

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zvyšování provozní spolehlivosti válcovacího bloku typu Morgan

Disertační práce

Studijní program:	P2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2302V019 Stavba výrobních strojů a zařízení
Školitel:	doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.
Doktorand:	Ing. Roman Latocha

Ostrava 2013

Rád bych touto cestou poděkoval všem pracovníkům univerzity za všestrannou pomoc po dobu mého studia. Především však mé poděkování patří školiteli doc. Ing. Jiřímu Friesovi, Ph.D. za jeho vedení, konzultace a čas.

Anotace

Latocha, R.: Zvyšování provozní spolehlivosti válcovacího bloku typu Morgan, VŠB-TU Ostrava, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2012, str. 98.

Disertační práce se zabývá analýzou příčin a řešením problémů, které se vyskytly v hotovním bloku válcovací stolice ve společnosti TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. V první části je proveden rozbor vlivů, které mají vliv na opotřebení válců v hotovním bloku. Na základě analýzy příčin, které ovlivňují životnost válců, bylo navrženo technické řešení chlazení válců, které zvýšilo účinnost chlazení v hotovním bloku typu MORGAN. Byla rovněž provedena matematická simulace chlazení, která vyhodnotila účinnost chlazení na prodloužení životnosti válců. V poslední části práce jsou nastaveny parametry k dosažení zvýšení spolehlivosti válcovacího bloku typu Morgan.

Annotation

Latocha, R.: Increasing of working reliability of rolling block type Morgan, VŠB – Technical University of Ostrava, Department of Production Machines and Design, 2012, pp. 98.

The dissertation deals with an analysis of causes and solutions of problems that occurred in the finishing train block of the rolling mill at company TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. The first part begins with an analysis of the effects that affect wear in cylinders in the rolling mill. Based on an analysis of causes that influence cylinder service life, it was proposed technical solution of the cylinder's cooling which increased an efficiency of cooling in the rolling mill – type Morgan. It was also performed the mathematical simulation of cooling that evaluated the cooling efficiency to an elongation of cylinder service life. In the last part of the study contains settings of the parameters required for an attainment increased reliability of rolling mill type Morgan.

OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE

1	ÚVOD	7
2	TECHNOLOGICKÉ SCHÉMA VÝROBNÍHO TOKU	8
2.1	Kyslíková konvertorová ocelárna.....	9
2.2	Kontilití.....	10
2.3	Charakteristika kontijemné trati.....	11
2.4	Hotovní blok.....	14
2.5	Výroba drátů mezi kalibračními válci.....	17
2.6	Válce hotovních bloků ze slinutých karbidů.....	18
2.6.1	Výroba a příprava prášků.....	20
2.6.2	Lisování a formování polotovarů.....	21
2.6.3	Fyzikální vlastnosti slinutých karbidů.....	21
2.6.4	Mechanické vlastnosti slinutých karbidů typu WC – Co.....	23
2.6.5	Modul pružnosti v tahu a smyku.....	25
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	26
4	STRATEGIE OPTIMALIZACE TECHNICKÝCH PARAMETRŮ VÁLCŮ	27
4.1	Činitelé ovlivňující životnost válců.....	28
4.2	Opotřebením otěrem prokluzem.....	29
4.3	Technické opotřebením válců při válcování za tepla.....	32
4.4	Opotřebením otěrem.....	34
4.5	Teplotní rozdíly ve válcovaném materiálu.....	37
4.6	Tvoření tepelných trhlin na válcích.....	39
4.7	Vnitřní napětí, mechanické trhliny.....	41
4.8	Vliv koroze na zhoršování kvality válců.....	43
5	CHLAZENÍ VÁLCŮ	46
5.1	Popis chladicího segmentu společnosti SMS MEER.....	48
6	TECHNICKÉ ŘEŠENÍ REKONSTRUKCE CHLAZENÍ VÁLCŮ	50
6.1	Použití trysek.....	51
6.1.1	Zvýšení účinnosti systémů chlazení pomocí rozprašování.....	52
6.1.2	Snížení spotřeby vody.....	52
6.1.3	Výběr trysek pro chlazení na chladícím segmentu.....	53
6.1.4	Trysky s plochým rozstříkem.....	54

6.1.5	Trysky s rozstříkem plného kužele.....	57
6.1.6	Tangenciální trysky s rozstříkem plného kužele	60
6.1.7	Axiální trysky s rozstříkem plného kužele	61
6.2	Závěrečné zhodnocení trysek	63
6.3	Nový chladicí segment	64
6.4	Nastavení vzdálenosti a úhlu rozstříku trysek chladicího segmentu.....	67
6.5	Proces simulace	70
6.5.1	Předpoklad simulace	71
6.5.2	Přestup tepla drát vs. válec	71
6.5.3	Simulační kroky při zjišťování prostupu tepla	75
6.6	Systém kontroly chlazení kalibru v hotovném bloku	82
6.7	Kontrola životnosti válců.....	85
6.8	Zvýšení válcovacích rychlostí.....	87
6.9	Ekonomické vyhodnocení a přínos projektu	88
7	ZÁVĚR	92
	Seznam obrázků	93
	Seznam tabulek	95
	Seznam použité literatury	96
	Seznam vlastních prací	98

Seznam použitých symbolů a označení

α	úhel rozstříku	[°]
ε	poměrné prodloužení	[-]
λ	vlnová délka	[m]
μ	průtokový součinitel	[K ⁻¹]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
τ_{\max}	maximální smykové napětí při plastické deformaci	[MPa]
ω	úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
APT	parawolframan amonný	[-]
b_0	šířka kovu před průchodem	[mm]
b_1	šířka kovu po průchodu	[mm]
D	průměr paprsku	[mm]
DN	vnitřní světlost trubky	[mm]
E	vzdálenost trysek	[mm]
f	frekvence	[Hz]
F	síla	[N]
h_0	výška kovu před průchodem	[mm]
h_1	výška kovu po průchodu	[mm]
H	výška instalovaných trysek	[mm]
l	dráha	[m, mm]
K_{IC}	lomová houževnatost	[MPa·m ^{1/2}]
l_0	délka kovu před průchodem	[mm]
l_1	délka kovu po průchodu	[mm]
m	hmotnost	[kg]
n	otáčky	[s ⁻¹]
p	tlak	[Pa]
p	přetlak	[Pa]
pH	tvrdost vody	[-]
t	teplota	[°C]
U	překrytí ostříkovaného úhlu	[mm]
v	rychlost	[m·s ⁻¹]
V	objem	[m ³]

1 ÚVOD

Cílem mé disertační práce je zvyšování provozní spolehlivosti válcovacího bloku typu Morgan ve společnosti TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s. Problematikou válcování se již zabývala celá řada odborníků. Válcováním rozumíme kontinuální proces, při kterém se tvářený materiál deformuje mezi otáčejícími se pracovními válci za podmínek převažujícího všestranného tlaku. Válcovaný materiál se mezi válci deformuje, průřez se zmenšuje, materiál se prodlužuje a současně rozšiřuje a mění se i rychlost, kterou válcovaný materiál z válcovací stolice vystupuje.

Tento složitý proces mne přiměl navrhnout nové technologické a konstrukční řešení, které se bude zabývat problematikou životnosti válců v hotovném bloku při válcování drátů. Konstrukční řešení bude zaměřeno na změnu chlazení SK válců v hotovném bloku, na zvýšení životnosti válců v procesu válcování. Provedu rovněž rozbor chlazení s ohledem na jeho účinky při změně válcovacích rychlostí, optimalizaci chlazení klíčových uzlů, odstranění nežádoucích vlivů při válcování, a další potřebné analýzy.

Disertační práce je zaměřena na zvýšení životnosti válců v řízeném procesu válcování v hotovném bloku válcovací stolice. Je zde proveden rozbor vlivů, které mají negativní vliv na životnost válců. Bude také navržen nový systém chlazení v hotovných blocích. Je rovněž vyhodnocována životnost válců v návaznosti na množství odválcovaného drátu. Součástí práce je provedení zkoušky, při které je zvýšena válcovací rychlost s možností zrychlení výroby drátů. Celý proces vyhodnocen z pohledů:

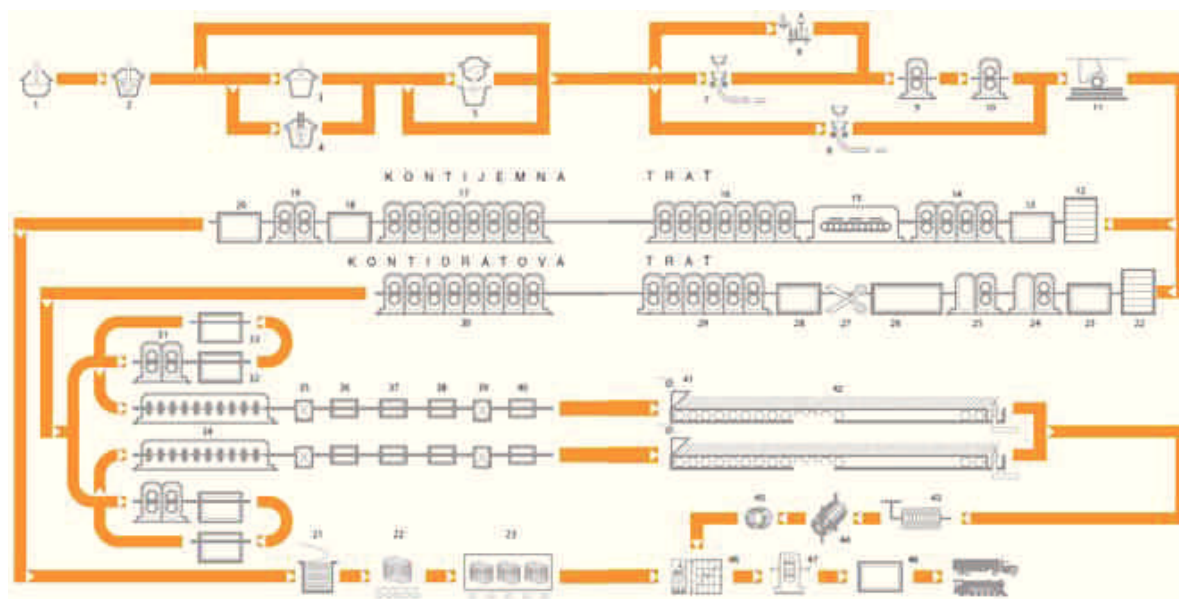
- Ekonomického - snížení množství chladicí kapaliny, prodloužení životnosti válců,
- Provozního - zvýšení válcovací rychlosti, snížení počtu montážních výměn válců.

2 TECHNOLOGICKÉ SCHÉMA VÝROBNÍHO TOKU

Složité proces válcování prochází mnoha stupni přepracování. Nemohu začít jinak než stručným popisem jednotlivých kroků materiálové přeměny až k výrobě konečného produktu v podobě drátu. Celý proces začíná výrobou oceli v konvertorech, dále pokračuje přes sochorové kontilití k nakládacím roštům do krokové pece, pak pokračuje přípravným pořadím k nůžkám přes střední pořadí do smyčky, následně přes vodní chlazení k hotovním blokům na dopravník a nakonec do sběrné komory. Celý materiálový tok můžeme vidět na schématu výroby (Tab. 1, obr. 1).

Tabulka 1 Popis schéma výrobního toku

KONTIJEMNÁ TRAŤ			KONTIDRÁTOVÁ TRAŤ				
01.	Konvertor	13.	Ostřík okují	24.	Kroková pec	36.	Hotovní pořadí
02.	Argonová homog. stanice	14.	Čtyřstolicové pořadí SMS	25.	Zařízení pro ostřík okují	37.	Průběžná defektoskopická kon.
03.	Chemický ohřev	15.	Izolovaný valník	26.	Horizontálně - vertikální poř. s výměnnými kazetami	38. - 41.	Vodní chlazení
04.	Pánvová pec	16.	Předválcovací pořadí 7 stolic	27.	Horizontálně - vertikální poř. s výměnnými kazetami	42.	Průběžné měření rozměrů
05.	Vakuovací stanice RH	17.	Hotovní pořadí	28.	Izolovaný valník	43.	Pokládací hlava
06.	Lití ingotů	18.	Řízené vodní chlazení	29.	Nůžky kyvadlové	44.	Chladicí dopravník Stelmor
07.	Blokové kontilití	19.	Dvoustolicový blok	30.	Druhý ostřík okují	45.	Hákový dopravník
08.	Sochorové kontilití	20.	Řízené vodní chlazení	31.	Předválecí pořadí	46.	Lisovací a vázací zařízení
09.	Blokovna 1	21.	Navíječky Garret	32.	Střední pořadí	47.	Jiskření
10.	Vratná trať	22.	Volné kompaktní ochlazování svitků na vzduchu	33.	Dvoustolice CL	48.	Kontrola kvality
11.	Čištění sochorů	23.	Pomalé ochlazování svitků (izolované tunely)	34.	Vodní chlazení	49.	Žihání
12.	Kroková pec			35.	Vodní chlazení	50.	Moření
						51.	Expedice



Obrázek 1 Schéma výrobního toku [18]

2.1 Kyslíková konvertorová ocelárna

Výroba oceli probíhá v kyslíkové konvertorové ocelárně (obr. 2), která byla uvedena do provozu v roce 1983. Je vybavena dvěma 180 t konvertory s roční kapacitou 2,4 mil. tun oceli. V letech 2004 - 2005 došlo k výměně zastaralých původních konvertorových nádob za nové. Tato změna rozšířila výrobní sortiment o nové typy oceli, jak ušlechtilé tak neušlechtilé. Jako vstupní materiál je používán šrot a surové železo připravované ve vysokých pecích TŽ a.s.



Obrázek 2 Tavba oceli v kyslíkové konvertorové ocelárně [18]

Konvertory jsou vybaveny spodním dmýcháním argonu nebo dusíku, systémem zásobníků kovových a nekovových přísad, plynočistírnu a jímáním konvertorového plynu. Dále je nainstalován řídicí model Z-BOP pro výpočet vsázky, polohování trysky, foukání kyslíku a zavádění přísad. Řízení celého konvertorového procesu včetně plynočistírny a jímání konvertorového plynu zajišťuje automatizovaný řídicí systém. [18]

2.2 Kontilití

Konvertorová ocel je odlévána na dvou kontilitích, z nichž první je blokové o pěti proudech a druhé sochorové je o osmi proudech. Blokové kontilití (obr. 3) vyrábí pravoúhlé i kruhové kontislítky. Blokové kontislítky jsou ohřívány v navazující krokové peci a válcovány na blokovně, která plní funkci předválecího pořadí.



Obrázek 3 Blokové kontilití [18]

Sochorové kontilití odlévá výhradně čtvercový formát 150 mm. Konvexní krystalizátory umožňují vysokou výrobu. Na každém licím proudu jsou umístěny dva elektromagnetické míchače oceli, jeden v krystalizátoru, druhý pod krystalizátorem, které zajišťují zlepšenou vnitřní kvalitu výrobku. Lité sochory jsou převáženy železniční vlečkou ke zpracování v hotovných válcovacích tratích. Speciální keramika pro zařízení plynulého odlévání oceli je vyráběna v Třinci ve společnosti Vesuvius Česká republika, a.s. Kontislitky jsou důležitým obchodním artiklem, který tvoří významnou část prodeje. [18]

2.3 Charakteristika kontijemné trati

Kontislitky a sochory z vratné tratě jsou ohřívány v krokové peci. Za krokovou pecí je umístěn ostřík okují a čtyřstolicové jednožilové přípravné pořadí. Za osmistolicovou dvoužilovou předtratí následuje samostatné pravé a levé hotovní pořadí.

Za pravou žílou se nachází hotovní ACS blok, který umožňuje přesné válcování s řízeným chlazením. Pravá žíla umožňuje válcování speciálních kvalit SBQ do průměru 80 mm. Levá žíla je uzpůsobena pro válcování betonářské oceli. Vývalky z obou žíl postupují na chladicí lože. Z pravého chladicího lože jsou vývalky v délkách 80 - 110 m dopravovány do úpravny k dělení na rozbrušovacích pilách a dále k vázacím linkám. Z levého chladicího lože jsou vývalky zaváděny k dělení nůžkami. Součástí tratě je navíc linka pro navíjení kruhové oceli do svitků. Pro výrobu oceli je použit systém (slitting). Podstatná část výroby je dále zpracovávána na finalizačních zařízeních – žihání, loupání, tryskání, hrotování, kontrole vnitřních i povrchových vad.

Kontijemná trať je znázorněna na obr. 4 a obr. 5.



Obrázek 4 Kontijemná trat' [18]

Drátové tratě pro výrobu válcovaného drátu za tepla jsou dnes všeobecně nejmodernějšími tratěmi hutních závodů jak u nás, tak i ve světě. Přispívá k tomu v podstatě jednotná koncepce všech moderních drátových tratí.

Jestliže se dříve vyráběl drát na tratích otevřených nebo polospojitéch, kde rychlost válcování nepřesahovala $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a váha svitku byla do 1000 kg, je dnes v průmyslově vyspělých zemích výroba drátu zajištěna na tratích s několika spojitými pořadími.

Jsou to většinou tratě, kde výstupní válcovací rychlost je 90 až $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a váha svitku je 2000 kg. Kontidrátová válcovna typu Morgan byla postavena v roce 1973, následně prošla rozsáhlou rekonstrukcí a modernizací v letech 1997 - 2000.

Z původně čtyřžilové tratě je dnes dvoužilová se zvýšenou kapacitou, širším sortimentem a vyšší kvalitou vyráběného drátu. Vlastní válcovna má délku přes 400 m a šířku 60 m. Je postavena více než 5 m nad hutní úroveň, a to z toho důvodu, že je pod tratí celé hydraulické, vodní a jiné hospodářství, dílny apod. Výrobní proces je řízen automatizovaným systémem. Kontislitky a sochory o hmotnosti 2000 kg a rozměrech 150 x 150 mm a délce 12 m z vratné tratě jsou po ohřevu v nové

krokové peci válcovány na přípravném, předválcovacím a středním pořadí. Následně je provalek přiváděn pomocí smyčky do CL dvoustolice s letmo uloženými válci a pak do 10 - ti stolicového hotovního bloku, z něhož vystupuje drát rychlostí až $105 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tepelné zpracování drátu probíhá na každé žile ve čtyřech sekvencích vodních drah. Další fáze tepelného zpracování drátu probíhá v rozvinuté smyčce na válečkovém dopravníku, kde probíhá chlazení vzduchem. Poté je svitek drátu o hmotnosti 2000 kg shromažďován ve sběrné komoře a odtud je hákovým dopravníkem dopravován k lisům, kde jsou svitky slisovány a připraveny k expedici po železnici nebo kamionovou dopravou. Trať vyrábí drát o průměru 5,5 - 20 mm. [18]



Obrázek 5 Kontijemná trať [18]

Tabulka 2 Charakteristika kontidrátové tratě [18]

KONTIDRÁTOVÁ TRAŤ	
Přípravné pořadí	4 stolice typu H-V
Předválečí a střední pořadí	14 stolic typu H
Průměr válců	540, 440 a 380 mm
Dvojblok	typu H, V
Průměr válců	203 mm
Hotovní blok	10-ti stolicový typu H, V
Průměr válců	200 a 160 mm
Válcovací rychlost	105 m/s
Kapacita	825 kt/rok

2.4 Hotovní blok

Hotovní blok slouží k přesnému doválcování drátu o \varnothing 5,5 - 20 mm v požadované toleranci. Uložení stolic je střídavé, to proto, aby osy válců sousedních stolic svíraly vůči horizontální rovině úhel 45° . Válce jsou uchyceny letmo a směřují střídavě nahoru a dolů. Instalací tohoto zařízení se dostala válcovna kvalitativně na světovou úroveň. Základem je 10 - ti stolicový blok, složený z čtyř 8" a šesti 6" stoliček, které jsou v činnosti podle průměru válcovaného drátu. Pohon je společný přes elektromotor, převodovku s rozvodovkou, rozváděcí transmisní hřídel a pomocí kuželových soukolí se točivý moment převádí na jednotlivé stoličky. Tímto pohonem lze docílit rychlost válcování při \varnothing 5,5 mm až na $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dané zařízení vyžaduje velmi vysokou náročnost na chlazení, mazání a přesnost při opravách a nastavení strojů a armatur.

Každý modul má dvě výstupní hřídele, na kterých jsou tlakem nasazeny válcovací kotouče, které jsou vyrobeny ze speciálních materiálů (slnutých karbidů) a součástí je také přesně vybroušený kalibr. Jeho rozměr udává kalibrační řada, kterou určuje dodavatel technologie (započítaný předstih, teploty, přetlakové odpory v závislosti na rychlostech). Pracovní válce stolice jsou v podstatě kotouče o rozměrech od \varnothing 159 mm u nových a \varnothing 143 mm u opotřeбенých a jejich životnost je až 40 000 t odválcovaného drátu. Malé průměry válců mají příznivý vliv na snížení válcovacích sil. Kalibry jsou provedeny s vysokou přesností v dimenzích až $\pm 0,01$ mm. U průměru drátu 5,5 - 8 mm dosahují tolerance $\pm 0,15$ mm, u průměru 8,5 - 20 mm tolerance $\pm 0,20$ mm. Při používání válců v blocích Morgan se volí jednoduchá řada kruhových a oválných kalibrů.

Společným znakem všech systémů hotovních bloků je:

- jednožilové válcování,
- válcování bez zkrucování provalku,
- průběžná příčná osa provalku, skupinový pohon bez chvění,
- symetrické nastavování válcovací mezery.

Hlubší a ostřejší zářezy by mohly vést k předčasným lomům válců.

Výhody kalibrace ovál - kruh:

- minimální teplotní rozdíl po průřezu, snížené riziko vzniku trhlin,
- rovnoměrné prodlužování, tvarová podobnost oválného a kruhového kalibru,
- velká pružnost při rozdílném šíření, možnost válcování legovaných ocelí.

Nevýhody kalibrace ovál - kruh:

- nutnost zavádění oválu do kruhu vyžaduje válečkovou armaturu,
- menší schopnost opadávání sekundárních okují (při velkých válcovacích rychlostech a malých vzdálenostech mezi stolicemi je nebezpečí zaválcování okují).

Za hotovními bloky následuje řízené chlazení drátu. V první části se drát ochlazuje vodou na teplotu 750 až 820°C, což se děje ve třech chladících sekcích pomocí chladících a stíracích trysek, které ostříkují drát v protiproudu. Předchlazený drát je zaveden do vertikální navíječky a závity drátu jsou ukládány na válečkový dopravník Stelmor v rozvinutých smyčkách. Takto je drát dále ochlazován vzduchovými ventilátory. Zapojení radiálních pyrometrů do systému umožňuje řídit rychlost dopravníku a tím ovlivňovat ochlazovací rychlost podle chemického složení.

Stolička hotovního bloku je znázorněna viz obr. 6.



Obrázek 6 Stolička hotovního bloku

Hotovný 10-ti stolicový blok typu „V“ – technické údaje:

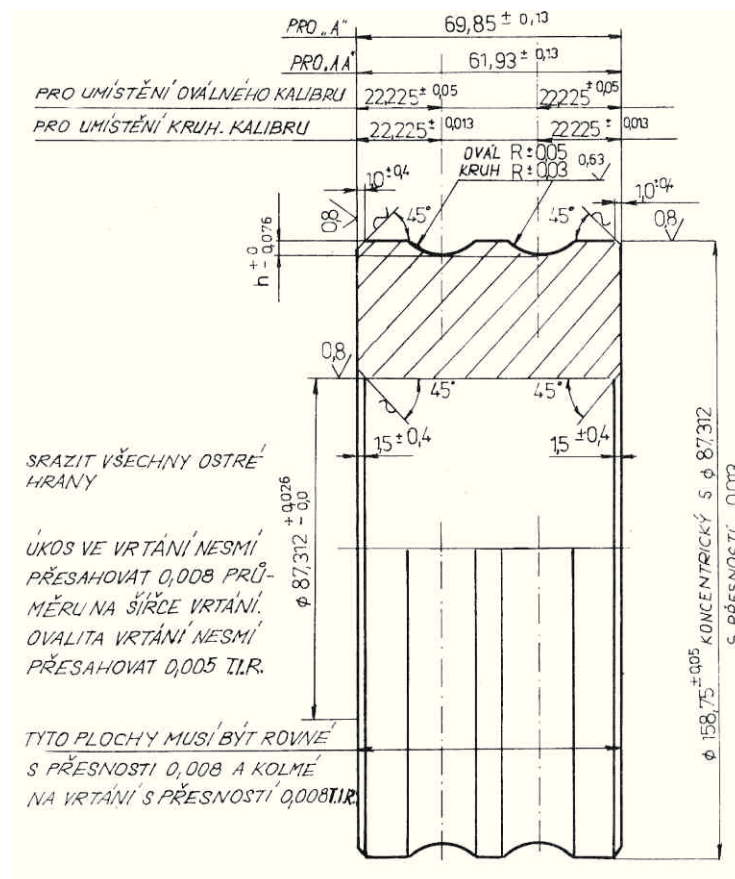
Kalibrace:	Standardní
Provedení vlastní stolice:	Stolice 1 až 4.....CL200 Stolice 5 až 10.....CL160
Výkon společného pohonu:	1 x 6300 kW
Počet otáček motoru pohonu:	950/1400 min ⁻¹
Celkový převodový poměr:	Stolice 1: 0,9486 Stolice 2: 0,7586 Stolice 3: 0,6063 Stolice 4: 0,3601 Stolice 5: 0,2881 Stolice 6: 0,2305 Stolice 7: 0,1844 Stolice 8: 0,1475 Stolice 9: 0,1179 Stolice 10: 0,0943
Olej MOBIL:	Vacuolin 525
Tlak oleje:	340 kPa
Max. teplota oleje:	42°C
Max. povolené znečištění oleje:	voda 0,6 % nečistoty 10ppm
Průtok:	500 l·min ⁻¹ – 1 stolička 250 l·min ⁻¹ – 1 válec na stoličce

2.5 Výroba drátů mezi kalibračními válci

Válcování oceli probíhá mezi kalibračními válci v několika průchodech v mezeře mezi válci v jedné nebo více stolicích. V každém dalším průchodu se plocha příčného průřezu postupně zmenšuje a blíží se konečnému tvaru. Požadovaného tvaru drátu dosáhneme na kalibrovaných válcích, tj. na válcích, které svým tvarem postupně odpovídají konečnému tvaru drátu. Hlavním úkolem kalibrace válců je držet kov patřičné jakosti a přesného tvaru průřezu se správnými rozměry. Při návrhu kalibrace je nutné:

- určení optimálního tvaru,
- správná volba úběru,
- využití teploty válcovaného výrobku (znalost deformačního odporu).

Konečné řešení pak vede k optimální výkonnosti zařízení ve vztahu k výrobní ceně hotového výrobku. Na obr. 7 můžeme vidět technickou dokumentaci kalibračního válce.



Obrázek 7 Technický výkres kalibračního válce [12]

2.6 Válce hotovných bloků ze slinutých karbidů

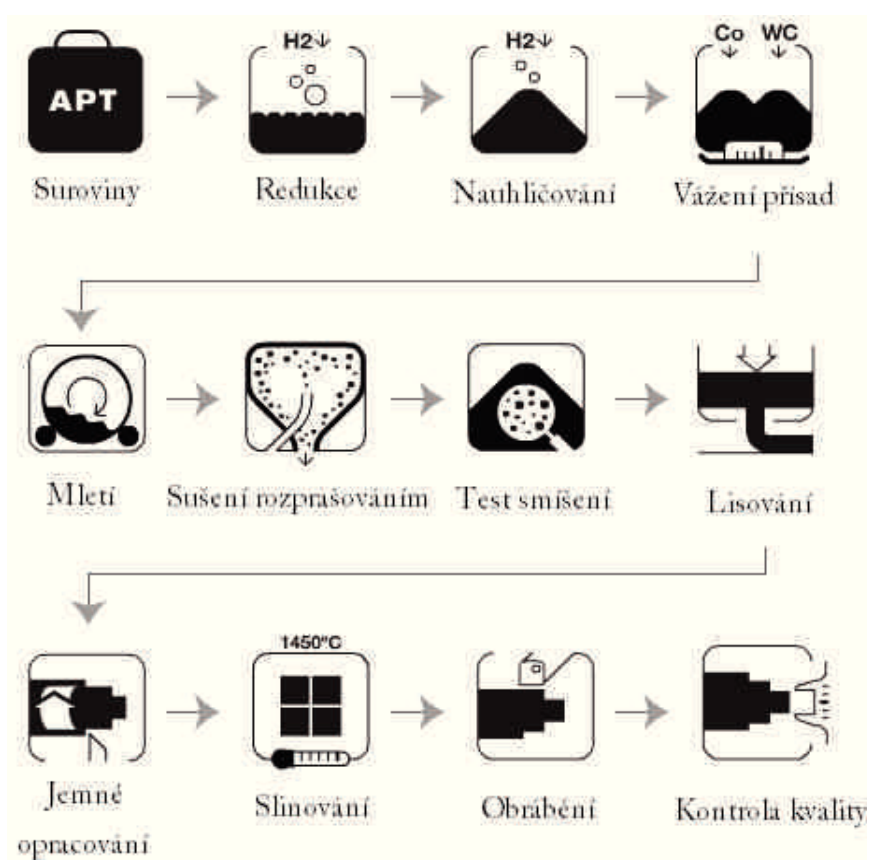
Válce ze slinutých karbidů jsou jedním z nejdůležitějších článků výrobního řetězce při výrobě drátů. Kalibrované válce tvarují drát do konečné podoby, proto jsou na ně kladeny ty nejvyšší požadavky - musí být odolné proti opotřebení, vnitřnímu napětí, mechanickým trhlinám, korozi, plastické deformaci atd. V minulosti se válce vyráběly z oceli, litiny. Dnes vysoké válcovací rychlosti v hotovných stolicích neumožňují použití válců z klasických materiálů. Válce se dnes vyrábějí ze slinutých karbidů, které musí být vyrobeny tak, aby byly přizpůsobené vysokým výrobním požadavkům.

