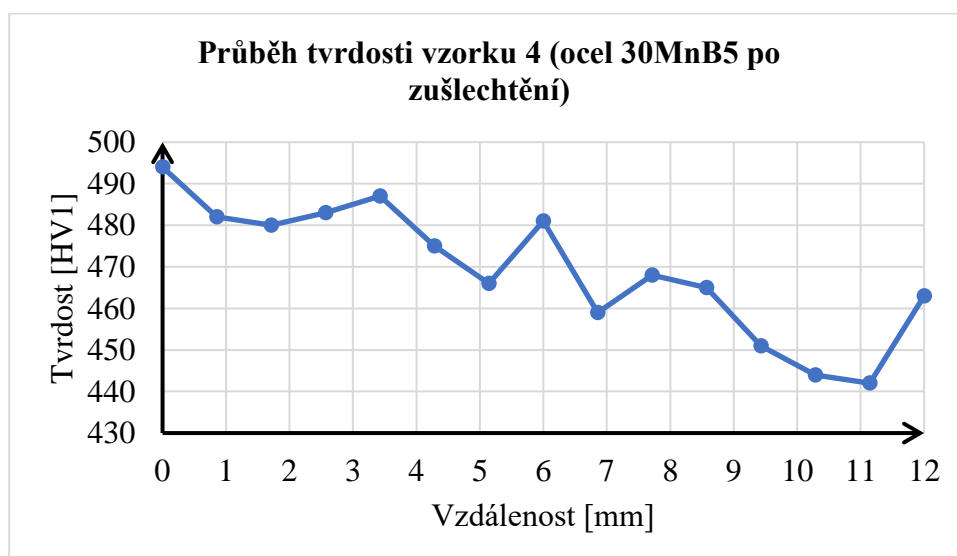
Obr. 73 Schematické znázornění linie vtisků na svařencích.

V grafu na obr. 74 je uveden průběh naměřené tvrdosti na vzorku 2, tedy ocele 27MnCrB5-2. Jak může být viděno, hodnoty se pohybují převážně v rozmezí mezi hodnotami 515 a 520 HV1, několik hodnot ovšem převyšuje 530 HV1. Průměrná hodnota tvrdosti vyšla 520 HV1. Tato průměrná hodnota se blíží teoretické hodnotě tvrdosti této oceli při martenzitickém kalení, uvedeného v ARA diagramu této oceli, zahrnutého v teoretické části práce. Jak již bylo uvedeno při popisu mikrostruktury, vzorek pochází z vnitřní části hutního polotovaru ve tvaru kulatiny. Velikost zrna by se ovšem při měření tvrdosti měla projevit minimálně. Dle interních firemních požadavků by naměřené hodnoty tvrdosti měly splňovat minimální požadované hodnoty.



Obr. 74 Průběh tvrdosti HV1 vzorku 2 základního materiálu oceli 27MnCrB5-2.

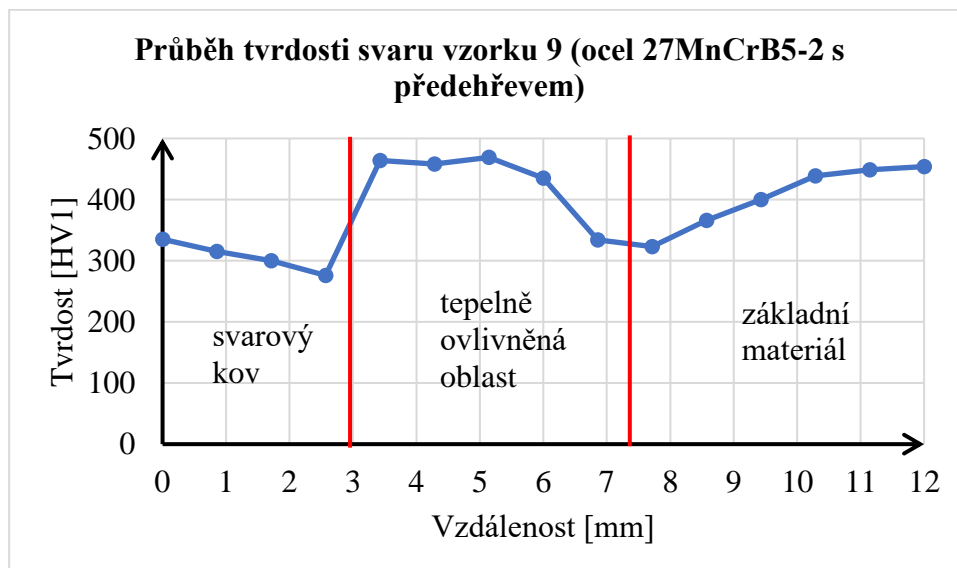
Na obr. 75 je uveden průběh naměřených hodnot tvrdosti na vzorku 4, oceli 30MnB5. Jak bylo uvedeno v kapitole pojednávající o mikrostruktuře, vzorek pocházel z části vykovaného příčnicku. Měření tedy v tomto případě opravdu probíhalo od vnějšího okraje součásti, která je vystavena otěru, směrem do jádra materiálu. Naměřené hodnoty tvrdosti se postupně od kraje snižují, a to od povrchové hodnoty přibližně 495 HV1, až po nejnižší, která je předposlední naměřená a nese hodnotu 442 HV1. V hloubce přibližně 5 mm od povrchu vyšla hodnota tvrdosti 466 HV1, což je hodnota ležící v intervalu pro tvrdost HV, po přepočtu, dle interní literatury z pásu prokalitelnosti. Pro tento materiál a způsob tepelného zpracování nebyly zatím firmou stanoveny minimální požadavky. Proto nelze vyhodnotit, zda je tvrdost dostačující. Při porovnání s firemními požadavky na tvrdost materiálu 27MnCrB5-2, by ovšem i tato ocel měla vyhovět. Na povrchu byla naměřena tvrdost 494 HV1. Postupně se tvrdost snižovala a hodnota tvrdosti těsně nad jmenovitou hodnotou 450 HV1 dosáhla ve vzdálenosti přibližně 9 mm pod povrchem. Minimální tvrdost, která byla naměřena, je přibližně 440 HV1, a to přibližně 11 mm pod povrchem. I v tomto místě jsou ovšem splněny požadavky, které byly původně předepsány pro ocel 27MnCrB5-2.



Obr. 75 Průběh tvrdosti HV1 vzorku 4 základního materiálu oceli 30MnB5.

Při celkovém hodnocení tvrdosti základních materiálů splňují oba materiály po tepelném zpracování požadavky, které jsou firmou předepsány pro ocel 27MnCrB5-2. U oceli 27MnCrB5-2 se ovšem v porovnání s ocelí 30MnB5 dosahuje podstatně vyšších tvrdostí. Průměrná naměřená hodnota u první zmiňované je dokonce o 25 HV1 vyšší, než nejvyšší tvrdost u druhé zmiňované. V případě tvrdosti v jádru obou ocelí je rozdíl ještě markantnější a dosahuje velikosti přibližně 80 HV1. Pro další ověření vlastností by bylo výhodné změřit tvrdosti u reálného příčnicku.

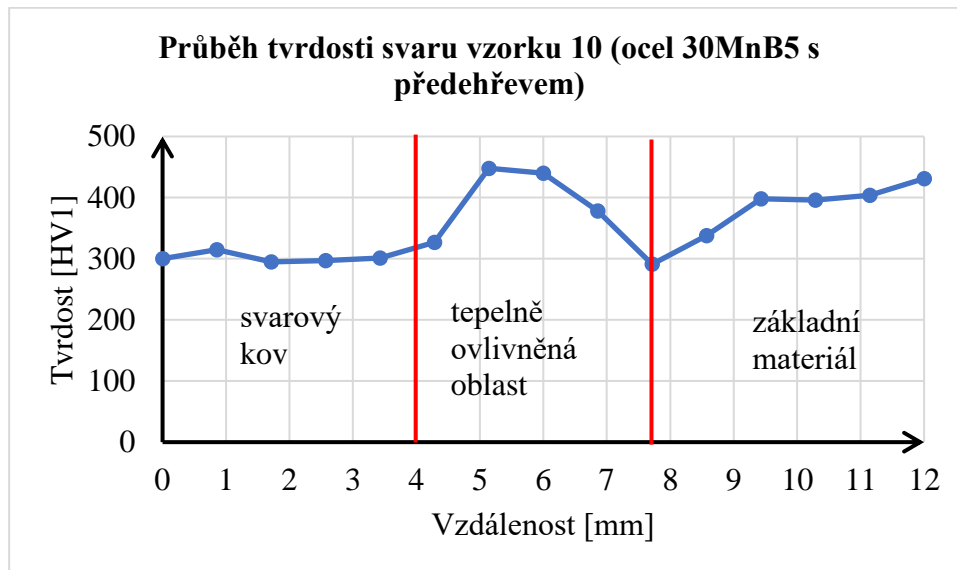
Na obr. 76 je graf průběhu tvrdosti ve svaru vzorku, tedy svařence oceli 27MnCrB5-2 vytvořeného s předehřevem. Graf je pro lepší orientaci rozdělen na 3 části, a to na svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast a základní materiál. Ve svarovém kovu je průměrná naměřená hodnota tvrdosti přibližně 300 HV1 a od osy svaru mírně klesá. V tepelně ovlivněné oblasti za hranicí natavení, tedy v pásmu přehřátí, tvrdost rapidně roste až na hodnotu 463 HV1. V nejvyšším bodě následně dosahuje až 469 HV1. Při porovnání s tvrdostí naměřenou na základním materiálu, kde se v jádru tvrdost pohybovala na průměrných 520 HV1, které byly vlastně vstupní tvrdostí na základních svařovaných materiálech, není tak vysoká. Po svaření se tedy maximální tvrdost snížila přibližně o 50 HV1. Směrem dál od osy svaru k základnímu materiálu tvrdost klesá až na 323 HV1. Po přechodu z tepelně ovlivněné oblasti do základního materiálu tvrdost opět postupně roste. Podle měření tvrdosti základního materiálu teoreticky až na již zmiňovaných přibližně 520 HV1.



