

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta materiálově - technologická

Katedra tváření materiálu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Analýza nehomogenity mechanických vlastností žebírkového drátu z oceli
B500B po válcování za tepla a po natažení za studena

Analysis of non-homogeneity of mechanical properties of ribbed wire from
B500B steel after hot rolling and after cold stretching



Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Molnár**

Studijní program: B2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor: 2109R038 Moderní metalurgické technologie

Téma: **Analýza nehomogenity mechanických vlastností žebírkového drátu z oceli B500B po válcování za tepla a po natažení za studena**
Analysis of non-homogeneity of mechanical properties of ribbed wire from B500B steel after hot rolling and after cold stretching

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Požadavky norem na žebírkový drát
3. Zpevnování oceli při tváření za studena
4. Popis technologie válcování za tepla a cold stretching
5. Návrh experimentu, popis experimentu a cíle práce
6. Diskuse a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ZHENHAI, G. *Principles of Reinforced Concrete*. Elsevier Inc., 2014.
- [2] DIN 488-1: *Betonářská ocel – část 1: jakosti ocelí, vlastnost, značení*. Normalizační výbor Eisen und Stahl a Normalizační výbor Stavebnictví, 2009.
- [3] DIN 488-3: *Betonářská ocel – část 3: betonářská ocel ve svitcích, drát do výztuží*. Normalizační výbor Eisen und Stahl a Normalizační výbor Stavebnictví, 2009.
- [4] KLEM, M., G. WAGENFUHRER a B. WAGNER. Der gereckte Betonstahl – ein einfaches Verfahren zur normgerechten Veredelung. *Draht*. 1993, **44**, 263-266.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.**

Konzultant bakalářské práce: doc. Ing. Richard Fabík, Ph.D.

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2019

prof. Ing. Ivo Schindler, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|--|
| 1. Titulní list | 6. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |
| 2. Originál zadání BP | 7. Obsah BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Textová část BP |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Seznam použité literatury |
| 5. Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby | 10. Přílohy |

- ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.
- ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.
- ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP.
- ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP.
- ad 5) V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právnickými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.
- ad 6) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.
- ad 7) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.
- ad 8) Textová část BP obvykle zahrnuje:
- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
 - Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 10).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 9) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 10) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta materiálově - technologická
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty materiálově – technologické, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2018/2019.

Ostrava 12. 11. 2018


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
Děkanka Fakulty materiálově – technologické
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

24.4. 2019



.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

PROHLÁŠENÍ ZÁSTUPCE SPOLUPRACUJÍCÍ PRÁVNICKÉ NEBO FYZICKÉ OSOBY

Bakalářská práce vychází ze spolupráce s právnickou/fyzickou osobou, která si nepřeje být zveřejněna.

Zástupce spolupracující osoby souhlasí se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských studijních programech VŠB -TU Ostrava.

Datum: 25.4.2019



.....
Podpis zástupce spolupracující osoby

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval mému konzultantovi práce doc. Ing. Richardu Fabíkovi, Ph.D a doc. Ing. Miroslavu Gregerovi, CSc. za odborné vedení a pomoc, cenné rady a připomínky, ochotu a čas, který mi poskytovali po celou dobu zpracovávání bakalářské práce. Moje poděkování patří také mé ženě Terezií Molnárové a mé rodině za trpělivost a podporu během tvorby této bakalářské práce i po celou dobu mého studia. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Ing. Petru Holušovi za vizuální úpravu této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou nehomogenity mechanických vlastností žebírkového drátu z oceli B500B po válcování za tepla a po natažení za studena. V rámci provozního experimentu byly získány vzorky drátu po válcování za tepla (30 vzorků) a po natažení za studena (18 vzorků). Tyto vzorky byly použity pro zkoušku tahem. Získali jsme tak hodnoty pevnosti, meze kluzu a tažnosti, které charakterizují změny vlastností drátu po jeho délce a to po válcování za tepla a po následném natažení za studena. Analýzou těchto hodnot jsme prokázali, že hlavní příčinou nehomogenity mechanických vlastností žebírkového drátu po jeho délce je způsob ukládání závitů drátu na řetězový dopravník kontidrátové tratě v ArcelorMittal Ostrava (KDT AMO). Poměrně překvapivým zjištěním pak je, že následné natažení za studena nehomogenitu vlastností dále zvýrazní.

Klíčová slova

Žebírkový drát, jakost oceli B500B, válcování za tepla, natahování za studena, zpevňování oceli, normální rozdělení pravděpodobnosti, rozložení vlastností po délce drátu

Abstract

This bachelor thesis deals with analysis of non-homogeneity of mechanical properties of ribbed wire from B500B steel after hot rolling and after cold stretching. In the operating experiment, wire samples were obtained after hot rolling (30 samples) and after cold stretching (18 samples). These samples were used for the tensile test. We obtained value of ultimate tensile stress, yield strength and elongation, which characterize changes in wire properties over its length after hot rolling and subsequent cold stretching. By analysing these values, we have shown that the main cause of the inhomogeneity of the mechanical properties of the ribbed wire over its length is the method of laying the wire threads on the chain conveyor of the wire rod line in ArcelorMittal Ostrava (KDT AMO). A rather surprising finding is that the subsequent cold stretching increase mechanical properties inhomogeneity.

Keywords

Ribbed wire, B500B steel quality, hot rolling, cold stretching, steel work hardening, normal distribution of probability, distribution of properties along the length of the wire

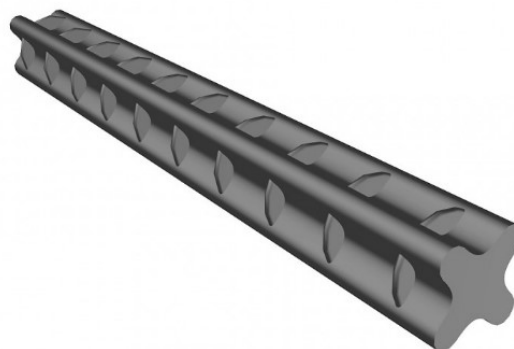
Obsah

1	Úvod.....	5
1.1	Válcování za tepla bez dodatečného zpracování (řízené tvářeni).....	6
1.2	Válcování za tepla s tepelným zpracováním z doválcovací teploty	7
1.3	Válcování za tepla a natažení za studena (cold stretching)	9
1.4	Tvářením za studena (tažením nebo válcováním za studena)	9
2	Požadavky norem na žebírkový drát	11
2.1	Značení betonářských ocelí	11
2.2	Značky ocelí a požadavky na mechanické vlastnosti	11
2.3	Přehled norem pro žebírkový drát ve svitku.....	12
2.4	Příčná žebírka	13
2.5	Značení výrobce.....	14
3	Zpevňování oceli.....	15
3.1	Způsoby zpevnění ocelí	15
3.1.1	Napětí potřebné k překonání meziatomárních sil.....	15
3.1.2	Zpevnění tuhého roztoku pomocí substitučních a intersticiálních legujících prvků.....	15
3.1.3	Dislokační zpevnění	16
3.1.4	Účinek hranic zrn a subzrn.....	16
3.1.5	Zpevnění vlivem jiných fází.....	17
3.1.6	Precipitační zpevnění	18
3.2	Mechanismy plastické deformace při tvářeni za studena	19
3.2.1	Mechanismus skluzu	20
3.2.2	Dvojčatění	22
3.3	Deformační zpevnění při tvářeni za studena a za tepla	22
4	Popis technologie válcování za tepla a natahování za studena (cold stretching).....	24
4.1	Válcování za tepla.....	24

4.2	Natahování za studena (Cold stretching).....	25
4.2.1	Schéma a popis linky	25
4.2.2	Nastavení výrobních parametrů stroje pro natahování drátu (pro výrobu oceli značky B500B dle normy DIN 488)	30
4.2.3	Odběr vzorků a zkoušení.....	31
5	Cíle práce	32
5.1	Analýza mechanických vlastností po délce drátu ve středu svitku.....	32
5.2	Vliv omezeného chlazení na začátku a na konci svitku	32
6	Návrh experimentu	33
6.1	Použitý materiál	33
6.2	Popis experimentu	33
7	Diskuze výsledků	36
7.1	Drát válcovaný za tepla	36
7.1.1	Data a popisná statistika.....	36
7.1.2	Analýza trendu ve středu svitku.....	42
7.2	Drát válcovaný za tepla s následným natažením za studena	48
7.2.1	Data a popisná statistika.....	48
7.2.2	Analýza trendu ve středu svitku.....	51
7.3	Analýza vlivu cold stretchingu na rozložení naměřených hodnot meze kluzu	55
7.3.1	Vliv cold stretchingu na průměrné hodnoty.....	55
7.3.2	Vliv cold stretchingu na rozptyl.....	56
8	Závěr.....	58
	Seznam použitých zdrojů.....	60

1 Úvod

Nároky zákazníků na mechanické vlastnosti žebírkového drátu se neustále zvyšují. Na počátku 19. století se používaly dráty a tyče vyrobené ze svářkové a plávkové oceli. Svářková ocel měla mez pevnosti v tahu 330 – 400 MPa a tažnost 12 – 25 %. Velký obsah zaválcované strusky způsoboval delaminaci materiálu a dnes se již nevyrábí. Plávková ocel byla pevnější a měla větší houževnatost než ocel svářková. Ve 30. letech minulého století se začaly používat tyče z uhlíkové oceli válcované za tepla podle ČSN 1090 s mezí kluzu R_e 230 MPa. Dále se používala celá řada výztuží např. výztuže válcované za tepla s hladkým povrchem, za studena zkrucované nebo nesvařitelné ISTEK 10 472. V Poldi Kladno se od 30. do 50. let minulého století vyráběly výztuže typu ROXOR 10 512 nebo 10 513 s mezí kluzu $R_{p0,2}$ až 380 MPa. V dnešní době se na stavbách už nepoužívá. Hlavními znaky těchto výztuží byl čtyřlístkový průřez s příčnými žebírky, který je znázorněn na obr. 1.



Obr. 1 Betonářská výztuž typu ROXOR [1]

Na počátku 80. let se začaly používat svařitelné betonářské oceli, které mají lepší mechanicko-technologické vlastnosti [1].

V následující **tabulce 1** jsou uvedeny jakosti betonářských ocelí, které jsou používány v současnosti a jejich mechanické vlastnosti.

Tabulka 1 Jakosti betonářských ocelí používané v současnosti s rozdělením podle jejich mechanických vlastností [1]

ČSN EN 10027 - 1	R_e	A_{gt}	$R_m / R_{p0,2}$
B420B	420MPa	5,0 %	1,08
B500A	500 MPa	2,5 %	1,05
B500B	500 MPa	5,0 %	1,08
B550A	550 MPa	2,5 %	1,05
B550B	550 MPa	5,0 %	1,08

Způsob výroby svařitelných betonářských ocelí:

- Válcováním za tepla bez dodatečného zpracování

- Válcováním za tepla s tepelným zpracováním z válcovací teploty
- Válcováním za tepla a natažením za studena (cold stretching)
- Tvářením za studena (tažením nebo válcováním za studena)

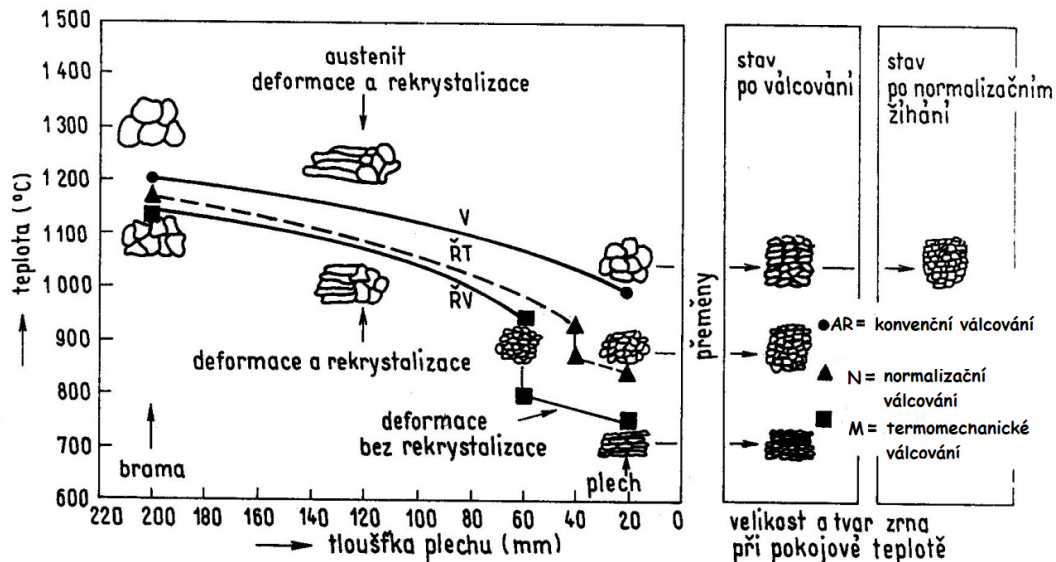
1.1 Válcování za tepla bez dodatečného zpracování (řízené tvářením)

Znamená, že výrobní podmínky, jako jsou teplota, deformace, deformační rychlost a chemické složení se snažíme ovlivnit tak, abychom dosáhli požadované co nejjemnější struktury, což má kladný vliv na pevnost a plastičnost materiálu. Uvnitř materiálu mohou vznikat vnitřní trhliny, pórovitost a segregace, které jsou výsledkem procesu tuhnutí. Všechny oceli tedy většinou procházejí válcováním za tepla, aby byl výrobek protvářenější a změnil svůj tvar. Snížení plochy příčného průřezu předvalku vstupujícího do válcovací stolice musí být dostatečný pro svařování vnitřních vad a zlepšení homogenity v produktu [2, 3].

Na **obr. 2** můžeme porovnat výsledné velikosti zrna po normalizačním válcování s řízením průběhu dynamické rekrytalizace N, termomechanickém válcování M a konvenčním (běžném, neřízeném) válcováním AR.

- Konvenční válcování – opakovanou statickou rekrytalizací, případně fázovou transformaci (překrytalizací) dochází ke zjemňování lící struktury.
- Normalizační válcování - probíhá v teplotní oblasti stabilního austenitu přibližně 50 °C nad Ac3. Transformační proces, je ovlivněn zjemněním austenitického zrna dynamickou rekrytalizací. Úplná rekrytalizace austenitu proběhne před přeměnou austenitu na ferit. Výsledkem je jemnozrná mikrostruktura s pravidelným rozložením feritu a perlitu.
- Termomechanické válcování – je založeno na fázové transformaci silně deformovaného a nezrekrytalizovaného austenitu na ferit. Zrna nové fáze vznikají z vysokého obsahu poruch, které znásobují množství vhodných zárodečných míst. Technologie termomechanického tvářením se skládá z několika etap [4].
 - 1) Předválcování – opakovanou statickou rekrytalizací dochází za vysokých teplot k zjemňování zrna.
 - 2) Prodleva – ochlazování polotovaru na teplotu, kde už nebude mezi úběry probíhat žádná statická rekrytalizace.

- 3) Doválcování – probíhá pod teplotou nulové rekrytalizace nejčastěji těsně nad teplotou A_{r3} .
- 4) Ochlazování – díky nízké teplotě fázové transformace vznikne velké množství zárodků. Výsledkem je velmi jemné feritické zrnno. Při ochlazování může navíc dojít ke zpevňující precipitaci ve feritu [4].

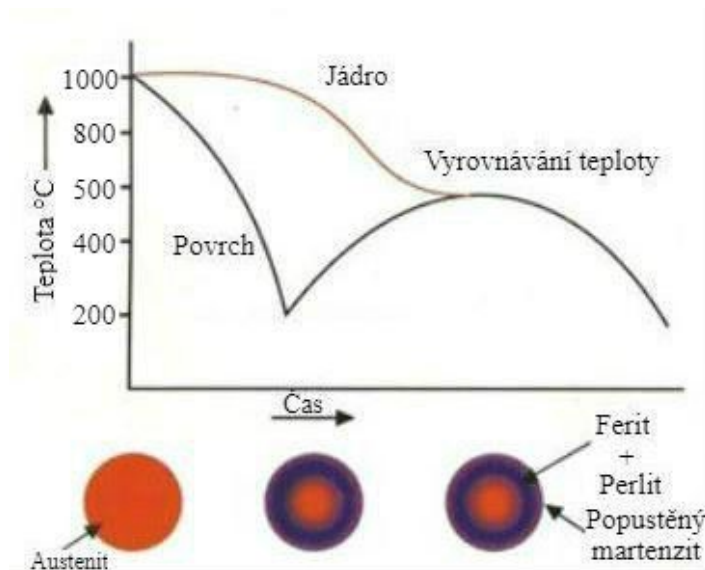


Obr. 2 Schéma postupu normalizačního válcování s řízením průběhu dynamické rekrytalizace N, termomechanického válcování M a konvenčního válcování AR [4]

Vliv prvků jako jsou Nb, Ti a V (obsah v setinách až desetínách hm. %) je velmi důležitý. Úkolem těchto prvků je přibrzdit uzdravovací procesy. Precipitáty brzdí rekrytalizaci při doválcování a zpevňují materiál tím, že zvyšují teplotu nulové rekrytalizace. Nejúčinnější jsou precipitáty do 5 nm, které jsou vyloučené na hranicích subzrn. Za vyšších teplot mají precipitáty vlastnost rychle hrubnout (cca 1000 °C) a ztrácejí brzdící vliv na kinetiku uzdravovacích procesů. Mikrolegury vytvářejí z chemického hlediska karbidy, nitridy a karbonitridy [4].