Válce musí splňovat zásadně dvojí protichůdnou funkci, a to dostatečnou pevnost ve střídavém ohybu a optimální životnost v kalibru. Obě veličiny jsou vzájemně hyperbolicky závislé. Zvýší-li se využití kalibru, pak se to děje na úkor pevnosti ve střídavém ohybu a obráceně. Kromě toho přistupuje ještě nutnost odolnosti proti tepelným rázům a namáhání odstředivou silou. Jako východisko se pro daný případ ukázaly válce vyrobené ze slinutých karbidů - válce jsou masivní (až 10 kg těžké). Válce se pak dále opracovávají do konečných tvarů. Sledování opotřebení válců se vyhodnocuje v průběhu výroby, kdy se válce opotřebují a znova brousí. Válce postupně zmenšují svůj průměr, minimální průměr válců je 143 mm, což je nejnižší průměr, při kterém jsme schopni válcovat drát. Tento nejnižší průměr nám určí hodnotu odválcovaného drátu v tunách na jeden válec. Tyto hodnoty jsou pečlivě vyhodnocovány a ukazují životnost válců ve výrobě. Válce mohou dosahovat až 40 000 t odválcovaného materiálu za dobu své životnosti. Snahou je tyto hodnoty kvalitním chlazením neustále zvyšovat. Nutnost kvalitních materiálů, které jsou zapotřebí pro výrobu válců ze slinutých karbidů, dodává firma Sandvik. Výroba slinutých karbidů je realizována technologií práškové metalurgie. Celý proces se skládá z mnoha operací, které musí být pro dosažení požadovaných vlastností, mikrostruktury apod., pečlivě prováděny a kontrolovány. Zde začal výzkum a vývoj nové technologie ve spolupráci se švédskou firmou Sandvik. Struktura a složení mají rozhodující význam na kvalitu výrobku i výkonnost, která je ve složitých provozních podmínkách požadována. Tolerance obsahu WC, Co a dalších karbidů jsou velice úzké a podléhají přísné kontrole. Výsledná struktura slinutého karbidu by měla být homogenní a reprodukovatelná.

Základem výroby slinutých karbidů je lisování směsi prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu a její následné slinování.

Celý postup (obr. 8) lze rozdělit do následujících hlavních fází:

- výroba, příprava prášků,
- lisování polotovarů,
- slinování,
- obrábění polotovarů.



Obrázek 8 Proces přípravy prášků a výroby slinutých karbidů [10]

2.6.1 Výroba a příprava prášků

Wolframit a scheelit jsou nejpoužívanějšími nerosty, obsahující wolfram, v produkci slinutých karbidů. Z koncentráту se získává roztok parawolframanu amonného (Ammonium ParaTungstate – APT), který je jednou z počátečních surovin pro výrobu. Prvním krokem této výroby je tzv. mokrý proces, zahrnující sekvence postupných rozpouštění, precipitací a separací. Získaný oxid wolframový (WO_3) je mimořádně čistý s minimálními stopami nečistot. Stupeň znečištění bývá kontrolován před dalším postupem. Po redukci oxidu wolframového ve vodíku se získává čistý wolframový prášek. Různými obměnami redukčního procesu lze regulovat velikost zrna prášku wolframu. Například pro získání jemnozrnného wolframového prášku je zapotřebí redukce s velkým přebytkem vodíku, za nízké teploty s malým přísunem oxidu wolframového. Hrubšího zrna lze dosáhnout opačným postupem. Vyrobený prášek opět podléhá přísné kontrole. Wolframový prášek se nejprve smíchá se sazemí v přesně stanoveném množství. Směs je následně ve vysokofrekvenčních pecích zahřívána na vysokou teplotu ($1700^\circ C$) ve vodíkové atmosféře. Proces nauhličování (karburace) probíhá do doby vzniku prášku karbidu wolframu (WC). Takto vyrobený karbid má určité vlastnosti, které dále určují jeho použití - např. velikost zrna, čistota. Obdobně se vyrábějí i další karbidy (TaC, NbC) potřebné pro výrobu slinutých karbidů. Karbid titanu (TiC) se nevyrábí samostatně, ale společně s karbidem wolframu při teplotách vyšších než $2000^\circ C$. Produktem je potom požadovaný směsný karbid (Ti, WC). Rozdílné typy práškových karbidů a pojící prášek kobaltu (Co) jsou považovány jako surovina pro výrobu slinutých karbidů. [13]

Po pečlivém vážení karbidu wolframu, kobaltu a dalších přísad dle stanoveného složení a požadovaného druhu slinutého karbidu se směs mele za mokra, tzn. v prostředí inertních organických kapalin. Mletí má za účinek zmenšování velikosti zrna prášků a také homogenitu směsi, která je důležitá z hlediska vlastností slinutého karbidu po slinování. Během mletí zrna kobaltu a karbidů k sobě přilnou díky svému reaktivnímu povrchu. Mokré mletí napomáhá k disperzi jednotlivých částic. Proces probíhá ve válcových (kulových) mlýnech, tzv. attritorech, které jsou naplněny tělísky ze slinutých karbidů, aby nedošlo k znečištění směsi. Tyto tělísky (kuličky) rozmělňují zrna karbidů a pojícího kovu.

Mletí je časově nejnáročnější proces během výroby slinutých karbidů, může trvat i několik dnů. Po mletí se směs musí vysušit, například metodou rozprašováním, do práškové formy.

Vysušený prášek se skládá z kulových zrníček karbidů rovnoměrně obalených pojícím kovem. Dokonale vysušená směs je připravena k lisování, je to tzv. RTP (Ready – To - Press) prášek. Ovšem ještě před samotným lisováním je nutné provést test smíšení. Lisovací parametry a složení RTP prášku je důležité pro následující postup. Důkladně se proto měří velikost a tvar částic RTP prášku. Mimoto musí mít prášek dobrou sbíhavost, aby rovnoměrně zaplnil veškeré dutiny lisovací formy.

2.6.2 Lisování a formování polotovarů

Samotná výroba slinutého karbidu začíná lisováním a formováním RTP prášku do kompaktního celku. Při vývoji nových technologií je snahou dosáhnout homogenity zhutnění s minimální pórovitostí v celém objemu. Při výrobě ze slinutých karbidů se používají dva způsoby lisování, a to oboustranné lisování a izostatické lisování za studena (za tepla). Rovnoměrný tlak na formu způsobuje inertní plyn, argon, helium. Lisování probíhá za vysokých teplot okolo 2000°C po dobu 2 až 6 hodin.

2.6.3 Fyzikální vlastnosti slinutých karbidů

Fyzikální vlastnosti se mohou značně lišit u jednotlivých typů slinutých karbidů. Závisí na použitém složení substrátů, struktuře vyrobeného materiálu, zrnitosti a jeho konečném opracování apod. Fyzikální vlastnosti slinutých karbidů bych rozdělil na karbidy typu WC - Co, WC - TiC - Co.

1. Fyzikální vlastnosti slinutých karbidů typu WC - Co

Měrná hmotnost:

Tyto typy slinutých karbidů mají měrnou hmotnost poměrně vysokou díky velké měrné hmotnosti karbidu wolframu - ta se pohybuje v rozmezí 12,3 - 15,2 g·cm⁻³. Skutečná měrná hmotnost se může nepatrně lišit od teoretické, jelikož ve výrobním procesu může dojít k zbytkové pórovitosti slinutého karbidu.

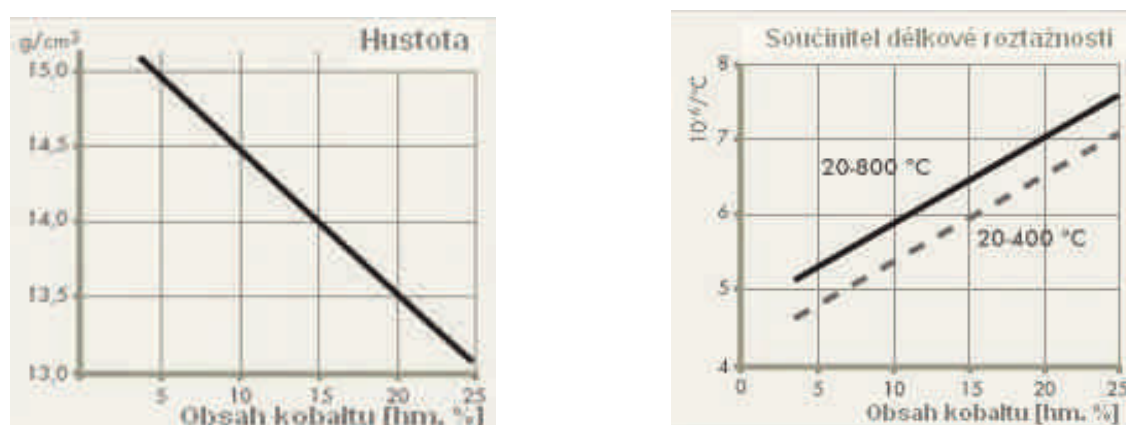
Tepelná vodivost:

Do značné míry závisí na velikosti zrna, kde teplota klesá s rostoucí velikostí zrna a jen málo závisí na obsahu kobaltového pojiva. Obvykle se pohybuje v rozmezí 50 - 150 (W·m⁻¹·K⁻¹), což je v porovnání s tepelnou vodivostí oceli 2 až 3 krát vyšší.

Součinitel délkové roztažnosti:

Součinitel délkové roztažnosti závisí na obsahu kobaltu. Čím je větší obsah kobaltu, tím je větší součinitel délkové roztažnosti. Hodnoty v rozmezí 3,4 – 7,1 (10⁻⁶ K⁻¹). [13]

2. Fyzikální vlastnosti slinutých karbidů typu WC - TiC - Co



Obrázek 9 Závislost měrné hmotnosti (hustoty) a součinitele délkové roztažnosti pro rozdílné teplotní intervaly na hmotnostním procentu obsahu Co [10]

Měrná hmotnost:

Vzhledem k nižší měrné hmotnosti TiC je nižší než u slinutých karbidů předchozího typu (WC – Co). Závisí opět na obsahu kobaltu a dalších příměsí. Udává se v širokém rozsahu hodnot ($5,2 \div 14,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Tepelná vodivost:

Je nižší než u systému WC - Co a klesá s rostoucím obsahem TiC. Při vysokém obsahu karbidu titanu mohou mít slinuté karbidy typu WC - TiC - Co dokonce nižší tepelnou vodivost než je tepelná vodivost oceli. V tabulkách výrobců lze nalézt hodnoty v rozmezí 15 až 100 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Součinitel délkové roztažnosti:

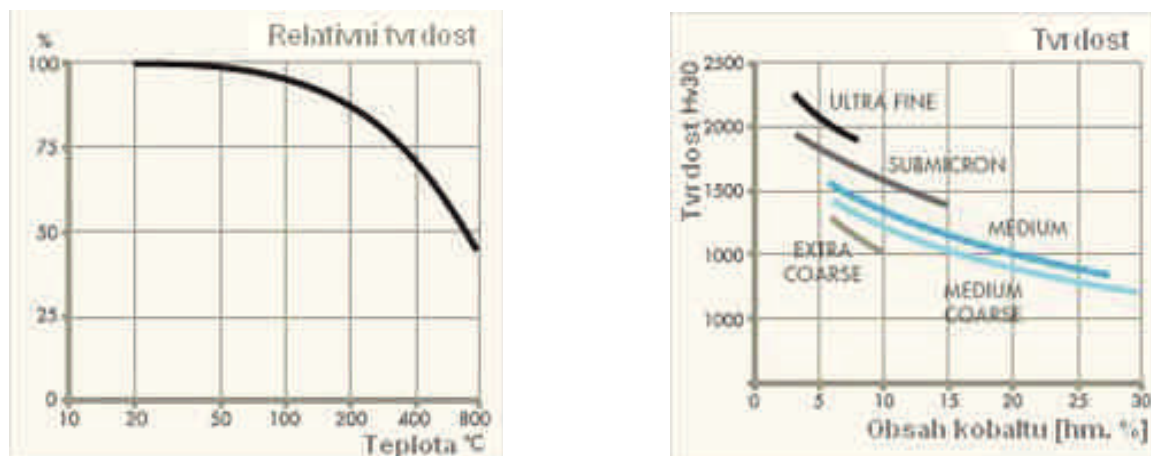
Součinitel délkové roztažnosti mírně roste s rostoucím obsahem TiC, proto je vzhledem k předchozímu typu vyšší. Rozsah hodnot válců je udáván mezi 5,5 ÷ 7,9 (10^{-6} K^{-1}).

Měrný odpor:

Měrný odpor klesá s rostoucím obsahem karbidu titanu. Rozsah hodnot ($20 \div 85 \mu\text{m}$). [13]

2.6.4 Mechanické vlastnosti slinutých karbidů typu WC – Co

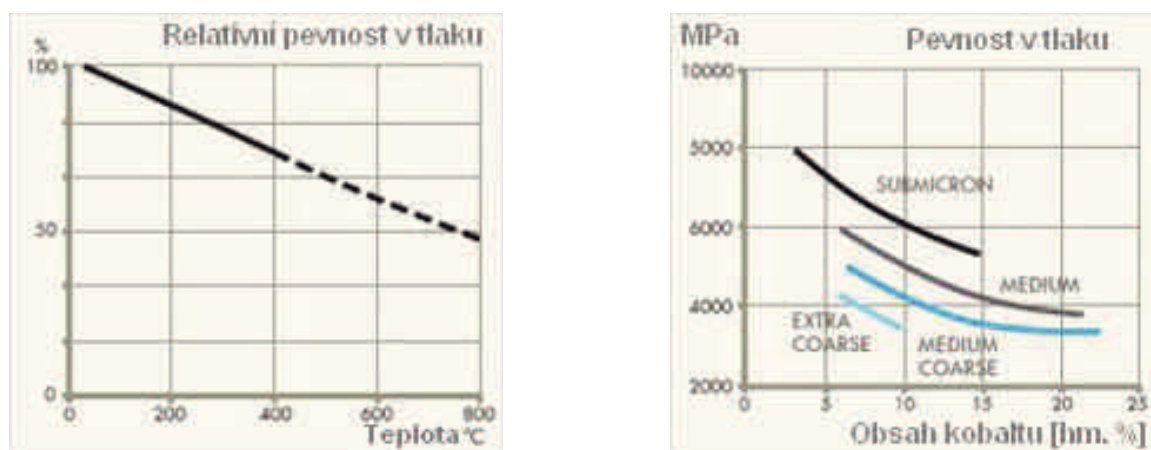
Tvrдость závisí především na obsahu kobaltu a velikosti zrna karbidické fáze. Tvrдость vyráběných slinutých karbidů se pohybuje v rozmezí 780 ÷ 2125 HV. Slinuté karbidy nejjemnějších struktur si zachovávají velmi dobrou tvrдость až do 800°C. Pevnost v ohybu roste spolu s rostoucím obsahem kobaltu. Maximální hodnota pevnosti v ohybu závisí na velikosti zrn karbidu wolframu.



Obrázek 10 Závislost relativní tvrdosti na teplotě a závislost tvrdosti na hmotnostním procentu obsahu kobaltu pro rozdílné zrnitosti slinutých karbidů [10]

Stejně jako tvrdost, klesá pevnost v ohybu s rostoucí teplotou. Pomocí izostatického lisování za vysokých teplot lze ohybovou pevnost zvýšit. Nově vyráběné materiály mohou dosahovat pevnosti v ohybu v rozsahu 2000 ÷ 4700 MPa.

Pevnost v tlaku opět závisí na obsahu Co a velikosti zrna karbidické fáze. Pevnost tlaku klesá s rostoucím obsahem kobaltu, rostoucí velikostí zrna WC a rostoucí teplotou. Rozsah hodnot je 3100 ÷ 8000 MPa.



Obrázek 11 Závislost relativní pevnosti v tlaku na teplotě a závislost pevnosti v tlaku na hmotnostním procentu obsahu kobaltu, pro rozdílné zrnitosti slinutých karbidů [10]

2.6.5 Modul pružnosti v tahu a smyku

Jsou ve srovnání s oceliemi několikanásobně vyšší. S rostoucím množstvím kobaltu a zvětšujícím se zrnem karbidické fáze jejich hodnota klesá. Modul pružnosti v tahu je uváděn v rozmezí 440 ÷ 670 GPa a modul pružnosti ve smyku mezi 170 ÷ 270 GPa.

Mechanické vlastnosti slinutých karbidů jsou rozhodujícími vlivy pro jejich použití. Každá z vlastností má svůj nezanedbatelný význam. Současné slinuté karbidy musí mít výborné mechanické vlastnosti při provozovaných vysokých teplotách. Z uvedených vlastností vyplývá, že tyto materiály dobře splňují všechny dané požadavky. V další části práce se budu zabývat činiteli, kteří ovlivňují životnost válců.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cíl disertační práce vychází z provozních potřeb firmy TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s. V první fázi bylo snahou zmapovat všechny negativní vlivy, které vstupovaly do procesu válcování. Od prvopočátku tvářecích operací hluboko do minulosti se ukazuje, že obsluha tvářecích strojů si uvědomovala zejména vztahy na jedné straně teploty a deformace a na druhé straně výsledných vlastností. Do hry vstupuje velikost deformace, velikost rychlosti deformace, teplota T , tvářecí čas t a čas v pauzách mezi deformacemi. Tyto převážně termomechanické parametry jsou kupodivu poměrně snadno zjistitelné, objektivně prokazatelné a vyskytují se v celé řadě konstitutivních rovnic pro popis zpevňování, rekystalizace, podílu uzdravené struktury a dalších. Parametry struktury, byť zdánlivě též zjistitelné, jako je chemické složení, velikost zrna a další (mikrostruktura, vměstky, precipitáty), které od prvopočátku vstupují do procesu, se mění v závislosti na termomechanických podmínkách tváření a přesné matematické popisy jsou mnohem obtížnější.

Řízená a přesně definovaná mikrostruktura materiálu je nositelem mechanických a technologických vlastností válcovaného drátu důležitých především pro jeho další zpracovatelnost. Celá technologie a stanovení postupu řízeného tváření je natolik složitá, že ji nelze popsat ani v omezeném rozsahu.

V teoretické části se budu zabývat dílčími problémy, chováním materiálu v hotovném bloku z pohledu rychlostního a vzniku vad na SK válcích. Termomechanické, popřípadě normalizační válcování patří mezi moderní metody řízeného válcování zajišťující dosažení mikrostrukturních charakteristik materiálu a z toho vyplývajících mechanicko - technologických vlastností už v drátu ve válcovaném stavu. Toto je možné jen pod podmínkou finálního válcování za přesně definovaných teplot požadovaných pro tento charakter tváření. Jak jsem se již zmínil, budu se ve své disertační práci zabývat konečnou fází výroby drátu v hotovném bloku.

Drát vstupuje do kalibru válců, kde se mění jeho tvar (ovál, kruh). Kalibry válců proto mají zásadní vliv na kvalitu drátů. Dokonalé chlazení snižuje prostup tepla válcem, respektive nadměrné zahřívání povrchových vrstev válců, čímž dosáhneme vyšší životnosti válců.

Vzhledem k tomu, že snahou je urychlit proces válcování, a tím dosáhnout co nejvyššího výkonu a provozní spolehlivosti s možností válcovat drát do \varnothing 4 mm, stanovil jsem si dílčí cíle, jejichž řešením mohu dosáhnout požadovaného cíle. Dílčí cíle jsou:

- analýza chlazení válců v hotovných blocích,
- změna systému chlazení válců v hotovných blocích,
- analýza technických parametrů válců,
- návrh nového chladícího segmentu,
- analýza možnosti rozšíření válcování o menší průměry drátů,
- zvýšení válcovacích rychlostí,
- analýza vlivu chlazení na prodloužení životnosti válců ze slinutých karbidů,
- kontrola spolehlivosti chlazení,
- ekonomický přínos navrženého systému.

4 STRATEGIE OPTIMALIZACE TECHNICKÝCH PARAMETRŮ VÁLCŮ

Zavedení bezkrutových stolic a vývoj nových technologií umožnilo výrobu válců ze slinutých karbidů (často se označují jako wolframové karbidy). Prvotní materiály vyrobené ze slitiny nebo nástrojové oceli se neosvědčili a technologové brzy tyto materiály opustili pro jejich extrémně rychle opotřebení. Opotřebení způsobilo neúměrný nárůst odstávek ve výrobě.

Protože odolnost slinutých karbidů vůči opotřebení může být řádově vyšší, než je tomu u litiny nebo nástrojové oceli, bylo přistoupeno k zavedení karbidačních válců, které nabízely možnost uplatnění vysokých rychlostí válcování (někdy i překračující hodnotu $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), které by jinak nemohly být v těchto válcovnách použity. Popularita slinutých karbidů v oblasti válcování za tepla se zakládá na jedinečné kombinaci odolnosti vůči opotřebení a pevnosti v tlaku, kterou tyto materiály s optimálními vlastnostmi nabízejí. Všeobecně můžeme konstatovat,

že tyto materiály několikanásobně převyšují vlastnosti jiných materiálů, které přicházejí v úvahu pro výrobu válců.

Jak tomu často bývá u materiálů s takto vysokou výkonností, i u slinutých karbidů se ukazují určitá omezení, která se především týkají skutečnosti, že jejich vlastnosti jsou velmi citlivé s ohledem na malé výchyly provozních parametrů.

Z tohoto důvodu se u nich často projevují výkyvy při nesprávném nastavení výrobních parametrů v závislosti na lokálních provozních podmínkách. Určitou úlevou může být skutečnost, že optimálně je možno vlastnosti slinutých karbidů dosáhnout jen v tom případě, že dobře zvolíme vztahy a závislosti mezi charakteristikou válcovaného materiálu a jeho vlastnostmi, parametry válcování a provozními podmínkami, které budou na materiál působit. Zvláštní pozornost musím věnovat problematickým okruhům, které mohou ovlivňovat výkonnost válců, nebo mohou omezit jejich životnost, stejně tak jako nejběžnější pochody jejich předčasného stárnutí:

- vlivy procesních parametrů,
- strategie výběru konkrétních značek slinutých karbidů,
- údržba válců a manipulace s nimi,
- chlazení válců v procesu výroby.

4.1 Činitelé ovlivňující životnost válců

Znalost mechanismů, na jejichž základě může dojít k omezení životnosti válců, je nezbytným předpokladem vytvoření strategie optimalizace podmínek, které mohou snižovat jejich životnost a v některých případech způsobit trvalé deformace znehodnocení válců.

To vše způsobuje přerušení výroby, zvýšenou zmetkovitost drátu a nemalé ekonomické ztráty. Celý proces válcování závisí na vysoké kvalitě válců, protože válce mají značný vliv na změny tvaru a průřezové velikosti válcovaného drátu. Protože válce ze slinutých karbidů jsou materiály, které vykazují vysokou tvrdost (proto i poměrně vysokou křehkost), jejich odolnost vůči lomu rázem,

opotřebení otěrem, kluzem je poněkud značná. Uvedu několik činitelů, kteří se podílejí na předčasném opotřebení:

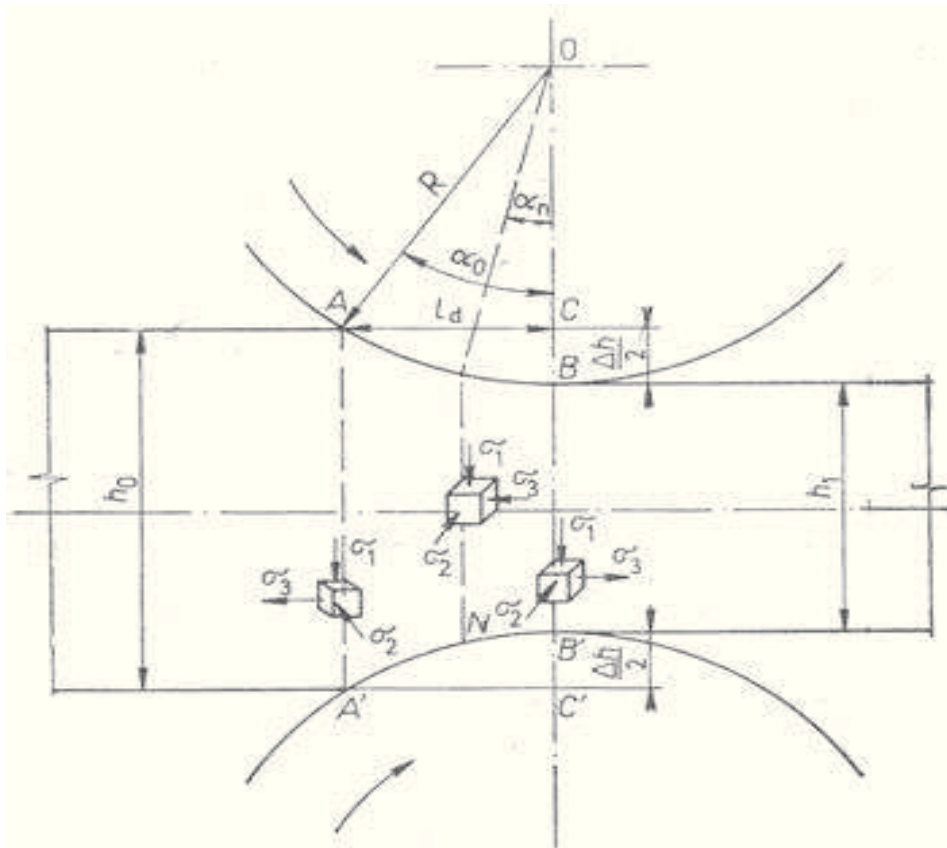
- náhlé změny velikosti, tvarů nebo teploty válcovaných drátů vlivem studených začátků nebo konců drátů,
- vlivem nesprávného vyrovnání vodících válečků,
- vlivem nesprávné montáže,
- vlivem nesprávného chlazení válců.

4.2 Opotřebení otěrem prokluzem

Proces válcování má za následek značné změny tvaru a průřezové velikosti válcovaného drátu. Zákon zachování objemu říká, že zmenšením průřezové plochy bude doprovázen zvýšením rychlosti, při které bude drát putovat při opuštění dvojice válců. Tato zvýšená rychlost může mít za následek prokluzování drátu na povrchu válce profilu v průběhu procesu válcování, čímž dochází k opotřebování materiálu válců odíráním a prokluzováním. Podobně tomu bude i se změnou tvaru (kulatého na oválný a naopak). Zde bude rovněž docházet k prokluzování materiálu s ohledem na povrch válců. Při válcování za tepla můžeme počítat se značným opotřebením v důsledku odírání a prokluzování. Rychlost samotného opotřebením bude záviset:

- na válcovaném materiálu a jeho teplotě,
- na změnách tvaru a velikosti, ke kterým bude docházet v průběhu procesu válcování,
- na abrazivním obsahu válcovaného materiálu,
- na vlastním použití materiálu válců,
- na značce použitého kalibru.

Na obr. 12 je znázorněna deformace během válcování.



Obrázek 12 Deformace materiálů během válcování [9]

Při zachování objemové konstanty platí následující vztahy:

$$H_0 \cdot B_0 \cdot L_0 = H_1 \cdot B_1 \cdot L_1 = V = konst. \quad (4.1)$$

kde $H_0, H_1 \dots$ je výška kovu před průchodem a po průchodu;
 $B_0, B_1 \dots$ je šířka kovu před průchodem a po průchodu;
 $L_0, L_1 \dots$ je délka kovu před průchodem a po průchodu;

Dále lze psát:

$$\frac{H_1}{H_0} \cdot \frac{B_1}{B_0} \cdot \frac{L_1}{L_0} = \gamma \cdot \beta \cdot \lambda = 1 \quad (4.2)$$

Úhel záběru kovu ve válci:

Prostor ohraničený shora i zdola oblouky záběru válců AB, bočními hranami vývalku a rovinami vstupu a výstupu vývalku z válců, nazýváme zónou deformace materiálů. Z trojúhelníku ABC a ACO vyplývá, že

$$BC = BO - CO = R - R \cos \alpha = R(1 - \cos \alpha) \quad (4.3)$$

Protože: $BC = \frac{h_0 - h_1}{2} = \frac{\Delta h}{2}$

Dostaneme: $\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D}$

Rovnice vyjadřuje závislost mezi úhlem záběru α , úběrem Δh a průměrem válce D . Ze vztahu vyplývá, že čím větší je absolutní úběr při zachování průměru válců, tím menší je $\cos \alpha$, to znamená, že tím větší je úhel záběru α .