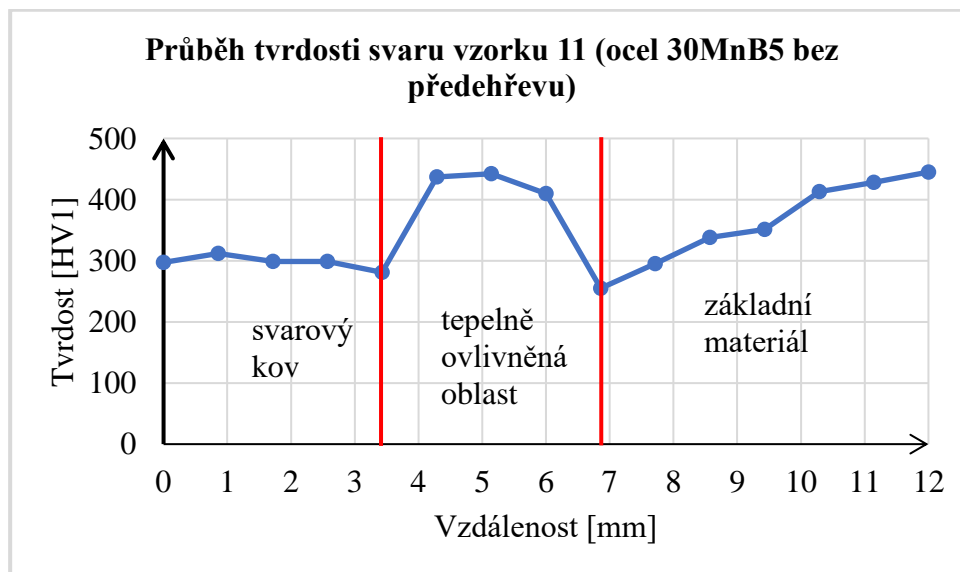
Obr. 76 Průběh tvrdosti HV1 ve svaru vzorku 9 oceli 27MnCrB5-2 s předehřevem.

Na obr. 77 a 78 jsou uvedeny průběhy tvrdosti svaru ocelí 30MnB5, svařovaných s předehřevem a bez předehřevu. Na obou grafech jsou tvrdosti v jednotlivých oblastech velice podobné. Svarový kov se v obou případech pohybuje v okolí hodnoty 300 HV1, to bylo naměřeno i v předchozím případě na vzorku 9. Po přechodu do tepelně ovlivněné zóny následně tvrdost rapidně roste až na maximální hodnoty. U vzorku 10 dosahuje 448 HV1 a u vzorku 11 pak 442 HV1. Při porovnání těchto maximálních hodnot tvrdostí, s hodnotami naměřených na základním materiálu, lze vidět, že tyto hodnoty dosahují přibližné hodnoty jako nejnižší hodnoty, naměřené v jádru vzorku základního materiálu oceli 30MnB5. Tedy opět jako v předešlém případě vzorku 9, maximální tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti je nižší, než byla původní vstupní tvrdost základních svařovaných materiálů. Následně tvrdost klesá až na hranici tepelně ovlivněné oblasti, kde dosahuje tvrdost celkově nejnižších hodnot – u vzorku 10 oceli 30MnB5, svařovaného s předehřevem 291 HV1 a u vzorku 11 oceli 30MnB5, svařovaného bez předehřevu 255 HV1. Po překročení tepelně ovlivněné zóny hodnoty tvrdosti dále rostou.

Problematický by mohl být z hlediska součásti „vrub“, který je vidět na přechodu mezi tepelně ovlivněnou oblastí a základním materiálem. Tato oblast by mohla být nebezpečná především z důvodu možného přednostního poškození v tomto místě [31].



Obr. 77 Průběh tvrdosti HV1 svaru oceli 30MnB5 s předehřevem.



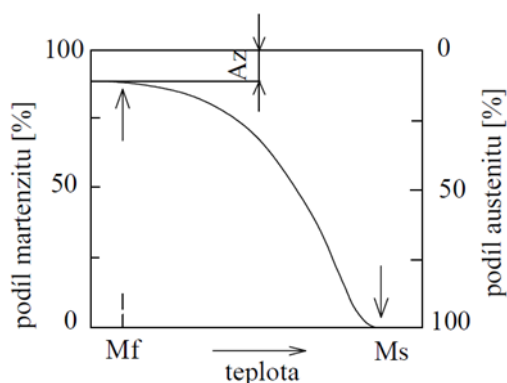
Obr. 78 Průběh tvrdosti HV1 na svaru oceli 30MnB5 bez předehřevu.

V teoretické části bylo uvedeno, že obě oceli lze zařadit, dle TNI CEN ISO/TR 15608 (050323) Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin, do skupiny 4. Dle normy ČSN EN ISO 15614-1 je pro oceli této třídy maximální přípustná tvrdost 350 HV10. Všechny tři vzorky svaru tuto maximální hodnotu v tepelně ovlivněné oblasti překračují [34].

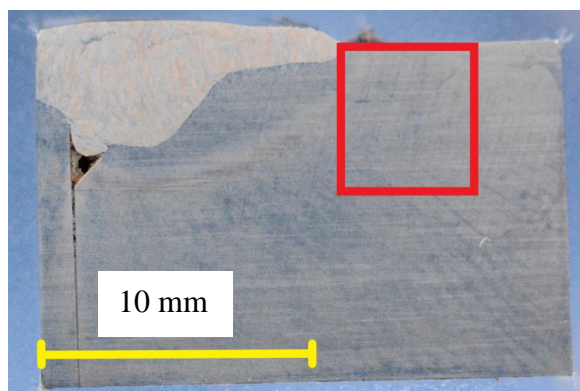
3.6 Měření zbytkového austenitu

Zbytkový austenit je část nepřetransformovaného austenitu vznikající při procesech martenzitického kalení. Jeho podílové množství ve struktuře společně s martenzitem lze odhadnout pomocí martenzitické křivky, která je uvedena na obr. 79. V zakalené martenzitické struktuře může být považován za nežádoucí především z důvodu jeho nižší tvrdosti. Dále pak může volně transformovat, a tím mírně pozměnit vlastnosti materiálu, popřípadě způsobit

nežádoucí prnutí v jeho struktuře. Jeho působení může být ale i pozitivní, kdy do přibližně 5% může zvyšovat houževnatost materiálu [31; 35].

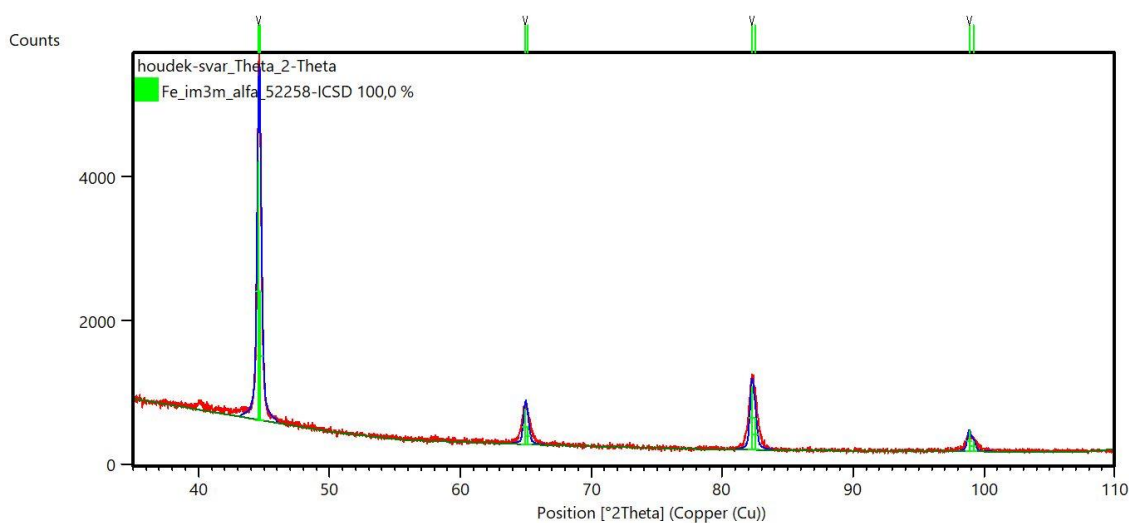


Obr. 79 Diagram martenzitické křivky [35].



Obr. 80 Místo měření zbytkového austenitu na vzorku 12.

