



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA SNĚHOVÝCH ŘETĚZŮ

SNOW CHAINS MANUFACTURING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Bořek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Pavel Bořek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Michaela Císařová, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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

Výroba sněhových řetězů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o popis výroby sněhových řetězů pro osobní automobily, které jsou zhotovovány z drátu, tvarovány ve speciálním nástroji a následně jsou odporově svařovány. V práci bude zmapován a popsán stávající postup výroby ve firmě. Vytipuje se slabé místo, na které bude provedena literární studie a z níž vyplynou návrhy na zlepšení.

Cíle bakalářské práce:

Popsat technologii výroby řetězů.
Zpracovat metodiku testování a zkoušení jednotlivých článků.
Najít slabé místo v postupu výroby.
Vypracovat literární rešerši na vybranou oblast výroby.
Navrhnout implementaci získaných poznatků do procesu.

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; KANDUS, Bohumil a KUBÍČEK, Jaroslav. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. Zeross, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

MUSIL, Miloslav a MORAVEC, Jaromír. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE, Mezinárodní svářečský technolog IWT. Česká Třebová: DOM - ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá zkoumáním procesu výroby sněhového řetězu s bližším zaměřením na problematické místo týkající se tepelně ovlivněné oblasti, svaru a základního materiálu. V teoretické části je popsána otázka odporového svařování a metalurgických pochodů při vzniku odporového svaru pro lepší pochopení nuancí v praktické části, kde je provedena strukturní analýza oblasti svaru z hlediska mikrostruktury, makrostruktury a tvrdosti. Pro tuto část jsou použity vzorky řetězu po svaření, cementování, kalení, popouštění a galvanickém zinkování.

Klíčová slova

Řetěz, odporové svařování, svarový spoj, tepelně ovlivněná oblast, tvrdost.

ABSTRACT

This thesis is aimed at investigating the snow chain manufacturing process with a closer focus on the problematic spot related to the heat affected zone, weld and base metal. In the theoretical part, the issue of resistance welding and the metallurgical processes involved in the formation of a resistance weld are described for a better understanding of the nuances in the practical part where a structural analysis of the weld area in terms of microstructure, macrostructure and hardness is carried out. For this part, chain samples after welding, carburizing, quenching, tempering and zinc electroplating are used.

Keywords

Chain, resistance welding, weld joint, heat affected zone, hardness.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOŘEK, Pavel. *Výroba sněhových řetězů* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160980>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Michaela Císařová.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba sněhových řetězů vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 23. 5. 2024

místo, datum

Pavel Bořek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto paní Ing. Michaele Císařové, Ph.D. za podporu a pomoc s úpravou textu při vypracování bakalářské práce.

Také děkuji firmě JTEKT Automotive Czech, s. r. o. za poskytnutí vybavení a pomoc při zhotovování metalografických vzorků a firmě Pewag Czech s. r. o. za poskytnutí prohlídky celé výroby a fotodokumentace výrobního procesu.

Dále bych rád poděkoval prof. Ing. Rudolfu Foretovi, CSc. za pomoc s vyhodnocením výsledků mikrostruktury a tvrdosti a panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví, IWE za pomoc s dotazy ohledně svařování.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 Popis řešeného celku	10
2 Svařování článků řetězu.....	21
2.1 Svařování elektrickým odporem.....	21
2.1.1 Parametry odporového svařování	22
2.1.2 Metody odporového svařování	24
2.2 Metalurgie a struktura svarového spoje.....	27
3 Praktická část.....	29
3.1 Hodnocení mikrostruktury a makrostruktury svaru	31
3.2 Měření tvrdosti	36
3.2.1 Měření tvrdosti vzorku A	36
3.2.2 Měření tvrdosti vzorku B.....	38
3.2.3 Měření tvrdosti vzorku C.....	39
3.3 Shrnutí a vyhodnocení výsledků	40
ZÁVĚR.....	41

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů

Seznam příloh

ÚVOD

V rámci automobilového průmyslu je klíčové splnění přísných atestů a certifikací, které zajišťují bezpečnost, spolehlivost a výkonnost v různých provozních podmínkách. Obzvláště pak v zimních měsících, kdy řidiči často čelí situacím na sněhu nebo ledu, a to zejména v horském prostředí, kde se sněhové srážky vyskytují často a ve velkém množství. Za takových podmínek vozidlo ztrácí trakci a hrozí jeho smyk. Proto na trhu existuje široká škála doplňků pro vozidla, které jsou navrženy pro řešení právě tohoto problému. [1]

Mezi takové doplňky patří například tekuté řetězy, viz obr. 1, které jsou ceněny pro svou snadnou aplikaci, nízkou cenu a schopnost poskytnout okamžité zlepšení trakce v nouzových situacích. Další možností řešení jsou textilní návleky, viz obr. 2, kterými se má řešit problém sněhových řetězů kvůli podvlékání kola při montáži a demontáži. [2; 3]

Přestože sněhové návleky a tekuté řetězy představují užitečné možnosti, jak řešit přilnavost kola na vozovce, sněhové řetězy, viz obr. 3, jsou stále neodmyslitelným a spolehlivým doplňkem. Spousta lidí stále tyto řetězy zpochybňuje právě kvůli jejich komplexnímu nasazování, omezené maximální rychlosti a vysokému opotřebení řetězů při jízdě po nezasněžené vozovce. Nicméně vývoj nových technologií přinesl na trh řetězy, jenž některé z těchto problémů eliminují. Moderní sněhové řetězy jsou navrženy tak, aby jejich montáž byla intuitivnější, což minimalizuje strávený čas nasazováním v chladných podmínkách. Oproti výše zmíněným doplňkům pro vozidla disponují také vysokou životností vlivem odolných materiálů, čímž se zvyšuje ekonomičnost investice do těchto doplňků. [1; 2]



Obr. 1 Tekuté řetězy [3].



Obr. 2 Textilní návlek [2].



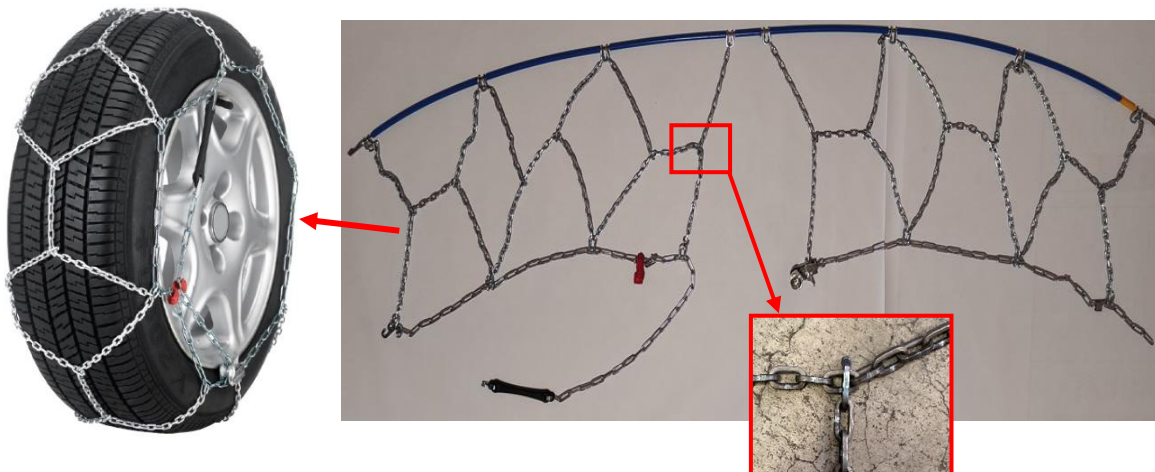
Obr. 3 Sněhový řetěz [1].

1 POPIS ŘEŠENÉHO CELKU

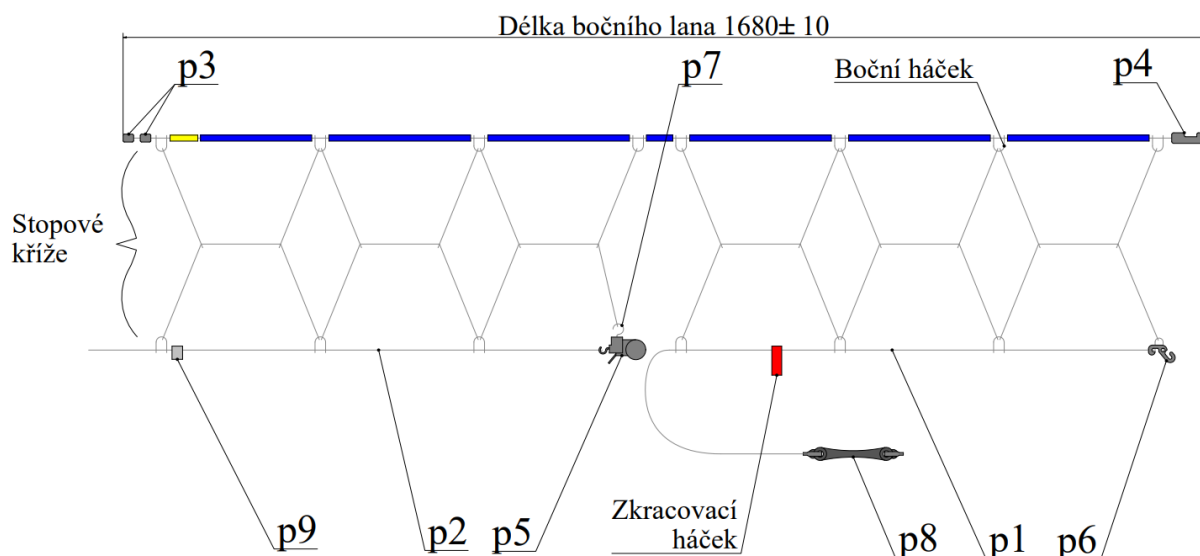
Úkolem této práce je popis technologického postupu sněhového řetězu König E9 090. Jedná se prakticky o nejjednodušší a nejlevnější variantu sněhového řetězu pro osobní automobily. Tento řetěz je vybaven ráčnovým systémem pro dopínání, plochým lanovým uzávěrem pro montáž a demontáž a články o šířce maximálně 9 mm, takže zajistí správnou funkci i u vozidel s minimálním prostorem v podběžích kol. [4; 5]

Spolupráce byla provedena s firmou Pewag Czech s. r. o., která se zabývá dlouhodobou výrobou a inovací v oblasti řetězů a podobných dílů. Historie výroby této společnosti sahá až do roku 1479, kdy začala v kovárně v Brücklu. Pewag se postupem času stal největším světovým výrobcem řetězů, které jsou nejen snadno instalovatelné i v náročných podmínkách, ale také odolné, schopné vydržet jízdu po nezasněžené vozovce o vzdálenosti až 120 km. [1; 6]

Řetěz jako celek se skládá z několika součástí, které se buď vyrábějí přímo ve firmě, nebo se nakupují od jiných společností a případně se pak ještě upravují. Mezi nejvýznamnější vyráběné díly patří články řetězu na samotném běhounu. Ty jsou spojené prostřednictvím tzv. maglie článku a společně vytváří stopový kříž řetězu, viz obr. 4. K bočnímu lanu a bočnímu řetězu jsou jednotlivé segmenty řetězu připojeny prostřednictvím bočního háčku. V poslední řadě je pak jako vyráběný díl plastový zkracovací háček.












Obr. 4 Tvar řetězu a spojení s maglií [5].



Obr. 5 Schématické znázornění řetězu König E9 090 [5].

Mezi nakupované díly patří boční lano, na které se ve firmě nanáší modrá bužírka a následně se na jednotlivých místech osekává. Dále boční řetěz, jež je v základu bez povlaku a ve firmě se nanáší zinkový povlak. Ostatní nakupované díly jsou v tab. 1. Celý řetěz je pak schématicky popsán na obr. 5 (příloha 1).

Tab. 1 Použité kupované komponenty [5].

Pozice	Název	Náhled komponenty	Popis	Dodavatel
p1	pravý boční řetěz		řetěz Ø2,9 - 24,2 mm, 42 článků	KETTENWERK
p2	levý boční řetěz		řetěz Ø2,9 - 24,2 mm, 29 článků	
p3	blokátor		blokátor Ø6,6 - 7,3 mm, nalisován 3x na bočním laně	RCT s. r. o.
p4	lanový uzávěr		uzávěr Ø8,5 - 25 mm, nalisován na bočním laně	
p5	ráčna		pro seřízení a zpětnému zamknutí bočního řetězu	
p6	zajišťovací hák		výstřižek tl. 3 mm, nasazen na pravém bočním řetězu	
p7	háček ráčny		hřeb Ø3 - 40 mm, pro spoj ráčny se stopovým křížem	
p8	pryžový napínač		elastomerový člen délky 100 mm s háčky tl. 2 mm, pro napnutí bočního řetězu	
p9	zajišťovací spona		nasazen na levém bočním řetězu, pro zaháknutí přebytečných článků	

Pozn.: Pozice z tabulky 1 souvisí s obr. 5.

Nejvíce namáhaná část celku, tedy stopový kříž, je zhotovena z válcovaného nepatentovaného drátu z materiálu 15Mn3Al. Dle normy DIN 17 115 má ocel ekvivalentní označení 1.0468 a jedná se o materiál pro výrobu svařovaných řetězů s kulatým článkem a součástí řetězů. Tato ocel je díky nízkému obsahu uhlíku (0,12 - 0,18) % dobře svařitelná bez nutných dodatečných opatření. Dále také odolává velkému přetvoření při ostrém ohýbání, což je dáno velkou tažností až 33 % a je vhodná pro chemicko-tepelné zpracování (cementování), čímž je dosaženo vyšších mechanických vlastností, zejména pak ořezuvzdornosti. Podle normy DIN 17 115 se používají další tři materiály s obdobným chemickým složením pro svařování řetězů s kulatým článkem, a sice 21Mn5, 21Mn4Al a 27MnSi5. Dosahují vyšší pevnosti vlivem vyššího obsahu uhlíku a manganu, nicméně mají vyšší uhlíkový ekvivalent a svařování se musí provádět za speciálních podmínek. Mechanické vlastnosti a chemické složení vycházející z materiálového listu oceli 1.0468 (příloha 2, 3) je v tab. 2, 3. [7; 8; 9; 10]

Tab. 2 Chemické složení oceli 15Mn3Al (1.0468) [9].

Procentuální zastoupení jednotlivých prvků [%]							
C	Mn	Si max.	P max.	S max.	Cu max.	N max.	Al
0,12 - 0,18	0,7 - 0,8	0,25	0,035	0,035	0,25	0,012	0,02 - 0,05

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli 15Mn3Al (1.0468) [8].

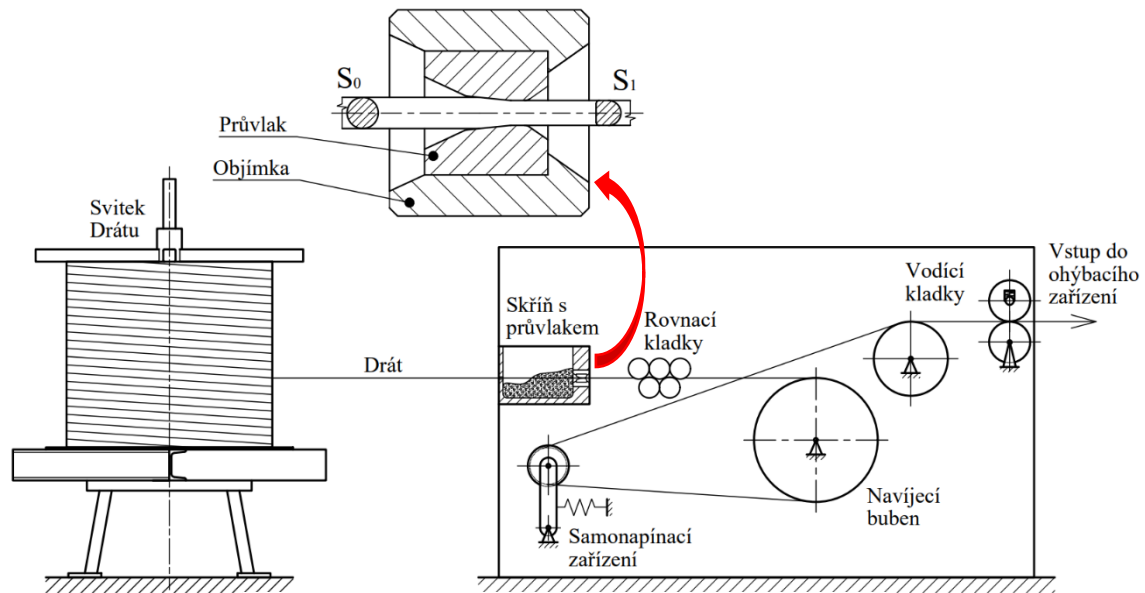
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Nárazová práce KV/Ku [J]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
min. 179	min. 417	12	33	14

Z vyráběných dílů se největší pozornost klade právě na stopový kříž, u něž musí být zajištěna správná výroba, jelikož je vystaven na celé sestavě největšímu zatížení. Ten se zhotovuje v několika operacích, přičemž v určitých okamžicích vstupují do procesu ostatní díly. Operace na sebe navazují v následujícím pořadí:

- tažení drátu,
- stříhání a ohýbání do článku,
- svařování,
- kalibrování,
- tvorba stopového kříže,
- cementování, kalení a popouštění,
- galvanické pokovování,
- montáž.

V první řadě se vyrábí tzv. nekonečný řetěz. Ten se zhotovuje na lince, jež zahrnuje první čtyři zmíněné operace. Výroba začíná odvíjením drátu průměru 3,3 mm, který se nejprve táhne průvlakem a redukuje se z průřezu S_0 na S_1 . Na výstupu je nepravidelný profil tvaru D pro samotné články řetězu.

Průvlaková skříň je opatřena kartáči pro očištění případných nečistot drátu a současně mazivem na bázi práškových mýdel. Tažení tedy probíhá za sucha a drát musí být před samotným tažením zbaven okují prostřednictvím procesu moření, jelikož okuje by na povrchu zvyšovaly součinitel smykového tření. [11]

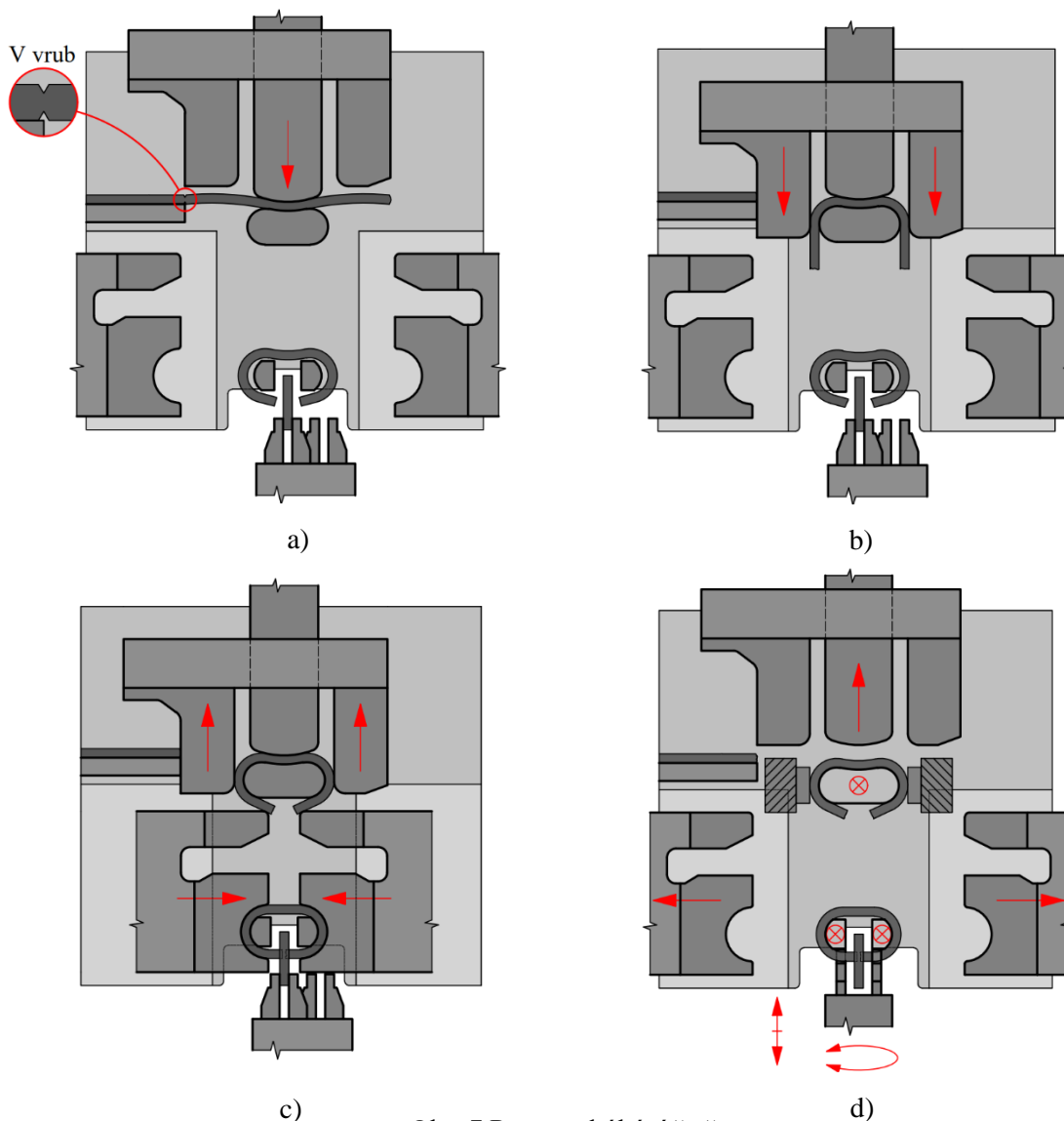


Obr. 6 Schématické uspořádání tažného stroje [12].