Vyjádření rozměrových změn výšky H , šířky B a délky L ; (rozdíly rozměru v mm):

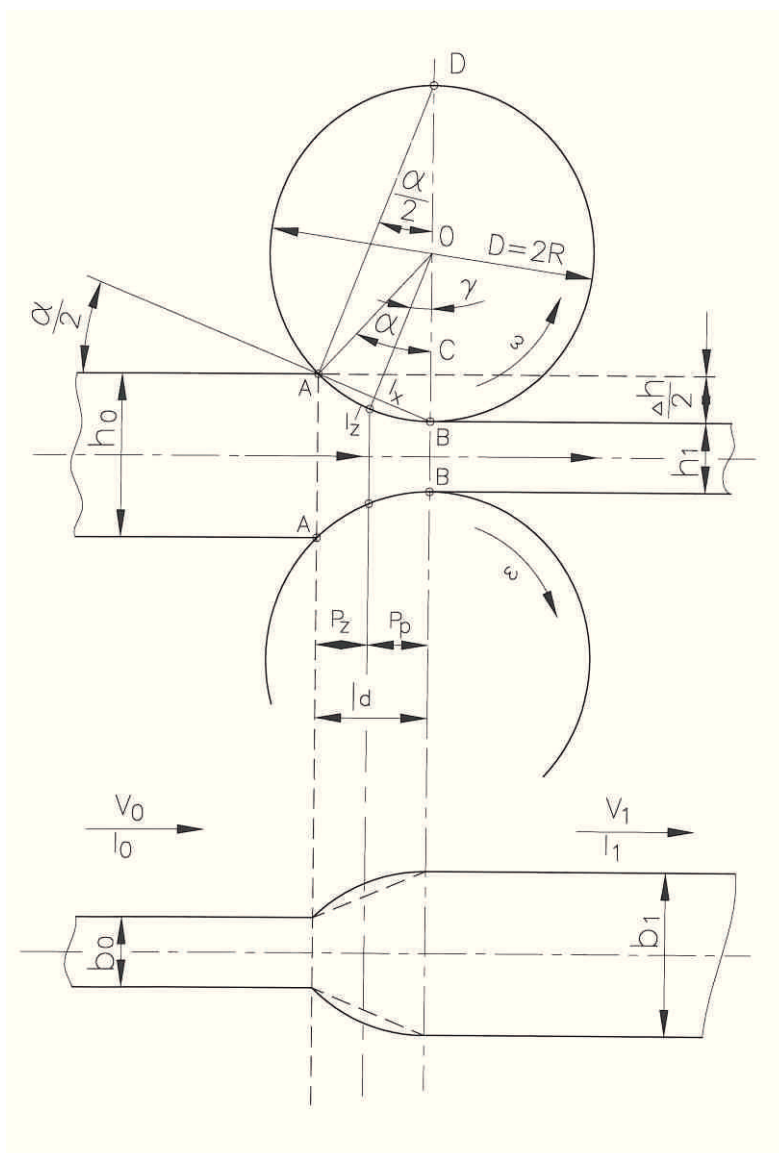
$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{H_1}{H_0} && \text{součinitel stlačení} && (< 1) \\ \lambda &= \frac{L_1}{L_0} && \text{součinitel prodloužení} && (> 1) \\ \beta &= \frac{B_1}{B_0} && \text{součinitel šíření} && (> 1) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Koeficient prodloužení λ se stanoví buď z poměru konečné délky k výchozí délce, nebo z poměru výchozího průřezu S_0 ke konečnému průřezu S_1 .

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{h_0 \cdot b_0}{h_1 \cdot b_1} = \frac{S_0}{S_1} \quad (4.5)$$

4.3 Technické opotřebení válců při válcování za tepla

Jak již bylo řečeno, proces válcování za tepla má za následek změny ve tvaru i velikosti válcovaného materiálu. Tento proces tedy spočívá v „lisování“ válcovaného materiálu, přičemž požadovaný tvářecí tlak vyvíjejí právě válce. Lze se domnívat, že takové tvářecí tlaky budou přímo úměrné deformačním napětím válcovaných materiálů. Na obr. 13 můžeme vidět délky deformační zóny.



Obrázek 13 Délka deformační zóny [9]

V závislosti na změnách tvaru a velikosti, ke kterým bude docházet, dojde v materiálu válce na povrchu profilu a v jeho blízkosti k vytvoření poměrně složité tlakové situací. Všechny tyto vlivy mají podíl na opotřebování válců, ke kterým musíme přidat i další faktory, které snižují provozní časy válcování a vyvolávají nutnost opravy válců:

- otěry,
- mechanické trhliny,
- povrchová deformace,
- koroze,
- teplotní profil za různých podmínek chlazení,
- tvorba tepelných trhlin na válcích.

Horizontální průměr tětiny mezi body AB se nazývá deformační zóna a označuje se (l_d).

$$\frac{AB}{BC} = \frac{BD}{AB}; AB = \sqrt{BD \cdot BC} \triangleright \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (4.6)$$

$$AC = l_d = \sqrt{AB^2 + BC^2} \triangleright \sqrt{R \cdot \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (4.7)$$

$$l_d = \sqrt{R \times \Delta h}$$

Poměrný úběr

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = 1 - \frac{h_1}{h_0} \quad (4.8)$$

Absolutní úběr

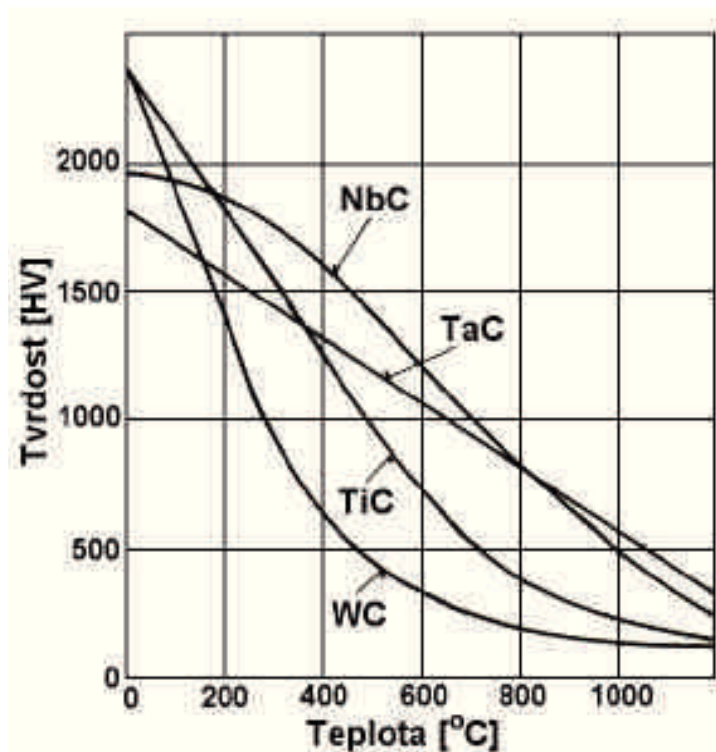
$$\Delta h = h_0 - h_1$$

4.4 Opotřebení otěrem

Toto čistě mechanické opotřebení závisí na době provozu válcovací stolice, rychlosti válcování, zatížení a odporu vůči deformacím válcovaného materiálu. Pro dosažení požadovaných vlastností, mikrostruktury je důležité chemické složení přísad SK válců. Důležitou skupinou, která ovlivňuje strukturu válců je množství přísad kovů (V, Ti, Nb, Ta) a karbidu (VC, NbC, TaC). Správné složení směsi má za úkol zpomalení růstu zrna v struktuře SK válců. Struktura a složení mají rozhodující význam na kvalitu výrobku.

Opotřebení otěrem začíná třecím opotřebením pojiva a odtrháváním zrn karbidu wolframu za působení střídavého mechanického napětí v důsledku tepelných cyklů, které působí na drážku kalibru válců.

Na obrázku 14 můžeme vidět různé struktury válců a jejich vliv, který má teplota na tvrdost válců. Opotřebení válců můžeme snížit, pokud použijeme tvrdý materiál - vyšší obsah karbidu wolframu nebo jemnějšího zrna nebo tvrdší pojivo.

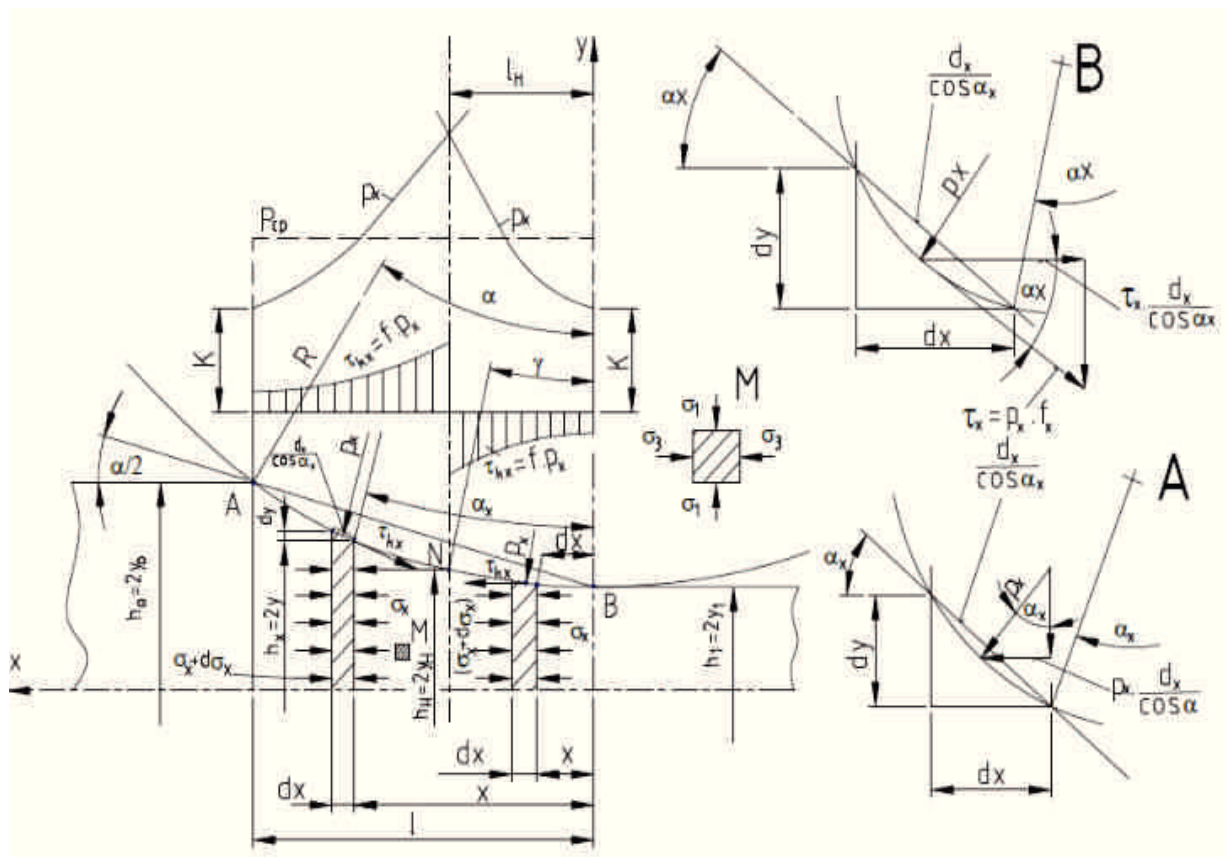


Obrázek 14 Vliv teploty na nové válce vyrobené s rozdílných přísad kovu v materiálu válců a jemnějším zrnem [9]

Třecí síly způsobující ořez lze popsat následovně:

- rozdíl v rychlostech mezi obvodovou rychlostí válce a válcovaného materiálu,
- na vstupní straně je rychlost válcovaného materiálu nižší než rychlost válce,
- na výstupní straně je tomu naopak.

Na obr. 15 je znázorněna plastická deformace kovu při vstupu do otáčejících se válců.



Obrázek 15 Plastické deformace kovu při vstupu do otáčejících se válců [9]

Ideální proces válcování je možný jen za určitých podmínek. Válcování odpovídá takovému objemovému napětovému stavu kovu v zóně deformací, při kterém proběhne deformace jen ve dvou směrech, ve smyslu osy X a Y.

Deformace v ose Z ve smyslu třecí síly je rovná nule. V obecném tvaru, ne v hlavních napětích.

$$(\delta_y - \delta_x)^2 + 4\tau_{xy}^2 = (2\tau_{\max})^2 = K^2 \quad (4.9)$$

kde τ_{\max} maximální smykové napětí při plastické deformaci

$$\frac{\delta_K}{\sqrt{3}} = 0,58\delta_K$$

K konstanta rovnice plasticity rovna $2\tau_{\max} = 1,15$

δ_k mez kluzu materiálu

Uvažujeme-li nekonečně malý element o tloušťce d_x v zóně deformace a s ohledem na malou velikost úhlu α_x , $\cos\alpha_x = 1$, pak radiální napětí p_x je rovné

$$\text{svislému normálovému napětí} \quad \frac{p_x}{\cos\alpha} = p_x = \delta_1 \quad (4.10)$$

Rovnice plasticity ve složkách hlavních napětí bude mít pak tento vztah:

$$p_x - \delta_x = k = \text{konstanta} \quad (4.11)$$

Konstantní rychlosti plastického tečení kovu ve vláknech při ideálním procesu válcování vyvolávají skluzu ve stykové ploše. Znamená to, že existuje rozdílná rychlost kovu ve všech svislých řezech po celé délce oblouku AB. Tento rozdíl rychlosti ve stykových plochách odpovídají osy válců.

$$\sum x = -px \cdot \frac{dx}{\cos\alpha} \cdot \sin\alpha \pm \tau_{kx} \cdot \frac{dx}{\cos\alpha} \cdot \cos\alpha + \delta x \cdot y \pm (\delta x + d\delta x) \cdot (y + dy) = 0 \quad (4.12)$$

Z obrázku A nebo B vyplývá:

$$\text{tg}\alpha_x = \frac{dy}{dx} = 0$$

Po dosazení do předchozí rovnice rovnováhy sil za $\operatorname{tg} \alpha_x = dx/dy$

$$p_x \cdot dy \pm \tau_{kx} \cdot dx + \delta_x \cdot y - \delta_x \cdot y - d\delta_x \cdot y - \delta_x \cdot dy - d\delta_x \cdot dy = 0$$

Jestliže položku $(\delta_x \cdot dy) = 0$ a podělíme celou rovnici dy dostaneme po úpravě:

$$\frac{d\delta_x}{dx} - \frac{px - \delta_x}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau_{kx}}{y} = 0 \quad (4.13)$$

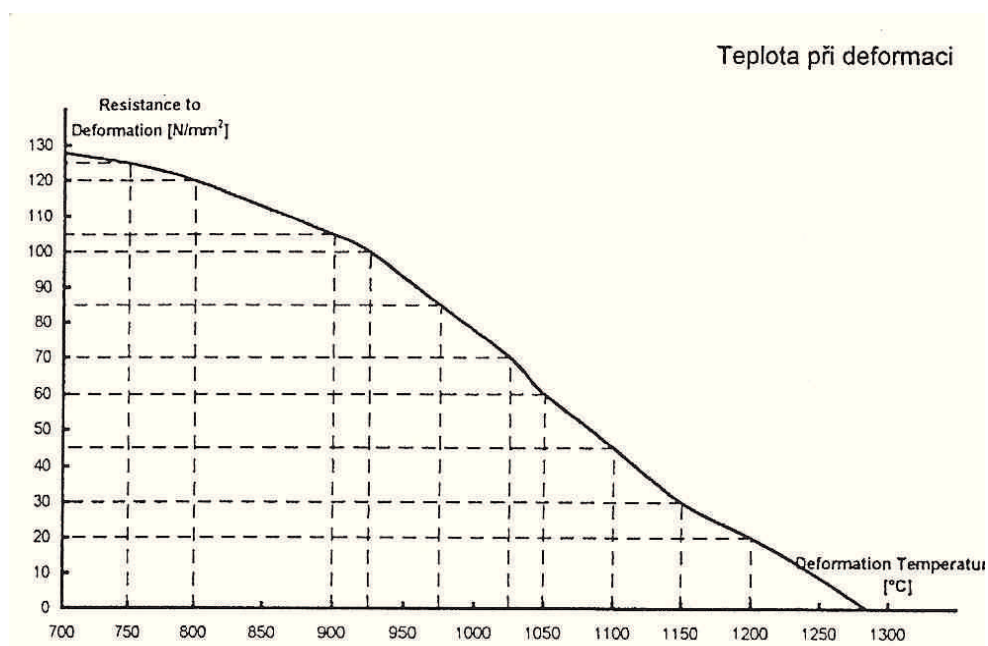
Další úpravou dostaneme vztah:

$$\frac{dp_x}{dx} - \frac{k}{y} \cdot \frac{dy}{dx} \pm \frac{\tau_{kx}}{y} = 0 \quad (4.14)$$

V této rovnici znaménka před τ_{kx} znamenají zpoždění a zrychlování, jak je v obr. 15 označeno bodem oblouku záběru.

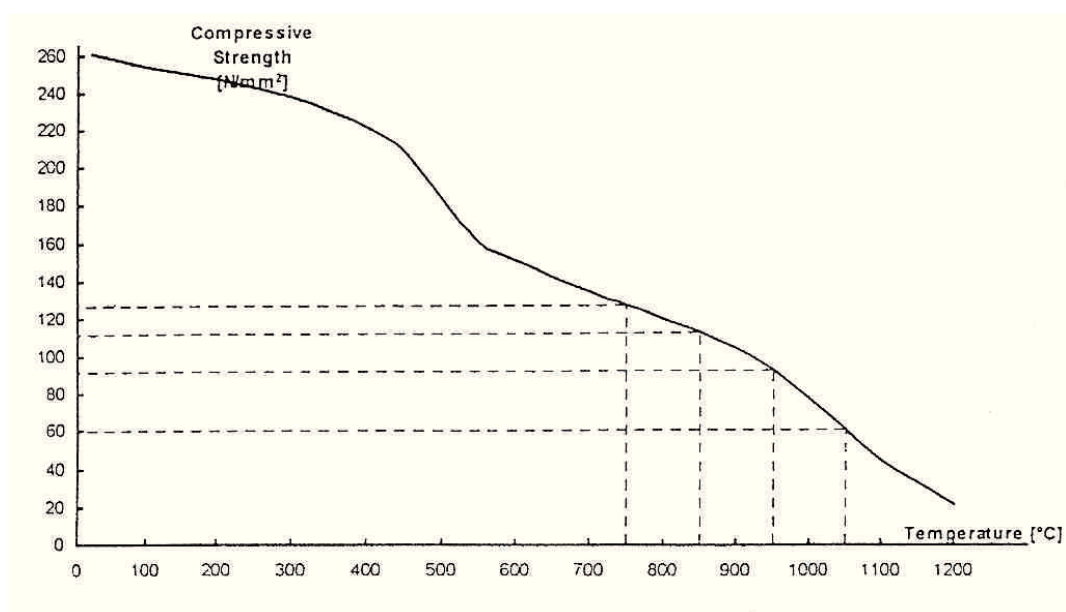
4.5 Teplotní rozdíly ve válcovaném materiálu

Teplotní rozdíly ve válcovaném materiálu mohou dosahovat i stovek °C. Rozdíl mezi čelní a koncovou teplotou může být až 80°C, rozdíl mezi teplotou jádra a povrchu může být až 200°C, nemluvě o studených čelech a stranách válcovaného oválu na vstupu do další kruhové drážky. Další vliv, který přináší teplota válcovaného materiálu v rozmezí 950°C až 1150°C, je odpor vůči deformacím, která u běžné oceli klesá z 7,7 kN·cm⁻² na 4,5 kN·cm⁻², tj. o 42%, viz obr. 16.



Obrázek 16 Vliv teploty na deformace [10]

Na dalším obrázku vidíme vliv pevnosti v tlaku $7,7 \text{ kN}\cdot\text{cm}^{-2}$ při 1000°C , která klesá na $3,2 \text{ kN}\cdot\text{cm}^{-2}$ při teplotě 1150°C - to je o 58%, viz obr. 17.

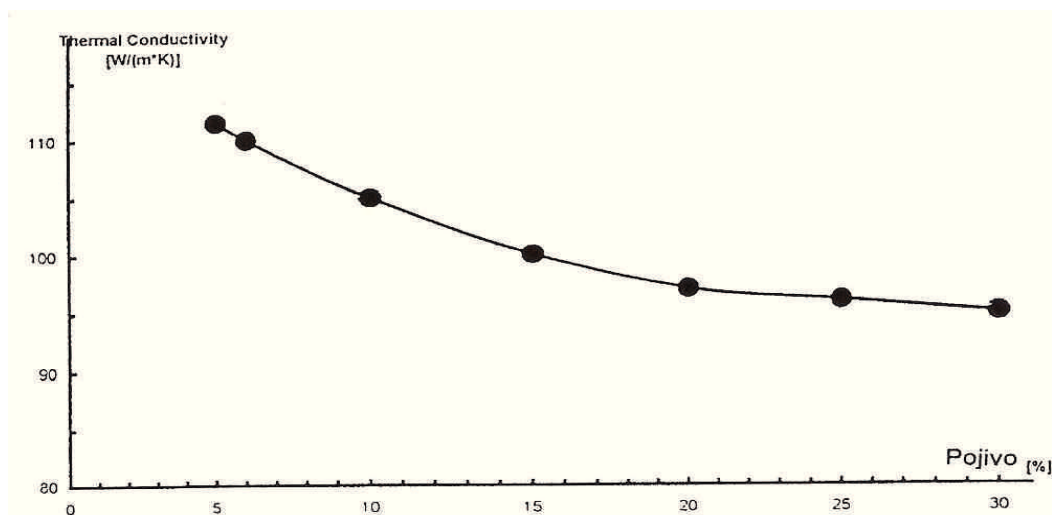


Obrázek 17 Závislost pevnosti v tlaku na teplotě [10]

4.6 Tvoření tepelných trhlin na válcích

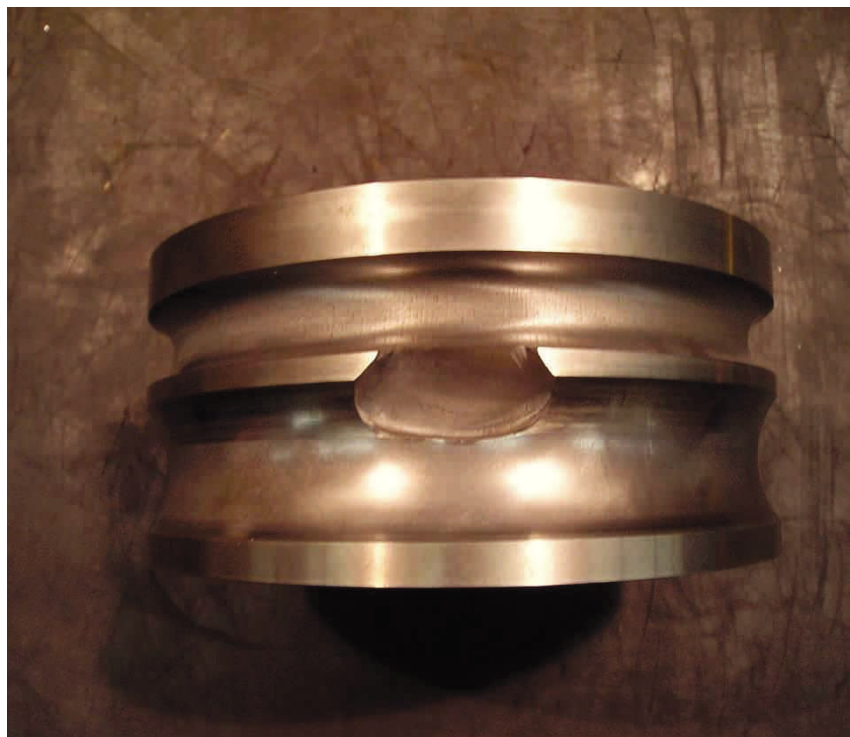
Odolnost jakéhokoliv materiálu vůči tvoření tepelných trhlin je přímo úměrná jeho lomové houževnatosti (K_{IC}) a tepelné vodivosti a nepřímo úměrná jeho koeficientu tepelné roztažnosti a modulu pružnosti. Poměr nízké lomové houževnatosti slinutých karbidů v kombinaci s jejich vysokým modulem pružnosti mívá za následek zvýšenou citlivost těchto materiálů na tepelnou únavu, a tím pádem i větší náchylnost k tvoření tepelných trhlin. Všeobecně se tendence k tvoření tepelných trhlin zvyšuje v přímé úměře ke snižování válcovací rychlosti a děje se tomu tak z toho důvodu, že povrch válce je v takovém případě po delší dobu v přímém kontaktu s teplým drátem, na základě čehož je možno přivést do válce větší množství tepla. Tvoření trhlin je způsobeno postupným rozpínáním a smršťováním, které způsobí střídavé ohřívání a chlazení během procesu válcování. Teplotní spád vyvolává velké napětí v povrchové vrstvě drážky kalibru. Toto napětí vede ke vzniku sítě tepelných trhlinek, které se často označují jako trhliny vzniklé ohřevem.

Všechny tyto skutečnosti mají velký vliv na správnou volbu jakosti karbidu wolframu. Materiál s vysokým obsahem pojiva má v porovnání s materiálem s nízkým obsahem pojiva vyšší koeficient tepelné roztažnosti a nižší tepelnou vodivost. V případě správného chlazení, rychlosti válcování je rozdíl max. kontaktní teploty vztažený k jakosti karbidu wolframu asi 100°C , pokles teploty v hloubce 0,2 mm je asi 50%, v hloubce 0,8 mm 90% a více. V důsledku správného chlazení, vhodného poměru pojiva v materiálu karbidu wolframu, rychlosti válcování jsem schopný omezit průnik teploty do hloubky 0,2 mm. Na obr. 18 vidíme závislost teplotní vodivosti a obsahu pojiva ve válcích.



Obrázek 18 Tepelná vodivost [10]

Prostup tepla válci je nutno omezit správným chlazením. Nesprávným postupem chlazení dojde k zahřátí prstence nebo nechlazené oblasti. Výsledné tahové napětí spolu s již existujícími trhlinami a tlakem na válce podpoří vznik hlubokých trhlin a lomů, které lze popsat jako příčné nebo kruhové závislosti na rozhraní. Na obr. 19 můžeme vidět trhlinu na válci hotovního bloku.



Obrázek 19 Zničený váleček hotovního bloku

Tabulka 3 Údaje k obrázku 19

Datum válcování	17.2.2009
Typ kalibru a číslo soupravy	010V/17-8
Strana válce	A(010V)
Číslo válce	58431
Výrobce a materiál válce	Sandvik C20C
Průměr válce	155,30 mm
Hotovní blok a číslo stoličky	HB1, stol. 20
Válcovaný průměr	17 mm
Odválcovaná tonáž na kalibru	37 t

V provozních podmínkách závodu a dlouhodobým výzkumem jsem zjistil, že při rychlostech válcování $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a vhodným chlazením proniknou trhliny do hloubky 0,4 mm, což při tak malých rychlostech je dobrý výsledek.

4.7 Vnitřní napětí, mechanické trhliny

Důležitým faktorem ovlivňujícím šíření trhlín je správné chlazení. V případě nesprávného chlazení dochází k zahřátí prstence válce, výsledné tahové napětí spolu s již existujícími tepelnými trhlinami a tlakem na válce podpoří vznik hlubokých trhlín a lomů, které lze popsat jako příčné nebo kruhové závislosti na rozhraní.

Abychom zamezili vzniku těchto trhlín, musíme stanovit správné podmínky chlazení. Správné chlazení zaručí stabilní tepelné podmínky po každé otáčce válce:

- u malých průměrů válců jsou cykly krátké s vysokou frekvencí, ale kontaktní povrch je malý a doba kontaktu krátká,
- u válců větších velikostí je kontaktní povrch větší a doba kontaktu delší, ale cykly jsou delší a s nižší frekvencí.

Podmínky při chlazení lze potom vztáhnout na určité jakosti karbidu wolframu vůči válcovanému profilu nebo pro zjednodušení na šířku drážky. V tabulce 4 uvádím potřebné množství chladící vody (v litrech na milimetr šířky drážky v minutách) pro různé jakosti kalibru wolframu při teplotě válcování 950°C - 1050°C a redukcí pojiva do 20%.

Tabulka 4 Množství chladící vody potřebné na chlazení kalibru válců

Pojivo (%)	6	10	15	20	25	30
Chlazení (l)	56	48	40	32	24	16

Jestliže vezmeme v úvahu síť tepelných trhlin, které již existují v pracovní drážce, které jsou způsobené již popsánymi vlivy. Jakmile trhliny dosáhnou šířky 0,5 mm a hloubky 0,1 mm, vměstky válcované oceli, kysličníky železa a částice mimo okraje trhlin jsou zatlačeny do trhlin, čímž je zvětší a prohloubí. Voda v těchto trhlínách je stlačena proti válcovanému materiálu a náhlá přeměna v páru vyvolá skutečné malé exploze, které dále podporují šíření již vzniklých trhlin. Tyto ukazatele se projevují na lomové houževnatosti u materiálů s nízkým obsahem pojiva.