V dodaném vzorku v oblasti svaru (obr. 80) byla pomocí XRD detekována přítomnost pouze jedné fáze a to alfa – Fe. Případný podíl zbytkového austenitu je pod detekčním limitem metody, který činí 2 hm. %. Lze tedy konstatovat, že v měřeném místě se téměř žádný zbytkový austenit nevyskytoval. Na obr. 81 je uveden výsledný diagram analýzy [36].



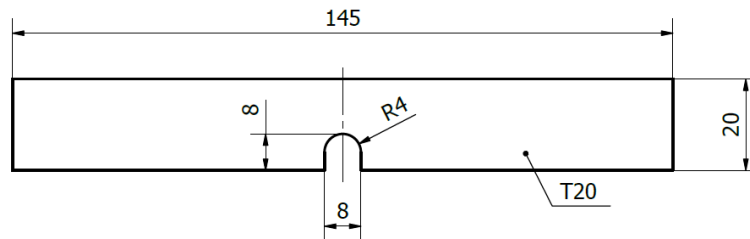
Obr. 81 Graf rentgenové difrakce vzorku 12 [36].

3.7 Zkouška rozlomením

Další zkouškou, sloužící ke zjištění stavu svařenců a základních materiálů s následným porovnáním, byla zkouška rozlomením. Po konzultaci se zástupci firmy byla navržena jako rozlomení jednotlivých vzorků, prostřednictvím 3 bodového ohybu na lisu, za pokojové teploty. Cílem zkoušky bylo zjistit, při jaké velikosti zatížení a po jak dlouhé dráze trnu dojde k rozlomení, a jaký charakter bude mít lomová plocha.

Pro tento účel bylo ve firmě navrženo vytvoření vhodných vzorků. V tabulkách 9 a 10 se jedná o vzorky s označením 2, 4, 5, 6, 7, 8, pro lepší identifikaci byly dále rozděleny na *a* a *b*. U svařenců se jednalo o kombinaci základních materiálů o přibližných rozměrech 20 mm x 20 mm x 50 mm z oceli 30MnB5 a 30MnB5 nebo 30MnB5 a 27MnCrB5-2, které byly svařovány s předehřevem a bez předehřevu. Materiály prošly před i po svaření stejným

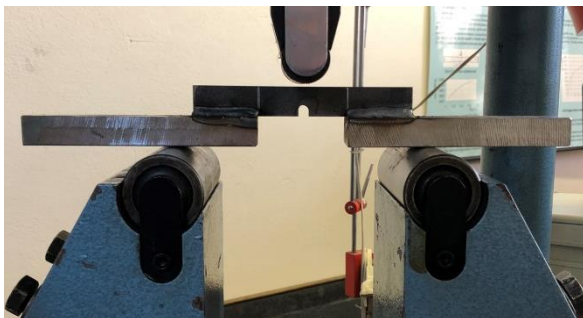
tepelným zpracováním, jako reálné součásti kolopásu. V případě základních materiálů zastoupené vzorky 2 a 4, o přibližných rozměrech přibližně 20 x 20 x 145 mm, prošly stejným tepelným zpracováním, jako prochází materiály svařenců neovlivněné svařováním. Následně měly být rozlomeny stejným způsobem jako svařence.



Obr. 82 Schematické znázornění vzorku základního materiálu s vrubem.

Vzorky bylo ovšem nutné před samotnou zkouškou, vzhledem k možnostem lámacího zařízení, dále dopravit. Pro zaručení rozlomení vzorků základních materiálů v požadovaném místě, kterou je osa vzorku, bylo nutné zhotovit vrub. Nejvýhodnějším pro tuto zkoušku se jevil U-vrub s šířkou a výškou 8 mm, situovaný do osy vzorku, tedy do místa požadovaného rozlomení. Schematické znázornění vzorku s vrubem je na obr. 82. Jako výrobní technologie bylo vzhledem k přesnosti a možnostem, zvoleno elektroerozivní drátové obrábění. Dále byly přivařeny prodlužující hranolky, pro co největší možný rozvor podpěr. Úprava byla navržena s ohledem na co nejmenší tepelné ovlivnění materiálu, především v místě vrubu, hranolky byly tedy přivařeny pomocí koutového spoje, ve vzdálenosti přibližně 30 mm od osy vrubu.

První úprava svařenců spočívala, stejně jako v případě základních materiálů, v dodatečném navaření prodlužujících hranolků, z důvodu zvětšení minimálního rozvoru podpěr, kdy by při menším rozvoru hrozilo zmáčknutí vzorků mezi ohýbací trn a podpěru. Stejně jako v předchozím případě bylo nežádoucí tepelné ovlivnění svarů, proto byla i tentokrát zvolena jako minimální bezpečná vzdálenost 30 mm od osy svaru. Dále bylo nutné jemné zabroušení převýšení svaru do roviny pomocí lamelového kotouče, z důvodu možného sklouznutí ohýbacího trnu z tohoto převýšení.



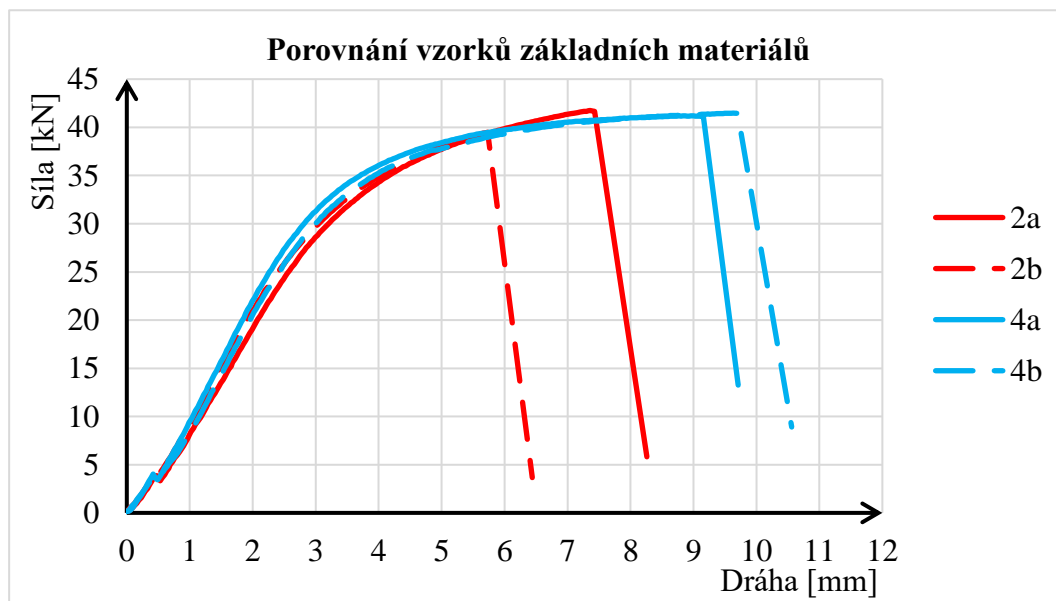
Obr. 83 Vzorek základního materiálu, založený do lisu na podpěry.



Obr. 84 Vzorek základního materiálu těsně před rozlomením.

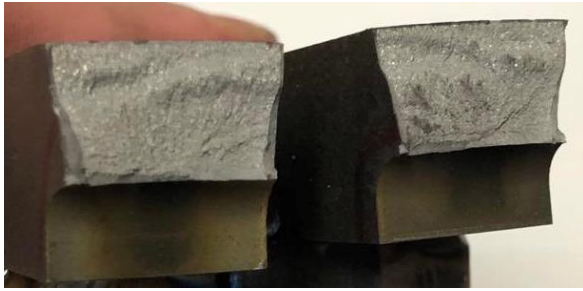
Vzorky základních materiálů byly postupně po jednom založeny do zkušebního zařízení tak, aby se vrub nacházel v ose přímo pod zatěžujícím trnem (obr.83). Rozvor podpěr byl přibližně 175 mm. Po zahájení zkoušky začal trn sjíždět směrem dolů přednastavenou rychlostí $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Vzorky se následně začaly prohýbat až do mezní hodnoty, kdy došlo k jejich rozlomení. Na obr. 84 je vyobrazeno přibližné maximální prohnutí vzorku ve chvíli jen pár okamžiků před rozlomením. Jednotlivé hodnoty zatížení a dráhy sjezdu beranu byly průběžně zaznamenávány pomocí měřícího zařízení do tabulky, pro jejich možné vyhodnocení.

V grafu na obr. 85 je přehledně vynesena závislost síly na dráze pro jednotlivé zkoušené vzorky základních materiálů. Jak lze vidět, začátek má pro všechny přibližně stejný průběh. V případě materiálů 27MnCrB5-2, zastoupených vzorky 2a a 2b, došlo k rozlomení při zatížení 39,5 kN a 41,6 kN a dráze 7,43 mm a 6,44 mm. V obou případech vzorků 2 při lomu došlo k tak dynamickému rozlomení, že se obě poloviny doslova rozletěly přibližně 1 m od zařízení. U materiálu 30MnB5, zastoupených vzorky 4a a 4b, došlo k rozlomení při přibližně stejné velikosti zatížení 41,1 kN a 41,5 kN, ale na delší dráze průhybu 9,2 mm a 9,7 mm. V tomto případě již nedošlo k tak dynamickému rozlomení, vzorky po rozlomení ležely na podpěrách. Maximální hodnota zatížení je u obou materiálů podobná a to přibližně 40 kN. Naopak největší rozdíl je pozorován na maximálním průhybu, kde u materiálu 30MnB5 došlo ke sjezdu beranu o přibližně 2 mm hlouběji než u oceli 27MnCrB5-2.