Stroj, na kterém je drát tažen, je jednorůchodový, takže drát odvíjený ze svitku prochází jedním průvlakem. Nástroj se skládá z průvlaku a objímky, která má za úkol minimalizovat radiální tahová napětí působící na průvlak. Navíjecí buben je tzv. akumulční, má tedy válcový tvar a drát se na něm kumuluje pro vyrovnání diferencí rychlosti. Za průvlakem se drát také deformačně proválcovává pěti kladkami, čímž se odstraní vnitřní napětí vzniklé při drátotahu a drát se v pozdější fázi nekrotí. Ústrojí obsahuje také samonapínací zařízení z důvodu dávkovacího zařízení v ohýbacím ústrojí. Postup je schématicky vyobrazen na obr. 6. [12]

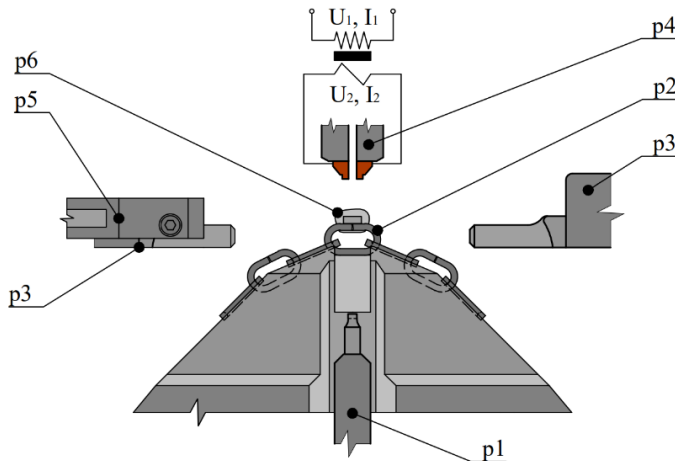
Po procesu tažení následuje operace ohýbání drátu. V prvním kroku vytáhnou dávkovací kleště profilový drát o 38,5 mm, což odpovídá délce jednoho článku. Toto popotažení je vyrovnáváno již zmíněným samonapínacím zařízením nacházejícím se v předchozím zařízení s průvlakem. Tento drát byl předem ve vetknutém konci nastřížen pomocí nastřihovacích nožů, čímž vznikl vrub, který zajišťuje stanovení přesné délky a usnadňuje operaci stříhání.

Proces ohýbání pak probíhá tak, že středový razník přitlačí polotovaru k matrici, což zároveň slouží jako přidržení polotovaru, umožňující snadné odstřížení v místě předpřipraveného vrubu, viz obr. 7a. Matrice je navržena s konvexní vrchní částí pro možnost vyrovnání při doohnutí. Po odstřížení se aktivují horní ohybníky, jež volné konce ohnou o 90° , viz 7b. Boční ohybníky pak ohnou konce dle požadovaného tvaru, ale ponechají je otevřené, aby bylo možné v pozdější fázi do nich vložit předcházející článek, viz 7c. Poté se matrice zasune a článek se pomocí podavače přesune do dalšího pracoviště, viz 7d. V tomto pracovišti se matrice vysune a zajistí tak článek. Následně se nasadí předchozí článek, který je držen v přesné pozici pomocí chapadla. Článek se doohne pomocí těch stejných ohybníků, které článek lemovaly v předešlé operaci a plní tak více funkcí současně, viz 7c. Na závěr chapadlo uchopí článek a po zasunutí matrice se otočí o devadesát stupňů a vše je připraveno pro nasazení dalšího článku, viz 7d. Chapadlo je přímočaře vysouváno pneumotorem a otáčí se díky hřebenovému převodu. Stroj tímto způsobem zhotoví zhruba 7000 článků za hodinu. [13]

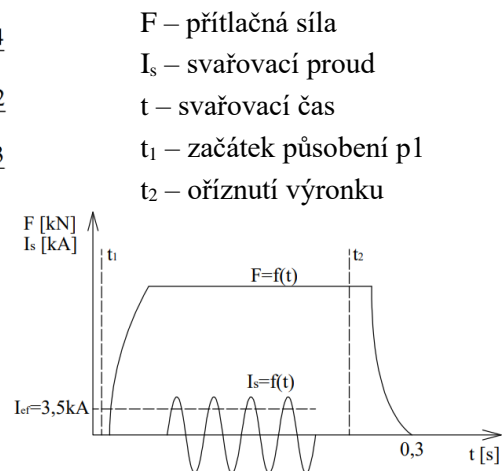


Obr. 7 Postup ohýbání řetězu.

Když jsou články řetězu vzájemně navlečeny na sobě, může proběhnout proces svařování. V tomto procesu se využívá specificky modifikovaná technologie svařování elektrickým odporem natupo, která se od normální liší tím, že elektrody jsou fyzicky oddělené od přítlačného mechanismu. Tento způsob svařování je preferován díky velmi dobré finální jakosti a vzhledu svaru a je vhodný pro svařování drátů a tyčí s podobnými šířkami bez přídavného materiálu. [14; 15]



Obr. 8 Schéma svařování natupo.



Obr. 9 Svařovací program [16].

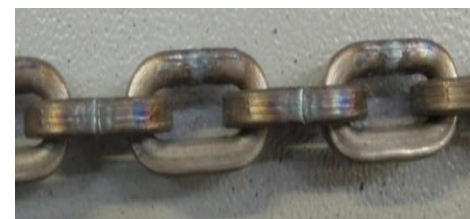
Postup procesu je znázorněn na obrázku 8. Nejprve je článek umístěn pomocí podavače do přípravku tak, aby se nacházel poloze svařování PC. V první fázi se musí zajistit rovnoběžnost obou svařovaných konců, které jsou vyhlé vlivem elastického odpružení při předchozí operaci ohýbání, viz obr. 10. Rovnoběžnost se zajišťuje prostřednictvím přidržovače p1, což umožňuje vznik kvalitního svaru v ohnisku drátu. Následně přítlačníky p3 stlačí svařovaný článek. Vzápětí sjedou elektrody p4, které přivádí do článku vysoký proud 3,5 kA. Používá se normální režim svařování, viz obr. 9, jelikož průřez drátu je příliš malý, a tak nevzniká velké vnitřní napětí. Materiál se v místě největšího odporu, tedy mezi volnými konci, nahřeje a vytvoří se svarový spoj. Jelikož dochází k částečné redukci délky, materiál se vytlačuje do stran a vzniká výronek. Redukce je vyrovnána konvexním předehtutím článku v předchozí operaci ohýbání. Výronek se ořízne z jedné strany noží p5 a shora nožem p6. Takto zhotovený článek, zobrazený na obr. 11, se posune a proces se cyklicky opakuje. Proces svařování je velmi rychlý a jeden článek se svaří za zhruba 0,3 s. Reálný provozní chod výroby je ilustrován na obr. 12.



Obr. 12 Reálný proces svařování natupo.



Obr. 10 Řetěz před svařováním.

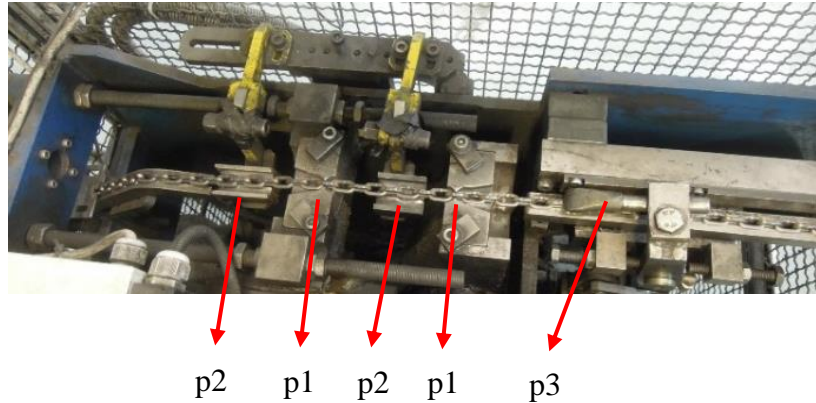


Obr. 11 Řetěz po svařování.

V poslední části linky dochází ke kalibraci délky řetězu, viz obr. 14. Provádí se po sérii jedenácti článků, které se uchopí pomocí dvou čelistí p1 na každé straně a natáhnou se na požadovanou délku. Následně se řetěz vyvlíkně z čelistí zvedacím mechanismem p2 a podávací zařízení p3 popotáhne řetěz o další rozteč. Řetěz následně vystupuje z linky a rovná se do ohradové palety, viz obr. 13, prostřednictvím které se převáží na další halu.



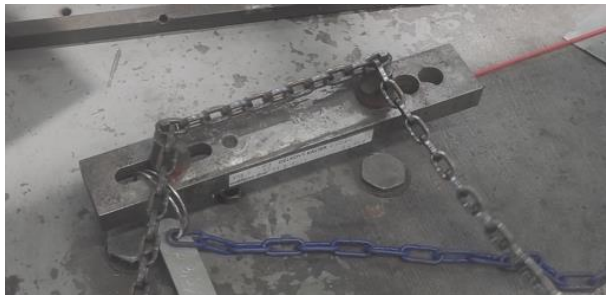
Obr. 13 Nekonečný řetěz.



Obr. 14 Kalibrování délky řetězu.

Před další operací se musí provést kontrola nekonečného řetězu, která se sestává z několika částí. V první fázi se musí provést vizuální kontrola svaru, kde se zjišťuje, zda jsou svary pravidelné, neobsahují návary a vypálený materiál vedle svaru. Během rozměrové kontroly se řetěz kontroluje dle dílenské normy, ve které jsou uvedeny všechny potřebné rozměry pro výrobu řetězu. Z důvodu rychlé kontroly se používají délkové kalibry pro měření přes 11 článků, viz obr. 15, kalibr pro maximální povolenou šířku článku a vnitřní rádius.

Technologické vlastnosti svaru se testují tahovou zkouškou, kde se řeší, zda řetěz nepraskl ve svaru. Dále na lámací zkoušce, kdy se článek láme v úhlu 90°, viz obr. 16, a vizuálně se kontroluje okolí svaru. Svar nesmí obsahovat žádné trhliny.



Obr. 15 Rozměrová kontrola 11 článků.



Obr. 16 Zkouška lámavosti.

Jelikož tepelně ovlivněná oblast představuje nejrizikovější oblast svaru, ve které nejčastěji vzniká lom, bude v praktické části proveden metalografický výbrus pro detailnější analýzu. Tento postup umožní detailnější pohled na mikrostrukturu svaru a okolní tepelně ovlivněné oblasti, včetně možného poklesu tvrdosti. Získané poznatky lze následně korelovat s parametry svařování a promítnout do stávajícího procesu výroby, což umožní optimalizaci a zvýšení kvality svarů.

Po provedení kontroly nastává fáze kompletizace stopového kříže, která se uskutečňuje na automatu zvaném Rombi, viz obr. 17. Vstupním materiálem jsou dva nekonečné řetězy a otevřené články maglie. Ty jsou pomocí vibračního dopravníku postupně vkládány do jednotlivých kleští umístěných na revolveru, který se postupně otáčí. Jeden z nekonečných řetězů vstupuje do dělicího zařízení, kde je vždy rozdělen na třináct článků a ty jsou poté nasazeny na otevřenou maglii, viz obr. 18.

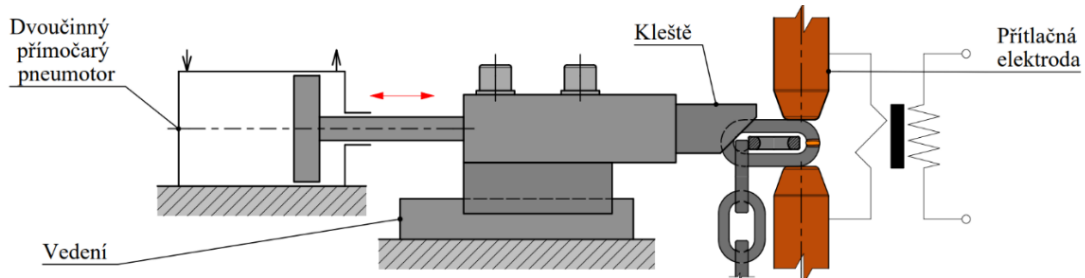
Druhý nekonečný řetěz je přiváděn po vodících lištách, přičemž v jednom místě dochází ke svaření s maglí natupo, které se od obr. 8 liší tím, že zde elektrody fungují současně jako přitlačníky i jako zdroj elektrického proudu, což je na obr. 19. Jednotlivé segmenty kříže jsou svařovány s roztečí 9 článků a poté se dělí po 11 článcích, čímž vzniká finální stopový kříž.



Obr. 17 Svařovací automat Rombi.



Obr. 18 Maglie se segmentem v kleštích.



Obr. 19 Schéma svařování maglie.

Když je stopový kříž zhotoven, následujícím krokem je tepelné zpracování, přičemž se využívá metoda chemicko-tepelného zpracování, konkrétně cementace. Stopové kříže jsou umístěny na dopravník, který je postupně přepravuje skrz cementační pec, viz obr. 20. V první zóně dochází za teploty 920 °C k nauhličení jejich povrchu. Samotná pec je vyhřívána kyslíko-acetylenovým plamenem a jako cementační médium se používá CO. Cílem je získat nauhličenou povrchovou vrstvu do hloubky (0,20 - 0,35) mm. Před dalším zpracováním, konkrétně kalením, se kříže ochladí na teplotu 830 °C, aby se předešlo nadměrnému napětí v materiálu a případnému praskání při ochlazování. Následně padají do chladicí lázně, která je složena z oleje a vody. Bezprostředně po kalení probíhá popouštění v popouštěcí peci, viz obr. 21, za teploty 230 °C. Tímto tepelným zpracováním se dosáhne vysoké povrchové tvrdosti (otěruvzdornosti) a současně houževnatého jádra. [17]

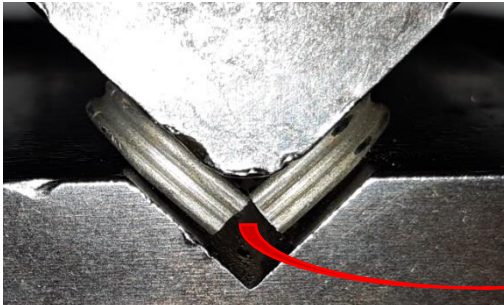


Obr. 20 Průběžná cementační pec [18].



Obr. 21 Průběžná popouštěcí pec [18].

Po tepelném zpracování se provádí kontrola cementované vrstvy a jádra pomocí stejného zařízení použitého pro předešlou lámací zkoušku, avšak zde je nutné, aby článek praskl, viz obr. 22. V místě lomu by měla být zřetelně vidět cementovaná vrstva, viz obr. 23. Zlomený článek se prasklou stranou zalije do pryskyřice a dělá se metalografický výbrus, na němž se následně provádí zkouška tvrdosti dle Vickerse. Tvrdost povrchu článku by měla dosahovat minimálně 700 HV5 a tvrdost jádra by měla být v rozmezí (300 – 500) HV5. [5]



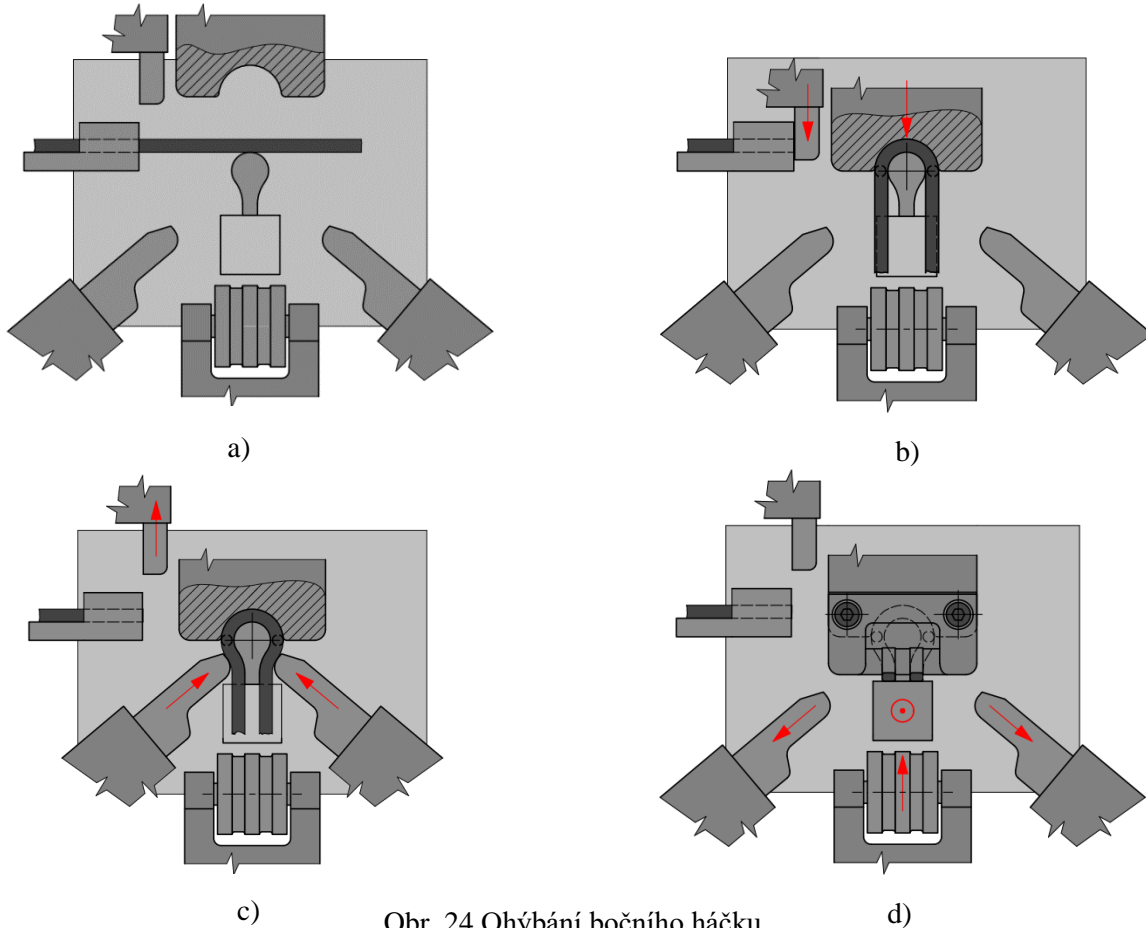
Obr. 22 Zkouška lámavosti po cementování [5].