Toto je jasně stanoveno, pokud uvažujeme s kritickým napětím, které vyvolává lom, působí-li na povrch s trhlínami. Z toho vyplývá, že zvolení správné struktury válců je důležitým faktorem ovlivňujícím životnost válců a vzniku trhlin.

Velkou roli při správném chlazení má správná struktura válců, jakost, složení pojiva, hustota, tvrdost, struktura zrna. Na obr. 20 můžeme vidět zničený válec, na kterém jsou trhliny vzniklé nesprávným chlazením válce.



Obrázek 20 Zničený válec vlivem trhlin

V následující tabulce (Tab. 5) uvádím přehled jakosti značek válců ze slinutých karbidů pro válcování za tepla s uvedením poměru pojiva, hustoty, tvrdosti a struktury zrna.

Tabulka 5 Přehled značek válců [16]

Označení válce	Pojivo (hm %)	Hustota (g.m ⁻³)	Tvrdost (HR N.mm ⁻²)	Struktura zrna
Na bázi Co jako pojiva				
SM-78	15	14	86	drsna
SM-75	20	13,6	84,7	drsna
SM-70	25	13,1	82,8	drsna
SM-69s	30	12,8	81	drsna
Na bázi Co-Ni-Cr jako pojiva				
SM-63	10	14,5	87,5	drsna
SM-59	15	14	85	drsna
SM-60	20	13,6	83	drsna
SM-61s	25	13,1	81,3	drsna
SM-62	30	12,8	79	drsna
SM-52	35	12,5	80,5	jemna
SM-96	40	12,2	72,5	stredni
Na bázi Co-Ni jako pojiva				
SMX-78	15	14	85,5	drsna
SMX-75	20	13,6	83,5	drsna
SMX-70	25	13,1	81,7	drsna
SMX-69	30	12,8	79,5	drsna

4.8 Vliv koroze na zhoršování kvality válců

V mnoha válcovnách působí koroze jako skrytý faktor přispívající ke zhoršování kvality výroby drátů. Jak již bylo zmíněno výše, chlazení má zásadní vliv na minimalizaci vznikání tepelných gradientů na povrchu válce. Chlazení provádíme tak, že povrch válce ostříkujeme vodou pod vysokým tlakem. Bohužel voda může mít i negativní vliv na povrch válců.

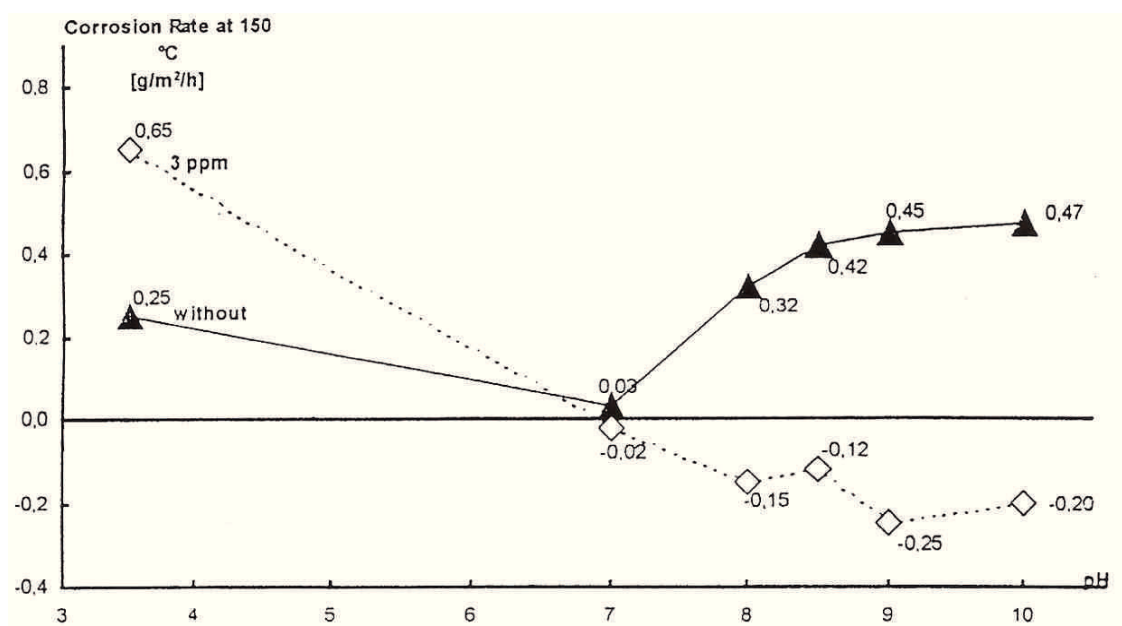
V některých případech chemicky reaguje s materiálem válce a způsobuje tak jeho korozi.

Koroze je elektrochemický proces, který se projevuje jako předčasné zdrsnění povrchu profilu válce. Vedle zdrsnění povrchu může v důsledku koroze dojít i k tvoření důlků na povrchu válce. Vlhké prostředí, které je v průběhu procesu válcování, spolu s teplotou obvykle nejvíc poškozuje pracovní povrch drážky válce. V důsledku koroze jsou zrnka karbidu wolframu odstraňována z povrchu válce nebo se rozpadávají. Zůstávají po nich dutiny, jejichž hloubka odpovídá maximální velikosti zrna, tj. více než 10 mikronů pro běžné hrubé zrnko, a více než 25 mikronů pro zvláště hrubé zrnko. Velikost těchto dutin sice nejsou znepokojující, ale dále napomáhají vzniku mechanickým a tepelným trhlinám.

Teplotu chladící vody 35°C považují za nejvyšší přijatelnou teplotní konstantu pro hodnoty pH mezi 7,5 - 8,5. Při teplotě 25°C je přijatelná hodnota pH v rozmezí 6,5 - 9,0. Kyselé vody napadají pojivo a zásadité vody reagují se samotným karbidem wolframu.

Rychlost, kterou bude koroze probíhat, je velice úzce spjata s celkovým chemickým složením vody, stejně jako s používanou značkou slinutých karbidů. Voda nesmí obsahovat kyanidy, proto je nutno kontrolovat obsah chloridů, dusičnanů, síranů a fluoru. Stanovit maximální přípustné hodnoty každého prvku není jednoduché, proto je třeba uvažovat s celou směsí.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat vlivu vápníku. Vápník působí negativně v kyselém prostředí a kladně v zásaditém prostředí, jak je možno vidět na obr. 21. Z obrázku můžeme vyčíst vývoj koroze při určení neutrálního bodu, což je bod laboratorně čisté vody a materiál zahřátý na 150°C, se nachází na pH 6,5 a minimální rychlost koroze bez vápníku se dosáhne při pH 7. Při této hodnotě voda obsahuje 3 ppm vápníku a způsobuje negativní opotřebení – 0,25 g/m²/h při pH 9. [3]



Obrázek 21 Rychlost koroze [10]

Při hodnotě pH 8 - 9 pokrývají krystaly CaWO_4 celý povrch válce. Nad pH 9 již usazeniny nevznikají. Dalším přidáním vápníku se zjistilo, že nejvhodnější podmínky pro usazování CaWO_4 nastávají při pH 8,5 a 30 ppm vápníku.

Teplotní rozdíly ve válcovaném materiálu, které mohou být velmi rozdílné mezi čelní a koncovou teplotou, mohou být až 80°C , rozdíl mezi teplotou jádra a povrchem až 200°C .

Abrazivní usazenina na povrchu válcovaného materiálu:

- částice neodfiltrované z chladící vody (krajní velikost po filtraci 10 - 15 mikronů),
- částice pocházející z povrchu válce - zkorodované pojivo, zrna karbidu wolframu,
- okuje z válcovaného materiálu: u předvalků o teplotě 1050°C lze očekávat 3% okují. Při teplotě 950°C se množství okují sníží na 1,5% a při teplotě 850°C se okuje nevyskytují. Okuje seskupené do vloček zvyšují místní otěr a vyvolávají další problémy v důsledku tepelných a velikostních rozdílů válcovaného materiálu,

při nanášení ochranného povlaku válce: při teplotě válcování 1000°C se koeficient tření s povlakem CaWO_4 sníží o 50% v porovnání s povrchem bez této vrstvy. [3]

5 CHLAZENÍ VÁLCŮ

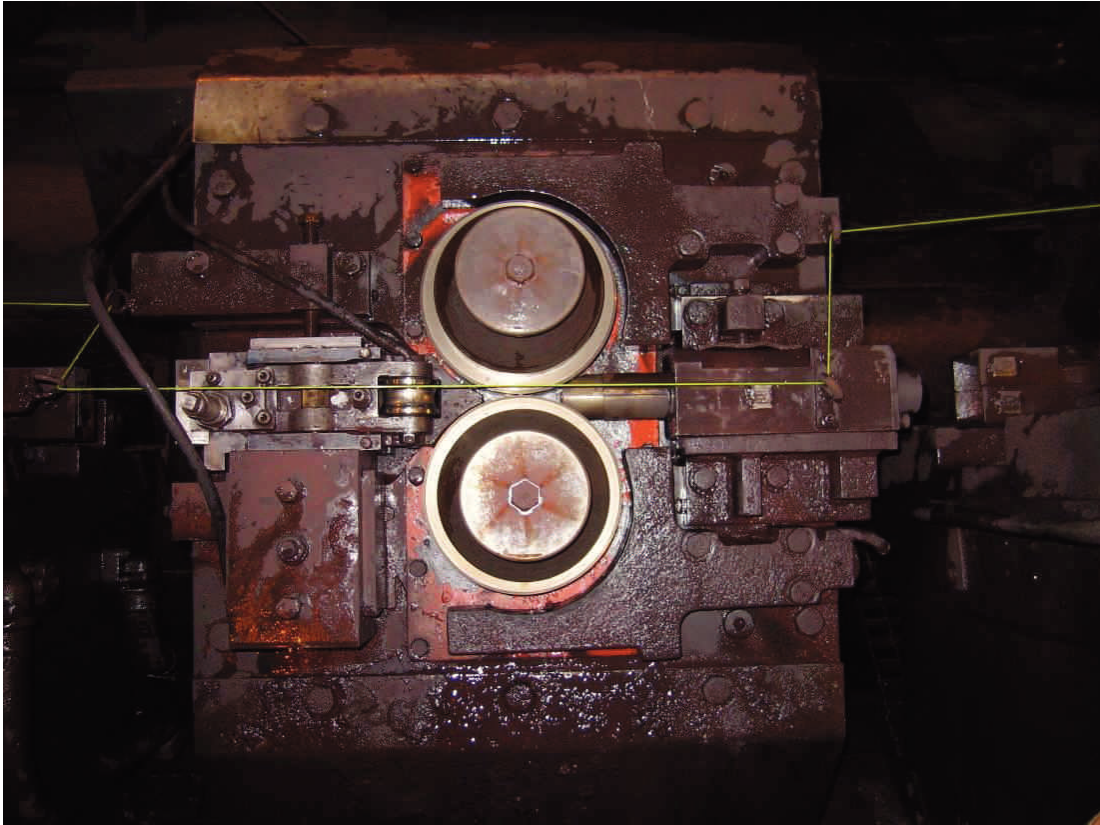
V předcházejících kapitolách jsem popisoval vlivy válcování na kvalitu válců, jelikož válce ovlivňují konečný produkt. Hlavním úkolem vodního chlazení je zpomalit tvoření trhlin vznikajících v důsledku tepelné únavy a eliminovat znehodnocování povrchu válců. Chlazení válců musí být zajištěno tak, aby nedocházelo k jejich přehřívání. K zajištění optimální životnosti válců je zapotřebí značného množství chladicí vody. Chlazení válců je tradičně realizováno chladícím segmentem, kde povrch profilu válců je ostříkovan vodou pod vysokým tlakem. Chlazení by mělo být spuštěno co nejdříve poté, co válce ztratí kontakt s válcovaným materiálem - v tomto případě drátem.

Ve společnosti TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s. se touto problematikou zabývají poměrně intenzivně a mohu říci, že i úspěšně. Válce jsou chlazeny studenou vodou, která musí splňovat kritéria, jako je chemické složení vody, hodnoty pH a jiné vlastnosti. Voda je do hotovního bloku přiváděna pomocí čerpadel přes vodní hospodářství. Hlavní přívodní potrubí je označeno DN 500. Z hlavního potrubí se nám vodní řád dále snižuje na světlost DN 200. K chladícím segmentům se voda přivádí potrubím, jehož světlost je DN 40.

Každý váleček je chlazen jedním chladícím segmentem. Celý chladící okruh je regulován pomocí ventilů, které usměrňují průtok vody. Chladící segmenty jsou umístěny na spodní i horní části hotovního bloku, viz obr. 22.

Chladící segmenty, které chladí válce, by měli mít dostatečně vysoký tlak chlazení. Tlak vody se pohybuje v pásmu od 0,3 do 0,6 MPa. Optimální objem vody pro proces chlazení závisí na několika faktorech:

- tvaru a velikosti válcovaného výrobku,
- velikosti a hmotnosti kotouče válce,
- válcovací rychlosti,
- doporučené konstantní teplotě válce stanovené výrobcem.



Obrázek 22 Chladící segment hotovního bloku od společnosti SMS MEER

Chladící segment navržený společností SMS MEER se nejevil jako dostatečný. Konstrukční provedení chladícího segmentu nespĺňovaly požadavky na dostatečně kvalitní chlazení na všech stupních, což se odráží na kvalitě výroby a samozřejmě i na životnosti válců. Neefektivní chlazení způsobovalo časté opotřebenění válců. Válce často praskaly, vznikaly na nich trhliny a nedařilo se eliminovat výskyt vad.

Právě naopak se vady objevovaly s pravidelnou periodou, množství odválcovaného materiálu nebylo dostačující. Vysoké ceny válců mne přiměly hledat řešení. Řešení jsem spatřoval ve zvýšení účinnosti chlazení.

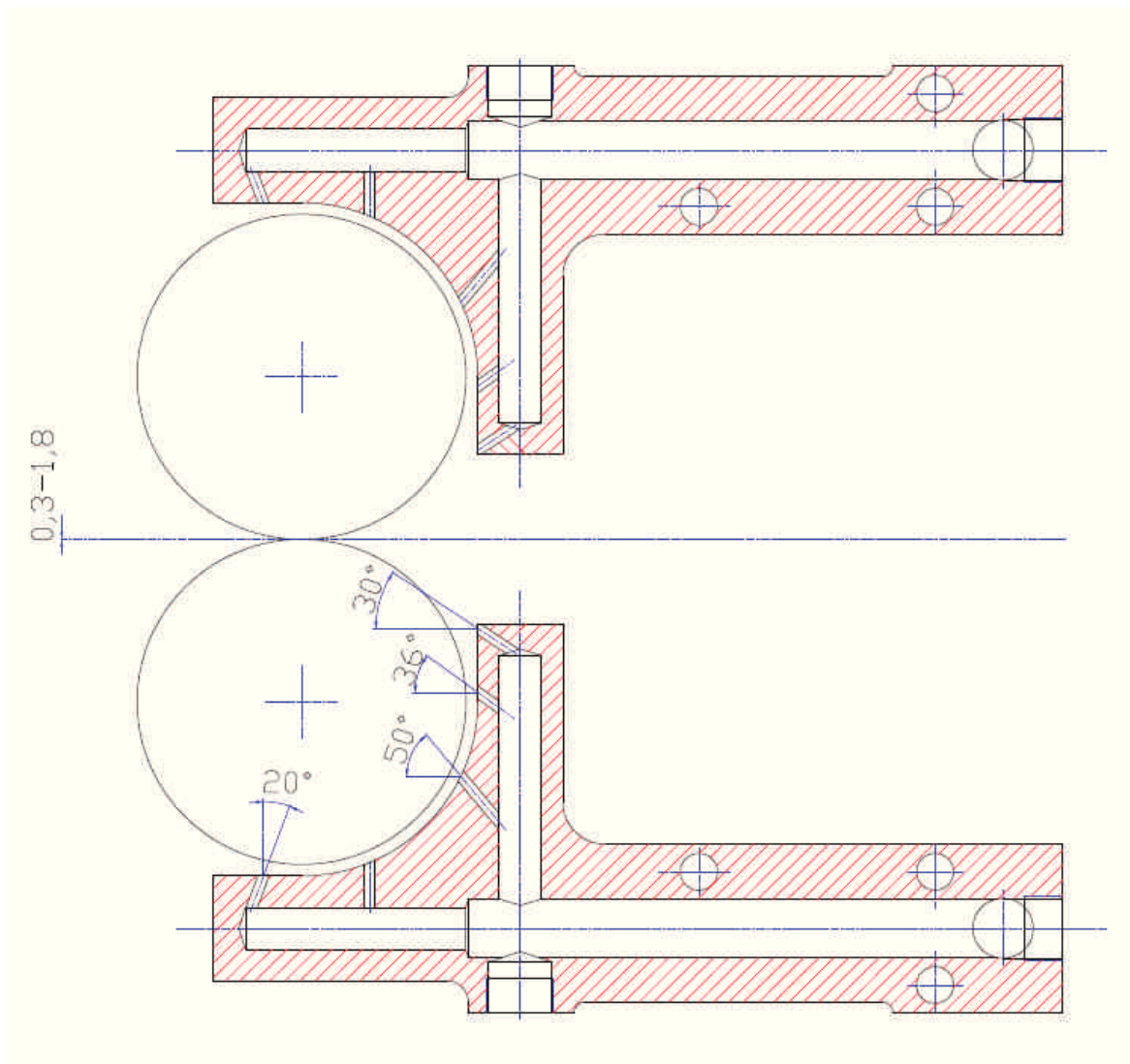
5.1 Popis chladícího segmentu společnosti SMS MEER

Chladící segment, který navrhla společnost SMS MEER, byl konstruován jako jednolitě těleso s pěti otvory, které má chladit válce. Konstrukce segmentu se mi jeví jako velmi jednoduchá, jelikož v segmentu jsou vyvrtány otvory, do kterých je přiváděna voda. Z hlavního vodovodního řádu je chladící voda přiváděna ke stoličkám hotovního bloku. Hlavní část segmentu pro přívod tlakové vody je konstrukčně řešena jako válcové těleso o průměru 28 mm. Chladící voda je dále rozváděna dvěma válcovými otvory o průměru 20 mm. V litinovém tělese segmentu je vyvrtáno pět válcových otvorů o průměru 5 mm, které jsou napojeny na válcové otvory o průměru 20 mm. Válcové otvory jsou rozmístěny tak, že první otvor na chladícím segmentu je umístěn pod úhlem 30° . Následují další, které jsou nastaveny pod úhly 36° , 50° , 20° . Nastavené úhly rozstříku nejsou z pohledu chlazení válců vhodně konstruovány. Chladící kapalina z prvního otvoru nedopadá na válce s dostatečnou účinností a v dostatečném množství, úhel nastavení nedovolí válce chladit hned po opuštění drátu z kalibru válce - vzniká prohřátí válců nedostatečným chlazením. Další otvory nestačí dostatečně účinně dochladit válce, které se postupně v cyklech zahřívají a dochází k jejich postupnému opotřebení.

Chlazení je neřízené, není možno nastavit jiný úhel, ani průtok než je udáván výrobcem na chladícím segmentu. Segment má nastavený průtok na jeden otvor $40 - 60 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, což představuje celkový objem vody $300 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Průtok vody je hlídán průtokoměry. Chlazení v segmentech je neřízené, rozptyl vody je zcela náhodný, v podstatě ovlivněn jen otvory, které jsou vyvrtány v segmentu. Problémem je, že na jednotlivých hotovních blocích probíhá výroba drátu různých průměrů. Nastavení chlazení zůstává stejné, ale profil válcovaného drátu se mění dle průměru drátů. Kalibry o průměru 5 mm jsou chlazeny stejně jak kalibry u drátů 20 mm. Další problém nastane, když jsou válce opotřebené.

Tyto válce se musí přebrousit, čímž se sníží jejich průměr a zároveň se zvětší vzdálenost proudu chladící vody. Voda nedopadá do drážky kalibru a podstatně se mění podmínky chlazení, tzn., že se snižuje účinnost chlazení. Celý chladící systém je automaticky regulován na tlak 0,6 MPa. Poškození válců, které vznikalo neúčinným chlazením, mělo zásadní vliv na vzniklých vadách na drátě.

Další faktor, který zapříčinil vývoj nového chladicího segmentu, byla životnost válců a jejich cena. Na obrázku 23 je výkres chladicího segmentu. Výchozím bodem dalšího řešení jsou požadavky na chlazení válců. Jak už bylo uvedeno v předchozích kapitolách, důraz je kladen na chlazení, správné složení vody, odstranění vnitřního napětí, otěry, mechanické poškození a korozi.



Obrázek 23 Chladicí segment společnosti SMS MEER

6 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ REKONSTRUKCE CHLAZENÍ VÁLCŮ

Při návrhu řešení nového chladícího segmentu jsem se zaměřil na spolupráci s výrobcí chladících zařízení. Dále jsem se obrátil na výrobce válců, kteří vyrábějí válce ze slinutých karbidů. Do hry vstupovalo velké množství faktorů, které bylo třeba zohlednit při návrhu nového chladícího segmentu. V úvahu bylo potřeba vzít následující faktory:

- velikost, tvar válců,
- teplotu a druh válcovaného materiálu,
- válcovací rychlosti,
- způsoby přebroušení válců,
- koroze,
- odolnost proti otěru a opotřebení.

Jako zásadní se jeví teplotní profil, který lze očekávat v případě ideálních podmínek chlazení. Za takových podmínek je dosaženo rovnovážného stavu krátce poté, co začne válcování a maximální teplota, průměrná teplota tělesa válce a teplotní rozdíl se v závislosti na čase nezvyšují. V případě, že nedochází ke správné účinnosti chlazení, zvyšuje se teplota tělesa válce v závislosti na čase, a na válcích dochází k vytváření teplotních gradientů. Tyto gradienty mohou vést k vytváření trhlin na povrchu profilu.

Základním úkolem bylo nastavit chlazení tak, že při rychlostech válcování nad $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je maximální kontaktní teplota vztažena k jakosti karbidu wolframu asi 80°C . Tyto teploty byly doporučeny výrobcí válců z karbidu wolframu.

Vliv teploty na složení dané značky je jedním z nedůležitějších faktorů v technologii karbidických válců. Zajišťuje takovou strukturu, která je zhotovena přesně na míru aplikace válců, čímž se zabezpečuje jejich dlouhá životnost v procesu válcování. Chlazení válců je realizováno ostříkáním povrchu válců pod vysokým tlakem. Nastavit chlazení tak, aby bylo velmi účinné, znamenalo začít chladit válce co nejdříve poté, jakmile válce ztratí kontakt s válcovaným drátem.

Dalším technickým zlepšením mělo být zvětšení oblouku chlazení, který měl zasahovat alespoň 180° obvodu válce. Přivádět vodu do chladicího segmentu a zároveň ji navádět na válce vedla k myšlence umístit na segment chladicí trysky. Trysky je možno nastavit tak, že chladicí voda je naváděna na válce a zabezpečuje dosažení účinného chlazení. Snaha o nalezení nejlepšího chladicího systému, vedla také k úvaze, jaké chladicí trysky použít. Rozhodnutí vycházelo z celé řady faktorů. Plán chladicího systému musí brát v úvahu zdroje tepla. Teplo je akumulováno v kalibrech válců od deformace kovu a třením na přímém rozhraní mezi výrobkem a válci.

Účelem chlazení je docílit odstranění tepla dříve, než se tepelná energie rozšíří do středu jádra válců. Chlazení musí být nastaveno tak, aby udržovalo tepelnou rovnováhu mezi horními a spodními válečky po celé době válcování.

6.1 Použití trysek

Použití chladicí trysky na segmentu vycházelo z celé řady možností, jaké dnes trysky na trhu skýtají. Hlavní výhodou trysek je možnost přivádět chladicí kapalinu na válce tak, že můžeme nastavit trysky na segmentu, a tím ovlivňovat dopad kapalin. Trysky poskytují možností svým provedením ovlivňovat úhly rozstříku, výšku dopadající kapaliny, průtokové množství a další činitelé, které ovlivňují chlazení.

Pro účinné chlazení využijeme výhody, které nabízejí trysky:

- zvýšení efektivity rozprašováním,
- snížení spotřeby vody,
- snadná údržba a instalace,
- možnosti kombinace několika druhů trysek na segmentu chlazení.

Rozprašovací a ostříková technika spolehlivě zefektivní výrobní postup a je nejvýhodnějším řešením daného výrobního procesu.

6.1.1 Zvýšení účinnosti systémů chlazení pomocí rozprašování

Velmi důležitou rolí při chlazení válců je efektivnost chlazení, při kterém musí být rapidní odvod teploty z povrchu válců. Odběr tepla z povrchu válců musí být cyklický, kdy po každé cyklické otáčce válců materiál opouští válce, nesmí teplota válce překročit 100°C, a to po celou dobu válcovacího procesu. Jako velmi vhodné se jeví trysky, které rozprašovaly chladicí kapalinu, a tím zaručovaly vysoké hodnoty rychlého odvodu tepla z povrchu válců. Trysky snadno dopravují potřebné množství chladicí vody až na povrch válců. Voda se jako vysoce rychlostní paprsek natlačí do expanzní komory, začne narážet na kovadlinku a rozstříkne se do jemných kapiček. Tyto kapičky nám umožní rovnoměrné rozprašování po celé ploše válců. Tento princip nárazu vychází z použití hydrokinetické energie na podporu rozprašovacího procesu.

Tryskami snadno dosáhneme stejnoměrného rozptylu paprsku vody, který zabezpečuje rovnoměrné chlazení po celém povrchu válce, a tím omezení vzniku tepelného pnutí. Další nespornou výhodou má rozprašovací paprsek vody, protože se dosahuje výrazného omezení ve spotřebě vody. Každá válcovna má svá specifika. V případě distribuce kapaliny nelze opomenout přesné řízení tlaku vody, která je dodávána do chladících segmentů. Tlak by měl být dostatečně vysoký, aby zabránil vzniku vodních par, které jsou při chlazení válců nežádoucí. Tato možnost umožňuje bezprostředně reagovat na provozní změny, které mohou nastat v průběhu výroby.

6.1.2 Snížení spotřeby vody

Jako velmi efektivní se jeví snížení spotřeby vody. Provozní náklady na chlazení vodou jsou velmi vysoké a jejich snížení je nesmírně důležité. S možností regulace vody v tryskách dochází k výraznému snížení ve spotřebě vody.

Ve válcových otvorech, které jsou navrženy na původním chladícím segmentu, není možnost regulace vody. Konstrukční změna s možností použít techniku rozprašování za pomoci trysek vedla k výraznému zkvalitnění chlazení.

Je možno regulovat průtok vody přes chladicí trysky, kde je možno nastavit rychlost proudění vody, úhel dopadu vodního paprsku, šířku vodního sloupce a jiné ukazatele, které nám umožňují dnešní trysky. Je tedy možno říci, že navržení trysek na nový chladicí segment má pozitivní dopad v celé řadě aspektů:

- zvyšování funkčnosti chlazení,
- využití stávajících a nově vznikajících technologií trysek,
- snižování spotřeby vody.

6.1.3 Výběr trysek pro chlazení na chladícím segmentu

Navrhnout nový chladicí segment a osadit ho tryskami skýtalo mnoho otázek, zejména, jaké trysky použít, aby byly dosažené parametry chlazení. To vedlo k celé řadě zkoušení, pokusů a vyhodnocování spolehlivosti jednotlivých ukazatelů. Byly vyzkoušeny různé druhy chladících trysek. Trysky musely splňovat určité provozní a funkční parametry potřebné k zajištění účinného chlazení:

- rovnoměrný rozstřík kapaliny,
- dostatečně vysoký tlak a síla,
- úhel nastavení rozstříku vodního sloupce,
- hloubku rozstříku a rozložení kapaliny,
- optimální objem průtoku vody.

Všechny poznatky byly vyhodnoceny ve spolupráci s výrobcem trysek, firmou Lechler, která má následující portfolio průmyslových trysek vhodných pro náš účel:

1. TRYSKY S ROZSTŘIKEM DUTÉHO KUŽELE,

- axiální trysky s rozstříkem dutého kužele,
- excentrické trysky s rozstříkem dutého kužele.

2. TRYSKY S ROZSTŘIKEM PLNÉHO KUŽELE,

- axiální trysky s rozstřikem plného kužele,
- tangenciální trysky s rozstřikem plného kužele,
- svazkové trysky.