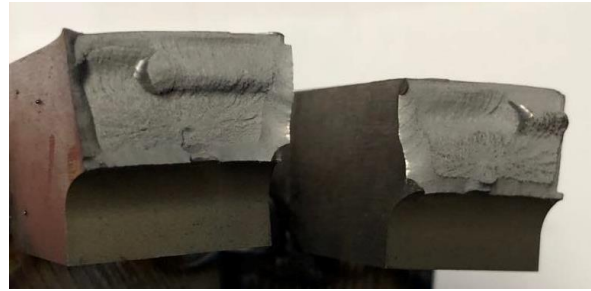


Obr. 85 Graf porovnání vzorků základních materiálů.

Na obr. 86 a 87 jsou uvedeny detailní fotografie lomových ploch. Jak jde vidět, jedná se o křehké lomy. Největší rozdíl lze pozorovat především v rovinnosti, kdy na vzorcích oceli 27MnCrB5-2 je plocha převážně rovinná, u oceli 30MnB5 se vyskytuje významné vytržení materiálu v místě rozlomení. Dle grafů tedy došlo u obou materiálů, při daných a stejných podmínkách, k rozlomení přibližně při stejném zatížení, přesahující hodnotu 40 kN. U materiálu 30MnB5 došlo ovšem, v porovnání s materiálem 27MnCrB5-2, k rozlomení na delší dráze sjezdu beranu, a to přibližně v rozsahu 15 až 40 %. Takový významný rozdíl v houževnatosti může být způsoben rozdílným chemickým složením, a tím pádem jiným strukturním složením po stejném tepelném zpracování. V tomto případě ovšem hraje významnou roli velikost zrn, která byla pozorována při zkoumání mikrostruktury. U oceli 27MnCrB5-2 byla zrna podstatně větší než ocel 30MnB5, což jak se v tomto případě potvrdilo mělo za následek mnohem menší houževnatost materiálu při zatěžování [31].



Obr. 86 Štěpné plochy vzorku 2.

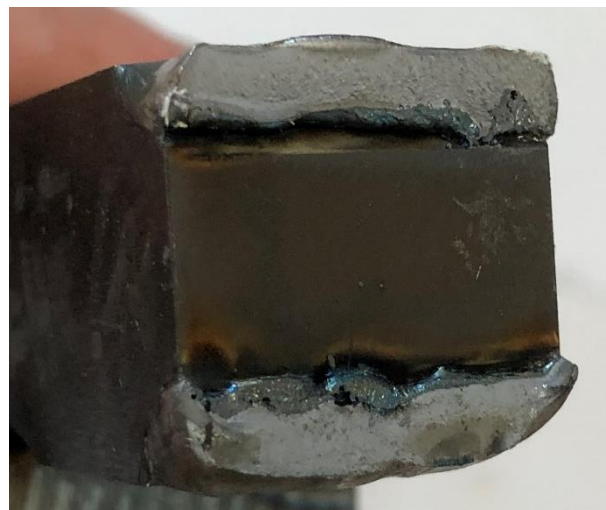


Obr. 87 Štěpné plochy vzorku 4.

Vzorky svařenců byly založeny do zkušebního zařízení. Rozvor podpěr byl přibližně 175 mm. Zatěžovací trn byl nastaven do poloviny vzorku, do místa tupého spojení obou materiálů. Následně se nechal sjíždět dolů rychlostí $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Průběhy sil a drah zaznamenané snímači jsou vyneseny do grafů. Z hlediska pozorovatele probíhala všechna rozlomení velice podobně. Během sjíždění beranu dolů docházelo k mírnému ohybu vzorků až do okamžiku rozlomení spodní svarové housenky. Následně se materiály dále rozevíraly až do dolomení horní svarové housenky a sklouznutí vzorků z podpěr. Tento okamžik zachycuje fotografie na obr. 88. Fotografie plochy svarového kovu je na obr. 89.



Obr. 88 Svařenec jen pár okamžiků po úplném rozlomení.



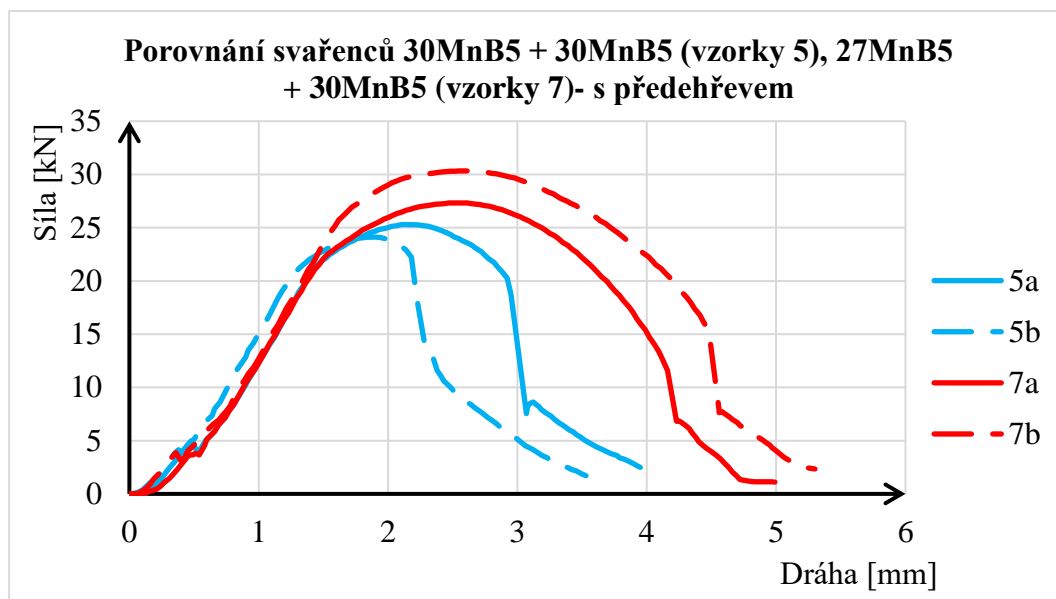
Obr. 89 Štěpné plochy svařence.

V grafu na obr. 90 jsou vyznačeny průběhy zkoušky rozlomení kombinace materiálů 30MnB5 + 30MnB5 (označení 5) a 27MnCrB5 + 30MnB5 (označení 7), svařovaných s předehřevem. Jak lze vidět u vzorků s označením 5, došlo v obou případech k rozlomení přibližně při zatížení 25 kN při sjezdu beranu 1,7 a 2,3 mm. Tato hodnota je o něco nižší, než v případě vzorků 7, které se rozlomily při zatížení přibližně 27 a 30 kN a sjezdu 2,5 mm.

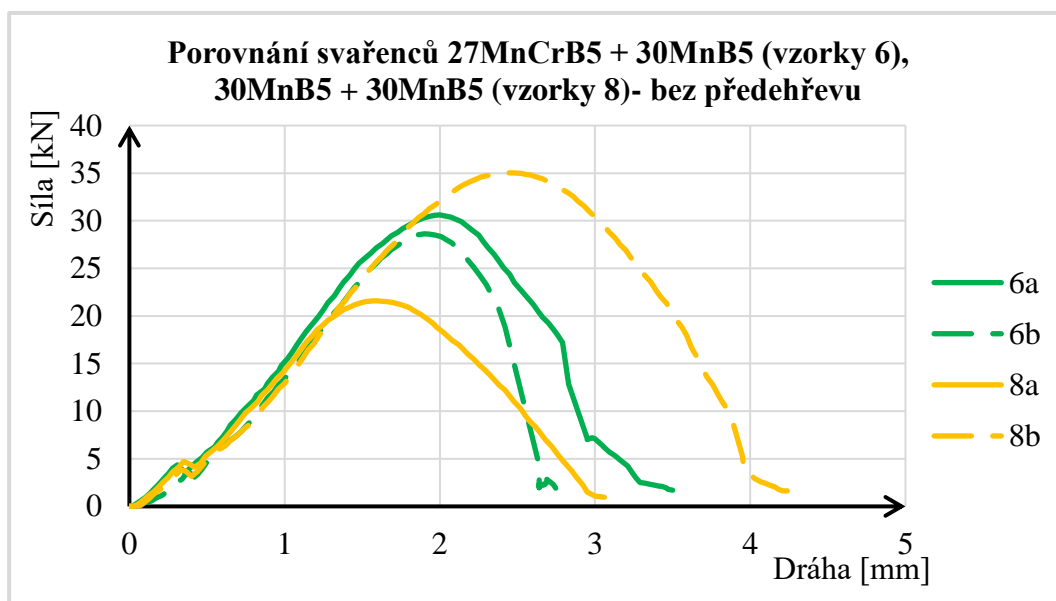
V grafu na obr. 91 jsou uvedeny průběhy rozlomení vzorků 6 a 7. U vzorku 6 došlo k rozlomení při zatížení přibližně 30 a 28,5 kN při sjezdu přibližně 2 mm. U vzorku 8 vyšly dva poměrně rozdílné průběhy. V prvním případě došlo k rozlomení již při celkově nejmenším zatížení 22 kN a dráze 1,5 mm. V druhé případě naopak při největším zatížení, které činilo 35 kN a sjezdu přibližně 2,5 mm.