Obr. 23 Cementovaná vrstva [5].

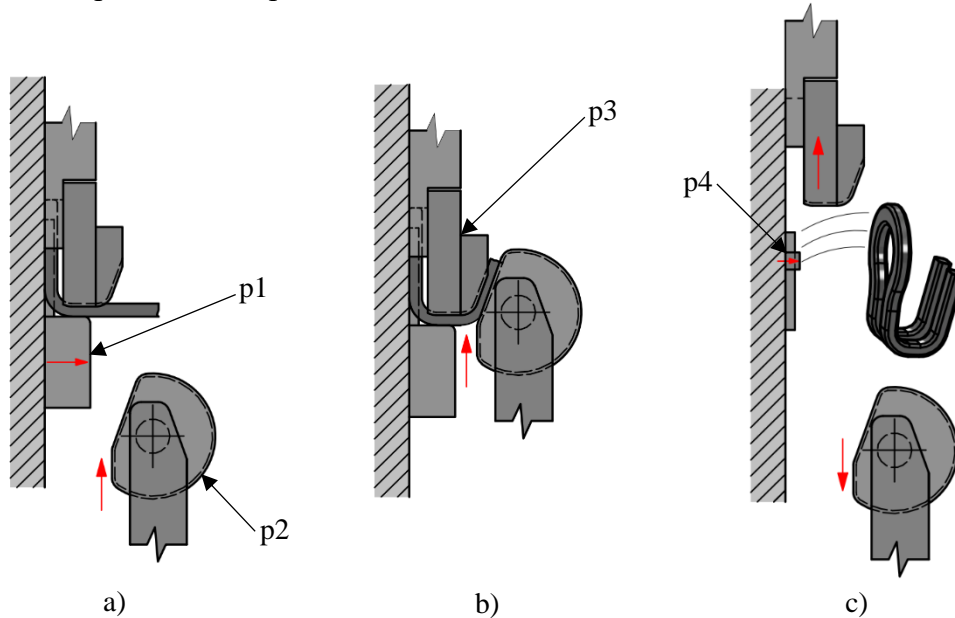
Během výroby stopového kříže dochází také k paralelní sériové výrobě bočního háčku. Ten je zhotoven z obdélníkového drátu 3,9 x 2,2 mm se zaoblenými rohy, kupovaný od firmy RCT. Materiál je nízkouhlíková konstrukční ocel s vysokou tažností bez další tepelné úpravy. [5]

Ohýbání probíhá obdobným způsobem jako u článků řetězu. Dávkovací zařízení přivede drát o přesně stanovené délce, viz obr. 24a. Drát se nejprve střížníkem ustříhne a poté se lisovníkem přitlačí na matrici, viz 24b. Stranové lisovníky následně drát přitlačí na matrici, viz 24c. V dalším kroku se vysune spodní ohybník, který ohne konce drátu směrem vzhůru tak, aby pak byly možné přitlačit dalším lisovníkem k horní části prvního lisovníku, viz 24d.



Obr. 24 Ohýbání bočního háčku.

Na obrázku 25 je proces zobrazen v bokoryse. Jakmile je drát nabalený na matrici, vysune se ze základové desky ohybník p1, který ohne volné konce drátu směrem vzhůru. Následně lisovnik p2 ohne volné konce a přitiskne k horní části lisovníku p3, která vlastně slouží jako matrice. V poslední řadě nástroje odjedou a vysunou se vyhazovače p4, které umožní vyjmutí součásti, která pak následně padá skluzem do zásobníku.



Obr. 25 Ohýbání volných konců bočního háčku.

Boční háček, stopový kříž a některé zakoupené díly, viz tab. 1 p1-7, procházejí procesem galvanického zinkování na lince Novodur na obr. 26. První krok zahrnuje vážení vsázky, na základě čehož se stanoví velikost proudu při zinkování. Dále se vsázka umístí do galvanických bubnů pro hromadné zinkování, které jsou mezi jednotlivými fázemi procesu přemísťovány za pomoci portálu. V první fázi nastává hrubý chemický oplach ve vodném alkalickém roztoku, jehož hlavní složku tvoří hydroxid sodný (louh). Ten je předehřátý na vyšší teplotu, což zajistí, že se do odmašťovadla emulgují i složitější mastnoty. Následuje proces moření v kyselině chlorovodíkové, které má za úkol odstranit rez a případné okuje. Mezi jednotlivými operacemi jsou nezbytné vodní oplachy pro odstranění zbytků lázní z povrchu součásti. [19; 20]



Obr. 26 Galvanická linka.



Obr. 27 Kontrola únosnosti [5].



Obr. 28 Kontrola povlaku [5].

Před nanášením povlaku se provádí ještě operace elektrolytického odmaštění a dekapování, což zajistí lepší kvalitu povlaku. Samotné povlakování probíhá ponořením do chloridové lázně, kdy se na buben za současné rotace přivádí katodický proud, který se přenáší na součásti. Proces trvá okolo 50 minut a vzniká povlak tloušťky zhruba 8 μm . Aby řetěz dostal hladký lesklý povrch, provádí se ještě pasivace povrchu modrým chromátem. Výstupem z linky jsou hotové díly, které se odstředivě suší a jsou připravené pro kompletizaci řetězu. [19; 20]

Zhotovený stopový kříž se následně kontroluje na minimální povolenou únosnost 520 kg na trhacím stroji, kdy se upne do Y, jak je vidět na obr. 27. Zinková vrstva se kontroluje pomocí digitálního tloušťkoměru Elcometer, viz obr. 28.

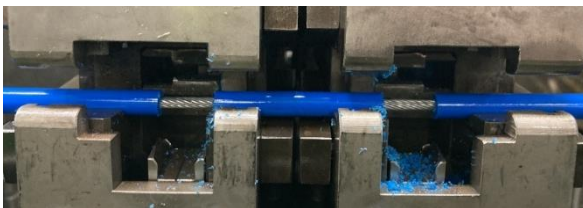
Dalším klíčovým komponentem pro finální produkt je boční lano. Výchozím polotovarem pro jeho výrobu je cívka s jednopramenným ocelovým lanem o průměru 4 mm. Prvním krokem je mechanické očištění od veškerých nečistot následované nanášením plastu. Při této operaci se na lano aplikuje polyethylenová vrstva o tloušťce 2,5 mm. To se provádí na stroji, viz obr. 29, kde se materiál průchodem šneku postupně taví a dostává do extruderu. Tam se nanáší na lano při teplotě 235 $^{\circ}\text{C}$. Tloušťka nanesené vrstvy je adekvátní počtu otáček šneku. Vrstva je pak kalibrována na přesný průměr, konkrétně 9 mm, pomocí výstupní trysky. Aby plast k lanu řádně přilnul, udržuje se v celém extruderu podtlak pomocí vývěvy. Po aplikaci plastu prochází lano žlabem s chladicí vodou, čímž dojde k zatuhnutí plastu a vytvoření pevné a stabilní vrstvy.



Obr. 29 Extruder polyamidu.



Obr. 30 Značení lana.



Obr. 31 Vysekávání poplastování.



Obr. 32 Ostatní komponenty lana [5].

Takto poplastované lano se následně dělí na segmenty o délce 1680 mm. Na speciálním stroji je poté do segmentů vysekáno šest otvorů pro boční háčky, viz obr. 31. Taktéž konce lana jsou ostříženy pro možnost nalisování blokátorů a na povrchu lana je v jednom místě vypáleno sériové číslo, viz obr. 30. Poté se na jeden konec lana nasadí žlutá bužírka a nalisují dva blokátory, na druhý konec se nalisuje blokátor a k němu lanový uzávěr, viz obr. 32.

Poslední vyráběný díl je zkracovací háček, který se vyrábí z polyamidu s 2 % barvy, 30 % skla, což zajišťuje vysokou pevnost na úkor snížení houževnatosti. Jako výrobní zařízení se používá vstřikovací lis Battenfeld na obr. 33. Materiál je vpravován do násypky šneku ve formě granulí, jež se před začátkem procesu suší za teploty 80 $^{\circ}\text{C}$. Ve šneku dochází k postupnému tavení materiálu, který je následně vstřikován do formy při teplotě 285 $^{\circ}\text{C}$, kde je ve finální fázi dotlačen šnekem pod tlakem 1200 barů. Aby se zvýšila efektivita výroby, používá se vícedutinová forma, viz obr. 34. Pro lepší zatečení plastu je forma vyhřívána na teplotu 90 $^{\circ}\text{C}$.

Následuje fáze chlazení a poté se háček pomocí vyhazovače vyjme a zbaví od jakékoliv přebytečné blány.



Obr. 33 Vstřikovací lis.



Obr. 34 Vstřikovací forma háčku.

Jakmile jsou zhotoveny všechny výše uvedené části, provádí se finální montáž celého řetězu. Je realizovaná podle montážního výkresu (příloha 1) prostřednictvím systému, kde každý pracovník provádí všechny montážní operace samostatně na svém pracovišti. Během montážního procesu se využívají základní lisovací operace, provádí se namátkové měření a kontrola jednotlivých článků, a také nacvaknutí plastových dílů.

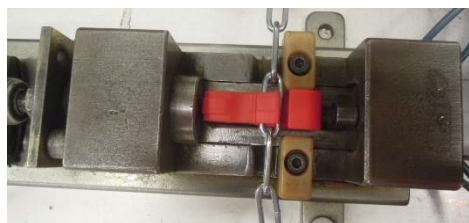
Jako první se spojí stopové kříže s bočním lanem a bočními řetězy prostřednictvím bočních háčků. Do těch se zahákne poslední článek stopového kříže a pomocí ručního lisu se ohnou oba konce bočního háčku, viz obr. 35. Musí se při tom současně dbát na to, aby byl řetěz v bočním háčku volně otočný. Potom se k řetězu připevňují pomocí ručního lisu ostatní nakupované díly, a sice pryžový napínač, ráčna pomocí háčku, viz obr. 36, 38. V neposlední řadě se na boční řetězy nalisují plastové díly, viz obr. 37.



Obr. 35 Ruční lis pro ohýbání konců bočního háčku [5].



Obr. 36 Lisování háčku ráčny [5].



Obr. 37 Zalisování plastových dílů [5].



Obr. 38 Lisování pryžového napínacího prvku [5].

Takto zkompleťovaný řetěz se pak dává do páru s jiným řetězem a jsou zabaleny tak, aby byly vzájemně odděleny a přešlo se propletení. Páry řetězů se poté umísťují do plechových přepravků ve třech vrstvách, přičemž v prvních dvou vrstvách je 36 párů řetězu a v poslední vrstvě je 28 párů. Přepravky se zasílají do České Třebové, kde dochází k balení do kufrů, tašek, krabic a posílají se na expedici do světa. [5]

2 SVAŘOVÁNÍ ČLÁNKŮ ŘETĚZU

Svařování představuje technologii nerozebíratelného spojení dvou a více materiálů, která má klíčovou roli v mnoha průmyslových aplikacích. Jednou z nich je svařování článků sněhových řetězů, zhotovených z uhlíkové oceli 15Mn3Al, kde je nutno zajistit mimořádnou pevnost svarového spoje. Materiál se vyznačuje nízkým obsahem uhlíku a legujících prvků, což by mělo zajistit optimální podmínky při svařování. Jako metoda svařování se doposud používala technologie odporového svařování natupo. Tento způsob svařování se pro danou aplikaci používá, jelikož oproti ostatním metodám svařování vyniká jedinečnými vlastnostmi, které budou podrobněji popsány společně se základy odporového svařování a metalurgickými pochody odporového svařování nízkouhlíkových ocelí v následující kapitole.

2.1 Svařování elektrickým odporem

Jednotlivé články sněhových řetězů jsou svařovány pomocí metody svařování elektrickým odporem, která se řadí mezi metody tlakového svařování. Jedná se o elektro-mechanický proces, při kterém vzniká svarový spoj působením tlaku za současného průchodu elektrického proudu, kdy zdrojem tepla je odporové teplo vznikající v místě největšího odporu podle Joule-Lenzova zákona. Výhodou odporového svařování je převážně to, že nevyžaduje přídavný materiál, ale svarový spoj vzniká přímo roztavením svařovaných dílců. Mezi další přednosti této metody patří vysoká kvalita svaru a možnost mechanizace a automatizace. Níže jsou uvedeny další charakteristiky odporového svařování [14; 21; 22; 23]:

- možnost svařování ve všech polohách,
- možnost svařovat většinu kovových materiálů v rozsahu tlouštěk (0,4 až 10) mm,
- vysoká rychlost svařování - svařovací čas (0,04 – 2) s,
- vysoké střídavé svařovací proudy, až 100 000 A,
- nízké svařovací napětí (0,5 - 30) V a rovněž elektrický odpor součástí ($10^{-2} - 10^{-5}$) Ω ,
- svařovací tlak (15 až 200) MPa,
- použití pro sériovou a hromadnou výrobu (zejména automobilový průmysl).

Podstatou elektrického odporového svařování je soustředění tepla do místa, kde se má svařovat. Teplo, které vznikne během průtoku elektrického proudu I_s mezi elektrodami za čas t , je dáno Joule-Lenzovým zákonem [14; 23; 24]:

$$W = Q = \int_0^t R(t) \cdot I_s(t)^2 dt \quad (2.1)$$

kde: W – elektrická práce [J]

Q – množství tepla vznikajícího mezi elektrodami [J]

R – celkový pracovní odpor mezi elektrodami [Ω]

$$R = R_e + R_{mat} + R_p \quad (2.2)$$

kde: R_e – elektrický odpor obou elektrod (R_6, R_7) [Ω]

R_{mat} – elektrický odpor svařovaných materiálů (R_2, R_4) [Ω]

R_p – elektrický odpor styků (přechodové odpory R_1, R_3, R_5) [Ω]

I_s – svařovací proud [A]

dt – diferenciál času [s]

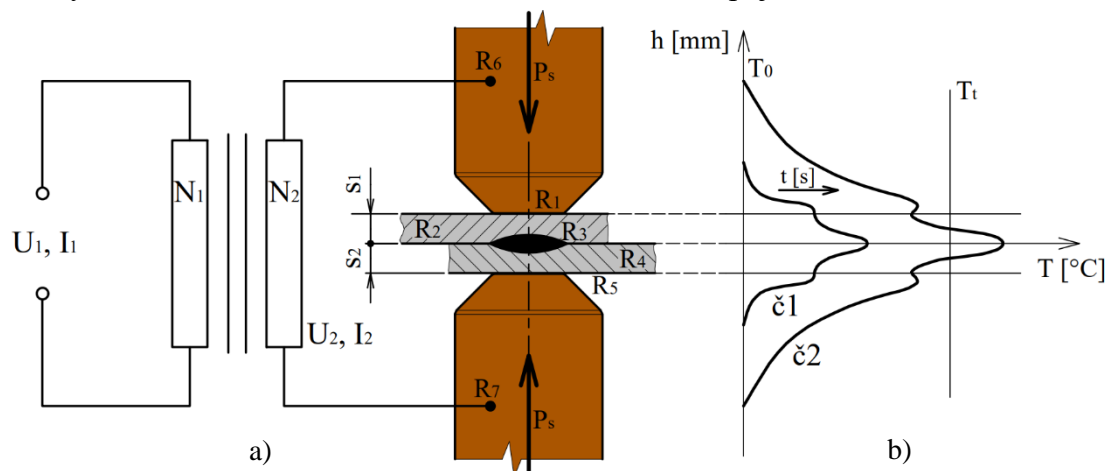
t – svařovací čas (čas působení proudu) [s]

Elektrická práce ze vztahu 2.1 je rovna součinu elektrického odporu, čtverci proudu a doby, po kterou se práce koná. Ta se přemění na teplo Q s účinností téměř 1 a jedná se o nejdokonalejší přeměnu elektrické energie. Teplo vzniká prostřednictvím srážek elektronů s částicemi vodiče. Uspořádaný pohyb elektronů se brzdí a elektrony předají část své kinetické energie částicím ve vodiči. Díky průchodu proudu vodičem se tedy zvyšuje vnitřní energie a tím i teplota. [24]

Z rovnice 2.1 vyplývá, že pro docílení dané teploty je možné regulovat pouze svařovací proud I_s a čas t (odpor je daný). Při elektrickém odporovém svařování se nejčastěji používá střídavý proud, proto je funkcí času. Rovněž elektrický odpor je funkcí času, jelikož se s časem mění teplota, jež má na odpor vliv. Celkový elektrický odpor svařovací soustavy je tvořen několika dílčími částmi, viz obr. 39 a [14; 16; 25]:

- odpor elektrod R_6, R_7 ,
- přechodové odpory mezi elektrodami a svařovanými materiály R_5, R_1 ,
- vlastní (ohmický) odpor svařovaných materiálů R_2, R_4 ,
- přechodový odpor mezi svařovanými materiály R_3 .

Každý z těchto odporů je funkcí teploty, přechodové odpory jsou výrazně ovlivněny drsností povrchu svařovaných materiálů a elektrod a tlakem mezi elektrodami. Odpor materiálů závisí na rozměrech vodiče, směru průchodu proudu a měrném odporu materiálu. Přechodové odpory R_5, R_1 a odpory elektrod R_6, R_7 jsou nežádoucí. Největší ze všech odporů je přechodový odpor R_3 , což způsobí, že se soustava nejvíce ohřívá v místě styku dvou svařovaných materiálů, viz obr. 39 b (č1 – po době 0,02 s, č2 – po době 0,1 s). Ohřev má za následek, že se část materiálu dostává do pásma natavení T_t a v blízkém okolí do plastického stavu (nebo jen do plastického stavu při svařování natupo bez odtavení). V poslední fázi dojde ke stlačení svařovaných materiálů elektrodami tlakem P_s , čímž vzniká spoj. [14; 16; 22; 23]



Obr. 39 a) schéma elektrického odporového svařování, b) průběh teplot [14].

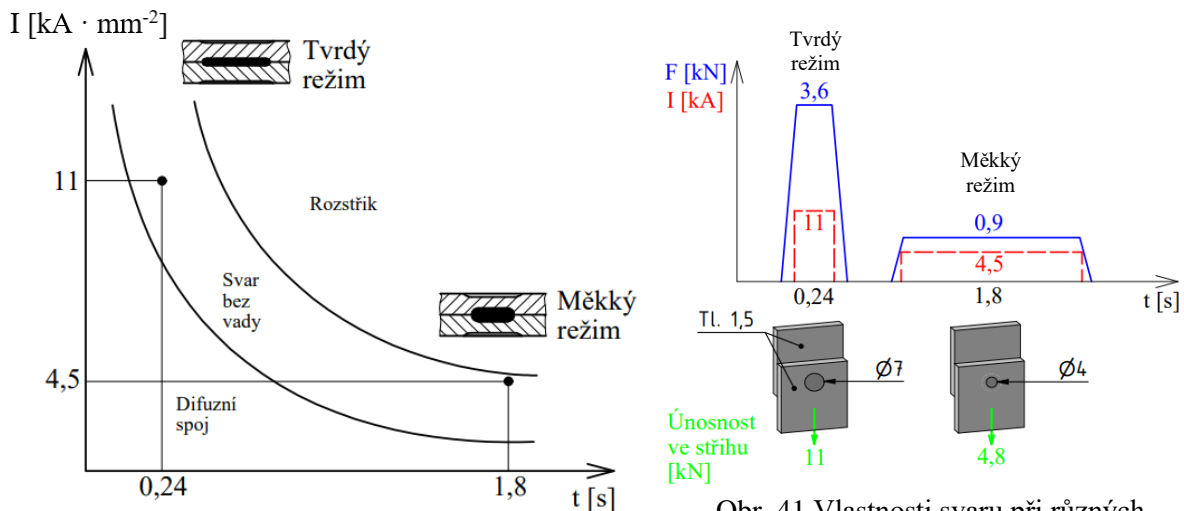
2.1.1 Parametry odporového svařování

Základní parametry svařování elektrickým odporem jsou svařovací proud, svařovací čas a tlak. Podle variace svařovacích parametrů se dělí svařování na dva základní režimy. Ze vztahu 2.1 vyplývá, že potřebné množství tepla pro natavení materiálu a vytvoření spoje je možné dosáhnout dvěma způsoby (hodnoty platí pro svařování natupo) [14; 23]:

- Měkký svařovací režim – používá se malého svařovacího proudu (do $20 \text{ A} \cdot \text{mm}^2$) a dlouhého času svařování pro dosažení požadovaného tepla za současného působení nízkých tlaků na elektrodách ($2 \div 4$) MPa. Příklady svařovacích parametrů viz. obr. 39.
- Tvrdý svařovací režim – používá se vyšší svařovací proud (nad $20 \text{ A} \cdot \text{mm}^2$) a kratší čas svařování za současného působení vysokých tlaků (nad 4 MPa).