3. TRYSKY S PLOCHÝM ROZSTŘIKEM.

4. TRYSKY S TENKÝM OSTRÝM PAPRSKEM.

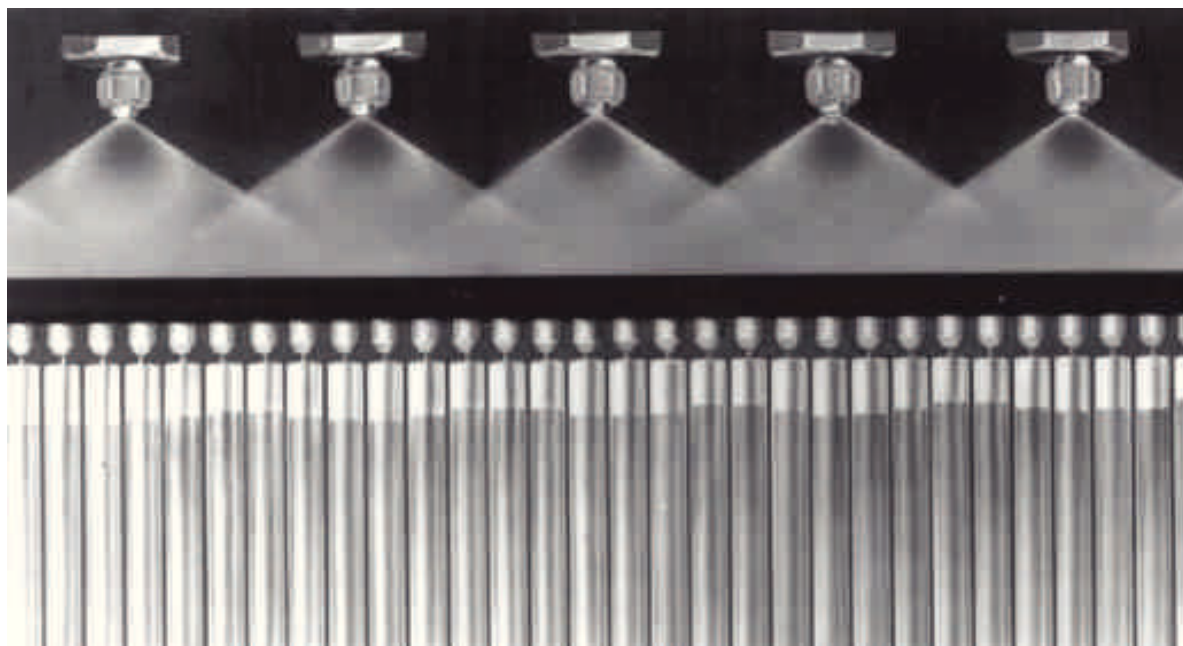
Na základě definovaných požadavků, funkcí a objektivních charakteristik tato firma doporučila některé typy trysek k odzkoušení. Jednalo se o následující typy trysek:

- trysky s plochým rozstřikem,
- trysky s rozstřikem plného kužele, a to:
 - tangenciální trysky s rozstřikem plného kužele,
 - axiální trysky s rozstřikem dutého kužele.

Všechny tyto trysky byly vyzkoušeny ve zkušebním výrobním procesu a byly také vyhodnoceny jejich vlastnosti. Popis jednotlivých typů trysek bude obsahem následujících kapitol.

6.1.4 Trysky s plochým rozstřikem

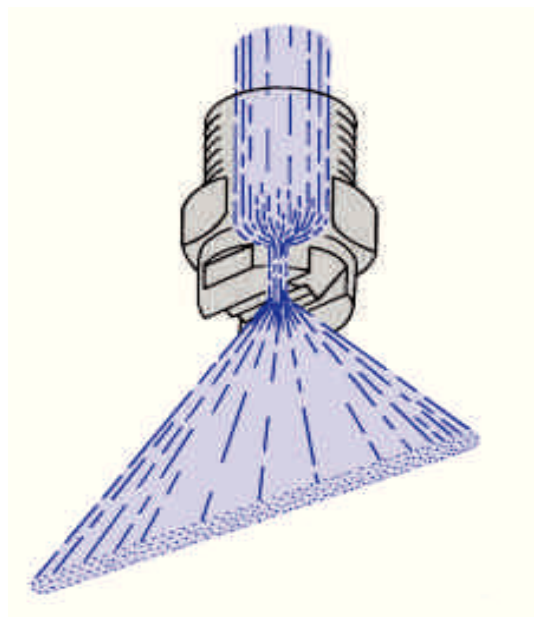
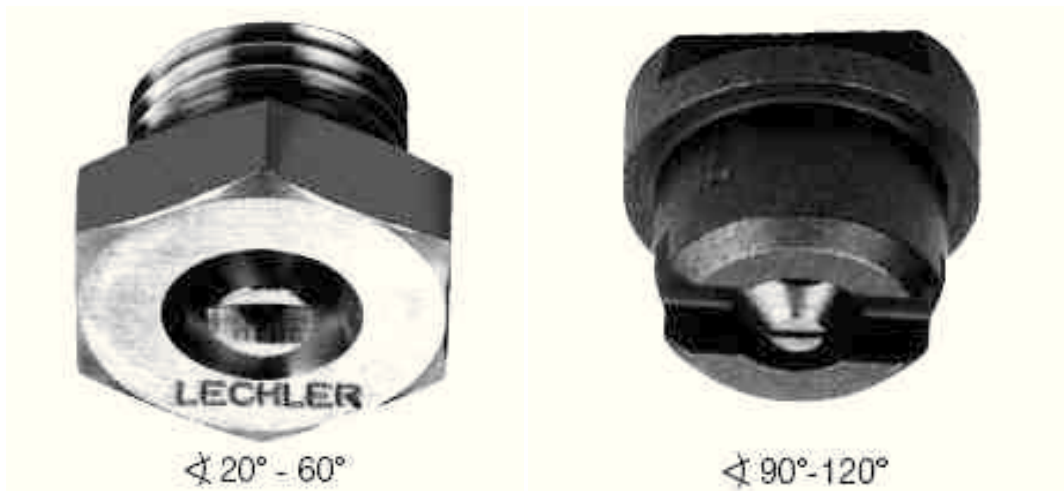
Pro tento typ trysek je charakteristické rovnoměrné rozdělení tlaku a kapaliny. Velmi vysoká účinnost chlazení je dosažena při vhodném nastavení úhlu paprsku, a to 60°. Geometrie trysky umožňuje dosáhnout kompaktní proud vody s kontrolovatelným paprskem vody s různými možnostmi rozložení kapaliny za účelem vhodného chlazení. Rozprašovaná kapalina má standardně tvar paraboly. Rozložení kapaliny je patrné na obr. 24.



Obrázek 24 Celkové rozložení kapaliny [15]

Jednoduchá konstrukce přináší velké využití především v hutním a strojním průmyslu. Jejich výhodou je stálý tlak a rovnoměrné rozptýlení rozstříkané kapaliny. Byly vyvinuty speciální měřicí metody, které za pomoci elektronického měření zpracovávají obrazce paprsků. Přesnost měření se pohybuje +/-1%. Skutečnost, že provozní hodnoty jsou k dispozici pro nejrůznější zkoušky, jako je tlak, rozptyl vodního sloupce atd., tyto údaje nám dávají přesný obraz o parametrech trysek. Tento typ trysek se dá vhodně kombinovat se zvláštními tryskami, jako jsou trysky s obdélníkovým nebo lichoběžníkovým obrazcem dopadajícího paprsku. Takto sestavené obrazce mohou vykrýt velmi účinně velkou chladící plochu.

Zvláštní pozornost musím věnovat jazýčkovým tryskám. Jejich konstrukce umožňuje proudu vody dopadat na šikmou plochu, ze které je následně přesměrován. Vznikne ostře ohraničený paprsek. Jazýčkové trysky jsou díky velkým průřezům odolné proti ucpávání. Trysky s plochým rozstříkem se používají všude tam, kde je požadován intenzivní a rovnoměrný paprsek vody. Jsou univerzálně použitelné a mají stálý tlak. Na obr. 25 můžeme vidět trysky s plochým rozstříkem.



Obrázek 25 Trysky s plochým rozstříkem [15]

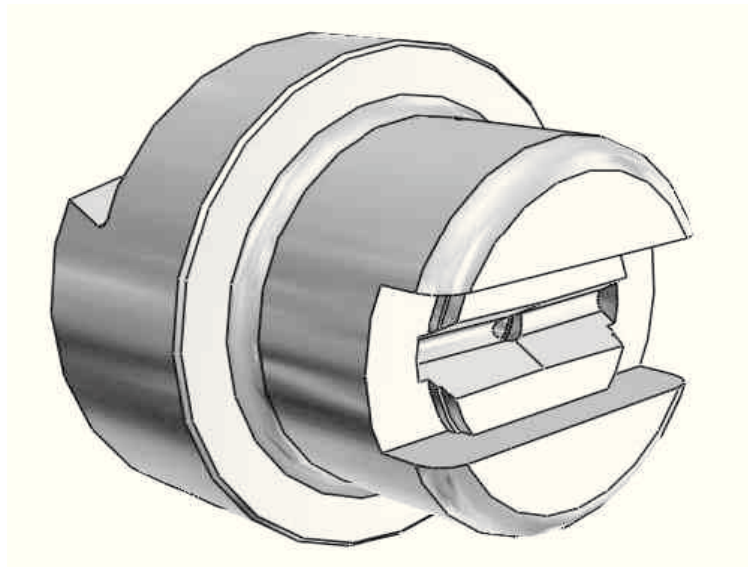
Na obr. 25 jsou zobrazeny dva druhy trysek, každá má jiný úhel rozstříku. Trysky mají rovnoměrné rozložení kapaliny ve tvaru paraboly, silně energetický paprsek, nepatrný podíl mlhy.

6.1.5 Trysky s rozstříkem plného kužele

Charakter rozstříku ve tvaru plného kužele vytváří kulatou, čtvercovou nebo oválnou nárazovou plochu, která je vždy zcela pokrytá kapalinou.

Tento charakteristický tvar rozstříku je dán trysce jejím vnitřním frézováním průzoru, který vytváří řízenou turbulenci (víření) kapaliny těsně před vstupem kapaliny do ústí trysky, kde nastane vířivý pohyb kapaliny. Samotné spektrum, které je kapénkové, nám vytváří tvar trysky. Tento typ trysek se vyznačuje vysokou schopností chlazení. Vysoká účinnost chlazení je zapříčiněna rovnoměrným rozptylem kapaliny ve tvaru kruhu. Trysky se vyznačují vysokou provozní spolehlivostí díky velkým průtočným otvorům. Trysky je možno nastavit pod různými úhly rozstříku, což nám umožní jejich použití ve složitých provozních podmínkách.

Na obrázku 26 je zobrazena tryska s rozstříkem plného kužele. [13]

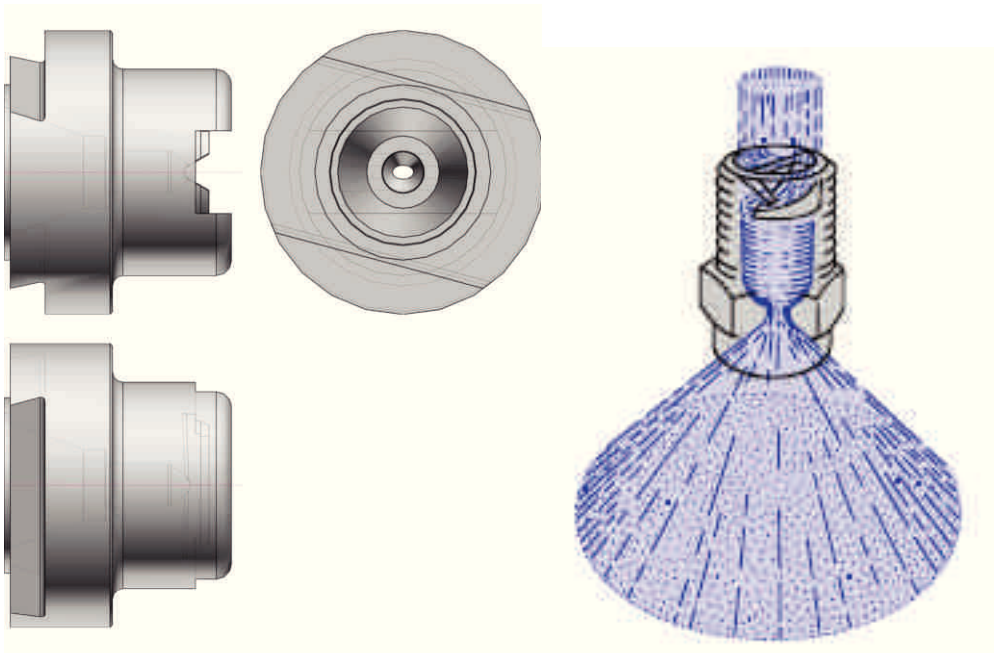


Obrázek 26 Tryska s rozstříkem plného kužele [15]

Tento typ trysky se vyznačuje těmito vlastnostmi:

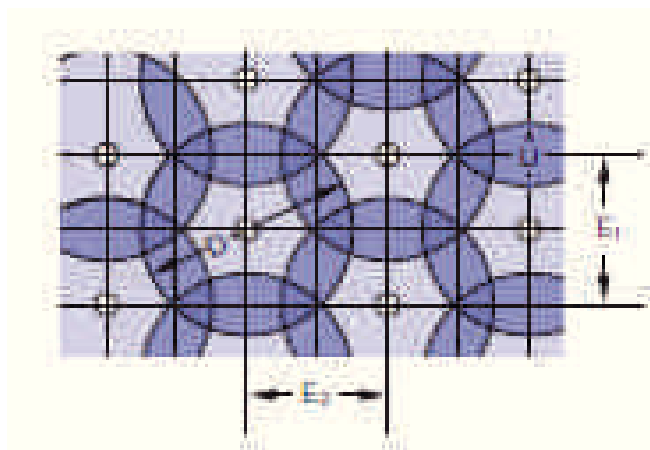
- velký výběr úhlu rozstříku,
- velký rozsah objemového průtočného množství kapaliny,
- velmi rovnoměrné rozptýlení kapaliny.

Tryska s rozstříkem plného kužele je znázorněná na obr. 27.



Obrázek 27 Řez axiální trysky s rozstříkem plného kužele [15]

Z obr. 27 je dobře patrné, že vestavěné pevné tělísko, které je umístěno uvnitř trysky, způsobuje rotaci kapaliny. Prudké proudění s rozdílnými tangenciálními a axiálními rychlostmi složek, vede k hrubšímu spektru kapek. Tento typ trysek je nastaven na následující provozní parametry. Vzdálenost trysek E je nastavena tak, aby se kruhové plochy dopadu chladicí kapaliny překrývaly o cca 1/3 - 1/4 mm.



Obrázek 28 Šachovité uspořádání trysek [15]

Vzdálenost trysek: $E_1 = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{3}$

Vzdálenost trysek: $E_2 = \frac{3}{4} \cdot D$

Překrytí: $U = D - E$

kde

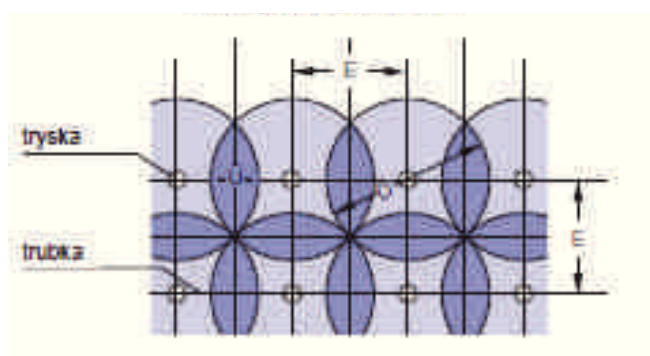
U překrytí ostříkovaného úhlu (mm)

D průměr paprsku

E vzdálenost trysek (mm)

H výška nainstalovaných trysek (mm)

α úhel rozstříku



Obrázek 29 Čtvercové uspořádání trysek [15]

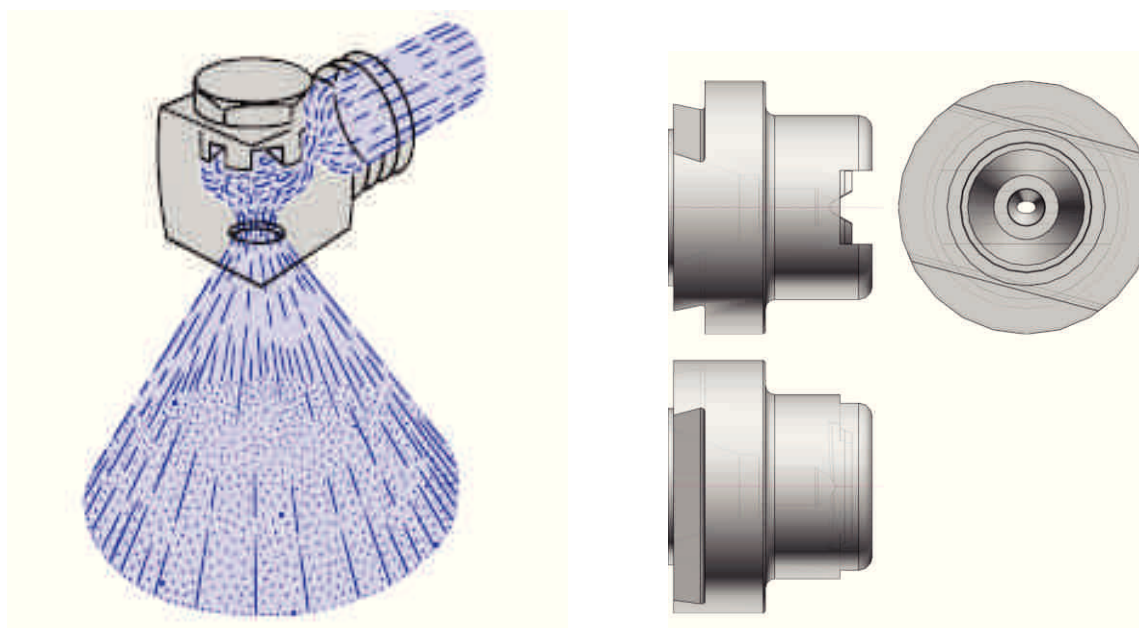
Vzdálenost trysek: $E = \frac{D}{\sqrt{2}}$

Překrytí: $U = D - E$

6.1.6 Tangenciální trysky s rozstříkem plného kužele

Chladicí kapalina je přiváděna do vířivé komory tangenciálně, a tam je následně uvedena do rotace. Tento typ trysek je vhodné použít tam, kde je možno využít chlazení pod vysokým tlakem při nižších rychlostech. Trysky s rozstříkem plného kužele pracují bez vnitřní vestavby a díky tomu se velmi málo ucpávají. Tvar vodního paprsku je docílen speciálními drážkami, které jsou vyfrézovány v tělese trysky.

Tímto konstrukčním provedením je kapalina soustředěna do středu paprsku, čímž je dosaženo rovnoměrného pokrytí chladicí plochy. Tento typ trysky je také možno nastavit pod různými úhly rozstříku s velmi stabilním úhlem dopadu paprsku chladicí kapaliny. Trysky tohoto typu jsou znázorněny na obr. 30.



Obrázek 30 Tangenciální tryska s rozstříkem plného kužele [14]

6.1.7 Axiální trysky s rozstříkem plného kužele

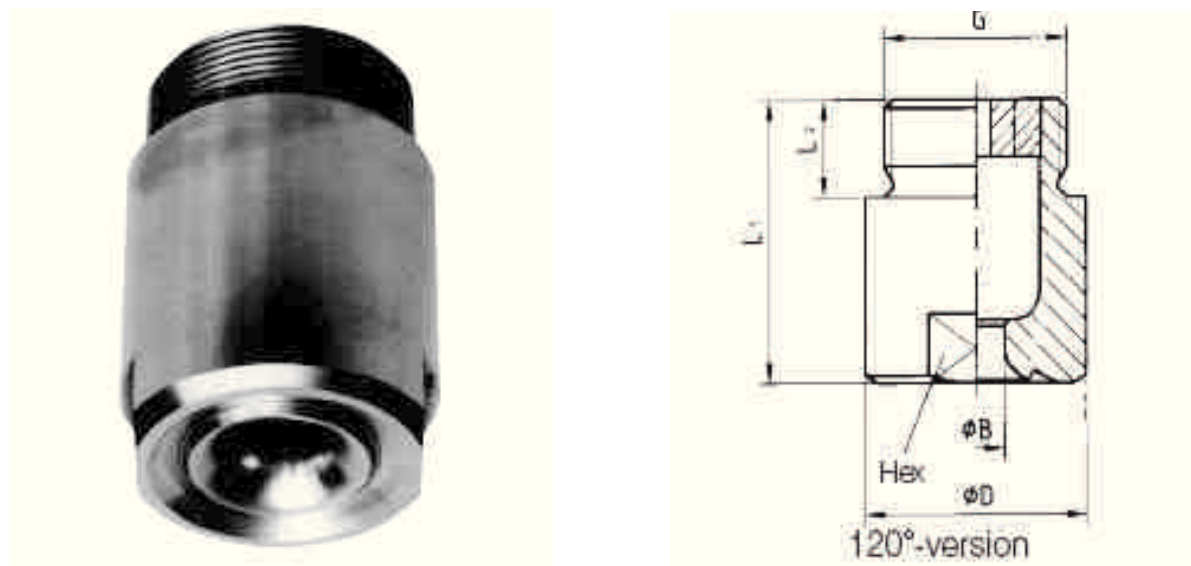
Velice účinné se v provozních podmínkách jevíly axiální trysky. Rozprašování kapaliny ve formě plného kužele u tohoto typu trysek je velmi rovnoměrné, a to po celé ploše kruhu. Tato mimořádně velká rozprašovací schopnost je zabezpečena soustředěním proudu kapaliny do středu prostoru, kde dochází k rotaci kapaliny. Rotaci kapaliny způsobují vírníky. Vysokou provozní spolehlivost dosahujeme díky vestavěnému pevnému tělísku s optimálním tvarem, které mají průtočné otvory. Tento typ trysek má velmi vhodně vyřešenou montáž pomocí závitu na konci trysky. Axiální trysky s rozstříkem plného kužele (obr. 31, 32) jsou dodávány s různými úhly rozstříku a jsou rovněž k výběru různé objemové průtoky.

Jejich výběr je vhodný v případech, když potřebujeme dosáhnout:

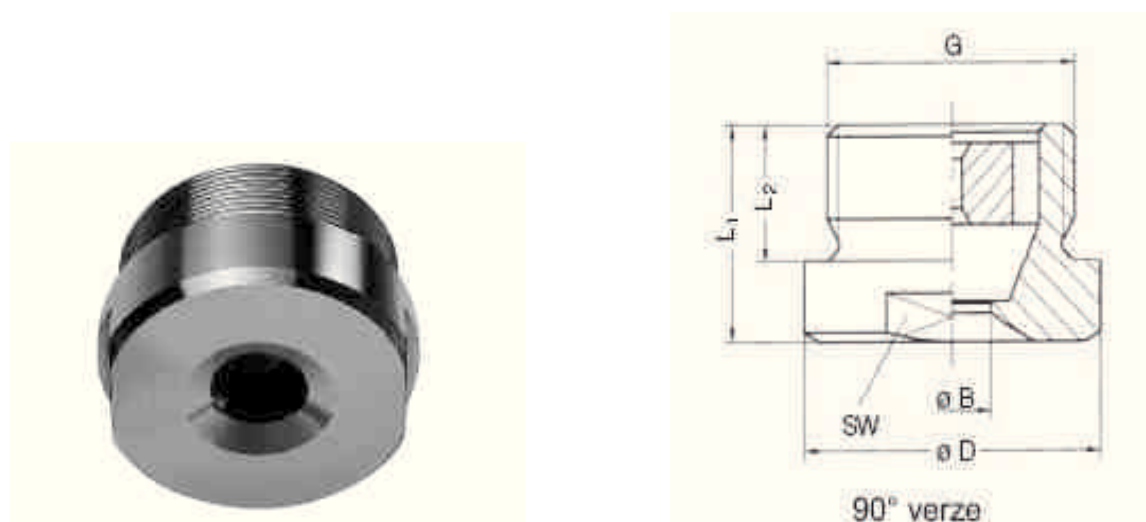
- velký výběr úhlů rozstříků,
- rovnoměrné rozptýlení rozstříkované kapaliny,
- široký rozsah objemových průtoků.

Hlavní parametry trysek s rozstříkem plného kužele, které byly používány v provozních podmínkách:

Úhel rozstříku	0 - 90°:30° - 120°
Vnitřní průměr trysky	B 10,5 mm
Tlak	0,3 MPa
Průtok	70 l/min
L ₁	27 mm
L ₂	17 mm
Průměr D	42 mm



Obrázek 31 Axiální trysky s rozstříkem plného kužele [14]



Obrázek 32 Axiální trysky s rozstříkem plného kužele [14]

Tyto trysky se vyznačují různými úhly rozstříku v mnoha úrovních objemového průtoku. Zvláště často používaný typ je rovnoměrný rozstřík ve formě plného kužele. Na obrázcích 31 a 32 vidíme dva druhy trysek - verze 90° a verze 120° úhel rozstříku.

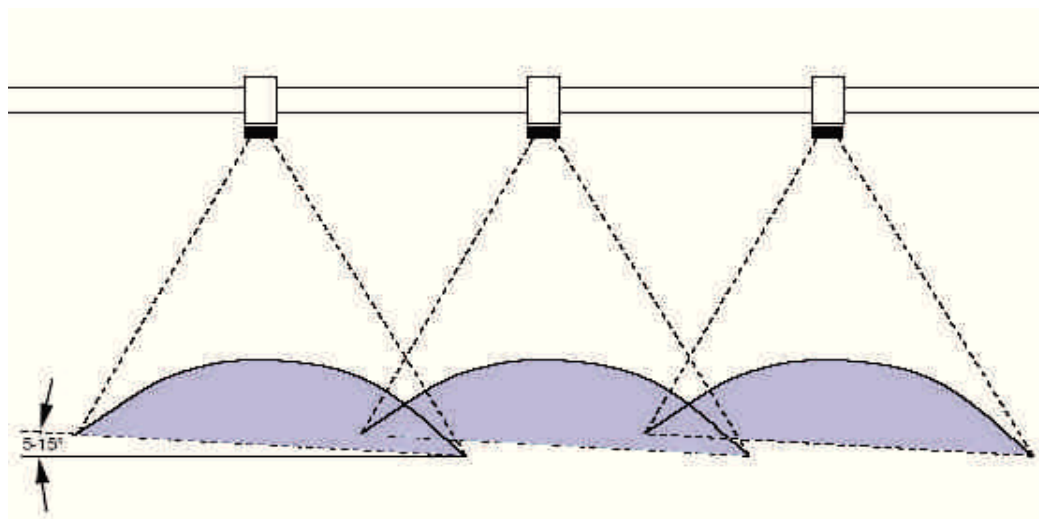
6.2 Závěrečné zhodnocení trysek

Na základě pozorování a ověřování účinnosti chlazení jednotlivých druhů trysek byly vybrány dva typy trysek:

- trysky s plochým rozstříkem,
- trysky s rozstříkem plného kužele.

Trysky byly vybrány, protože splňovaly nejlépe provozní podmínky výroby. Nejlépe vyhovovaly požadavkům pro efektivní tlaky a intenzitu průtoku. Dalším důležitým faktorem, pro výběr těchto typu trysek, byla možnost vhodné kombinace těchto trysek na chladícím segmentu. Tím jsem dosáhl velmi efektivního chlazení v prvním kvadrátu po opuštění drátu z pracovních válců. Válce v prvním kvadrátu byly velmi intenzivně chlazeny. Teplota nepřesahovala výrobcem požadovanou hodnotu, ta nesměla překročit 200°C. To bylo dosaženo vhodným poskládáním trysek na chladícím segmentu.

Nesmírnou výhodou těchto trysek je velmi jednoduchá vnitřní struktura, která umožňuje proudění kapaliny přímo do komory trysky. Trysky mohou být nainstalovány na chladící segment tak, aby jejich uspořádání zabránilo tomu, že se budou překrývat pásy vody bez zasahování do rozptylu proudu vedlejší trysky. Trysky s plochým rozstříkem jsou uspořádány tak, aby jejich výsledný rozptyl paprsku vody vytvářel obrazec, tento obrazec můžeme vidět na obr. 33. Tryskami s plochým rozstříkem dosáhneme rovnoměrného nanesení kapaliny na ostříkovanou plochu.



Obrázek 33 Výsledný rozptyl paprsku trysky s plochým rozstříkem [14]

Paprsky vody na sebe navzájem navazují, čímž dochází k pokrytí celé plochy válců, a tím i dokonalému chlazení celého povrchu válců. Kombinací těchto dvou druhů trysek můžeme vytvořit takový proud vody, kterým dosáhneme požadovaného rozložení chladicí kapaliny. Chlazení je velmi efektivní a dosahuje požadovaného výsledku.

6.3 Nový chladicí segment

V předchozích kapitolách bylo popsáno několik základních poznatků, které vedly k návrhu nového chladicího segmentu. Hlavní důvodem je zvýšení životnosti válců v hotovných blocích válcovací stolice.

Navrhovaný chladicí segment jsem navrhnul s využitím všech praktických poznatků, které jsem mapoval v průběhu výroby.