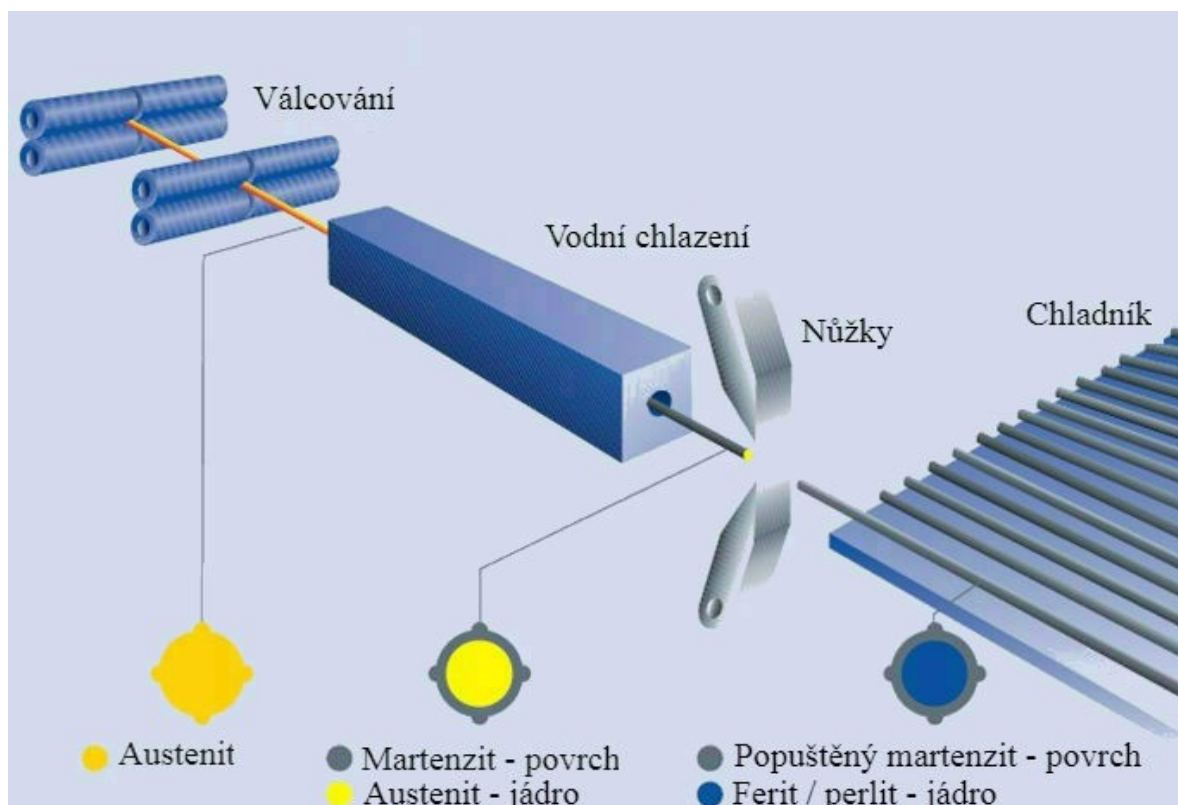
1.2 Válcování za tepla s tepelným zpracováním z doválcovací teploty

Ihned po vyválcování za tepla je vývalek podroben vysokotlakému vodnímu ostříku, který ochladí a transformuje jeho povrch na martenzit. Zakalená povrchová vrstva se popustí vnitřním teplem jádra vývalku. Výsledkem je poměrně měkké tažné jádro (ferit + perlit) se silnou houževnatou povrchovou vrstvou (popuštěný martenzit = sorbid) viz **obr. 3** [2, 3].



Obr. 3 Graf procesu QST znázorňující ochlazovací křivky jádra a povrchu oceli [5]

Tento proces řízeného válcování za tepla s tepelným zpracováním z válcovací teploty se nazývá systém QST (quenching self-tempering). Systém QST a jeho celý průběh je zobrazen na obr. 4.



Obr. 4 Proces QST [2]

1.3 Válcování za tepla a natažení za studena (cold stretching)

Pokud je žebírkový drát natahován za studena a nepřekročí mez kluzu, jeho mechanické vlastnosti se nezmění. V oceli probíhá elastická deformace.

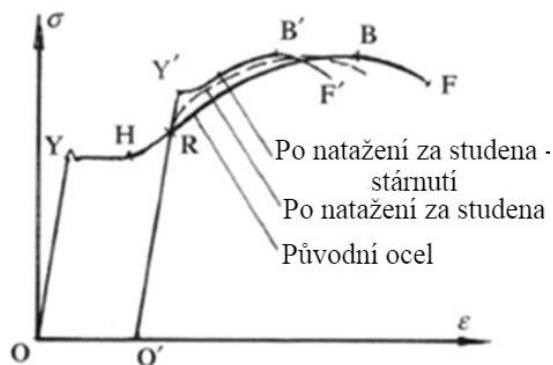
Pokud začne na žebírkový drát působit větší napětí, tak se zvýší deformace a napětí překročí mez kluzu. Tuto křivku charakterizuje navýšení pevnosti a snížení tažnosti. Hlavní mechanické vlastnosti včetně meze kluzu, pevnosti a maximálního prodloužení

žebírkového drátu po natažení za studena, závisí na druhu původní oceli. Obecně platí, že mez kluzu žebírkového drátu po natažení za studena se zvyšuje o 20 – 35 % oproti původní nenatažené oceli, kdy prodloužení výztuže při natažení za studena je zhruba (3 – 5 %). Vlivem deformace za studena dojde k poklesu tažnosti o 30 až 50 %. Pevnost výztuže po natažení za studena se však zvýší jen nepatrně [6].

U křivky O'RY'B'F' znázorněné na **obr. 5** (křivka po natažení za studena a následném precipitačním zpevnění (stárnutí)) se zvýšila pevnost, mez kluzu, a naopak se snížila maximální tažnost. Tato křivka charakterizuje vliv stárnutí na mechanické vlastnosti. Žebírkový drát po natažení za studena je udržována na přirozené teplotě nebo je uměle ohříván. Precipitační zpevnění je užitečné pro zvýšení pevnostních vlastností, ale je také doprovázeno poklesem tažnosti. Různé druhy ocelí potřebují různé procesy stárnutím. Běžná uhlíková ocel v přirozeném prostředí stárne obvykle dva nebo tři týdny. Při vyšších teplotách trvá tento proces kratší dobu. Například stárnutím běžné uhlíkové oceli, která byla po natažení za studena ohřáta na teplotu 100 °C trvá dvě hodiny. Zpevnění nízkolegované oceli, je v přirozeném prostředí velmi pomalé. Ohřevem na teplotu 250 °C po dobu 30 minut, lze stárnutí urychlit [6].

1.4 Tvářením za studena (tažením nebo válcováním za studena)

Po tvářením za tepla se ocel zpracovává tvářením za studena. Za studena se ocel zpracovává buď válcováním, kde se ocel válcuje na kalibrovaných válcích, či tažením, kdy se průměr drátu redukuje průchodem přes průvlak. Oceli se tak dostává požadovaného tvaru a



Obr. 5 Graf napětí – deformace po natahování za studena a deformačním stárnutím [6]

deformačně se zpevňuje. Dráty válcované za studena mají menší tažnost, než dráty válcované za tepla, ale za to mají větší pevnost. Válcování nebo tažení za studena jsou možné pouze v omezeném rozsahu, protože to jsou poměrně nákladná technologie a také musí být dodrženy definované mechanicko-technologické vlastnosti [2].

Tato bakalářská práce se zabývá žebírkovým drátem ve svitcích jakosti B500B, která je vyráběna v ArcelorMittal Ostrava a.s. technologií tváření za tepla a následného natahování za studena (cold stretching).

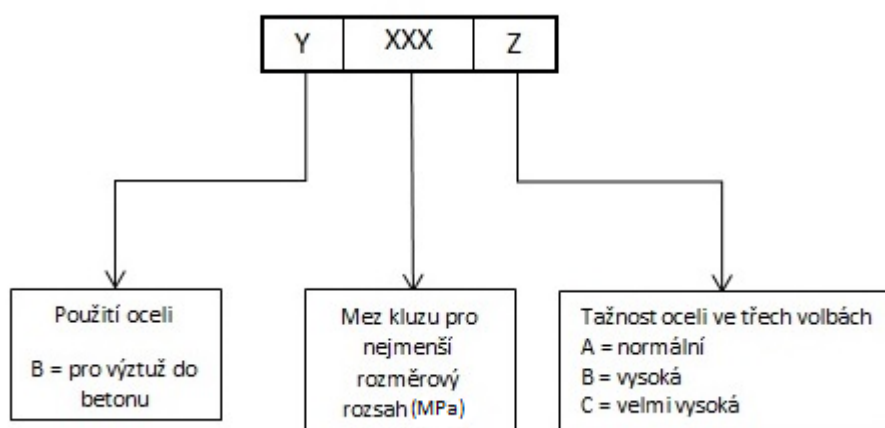
2 Požadavky norem na žebírkový drát

2.1 Značení betonářských ocelí

V systému zkráceného označování ocelí podle EN 10027-1 se používají dva typy značek:

- Značky vytvořené podle použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností.
- Značky vytvořené na základě chemického složení [7].

Na **obr. 6** můžeme vidět systém značení podle použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností.



Obr. 6 Značení oceli podle použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností

V **tabulce 2** můžeme vidět význam nejběžnějších znaků pro značení oceli podle jejího použití.

Tabulka 2 Základní přehled významu znaků k použití oceli [7]

Použití oceli	Konstrukční	Betonářská ocel	Strojní součásti	Tlakové nádoby
První skupina znaků	S	B	E	P

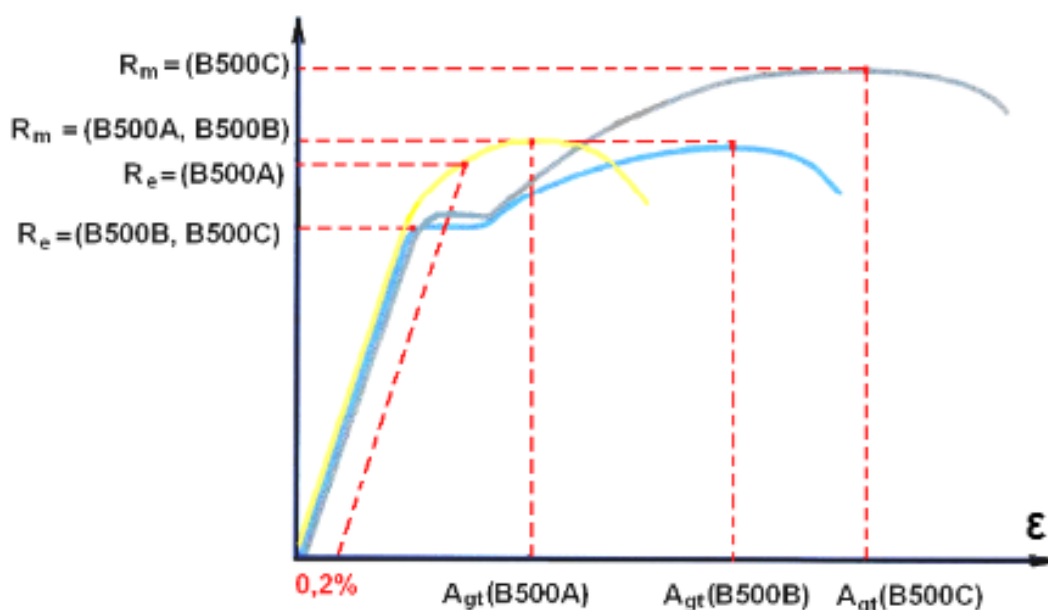
2.2 Značky ocelí a požadavky na mechanické vlastnosti

Existuje mnoho druhů jakosti ocelí a několik mezinárodních norem, které přesně definují jejich mechanické vlastnosti. Např. značka oceli B500B bude mít v každé normě jinou hodnotu meze kluzu či tažnosti. Pro přehlednost uvádím v následující **tabulce 3** jakost oceli B500B a požadavky na její mechanické vlastnosti podle národních norem.

Tabulka 3 Přehled požadavků na minima mechanických vlastností oceli B500B pro drát ve svitku podle jednotlivých norem [7, 8, 9]

B500B	ČSN 42 0139	DIN 488	ÖNORM 4707:2010
R_e	500	525	485
R_m / R_e	1,08	1,08	1,06
A_{gt}	5,0	5,9	4,0

V následujícím **obr. 7** Jsou zobrazeny inženýrské diagramy tahové zkoušky několika druhů jakosti ocelí, které dokumentují rozdíly v jejich mechanických vlastnostech.



Obr. 7 Charakterizuje křivku napětí – deformace, kde můžeme porovnat rozdíly mechanických vlastností z uvedených jakostí betonářských ocelí [10]

2.3 Přehled norem pro žebírkový drát ve svitku

Většina českých i zahraničních firem požaduje dodávat výrobky podle německé normy DIN 488. Pro větší rozsah jsou v **tabulce 4** uvedeny také ostatní normy, které se v České republice nejvíce používají.

Tabulka 4 Přehled nepoužívanějších norem v České republice

Německá norma	Rakouská norma	Polská norma	Česká norma
DIN 488	ÖNORM 4707:2010	PN-H-93200	ČSN 42 0139

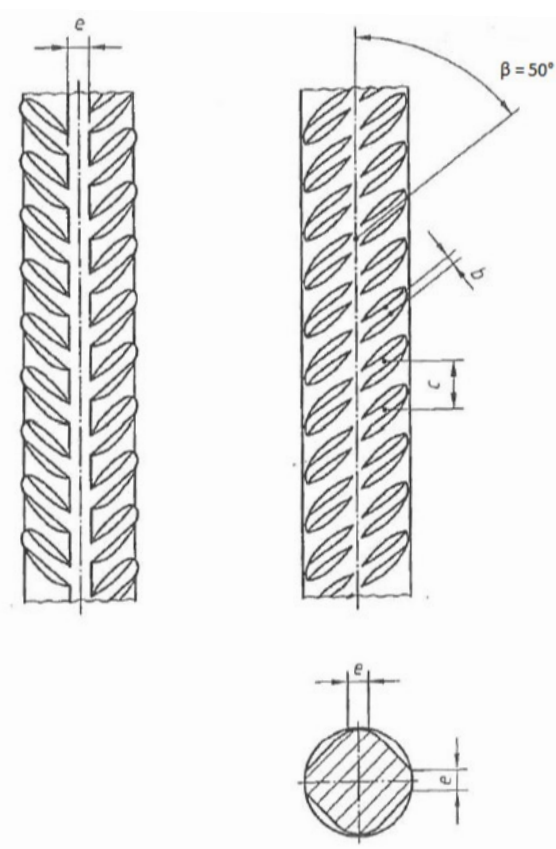
Protože německá norma DIN 488 je nejvíce rozšířená, uvádím v **tabulce 5** rozdělení podle jejich částí.

Tabulka 5 Rozdělení německé normy DIN 488

<i>DIN 488</i>						
DIN 488-1	DIN 488-2	DIN 488-3	DIN 488-4	DIN 488-5	DIN 488-6	DIN 488-7
Druhy, vlastnosti, značení	Tyče pro výztuž do betonu, rozměry a hmotnosti	Zkoušení	Výztužné sítě a výztužné dráty	Zkoušení	Kontrola jakosti	Kontrola jakosti

2.4 Příčná žebírka

Betonářská ocel ve svitcích jakosti B500B dle DIN488-1 s žebírkovým povrchem musí splňovat správný sklon a rozměry žebírek [12]. Na **obr. 8** je znázorněna betonářská ocel B500B se čtyřmi řadami žebírek.



- e – šířka podélných žebírek
- c – rozteč os příčných žebírek
- b – šířka příčných žebírek
- β – sklon příčného žebra k ose tyče [12]

Obr. 8 Betonářská ocel B500B se čtyřmi řadami žebírek [11]

Příčná žebírka musí mít v podélném řezu srpovitý tvar a nesmí navazovat na podélná žebírka. Boky příčných žebírek musí být skloněny o více než 40° a jejich přechod do jádra výrobku musí být zaoblen. Úhel sklonu příčných žebírek k podélné ose výrobku musí být $40^\circ - 70^\circ$. U řad žebírek s proměnnými úhly sklonu, mohou úhly ležet v rozmezí $35^\circ - 75^\circ$ [11, 12].

2.5 Značení výrobce

Betonářská ocel ve svitcích válcovaná za tepla a tvářená za studena tažením musí být opatřena znakem závodu provádějícího tažení. Udělením prohlášení o shodě uznávaným certifikačním místem dostává další zpracovatel betonářské oceli ve svitcích označení pro její zpracování. Označení dalším zpracovatelem není nutné, pokud je betonářská ocel použita bezprostředně a výlučně jím samostatným jako žebírkový drát hotových dílců. Betonářská ocel všech dodávaných tvarů a průměrů musí splňovat požadavky určené v DIN 488 – 1 až DIN 488 – 7. Oceli, které neodpovídají těmto požadavkům, nesmí být označeny za betonářskou ocel podle této normy [7].