Měkký režim se vyznačuje nižší produktivitou, vyššími deformacemi a možností použití strojů o nižším příkonu. Vlivem delšího svařovacího času je zde větší ztráta tepelné energie vedením do okolí. Díky tomu jsou elektrody více namáhané a musí se často měnit. V případě bodového svařování má svar díky delšímu silovému působení větší otlaky od elektrod. Svarová čočka má malý průměr, velkou výšku a hrubozrnnou strukturu, což vede k nižší pevnosti, viz obr. 41. Dochází také k většímu tepelnému ovlivnění a větším deformacím. Používá se spíše pro svařování pokovovaných materiálů, kde nanesený kov potřebuje dostatek času pro vytečení z místa svaru. Dále se dá použít pro materiály s vyšším obsahem uhlíku, a tedy větší náchylností k zakalení. [14; 16; 21; 23; 26]

U svařování článků řetězů by nebyl měkký režim vhodný z důvodu delšího svařovacího času. Tedy se používá režim tvrdý, jímž je docílena jemnozrnnější struktura, minimální napětí a deformace, malá tepelně ovlivněná oblast a nízká spotřeba elektrické energie. S vyšším přitlakem elektrod klesá přechodový odpor a elektrody jsou méně tepelně namáhány. Svarová čočka má větší průměr (zhruba průměr elektrody, smyková síla se rozloží na větší plochu), menší tloušťku (zhruba 30 % celkové tloušťky obou plechů) a svar má menší otlaky. Rozmezí svařovacích režimů a tvary čoček jsou vidět na obrázku 40. Stroje však musí mít větší příkon a silnější konstrukci pro větší přitlačné síly. V případě stykového svařování je častější použití tvrdého režimu, aby se právě zabránilo nepříznivým vlivům na strukturu. [14; 16; 22; 23]



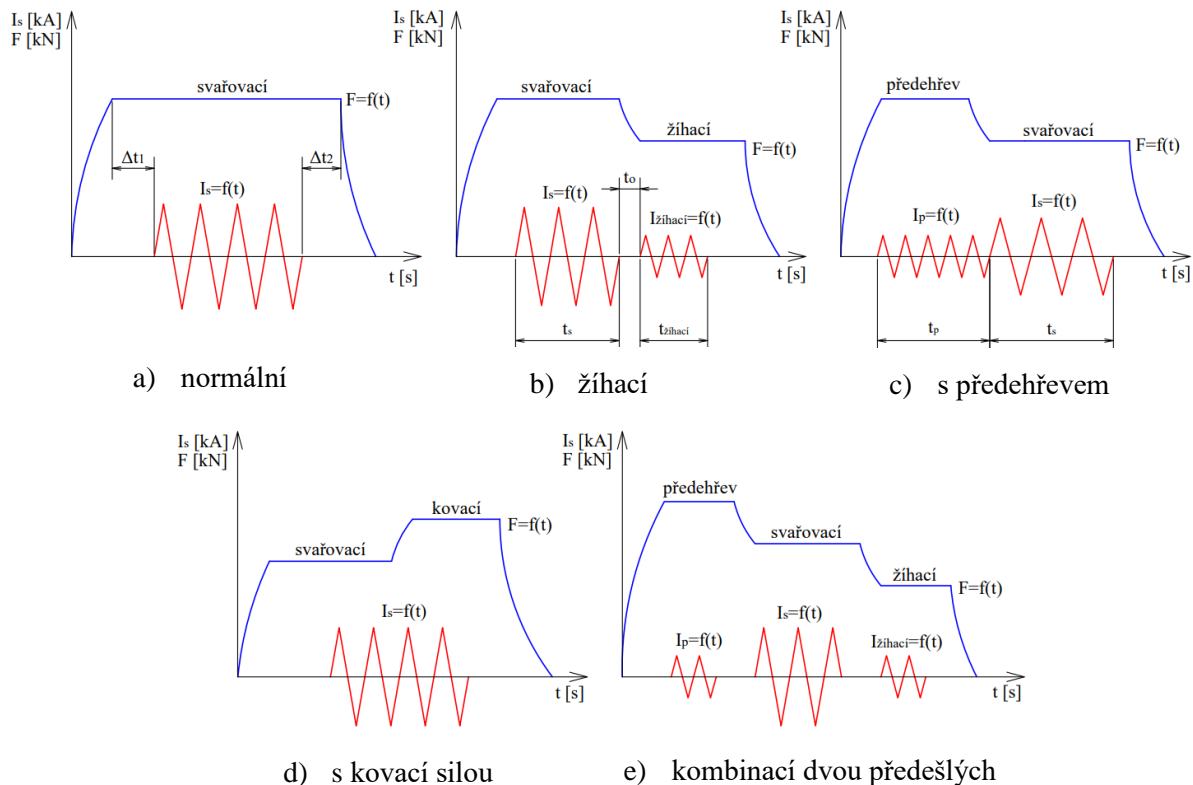
Obr. 40 Závislost proudu na čase [14; 16].

Obr. 41 Vlastnosti svaru při různých režimech [22; 27].

Další modifikací svařovacích parametrů, které mají vliv na dynamiku procesu, tedy vznik svaru, metalurgické pochody a finální vlastnosti svaru je svařovací program. Jedná se o průběh svařovacího proudu a přitlačné síly, které působí v různých kombinacích. Svařovací programy lze doplnit o další operace, jako například předehřev, dohřev, žíhání apod. Jednotlivé svařovací cykly jsou na obrázku 42. [23; 26]

Nejčastější je svařovací cyklus s konstantní silou a konstantní jmenovitou hodnotou střídavého proudu na obr. 42a. Je zde časová prodleva Δt_1 před zapnutím proudu pro zajištění správného kontaktu, přitlačná síla by měla být konstantní do doby, než teplota svaru klesne pod $400\text{ }^\circ\text{C}$, v opačném případě by mohlo dojít k tvorbě staženin ve svaru. Pro náročnější případy se však parametry během svařování mohou měnit. Pro materiály s vyšším obsahem uhlíku, a tedy náchylné na vznik martenzitické struktury, se může použít kromě měkkého režimu cyklus s předehřevem, viz obr. 42c nebo dohřevem. Tímto předběžným nahřátím se také zlepší kontakt svařovaných součástí, jelikož změknou. Při použití měkkého režimu se pak dále dá použít žíhací cyklus na obr. 42b, který normalizačně vyžihá součást a dojde tak ke zjemnění struktury. Tento program také může snížit rychlost ochlazování, a tedy zamezit vzniku velkého vnitřního napětí. Časová prodleva t_0 zde pak je u metod, kde dochází k tavení a umožňuje zatuhnutí. [14; 26]

Pro dosažení lepších mechanických vlastností svaru lze použít kovací program, viz obr. 42d, který lze ještě zefektivnit postupně stoupajícím tlakem. Programy lze dále také modifikovat např. jejich kombinací, jako je na obr. 42e, případně přidáním vyšší došedací síly apod. [26]



Obr. 42 Svařovací režimy [23; 26; 27].

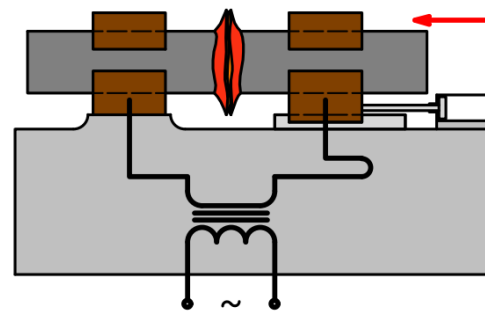
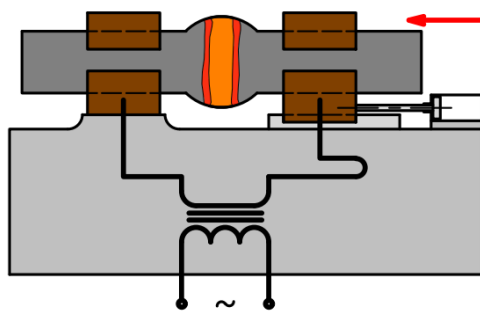
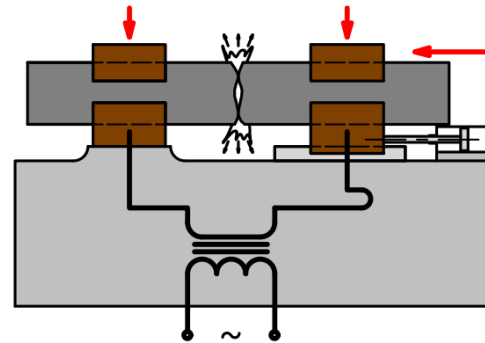
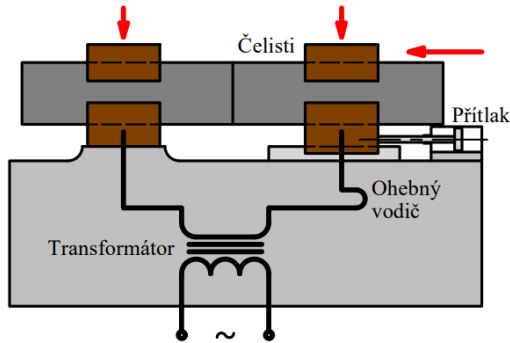
2.1.2 Metody odporového svařování

Podle pracovního postupu a způsobu uspořádání elektrod je možné odporové svařování rozdělit na čtyři druhy [16; 22]:

- bodové svařování – spojování dvou a více přeplátovaných plechů, přičemž svar netěsní,
- švové svařování – spojování přeplátovaných plechů přerušovaným/nepřerušovaným svarem za pomoci kotoučových elektrod,
- výstupkové svařování (bradavkové) – spojování materiálů prostřednictvím výstupků, ve kterých se kumuluje proud a taví je, přičemž výstupek může být jeden nebo jich je více,
- stykové svařování (natupo) – spojování dvou materiálů v celých styčných plochách,
 - s odtavením (pěchovací),
 - bez odtavení.

Článek řetězu má charakter dvou spojovaných čelních ploch, musí být tedy použita jedna z metod stykového svařování. Stykové svařování s odtavením probíhá tak, že dílce se ještě před stlačením připojí na zdroj nízkého napětí, aby nevznikl elektrický oblouk. Dílce se k sobě začnou poté přibližovat malou rychlostí (zhruba $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), přičemž se začnou dotýkat na jednotlivých místech. Díky malé stlačovací síle (blížíci se nule) vznikají v těchto místech proudové můstky, a tedy vysoký elektrický odpor. To má za následek, že se materiál v místě dotyku nataví a část roztaveného kovu vystříkne z místa svaru. Díky tomu je svar chráněn před okolní atmosférou. V místě bývalého můstku je kráter vyplněn taveninou. S dalším přiblížením se počet styčných bodů zvětšuje, až se celý svařovaný povrch pokryje taveninou. [14; 16]

Potom následuje druhá fáze, a sice stlačení. Když jsou dílce natavené na čelech, stlačí se zvýšenou silou, přičemž se proud vzápětí vypne. Roztavený kov za současného silového působení vytvoří svar. Část ohřátého materiálu se vytlačí mimo svar a vytvoří výronek, který je následně nutno opracovat. Tento způsob se používá spíše pro velké průřezy, kde by bylo příliš energeticky náročné používat metodu bez odtavení. Navíc se zde musí počítat s vyššími délkovými přídávky z důvodu fáze odtavení. Celý proces je zobrazen na obr. 44. [14; 22; 28]



Obr. 43 Stykové svařování bez odtavení [29].

Obr. 44 Stykové svařování s odtavením [29].

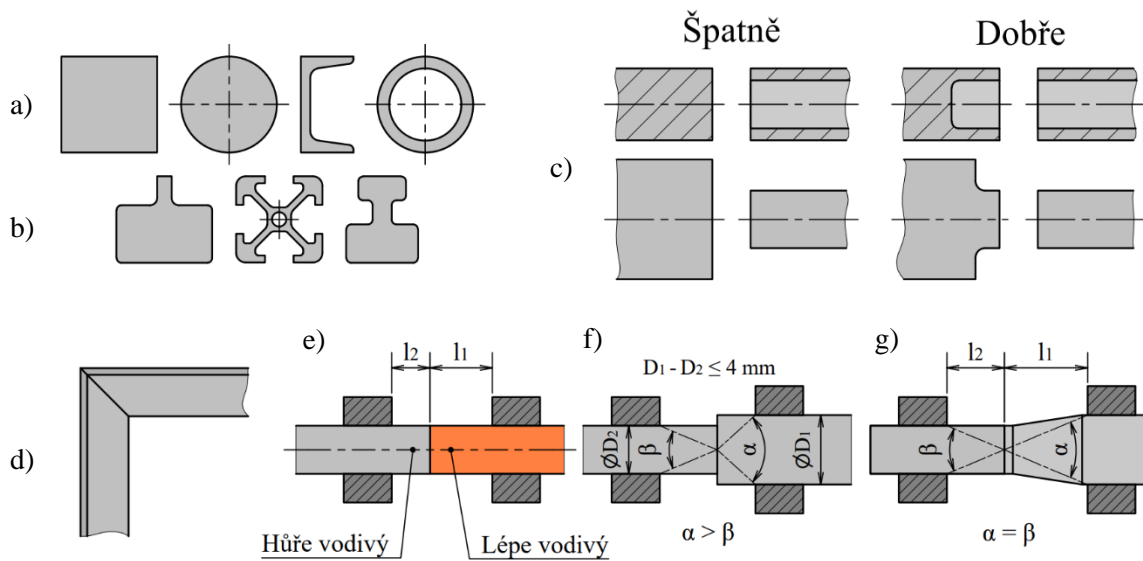
Pro svařování článků řetězu je jediná možná technologie stykového svařování bez odtavení. Jedná se o způsob svařování, při kterém jsou spojované součásti (nejčastěji tyče a dráty) přitlačeny k sobě čely. Na rozdíl od předchozí metody se zde proud přivádí až po přitlačení elektrod k sobě. Při průchodu elektrického proudu se v tomto místě největšího odporu materiál nahřeje a spojí. Proud se do součástí přivádí díky čelistem, které mají jak funkci elektrod, tak funkci přítlačníků a musí zamezit proklouznutí materiálu při přitlačování, viz obr. 43, případně se použijí opěrky (pro velké tlaky). V případě svařování článků řetězu by nebylo čelistové upnutí možné, a tak jsou zde elektrody a přítlačníky zvlášť, viz obr. 8. [14; 22]

Při procesu se dosahuje teploty blízké bodu tavení. Svařovaný materiál se ze svaru částečně vytlačuje a vytváří výronek, který se podle potřeby musí odstranit. Součásti se tedy zkrátí, ale méně než u metody s odtavením. Po vypnutí svařovacího proudu, ochlazení a ztuhnutí materiálu vzniká difuzní svarový spoj. Teprve poté se uvolní tlak přítlačníků. Z důvodu vysoké energetické náročnosti se tímto způsobem svařují dráty a tyče menších průměrů. [14; 22]

Konstrukční zásady při stykovém svařování:

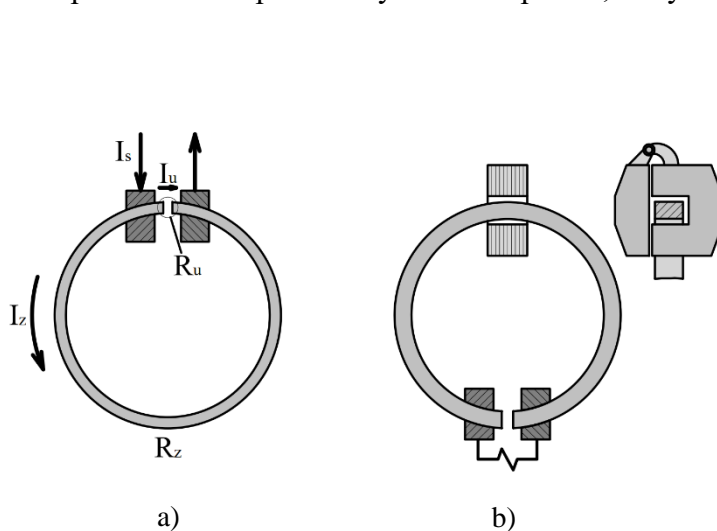
Stykové svařování se hodí pro svary nejčastěji tyčí a drátů s podobnou tloušťkou stěn průřezu, viz obr. 45 a. Méně vhodné je pak pro průřezy s velmi rozdílnou tloušťkou stěn, viz 45 b. Při svařování tyčí různé jakosti či různého průřezu, kde platí podmínka průměrů viz. 45 f, je nutno zajistit tepelnou rovnováhu. Ta je narušena vlivem rozdílných tepelných vodivostí a odporů materiálů. Rozdíly je možno kompenzovat vyložením svařovaných dílů, kde délka vyložení by měla být přímo úměrná vodivosti materiálů, viz 45 e, případně nepřímo úměrná průřezu. Když je rozdíl průřezů větší než plyne z podmínky, tak je nutno vytvořit pozvolný přechod, čímž se vyrovnají úhly odvodů tepla, viz 45 g. [15; 22; 29]

V případě svařování rozdílných průřezů by se v místě svaru měly upravit tak, aby byly stejné, viz 45 c. Samozřejmě je nutné zajistit jejich správný poměr vyložení. Sváret lze i součásti do pravého úhlu na speciálně upraveném stroji pro svařování s odtavením, viz 45 d. [15; 22; 29]

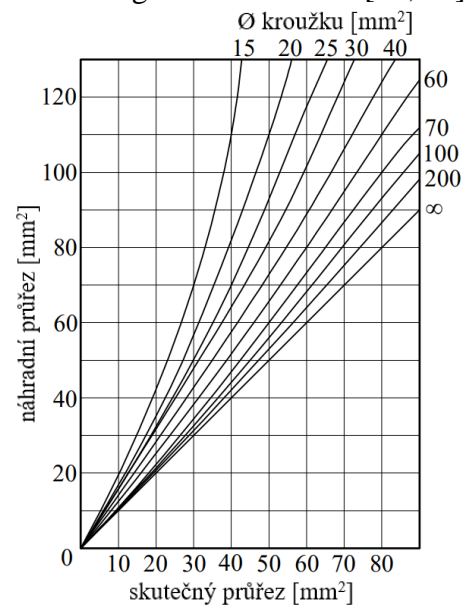


Obr. 45 Konstrukční zásady stykového svařování [15; 27].