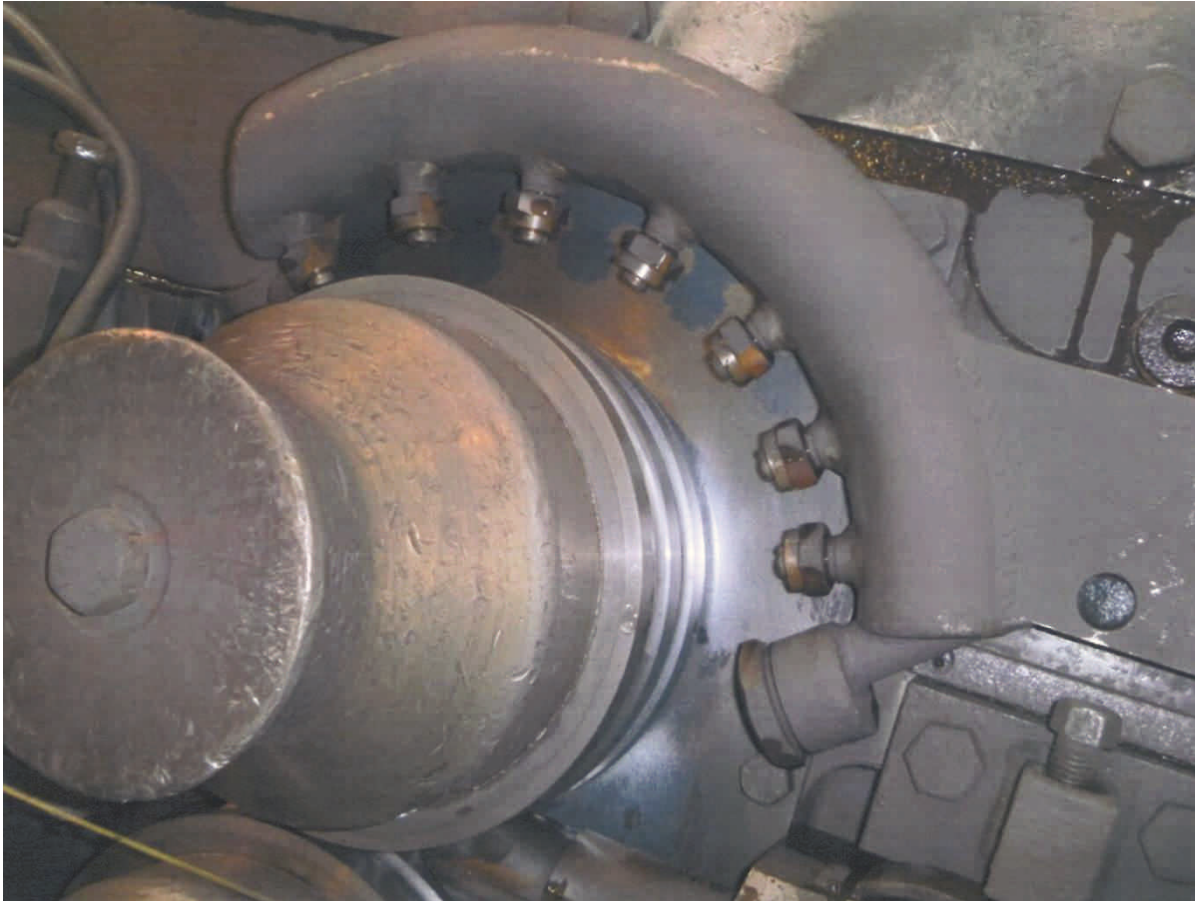
Nejdůležitějším faktorem pro efektivní chlazení válců je rapidní snížení teploty z povrchu válců v prvním kvadrátu otáčky válců, kdy válce tváří drát a končí pracovní proces válcování drátů. Dokonce během celého procesu válcování by podstatná část válců, která je temperovaná, měla zůstat na relativně nízké teplotě nepřesahující

hodnotu 80°C. Proto maximální povrchová teplota v kalibrech válců musí zůstat nízká (konstantní). Na matematickém modulu je dobře patrné, že regulace teploty povrchů válců po každé otáčce sníží riziko poškození válců. Celý proces chlazení je nastaven tak, že do trysek je přiváděno 220 - 260 l·min⁻¹ chladící vody. Chlazení vodou je nastaveno na vysoký průtok s nižším tlakem. Nastavení tlaku vody souvisí s rizikem vzniku vodních par, které jsou v procesu chlazení válců nežádoucí.

Při konstrukčním návrhu chladícího segmentu jsem použil poznatků ze simulace ohřevu válců. Nový chladící segment byl konstrukčně navržen z litiny. Na litinové tělo segmentu jsem navařil válcovou trubku, rádius zaoblení válcové trubky je R150 od středu válců. Chladící segment byl opatřen osmi chladícími tryskami. Trysky byly na chladícím segmentu rozmístěny tak, aby jejich účinnost chlazení byla co nejvyšší. Chlazení by mělo probíhat po obvodu válců do oblouku zasahujícího alespoň 180° obvodu válců. Trysky na chladícím segmentu byly rozmístěné pod různými úhly. První tryška svírá s osou válce úhel 20° a jedná se o axiální tryšku s rozstříkem plného kužele.

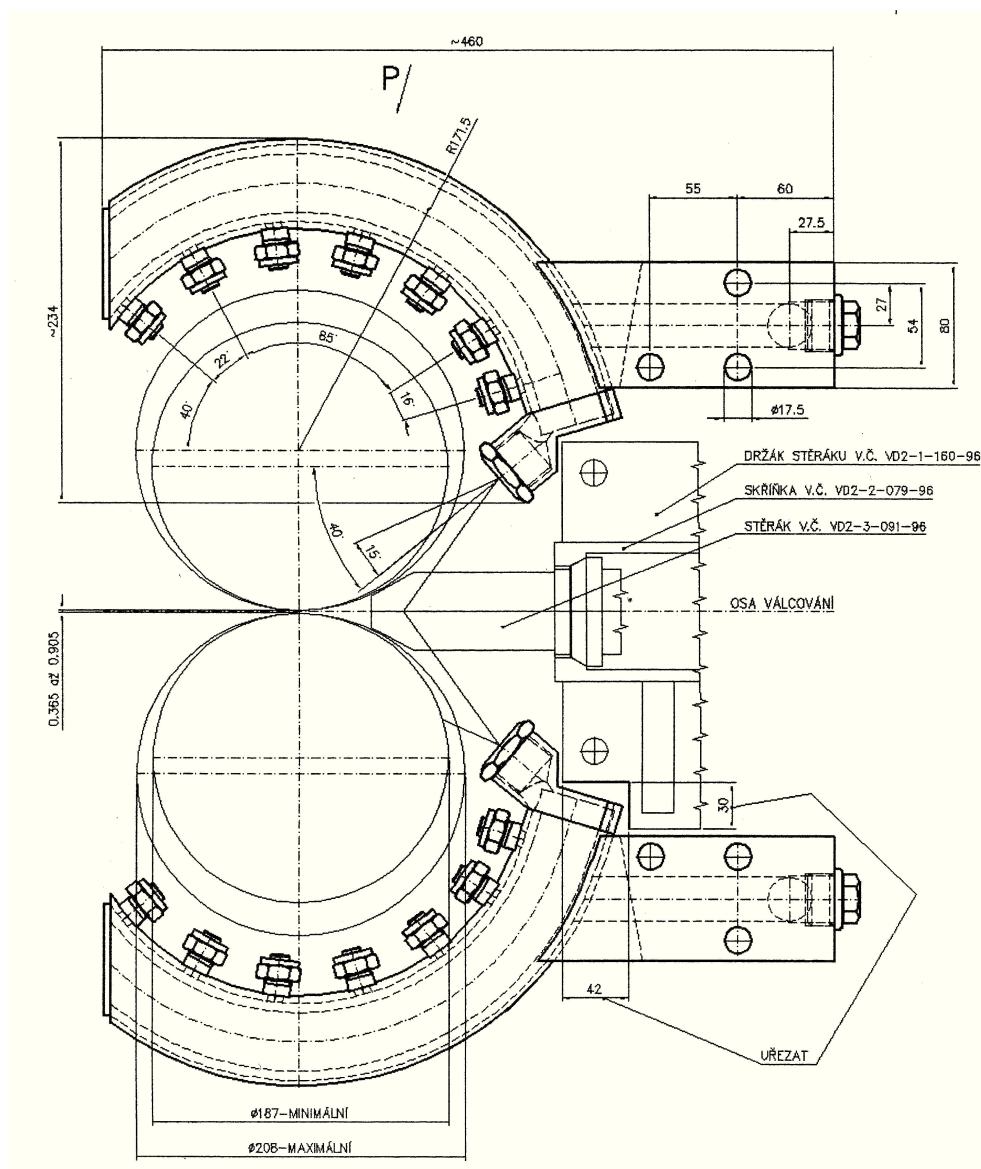
Tato tryška využije možnosti dopravit velké množství vody - dle průměru je schopna dopravit až 200 l·min⁻¹. Charakter rozstříku ve tvaru plného kužele vytváří kulatou, nárazovou plochu, která je vždy zcela pokrytá kapalinou. Cílem této trysky je odebrání největšího možného množství tepla z válců. Proto je tato tryška na chladícím segmentu umístěna jako první. Chlazení této trysky je nastaveno tak, že chladící kapalina dopadá na válce co nejdříve, jakmile válce opustí válcovaný drát.

Další trysky na chladícím segmentu jsou nainstalovány jako trysky s plochým rozstříkem. Trysky jsou na chladícím segmentu nainstalovány pomocí závitů. Závitů umožňují snadnou manipulaci s tryskami a také možnost rychlé výměny v případě poruchy. Takto vyrobený a navržený chladící segment je zobrazen na obr. 34.



Obrázek 34 Nový chladící segment upevněný na stoličce hotovního bloku

Na následujícím obrázku 35 je znázorněn výkres nového chladícího segmentu. Na výkrese je zakótován chladící segment, úhly rozstříku trysek, tvar segmentu, nastavení mezery mezi válci, přívod kapaliny do segmentu.



Obrázek 35 Nový chladicí segment

6.4 Nastavení vzdálenosti a úhlu rozstříku trysek chladícího segmentu

Samotným nainstalováním trysek na chladícím segmentu však nebylo vyřešeno kvalitní chlazení válců. Účinnost chlazení pomocí trysek závisela nejen na správném zvolení typu trysek a jejich uspořádání, ale i na nastavení úhlu rozstříku, výšky dopadu chladící kapaliny a objemovém průtoku.

Při válcování prochází drát mezi válečky a je postupně zmenšován jeho průměr až na konečný rozměr. Drát prochází ve stoličkách, kde kalibrační válce mají střídavý tvar ovál, respektive kruh.

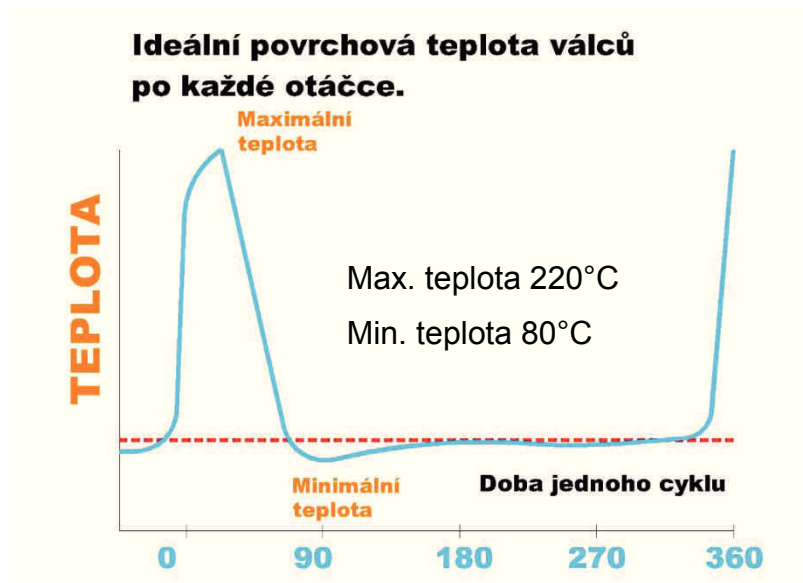
Trysky na chladícím segmentu musí být nastaveny na šířku oválu, nebo na tvar kruhu. Trysky musí chladit celou šířku kalibru. Nesmím zapomenout, že mezera mezi kalibry válců je nastavena dle válcovaného profilu, drátu mezi $0,33 \div 1,81$ mm. To vše musíme zohlednit při nastavení chlazení. Na základě všech provedených zkoušek jsem došel k závěru, že polovina obvodu válců bude chlazena plochými rozstřikovacími tryskami, které budou rozděleny na dvě části. Jako hlavní tryška bude axiální tryška s rozstřikem plného kužele. Snahou bylo nastavit tryšku tak, aby mohla chladit válece co nejdříve, jakmile ztratí kontakt s válcovaným materiálem. To znamená, že přibližně jedna třetina chladicí kapaliny je soustředěna do chlazení v prvním kvadrátu. Rozmístění trysek je patrné na obr. 36.



Obrázek 36 Rozmístění trysek na chladícím segmentu

Tryska s rozstřikem plného kužele je nastavena na výšku rozstřiku H 500 mm, úhel rozstřiku 20° , objemový průtok na $70 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při tlaku 0,3 MPa. Další sedm trysek je nastaveno na objemový průtok $27 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při tlaku 0,3 MPa. Celé chlazení musí být nastaveno tak, že po každé otáčce válce musí být teplota válce před stykem

s teplým drátem na hodnotě 60 - 80°C. Ideální odvod tepla po jedné otáčce je možno vidět na obr. 37.

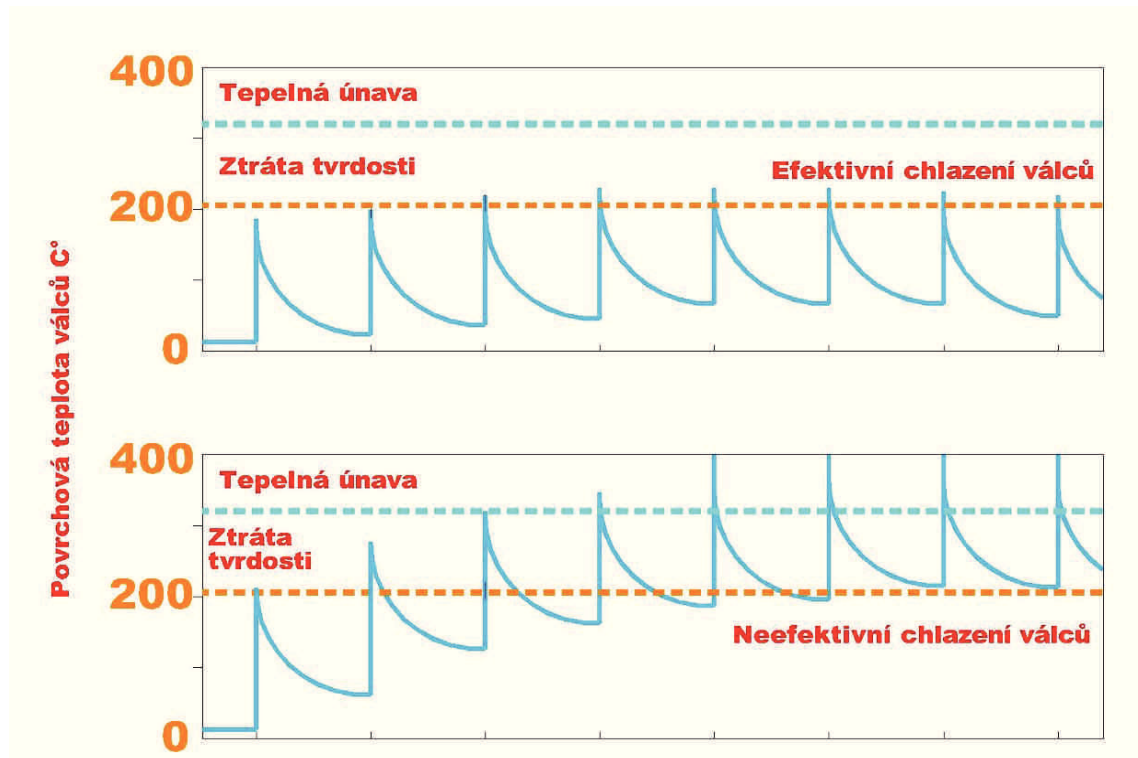


Obrázek 37 Ideální povrchová teplota válců

V případě, že chlazení vykazuje nějakou odchylku, válce začnou postupně zvyšovat teplotu. S nárůstem teploty pak dochází k tepelné únavě. Teplota postupně prostupuje do středu válců.

Na povrchu válců se začínají vytvářet povrchové trhliny, které způsobují vady na drátě. Na obr. 38 můžeme vidět efektivní chlazení, kdy teplota po každé otáčce zůstává konstantní. Na spodním obrázku můžeme vidět nárůst teploty, která je zapříčiněna neefektivním chlazením. Všechny tyto informace mne přiměly vyzkoušet účinnost celého systému chlazení.

Celý proces chlazení jsem nechal nasimulovat v programu MARC. Cílem simulace je ověřit si správnost rozložení trysek, účinnost chlazení a rozložení teplotního pole ve válcích ze slinutých karbidů.



Obrázek 38 Popis efektivního a neefektivního chlazení válců

6.5 Proces simulace

Pro simulaci byl použit programový systém MARC, jehož dodavatelem je MSC. Software, s.r.o., Brno. Tento programový systém se skládá z řady programů, které jsou použitelné jako podpora pro analýzu problémů v oblasti mechaniky a přenosu tepla. Software je využitelný pro lineární a nelineární pevnostní analýzu, a to jak ve statické tak dynamické oblasti a rovněž pro rozbor vedení tepla. Nelinearity mohou být způsobeny chováním materiálů, velkými deformacemi nebo okrajovými podmínkami. Fyzikální problémy jsou řešitelné v jednom, ve dvou nebo ve třech rozměrech.

Pro model problému je možné použít celou řadu prvků. Každá simulace se provádí tak, že se pro vytvořený model nejdříve provede zjednodušený testovací výpočet, aby se zjistilo, nakolik je výpočtový model numericky stabilní, zda řešení vůbec konverguje, kolik času je zapotřebí pro výpočet požadované simulace atd.

Výpočet byl řešen jako spojitá teplotně mechanická úloha. Protože se jedná o úlohu s časově závislými okrajovými podmínkami, probíhalo řešení v jednotlivých časových krocích. Délka jednotlivých časových kroků byla stanovena programem na základě podmínky maximální přípustné změny teplot jednotlivých uzlů v tomto kroku. Pro každý časový krok tedy prakticky probíhaly dva výpočty. Nejprve to byl výpočet teplotního pole rolky pro okamžitou polohu kladky. Následně proběhl výpočet deformací kladky.

Pro zajímavost, v našem případě pro čas simulovaného děje 1200 sec bylo potřeba 12 912 časových kroků a proběhlo 51 438 iterací.

6.5.1 Předpoklad simulace

Cílem simulace je ověřit rozložení teplotního pole ve válcích ze slinutých karbidů při válcování drátů, a to především v ustáleném stavu. Geometrie válců a rozložení chladících trysek bylo zadáno do programu na základě výkresové dokumentace. Tento program dovoluje řešení spojitě teplotně mechanické úlohy.

Tato teplotně mechanická úloha je nutná pro jednoduchou realizaci otáčení válců kolem osy a zjištění prostupu tepla válci. Tato úloha rovněž umožňuje počítat s možností deformací válců, které nastanou v procesu válcování, ale v této fázi nebylo nutno s touto možností počítat. Teplota drátu byla pokládána za konstantní, a to 900°C. Teplota vody byla nastavena na maximální možnou hranici 20°C, která odpovídá letnímu provozu. Nejproblematictější místem celé simulace je přestup tepla z drátu do válců a odvod tepla z válců do chladící vody.

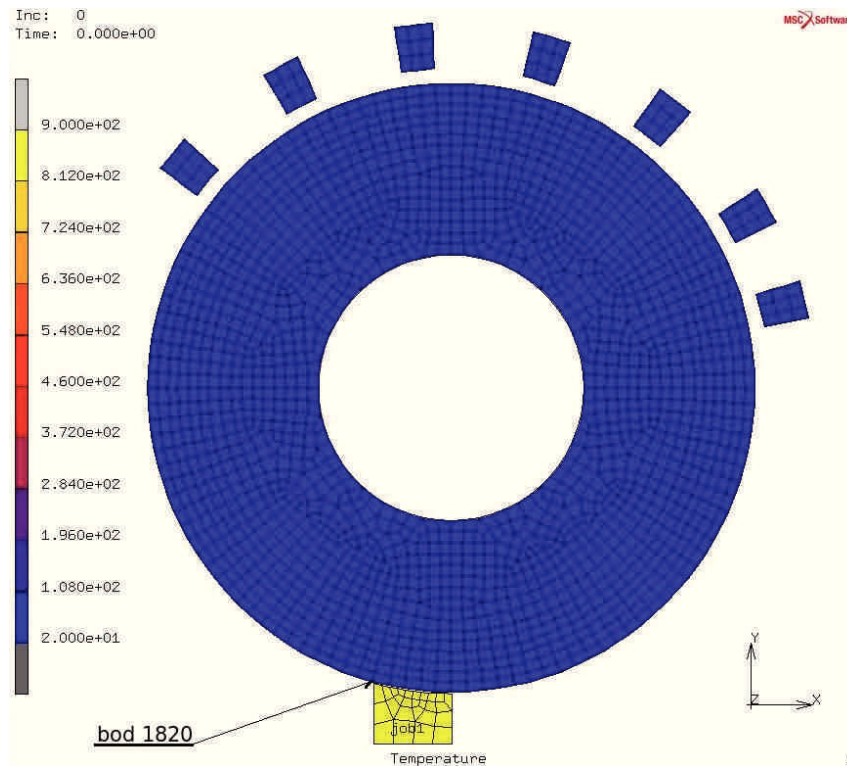
6.5.2 Přestup tepla drát vs. válec

Drát je považován jako těleso o konstantní teplotě 900°C. Součinitel přestupu tepla byl simulován v místě okamžitého kontaktu mezi válcem a drátem. U přestupu tepla mezi válcem a chladící vodou byl použit stejný model jako u přestupu tepla

mezi drátem a válcem. Tedy jednotlivé trysky jsou pokládány za tělesa o teplotě 20°C a teplo prochází v místě okamžiku kontaktu válce a trysky.

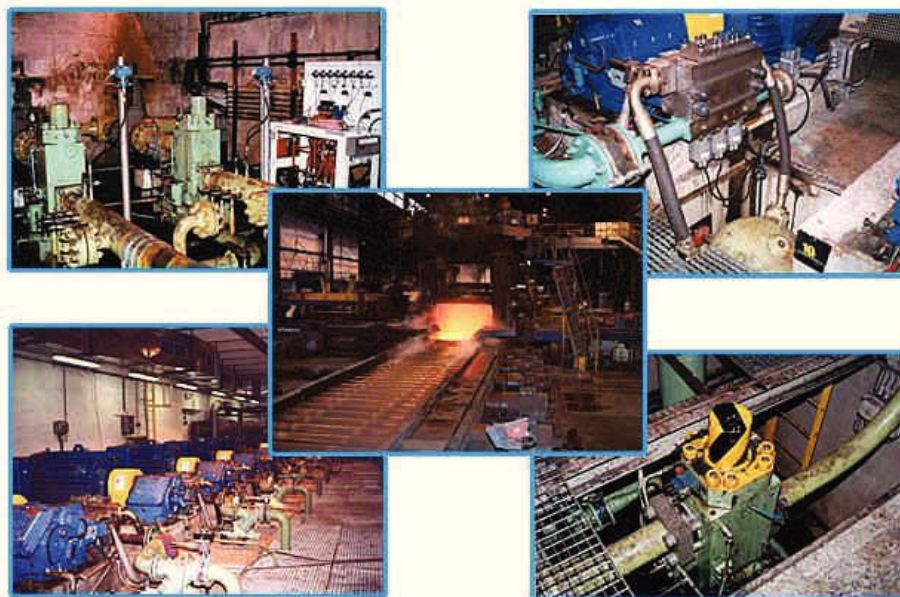
Celkový výpočtový model je na obr. 39. Model válce je vytvořen z plošných elementů. Válec je vymodelován přesně podle doložené výkresové dokumentace. Model drátu a trysek je vytvořený rovněž z plošných elementů. Tyto elementy slouží pouze k simulaci přívodu tepla z drátu a odvodu tepla vodou z chladících trysek.

Model pohonu je představován kružnicí na vnitřním povrchu válce. Z hlediska simulace se jedná o tuhé těleso, které zajišťuje otáčky válce a na teplotním výpočtu se nijak nepodílí. Model byl nastaven na simulaci tak, aby byly mapovaly podmínky, které mohou nastat ve výrobním procesu. Teplota vody byla nastavena na 20°C, tato teplota byla nastavena záměrně, aby simulovala provozní podmínky v letních měsících, kde jsou teploty vody, která přichází do chladicího systému nejvyšší a pohybují se cca 20°C, tak jak jsou nastaveny chladicí věže. Pokud budeme brát možnost, že v zimních měsících je teplota vody podstatně nižší. Byla snaha při modelaci chlazení zjistit účinnost systému při vyšších teplotách chladicí vody.



Obrázek 39 Celkový výpočtový model

Na obr. 40 můžeme vidět čerpací stanici, která přivádí do potrubních rozvodů chladicí kapalinu, která zabezpečuje chlazení v hotovných blocích válcovací tratě.



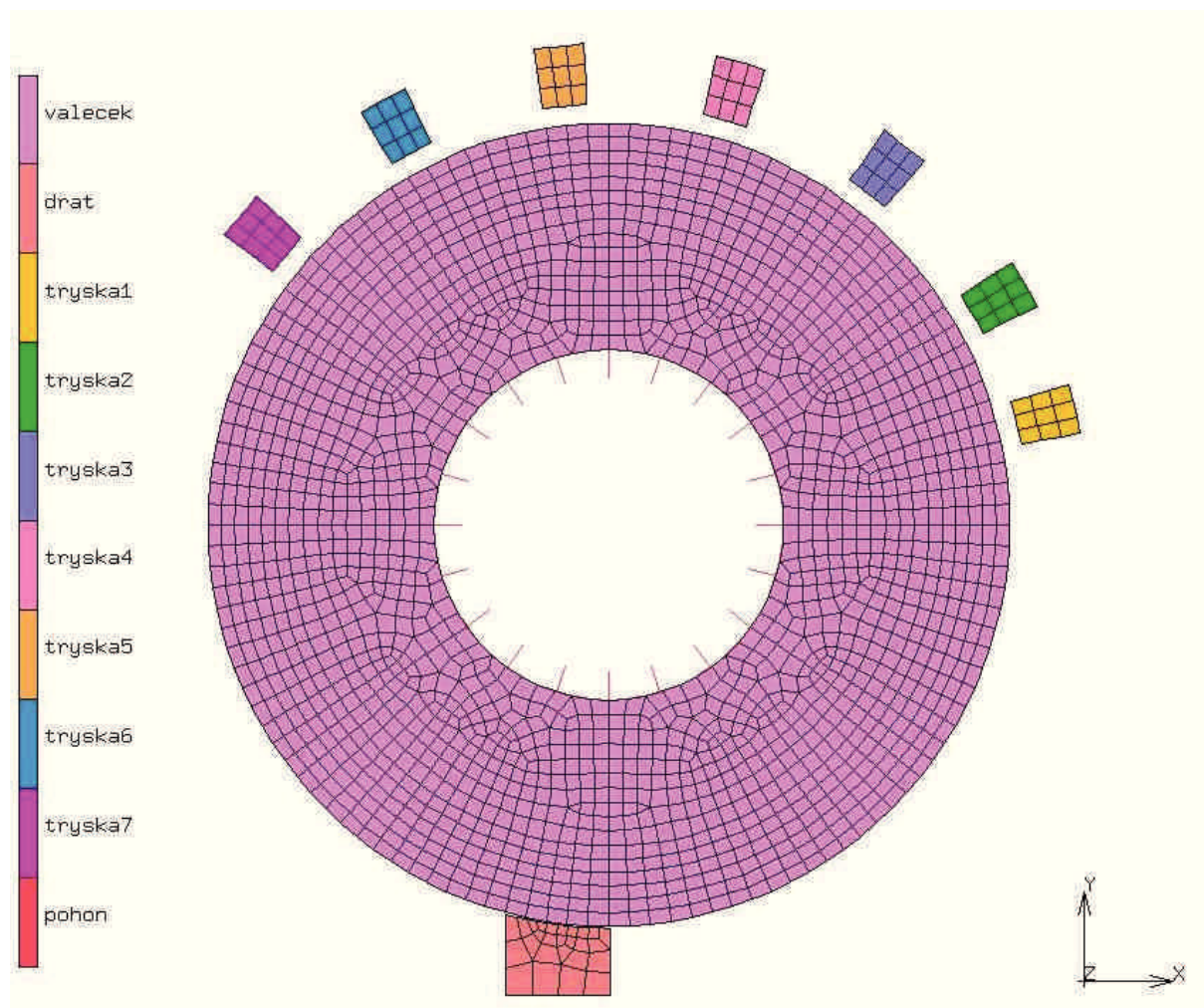
Obrázek 40 Rozvod chladicí kapaliny

Na dalším obrázku 41 je softwarový systém, který hlídá a vyhodnocuje potřebné hodnoty, jako jsou tlak, teplota, pH chladicí vody v jednotlivých stoličkách hotovního bloku typu MORGAN.



Obrázek 41 Software řídicí chlazení kapaliny na válcovací trati

Na obrázku 42 je znázorněn model chlazení, kde je válec vymodelován z plošných elementů na základě výkresové dokumentace. Modely trysek a drátu jsou rovněž vytvořeny z plošných elementů. Takto simulovaný model mi slouží k vyhodnocení účinnosti navrženého inovovaného chlazení válců.