3 Zpevnění oceli

3.1 Způsoby zpevnění ocelí

Celkové zpevnění oceli je výsledkem šesti dílčích přírůstků zpevnění, uvedené v následující rovnici.

$$R_{p0,2} = \sigma_z + \sigma_{tr} + \sigma_d + \sigma_t + \sigma_p + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

$R_{p0,2}$ – celkové zpevnění (mez kluzu)

σ_z – základní Pierls-Nabarovo napětí

σ_t – substituční a intersticiální zpevnění tuhého roztoku

σ_d – dislokační zpevnění

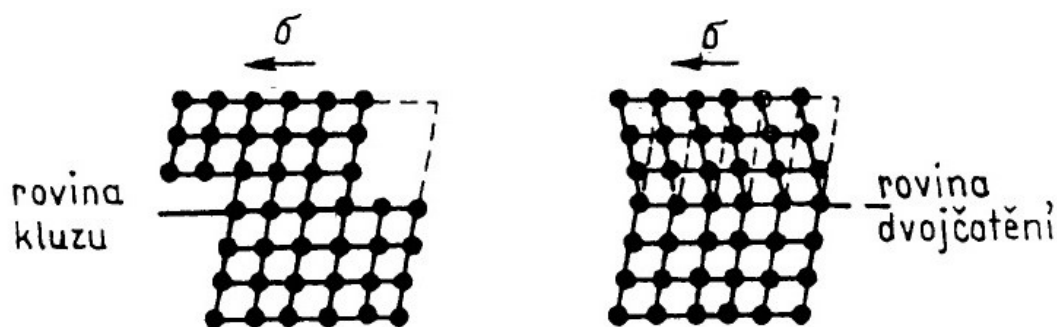
σ_t – zpevnění díky textuře

σ_p – precipitační zpevnění

$\frac{k}{\sqrt{D}}$ – zpevnění vlivem velikosti zrna [13]

3.1.1 Napětí potřebné k překonání meziatomárních sil

Pokud dodáme dostatečné množství napětí, tak dojde k posuvu atomů z rovnovážných poloh mřížky, které je znázorněno na **obr. 9** [13].



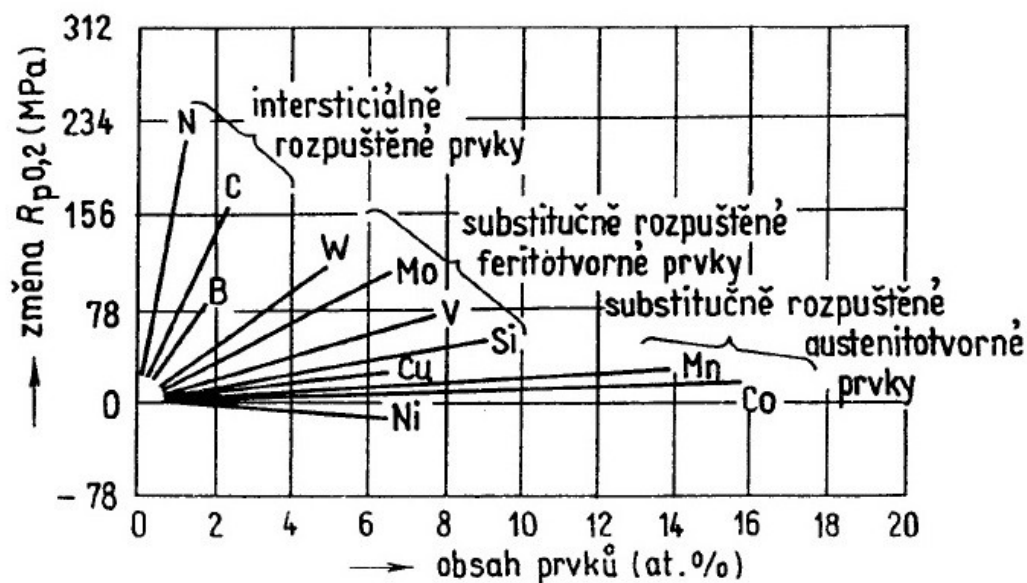
Obr. 9 Posunutí atomů z rovnovážných poloh mřížky po dodání dostatečného množství napětí, které působí na povrch materiálu [13]

3.1.2 Zpevnění tuhého roztoku pomocí substitučních a intersticiálních legujících prvků

Na **obr. 10** si můžeme všimnout prvků, které mají největší vliv na růst meze kluzu. U intersticiálně rozpuštěných prvků má největší potenciál dusík a uhlík. Intersticiálně rozpuštěný prvek znamená, že legující prvek obsahuje atomy s menším poloměrem, než prvek

základní. Atomy přídavného legujícího prvku se v krystalografické mřížce umisťují mezi atomy základního prvku a tím zpevňují materiál [14].

U substitučně rozpuštěných feritotvorných prvků má největší potenciál Wolfram a Molybden a u austenitotvorných Měď a Mangan. Atomy substitučně rozpuštěného legujícího prvku mají podobné elektrochemické vlastnosti a velikost jako atomy prvku základního. V krystalografické mřížce se proto mohou zastupovat [14].



Obr. 10 Změna meze kluzu v závislosti na obsahu legujících prvků v oceli [13]

3.1.3 Dislokační zpevnění

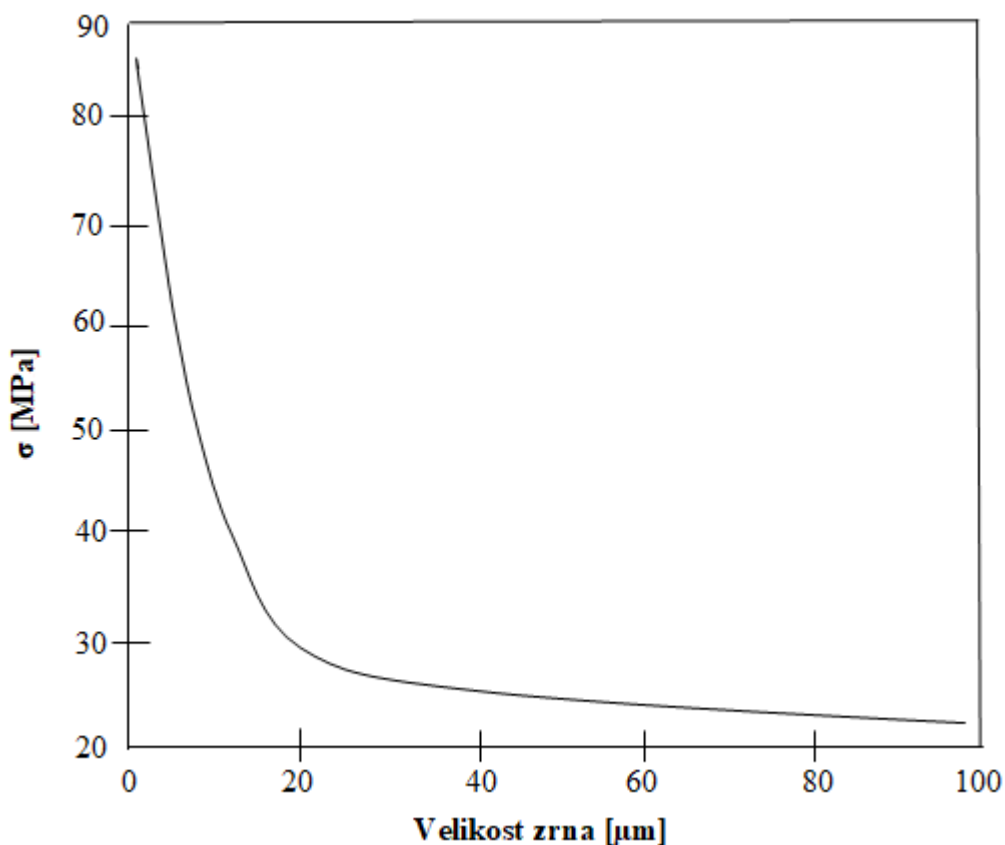
O dislokačním zpevnění se více zmiňují v kapitole 3.2 Mechanismy plastické deformace při tváření za studena.

3.1.4 Účinek hranic zrn a subzrn

Hranice zrn obsahují hodně dislokací, vakancí apod. a navzájem brání okolním dislokacím v pohybu. Chovají se jako nepřekonatelné překážky. Čím vyšší je vnější napětí působící na materiál, tím se zvyšuje počet dislokací na hranicích zrn, které si brání v pohybu a materiál se stává plasticky odolnějším. Plastickou odolnost materiálu nám určuje celková plocha hranic zrn, která se v materiálu nachází. Čím větší plocha hranic zrn v materiálu bude, tím bude větší přirozený deformační odpor materiálu [15].

Hall – Petchovým modelem si můžeme ukázat účinek hranic zrn a tím i velikosti zrna na mez kluzu.

Obr. 11 nám udává vztah závislosti meze kluzu na velikost zrna. Čím menší zrno v materiálu bude, tím větší plocha hranic zrn se bude v materiálu nacházet a tím bude materiál plasticky odolnější [15].



Obr. 11 Závislost meze kluzu na velikost zrna

Hall – Petchova rovnice má tvar:

$$\sigma_K = \sigma_0 + K_y d_z^{-1/2} \quad [MPa] \quad (2)$$

σ_0 – napětí brzdící pohyb nezakotvených dislokací

d_z – střední rozměr zrna

K_y – materiálová konstanta [$N \cdot mm^{-3/2}$]

σ_K – napětí na mezi kluzu [15]

3.1.5 Zpevnění vlivem jiných fází

Zpevnění oceli můžeme dosáhnout také tepelným zpracováním. Tepelné zpracování oceli je postup, kdy ocel v tuhém stavu podrobíme několika teplotním cyklům za účelem dosažení požadovaných vlastností. Existuje několik postupů tepelného zpracování např. kalení či popouštění [16].

Kalením se snažíme docílit zvýšení tvrdosti. Na zvýšení tvrdosti má největší zásluhu obsah uhlíku v oceli. Pokud ocel obsahuje uhlíku málo, nikdy nedosáhneme vysoké tvrdosti. Dobře kalitelné oceli jsou uhlíkové oceli obsahující více než 0,35 % uhlíku. Existuje několik způsobů kalení, jako je např. přerušované kalení, termální kalení, kalení se zmrazováním a další. Nejběžněji používané je martenzitické kalení do studené lázně [16].

Po ohřevu na správnou kalící teplotu nastává plynulé ochlazení nejčastěji do vody. Teplota vody se většinou přibližuje teplotě místnosti. Rozdíl teplot na povrchu a uvnitř tělesa je tím větší, čím větší je součinitel přestupu tepla na povrchu a průměr tělesa [16].

Proces popouštění, jehož cílem je dosáhnout skoro rovnovážného stavu v oceli se skládá z ohřevu na teplotu nižší než A_1 a výdrže na této teplotě. Pak nastává ochlazování vhodnou rychlostí. Postupné zvyšování teploty při prvním stádiu popouštění zakalené oceli, přibližuje ocel rovnovážnému stavu, aby se předešlo tvorbě trhlin po vyjmutí tělesa z kalící lázně [16].

3.1.6 Precipitační zpevnění

Nastává, pokud se přesycený tuhý roztok při ochlazování rozpadá. V případě snižující se rozpustnosti se v materiálu začnou tvořit precipitáty. Jsou to částice druhé fáze, které mají často zcela odlišné fyzikální a chemické vlastnosti a krystalickou strukturu, než částice první hlavní fáze. Precipitující fáze se nebude tvořit přímo, ale bude se postupně přibližovat k struktuře konečné rovnovážné fáze přes několik mezistupňů [13].

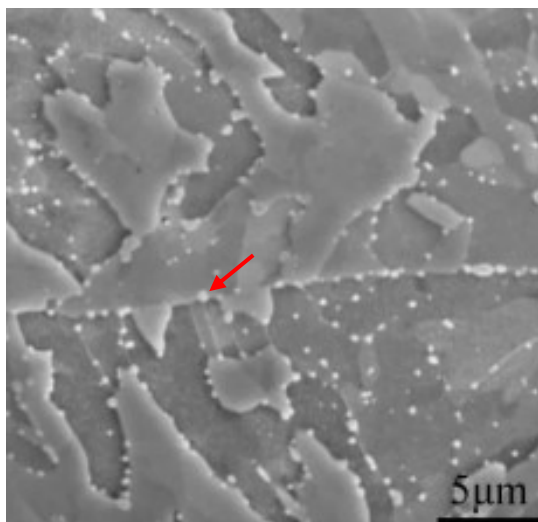
Rozlišujeme tři druhy precipitace:

- 1) Statická
- 2) Dynamická (probíhající během tváření)
- 2) Indukovaná (probíhající po tváření)

Statická precipitace probíhá bez interakce s deformací [17].

Dynamická precipitace probíhá během tváření, zvyšuje deformační odpor a výrazně snižuje plastické vlastnosti. Precipitáty blokují skluzový mechanismus plastické deformace. Výskyt precipitátů se nachází na energicky výhodných místech např. na hranicích zrn a kluzových rovinách. Obsah interstických prvků (C a N) v oceli výrazně ovlivňuje průběh precipitace. Dynamická precipitace bude probíhat tím rychleji, čím větší bude deformace a obsah interstických prvků [13].

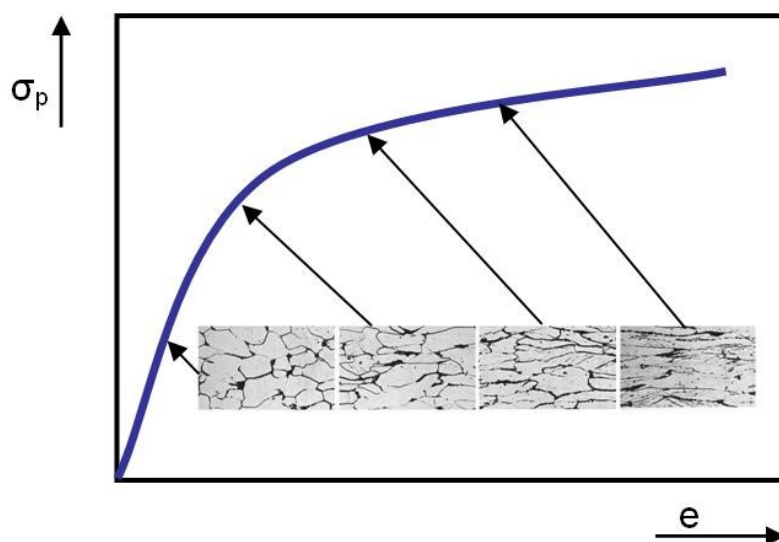
Na **obr. 12** precipitační zpevnění oceli Fe-0,15C-4,0Cr, kde precipitáty jsou umístěny do základního kovu (červená šipka).



Obr. 12 Precipitační zpevnění oceli Fe-0,15C-4,0Cr [18]

3.2 Mechanismy plastické deformace při tváření za studena

Pod pojmem zpevňování oceli za studena si můžeme představit růst deformačního napětí a tvářecích sil při poklesu tvařitelnosti. Zvýší se pevnost, mez kluzu, tvrdost a sníží se plastické vlastnosti jako tažnost a kontrakce. Na **obr. 13** si můžeme všimnout, jak s rostoucím napětím probíhá deformace zrna [18].



Obr. 13 Křivka napětí – deformace, znázorňující deformaci zrna s rostoucím napětím [19]

Všechny kovy mají pravidelně uspořádané atomy v krystalické mřížce, které na sebe působí soudržnými silami. Plastická deformace vzniká působením vnější síly na kov, kdy

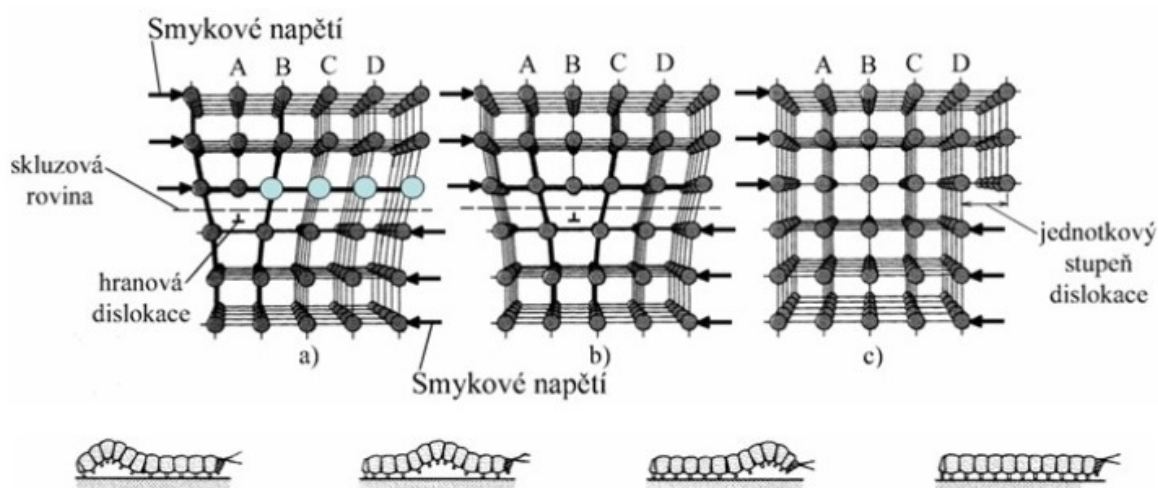
dochází k posunutí atomů do nové stabilní polohy a tím k nevratné plastické deformaci [13].