Zvláštním případem je pak svařování uzavřených součástí z jednoho kusu. Jsou to například zděre, obruče, kruhy (charakter článku řetězu), viz obr. 46 a. Tyto součásti se svařují obtížněji než tyče otevřeného průřezu, neboť soudržným materiálem součásti odchází značná část nevyužitého proudu. Ztráty jsou tím větší, čím menší je průměr kruhu, větší jeho průřez a čím elektricky vodivější je, jak plyne ze vztahu 2.3. Dají se částečně zmenšit použitím tlumícího otevíracího jádra, složeného z transformátorových plechů, který obepíná řetěz na jednom místě, viz obr. 46 b. Další nevýhodou je, že k překonání tuhosti kroužku se spotřebuje část pýchovací tlaku, která roste se zmenšováním průměru kroužku, a klesá svařitelný průřez. Z tohoto důvodu je nutno použít silnějších strojů než pro otevřené průřezy, přičemž se svařička musí přenastavit na přidružený náhradní průřez, který se odečte z diagramu na obr. 47. [15; 22]



Obr. 46 a) svařování uzavřených průřezů b) použití tlumícího jádra při svařování uzavřených těles [15; 22; 30].



Obr. 47 Zdánlivý náhradní průřez pro uzavřený profil [22].

Pro svařovací proud protékající obvodem podle obr. 46a platí vztah [30]:

$$I_s = I_u + I_z = \frac{U}{R_u} + \frac{U}{R_z} \quad (2.3)$$

kde: I_u – užitkový proud [A]

I_z – proud ztrátový [A]

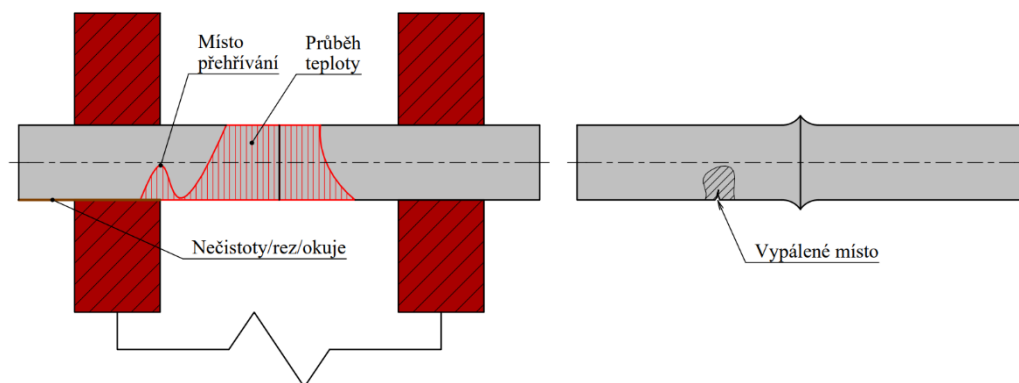
U – napětí na zdroji [V]

R_u, R_z – elektrické odpory jednotlivých větví [Ω]

Je potřeba zajistit, aby platila podmínka $R_z \gg R_u$. V takovém případě pak podle Ohmova zákona ze vzorce 2.3 vyplývá, že $I_u \gg I_z$. Většina proudu bude tedy protékat horní větví, kde má vzniknout svar. Odpor je zde menší, nicméně ze vztahu 2.1 plyne, že vznikající teplo je přímo úměrné odporu a čtverci proudu. Proud má tedy na vývin tepla mnohem větší vliv. [30]

Díky výše zmíněným nedostatkům se tento způsob svařování používá jen pro menší a slabší segmenty, jako jsou právě sněhové řetězy. Technologicky výhodnější je svařování článků ze dvou polovin, jelikož umožňuje použít odtavovací způsob, odpadájí těžkosti s odbočováním proudu, a tedy přehříváním článku naproti svaru a nedochází k přemáhání tuhosti článku. [22]

Na rozdíl od ostatních metod svařování elektrickým odporem se u stykového svařování nemusí klást vysoké požadavky na stav čelního povrchu svařovaných dílů. Všechny nečistoty, jako například rez, okuje, jsou přípustné, pokud dovolují průtok proudu. Z definice odtavovacího svařování plyne, že jsou přípustné i neobrobené, nerovné plochy nebo šikmé řezy vzniklé například stříháním. Naopak v případě drsnější plochy vznikají na součásti proudové můstky a ty umožňují intenzivnější ohřev, přičemž se přesahující části odtaví. Plochy, na které se kladou největší požadavky jsou plochy styku elektrod. V případě výskytu nečistot, rzi nebo okují zde vzniká vyšší přechodový odpor. Zde by se pak materiál příliš přehříval a mohlo by dojít k poškození elektrod, případně vzniku vypálených kráterů nebo trhlin na svařenci, jak je vidět na obr. 48. [22; 27; 29]



Obr. 48 Vady vlivem nečistot, okují a rzi na upínací ploše [27].

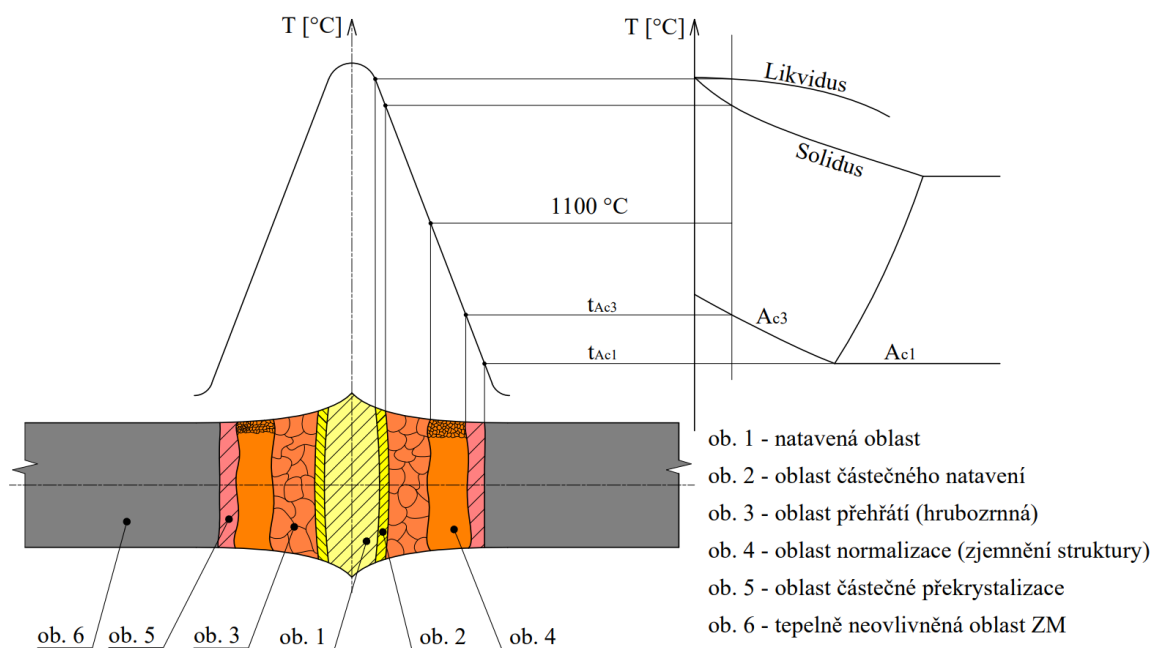
2.2 Metalurgie a struktura svarového spoje

Elektrickým odporovým svařováním lze z metalurgického hlediska udělat dva typy svarů [29]:

- Tavné svary – vyznačují se vysokou kvalitou, probíhají v rozmezí teplot zhruba 50 °C nad čarou likvidu. Tyto svary se uplatňují u všech metod odporového svařování, kromě svařování natupo bez odtavení.
- Difuzní svary – pevnost svaru zpravidla roste, jestliže se svarová oblast hloubkově rozšíří. Probíhají za teploty v pásmu těsně pod teplotou solidu v oblasti austenitu. Používá se u odporového svařování natupo nebo při špatném nastavení parametrů.

Jelikož při odporovém svařování dochází k ohřevu velmi rychle (až $100\,000\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$), příslušné přeměny v oblastech křivek A_{c1} , A_{c3} probíhají za vyšší teploty, než je tomu při pomalém ohřevu. Při rychlém ohřevu tedy nastává hrubnutí austenitických zrn při vyšší teplotě a trvá kratší dobu (zvláště pak u tvrdého režimu). Oproti jiným metodám svařování nedochází tedy k tak velkému zhrubnutí zrna v oblasti svaru. Současně velký přítlačný tlak nedovoluje vzniku velkých zrn, ba naopak podporuje vznik jemnějšího zrna a například u metod s odtavením má svar mnohem lepší vlastnosti, než má odlitek. [22; 26; 29]

V případě stykového svařování s odtavením nízkouhlíkové oceli jsou teplotní poměry v závislosti na struktuře zobrazeny na obr. 49. Vznik svaru je tu charakterizován přítomností velmi malého objemu taveniny a tepelně ovlivněnou oblastí (TOO) základního materiálu (ZM) vytvořenou tepelně-deformačními cykly při jednotlivých fázích svařování. V bezprostředním styku obou materiálů vzniká natavená oblast s dendritickou lící strukturou. Šířka tohoto pásma je odvislá od svařovacích parametrů, nicméně se jedná řádově o desetiny milimetru. [29]



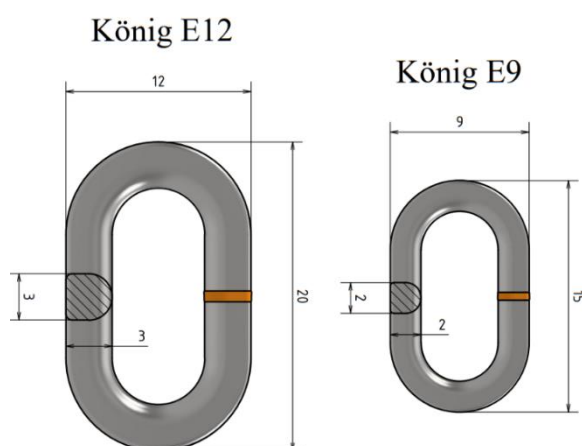
Obr. 49 Vliv teploty na strukturu svarového spoje zhotoveného stykovým svařováním s odtavením [29].

Ve směru klesajícího teplotního gradientu navazuje oblast natavení na hranicích zrn 2, která je rovněž velmi úzká. Bezprostředně vedle oblasti 2 je zde pásmo, jež je ovlivněno deformačním procesem a vyznačuje se poměrně jemnozrnnou strukturou. Tato oblast přechází do pásma přehřátí, které se vyznačuje hrubozrnnou strukturou. Oblast 4 odpovídá teplotám těsně nad A_{c3} , kdy dochází vlivem normalizačního žíhání ke zjemnění struktury. Oblast 5 je vymezena teplotami A_{c1} a A_{c3} . Struktura se přeměňuje na zrnitou a perlit se snaží přeskupit a shlukovat. Oblast těsně pod teplotou A_{c1} se může zřídka projevit např. zjemněním tažené struktury. Poslední oblast 6 je tepelně neovlivněný základní materiál. Obecně lze říci, že dojde k porušení svaru právě v TOO kvůli její hrubozrnnější struktuře, která má za následek nepříznivé mechanické vlastnosti. [26; 29; 31]

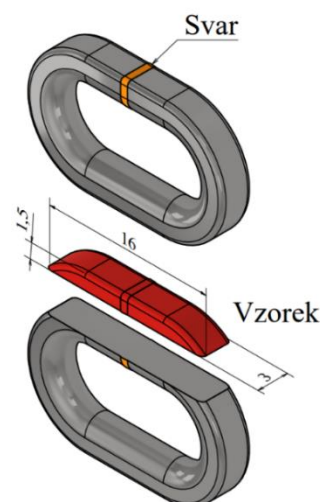
V případě stykového svařování bez odtavení svar vzniká pod teplotou solidu, a jak již bylo zmíněno, má difuzní charakter. Spoj zde vzniká největším přiblížením stykových ploch, kdy prostřednictvím lokální plastické deformace je zaručena vzájemná difuze v povrchových vrstvách, přičemž pronikají atomy z mřížek krystalu jednoho kovu do mřížek krystalu druhého kovu. Výhodou je, že díky nenatavení nevznikají u některých materiálů tvrdé a křehké intermetalické fáze jako u předchozích metod odporového svařování. [16; 29]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Úkolem praktické části je zkoumání tepelně ovlivněné oblasti, svarového spoje a základního materiálu uzavřeného článku sněhového řetězu z materiálu 15Mn3Al, viz tab. 2, 3, v průběhu procesu výroby. Řetěz se v první fázi svařoval elektrickým odporem natupo, následně se cementoval za teploty 920 °C po dobu jedné hodiny, kalil a popouštěl. Jako poslední se na řetěz nanášel zinkový protikoroziční povlak. Vzhledem k příliš malým rozměrům článku řetězu König E9 z původního zadání byl zaměněn za největší vyráběný řetěz třídy König E12, který je ze stejného materiálu, tedy dojde jen ke změně rozměrů, což je patrné z obr. 50.



Obr. 50 Rozměry článků řetězu König E9 a E12.



Obr. 51 Dělení článku.

Pro účely zkoušky byly připraveny tři vzorky, kde každý vzorek reprezentoval různé stavy řetězu ve výrobním procesu, konkrétně stav po svaření, po cementování, kalení a popouštění a po galvanickém zinkování. Jelikož firma neměla k dispozici řetěz přímo z výrobního procesu po operaci zinkování, byl použit odpadní článek, který nevyhovoval požadované únosnosti, viz obr. 27. Vzorky byly označeny dle tabulky 4 a obr. 55. Články byly řezány podélně podle obr. 51, aby byl vidět pozvolný přechod základního materiálu do svarového spoje.

Tab. 4 Označení vzorků.

Označení vzorku	Stav vzorku
A (dva zářezy na vzorku)	po svaření elektrickým odporem
B (jeden zářez na vzorku)	po cementování, kalení a popouštění
C (tři zářezy na vzorku)	odpadní článek po galvanickém zinkování (zmetek)



Obr. 52 Rozbrušovací pila BRILLANT 250.



Obr. 53 Průběh dělení.

Celý proces řezání byl proveden na rozbrušovací pile BRILLANT 250, viz obr. 52, přičemž se vzorek musel vydatně chladit, aby nedošlo k jeho tepelnému ovlivnění, a tedy změně vlastností na povrchu vzorku, průběh dělení je pak vidět na obr. 53. Současně by se mělo dbát na to, aby kotouč měl při řezání se vzorkem co nejmenší styčnou plochu, čímž se zmenší tření, a tedy i vývin tepla.



Obr. 54 Lis SimpliMet 1000.



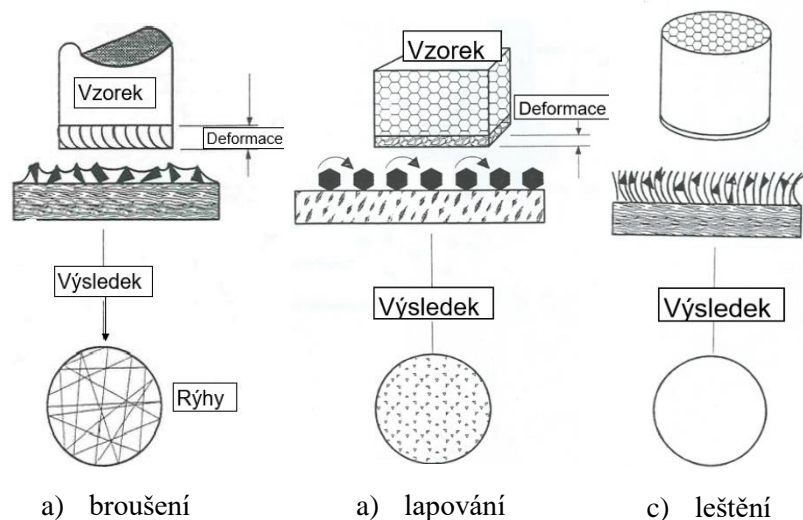
Obr. 55 Lisování a značení vzorků.

Lisování vzorků se provádělo na metalurgickém lisu Simplimet 1000, viz obr. 54, kde jako lisovací hmota byl použit černý bakelit PhenoCure, což je termosetová pryskyřice, která se za působení tepla a tlaku vytvrdí. Z důvodu malých rozměrů vzorků byly všechny zalisovány do jednoho metalografického puku pro vyšší využitelnost, jak je vidět na obr. 55. Pro bakelit byla doba ohřevu 2 minuty 20 sekund za teploty 150 °C, doba chladnutí pak 2 minuty 20 sekund a lisovací tlak 200 barů.

Po lisování se na hrubé brusce puk zarovná, aby měl rovnou základnu a následuje finální úprava vzorku, jejíž specifikace jsou uvedeny v tabulce 5. Tato úprava zahrnuje čtyři operace, které se provádí na metalografické brusce Buehler MetaServ 250, viz obr. 56. První dvě operace představují broušení, kdy je díky diamantovému kotouči se speciálně formulovanou pryskyřicí zajištěna rovinnost vzorku, odstranění rýh a plochy ovlivněné předchozím řezáním. Nejprve se použije kotouč o velikosti zrn 75 μm a následně o velikosti 15 μm.



Obr. 56 Metalografická bruska a leštička MetaServ 250.



Obr. 57 Postup finální úpravy vzorku [32].

Dalším krokem je lapování, čímž se docílí menší deformované plochy vzorku a zjemnění rýh po broušení. Provádí se pomocí textilní podložky Trident a diamantové suspenze o zrnitosti 3 μm , jako chladivo se používá smáčedlo. Lapování je postačující na měření makroskopických vad, nicméně pokud je potřeba odhalit mikrostrukturu materiálu, provádí se ještě čtvrtá operace leštění, kde se používá kotouč s vlákny a MasterPolisher PH9 o zrnitosti 0,05 μm . Vlákna na kotouči unášejí zrna a dochází k vyhlazení plochy vzorku, přičemž leštící kotouč a kotouč se vzorky mají opačný smysl otáčení pro zefektivnění úběru materiálu. Celý postup je na obr. 57.

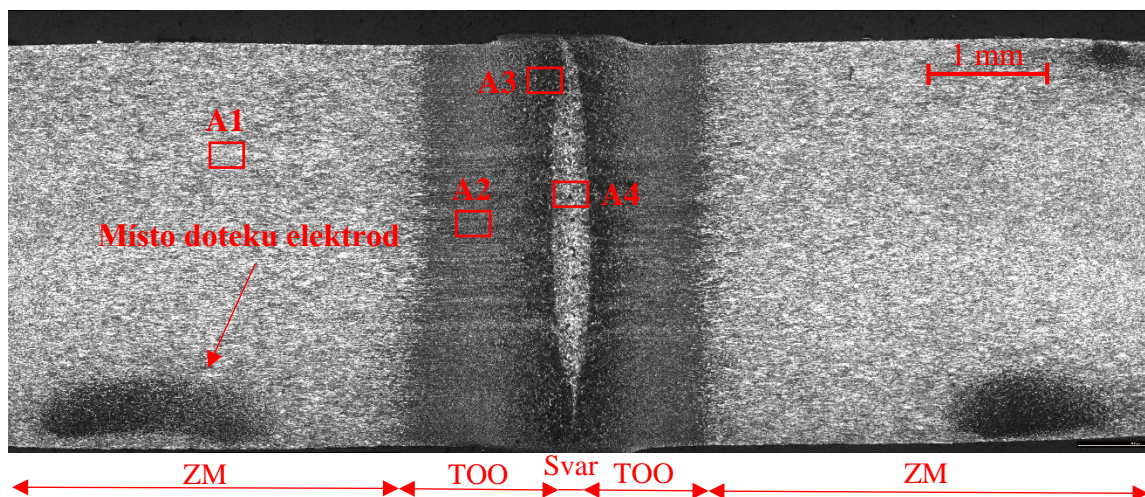
Tab. 5 Postup a parametry jednotlivých operací finální úpravy vzorku [32].