Obrázek 42 Model chlazení

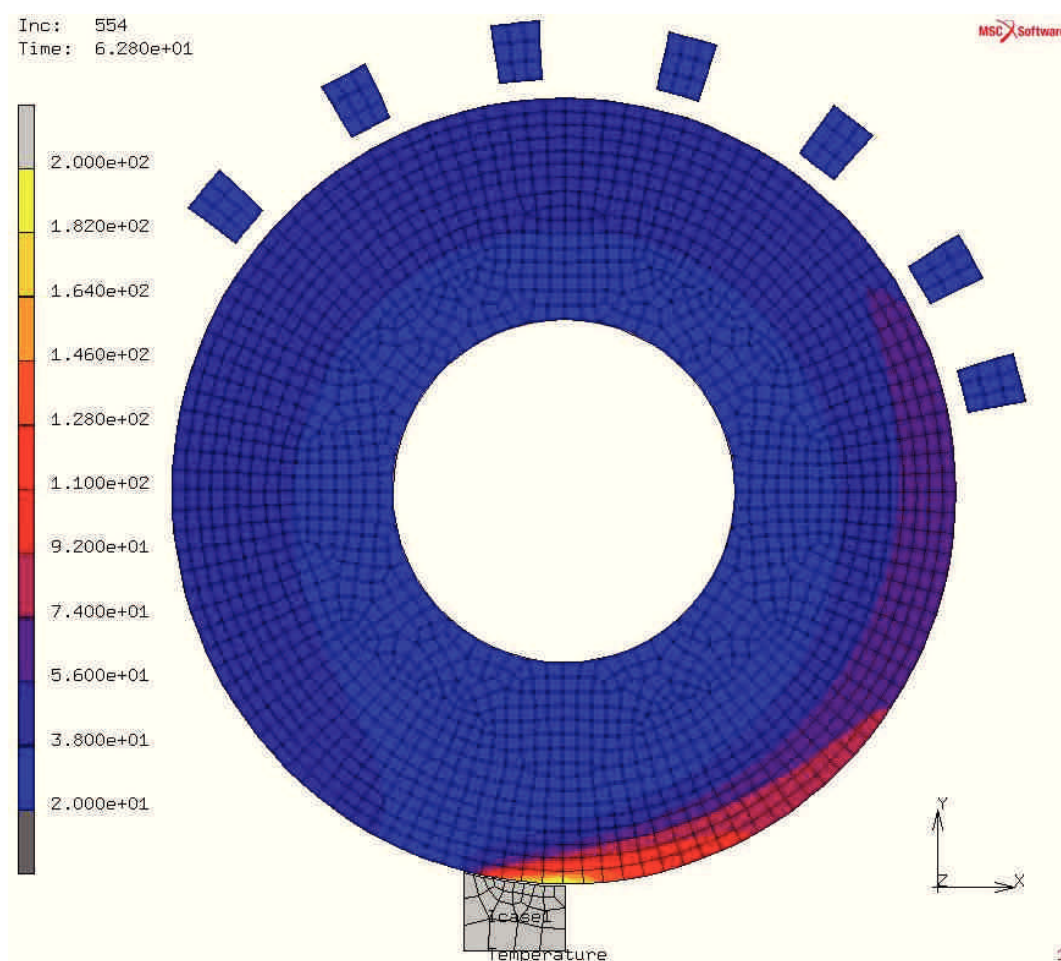
6.5.3 Simulační kroky při zjišťování prostupu tepla

Simulaci jsem musel rozdělit do několika postupných kroků, aby bylo patrné, jak prostupuje teplo válci a jak jsou následně válce ochlazovány. Při simulaci se vyskytly problémy se stabilitou výpočtů, pro enormní požadavky na délku simulace v průběhu času. Tento problém byl způsoben velkou válcovací rychlostí, rychlostí drátu, který vstupuje do válců a velkými hodnotami součinitelů přestupu tepla.

Na základě těchto informací bylo nutno postupovat s velmi malým úhlem otočení mezi jednotlivými řešeními. Proto byla snížena rychlost otáčení válců na $0,1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ a celkový čas pro výpočet otáčení válců byl stanoven na 1200 s. Odpovídajícím způsobem byly také sníženy hodnoty přestupu tepla. Tato simulace trvala asi čtyři hodiny.

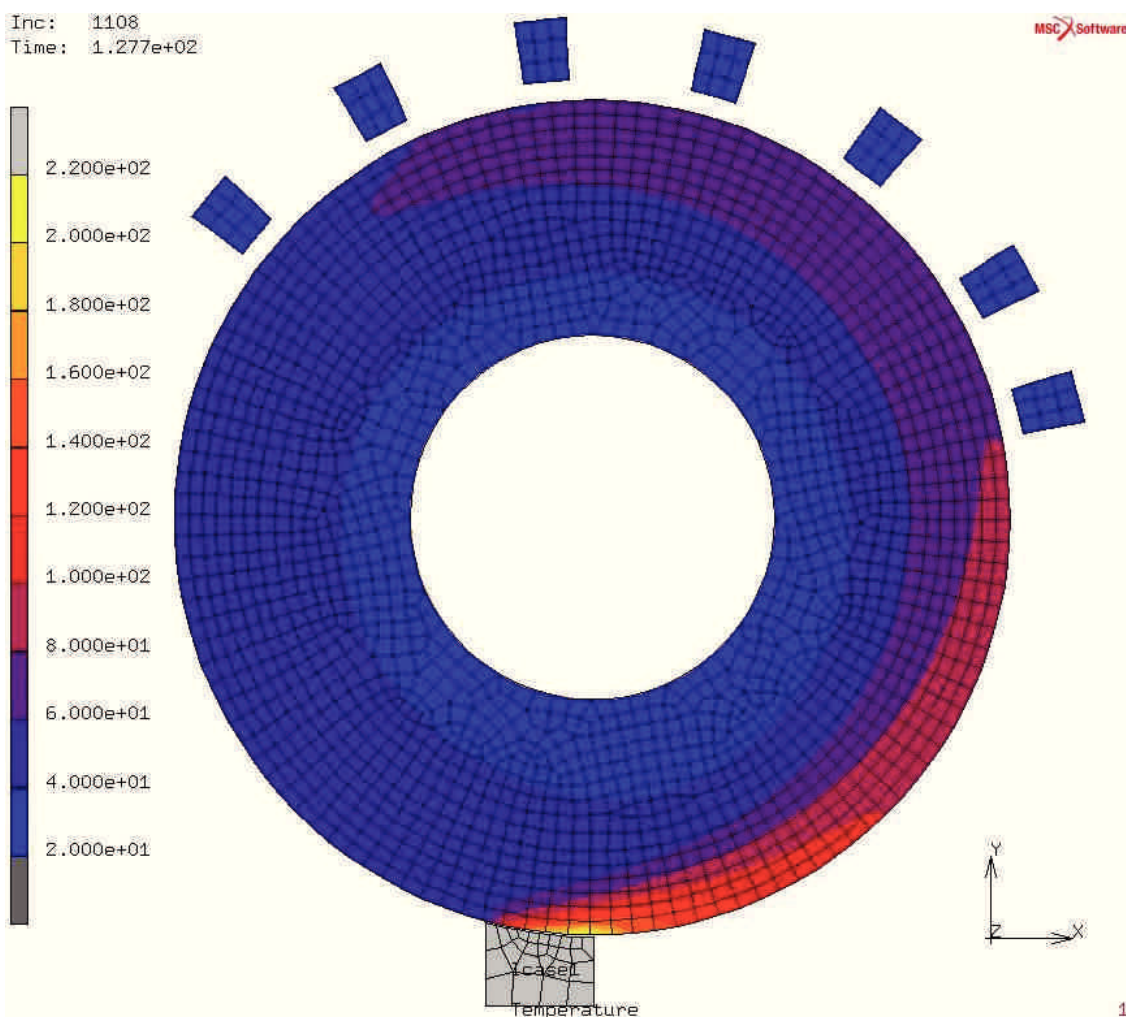
Celá simulace je znázorněna následujícími obrázky a grafy:

- Obrázek 43 Model chlazení válců po jedné otáčce,
- Obrázek 44 Teplotní pole po dvou otáčkách,
- Obrázek 45 Teplotní pole po třech otáčkách,
- Obrázek 46 Teplotní pole po čtyřech otáčkách,
- Obrázek 47 Teplotní pole na konci simulace,
- Obrázek 48 Časový průběh teplot bodu 1820, který je umístěn na povrchu válce po celou dobu simulace,
- Obrázek 49 Časový průběh teplot bodu 1820 a 1762 po první otáčce, kde je porovnávána prostupnost tepla dvou bodů, umístěných v různých místech na válcích. Při simulaci teplotní bod 1762 je umístěn 6,6 mm pod povrchem válce,
- Obrázek 50 Časový průběh teplot bodu 1820 v poslední otáčce simulace.



Obrázek 43 Model chlazení válců po jedné otáčce

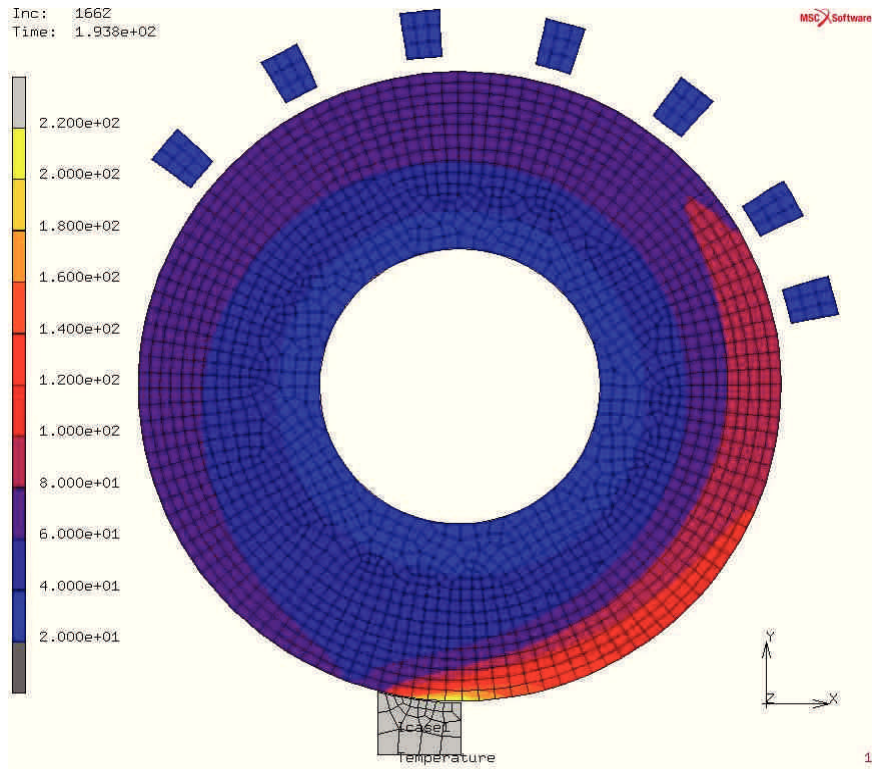
Na prvním obrázku 43 je dobře patrné, jak teplota drátů prostupuje povrchem válce. Válec je rychle zahříván, ale materiál je schopen pohltit zvyšující se teplotu. Na modelu můžeme vidět, že rychlost otáčejícího válce po první otáčce je příliš vysoká pro zjištění skutečného stavu účinnosti chlazení. Simulovaný bod ve válci se ve velmi krátké době dostal na počáteční teplotu simulace. Počáteční teplota bodu 1820 je 20°C.



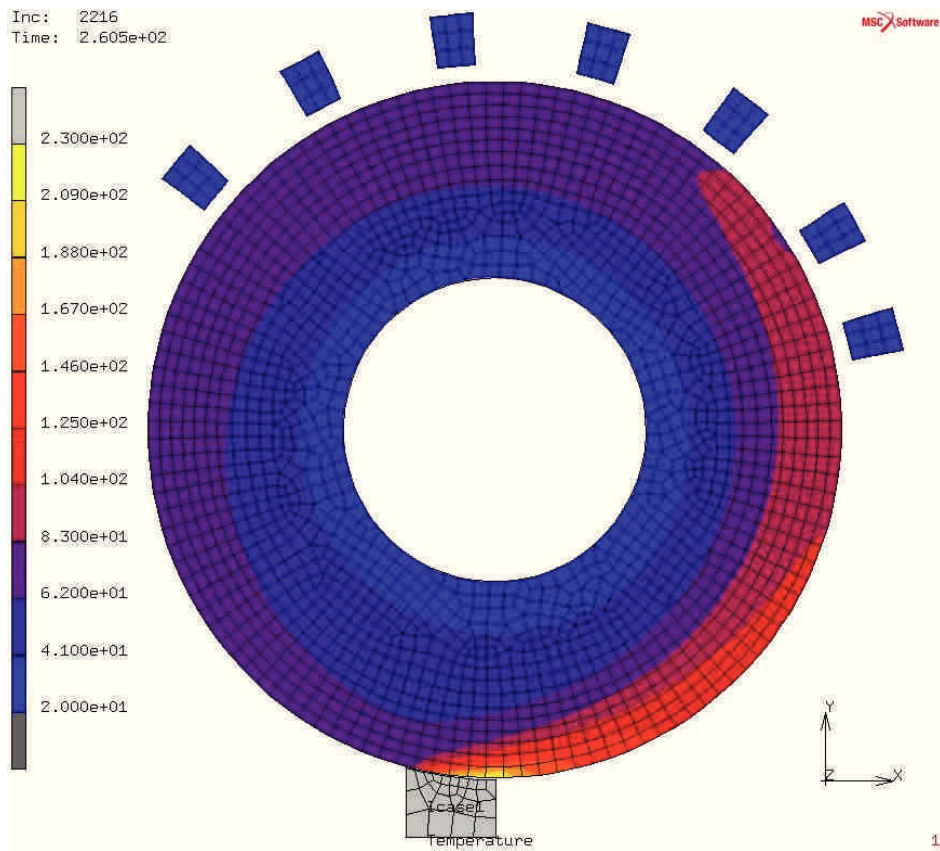
Obrázek 44 Teplotní pole po dvou otáčkách

Teplota drátu po druhé otáčce (obr. 44) začíná prostupovat hlouběji do povrchu válce. Válec se na povrchu začíná zahřívat, ale při tak vysokých válcovacích rychlostech stále nemůžeme spolehlivě vyhodnotit účinnost chladicího segmentu. Materiál válců ze slinutého karbidu velmi dobře pohlcuje teplo. Teplota válce u první chladicí trysky je velmi nízká, pohybuje se kolem 80°C. Trysky spolehlivě ochladí válec. Ani v tomto kroku jsem nezjistil účinnost chlazení.

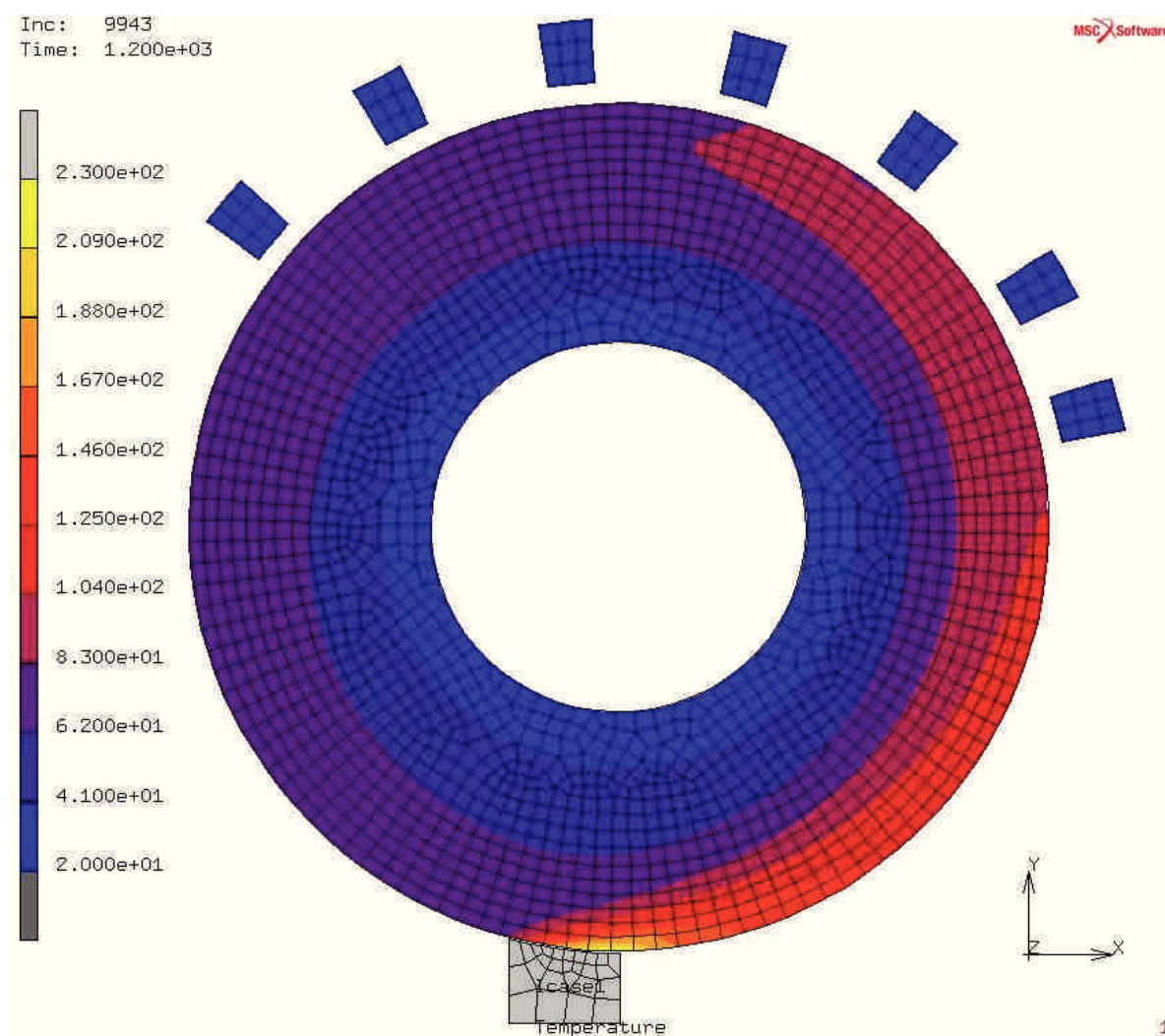
Další průběh simulace je znázorněn na obr. 45, 46.



Obrázek 45 Teplotní pole po třech otáčkách

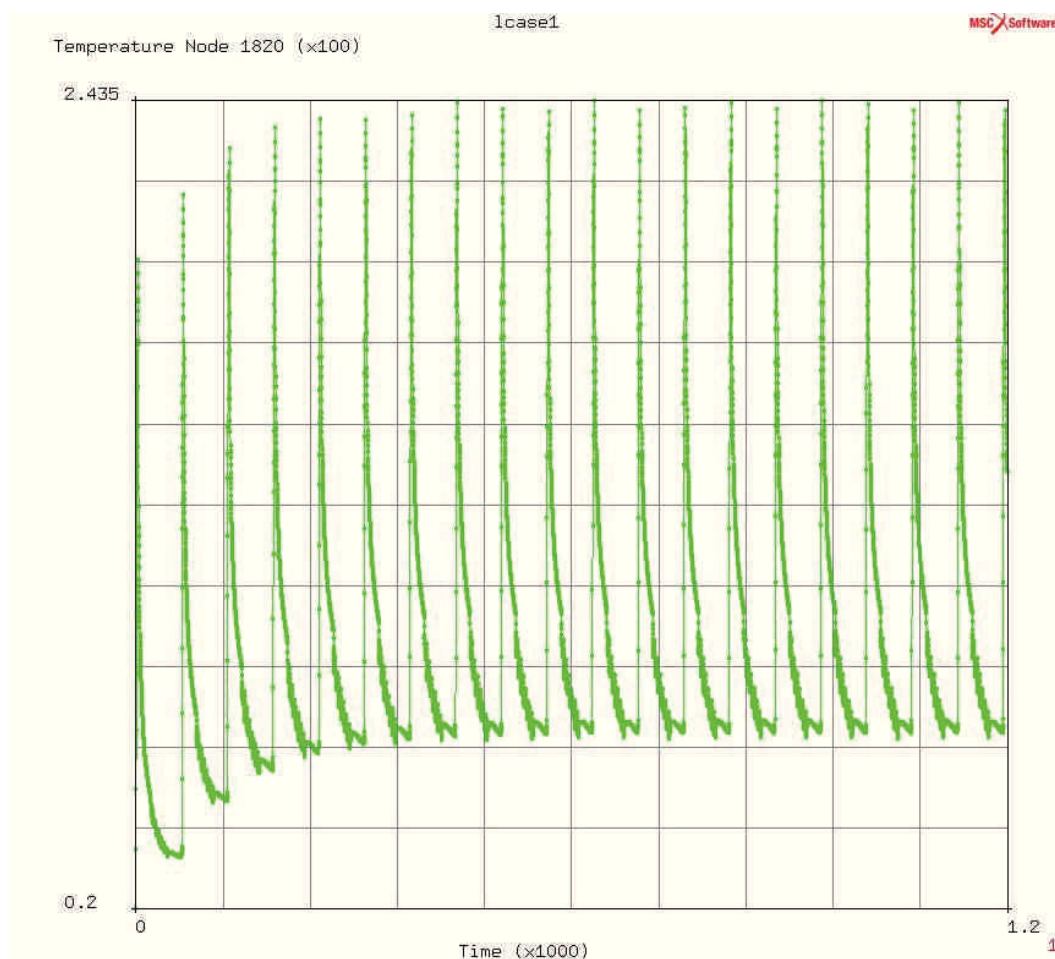


Obrázek 46 Teplotní pole po čtyřech otáčkách



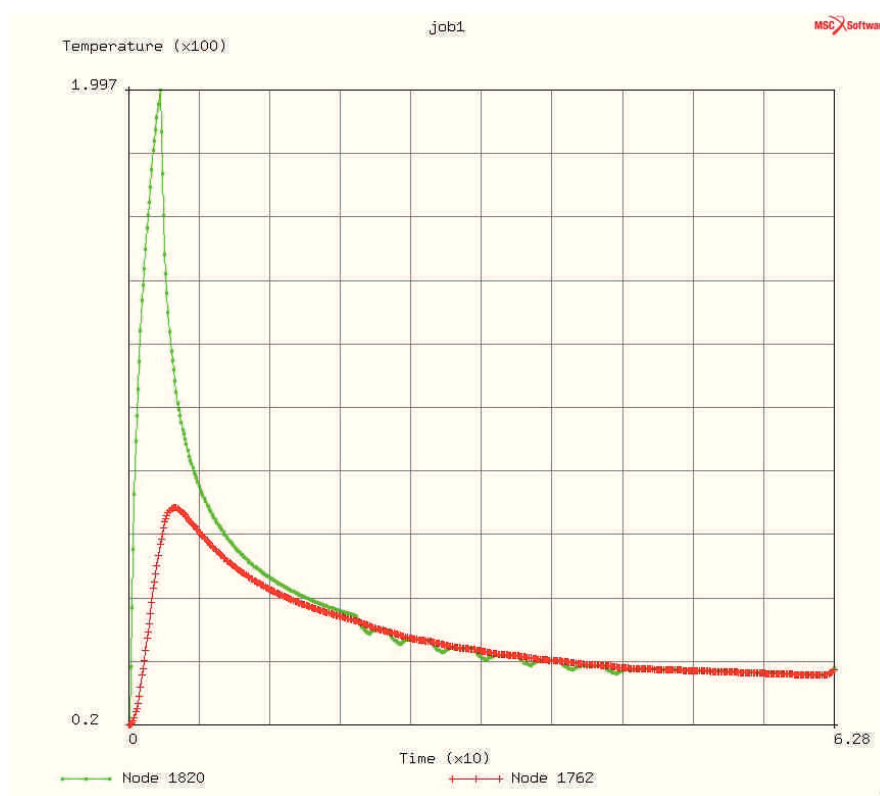
Obrázek 47 Teplotní pole na konci simulace

Na konci simulace (obr. 47) jsme se dostali do ustáleného procesu, kdy se prostup tepla válci ustálil a při každé další otáčce zůstala povrchová teplota téměř neměnná. Teplota válců při styku s drátem dosahovala $243,5^{\circ}\text{C}$. V okamžiku, kdy začneme na měřící bod působit proudem chladící vody z první trysky, teplota se začne snižovat, teplota povrchu válce postupně klesá. V okamžiku opuštění čtvrté chladící trysky měřící bod 1820 vykazoval konstantní teplotu povrchu válce kolem 80°C . Další trysky jen udržují teplotu povrchu válce. Naměřené hodnoty prokázaly účinnost chlazení v procesu válcování drátů. Z provedené simulace je zřejmé, že dynamického teplotního pole rotujícího válce při válcování drátů je proveditelné.



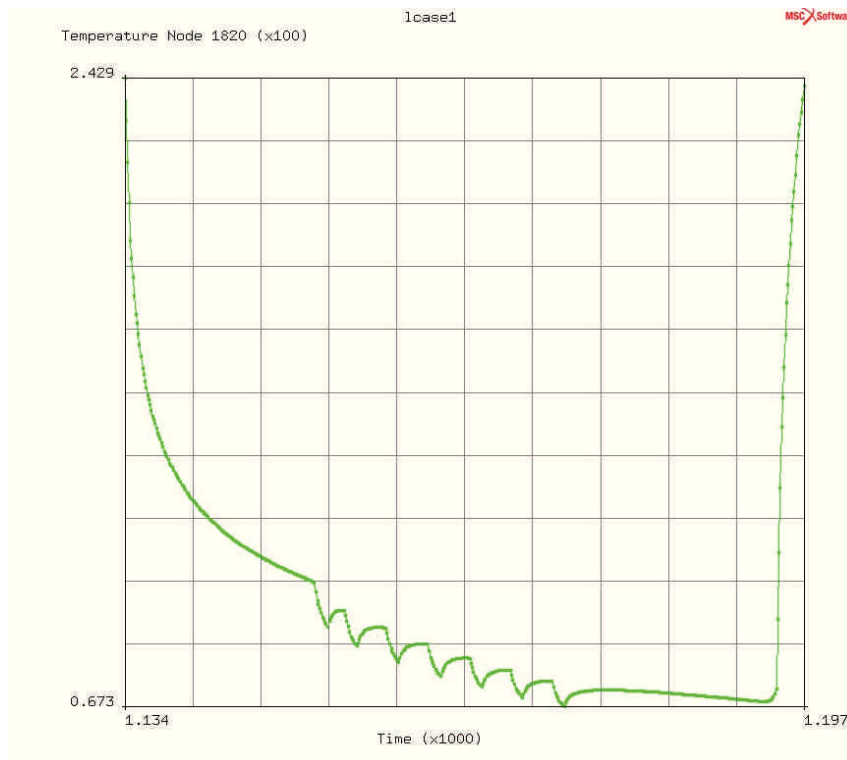
Obrázek 48 Časový průběh teplot bodu 1820 po celou dobu simulace

Z časového teplotního grafu (obr. 48) je dobře patrný předchozí výsledek simulace. V grafu je zaznamenán celý průběh simulace chlazení od první otáčky, až k ustálenému stavu chlazení válců. Náběhová křivka pozvolna stoupá a teplota válců se ustálí při čtvrté až šesté otáčce na 243°C. Z časového průběhu simulace teplot můžeme konstatovat, že chladicí segment v hotovním bloku udržuje válce během otáčení na konstantních teplotách mezi 243 - 265°C. Simulace potvrdila účinnost chlazení a správný výběr materiálu pro válce ze slinutých karbidů.



Obrázek 49 Časový průběh teplot bodu 1820 a 1762 po první otáčce při simulaci

Na základě informací, které jsem obdržel od společnosti Sandvik, jsem chtěl zjistit, jak hluboko proniká teplota do středu válců. Pokles teploty při dostatečně účinném chlazení má být v hloubce 0,5 mm o 50% vyšší než na povrchu válců. Simulací jsem vytvořil druhý kontrolní bod, který dostal označení 1762 a byl nasimulován 6,6 mm pod bodem s označením 1820. Časový průběh teplot bodu je velmi dobře zaznamenán na obr. 49. Bod s označením 1762 měl minimální teplotní rozdíly v průběhu celé simulace a prostup tepla válcem byl velmi nepatrný, teploty se pohybovaly v rozmezí mezi 92 - 38°C. Simulace potvrdila, že prostup teploty do středu válců je velmi malý a účinnost chlazení je dostatečná.



Obrázek 50 Časový průběh teplot bodu 1820 v poslední otáčce simulace

Na konci simulace jsem chtěl poukázat na poslední otáčku simulace (obr. 50) v ustáleném výrobním procesu, kdy chladicí trysky velmi účinně chladí válec a každá tryska postupně odebírá teplotu z válce. V případě, že by chlazení nebylo účinné, válce se mohou postupně zahřívat. Teplota prostupuje do středu válců. V takovém případě dochází velmi rychle k opotřebení válců a následnému poškození, nebo úplnému zničení válce. Tyto negativní vlivy mají dopad na výrobní proces.