U svařenců došlo ve všech případech k rozlomení v místě svarového kovu. Ten by měl mít u všech vzorků podobné vlastnosti (i vzhledem k naměřené mikrotvrdoti a pozorování mikrostruktury). Největších extrémů zatížení bylo dosaženo u vzorku 8, tedy svařenců oceli 30MnB5, svařovaných bez předehřevu, kdy nejnižší hodnota zatížení dosahovala přibližně 22 kN

a nejvyšší přibližně 35kN. Sjezd beranu dosahoval ve všech případech délky v rozsahu přibližně 2 až 2,5 mm.



Obr. 90 Graf porovnání zkoušky rozlomením svařenců vzorků 5 a 7.

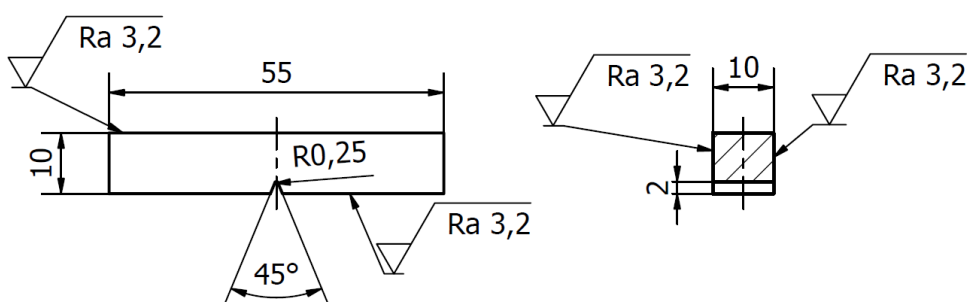


Obr. 91 Graf porovnání zkoušky rozlomením svařenců vzorků 6 a 8.

3.8 Zkouška rázem v ohybu

Cílem zkoušky bylo porovnat mechanické vlastnosti obou materiálu po výrobě. Předmětem zkoumání bylo určení energie absorbované při zkoušce rázem v ohybu za pokojové teploty. Jako zkušební zařízení bylo vybráno Charpyho kladivo Psd 300/150 s hydraulickým zdvihem beranu kladiva a vybaveným elektronickým určováním nárazové práce [37; 38].

Pro tento účel byly firmou vyrobeny a dodány 3 ks zkušebních vzorků od každého materiálu. Ty byly následně pro lepší identifikaci dooznačeny jako *a*, *b*, *c*. Vzorky s označením 1 zastupují ocel 27MnCrB5-2 a vzorky s označením 3 ocel 30MnB5. Všechny byly vyrobeny s V vrubem, dle normalizovaných rozměrů, předepsaných normou ČSN EN ISO 148-1. Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – část 1: Zkušební metoda. Jejich schematické znázornění je na obr. 93. Z důvodu vysoké tvrdosti obou materiálů bylo jako výrobní metoda zvoleno elektroerozivní obrábění [37; 38].



Obr. 92 Schéma normalizovaného vzorku pro zkoušku rázem v ohybu [38].

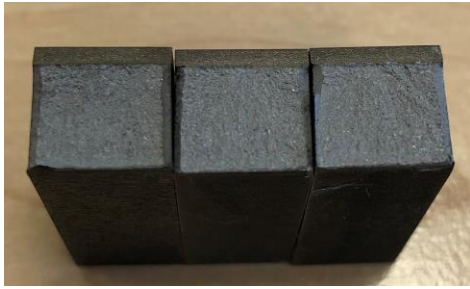
Vzorky byly postupně vkládány do zkušebního zařízení, ve kterém probíhal experiment. Po přeražení se následně odečetla příslušná hodnota. V tabulkách 10 a 11 jsou souhrnně uvedeny naměřené hodnoty nárazové práce, potřebné k přeražení jednotlivých vzorků. Na obr. 93 a 94 jsou uvedeny fotografie lomových ploch.

Tab. 10 Naměřené hodnoty nárazové práce pro vzorky 1 (ocel 27MnCrB5-2).

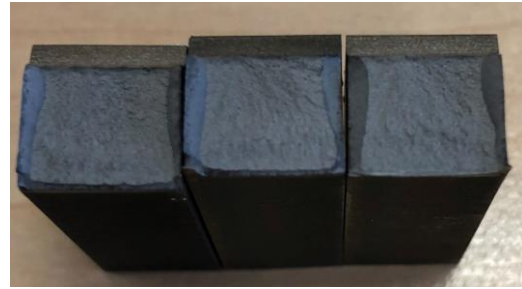
Označení vzorku	1a	1b	1c	Průměrná hodnota nárazové práce vzorku 1 [J]
KV 10 [J]	23,1	21,1	21,7	22

Tab. 11 Naměřené hodnoty nárazové práce pro vzorky 3 (ocel 30MnB5).

Označení vzorku	3a	3b	3c	Průměrná hodnota nárazové práce vzorku 3 [J]
KV 10 [J]	30,8	34,5	34,2	33,2



Obr. 93 Lomová plocha vzorků 1.



Obr. 94 Lomová plocha vzorků 3.

Jak lze vidět z naměřených hodnot, k přeražení vzorků 1, vyrobených z oceli 27MnCrB5-2, byla potřeba v průměru energie 22 J. Oproti tomu k přeražení vzorků 3, vyrobených z oceli 30MnB5, byla potřeba v průměru energie 33,2 J. Tato energie je tedy přibližně 50 % větší než v předešlém případě. U každého vzorku došlo ke křehkému rozlomení v celém průřezu, charakter ploch je podobný jako u zkoušky rozlomením. U materiálu 27MnCrB5-2 je plocha spíše rovinnější, naopak v případě oceli 30MnB5 je vidět významnější vytržení materiálu, který je tedy houževnatější než v předešlém případě. Takovýto rozdíl v potřebných energiích pro přeražení, ale i v charakteru ploch u dvou rozdílných materiálů, které prošly stejným tepelným zpracováním může být způsoben v určité míře jejich mírně rozdílným chemickým složením, ale především velikostí zrna. To je, jak již bylo uvedeno, u materiálu 27MnCrB5 - 2 podstatně větší, v důsledku čehož se, mimo jiné, snižují i mechanické vlastnosti tohoto materiálu. Z výše uvedených důvodů nelze oba materiály spolehlivě porovnat, protože neprošly stejným zpracováním, kdy u materiálu 27MnCrB5-2 neproběhla žádná normalizace zrna ani kování před tepelným zpracováním.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Fáze přivařování kostiček je, z časového hlediska, ze všech fází výroby článku kolopásu nejdelší. Robot tak na následujícím pracovišti musí čekat na dodaný příčník. V tabulce 12 jsou souhrnně uvedeny možné dosažitelné rozdíly v době výroby právě ve fázi přivařování 4 kusů kostiček a na to navazující teoretický počet kusů článků, které je možno vyrobit za 1 směnu, která činí 8 hodin, tedy 480 minut.

Tab. 12 Shrnutí výrobních časů a počet vyrobených kusů u stávajícího a nově navrženého výrobního postupu.

	Stávající technologický postup	Nově navržený technologický postup
Průměrná doba výroby 1 příčníku (fáze přivařování kostiček) [min:s]	2:47	1:23
Počet vyrobených kusů za směnu [ks]	172	347

Jak je vidět v tabulce 12, záměna materiálu, která by umožňovala vypuštění předeřevu, by měla významný vliv na celkové zrychlení výroby. Ta by konkrétně u daného typu článku kolopásu, tedy příčníku osazeného 4 kostičkami, umožňovala až dvojnásobné zvýšení produkce. Tyto propočty jsou ovšem pouze teoretické, v reálném provozu dochází vlivem různých faktorů k zastavení linky, a tím snížení počtu vyrobených dílů. Tyto hodnoty jsou tedy spíše orientační pro získání přibližné představy a další proměnné při rozhodování, zda by případná záměna materiálu měla pro firmu smysl.

Vzhledem k dodatečnému požadavku firmy nebudou uváděné ekonomické propočty, které by vyplývaly ze zvýšení produkce.

ZÁVĚR

V práci byl popsán stávající technologický postup výroby článku řetězu kolopásu, ve kterém byla jako materiál příčnicku využita ocel 27MnCrB5-2. Tuto ocel je před svařováním nutné předehřát, což v případě přivařování 4 kusů kostiček na příčník značně zdržuje výrobu. Zároveň byl pro výrobu příčnicků navržen nový materiál, kterým je ocel 30MnB5, ze které jsou vyrobeny další komponenty článku kolopásu, jmenovitě kostička a céčko. Před jejich přivařením k příčníku nedochází k jejich předehřevu a svary následně splňují požadované vlastnosti, ověřené v praktickém využití. Pro ocel 30MnB5, byl navrhnout a popsán nový technologický postup, především fáze přivařování kostiček. Jak se ukázalo, v případě vypuštění předehřevu se zkrátila fáze přivařování kostiček, a tím i celý technologický postup přibližně o 3 minuty. Toto zkrácení by v praxi mohlo vést až ke zdvojnásobení produkce článků v rámci 1 směny. Konkrétně by to znamenalo zvýšení počtu ze stávajících 172 ks na 347 ks.