Tváření za studena se může realizovat dvěma základními mechanismy:

- 1) Skluzem
- 2) Dvojčatěním

3.2.1 Mechanismus skluzu

U tváření za studena převažuje spíše skluzový mechanismus plastické deformace. Plastická deformace se uskutečňuje postupným pohybem dislokací v krystalograficky činných rovinách. Působením nadkritického smykového skluzového napětí se atomy kovu postupně přemísťují ve směru skluzu po skluzné rovině. Dochází ke vzájemnému posuvu deformovaných vrstev krystalů [13]. Na **obr. 14** můžeme vidět postupný pohyb dislokace.

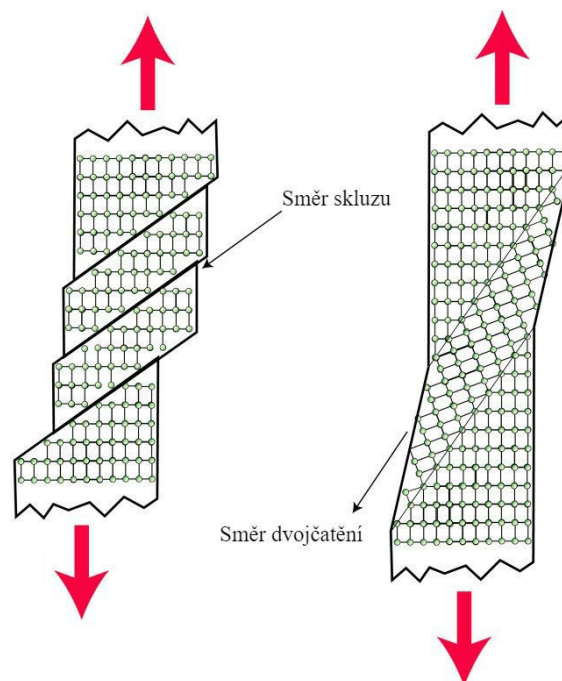


Obr. 14 Průběh deformace způsobené pohybem dislokace [20]

Skluz se řídí těmito zákony:

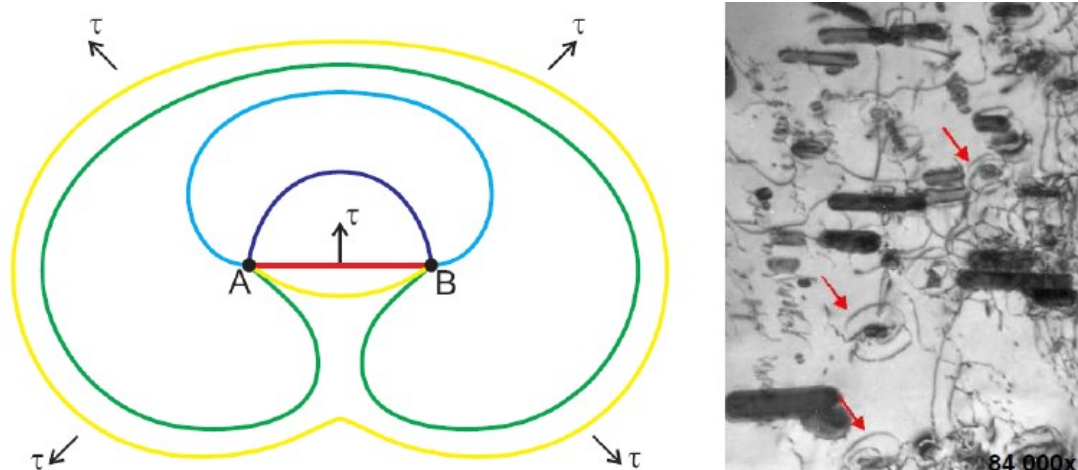
- 1) Směr nejhustěji obsazených atomů uvnitř zrna = směru skluzu.
- 2) Rovina skluzu je zpravidla rovinou s nejhustěji obsazenými atomy [13].

Na **obr. 15** si můžeme prohlédnout rozdíl mezi skluzovým mechanismem a dvojčatěním.



Obr. 15 Rozdíl mezi skluzovým mechanismem a dvojčatěním [19]

U plastické deformace nejen že dochází ke skluzu dislokací, ale také vznikají dislokace nové. Jako vzor můžeme uvést Frank – Readův zdroj dislokací, kde tvrdé částice jiné fáze v mikrostruktuře, zabrání dislokaci v pohybu. Dislokace se vlivem zvyšování působícího napětí začne prohýbat. Z tohoto procesu vzniká nová dislokace ve tvaru smyčky. Zbytek, který se zakotví mezi částicemi, se znovu prohýbá a celý proces se opakuje. Takže z jedné dislokace vznikne několik desítek nových dislokací. Frank - Readův zdroj dislokací je schematicky znázorněn na **obr. 16** vlevo [19].



Obr. 16 Vlevo: schéma Frank – Readova zdroje dislokací, vpravo: polygonizovaná dislokační substruktura slitiny AlSi12MgCuNi po tvářeni. Šipky ukazují Frank – Readův zdroj dislokací tvořící se na karbidických částicích [19]

Tvorba nových dislokací způsobí, že začne narůstat jejich celková hustota. S rostoucím počtem dislokací klesá volná dráha jejich pohybu. Díky vzájemnému působení a zvýšením hustoty si vznikající dislokace začnou vzájemně překážet, tím dochází ke značnému zpevnění materiálu. Zároveň dochází k jejich nakupení na hranicích zrn. K tomu, aby se dislokace znova začaly pohybovat, musíme zvýšit smykové napětí. Smykové napětí uvede v činnost další skluzové systémy. Tato fáze se označuje jako složitý skluz. V konečné fázi zpevňování plasticky tvářených kovů se intenzita zpevňování mírně snižuje. Pokud bychom měli porovnat austenitickou a feritickou strukturu tvářenou za studena, tak se intenzivněji zpevňuje austenitická struktura, protože má menší počet skluzových systémů a menší energii vrstevné chyby [19].

3.2.2 Dvojčatění

Dvojčatění probíhá pouze při vysokých deformačních rychlostech. Je to zvláštní typ skluzového mechanismu plastické deformace. Většina kovů je doprovázena mřížkovými poruchami (dislokace, vakance, mikrotrhliny). Při deformaci za studena dochází ke vzájemné interakci již existujících strukturních poruch ve výchozím materiálu a strukturních poruch, které vzniknou až v průběhu vlastní plastické deformace za studena a to vše s pohybujícími se dislokacemi. Při tomto ději dochází ke vzniku dislokačních stupňů, k nakupení dislokací před překážkami, k zaškrcování rozštěpených dislokací a dislokačních smyček, k deformaci a štěpení precipitátů a nekovových částic, k anihilaci dislokací a k rozpadu vakančních shluků [13].

3.3 Deformační zpevnění při tváření za studena a za tepla

Tváření oceli za studena nastává ve většině případů po tváření oceli za tepla. Tváření za studena probíhá pod rekrystalizační teplotou. Rekrystalizační teplota materiálu se stanoví:

$$T_r = 0,4 \cdot T_t \quad (3)$$

T_r – teplota rekrystalizace (K)

T_t – teplota tání materiálu (K) [19]

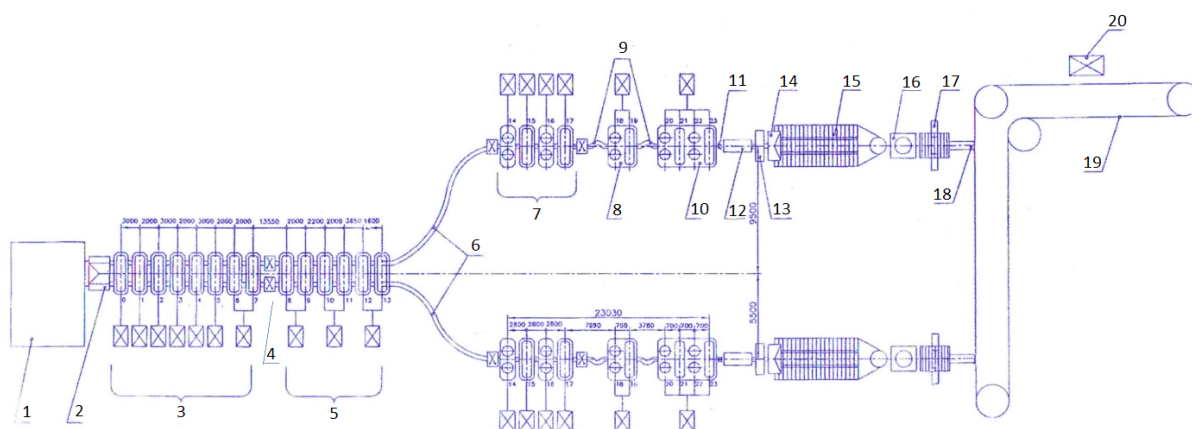
Rekrystalizační teplota nebo také teplota nulové rekrystalizace nám určuje, zda budeme tvářet za studena (pod teplotou rekrystalizace) nebo za tepla (nad teplotou rekrystalizace). My se zaměříme na tváření za studena, kde válcováním nebo tažením dochází k deformaci a protažení zrna a tím se materiál zpevňuje. Je nutné dodat, že objem zrna zůstává stále stejný,

protože jsou potlačeny uzdravovací procesy (rekrytalizace a zotavení). Zpevnování materiálu nastává při plastické deformaci. Čím víc se materiál zpevňuje, tím víc dochází k nárůstu odporu proti dalšímu tváření, kde nakonec dojde k úplnému vyčerpání plastičnosti materiálu. Čím více se materiál zpevňuje, tím více klesá tažnost. Při rekrytalizačním žhání získává materiál schopnost být znova plasticky tvářen. Výhodou tváření za studena je vysoká přesnost rozměrů, zlepšování vlastností zpevněním a kvalitní povrch bez tvorby okují. Nevýhodou je nutnost použít velké tvářecí síly, omezená tvárnost materiálu a nerovnoměrné zpevnování [19].

4 Popis technologie válcování za tepla a natahování za studena (cold stretching)

4.1 Válcování za tepla

Drát byl válcován na kontidrátové trati (KDT) ve společnosti ArcelorMittal Ostrava (AMO). Na obr. 17 je zobrazeno schéma kontidrátové tratě v ArcelorMittal Ostrava a.s. KDT se skládá ze strkací pece, na kterou navazují předválcovací pořadí a střední pořadí oddělené nůžkami. Následuje rozdělení na žílu A a B a smyčka před hotovným pořadím. Dále jsou v trati umístěny hotovní bloky, v případě drátu průměru 12 mm se válcuje pouze na dvojbloku. Po vyválcování na dvojbloku vstupuje drát do vodního boxu, kde dochází k řízení teploty, která se měří na začátku dopravníku ihned za pokládací hlavou. Z technologických důvodů (velký odpor proti pohybu drátu a s tím spojené nebezpečí vzniku nedovalku) se vodní chlazení zapíná, až když automatizovaný systém řízení detekuje drát bezprostředně před pokládací hlavou. Následuje volné ochlazování na řetězovém dopravníku délky 30 m. Poté drát padá do svitkovací komory, zde je vytvořen a svázán svitek a přesunut k hákovému dopravníku [21].



- | | |
|--|------------------------|
| 1. Strkací pec | 11. Měření průměru |
| 2. Přepínač, vyhýbka | 12. Vodní chlazení |
| 3. Předválcovací pořadí s osmi stolicemi | 13. Válečky |
| 4. Nůžky | 14. Pokládací hlava |
| 5. Střední pořadí s šesti stolicemi | 15. Řetězový dopravník |
| 6. Velká smyčka | 16. Svitkovací komora |
| 7. Hotovní pořadí s čtyřmi stolicemi | 17. Vázání svitku |
| 8. Dvojblok | 18. Sklápění svitku |
| 9. Malá smyčka | 19. Hákový dopravník |
| 10. Čtyřblok | 20. Lis svitků SUND |

Obr. 17 Schéma kontidrátové tratě s popisem jednotlivých zařízení [21]

V **tabulce 6** jsou uvedeny doporučené mechanické vlastnosti drátu válcovaného za tepla jakosti B500B pro průměr 8, 10 a 12 mm. Tyto doporučené hodnoty byly stanoveny interně v AMO. V našem experimentu je použit drát o průměru 12 mm.

Tabulka 6 Doporučené minimální mechanické vlastnosti pro drát válcovaný za tepla

Průměr	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	$R_m / R_{p0,2}$	A_{gt} %
8 mm	475	680	1,43	10,5
10 mm	465	680	1,46	10,5
12 mm	455	680	1,49	10,5

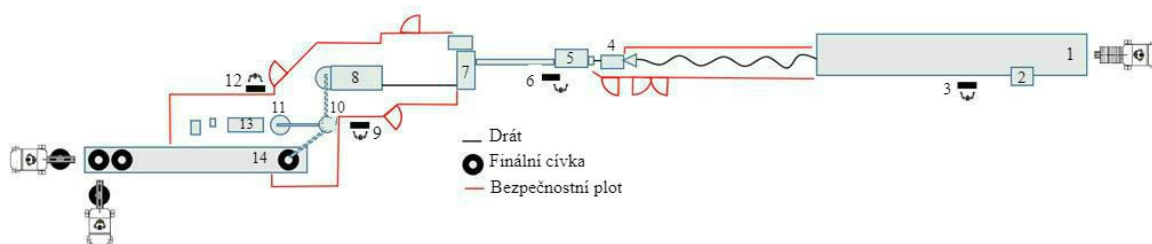
4.2 Natahování za studena (Cold stretching)

Po technologii válcování za tepla na kontidrátové trati, je žebírkový drát natahován za studena na lince KOCH. Při natahování na lince KOCH dojde k navýšení pevnostních vlastností (mez kluzu, pevnost) a k poklesu plastických vlastností (tažnost při maximálním zatížení a poměr mez kluzu / pevnost). Příčinou změny vlastností je zpevnění drátu za studena [21].

Při natahování za studena se průměr drátu a tím i jeho metrová hmotnost zmenší. Natažení drátu o průměru 12 mm na lince KOCH způsobí prodloužení celkové délky drátu o 2 – 3 %, pokud nastavíme ohýbací kladky stroje KBR 14/16 uvedeném níže na **obr. 22** na 110 mm [21].

4.2.1 Schéma a popis linky

Na **obr. 18** je uvedeno schéma linky KOCH s popisem jednotlivých zařízení.



1. Horizontální odvíjedlo svitků, model KWA/6
2. Svářečka na tupo, typ 3a HY sloupová konstrukce STRECKER
3. Ovládací pult odvíjedla
4. Zařízení pro zavádění drátu, typ DEZ1
5. Ohýbací kladky pro deformaci za studena, model KBR 14/16
6. Ovládací pult ohýbacích kladek
7. Tažné zařízení typu S-roller, model KSG 16
8. Vertikální cívkovačka s otočným stolem pro výměnu cívek, typ KSS 1400 - A/M
9. Ovládací pult cívkovačky a ohýbačky kladek
10. Jeřáb
11. Stanoviště pro vázání cívek
12. Ovládací pult jeřábu a vázačky
13. Vázačka PW Lenzen
14. Válečkový dopravník

Obr. 18 Schéma a popis linky KOCH [21]

V následujícím textu jsou popsány jednotlivé zařízení linky KOCH a jejich funkce.

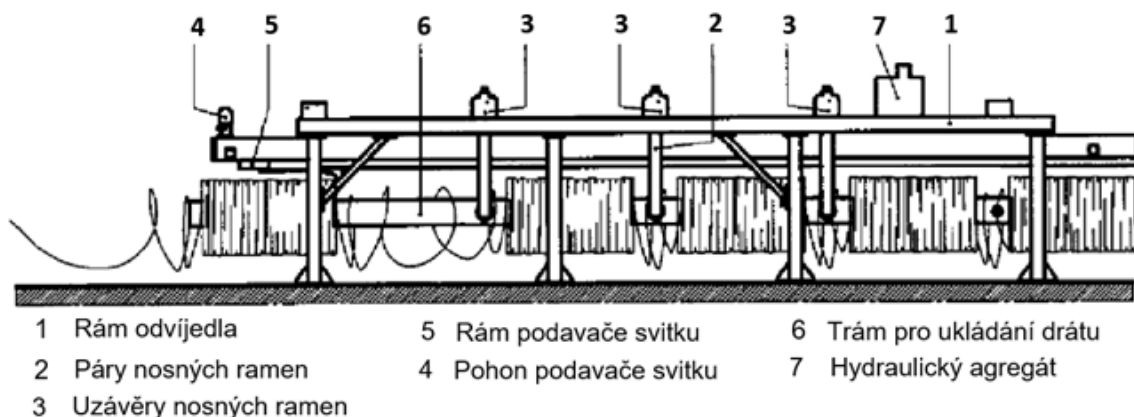
a) Odvíjedlo KWA/6

Díky horizontálnímu odvíjedlu KWA/6 a sloupové svářečce na tupo Strecker, je možno navařit konec jednoho svitku válcovaného drátu k začátku druhého svitku a tím dosáhnout prakticky nekonečného tažení. Na výstupu nám to umožní vyrábět cívky v rozmezí od 1,5 do 5,0 tun [21].