6.6 Systém kontroly chlazení kalibru v hotovném bloku

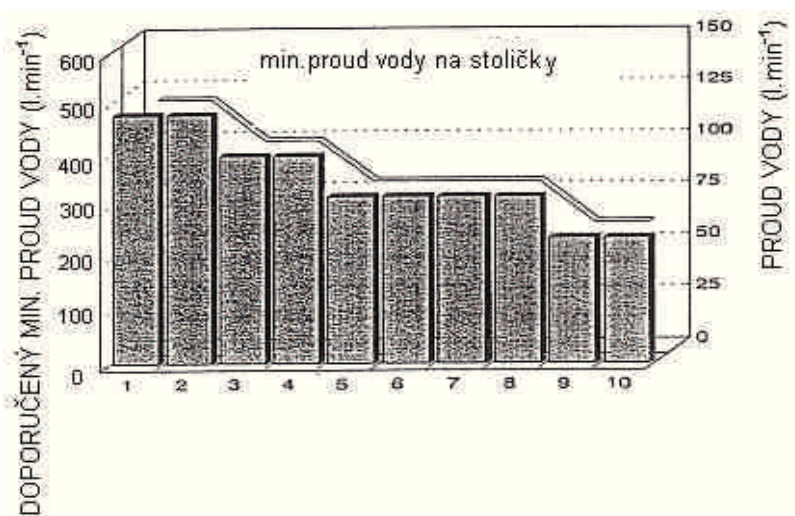
V předchozích kapitolách bylo popsáno a vyhodnoceno nové chladicí zařízení. Snahou bylo ověřit účinnost chlazení v průběhu výroby. Drát prochází v průběhu válcování hotovnými bloky. V hotovných blocích je umístěn chladicí segment, který chladí válce. Na hotovných blocích byly umístěny snímače teploty, které snímají a vyhodnocují teplotu v hotovných blocích. Teplota je zaznamenávána a v průběhu

výroby vyhodnocována. K tomuto účelu byl pořízen nový softwarový program. Systém hlídá jednotlivé stoličky hotovných bloků, vyhodnocuje jejich teplotu nastavení, opotřebením kalibru, hlídá mikrostrukturu během procesu válcování.

Snímání teplot, umístění trysek, výška segmentu, to vše závisí na správném nastavení tlaku a průtokovém množství použité chladicí vody. Tlak vody regulují ventily, které jsou počítačově řízeny na základě naměřených hodnot. Tlak v chladicím segmentu je nastaven na 0,3 - 0,6 MPa, měřeno v bodě dotyku ze sběrače vody nebo poblíž něj. Tlak musí být nastaven dostatečně vysoký, aby voda mohla dobře prostupovat clonou výparů, ale nesmí být příliš vysoký. Voda se pak odráží od povrchu válců, kumuluje se v prostoru mezi válci a chladicím segmentem, vytváří vodní páry a dochází ke zvyšování teploty válců. Optimální objem vody je regulován na základě naměřených hodnot. Naměřené hodnoty závisí na několika faktorech:

- na válcovacích rychlostech,
- na průměru velikosti válce,
- na typu a velikosti válcovaného profilu.

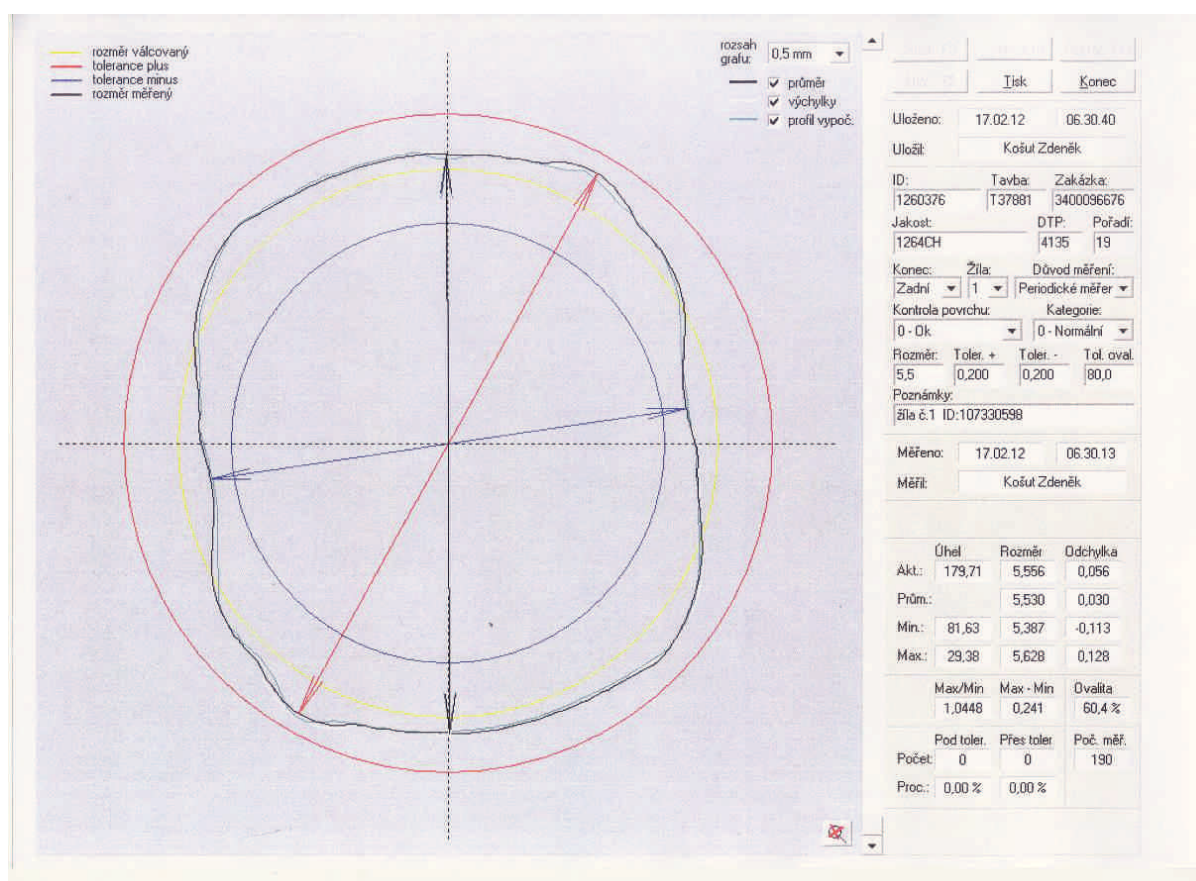
Na obr. 51 je znázorněn doporučený minimální objem chladicí vody působící na válce po stoličkách v typickém 10 - ti stolicovém bloku. Nutno konstatovat, že se jedná pouze o doporučené hodnoty objemu chladicí vody.



Obrázek 51 Doporučené množství vody na stoličkách [14]

6.7 Kontrola životnosti válců

Hlavní a nejdůležitější kontrolou je hlídání opotřebení válců v průběhu válcování. Hotovní kalibované válce jsou dnes softwarově hlídány a sledujeme jejich opotřebení. K tomuto účelu byl pořízen nový program, který zpracovává a vyhodnocuje data. Kalibrační válce v hotovních blocích jsou měněny na základě válcovaného sortimentu, který se mění v cyklech cca po 2000 - 3000 tunách. V průběhu válcování je sledován drát, který prochází jednotlivými stoličkami a je kontrolována jeho kvalita.



Obrázek 53 Protokol kvality vstupu drátů do kalibru válců

Celý proces výroby je zaznamenáván v protokolu kvality (obr. 53), který obsahuje tyto základní údaje:

- toleranční pole drátu,
- odchylky od průměru,
- ovality,
- zakázku, tavbu, jakost,
- vstup drátů do kalibru válců,
- datum a čas měření,
- jméno pracovníka.

Z protokolu kvality je snadno zjistitelné opotřebenění válců na základě tolerančních rozměrů. Na obrázku 53 můžeme vidět válcovaný rozměr drátů, ten je označen žlutou barvou.

Měřený rozměr nám kopíruje válcovaný materiál. Je dobře patrné, jak se materiál v průběhu válcování mění. Tvar drátu vstupuje do kalibrovaných válců jako ovál a je snadno rozpoznatelné, kde vzniká největší namáhání válců. Z tolerančního pole je možno zjistit stav opotřebenění válců. Toleranční odchylky nám ukazují průběh válcování a stav jednotlivých válců po průchodech drátů. V případě zjištění odchylky z tolerančního pole musíme zastavit výrobu a zkontrolovat stav válců. Tato metoda měření je velice přesná a velmi podrobně vypovídá o stavu probíhající výroby.

U hotovných válců se sleduje vliv chlazení na životnost válců. Nutnost zjistit účinnost chlazení na životnost válců se vyhodnocuje množstvím odválcovaných tun drátu na válec. Každý válec je evidovaný pod svým pořadovým číslem. Toto pořadové číslo je evidováno po celou dobu životnosti válců. Při prověřování účinnosti chlazení bylo vytipováno 2000 ks válců, které se podrobily kontrole na délku životnosti. U těchto válců se měřila vytiženost vyrobeného drátu k poměru na jejich životnosti. Pracovní válce stoliček mají rozměry od \varnothing 159 mm u nových a nejnižší možný rozměr je \varnothing 143 mm po přebroušení. Válce se po každé výrobní kampani demontují a kontroluje se stav opotřebenění. Opotřebené válce se musí znovu opravit broušením na speciálních bruskách. U sledovaného typu válců bylo vyrobeno v průměru cca 40 000 tun odválcovaného materiálů na válec.

Při vyhodnocení všech 2000 ks válců bylo zjištěno, že v případě používání nového chladičského systém bylo docíleno zvýšení životnost válců o 2 000 tun na válec. To znamená, že při použití nového chlazení se prodlouží životnost válce, který je schopný vyrobit o 2000 tun drátů více než při používání starého chladičského systému.

6.8 Zvýšení válcovacích rychlostí

Celý systém chlazení vykazoval dobré výsledky. V návaznosti na dobře zvolený materiál válců ze slinutých karbidů jsem usoudil, že je možné zkusit zvýšit válcovací rychlost celé trati. Celá trať je velmi dobře mapovaná. Jsou hlídány všechny důležité uzly provozu, teplota v hotovných blocích, chlazení válců, toleranční odchylky, drát v průběhu výroby a stav opotřebenosti kalibru ve válcích. Tato změna válcovacích rychlostí mohla proběhnout jen za předpokladu, že budou zachovány všechny požadované vlastnosti konečného výrobku. Celá válcovací trať byla nastavena na vyšší válcovací rychlost. V tabulce č. 6 lze vidět zvýšení válcovacích rychlostí, které byly vyzkoušené ve výrobě.

Tabulka 6 Změny válcovacích rychlostí drátu

Průměr drátu (mm)	Válcovací rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Válcovací rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
5,5	96	103,6
6	95	102,6
6,5	90	97,2
7	80	86,4
7,5	62,8	67,8
8	55,2	59,6
8,5	48,9	52,9
9	43,6	47
9,5	39,1	42,2
10	35,3	38,1
10,5	32	34,6
11	29,2	31,5
11,5 - 12,5	26,7	28,8
13 - 14	20,9	22,5
14,5 - 16	15	16,2
16,5 - 20	11	12

Po provedení změny rychlosti byl drát podroben kontrole ve zkušebně. Byly provedeny všechny požadované výrobní zkoušky. Zvýšení válcovacích rychlostí neovlivnilo kvalitu drátů. Tento proces, při kterém byly zvýšeny válcovací rychlosti, potvrdil možnost zvýšení odválcovaného materiálu na válcovací trati.

6.9 Ekonomické vyhodnocení a přínos projektu

V posledním období dochází k rozmachu celosvětového průmyslu. Na tento trend reagovaly společnosti tím, že zavádějí nové technologie do svých výrob. Tím se jejich produkty stávají zárukou světové kvality. Je zcela pochopitelné, že hlavní důraz je kladen na přesnost výroby, neboť sebemenší odchylky od požadovaného stavu činí produkt neprodejný a nepoužitelný pro daný účel. Návrh nové technologie vychází z politiky jakosti TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN a.s., a také ze strategických cílů pro příštích pět let v klíčových oblastech společnosti. Nové chladící segmenty jsou důsledkem inovačních činností v rámci chlazení válcovací stolice kontidrátové tratě.

Společnost TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s. se problematikou chlazení válců zabývá již velmi dlouho. S příchodem nových revolučních technologií se požadavky na kvalitu konečného produktu podstatně zpřísnily, což se dotklo i výroby drátu. Neefektivní chlazení válcovací stolice se tak projevuje právě v nekvalitě výrobků. TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s. se považují za inovativní společnost, která novým chladícím systémem realizoval významně technicky vylepšený proces výroby drátu. Jedná se o společnost, která se inovativním činnostem soustavně věnuje a považuje to za důležitý prvek svých podnikových strategií. Vše se děje s cílem zvyšování kvality svých výrobků a zvýšení efektivity výroby nových produktových řad i výrobních technologií. V rámci inovačních činností je kladen důraz i na ochranu životního prostředí.

Ve společnosti TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY a.s. se ročně vyrobí 820 tisíc tun válcovaného drátu. Výroba probíhá na dvoužilové trati se zvýšenou kapacitou, rozšířeným sortimentem výroby. K vyrobení takového objemu drátu je zapotřebí cca 550 ks válců ze slinutých karbidů za rok. Tyto válce jsou provozovány pouze v hotovných blocích. Celkové náklady na tyto válce se pohybují kolem 10 mil. Kč za rok.

Nové chlazení dokázalo zvýšit životnost u sledovaných válců v průměru o cca 2000 - 2200 tun drátu. V případě, že na jedné žíle v hotovných blocích máme 20 ks válců, které odválcují o 2000 tun drátu více, můžeme rovněž říct, že se jedná o ekonomické úspory.

Další úspory nastávají při výměně opotřebených válců za nové. Nové chlazení snižuje počet odstávek na trati. Vzhledem k tomu, že životnost válců se zvýšila, není nutná tak častá výměna. Výměny probíhají pravidelně na každé žíle tak, aby nebyl zastaven provoz celé tratě, to probíhá cca po 1000 tunách drátu. Snížení počtu odstávek na trati zvyšuje množství vyrobeného materiálu. To přináší vyšší produktivitu práce. Vyčíslená úspora válců při použití nového chladicího segmentu oproti segmentu starému je obsažena v tabulce 7.

Tabulka 7 Vyčíslená úspora válců při použití nového chladicího segmentu

Počet stoliček hotovního bloku	Počet válců stoliček	Počet válců (ks/rok)	Množství vyrobených kt/rok	Celková cena/rok
Starý typ chlazení				
1 stolička	2	42	840 kt/rok	756 000,00 Kč
10 stoliček	20	420	840 kt/rok	7 560 000,00 Kč
Nový typ chlazení				
1 stolička	2	40	840 kt/rok	720 000,00 Kč
10 stoliček	20	400	840 kt/rok	7 200 000,00 Kč
Celkem úspora				360 000,00 Kč

Dalším přínosem je úspora chladicí vody. Provozní náklady na vodu jsou při chlazení nesmírně důležité. Při tak velkém odběru vody, jaký je na válcovací trati, bylo použití trysek dobrým řešením. V tryskách je množství chladicí vody dobře regulovatelné, kdy při nastavení požadovaného tlaku jsou trysky schopné dodržet nastavený průtok vody. Nutnost dosáhnout stálého chlazení a možnost snížení odběru vody na jednotlivých hotovných blocích se dokonale osvědčilo. Odběr vody v tryskách je mnohem menší než odběr vody, které poskytovaly válcové otvory bez možnosti regulace. Tlak v tryskách umožnil dosáhnout velkého průřezu vodního sloupce. Při používání nového chlazení bylo sníženo průtokové množství vody na jeden válec o cca $60 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ vody. Při provozování deseti stoliček a chlazení dvaceti válců je celkové snížené průtokové množství vysoké.

Snížení průtokového množství v hotovných blocích:

- na jedné stoličce je snížené průtokové množství: 120 l/min,
- na jedné stoličce je snížené průtokové množství: 7200 l/hod,
- na jedné stoličce je snížené průtokového množství: 172 800 l/den.

Ekonomický přínos spojený se sníženým průtokovým množstvím vody je složitě vyčíslitelný, protože chladicí systém je uzavřený okruh. Přesto nelze tento fakt opomenout, neboť svou měrou přispívá k omezování negativních dopadů provozování. Součástí environmentální politiky TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN a.s. je dlouhodobá koncepční práce a shoda veškerých výrobních zařízení s nejlepšími dostupnými technikami a technologiemi. Jednou ze zásad a pilířů strategického rámce je efektivní využívání a rovněž snižování spotřeby surovin a energie. Rozvoj výzkumné činnosti podporuje minimalizaci dopadů výroby na životní prostředí.

Recirkulace vody má vliv na snížení množství povrchové přídavné vody potřebné k výrobnímu programu a následně i tedy na snížené množství odpadních vod. Úspora potřebné povrchové přídavné vody v roce 2011 oproti roku 2006 je o 18,85% a množství odpadních vod se ve stejném období snížilo o 32,29%, viz tab. 8.

Tabulka 8 Údaje k recirkulaci vod

Rok	Množství odpadní vody (m ³ /rok)	Množství přídavné povrchové vody (m ³ /rok)
2006	6 384 551	12 267 112
2008	5 004 735	12 145 633
2011	4 323 082	9 954 435

Zamyslíme-li se dále nad tím, co nám nový systém chlazení přinese, nemůžeme brát v potaz jen vyčíslitelné úspory, ale i ty, co lze obtížně vyčíslit a mimo jiné i prezentaci společnosti vůči svému okolí. Kromě úspor na vodě a použitých válcích v chladicím zařízení můžeme počítat se snížením elektrické náročnosti zařízení chladicích trysek, kdy je potřeba nižší výkon čerpadel a samotný vodovodní řád je nastaven tak, aby docházelo k úspoře vody. S menší frekvencí výměny válců

je propojeno snížení spotřebovaných maziv při výměnách a také snížení pracovní náročnosti při výměně a opravách zařízení hotovni stolice, která byla při používání starého systému chlazení. S tím související náklady příležitosti nám udávají, kolik uspoříme, pokud pracovníci zabývající se výměnou či opravou válců, se budou v uspořeném čase věnovat opravám dalších linek, které mohou být v danou chvíli v poruše a dochází tak k velkým ztrátám společnosti z důsledku zastavené výroby.

Nový systém chlazení nám také díky snížení počtu výměn válců zvýší hodnotu celkového využití stroje a to díky navýšení ukazatele dostupnosti stroje. Zvýšení ukazatele využití stroje společnosti pomáhá zvyšovat prestiž na úroveň nejlepších světových podniků ve využití svých zdrojů. Není to však jediný ukazatel, který nám prestiž zvýší, ale při prezentaci ekologického působení na naše okolí je pro nás velmi významným prvkem to, že dochází ke snížení odběru vody z prostředí, jak jsem již dříve poznamenal, ke snížení materiálové náročnosti na válce, a tím pádem i ke snížení ekologické stopy našich výrobků.

Celý projekt chlazení byl navržen jako zlepšovací návrh. Na základě úspor a účinnosti chlazení byl schválen a oceněn jako velký přínos společnosti TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s.

7 ZÁVĚR

Problematika výroby drátů zahrnuje celou škálu technických problémů. Uplatňuje se zde mnoho odvětví výroby - chemické inženýrství, měření a regulace technologických procesů chlazení, diagnostika a v neposlední řadě strojní inženýrství, řešící jednotlivá strojní zařízení počínaje konstrukcí, výpočty parametrů chlazení, proudění vody, návržení chladících trysek.

Ve své práci jsem popsal technologický proces výroby drátu, přičemž jsem se zaměřil na detailní rozbor chlazení v hotovném bloku. Materiál procházející přeměnou tváření v hotovném bloku je podroben vysokým teplotním procesům, při kterých dochází k strukturálním změnám. Válce, které jsou zodpovědné za konečnou kvalitu výroby, jsou vystavovány externím teplotním gradientům, které ovlivňují proces válcování. Odstranění teplotních gradientů se snažím dosáhnout pomocí nového chladícího segmentu.

Nový chladící segment, který byl navrhnout a v praxi odzkoušen, vycházel z poznatků, které jsem získal při vyhodnocování jednotlivých trysek za pomoci fa. Lechler. Správné umístění trysek, úhly nastavení rozstříku a neposlední řadě správná vzdálenost rozstříku má pozitivní vliv na efektivní chlazení hotovných válců, a tím na jejich životnost a spolehlivost. Byla rovněž snížena spotřeba vody. Nový softwarový program umožňuje vyhodnocovat kvalitu drátů, a tím se zlepšila spolehlivost válcovací tratě. Na základě těchto výsledků jsem přistoupil ke zvýšení válcovacích rychlostí a tím se snažil dosáhnout větší produktivity práce. Zvýšená rychlost mi umožní vyzkoušet válcování menších průměrů drátu při stejných provozních časech. Dále se objevuje otázka, zda celý systém chlazení nenastavit plně automaticky tak, aby reagoval na změny teplot v hotovných blocích a byl schopen se automaticky přenastavit a tím lépe ovlivňovat teplotní rozmezí v hotovných blocích. Regulace je však otázkou, zda teplota v hotovném bloku dovolí nainstalovat teplotní čidla a zda celý proces válcování nebude příliš ekonomicky drahý. Tento sofistikovaný systém je však natolik složitý, že by to mělo být tématem dalšího rozvoje dané problematiky a to buď komplexně v rámci další disertační práce, nebo z pohledu vědy a výzkumu v rámci habilitačních prací. Výsledky mé soustavné práce jsou využity v praxi a posloužily k technickému rozvoji válcování drátu a ke zvýšení efektivity výroby zmíněného produktu.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma výrobního toku	9
Obrázek 2 Tavba oceli v kyslíkové konvertorové ocelárně	9
Obrázek 3 Blokované kontilití	10
Obrázek 4 Kontijemná trať.....	12
Obrázek 5 Kontijemná trať.....	13
Obrázek 6 Stolička hotovního bloku	15
Obrázek 7 Technický výkres kalibračního válce	17
Obrázek 8 Proces přípravy prášků a výroby slinutých karbidů	19
Obrázek 9 Závislost měrné hmotnosti (hustoty) a součinitele délkové roztažnosti pro rozdílné teplotní intervaly na hmotnostním procentu obsahu Co	22
Obrázek 10 Závislost relativní tvrdosti na teplotě a závislost tvrdosti na hmotnostním procentu obsahu kobaltu pro rozdílné zrnitosti slinutých karbidů.....	24
Obrázek 11 Závislost relativní pevnosti v tlaku na teplotě a závislost pevnosti v tlaku na hmotnostním procentu obsahu kobaltu, pro rozdílné zrnitosti slinutých karbidů ..	24
Obrázek 12 Deformace během válcování.....	30
Obrázek 13 Délka deformační zóny	32
Obrázek 14 Vliv teploty na nové válce vyrobené s vyšším obsahem karbidu wolframu a jemnější zrnem	34
Obrázek 15 Plastické deformace kovu při vstupu do otáčejících válců	35
Obrázek 16 Vliv teploty na deformace	38
Obrázek 17 Závislost pevnosti v tlaku na teplotě.....	38
Obrázek 18 Tepelná vodivost	40
Obrázek 19 Zničený váleček hotovního bloku	40
Obrázek 20 Zničený válec vlivem trhlin	42
Obrázek 21 Rychlost koroze.....	45
Obrázek 22 Chladící segment hotovního bloku od společnosti SMS MEER	47
Obrázek 23 Chladící segment společnosti SMS MEER	49
Obrázek 24 Celkové rozložení kapaliny	55
Obrázek 25 Tryska s plochým rozstříkem.....	56
Obrázek 26 Tryska s rozstříkem plného kužele.....	57
Obrázek 27 Řez axiální trysky s rozstříkem plného kužele.....	58

Obrázek 28 Šachovité uspořádání trysek.....	58
Obrázek 29 Čtvercové uspořádání trysek.....	59
Obrázek 30 Tangenciální trysky s rozstříkem plného kužele.....	60
Obrázek 31 Axiální trysky s rozstříkem plného kužele.....	61
Obrázek 32 Axiální trysky s rozstříkem plného kužele.....	62
Obrázek 33 Výsledný rozptyl paprsku trysky s plochým rozptylem	63
Obrázek 34 Nový chladící segment upevněný na stoličce hotovního bloku	65
Obrázek 35 Nový chladící segment.....	66
Obrázek 36 Rozmístění na chladícím segmentu.....	67
Obrázek 37 Ideální povrchová teplota válců.....	68
Obrázek 38 Popis efektivního a neefektivního chlazení válců	69
Obrázek 39 Celkový výpočtový model.....	71
Obrázek 40 Rozvod chladící kapaliny.....	72
Obrázek 41 Software řídící chlazení kapaliny ve válcovací trati.....	72
Obrázek 42 Model chlazení	73
Obrázek 43 Model chlazení po jedné otáčce.....	75
Obrázek 44 Teplotní pole po dvou otáčkách	76
Obrázek 45 Teplotní pole po třech otáčkách	77
Obrázek 46 Teplotní pole po čtyřech otáčkách.....	77
Obrázek 47 Teplotní pole na konci simulace	78
Obrázek 48 Časový průběh teplot bodu 1820 po celou dobu simulace	79
Obrázek 49 Časový průběh teplot bodu 1820 a 1762 po první otáčce při simulaci ..	80
Obrázek 50 Časový průběh teplot bodu 1820 v poslední otáčce simulace	81
Obrázek 51 Doporučené množství vody na stoličkách	82
Obrázek 52 Hlavní okno dialogu pro zadávání parametrů chlazení spojitě trati pro válcování drátů	83
Obrázek 53 Protokol kvality	84

Seznam tabulek

Tabulka 1 Popis schéma výrobního toku	8
Tabulka 2 Charakteristika kontidrátové tratě	13
Tabulka 3 Údaje k obrázku 19	41
Tabulka 4 Množství chladící vody	42
Tabulka 5 Přehled značek válců	43
Tabulka 6 Změny válcovací rychlosti	86
Tabulka 7 Vyčíslená úspora při použití nového chladícího segmentu	88
Tabulka 8 Údaje k recirkulaci vod	89

Seznam použité literatury

- [1] BOCANEGRA-BERNAL, M. H. Hot Isostatic Pressing (HIP) Technology and its applications to metals and ceramics. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*. 39/2004, s. 6399 - 6420. ISSN 0022-2461.
- [2] BROOKES, K., How gradient hardmetals function. *Metal Powder Report*. Volume 62, April 2007, s. 19 - 25. ISSN 0026-0657.
- [3] CERATIZIT S. A., Mamer, Luxemburg. *Main Catalogue*. [online] [cit. 2010-05-26] URL http://www.ceratizit.com/4170_DEA_HTML.php.
- [4] HELEBRANT, F. *Konstrukce velkostrojů a jejich spolehlivost II Provozní spolehlivost*. Ostrava – Mariánské Hory: Montanex, 2005. 89 s. ISBN 80-7225-149-X.
- [5] HORSKÝ. Zpřesnění výpočtových modelů tepelných procesů: Experimental study of Nozzle Cooling in Continuous Casting. In: *International Conference of Billets*. Třinec, 1997, s. 11-24.
- [6] CHABRETOU, V., MISSIAEN, J. M., Analysis of the evolution of the grain size distribution in WC – Co sintered materials with random set models. *Materials Science and Engineering A*. 328/2002, s. 291 - 296. ISSN 0921-5093.
- [7] LENFELD, P. *Technologie II*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita Liberec, 2005. 110 s. ISBN 80-737-2020-5.
- [8] LATOCHA, R. *Chlazení válcovací stolice v TŽ, a.s.* Ostrava: VŠB- TU, Fakulta strojní, 2007. 53 s.
- [9] POKORNÝ, A. *Hutní tvářecí stroje*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1987. 328 str.
- [10] SANDVIK AB, Sandviken, Sweden, *All about Cemented Carbide* [online] URL <<http://www.allaboutcemented-carbide.com>>.
- [11] MIKEŠ, V., TMĚJ, J. *Teorie tváření*. Liberec: VŠST Liberec, 1990. 177 s. ISBN 80-7083-011-5.
- [12] DĚDEK, V., SOMMER, B., ŽÍDEK, M. *Tváření ocelí*. Praha: SNTL, 1988. 320 s.

- [13] Technické materiály a prospekty firem Ceratizit, Iscar, Kennametal, Korloy, Mitsubishi, Pramet Tools, Sandvik Coromant, Seco, Walter, Widia.
- [14] www.hennlich.cz
- [15] www.lechler.cz
- [16] www.valcovna-nh.cz
- [17] www.sandvik.cz
- [18] www.tztrinec.cz

Seznam vlastních prací

- [1] LATOCHA, R. Aplikace měření rozměrů elektronicko-optickou metodou. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení DIAGO 2010. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010.
- [2] LATOCHA, R. Zavádění technologií systému údržby. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení DIAGO 2010. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010.
- [3] FRIES, J., LATOCHA, R. Chladící segment pro testování vlivu chlazení na rychlost válcování. 2011.
- [4] LATOCHA, R. Zavedení nové technologie výroby drátu. Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení DIAGO 2010. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010.