Teplota předehřevu dle normy ČSN EN ISO 1011-2 metoda B a tloušťku materiálu 57 mm vyšla pro ocel 27MnCrB5-2 přibližně 213 °C a pro ocel 30MnB5 236 °C. Pro druhou zmiňovanou vyšla teplota předehřevu o 20 °C vyšší, přesto je z technické praxe možné součásti z této oceli spolehlivě svařovat bez předehřevu. Dalším faktorem je, že příčník je z předchozího tepelného zpracování před svařováním předehřátý přibližně na 100 °C.

Z makrostrukturních snímků svarů se ukázalo, že ve všech případech svařovaných a zkoumaných vzorků (vzorky 9, 10, 11) došlo k neprůvaru v kořeni. Jinak nebyly shledány žádné jiné významné vady.

Průběh tvrdosti HV1 vyšel u svařenců ocelí 30MnB5, svařovaných s předehřevem i bez předehřevu téměř identicky. Maximální hodnoty vyšly těsně pod hodnotu 450 HV1. Norma ČSN EN ISO 15614-1 dovoluje pro oceli skupiny 4 po tepelném zpracování hodnotu maximálně 350 HV. Při porovnání této maximální tvrdosti s tvrdostí v tepelně ovlivněné oblasti oceli 27MnCrB5-2, svařované s předehřevem, tedy jistým osvědčeným způsobem, tyto tvrdosti vyšly o něco menší.

Na základě dodaných a vyhodnocených vzorků by záměna materiálu mohla být možná vzhledem k faktu, že v případě oceli 30MnB5 vycházely výsledky experimentů velice podobně jak u varianty s předehřevem, tak bez předehřevu. Určitý vliv zde ale mohla hrát vlastní poměrně malá velikost dodaných vzorků. Z tohoto důvodu by mohly být výsledky zkreslené. Nejlepší variantou by bylo provést hodnocení na vzorcích pocházejících z reálného příčnicku, který prošel celým postupem výroby.

Dále byly provedeny doplňkové zkoušky vzorků základních materiálů. Jejich vyhodnocení ovšem nebylo možné spolehlivě porovnat. Vzorky oceli 30MnB5 pocházely z vyrobeného příčnicku, který prošel celým technologickým postupem výroby. Vzorky materiálu 27MnCrB5 - 2 neprošly celým technologickým postupem jako příčník, konkrétně na nich bylo provedeno pouze tepelné zpracování. Pocházely z hutního polotovaru ve formě tyče kruhového průřezu, který neprošel kováním ani normalizačním žiháním. V důsledku toho se v oceli vyskytovalo hrubé zrno, které významně snižovalo mechanické vlastnosti materiálu. Dílčí závěry jsou uvedeny u popisu jednotlivých zkoušek.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BENEŠ, Libor. Svařování. In: *Users.fs.cvut.cz/libor.benes* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
2. PEWAG. Lesnické kolopásky pewag pro optimální záběr a vysokou ochranu půdy. *Pewag* [online]. Vamberk: Pewag, 2022 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.pewag.cz/shop/forestry-traction/lesnicke-stroje.html>
3. SPOLUPRACUJÍCÍ FIRMA. *Podklady pro DP* [PDF]. [2022] Pdf dokument byl poskytnut spolupracující firmou.
4. TEUER, Tomáš. *Hodnocení kvality svarů řetězů harvestorů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2022-05-16]. 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.
5. AMBROŽ, Oldřich., Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
6. ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování* [online] Praha: Český normalizační institut, 2001 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 05 0011.
7. BLECHA, Petr, Zdeněk KOLÍBAL, Radek KNOFLICEK, Aleš POCHYLÝ, Tomáš KUBELA, Radim BLECHA a Tomáš BŘEZINA. *Mechatronika: Modul 10: Robotika*. In: *Docplayer.cz* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010, 2010 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: *Mechatronika Modul 10: Robotika - PDF Stažení zdarma* (docplayer.cz)
8. UHER, Vladimír, Ivan VITÁLOŠ, Juraj KOVÁČ, Viktor ORSZÁGH, Peter ORSZÁGH, Martin VITÁSEK, Pavol BLAŠKOVITŠ, Tomáš FARKAS, Milan ČOMAJ, Milan LIPA, Peter FODREK, Alojz JAJCAY, Peter BLAŽÍČEK a František KHANDL. *Zvárací metody a zariadenia: II. diel učebných textov pre kurzy zvaračských technologov*. Ostrava: ZEROSS, 2000, 616 stran : ilustrace. ISBN 80-85771-84-5.
9. Co je svařování MIG/MAG?. In: *Fronius.com* [online]. Praha: Fronius, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/svaovn-migmag#anc_mig-mag-systemaufbau
10. TPS/i: TPS 400 i. In: *Fronius.com* [online]. Praha: Fronius, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/ru%C4%8Dn%C3%AD-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/migmag/tpsi/tpsi/tps-400i>
11. KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 185 s. ISBN 80-7082-697-5.
12. Robotické svařovací buňky: udržitelné, bezpečné, hospodárné. In: *Blog.perfectwelding.fronius.com* [online]. Fronius, 2021, [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/roboticke-svarovaci-bunky-udrzitelne-bezpecne-hospodarne-svarovani>

13. MIG/MAG = CO₂ | sváření v ochranné atmosféře. In: *Svarecikukla.cz* [online]. Poděbrady: Proindustry, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.svarecikukla.cz/blog/mig-mag-svarovani-v-ochranne-atmosfere/>
14. Katalog přídatných svařovacích materiálů: vydání 2018. 2018. Vamberk: ESAB, 2018.
15. SIGMUND, Marian. *Svařování TIG – MIG - MAG* [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, 8. října 2019.
16. ČSN EN 439. *Svařovací materiály - Ochranné plyny pro obloukové svařování a řezání* [online] Praha: Český normalizační institut, 1996 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 05 2510.
17. KAŠPAR, Jan. Ochranné plyny pro MAG svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. *Konstrukce* [online]. 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/ochranne-plyny-pro-mag-svarovani-nelegovanych-a-nizkolegovanych-oceli-921>
18. *Nové barevné značení tlakových lahví* [online]. Praha: Linde Gas, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.linde-gas.cz/cs/images/Barevn%C3%A9%20zna%C4%8Den%C3%AD%20lahv%C3%AD_tcm79-575758.pdf
19. KUČERA, Jan. *Teorie svařování - část I*. Ostrava: VŠB, 1994, 206 s
20. KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-0870-3.
21. FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Věra OLŠAROVÁ, Ivo HLAVATÝ, Jaroslav KOUKAL, František KRISTOFORY, Vladislav OCHODEK, Václav PILOUS, Jaroslav PURMENSKÝ, Drahomír SCHWARZ a Július VESELKO. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
22. SIGMUND, Marian. *Svařitelnost kovových materiálů. Svařitelnost C a C-Mn ocelí* [přednáška]. Brno, Fakulta strojního inženýrství, 17. listopadu 2020.
23. ČSN EN 1011-2. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí* [online] Praha: Český normalizační institut, 2002 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 05 2210.
24. Mangan-borové oceli. In: *Bilstein-cee.cz* [online]. Karlova Huť: BILSTEIN CEE, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.bilstein-cee.cz/produkty/sortiment-bilstein-group/mangan-borove-oceli/>
25. Boron in Steel: Part Two. In: *Totalmateria* [online]. Zürich: Totalmateria, 2007 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=CZ&site=kts&NM=214>
26. Vynikající odolnost proti otěru: Tepelně zpracovatelné bórové oceli vhodné pro tepelné zpracování nabízejí výbornou odolnost proti otěru. In: *Dspace.tul.cz* [online]. Liberty Ostrava [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/149104/BoronGrades_brochure_CZ.pdf?sequence=3&isAllowed=y
27. Kverneland Ecomat: Účinný podmítací pluh pomocí mělké orby. In: *Kverneland.com* [online]. Beroun: KVERNELAND GROUP CZECH, 2022, 2022 [cit. 2022-05-16].