Postup odvíjení svitků

Válcovaný svitek drátu se ukládá na trám odvíjedla pomocí vysokozdvížného vozíku. Pomocí podavače svitku a vysokozdvížného vozíku posuneme svitek zhruba o 2,5 metru dopředu, abychom mohli za něj uložit další svitek. Po uložení druhého svitku můžeme přivařit oba svitky k sobě. Po spojovacím svařování, se otevře první pár nosných ramen a svitky se postupně posouvají o jednu pozici. Aby nedošlo ke skřípnutí drátu nosnými rameny, tak se nosná ramena zavřou mezi prvním a druhým svitkem. Následuje uložení dalšího třetího svitku a navaření na předchozí druhý svitek. Pokud probíhá navařování svitků různých taveb, vždy označíme svar barvou. Po otevření druhého páru nosných ramen se svitek jedna postupně posouvá na další pozici. Pak se druhý pár nosných ramen okamžitě zavře a otevře se první pár nosných ramen. Posuneme svitek dvě a uzavřeme první pár nosných ramen. Nyní je možné posouvat svitek tři až do pozice navaření. Tyto pracovní kroky se neustále opakují, dokud není zavedeno šest svitků, kde potom můžeme zahájit odvíjení svitků [21].

Na **obr. 19** je zobrazeno schéma s podrobným popisem odvíjedla KWA/6.

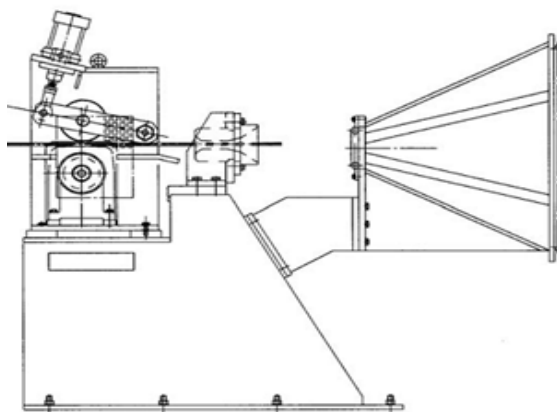


Obr. 19 Schéma a popis odvíjedla KWA/6 [21]

b) Zavádění začátku drátu do linky pomocí zařízení DEZ 1

Zaváděcí stroj DEZ 1 slouží k zavádění drátu o průměru 8 – 12 mm. Skládá se ze dvou kalených válečků. Jeden váleček je umístěn na pevně na pevném ložisku. Druhý váleček je pohyblivý, může se zvedat pomocí hydraulického zdviháku a zároveň je poháněn převodovým motorem s přímým soustrojím [21].

Při zavádění drátu musíme nejprve začátek drátu manuálně narovnat a zavést je mezi otevřené válečky podavače drátu. Po zavření podavače můžeme v krokovém režimu drát protáhnout linkou až k S-rolleru. Když zavedeme drát do stroje tažení drátu, tak se otevře podavač a tažení může začít. Stroj DEZ 1 si můžeme prohlédnout na **obr. 20** [21].



Obr. 20 Stroj DEZ 1 na zavádění drátu [21]

c) Stroj na tažení drátu KBR14/16 + KSG 16

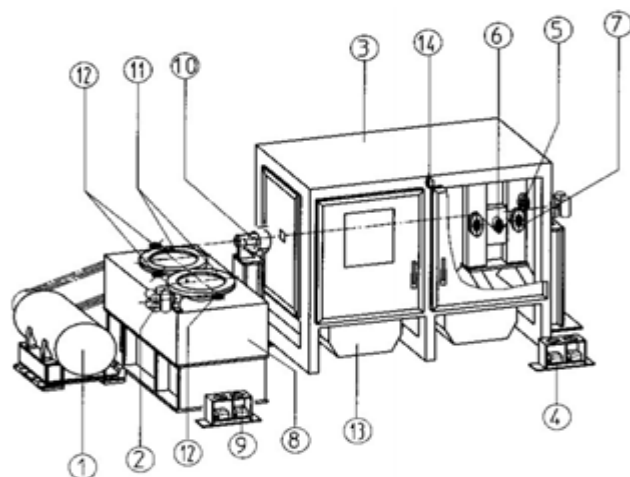
Stroj na tažení drátu KBR14/16 je srdcem linky, kde dochází k plastické deformaci. Stroj pro tažení drátu je doplněn S-rollerem KSG 16, který zajišťuje vlastní pohyb drátu přes linku a vlastní rovnoměrnou deformaci drátu, který je brzděn kladkami. Pomocí nastavení kladek lze regulovat stupeň deformace a tím do určité míry přesně řídit výsledné mechanické vlastnosti drátu [21].

Stroj na tažení drátu se skládá ze dvou částí:

- 1) Stroj na tažení drátu
- 2) Jednotka válečků ve tvaru S (S – roller)

Při zavádění začátku drátu máme vždy otevřené ohýbací kladky. Ohýbací kladky se uzavřou, až když je drát zaveden do tažné jednotky a zachycen kladkou ve tvaru V. Na výstupu ze stroje máme zařízení pro monitoring drátu. Pokud by se drát přetrhl nebo by došel

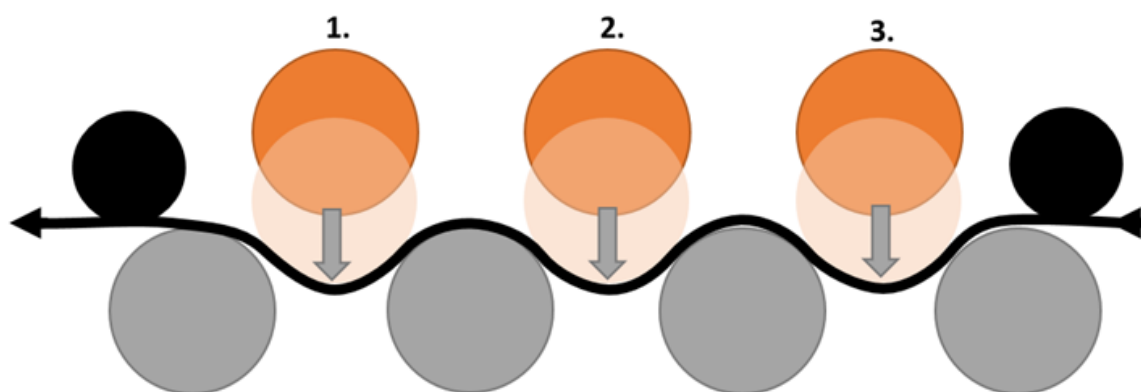
na svůj konec, tak bezkontaktní koncový snímač vypne celou linku. Při zavádění drátu do S – rolleru, musí být přítlačné válečky vždy otevřeny. Po zavedení drátu do S – rolleru, respektive když drát projde přes první přítlačný váleček, můžeme přítlačné válečky uzavřít. Posun drátu se provádí pomocí pedálu. Kompletní popis stroje na tažení drátu včetně S – rolleru je zobrazeno na **obr. 21** [21].



- | | |
|--------------------------------|--|
| 1 Hlavní pohon | 8 S-roller |
| 2 Váleček s křížovým pohybem | 9 Pedál S-rolleru |
| 3 Stroj na tažení drátu | 10 Monitorování drátu |
| 4 Pedál stroje na tažení drátu | 11 Válečky ve tvaru S |
| 5 Vodicí kladka | 12 Přítlačné válečky |
| 6 Ohýbací kladka | 13 Skluz pro okuje |
| 7 Opěrná kladka | 14 Tlačítko nouzového zastavení ve tvaru hříbu |

Obr. 21 Kompletní stroj na tažení drátu KBR14/16 včetně S – rolleru KSG 16, který zajišťuje vlastní pohyb drátu přes linku [21]

Na **obr. 22** je zobrazeno nastavení ohýbacích kladek stroje KBR14/16, které brzdí drát, který je tak natahován S - rollerem.



Obr. 22 Nastavení ohýbacích kladek ve stroji KBR14/16 [21]

Po výstupu z tažného stroje KBR 14/16 je drát navinut na cívkovčce tak, že vznikne kompaktní cívka o vnitřním průměru cca 600 mm, maximálním vnějším průměru cca 1 250 mm a výšce 690 mm pro svitky o hmotnosti od 1,5 do 3 t a 950 mm pro svitky o hmotnosti od 3,0 do 5,0 t. Cívkovačka je plně automatická v provedení double coiler, což znamená, že lze vyměnit cívky ve velmi krátkém čase a podstatně tak snížit prostoje. Po navinutí je cívka otočným sloupovým jeřábem transportována na vázací stanoviště, kde je na čtyřech místech svázána ocelovou páskou na stroji od firmy PW Lenzen. Následně je svázaná cívka transportována na automatický válečkový dopravník [21].

Na **obr. 23** je znázorněno navíjení drátu na cívku, kde po úplném navinutí se cívka pomocí jeřábu přesouvá na stanoviště vazačky **obr. 24**.



Obr. 23 Navíjení kompaktního svitku [21]



Obr. 24 Přesun cívky na stanoviště vazačky [21]

Obr. 25 a 26 znázorňuje vázání svitku ocelovou páskou a přesunutí na dopravník.



Obr. 25 Vázání cívky ocelovou páskou [21]



Obr. 26 Přesunutí cívky na dopravník [21]

4.2.2 Nastavení výrobních parametrů stroje pro natahování drátu (pro výrobu oceli značky B500B dle normy DIN 488)

Aby natahování drátu probíhalo bez prodlev způsobených přetržením drátu a abychom docílili požadovaných mechanických vlastností, máme pro určitý průměr drátu stanovený rozsah rychlostí natahování uvedený v **tabulce 7**.

Tabulka 7 Doporučená rychlost tažení a jí odpovídající teoretická 100% výroba bez uvažování prostožů [21]

Průměr drátu	Poloha ohýbacích kladek			Rychlost (m/s)	Výroba 100% (t/h)	Výroba 100% (kt/rok)
	min.	střed.	max.			
8 mm	150	170	190	6 – 10	7,6 – 14,6	67 – 128
10 mm	120	135	150	5 – 8	10 – 18,4	88 – 161
12 mm	100	110	125	5 – 8	14,4 – 26,5	126 – 232

Nastavením polohy ohýbacích kladek stroje KBR 14/16, můžeme ovlivnit deformaci drátu při cold stretchingu. Nastavení ohýbacích kladek na základě průměru drátu uvádí **tabulka 7** [21].

V **tabulce 8** jsou uvedeny požadavky mechanických hodnot podle německé normy DIN 488 a nastavená provozní rezerva.

Tabulka 8 Požadavky normy DIN 488 s doporučenou provozní rezervou u obou nejsledovanějších vzájemně protichůdných parametrů meze kluzu R_e a tažnosti při maximálním zatížení A_{gt} [21]

Vlastnost		B500B ve svitku	
		DIN 488-1:2009	DIN 488-1:2009 + rezerva
R_e	Průměrná hodnota min. *	535 MPa	540 MPa
	Minimum	525 MPa	530 MPa
R_m/R_e	Průměrná hodnota min. *	1,15	1,17
	Minimum	1,08	1,10
A_{gt}	Průměrná hodnota min. *	6,5 %	7,25 %
	Minimum	5,90 %	6,10 %
$R_{e,act}/R_{e,nom}$	Průměrná hodnota min. *	1,25	1,25
	Minimum	1,27	1,27
* Minimální hodnota průměru ze tří měření			

Nastavení deformace se provádí při každé změně tavby či průměru na základě tahové zkoušky vzorků odebraných při různém nastavení kladek. Optimální hodnota deformace zajistí, že výsledný drát bude splňovat požadavky normy DIN 488 s doporučenou rezervou. Cílem je vyrábět drát v plusové toleranci metrové hmotnosti [21].

4.2.3 Odběr vzorků a zkoušení

Během protahování na lince KOCH se mimo odběr vzorků nutných pro optimální nastavení stupně deformace, odebírají také vzorky pro zkoušení hotového výrobku. V automatickém režimu linky KOCH lze nastavit množství a četnost odebraných vzorků [21].

Rozsah zkoušek:

- Chemické složení – 1x na tavbu. Tavební analýzu zajistí ocelárna.
- Ohýbatelnost, geometrie povrchu a odchylka od příčného průřezu – 1x na tavbu (nejméně však co 150 t)
- Zkoušku tahem je potřeba provést na jednom vzorku co 30 t, nejméně však u tří vzorků jedné tavby a jednoho jmenovitého průměru [21].

Při zkoušce ohybem musí všechny vzorky splnit požadavky normy DIN 488-3.

Při zkoušce geometrie povrchu musí jednotlivé výsledky odpovídat požadavkům DIN 488-1:2009-08, Tabulka č. 2. Pro betonářskou ocel ve svitcích musí být hodnoty metrové hmotnosti uvedené v této tabulce překročeny o nejméně 15 %. Požadavky shrnuje **tabulka 9** [21].

Tabulka 9 Jmenovitá hmotnost a vztažná plocha žebírek dle normy DIN 488-1 pro drát ve svitku [21]

D (mm)	Jmenovitá hmotnost (kg.m ⁻¹)			Vztažná plocha žebírek (-)	
	Nominální	Min	Nom.		Max
8		0,379	0,395	0,419	0,0518
10		0,592	0,617	0,654	0,0598
12		0,852	0,888	0,941	0,0644

Při zkoušce tahem musí jednotlivé výsledky splňovat požadavky uvedené v **tabulce 8**. Při vyhodnocování zkoušek tahem se pro výpočet mechanických hodnot používá nominální průřez drátu [21].

5 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je zanalyzovat mechanické vlastnosti žebírkového drátu po jeho délce po válcování za tepla a po následném natažení za studena. Analyzovány budou mechanické vlastnosti získané tahovou zkouškou, tedy mez kluzu, pevnost a tažnost na mezi pevnosti. Detailně se zaměříme na dva, pravděpodobně, spolu nesouvisející problémy:

5.1 Analýza mechanických vlastností po délce drátu ve středu svitku

Cílem je porovnat mechanické vlastnosti drátu ve svitku, který je vyválcován za tepla s drátem vyválcovaným za tepla s následným natažením za studena (cold stretching). Zkušební vzorky budou odebrány ze středu svitku, kde při válcování za tepla můžeme hovořit o ustáleném stavu z hlediska ochlazování ve vodních boxech za hotovním blokem.

5.2 Vliv omezeného chlazení na začátku a na konci svitku

Druhým úkolem je zhodnotit, zda drát z nechlazeného začátku svitku a pomaleji chlazeného konce svitku má vyhovující mechanické vlastnosti odpovídající středu svitku a také to, jak se tyto rozdíly změní po přetažení za studena.

6 Návrh experimentu

6.1 Použitý materiál

Experiment se týkal žebírkového drátu z oceli jakosti B500B o průměru 12 milimetrů, který byl vyválcován za tepla do svitku na kontidrátové trati a následně natahován za studena na lince KOCH. Chemické složení oceli udává **tabulka 10**. Kvůli citlivosti údajů AMO je v uvedené tabulce chemického složení oceli vynecháno procentuální vyjádření dusíku a vanadu.