Č. op.	Kotouč + suspenze	Otáčky [min^{-1}]	Přítlak [bar]	Směr	Čas [min]	Chlazení
op. 1	Apex DGD Color, red 75 μm	300	25	souběh	4	voda
op. 2	Apex DGD Color, white 15 μm	300	25	souběh	4	voda
op. 3	Trident + diamantová suspenze 3 μm	150	25	souběh	3	smáčedlo
op. 4	Microcloth + 0,05 μm MasterPolisher	150	10	protiběh	2	minimum vody

3.1 Hodnocení mikrostruktury a makrostruktury svaru

Před samotným zkoumáním bylo nutno vzorek naleptat v 4% roztoku kyseliny dusičné v etanolu (NITAL4), čímž vynikne struktura materiálu. Metalografický puk se leptal asi 2 vteřiny pro měření makrostruktury vzorku B a C. Vzorek A se pak leptal dalších 5 vteřin z důvodu nižší citlivosti. Pozorování makrostruktury se pak provádělo na mikroskopu OLYMPUS GX51.

Na obrázku 58 je znázorněn vzorek A, kde lze z hlediska makroskopické analýzy sledovat typický vzhled odporového svarového spoje natupo. Je zde vidět, jak struktura ZM postupně přechází do TOO. Ta je v celé oblasti svaru rovnoměrná, má šířku zhruba 2,3 mm a jsou v ní výrazně vidět jednotlivá pásma. TOO postupně přechází ve svarový spoj, který má ve středu největší šířku okolo 0,35 mm a ke kraji se pozvolna zužuje. Je tomu tak proto, že proudová hustota je ve středu největší, což má za následek větší teplotu, a tedy i plastickou deformaci. Na obou stranách svaru je pak vidět stopa po ostřížení výronku. Tmavé oblasti na levé a pravé spodní straně jsou způsobeny ohřevem přechodovým odporem mezi elektrodou a materiálem. Z pohledu makrostruktury je svar pěkný a nebyly nalezeny žádné makroskopické vady.



Obr. 58 Makrostruktura vzorku A s vyznačenými místy pro hodnocení mikrostruktury.

V obrázku 58 jsou také vyznačena místa, ze kterých byly provedeny snímky mikrostruktury. Na obrázku 59 je zobrazena mikrostruktura základního materiálu. Jedná se o feritická zrna, která jsou protažena v jednom směru vlivem předchozí operace tažení. Barvou je pak dána orientace zrna. Struktura také naznačuje, že drát byl před tažením žíhaný na měkko, jelikož se zde nachází mezi jednotlivými zrnky globulární perlit, který je pro deformaci menší překážkou než perlit lamelární. Dále si zde (v kroužku) lze povšimnout vměstku nitridu titanu, jež se vyznačuje hranovou naoranžovělou strukturou. Je velmi tvrdý a křehký, nicméně v takto malém množství nemá negativní účinky na vlastnosti oceli.

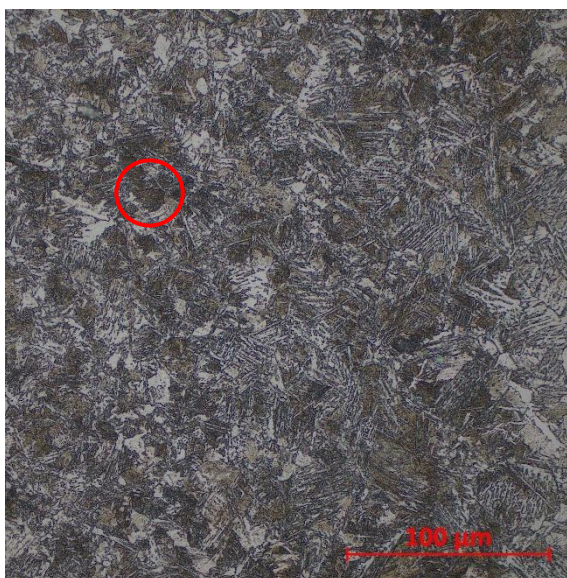


Obr. 59 Mikrostruktura ZM z místa A1.

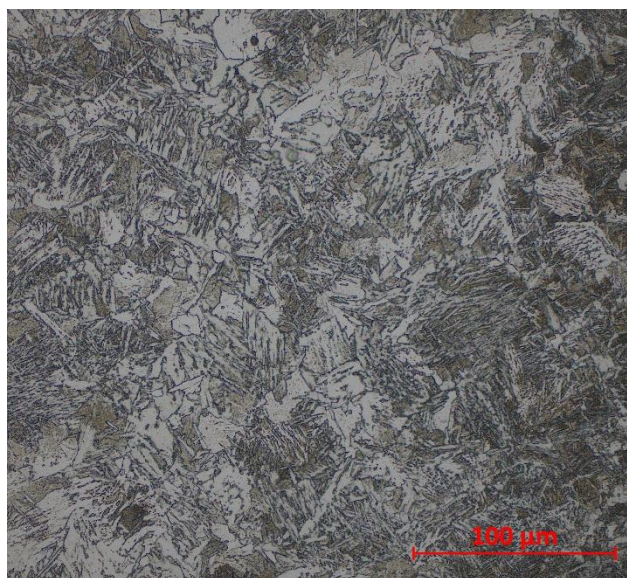


Obr. 60 Mikrostruktura oblasti normalizace z místa A2.

V obrázku 60 je oblast normalizace, což je nejzazší oblast TOO směrem od svaru. V této oblasti bylo dosaženo teploty těsně nad A_{c3} , přičemž řetěz následně chladnul volně na vzduchu, čímž se struktura normalizačně vyžihala. Výsledkem je globulární a jemnozrná feritická struktura s jemným lamelárním perlitem v mezioblastech. Na ojedinělých místech si zde lze povšimnout nitridu titanu, ovšem mnohem jemnějšího.



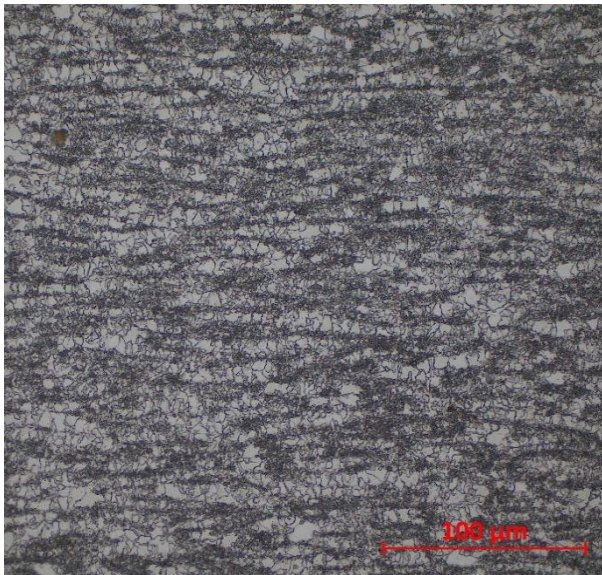
Obr. 61 Hrubá struktura TOO z místa A3.



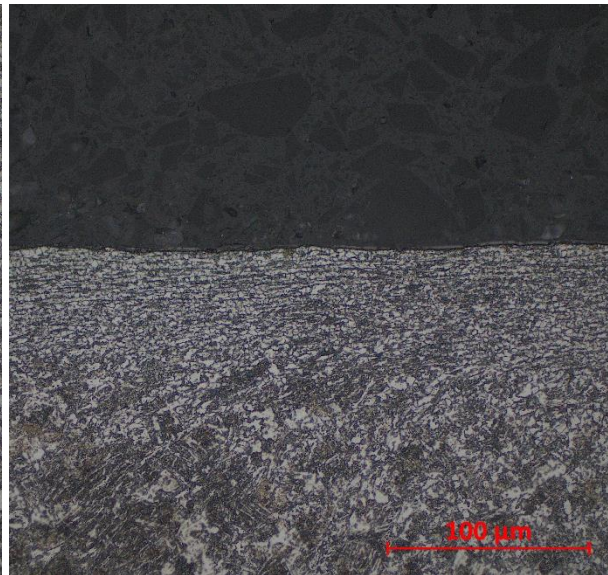
Obr. 62 Mikrostruktura svaru z místa A4.

Oblast svaru na obr. 62 je tvořena směsí rozpadových struktur označovaných jako rozpadová fáze (Zwissenstufe) pod zkratkou ZW. V tomto případě se jedná o strukturu s převažujícím acikulárním feritem a tmavé mezioblasti jsou pak horní bainit. Struktura je velice hrubozrnná, jelikož zde bylo obrovské přehřátí až 1300 °C, a tak stávající struktura předcházela velká zrna austenitu. [33]

Přilehlá tepelně ovlivněná oblast svaru na obr. 61 se pak skládá také ze směsné struktury jehlicového feritu a bainitu, avšak s o něco jemnější morfologií. Tmavé oblasti, které jsou zakroužkované a zaujímají významný podíl struktury, představují troosit. Jedná se o velice jemný perlit, který se vyznačuje poměrně vysokou tvrdostí. [33]



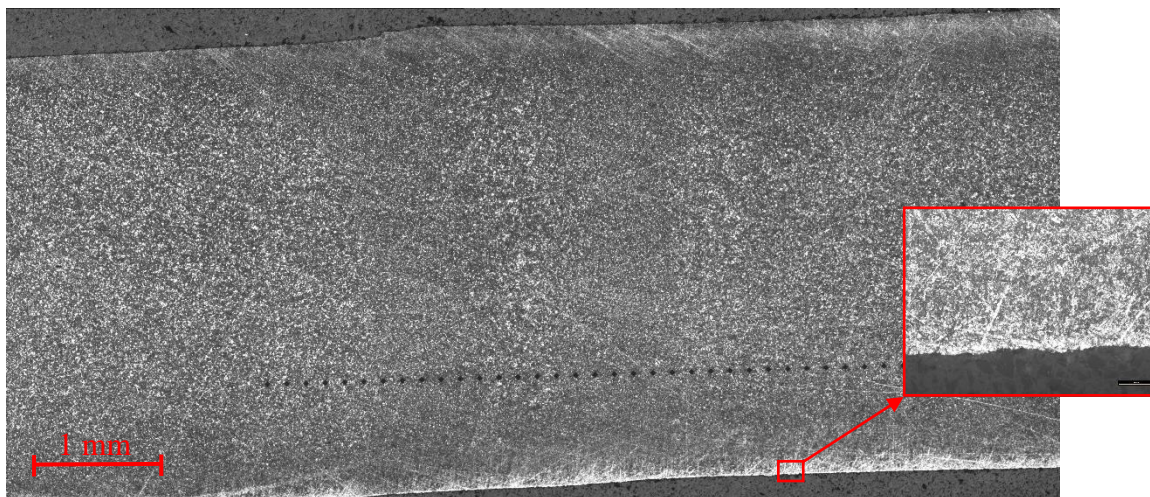
Obr. 63 Oblast dotyku elektrod.



Obr. 64 Oblast ostřížení výrobku.

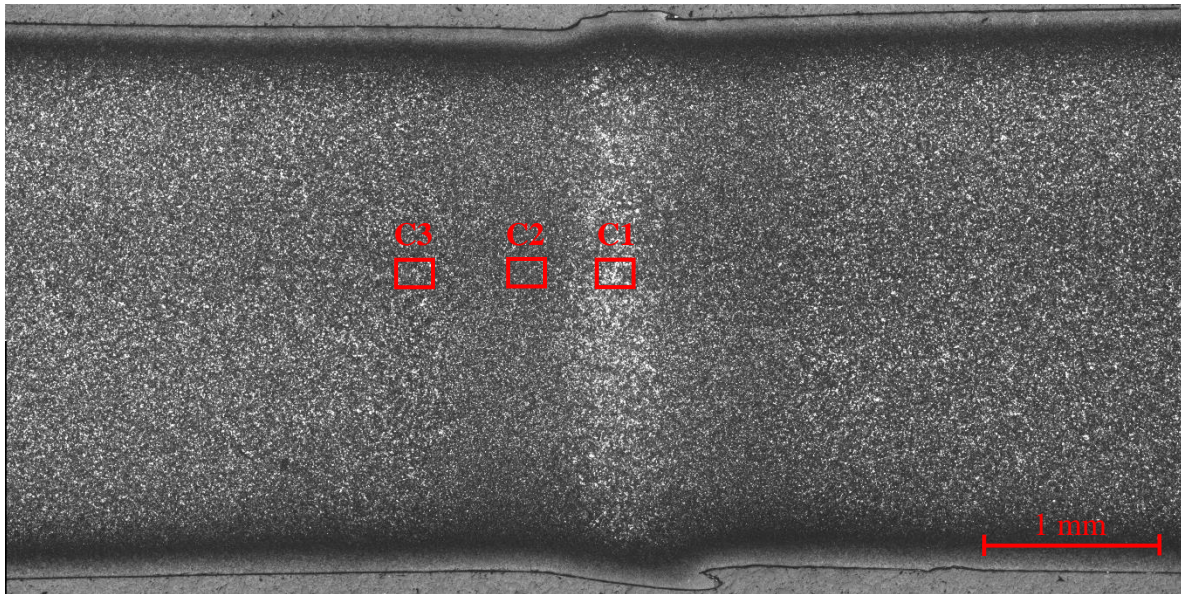
Na obrázku 63 je zobrazena mikrostruktura v místě doteku elektrod. Vlivem přechodového odporu mezi elektrodou a materiálem došlo k ohřevu minimálně na teplotu A_{c1} , což mělo za následek ovlivnění struktury. Ve struktuře částečně zůstává protažená struktura zrn feritu a došlo také k řádkovému usměrnění perlitu. V místě perlitu lze očekávat i zvýšený obsah manganu, který na sebe uhlík váže. S velkou pravděpodobností se bude jednat o oblast částečné překrystalizace, tedy mezi teplotami A_{c1} a A_{c3} .

Na obrázku 64 je pak vidět oblast ostřížení výrobku, kde došlo vlivem plastické deformace a lomu k výraznému deformačnímu usměrnění struktury.



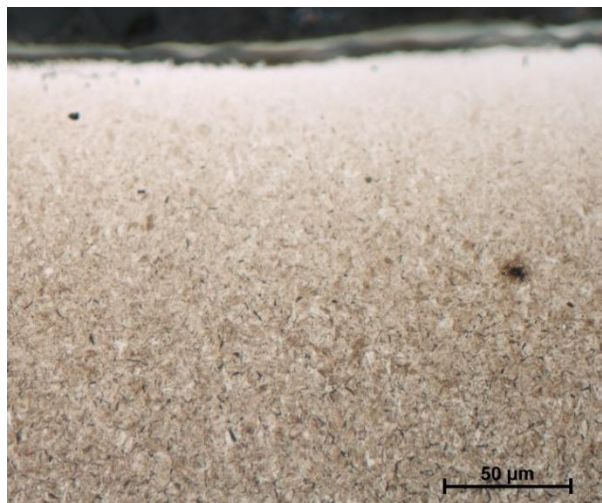
Obr. 65 Vzorek B + cementovaná vrstva.

Na obrázku 65 je zobrazen vzorek B, kdy oblast svaru a TOO už nejsou tak dobře rozeznatelné vlivem procesu cementování, kdy se vzorek nauhličoval při teplotě 920 °C, což odpovídá oblasti normalizace. Tento proces způsobil jednak nauhličení a zakalení povrchu vzorku, druhá zjemnění zrna a zrovnoměrnění celé struktury jak ve svarovém kovu, tak v TOO a ZM, což je patrné z vizuálního pozorování celé oblasti překrystalizace do oblasti austenitu s výdrží 1 hodinu na této teplotě a následné ochlazení do oblasti feritu. Tloušťka cementované vrstvy je zhruba 0,3 mm. Výronek je v tomto případě ostřížen tak, že vzniká velmi plynulý přechod.

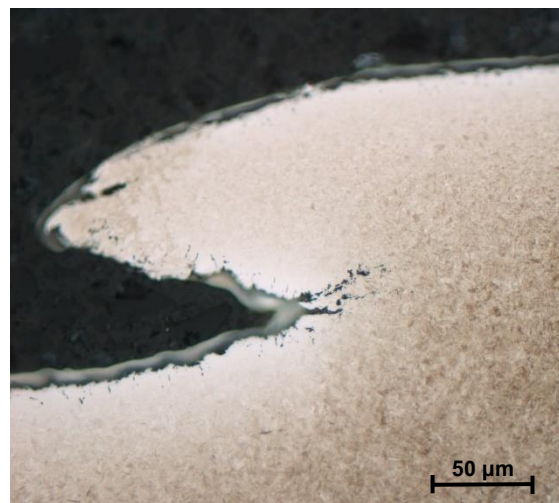


Obr. 66 Makrostruktura vzorku C s vyznačenými místy pro hodnocení mikrostruktury.

Na obrázku 66 je vzorek C, který prošel procesem galvanického zinkování. Je zde lépe odlišitelná cementovaná vrstva než na vzorku B. Zde je struktura z největší části tvořena martenzitem, což je vidět na obr. 67. Je zde viditelná i zinková vrstva, která má tloušťku zhruba 10 µm. Ve spodní části si lze povšimnout nedokonale ostříženého výronku, který zanechal vrub, což by mohlo být zdrojem šíření únavových trhlin nebo koncentrátorem napětí. Z bližšího prozkoumání obr. 68 je zřejmé, že se z vrubu šíří trhliny a došlo k nedokonalému nanesení zinkové vrstvy. Makrostruktura a mikrostruktura se oproti předchozímu vzorku B nezměnila, protože galvanické zinkování probíhá za nízkých teplot, kdy nedojde k fázové přeměně. Proto bude na rozhraní mikrostruktury analyzován pouze finální zinkovaný vzorek a fotky vzorku po cementování jsou uvedeny v příloze 4.

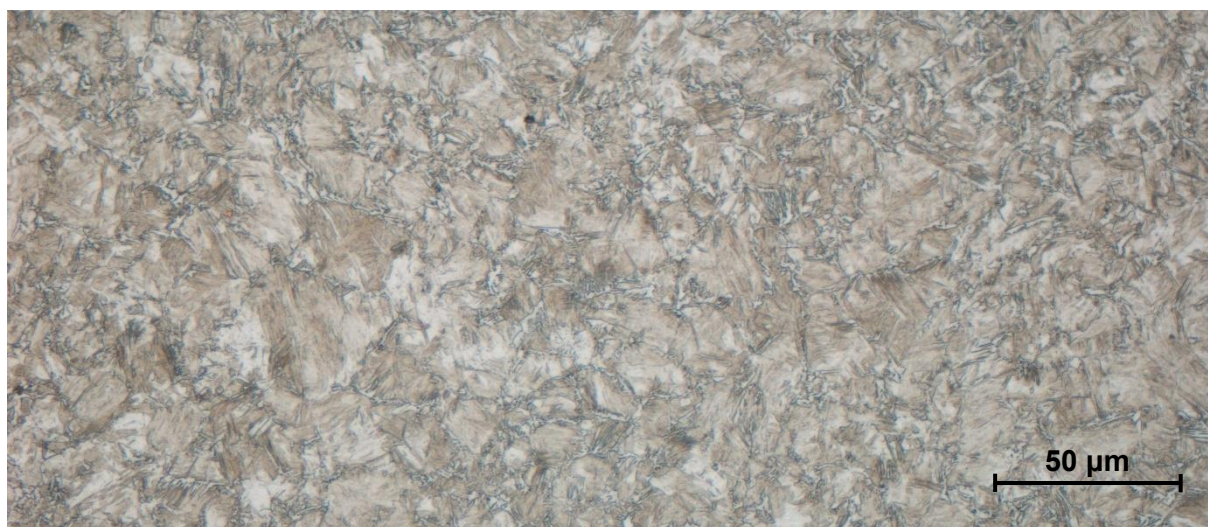


Obr. 67 Mikrostruktura cementované oblasti.



Obr. 68 Detail vrubu.