- Dostupné z: <https://cz.kverneland.com/Zpracovani-pudy/Pluhy/Ecomat/Kverneland-Ecoma>
28. TNI CEN ISO/TR 15608. *Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin* [online] Praha: Český normalizační institut, 2008 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 05 0323.
 29. JAASON, Karli, Priidu PEETSALU, Priit KULU, Mart SAARNA a Jueri BEILMANN. Predictive tools for the isothermal hardening of strip steel parts in molten salt. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences* [online]. Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus (Estonian Academy Publishers), 2016, **65**(2), 152-152 [cit. 2022-05-15]. ISSN 1736-6046. Dostupné z: doi:10.3176/proc.2016.2.04
 30. SIQUAL 7182 Steel. In: *Steelselector.sij.si* [online]. Slovenia: SIJ Metal Ravne d.o.o. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://steelselector.sij.si/steels/VMB.html>
 31. KLAJKURKOVÁ, Lenka [ústní sdělení]. Fakulta strojního inženýrství v Brně, 12. května 2022.
 32. ČSN EN ISO 6507–1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda* [online] Praha: 2018 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 05 2210.
 33. PACAL, Bohumil. a Pavel DOLEŽAL. Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů. *Ústav materiálových věd a inženýrství VUT v Brně* [online]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství VUT v Brně [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
 34. ČSN EN ISO 15614-1. Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu [online] Praha: Český normalizační institut, 2018 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 05 0313.
 35. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
 36. SPOTZ, Zdeněk. Re: *Konzultace* [e-mailová komunikace]. 3. června 2020 [cit. 2020-06-03].
 37. ČSN EN ISO 148-1. *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy – část 1: Zkušební metoda* [online] Praha: Český normalizační institut, 2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: Databáze ČSN norem. Třídící znak 42 0381.
 38. NOVOTNÁ, Eva. Zkouška rázem v ohybu. In: *Ime.fme.vutbr.cz* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
 39. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
d_1, d_2	Úhlopříčka vtisků	[mm]
F	Síla	[N]
I	Svařovací proud	[A]
KV	Nárazová práce	[J]
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
V	Svařovací napětí	[V]
v	Svařovací rychlost	[mm · s ⁻¹]
η	Koeficient účinnosti svařování	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
B	Bainit
F	Ferit
hm. %	Hmotnostní procenta
HV	Tvrдость dle Vickerse
HRC	Tvrдость dle Rockwella
M	Martenzit
Ms	Martenzit start
Mf	Martenzit finiš
P	Perlit
SK	Svarový kov

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/
- Příloha 2 Atest oceli 27MnCrB5-2
- Příloha 3 Atest oceli 30MnB5
- Příloha 4 Průběhy tvrdostí vzorků základních materiálů
- Příloha 5 Průběhy tvrdostí vzorků svařenců
- Příloha 6 Atest přídavného materiálu OK 12.51
- Příloha 7 Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svaru vzorku 9 (27MnCrB5-2)
- Příloha 8 Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svaru vzorku 10 (30MnB5)
- Příloha 9 Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svaru vzorku 11 (30MnB5)

Seznam výkresů

Svařenec článku; 2022-DP-182765-01

Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/

Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

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

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

Technické parametry:

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

Počítač je vybaven programem TIRAtest v.2.1 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10 002 a EN ISO 6892 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

Date: 19.01.2022

INSPECTION CERTIFICATE

EN 10204/3.1

No.: ATK2200863

Purchaser

Order No.: 4500114462
 Our order No.: 03-21-01669/001
 Delivery note: 30-22-00348
 Delivery date: 19.01.2022
 Transport: By truck 7H9 3877 + 2ST 4976

Product: ROLLED FLAT STEEL EN 10058 EN 10083-3 - 27MnCrB5-2 (WNR.:1.7182)

Cast No.	Quality	Dim (mm)	Weight (kg)	Bundle	Melting furnace	Dim. of billet
88380	27MnCrB5-2	150x20	24.140	17	E	#180

CHEMICAL COMPOSITION OF CAST (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	B	Ti
0,28	0,25	1,24	0,014	0,005	0,54	0,14	0,06	0,010	0,20	0,021	0,0038	0,031

	Hard. final HB	Hard. final N/mm2
Min		
Val	252	
Max	255	

MECHANICAL PROPERTIES

Hardness in as delivered condition: 252 HB;
 Heat treatment of samples: QUENCHED AND TEMPERED
 Temperature (°C): 900(+20-20)/500(+100-100)
 Media: Oil, Water

	Yield stress N/mm ²	Tensile strength N/mm ²	Elongation %	Reduction of area	The direction of the sample	Impact test			Tip	°C
						Joule 1	Joule 2	Joule 3		
Min	700	800	15	55		65	65	65		
Val	820	936	16,4	57,8		91	94	94	KV	20
Max		1000								

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

Date: 22.11.2021

INSPECTION CERTIFICATE

EN 10204/3.1

No.: ATK2114393

Purchaser

Order No.: 4 500100641

Our order No.: 03-21-01219/007

Delivery note: 30-21-06364

Delivery date: 22.11.2021

Transport: By truck RCN931/WDJ141

Product: ROLLED ROUND STEEL EN 10050 TRB-IS Nr.: 01-2QM.08.04.05/A-19-02-07 - 30MnB5 (WNr.:1.5531)

Cast No.	Quality	Dim (mm)	Weight (kg)	Bundle	Melting furnace	Dim. of billet
87704	30MnB5	40	24.715	11	E	# 180

CHEMICAL COMPOSITION OF CAST (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	B	Ti	N
0,32	0,29	1,26	0,011	0,007	0,14	0,08	0,03	0,000	0,19	0,021	0,0037	0,020	0,009

	Hard. final HB	Hard. final N/mm ²
Min		
Val	192	
Max	210	

MECHANICAL PROPERTIES

Hardness in as delivered condition: 192 HB;
Heat treatment of samples: QUENCHED AND TEMPERED
Temperature (°C): 880(+20-20)/500(+100-100)
Media: Water

	Yield stress N/mm ²	Tensile strenght N/mm ²	Elongation %	Reduction of area	The direction of the sample	Impact test				
						Joule 1	Joule 2	Joule 3	Tip	°C
Min	650	800	13	50		60	60	60		
Val	769	882	13,2	63,5		120	125	119	KV	20
Max		950								

ADDITIONAL REQUIREMENTS

Radioactivity: Max 0,4 Bq/g;

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

Průběh tvrdosti vzorku 2 – ocel 27MnCrB5-2. Průběh tvrdosti vzorku 4 – ocel 30MnB5.

Číslo vtisku	HV 1	Vzdálenost [mm]
1	530	0
2	517	0,857
3	516	1,714
4	517	2,571
5	532	3,429
6	514	4,286
7	519	5,143
8	519	6
9	515	6,857
10	514	7,714
11	530	8,571
12	536	9,429
13	517	10,286
14	514	11,143
15	515	12

Číslo vtisku	HV 1	Vzdálenost [mm]
1	494	0
2	482	0,857
3	480	1,714
4	483	2,571
5	487	3,429
6	475	4,286
7	466	5,143
8	481	6
9	459	6,857
10	468	7,714
11	465	8,571
12	451	9,429
13	444	10,286
14	442	11,143
15	463	12

Průběh tvrdosti vzorku 9 – svařenec oceli
27MnCrB5-2.

Číslo vtisku	HV 1	Vzdálenost [mm]
1	335	0
2	315	0,857
3	300	1,714
4	276	2,571
5	464	3,429
6	458	4,286
7	469	5,143
8	435	6
9	334	6,857
10	323	7,714
11	366	8,571
12	400	9,429
13	439	10,286
14	449	11,143
15	454	12

Průběh tvrdosti vzorku 10 – svařenec oceli
30MnB5 s předehřevem.

Číslo vtisku	HV 1	Vzdálenost [mm]
1	300	0
2	315	0,857
3	295	1,714
4	297	2,571
5	301	3,429
6	327	4,286
7	448	5,143
8	440	6
9	378	6,857
10	291	7,714
11	338	8,571
12	398	9,429
13	396	10,286
14	404	11,143
15	431	12

Průběh tvrdosti vzorku 11 – svařenec oceli
30MnB5 bez předehřevu.

Číslo vtisku	HV 1	Vzdálenost [mm]
1	297	0
2	312	0,857
3	299	1,714
4	299	2,571
5	281	3,429
6	437	4,286
7	442	5,143
8	410	6
9	255	6,857
10	295	7,714
11	338	8,571
12	351	9,429
13	413	10,286
14	428	11,143
15	445	12



ZKUŠEBNÍ ZPRÁVA / TEST REPORT

v souladu s/acc to EN 10204 - 2.2

Datum/Data: 2022-02-25

Číslo certifikátu/Cert no: EC26720642 rev. 0

Naše objednávka/Our order:

Naše reference/Our ref:

Číslo zákazníka/Cust no:

Datum obj. zákazníka/Your date:

Stanislava Kratěnová

CZB00082

Vaše objednávka/Your order:

Vaše reference/Your ref:

Vaše faxové číslo/Your fax:

Váš e-mail/Your e-mail:

Fakurační adresa/Invoice address

Příjemce certifikátu/Cert receiver

Dodací adresa/Delivery address

DODÁVKA/DELIVERY

LOT číslo/Lot no:

PVV17054858

Množství/Quantity:

VÝROBEK/PRODUCT

Značka/Brand:

ESAB

Popis/Desc:

OK Autrod 12.51 1.2mm 250kg

Číslo výrobku/item no:

1251129320

CHEMICKÉ SLOŽENÍ/
CHEMICAL COMPOSITION

Wire/strip

Ostatní/Auxiliary:

KLASIFIKACE/CLASSIFICATIONS

EN ISO 14341-A: G 3Si1

EN ISO 14341-A: G 38 3 C1 3Si1

EN ISO 14341-A: G 42 4 M20 3Si1

EN ISO 14341-A: G 42 4 M21 3Si1

SFA/AWS A5.18: ER70S-6

CSA W48: B-G 49A 3 C1 S6

JIS Z 3312: YGW 12(C1)

C	0.078%
Si	0.85%
Mn	1.46%
P	0.013%
S	0.012%
Cr	0.03%
Ni	0.04%
Mo	0.01%
Cu	0.07%
V	0.004%
Al	0.005%
Ti+Zr	0.01%

MECHANICKÉ VLASTNOSTI/MECHANICAL PROPS

Standard/norma/Standard:

EN

Ostatní/Auxiliary:

M21 (EN ISO 14175)

Stav/podminky/Condition:

As Welded

PEVNOST/TENSILE

ReL

Rm

A4-A5

470 MPa

560 MPa

26 %

ZKOUŠKA RÁZEM/IMPACT

Temp

+20 °C

-20 °C

-30 °C

-40 °C

KV

130 J

120 J

100 J

90 J

KOMENTÁŘ/COMMENTS

Certificate complies with requirements specified in ASME Sec II C, ed. 2017 Schedule F

Výrobek je dodán podle programu QA, který splňuje normu EN ISO 9001.