Tabulka 10 Chemické složení použité oceli (hm. %)

C	Mn	Si	P	S	N	V
0,20	1,37	0,185	0,015	0,012	-	-

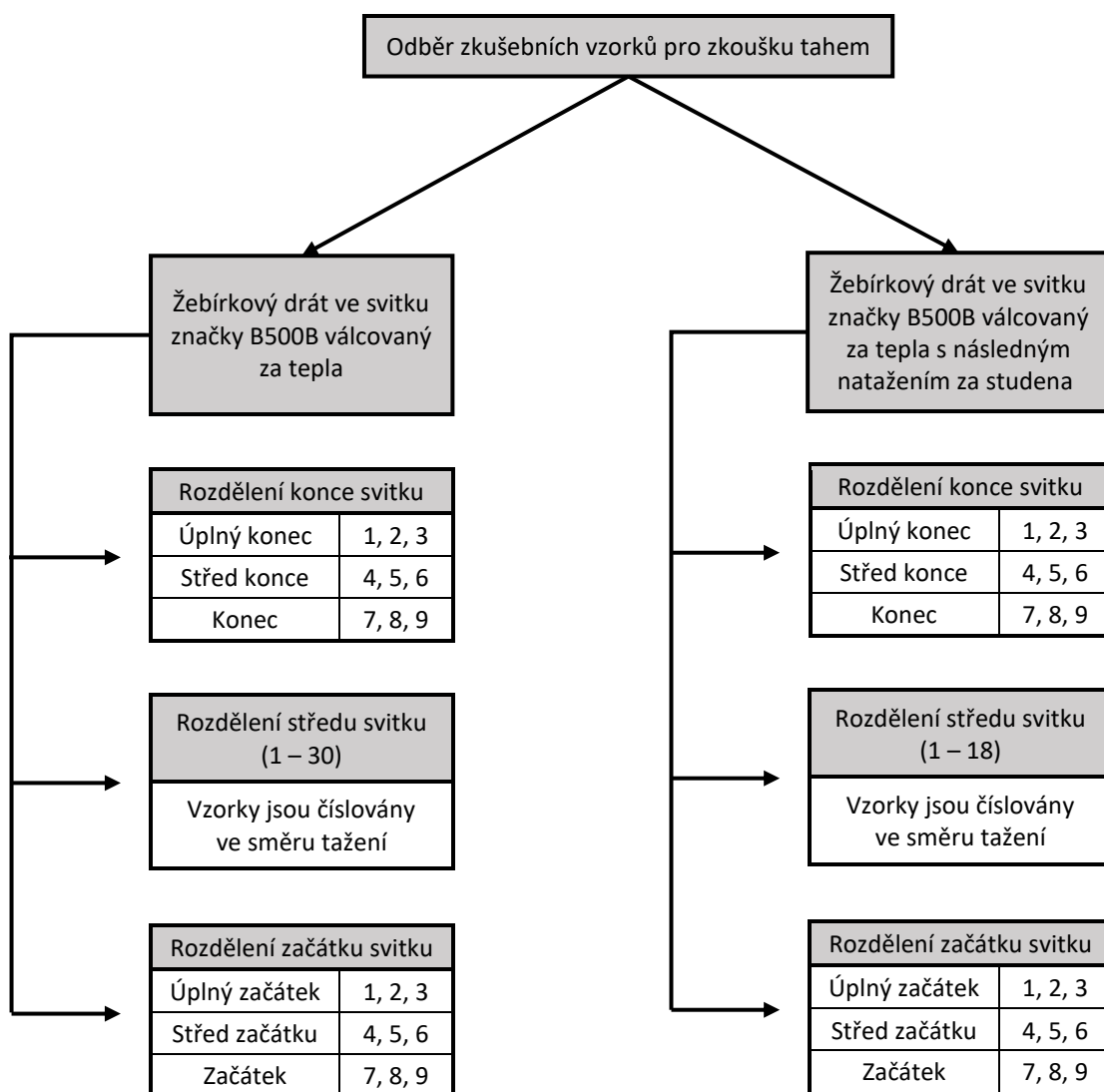
6.2 Popis experimentu

Z obou drátů, jak z drátu pouze válcovaného za tepla, tak z drátu válcovaného za tepla s následným natažením za studena (cold stretching), jsem si odebral zhruba tři závity z konce, středu a začátku svitku. Všechny zkušební vzorky, které jsem odebral, měly délku 35 centimetrů. Byli jsme limitováni kapacitou zkušebny, proto jsme z obou svitků mohli odebrat jen omezené množství drátu. Odebírání zkušebních vzorků probíhalo následujícím postupem:

- 1) Nejprve jsem začal pracovat se třemi závity z konce svitku, které jsem si rozdělil na tři části (úplný konec, střed konce a konec). Z úplného konce, středu konce a konce, jsem si nastříhal celkem devět zkušebních vzorků. Tři vzorky z úplného konce jsem si označil čísly 1, 2 a 3. Následující tři vzorky ze středu konce byly označeny čísly 4, 5 a 6 a vzorky z konce jsem označil čísly 7, 8 a 9.
- 2) Ze středu svitku jsem po válcování za tepla odebral ze tří závitů třicet zkušebních vzorků jdoucích v řadě za sebou. Zkušební vzorky byly označeny čísly 1 – 30. Při odebírání zkušebních vzorků po válcování za tepla s následným natažením za studena, se mi zhruba ze tří závitů podařilo odebrat osmnáct zkušebních vzorků jdoucích v řadě za sebou. Zkušební vzorky byly označeny čísly 1 – 18. Vzorky jsou číslovány ve směru tažení.

3) Začátek svitku jsem rozdělil stejným způsobem jako konec svitku. Tři závity začátku svitku jsem si rozdělil na tři části (úplný začátek, střed začátku a začátek). Z úplného začátku, středu začátku a začátku, jsem si nastříhal celkem devět zkušebních vzorků. Tři vzorky z úplného začátku jsem označil čísly 1, 2, a 3. Následující tři vzorky ze středu začátku jsem označil čísly 4, 5 a 6 a vzorky ze začátku jsem označil čísly 7, 8, a 9.

Přehled všech odebraných vzorků pro zkoušku tahem je znázorněn na **obr. 27**.



Obr. 27 Přehled zkušebních vzorků

Pro lepší orientaci jsou zde znázorněny **tabulky 11 a 12**, kde **tabulka 11** nám udává více informací o odebraném drátu ze středu svitku a **tabulka 12** ze začátku a konce svitku. U odebírání vzorků ze začátku či konce svitku vzniklo poměrně velké množství šrotu. Např. rozdělením začátku svitku na úplný začátek, střed začátku a začátek nám zbylo 6,25 m šrotu.

Mezi jednotlivými částmi začátku svitku (např. mezi úplným začátkem a středem začátku) byl rozestup 2,1 m.

Tabulka 11 *Informace o rozdělení drátu na zkušební vzorky ze středu svitku válcovaného za tepla či válcovaného za tepla s následným natažením za studena.*

Střed svitku	Po válcování za tepla	Po natažení za studena
Celkový počet zk. vzorků	30	18
Délka zk. vzorku	35 cm	35 cm
Celková odebraná délka drátu	10,5 m	6,3 m
Průměr jednoho závitu	1 m	1 m
Délka drátu v jednom závitu	3,14 m	3,14 m
Celkem odebráno závitů	3,3	2

Tabulka 12 *Informace o rozdělení drátu na zkušební vzorky ze začátku a konce svitku válcovaného za tepla či válcovaného za tepla s následným natažením za studena.*

Začátek a konec svitku	Po válcování za tepla	Po natažení za studena
Celkový počet zk. vzorků	9	9
Délka zk. vzorku	35 cm	35 cm
Odebraná délka pro zk. vzorky	3,15 m	3,15 m
Šrot	6,25	6,25
Celková odebraná délka drátu	9,4 m	9,4 m
Průměr jednoho závitu	1 m	1 m
Délka drátu v jednom závitu	3,14 m	3,14 m
Celkem odebráno závitů	3	3

Experiment byl doplněn analýzou ochlazovacích křivek při chlazení ve vodním boxu a měřením teplot na řetězovém dopravníku KDT pomocí termovizní kamery FLIR T1030 sc.

7 Diskuze výsledků

7.1 Drát válcovaný za tepla

7.1.1 Data a popisná statistika

V **tabulce 13** jsou uvedeny výsledky tahové zkoušky ze středu svitku po válcování za tepla a číselné charakteristiky. Vlastnosti pro válcovaný drát za tepla najdeme v **tabulce 6 kapitola 4.1 Válcování za tepla**.

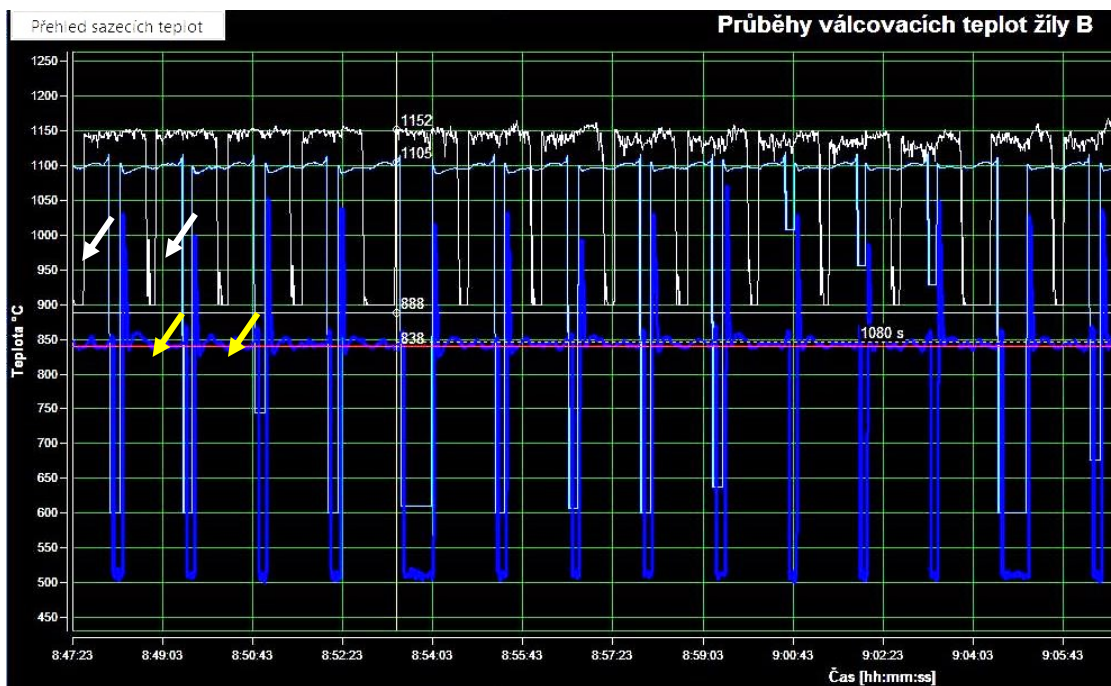
Tabulka 13 *Výsledky tahové zkoušky ze středu svitku po válcování za tepla. Výsledné naměřené hodnoty vyznačené červeně, nespĺňují interní doporučenou hodnotu pro jakost oceli B500B*

Č. vz.	Část vz. / stav	S ₀ (mm ²)	E (GPa)	R _{p0,2, nom} (MPa)	R _{m, nom} (MPa)	A _{gt} (%)	R _m /R _{p0,2} (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
1	Střed / KDT	120,58	149	451	664	12,84	1,47	0,9466
2	Střed / KDT	119,91	180	465	666	12,82	1,43	0,9413
3	Střed / KDT	119,35	172	451	662	12,3	1,47	0,9369
4	Střed / KDT	119,72	181	459	656	12,21	1,43	0,9398
5	Střed / KDT	119,33	165	455	664	12,56	1,46	0,9367
6	Střed / KDT	119,47	264	467	668	12,05	1,43	0,9378
7	Střed / KDT	119,81	169	466	688	12,56	1,43	0,9412
8	Střed / KDT	119,34	166	465	664	12,15	1,43	0,9368
9	Střed / KDT	119,62	163	458	652	11,17	1,42	0,9390
10	Střed / KDT	119,26	168	447	648	13,08	1,45	0,9362
11	Střed / KDT	120,29	163	450	659	12,13	1,47	0,9443
12	Střed / KDT	119,61	153	469	666	12,71	1,42	0,939
13	Střed / KDT	119,59	170	456	670	11,72	1,47	0,9388
14	Střed / KDT	119,38	156	454	663	11,56	1,46	0,9371
15	Střed / KDT	118,91	217	456	657	12,92	1,44	0,9334
16	Střed / KDT	119,66	137	454	664	12,95	1,46	0,9393
17	Střed / KDT	118,93	175	462	665	12,45	1,44	0,9336
18	Střed / KDT	119,38	160	459	666	12,04	1,45	0,9372
19	Střed / KDT	119,48	153	441	657	11,58	1,49	0,9379
20	Střed / KDT	119,03	161	447	651	13,33	1,46	0,9343
21	Střed / KDT	119,75	169	462	666	12,02	1,44	0,9401
22	Střed / KDT	119,44	181	460	666	12,45	1,45	0,9376
23	Střed / KDT	120,06	176	452	668	12,11	1,48	0,9425

Č. vz.	Část vz. / stav	S ₀ (mm ²)	E (GPa)	R _{p0,2, nom} (MPa)	R _{m, nom} (MPa)	A _{gt} (%)	R _m /R _{p0,2} (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
24	Střed / KDT	119,91	198	464	664	12,64	1,43	0,9413
25	Střed / KDT	118,95	153	453	661	12,44	1,46	0,9337
26	Střed / KDT	119,64	165	465	668	13,08	1,44	0,9391
27	Střed / KDT	119,84	182	460	667	12,23	1,45	0,9405
28	Střed / KDT	119,08	181	461	664	10,65	1,44	0,9348
29	Střed / KDT	119,18	172	463	656	11,19	1,42	0,9356
30	Střed / KDT	120,07	168	452	653	12,35	1,45	0,9425
Průměr	Střed / KDT	119,55	172,23	457,47	662,77	12,28	1,45	0,9385
Směr. od.	Střed / KDT	0,4038	22,9718	6,8367	7,4263	0,6175	0,0186	0,0032
Minimum	Střed / KDT	118,91	137,00	441,00	648,00	10,65	1,42	0,9334
Maximum	Střed / KDT	120,58	264,00	469,00	688,00	13,33	1,49	0,9466
Rozpětí	Střed / KDT	1,67	127,00	28,00	40,00	2,68	0,07	0,0132

Z uvedených dat a vypočtených průměrných hodnot je zřejmé, že válcovaný drát má o něco nižší mez kluzu, než je doporučeno pro jakost B500B po válcování za tepla. Celkem 11 naměřených hodnot je menších než minimální doporučená mez kluzu, která je pro průměr 12 mm (455 MPa). Naměřená doporučená pevnost byla téměř celá s výsledkem nevyhovující, hned 29 naměřených hodnot nespĺňuje doporučenou hodnotu (680 MPa). Hodnoty tažnosti na mezi pevnosti resp. poměr pevnosti k mezi kluzu splňují minimální požadavky (10,5 % resp. 1,35) s velkou rezervou. Dostatečná zásoba plasticity umožní použít při následném natažení za studena (cold stretchingu) větší deformaci a tím dohnat chybějící úroveň meze kluzu.

Pokud se podíváme na záznam teplot při ochlazování drátu ve vodním boxu na KDT, tak je zřejmé, že na začátku svitku je délka drátu odpovídající vzdálenosti bloků a pokládací hlavy nechlazena (bílá šipka na **obr. 28**). Pokud by totiž bylo vodní chlazení zapnuto, došlo by k ohnutí začátku drátu a ten by narazil do armatury. O něco vyšší pokládací teplotu má také konec drátu, protože drát se po výstupu z bloku zrychlí a řídicí program na to nestihne zareagovat (žlutá šipka na **obr. 28**). Proto se v této práci zaměříme detailně na vlastnosti drátu na začátku a na konci svitku.



Obr. 28 Záznam časového průběhu teplot při válcování žebírkového drátu D12 na KDT. *Bílá čára je teplota mezi stolicemi S_0 a S_1 . Bleděmodrá čára představuje doválcovací teplotu měřenou za finálním blokem a tmavě modrá čára představuje teplotu drátu pokládávaného na začátku řetězového dopravníku (tato teplota slouží k řízení modelu vodního chlazení).*
Zdroj: IS KD klient [21]

Ze začátku a konce svitku bylo odebráno menší množství vzorků kvůli kapacitnímu omezení zkušebny v AMO. V **tabulce 14** resp. **15** jsou výsledky a základní číselné statistiky ze začátku resp. konce svitku. Číselné charakteristiky jsou vypočítány pro všech 9 vzorků (v tabulkách označené jako cel.) a také pro každou trojici zvlášť.

Tabulka 14 Výsledky tahové zkoušky ze začátku svitku po válcování za tepla. Výsledné naměřené hodnoty vyznačené červeně, nespĺňují doporučenou hodnotu pro jakost oceli B500B

Č. vz.	Část vz. / stav	S_0 (mm ²)	E (GPa)	$R_{p0,2, nom}$ (MPa)	R_m, nom (MPa)	A_{gt} (%)	$R_m/R_{p0,2}$ (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
1	Úp. zač. / KDT	122,09	165	474	694	10,08	1,46	0,9584
2	Úp. zač. / KDT	122,57	148	469	697	11,70	1,49	0,9622
3	Úp. zač. / KDT	122,16	170	476	696	11,02	1,46	0,9589
Průměr	Úp. zač. / KDT	122,27	161,00	473,00	695,67	10,93	1,47	0,9598
Směr. od.	Úp. zač. / KDT	0,2593	11,5326	3,6056	1,5275	0,8135	0,0173	0,0021
4	St. zač. / KDT	120,12	173	454	673	10,20	1,48	0,9430
5	St. zač. / KDT	119,52	158	474	681	10,46	1,44	0,9382
6	St. zač. / KDT	120,37	156	461	682	9,34	1,48	0,9449
Průměr	St. zač. / KDT	120,00	162,33	463,00	678,67	10,00	1,47	0,9420
Směr. od.	St. zač. / KDT	0,4368	9,2916	10,1489	4,9329	0,5862	0,0231	0,0035

Č. vz.	Část vz. / stav	S ₀ (mm ²)	E (GPa)	R _{p0,2, nom} (MPa)	R _{m, nom} (MPa)	A _{gt} (%)	R _m /R _{p0,2} (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
7	Zač. / KDT	119,67	160	470	668	10,63	1,42	0,9394
8	Zač. / KDT	119,37	169	481	665	7,80	1,38	0,9370
9	Zač. / KDT	120,09	163	465	655	8,09	1,41	0,9427
Průměr	Zač. / KDT	119,71	164,00	472,00	662,67	8,84	1,40	0,9397
Směr. od.	Zač / KDT	0,3617	4,5826	8,1854	6,8069	1,5570	0,0208	0,0029
Cel. průměr	KDT	120,66	162,44	469,33	679,00	9,92	1,45	0,9472
Cel. směr. od.	KDT	1,2544	7,8599	8,2765	14,9164	1,2970	0,0371	0,0099
Cel. min.	KDT	119,37	148,00	454,00	655,00	7,80	1,38	0,9370
Cel. max.	KDT	122,57	173,00	481,00	697,00	11,70	1,49	0,9622
Cel. rozpětí	KDT	3,20	25,00	27,00	42,00	3,90	0,11	0,0252

Z uvedených naměřených a vypočtených průměrných hodnot začátku svitku si můžeme všimnout, že výsledná tažnost neodpovídá doporučeným hodnotám pro jakost oceli B500B, která je (10,5 %). Z 9 odebraných vzorků je hned 6 s výsledkem nevyhovujících (1 hodnota z úplného začátku, všechny 3 hodnoty ze středu začátku a 2 hodnoty ze začátku). Mez kluzu válcovaného drátu za tepla odpovídá mezi kluzu, která je doporučena pro jakost B500B po válcování za tepla. Pouze 1 naměřená hodnota středu začátku má nižší mez kluzu, než je hodnota doporučená. Doporučená pevnost pro jakost oceli B500B je (680 MPa). Z našich naměřených hodnot nevyhovují celkem 4 (1 hodnota ze středu začátku a všechny 3 hodnoty ze začátku). Poměr pevnosti k mezi kluzu splňuje doporučené požadavky (1,35) s velkou rezervou. Všechny doporučené hodnoty pro mechanické vlastnosti drátu válcovaného za tepla jsou určeny pro drát průměru 12 mm. Z porovnání číselných charakteristik jednotlivých trojic je zřejmé, že data vykazují statisticky významný trend pouze u hodnot pevnosti.