Na obrázku 69 je mikrostruktura svarového spoje, který je charakteristický zjemněným zrnem, nicméně je toto zrno pořád hrubší než u TOO a ZM, což by mohlo mít vliv na variabilitu mechanických vlastností. Podél hranic zrn se nachází proeutektoidní ferit, který se vyloučil před transformací austenitu, zrna samotná jsou tvořena směsnou strukturou martenzitu a bainitu.



Obr. 69 Mikrostruktura svaru vzorku z místa C1.

V TOO na obrázku 70 je struktura defacto stejná, liší se jen velikostí zrna. V případě ZM, viz obr. 71, není proeutektoidní ferit tak souvislý a je ho tam méně, což bude mít za následek nižší houževnatost a vyšší pevnost a tvrdost.



Obr. 70 Mikrostruktura TOO vzorku z místa C2.



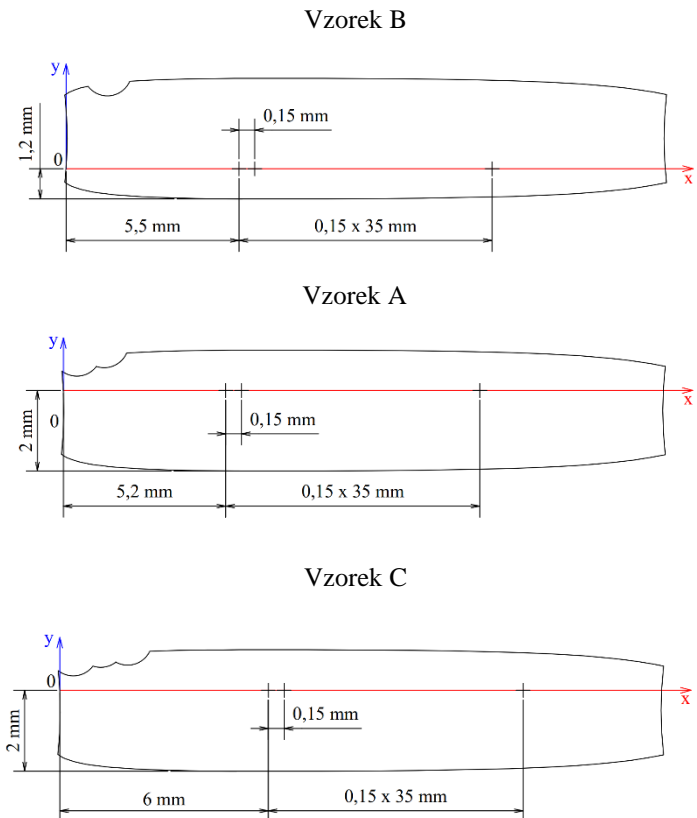
Obr. 71 Mikrostruktura ZM vzorku z místa C3.

3.2 Měření tvrdosti

Ve druhé části experimentu se provádělo měření tvrdosti všech tří vzorků. Díky naleptanému povrchu se zhoršuje viditelnost vtisků. Aby byly vtisky lépe viditelné a měření se tím tak zpřesnilo, provedla se znovu povrchová úprava vzorku podle tabulky 5. Měření se provádělo na softwarově řízeném tvrdoměru značky Mitutoyo, viz obr. 72.



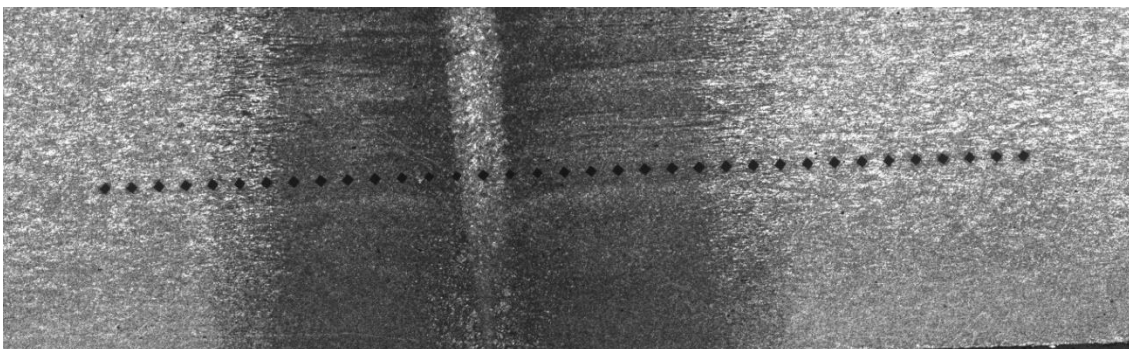
Obr. 72 Tvrdoměr Mitutoyo.



Obr. 73 Poloha vtisků na vzorcích.

Z důvodu malých rozměrů TOO a svaru bylo pro největší proměření použito zatížení 0,5 kg podle Vickerse se zatěžovací dobou 10 sekund. Měření bylo předem odzkoušeno a změřena úhlopříčka největšího vtisku, aby se podle ní mohla stanovit minimální vzdálenost mezi jednotlivými vtisky, a to trojnásobek uhlopříčky. Finální rozteč vtisků byla stanovena na 0,15 mm, přičemž se na všech třech vzorcích provedlo 35 vpichů tak, aby se proměřil celý svar, TOO a ZM. Přesné polohy vpichů jsou zobrazeny na obr. 73.

3.2.1 Měření tvrdosti vzorku A

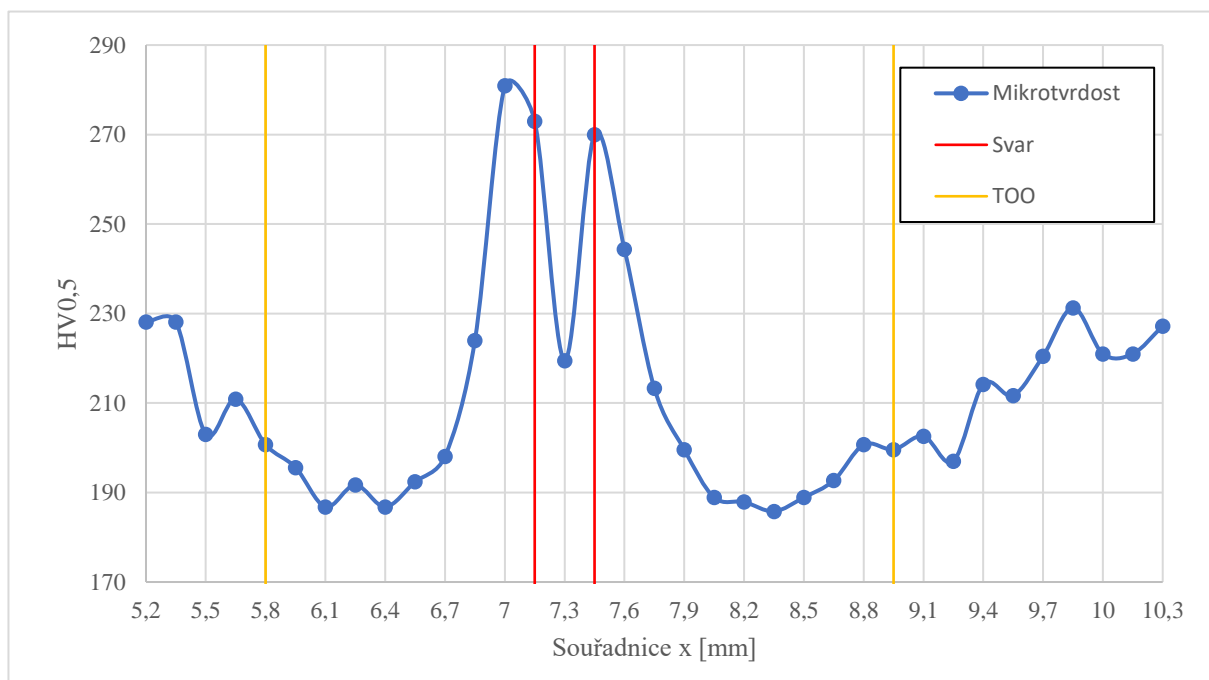


Obr. 74 Vtisky viditelné na naleptaném vzorku A.

Po měření a odečtení hodnot tvrdosti se vzorek naleptal, aby byla stanovena přesná pozice jednotlivých vpichů, viz obr. 74. Z naměřených hodnot v tabulce 6 plyne, že změřené hodnoty tvrdosti v žádném případě nepřekročily hodnotu 300HV_{0,5}, která odpovídá 50 % martenzitu ve struktuře. [10]

Tab. 6 Naměřené hodnoty tvrdosti na vzorku A.

Souřadnice x [mm]	HV _{0,5}	Souřadnice x [mm]	HV _{0,5}	Souřadnice x [mm]	HV _{0,5}
5,2	228,1	7	280,9	8,8	200,7
5,35	228,1	7,15	273	8,95	199,6
5,5	203	7,3	219,5	9,1	202,6
5,65	210,9	7,45	270	9,25	197
5,8	200,7	7,6	244,4	9,4	214,2
5,95	195,6	7,75	213,3	9,55	211,7
6,1	186,8	7,9	199,6	9,7	220,5
6,25	191,7	8,05	188,9	9,85	231,3
6,4	186,8	8,2	187,9	10	221
6,55	192,4	8,35	185,8	10,15	221
6,7	198,1	8,5	188,9	10,3	227,2
6,85	224	8,65	192,7	Ø HV _{0,5}	212,5

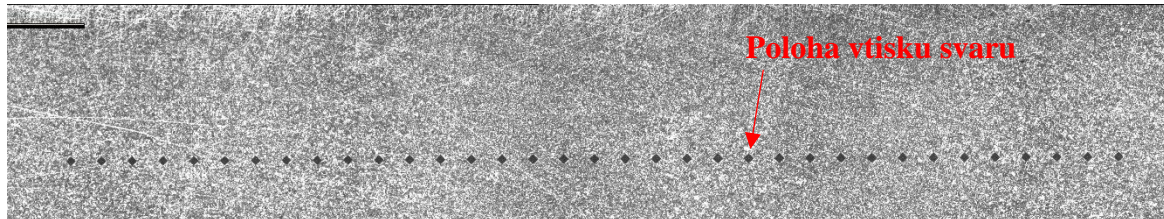


Obr. 75 Průběh tvrdosti vzorku A.

Z grafu na obrázku 75 je patrné, že největší tvrdost vyšla v tepelně ovlivněné oblasti bezprostředně vedle svaru, což je způsobeno velkým množstvím troostitu. Ve svaru pak došlo k poklesu tvrdosti kvůli hrubému zrně a převážně feritické houževnaté struktuře s menším množstvím bainitu v mezioblastech. V oblasti normalizace vyšla průměrně nejnižší tvrdost a v pásmu částečné překrystalizace se postupně směrem k ZM začala zvyšovat vlivem deformačně zpevněné struktury.

3.2.2 Měření tvrdosti vzorku B

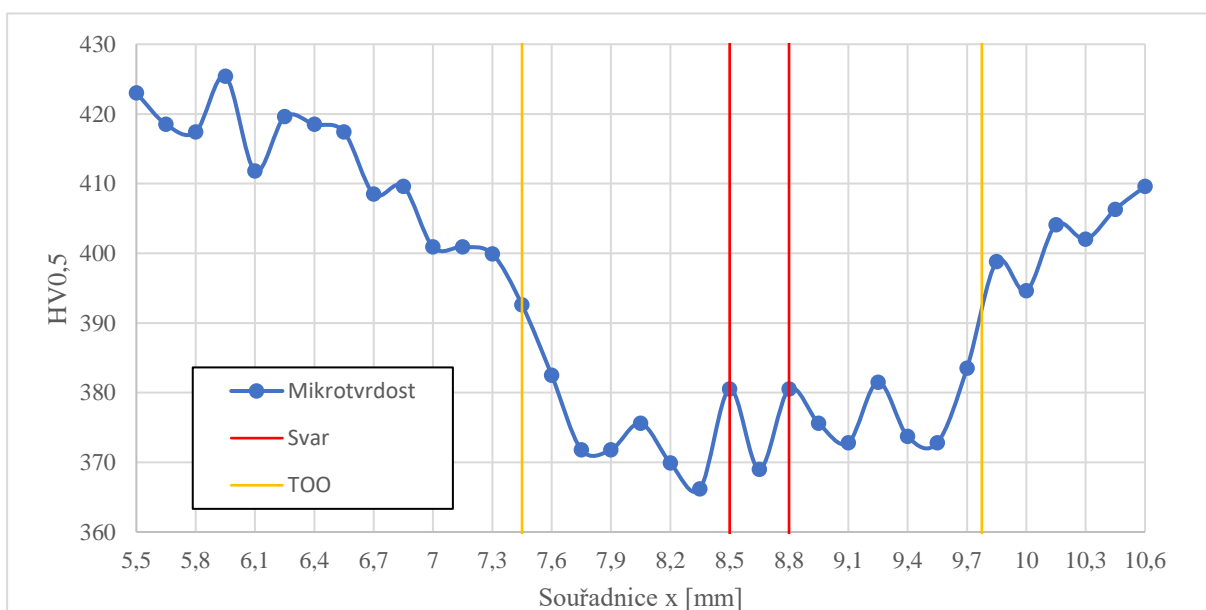
Na obrázku 76 je viditelná přesná pozice vpichů vůči svaru. Z naměřených hodnot v tabulce 7 vyplývá, že tvrdost jádra článku se oproti předchozímu nezpracovanému stavu zvýšila skoro o 50 %. Tvrdosti taktéž vyhovují minimální hodnotě z atestu řetězu, a sice 300 HV0,5. Z grafu na obrázku 77 je pak patrné, že průběh tvrdosti poklesnul ve svaru a v TOO oproti ZM, což je zapříčiněno měkkým proeutektoidním feritem vyloučeným na hranicích zrn. Mezi svarem a TOO je pak pokles zhruba o 10 jednotek HV0,5 díky hrubšímu zrně ve svaru.



Obr. 76 Poloha vtisků vzorku B.

Tab. 7 Naměřené hodnoty tvrdosti na vzorku B.

Souřadnice x [mm]	HV0,5	Souřadnice x [mm]	HV0,5	Souřadnice x [mm]	HV0,5
5,5	423	7,3	399,9	9,1	372,8
5,65	418,5	7,45	392,6	9,25	381,5
5,8	417,4	7,6	382,5	9,4	373,7
5,95	425,4	7,75	371,8	9,55	372,8
6,1	411,8	7,9	371,8	9,7	383,5
6,25	419,6	8,05	375,6	9,85	398,8
6,4	418,5	8,2	369,9	10	394,6
6,55	417,4	8,35	366,2	10,15	404,1
6,7	408,5	8,5	380,5	10,3	402
6,85	409,6	8,65	369	10,45	406,3
7	400,9	8,8	380,5	10,6	409,6
7,15	400,9	8,95	375,6	Ø HV0,5	394,5



Obr. 77 Průběh tvrdosti vzorku B.

3.2.3 Měření tvrdosti vzorku C

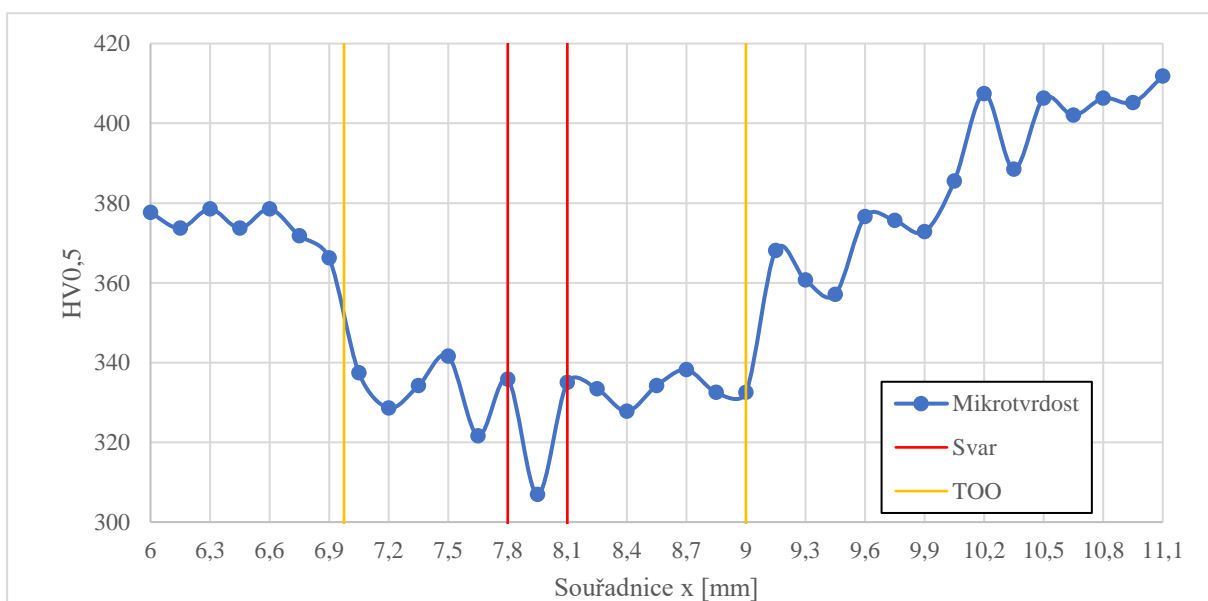
Na obrázku 78 je vidět přesné rozmístění vtisků včetně pozice svaru. Jak je patno z hodnot z tabulky 8, tvrdost po zinkování mírně klesla, a to průměrně o skoro 10 %, ve svaru a v TOO pak zhruba o 15 %. Podle grafu na obr. 79 má průběh stejný charakter jako u vzorku B, což je způsobeno stejným rozložením struktury. Nejnižší hodnota tvrdosti 306,9 HV0,5, což je v tomto případě ve svaru, stále vyhovuje nejnižší dovolené hodnotě z atestu 300 HV0,5. Horní povolenou mez 500 HV0,5 žádná z naměřených hodnot nepřekročila.



Obr. 78 Poloha vtisků vzorku C.

Tab. 8 Naměřené hodnoty tvrdosti na vzorku C.

Souřadnice x [mm]	HV0,5	Souřadnice x [mm]	HV0,5	Souřadnice x [mm]	HV0,5
6	377,6	7,8	335,8	9,6	376,6
6,15	373,7	7,95	306,9	9,75	375,6
6,3	378,5	8,1	335	9,9	372,8
6,45	373,7	8,25	333,4	10,05	385,5
6,6	378,5	8,4	327,8	10,2	407,4
6,75	371,8	8,55	334,2	10,35	388,5
6,9	366,2	8,7	338,2	10,5	406,3
7,05	337,4	8,85	332,5	10,65	402
7,2	328,6	9	332,5	10,8	406,3
7,35	334,2	9,15	368,1	10,95	405,2
7,5	341,6	9,3	360,7	11,1	411,8
7,65	321,6	9,45	357,1	Ø HV0,5	362,4



Obr. 79 Průběh tvrdosti vzorku C.

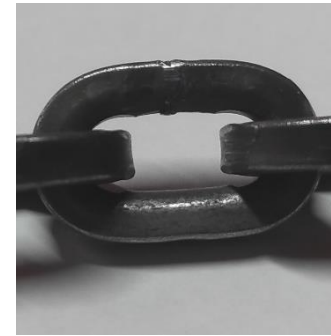
3.3 Shrnutí a vyhodnocení výsledků

Pro přehlednost bude zvláště vyhodnocena mikrostruktura, makrostruktura a tvrdost:

- Z hlediska makrostruktury na svaru nebyly pozorovány žádné dutiny, které by naznačovaly, že byl použit nízký dotlak přítlačníků. Výronek byl u vzorku A a B ostřížen tak, že tvořil téměř plynulý přechod. To stejné neplatí pro vzorek C, kde na jedné straně vzniknul vrub. V oblasti vrubu byl povrch nedostatečně krytý zinkovou vrstvou, což mohlo mít za následek iniciaci koroze. Rovněž se z vrubu šířily trhliny, což byl s největší pravděpodobností také důvod, proč řetěz nevydržel požadované zatížení 780 kg. Po bližším zkoumání bylo zjištěno, že segment řetězu, ze kterého byl vyjmut a zhotoven vzorek C, obsahuje články, které mají všechny už jen podle vizuální kontroly vrub, jak je vidět na obrázku 80. Správně ostřížený výronek by měl tvořit plynulý přechod, jako je na obrázku 81. Problém tedy spočíval ve špatném naostření nože. [34]



Obr. 80 Špatně ostřížený výronek.