Tento certifikát je zhotoven elektronicky a je platný bez podpisu.

Veškeré dotazy prosím adresujte na:

ESAB VAMBERK, s.r.o., Smetanovo náb. 334, Vamberk 517 54, tel. +420 494 501 476, order@esab.cz

Product supplied under a QA Programme fulfilling the EN ISO 9001 standard.

This certificate is produced electronically and is valid without signature.

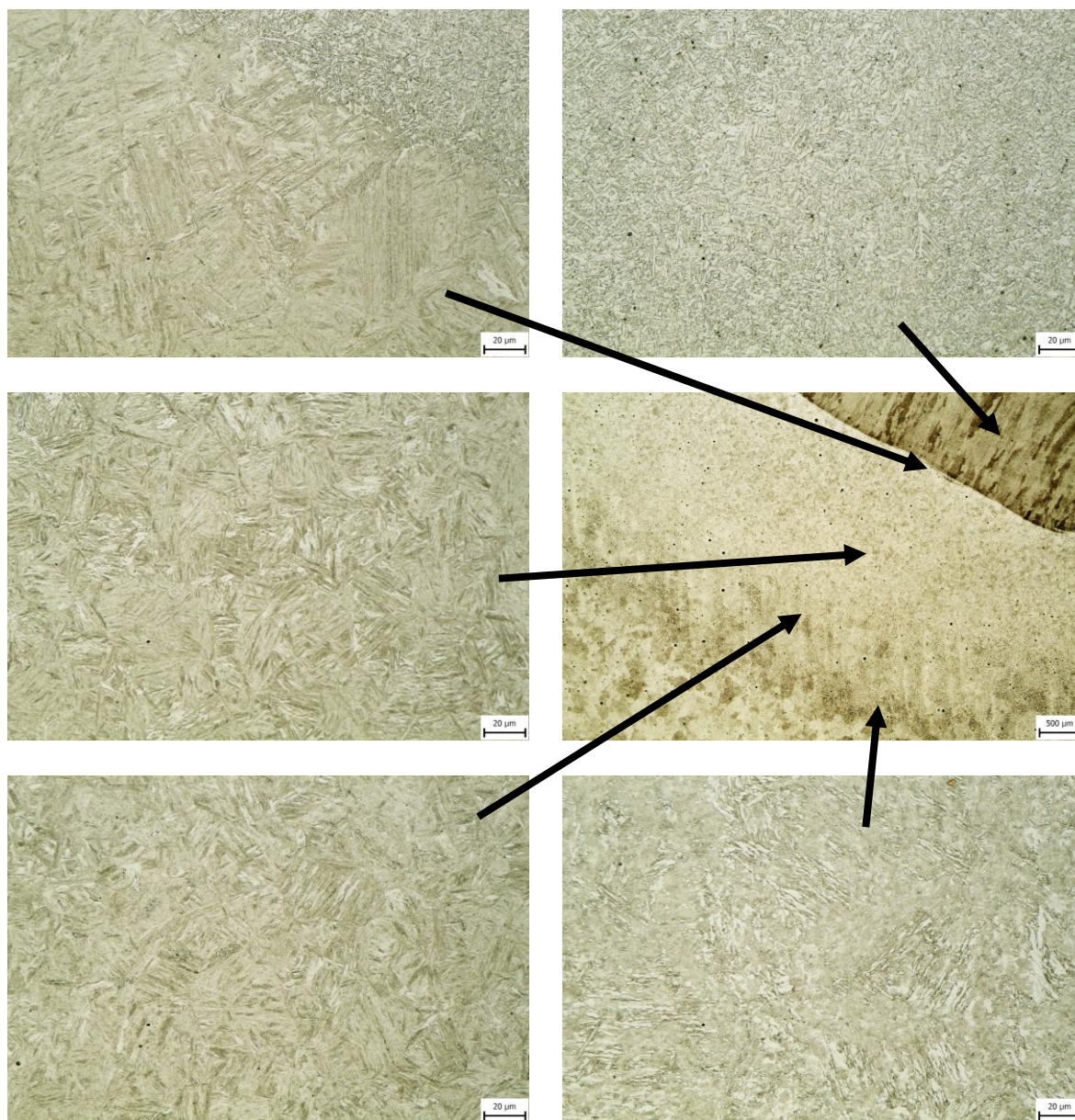
Please refer any queries to: (see above)

Za správnosti/Validation

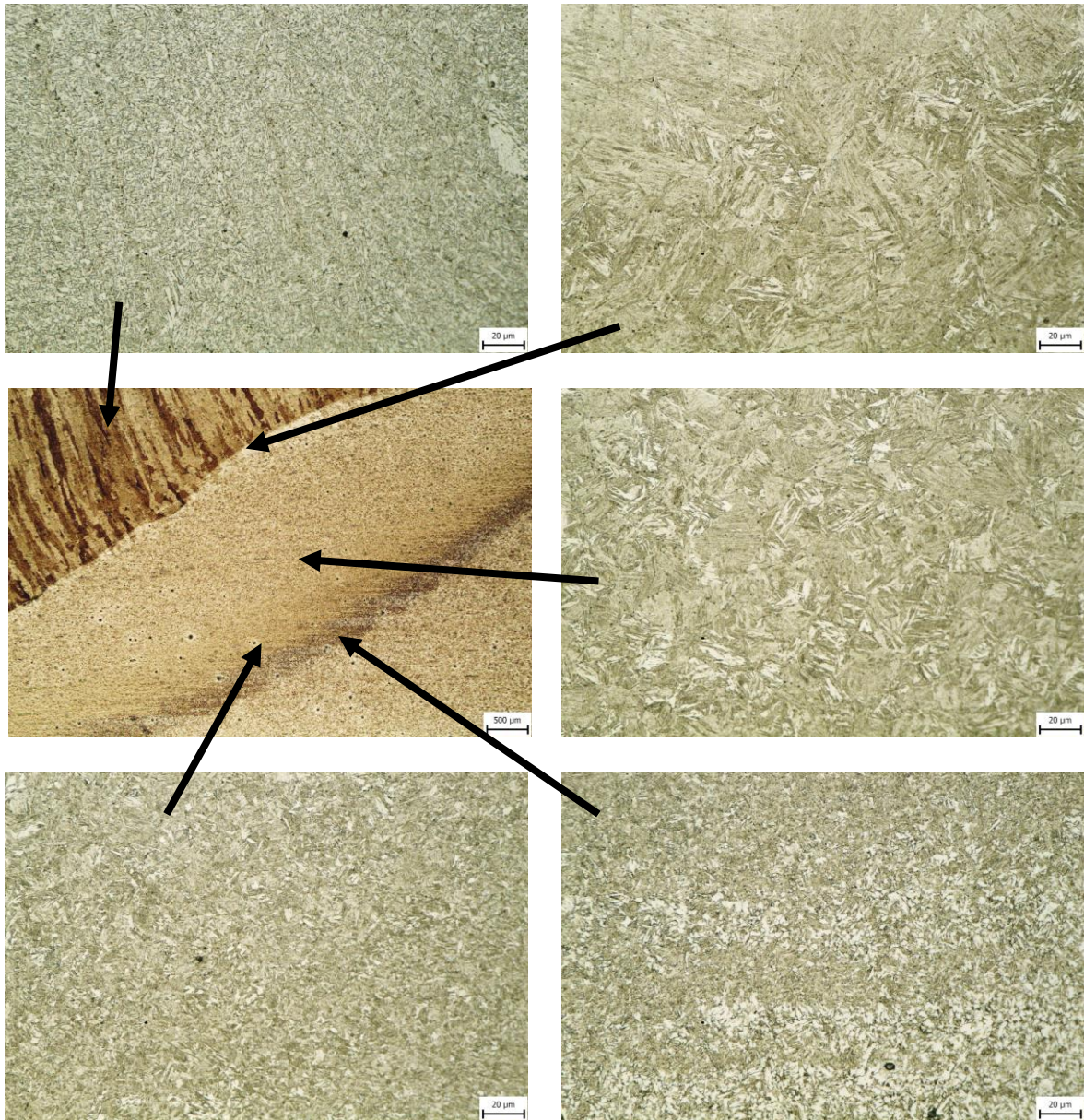
H. Rasmuson

Product Manager

Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svaru vzorku 9 (27MnCrB5-2)



Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svaru vzorku 10 (30MnB5)



Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svaru vzorku 11 (30MnB5)