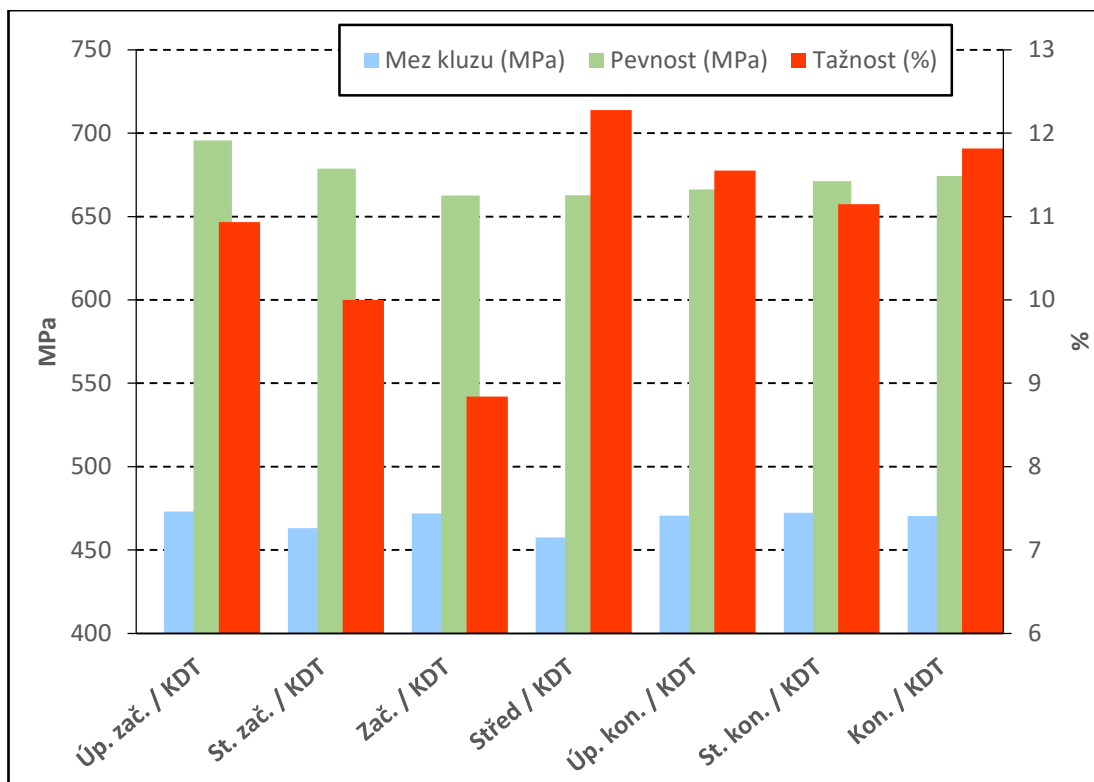
Tabulka 15 Výsledky tahové zkoušky z konce svitku po válcování za tepla. Výsledné naměřené hodnoty vyznačené červeně, nesplňují doporučenou hodnotu pro jakost oceli B500B

Č. vz.	Část vz. / stav	S ₀ (mm ²)	E (GPa)	R _{p0,2, nom} (MPa)	R _{m, nom} (MPa)	A _{gt} (%)	R _m /R _{p0,2} (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
1	Úp. Kon. / KDT	122,40	183	484	663	11,18	1,37	0,9608
2	Úp. Kon. / KDT	121,67	166	470	668	12,52	1,42	0,9551
3	Úp. Kon. / KDT	122,14	193	458	668	10,96	1,46	0,9588
Průměr	Úp. Kon. / KDT	122,07	180,67	470,67	666,33	11,55	1,42	0,9582
Směr. od.	Úp. Kon. / KDT	0,3700	13,6504	13,0128	2,8868	0,8444	0,0451	0,0029

Č. vz.	Část vz. / stav	S ₀ (mm ²)	E (GPa)	R _{p0,2, nom} (MPa)	R _{m, nom} (MPa)	A _{gt} (%)	R _m /R _{p0,2} (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
4	St. Kon. / KDT	120,24	165	475	675	11,78	1,42	0,9439
5	St. Kon. / KDT	121,04	166	469	669	11,14	1,43	0,9501
6	St. Kon. / KDT	120,74	165	473	670	10,52	1,42	0,9478
Průměr	St. Kon. / KDT	120,67	165,33	472,33	671,33	11,15	1,42	0,9473
Směr. od.	St. Kon. / KDT	0,4041	0,5774	3,0551	3,2146	0,6300	0,0058	0,0031
7	Kon. / KDT	120,74	170	469	677	10,99	1,44	0,9478
8	Kon. / KDT	120,55	169	475	676	12,20	1,42	0,9463
9	Kon. / KDT	120,00	175	467	670	12,26	1,44	0,9420
Průměr	Kon. / KDT	120,43	171,33	470,33	674,33	11,82	1,43	0,9454
Směr. od.	Kon. / KDT	0,3843	3,2146	4,1633	3,7859	0,7165	0,0115	0,0030
Cel. průměr	KDT	121,06	172,44	471,11	670,67	11,51	1,42	0,9503
Cel. směr. od.	KDT	0,8363	9,6968	7,0612	4,5277	0,7009	0,0246	0,0066
Cel. min.	KDT	120,00	165,00	458,00	663,00	10,52	1,37	0,9420
Cel. max.	KDT	122,40	193,00	484,00	677,00	12,52	1,46	0,9608
Cel. rozpětí	KDT	2,40	28,00	26,00	14,00	2,00	0,09	0,0188

Z uvedených dat a vypočtených průměrných hodnot konce svitku je zřejmé, že výsledná pevnost neodpovídá doporučeným hodnotám pro jakost oceli B500B, která je (680 MPa). Z 9 odebraných vzorků je hned všech 9 nevyhovujících. Naměřené hodnoty tažnosti splňují doporučené hodnoty (10,5 %) pro ocel jakosti B500B. Mez kluzu válcovaného drátu za tepla, kde je doporučená mez kluzu (455 MPa) a poměr pevnosti k mezi kluzu (1,35) také splňují doporučené požadavky. Mezi jednotlivými trojicemi hodnot zde není statisticky významný rozdíl.

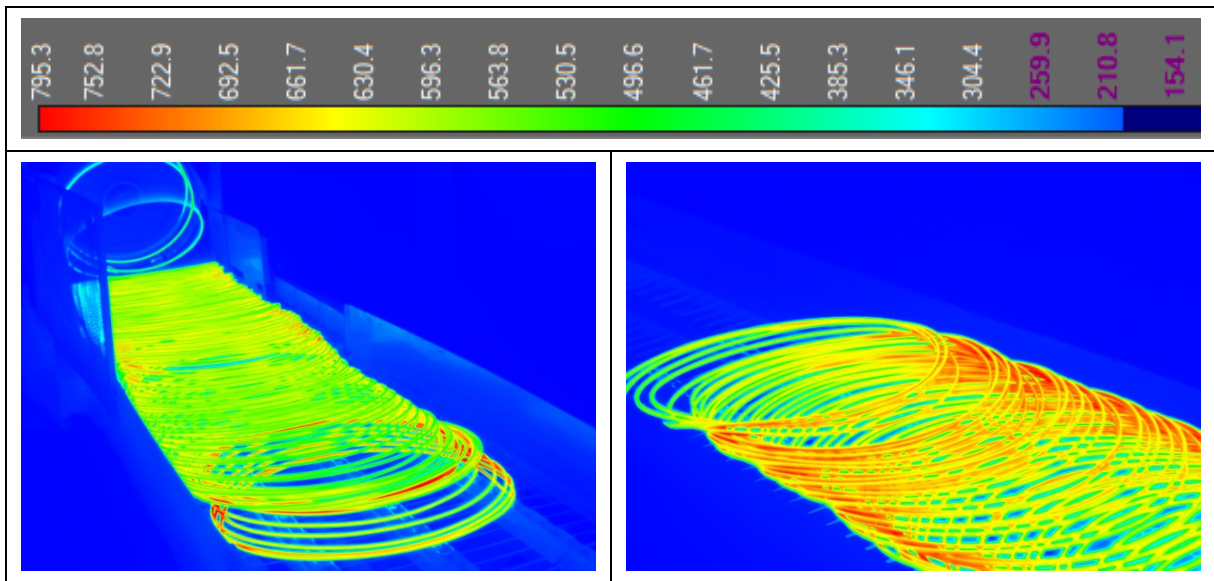
Pro lepší orientaci je na **obr. 29** znázorněn graf pro podrobnější porovnání průměrných hodnot mechanických vlastností jednotlivých částí (začátku, středu a konce svitku) po válcování za tepla. Začátek a konec svitku je rozdělen na tři části: Úplný začátek (konec), střed začátku (konce) a začátek (konec).



Obr. 29 Znáznorňuje průměrné hodnoty mechanických vlastností začátku, středu a konce svitku po válcování za tepla. Začátek a konec svitku je rozdělen na tři části: Úplný začátek (konec), střed začátku (konec) a začátek (konec)

Po porovnání naměřených hodnot vzorků ze středu svitku s naměřenými a vypočtenými hodnotami vzorků ze začátku a konce svitku je zřejmé, že hodnoty meze kluzu jsou trochu překvapivě na začátku a konci drátu vyšší než ve středu svitku. Vysvětlení, proč je tomu tak, najdeme na termovizních snímcích na **obr. 30**.

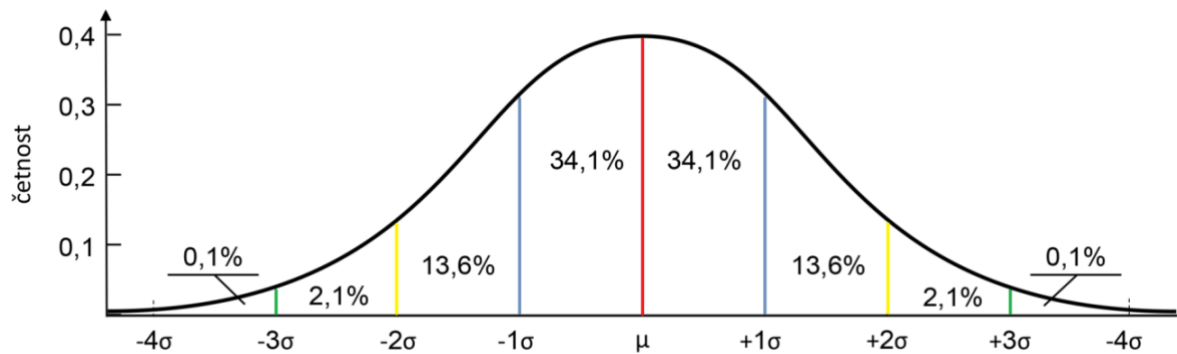
Z obou termovizních snímků je patrné, že závity na začátku a na konci svitku jsou uspořádány volněji a chladnou tedy na dopravníku rychleji. Po sbalení do svitku se pak jedná o okraje svitku, které také chladnou rychleji.



Obr. 30 Termovizní snímky z řetězového dopravníku **vlevo**) začátek svitku, **vpravo**) konec svitku, **nahoře**) stupnice teplot zobrazující teploty k jednotlivým barvám termovizních snímků [21]

7.1.2 Analýza trendu ve středu svitku

Cílem této analýzy je rozhodnout, zda jsou mechanické vlastnosti drátu z prostřední části svitku ovlivněny pouze nevymezitelnými příčinami, či zda má na jejich hodnotu významný vliv nerovnoměrné rozložení teploty v průběhu ochlazování na řetězovém dopravníku na KDT. Pokud na daný proces působí pouze nevymezitelné příčiny, budou mít sledované mechanické vlastnosti normální rozdělení pravděpodobnosti, reprezentované Gaussovou křivkou uvedenou na **obr. 31**. Plocha pod touto křivkou reprezentuje pravděpodobnost výskytu naměřených výsledků v daném intervalu (σ je směrodatná odchylka). Výsledky blíží se střední hodnotě (μ) jsou pravděpodobnější než výsledky odlehlejší.

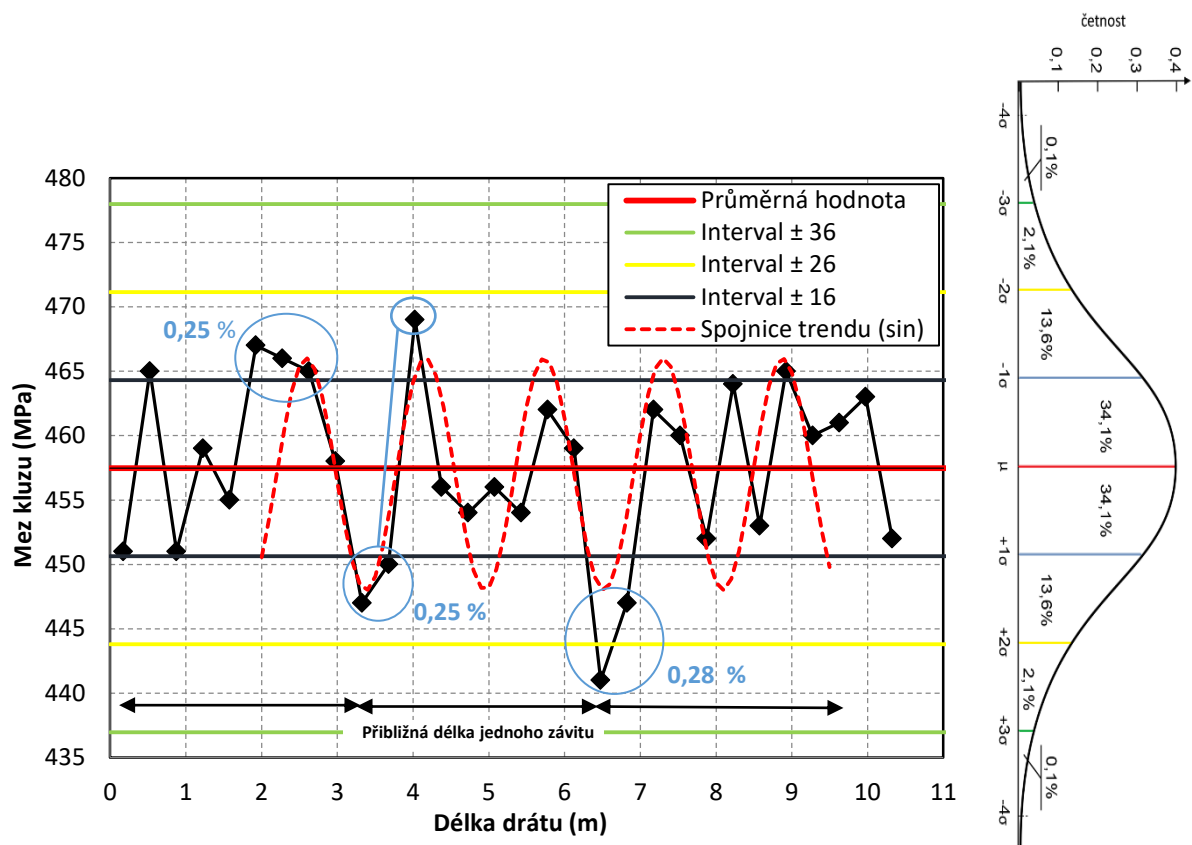


Obr. 31 Gaussova křivka s rozdělením na oblasti, ve kterých je procentuálně znázorněna pravděpodobnost výskytu naměřených hodnot [21]

V následujících grafech na **obr. 32, 35 a 36** jsou uvedeny hodnoty meze kluzu, pevnosti a tažnosti (černá křivka), které byly naměřeny ze třiceti zkušebních vzorků v závislosti na délce drátu. Pokud mají data normální rozdělení, kolísají rovnoměrně kolem průměrné hodnoty a v grafu nejsou pozorovatelné žádné trendy (např. více hodnot za sebou klesá nebo roste). Pokud se v grafu objevují méně pravděpodobné kombinace po sobě jdoucích výsledků (pravděpodobnost menší než 0,5 %), bude se zřejmě jednat o vliv nějaké vymezitelné příčiny (podle naší hypotézy rozdílné teploty (resp. rychlosti ochlazování) na krajích a ve středu svitků ležících na řetězovém dopravníku). Mezi takovéto nepravděpodobné situace patří:

- jedna hodnota mimo interval $\mu \pm 3\sigma$,
- nejméně tři po sobě jdoucí hodnoty v intervalu $\mu \pm 2\sigma$, ale mimo interval $\mu \pm \sigma$,
- nejméně pět hodnot po sobě jdoucích, které jsou vyšší nebo nižší než průměrná hodnota,
- dvě ze tří po sobě jdoucích hodnot v intervalu $\mu \pm 3\sigma$, ale mimo interval $\mu \pm 2\sigma$,
- atd.