Obr. 81 Plynulý přechod.

- V případě mikrostruktury nebyly na svaru shledány žádné významné vady. Všechny nežádoucí struktury, jako například oblast uspořádaného perlitu pod elektrodou, se vlivem procesu cementování zrovnoměrnily s okolní strukturou. Ve struktuře byl také ojediněle pozorován nitrid titanu, jehož úkolem je zabránit hrubnutí austenitického zrna. V případě oceli 15Mn3Al je titan nežádoucí prvek. Vměstek se však v oceli nachází ve velmi zanedbatelném množství, a tak se dá považovat za neškodný. Ve výsledné struktuře je pak na hranicích zrn proeutektoidní ferit, který se vyznačuje velkou houževnatostí. Mohl by být na škodu při záporných teplotách, kdy by článek na hranicích zrn mohl začít praskat, nicméně se jedná o výrazně nižší teploty, než jsou provozní teploty sněhového řetězu, a tak se jedná o neškodnou fázi. Pro zlepšení vlastností řetězu, tedy zamezení vzniku proeutektoidního feritu by se řetěz musel rychleji ochladit při kalení například prostřednictvím vody bez oleje.
- Na tvrdosti byl u finálního vzorku C oproti vzorku B pozorován průměrný pokles tvrdosti zhruba o 10 %. Ve svaru a v TOO pak tvrdost poklesla oproti cementovanému vzorku až o několik desítek jednotek HV_{0,5}. Nejnižší hodnota je přímo ve svaru, a činila 306,9 HV_{0,5}. Tato hodnota je vyšší než hodnota z atestu, tedy 300 HV_{0,5}, každopádně je zde malá rezerva. Nízká tvrdost je způsobena velkým množstvím již zmíněného proeutektoidního feritu a také hrubozrnější strukturou. Pro vyšší zrovnomnění struktury doporučuji do svařovacího procesu zařadit žihací režim zobrazený na obrázku 42 b (bez prodlevy t_0), který by měl tyto odchylky částečně eliminovat, avšak nepatrně zvýší svařovací časy.

ZÁVĚR

V první části bakalářské práce byl zmapován technologický postup výroby řetězu König E9 090, a to od výchozího polotovaru až po finální zabalený výrobek. Úkolem bylo v tomto procesu najít problematické místo, kterému by se měla věnovat zvýšená pozornost. Jako problematické místo byla určena tepelně ovlivněná oblast, svar a jeho okolí, které byly navzájem porovnány jak z hlediska mikrostruktury a makrostruktury, tak z hlediska tvrdosti, a to v jednotlivých etapách výroby, konkrétně po svaření (vzorek A), cementování, kalení a popouštění (vzorek B) a v poslední řadě po galvanickém zinkování (vzorek C).

Na základě fotografií pořízených při vyhodnocování makrostruktury nebyla na vzorku A a B shledána žádná vada. Na vzorku C byl vyzorován vrub, který byl příčinou toho, že řetěz nevydržel požadované zatížení 780 kg. Pro správnou funkci řetězu a zajištění jeho pevnosti je nutno zajistit v místě svaru plynulý přechod.

Z hlediska mikrostruktury nebyly na vzorcích shledány žádné vady, které by významně ovlivňovaly mechanické vlastnosti řetězu. Na vzorku A bylo vyzorováno několik vměstků nitridu titanu, které na strukturu nemají negativní účinky v takto omezeném množství. Na vzorku B a C byla pak identifikována zakalená struktura v celém objemu článku, přičemž v tepelně ovlivněné oblasti a ve svaru byl na hranicích zrn souvislý proeutektoidní ferit. Ten vykazuje horší vlastnosti a mohl by začít praskat na hranicích zrn za nízkých teplot, avšak se jedná o teploty výrazně nižší než jsou provozní teploty sněhového řetězu.

Vyhodnocováním tvrdosti bylo zjištěno, že finálně zpracovaný řetěz ve všech místech vyhovuje hodnotě tvrdosti 300 HV_{0,5} podle atestu, avšak ve svaru se tato hodnota blíží minimální přípustné hodnotě. Pro zajištění větší bezpečnosti by se do odporového svařování mohl zařadit žíhací režim, který by zajistil větší rovnoměrnost struktury. Pokles tvrdosti ve svaru a v tepelně ovlivněné oblasti je také způsoben proeutektoidním feritem. Vznik této fáze by se dal částečně potlačit rychlejším ochlazením například do vody. Současně by se tím řešil problém nestálosti proeutektoidního feritu za nízkých teplot.

Závěrem lze konstatovat, že řetěz, ze kterého byl odebrán vzorek C, není vhodný pro funkci z důvodu konstrukčního vrubu. Na vzorcích A a B nebyly shledány žádné významnější vady, které by měly výrazně ovlivňovat správnou funkci řetězu. Za předpokladu správně provedených následujících operací dle technologického postupu lze oba řetězy (vzorku A, B) považovat za způsobilé k provozu na pozemních komunikacích.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MOKŘÍŠ, Jakub. PORTÁL ŘIDIČE. *Nejčastější mýty a polopravdy o sněhových řetězech* [online]. 2023 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.portalridice.cz/clanek/nejcastejsi-myty-a-polopravdy-o-snehovych-retezech>
 2. DUSIL, Tomáš. AUTO. *Sněhové řetězy trochu jinak: Opravdu je textilní „návlaky“ či spreje nahradí?* [online]. 2017 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/snehove-retezy-trochu-jinak-opravdu-je-textilni-navleky-ci-spreje-nahradi-102228>
 3. ZEMAN, Pavel. ČESKÝ KUTIL. *Tekuté řetězy* [online]. 2012 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://ceskykutil.cz/clanek-15920-tekute-retezy>
 4. OBCHODTH.CZ. *König ZIP-9 rozměr 090* [online]. [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://www.obchodth.cz/1425-konig-zip-9-rozmer-090.html>
 5. SPOLUPRÁCE S FIRMOU PEWAG GROUP. Fotografie a technické parametry procesu [Excel]. [2023] Excel dokument byl poskytnut firmou Pewag Group
 6. PEWAG GROUP. *O společnosti* [online]. 2017 [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.pewag.cz/o-nas/profil-spolecnosti/>
 7. MATMATCH. *Low carbon steel grade 15Mn3Al* [online]. 2024 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://matmatch.com/materials/minfc5440-din-17115-grade-15mn3al-normalized-or-normalized-formed-n->
 8. STEEL STORES. *DIN 1.0468 DIN 17115* [online]. [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.steelestores.com/grade/din-10468-din-17115.html>
 9. TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY. *Válcovaný drát* [online]. 2010 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: https://apl.trz.cz/pdf/Drat_2010.pdf
 10. FOLDYNA, Václav, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd.* Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
 11. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
 12. FABÍK, Richard. *Tváření kovů: učební text : studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2024-04-22]. ISBN 978-80-248-2572-4.
 13. KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
 14. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro mezinárodní/eurospké svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT).* Brno: Odbor svařování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2016.
 15. FALTUS, František; KROUZA, Václav a FALTUS, František. *Svařování.* V Praze: Česká matice technická, 1947.
 16. BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory.* Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 80-85771-97-7.
 17. KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování. 2. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1999. ISBN 80-7082-582-0.
-

-
18. HOUDEK, Radim. Změna materiálů dílů pro výrobu řetězů harvestorů [online]. Brno, 2022 [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/136982>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.
 19. KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
 20. HAMAL, Jan. *Galvanické zinkování* [online]. Brno, 2014 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87110. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.
 21. SIGMUND, Marian. *Technologie svařování [Přednáška]*. Brno: Fakulta strojního inženýrství, 16.11.2024.
 22. PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: SNTL, 1975.
 23. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
 24. VOŽENÍLEK, Ladislav a Miloš ŘEŠÁTKO. *Základy elektrotechniky I pro 1. ročník elektrotechnických učebních a studijních oborů středních odborných učilišť*. Druhé. Praha: SNTL, 1984, 301 s.
 25. RESISTANCE WELDING MANUFACTURING ALLIANCE (RWMA). *Resistance Welding Manual (Revised 4th Edition)*. American Welding Society (AWS), 2003. ISBN 9780962438202.
 26. LIPA, Milan. *Bodové a švové zváranie*. Bratislava: SVTL, 1966.
 27. STEINER, Jaromír. *Pevnost bodového spoje v měkkém a tvrdém režimu svařování* [online]. Brno, 2015 [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102156. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandus.
 28. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
 29. KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986.
 30. MRŇA, Libor. *Odtavovací a stlačovací stykové svařování* [online]. Brno [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_odtavovaci_a_stlacovaci_stykovye_svarovani_mrna.pdf. Učební texty. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
 31. KUNCIPÁL, Josef. *Speciální technologie*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1988, 254 s.
 32. SPOLUPRÁCE S FIRMOU JTEKT Czech Republic s. r. o. Podmínky pro přípravu vzorků [Excel]. [2023] Excel dokument byl poskytnut firmou JTEKT
 33. HRIVŇÁK, Ivan. *Zvaritelnost ocelí*. Bratislava: Alfa, 1979.
 34. MUSIL, Miloslav a MORAVEC, Jaromír. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE, Mezinárodní svářečský technolog IWT*. Česká Třebová: DOM - ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
dt	Diferenciál času	[s]
D ₁	Průměr prvního svařovaného materiálu	[mm]
D ₂	Průměr druhého svařovaného materiálu	[mm]
F	Přítlačná síla elektrod	[N]
h	Vzdálenost od ohniska svaru	[mm]
I ₁	Primární proud transformátoru	[A]
I ₂	Sekundární proud transformátoru	[A]
I _{ef}	Efektivní hodnota střídavého proudu	[A]
I _p	Proud na předeřev	[A]
I _s	Svařovací proud	[A]
I _u	Užitkový proud	[A]
I _z	Ztrátový proud	[A]
I _{žhací}	Žihací proud	[A]
KV/Ku	Nárazová práce	[J]
l ₁	Délka vysunutí prvního svařovaného materiálu	[mm]
l ₂	Délka vysunutí druhého svařovaného materiálu	[mm]
N ₁	Počet závitů na primárním vynutí	[-]
N ₂	Počet závitů na sekundárním vynutí	[-]
P _S	Tlak na elektrodách/přítlačnicích	[MPa]
Q	Množství tepla vznikajícího mezi elektrodami	[J]
R	Celkový pracovní odpor mezi elektrodami	[Ω]
R ₁	Přechodový odpor mezi horní elektrodou a materiálem	[Ω]
R ₂	Elektrický odpor vrchního svařovaného materiálu	[Ω]
R ₃	Přechodový odpor mezi materiály	[Ω]
R ₄	Elektrický odpor spodního svařovaného materiálu	[Ω]
R ₅	Přechodový odpor mezi spodní elektrodou a materiálem	[Ω]
R ₆	Elektrický odpor horní elektrody	[Ω]
R ₇	Elektrický odpor spodní elektrody	[Ω]
R _e	Elektrický odpor obou elektrod	[Ω]
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _{mat}	Elektrický odpor svařovaných materiálů	[Ω]
R _p	Elektrický odpor styku	[Ω]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R _u	Elektrický odpor v užitkové větvi	[Ω]
R _z	Elektrický odpor ve ztrátové větvi	[Ω]
s ₁	Tloušťka vrchního materiálu	[mm]
s ₂	Tloušťka spodního materiálu	[mm]
S ₀	Vstupní průřez (kruhový) u tažení drátu	[mm ²]
S ₁	Výstupní průřez (tvaru D) u tažení drátu	[mm ²]
t	Svařovací čas	[s]
t ₁	Čas začátku působení přidržovače	[s]
t ₂	Čas oříznutí výronku	[s]
t ₀	Časová prodleva mezi svařovacím a žihacím proudem	[s]
T	Teplota	[°C]
T _{Ac1}	Teplota na křivce A _{c1} pro danou koncentraci uhlíku	[°C]

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
T_{Ac3}	Teplota na křivce A_{c3} pro danou koncentraci uhlíku	[°C]
T_0	Počáteční teplota soustavy	[°C]
T_t	Teplota tavení	[°C]
U	Napětí na zdroji	[V]
U_1	Primární napětí transformátoru	[V]
U_2	Sekundární napětí transformátoru	[V]
W	Elektrická práce	[J]
Z	Kontrakce	[%]
α	Úhel odvodu tepla prvního svařovaného materiálu	[°]
β	Úhel odvodu tepla druhého svařovaného materiálu	[°]
Δt_1	Prodleva mezi začátkem přitlaku elektrod a přívodem proudu	[°]
Δt_2	Prodleva mezi koncem přívodu proudu a přitlakem elektrod	[°]

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Schéma a rozměry řetězu
 - Příloha 2 Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli 1.0468
 - Příloha 3 Chemické složení ocelí pro výrobu řetězu
 - Příloha 4 Mikrostruktura vzorku B
-

Příloha 2 Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli 1.0468 [8]

1/1

Heat treated: 1682°C - 1975°C.

DIN 1.0468 DIN 17115 Mechanical Properties

Yield $R_{p0.2}$ (MPa)	Tensile R_m (MPa)	Impact KV/Ku (J)	Elongation A (%)	Reduction in cross section on fracture Z (%)	As-Heat-Treated Condition	Brinell hardness (HBW)
179 (≥)	417 (≥)	12	33	14	Solution and Aging, Annealing, Ausaging, Q+T,etc	121

DIN 1.0468 DIN 17115 Physical Properties

The following lists give DIN 1.0468 DIN 17115 properties such as physical properties, density, thermal expansion.

Temperature (°C)	Modulus of elasticity (GPa)	Mean coefficient of thermal expansion 10-6/(°C) between 20(°C) and	Thermal conductivity (W/m·°C)	Specific thermal capacity (J/kg·°C)	Specific electrical resistivity (Ω mm ² /m)	Density (kg/dm ³)	Poisson's coefficient, ν
33	-	-			0.34	-	
794	523	-	32.3	213		-	
299	-	23	24.2			432	331

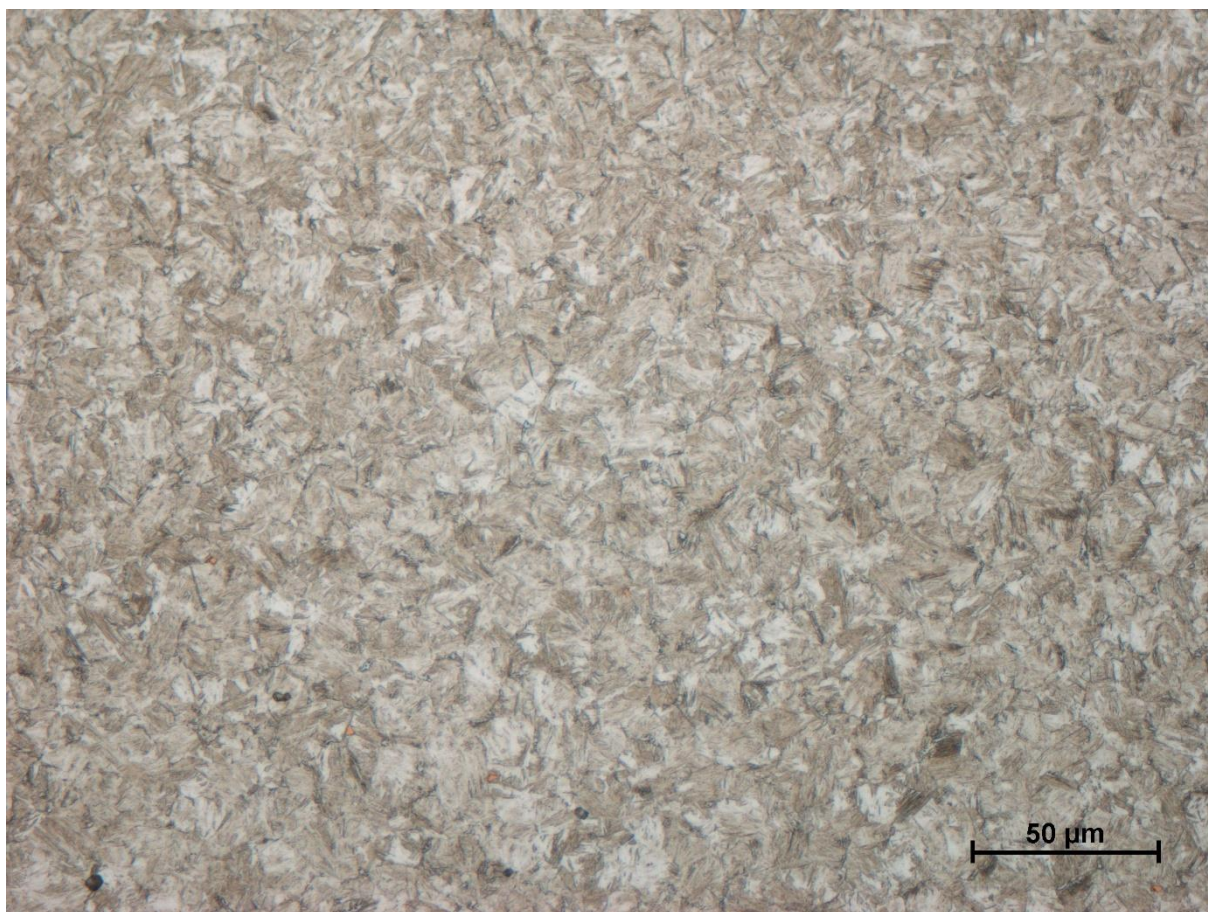
DIN 17115-1987											
Označení oceli	Chemické složení (%)										
	Chemical composition (%)										
Designation	C	Mn	Si max.	P max.	S max.	Cu max.	Cr	Ni	Mo	N max.	Al celkem Al total
Rst35-2	0.06-0.12	0.40-0.60	0.25	0.035	0.035	0.25	–	–	–	0.012	-
15Mn3Al	0.12-0.18	0.70-0.80	0.25	0.035	0.035	0.25	–	–	–	0.012	0.020-0.050
21Mn4Al	0.18-0.24	0.80-1.10	0.25	0.035	0.035	0.25	–	–	–	0.012	0.020-0.050
21Mn5	0.18-0.24	1.10-1.60	0.25	0.035	0.035	0.25	–	–	–	0.012	0.020-0.050
27MnSi5	0.24-0.30	1.10-1.60	0.25	0.035	0.035	0.25	–	–	–	0.012	0.020-0.050
20NiCrMo2	0.17-0.23	0.60-0.90	0.25	0.020	0.020	0.25	0.35-0.65	0.40-0.70	0.17-0.25	0.012	0.020-0.050
20NiCrMo3	0.17-0.23	0.60-0.90	0.25	0.020	0.020	0.25	0.35-0.65	0.70-0.90	0.15-0.25	0.012	0.020-0.050
23MnNiMoCr52	0.20-0.26	1.10-1.40	0.25	0.020	0.020	0.25	0.40-0.60	0.40-0.70	0.20-0.30	0.012	0.020-0.050
23MnNiMoCr53	0.20-0.26	1.10-1.40	0.25	0.020	0.020	0.25	0.40-0.60	0.70-0.90	0.20-0.30	0.012	0.020-0.050
23MnNiMoCr54	0.20-0.26	1.10-1.40	0.25	0.020	0.020	0.25	0.40-0.60	0.90-1.10	0.50-0.60	0.012	0.020-0.050



Obr. P1 Mikrostruktura svaru vzorku B.



Obr. P2 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti vzorku B.



Obr. P3 Mikrostruktura základního materiálu vzorku B.