V grafu na **obr. 32** vidíme hodnoty meze kluzu po délce válcovaného drátu. Vyznačeny jsou zde také intervaly: $\mu \pm 3\sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ a $\mu \pm \sigma$. V uvedeném grafu jsme identifikovali celkem tři málo pravděpodobné situace (body jsou označeny modře a je u nich uvedena jejich pravděpodobnost).



Obr. 32 Vlevo znázorňuje naměřené hodnoty meze kluzu z 30 zkušebních vzorků (černá čára) proložené sinusovkou (červená čárkovaná). Porovnáním sinusovky s naměřenými hodnotami je zřejmé, že data vykazují trend. Minima meze kluzu odpovídají okrajům závitu umístěných na dopravníku. Naopak maxima meze kluzu odpovídají středu závitu na dopravníku. Body označené modře uvádějí málo pravděpodobné situace s procentuálním vyjádřením pravděpodobnosti

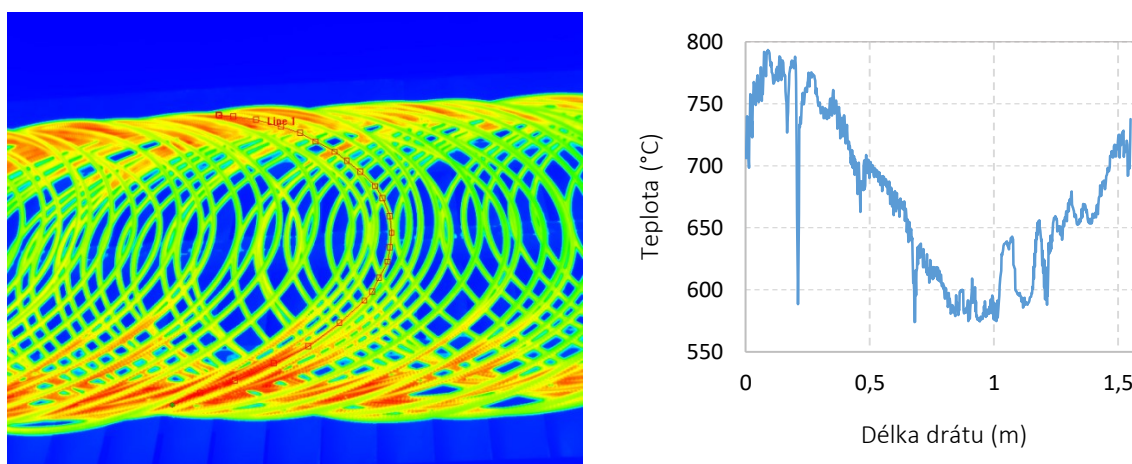
Příklad výpočtu pravděpodobnosti:

- 1) Pokud se nejméně tři po sobě jdoucí hodnoty nacházejí v intervalu $\mu \pm 2\sigma$, ale mimo interval $\mu \pm \sigma$ (první dvě modře obarvené situace v grafu) stanoví se pravděpodobnost této situace takto: $0,136^3 = 0,0025 = 0,25\%$, kde 0,136 je pravděpodobnost, že se vyskytne tato situace 1x.
- 2) Pokud se např. jedna hodnota nachází v intervalu $\mu \pm 2\sigma$ a druhá hodnota v intervalu $\mu \pm 3\sigma$ (třetí modře obarvená situace v grafu) stanoví se pravděpodobnost této situace takto: $0,136 \cdot 0,021 = 0,0028 = 0,28\%$, kde 0,136 a 0,021 jsou stanovené pravděpodobnosti, že naměřená hodnota padne do příslušného intervalu.

Z uvedeného plyne, že na daný proces má vliv nějaká vymezitelná příčina. Touto příčinou bude v našem případě nerovnoměrná rychlost ochlazování na řetězovém dopravníku.

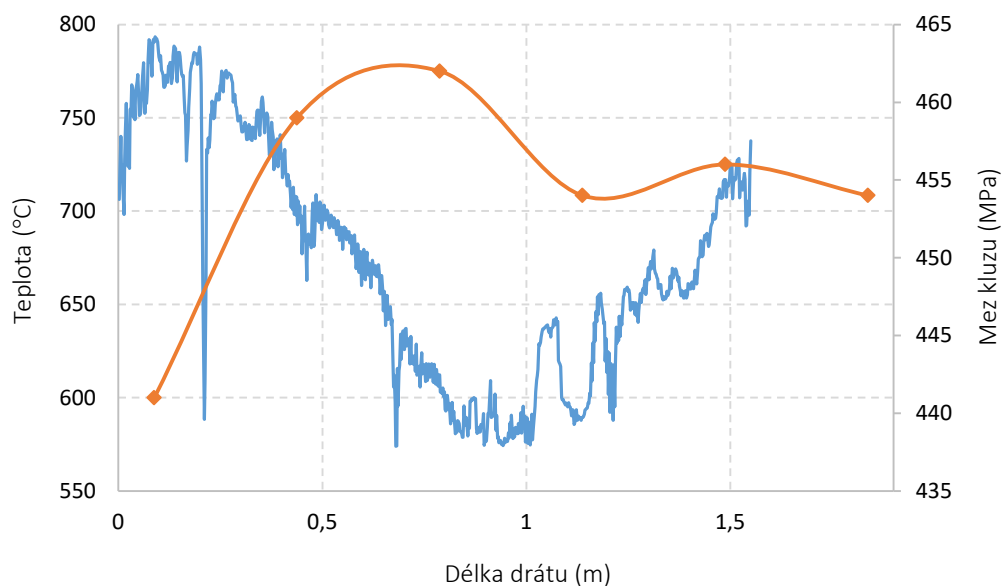
Jestliže budeme předpokládat, že vysoká teplota (resp. nízká rychlost ochlazování) na řetězovém dopravníku způsobí pokles meze kluzu, můžeme říci, že oblast s minimální mezí kluzu v grafu na **obr. 32** (na délce 6,475 m) odpovídá okraji závitů na dopravníku. Při průměrné délce drátu v jednom závitě 3,14 m, můžeme proložit výsledné hodnoty sinusovkou. Srovnáním sinusovky s naměřenými daty je zřejmé, že data vykazují trend. Minima odpovídají okrajům závitů (na jedné straně dopravníku byly zřejmě závity uloženy hustěji (délka 3,325 a 6,475 m) a maxima pak odpovídají rychleji ochlazovaným částem drátu ve středu dopravníku (délka 4,025 a 5,775 m).

Následující termovizní snímek a graf průběhu teploty po délce půlky závitu drátu od jednoho okraje ke druhému **obr. 33** přibližně odpovídá situaci, která byla popsána v předchozím odstavci, tedy na obou stranách dopravníku je vyšší teplota než ve středu dopravníku.



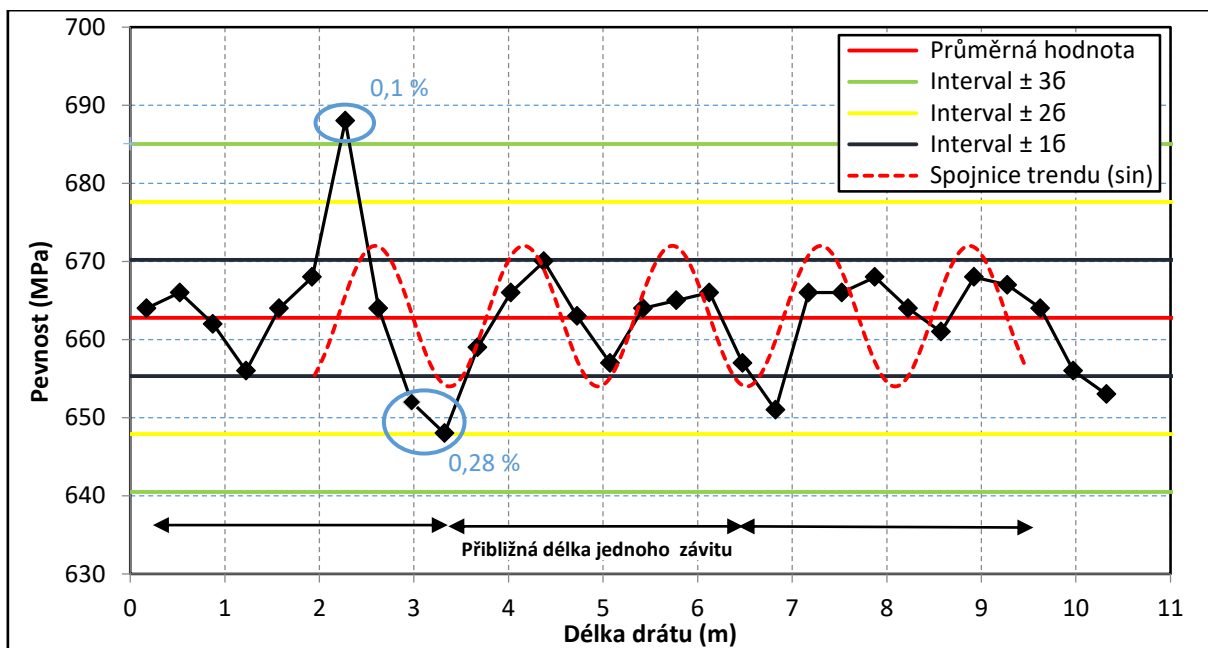
Obr. 33 vlevo: Termovizní snímek drátu na řetězovém dopravníku, vpravo: Graf průběhu teploty po délce půlky závitu (červená čára v termovizním snímku) od jednoho okraje k druhému [21]

Pokud spojíme naše naměřené hodnoty meze kluzu s průběhem z teploty (**obr. 33**) uvidíme poměrně jasnou korelaci mezi teplotou na dopravníku a výslednou mezí kluzu (**obr. 34**).

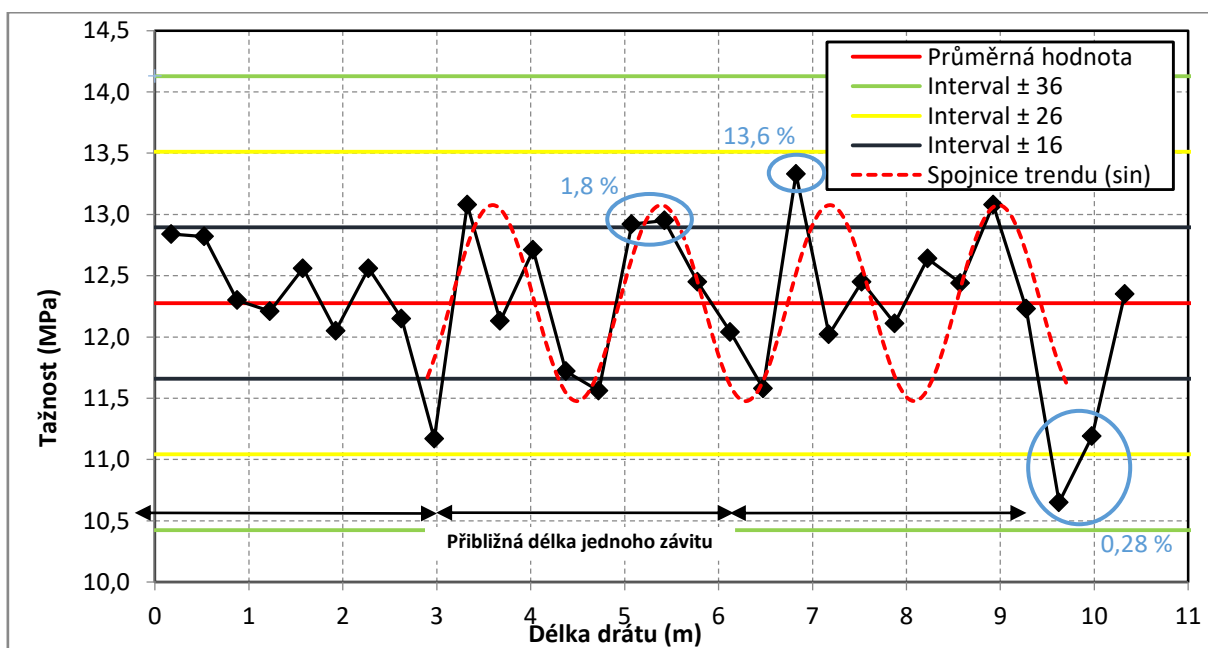


Obr. 34 Superpozice naměřených hodnot meze kluzu (střed svitku, zkušební vzorky 14 – 19) (červená křivka) a naměřené teploty drátu na řetězovém dopravníku (modrá křivka)

V následujících grafech na **obr. 35** a **36** máme hodnoty pevnosti a tažnosti po délce drátu. V grafu pevnosti na **obr. 35** jsme identifikovali celkem dvě málo pravděpodobné situace. Hodnota na délce 2,27 m by měla odpovídat středu závitů umístěného na dopravníku a hodnoty naměřené za sebou na délce 2,97 m a 3,32 m by měly odpovídat krajím závitů uložených na dopravníku. Podle naší teorie budou pevnostní maxima odpovídat středům závitů a pevnostní minima krajům závitů. U tažnosti na **obr. 36** jsme identifikovali tři nepravděpodobné situace. Hodnoty naměřené za sebou na délce 5,2 m a 5,3 m, pak hodnota naměřená na délce 6,82 m a dvě za sebou naměřené hodnoty na délce 9,62 m a 9,97 m. Identifikované body jsou u obou grafů označeny modře a je u nich uvedena jejich procentuální pravděpodobnost. V grafech jsou vyneseny průměrné hodnoty a také hranice intervalů $\mu \pm 3\sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ a $\mu \pm \sigma$, které nám v grafech znázorňují pravděpodobnost výskytu naměřených hodnot (σ je směrodatná odchylka). Výsledky blízké se střední hodnotě (μ – červená čára) jsou pravděpodobnější než výsledky odlehlejší.



Obr. 35 Naměřené hodnoty pevnosti z 30 zkušebních vzorků (černá čára) proložené sinusovkou (červená čárkovaná). Porovnáním sinusovky s naměřenými hodnotami je zřejmé, že data vykazují trend. Pevnostní minima odpovídají okrajům závitu umístěných na dopravníku. Naopak pevnostní maxima odpovídají středu závitu na dopravníku. Body označené modře uvádějí málo pravděpodobné situace s procentuálním vyjádřením pravděpodobnosti. Na proces má vliv nějaká vymezená příčina pravděpodobně vysoká teplota resp. nízká rychlost ochlazování



Obr 36 Naměřené hodnoty tažnosti z 30 zkušebních vzorků (černá čára) proložené sinusovkou (červená čárkovaná). Porovnáním sinusovky s naměřenými hodnotami nám data trend vykazují jen mezi 3 a 7 m. Na této délce minima a maxima tažnosti odpovídají krajům a středům závitu, ale není splněn předpoklad, že tažnost na okraji závitu bude vyšší, jak jsme mohli pozorovat na **obr. 35** a **32**. Body označené modře uvádějí málo pravděpodobné situace s procentuálním vyjádřením pravděpodobnosti. Na proces má vliv nějaká vymezená příčina pravděpodobně vysoká teplota resp. nízká rychlost ochlazování

7.2 Drát válcovaný za tepla s následným natažením za studena

7.2.1 Data a popisná statistika

V tabulce 16, 17 a 18 jsou uvedeny výsledky tahové zkoušky ze středu svitku po válcování za tepla s následným natažením za studena a jejich číselné charakteristiky. Minimální a průměrné hodnoty mechanických vlastností pro válcovaný drát za tepla s následným natažením za studena najdeme v tabulce 8 uvedené v kapitole 4.2.2.

Tabulka 16 Výsledky tahové zkoušky ze středu svitku po válcování za tepla s následným natažením za studena. Výsledné naměřené hodnoty vyznačené červeně, nesplňují minimální hodnotu pro jakost oceli B500B

Č. vz.	Část vz. / stav	S ₀ (mm ²)	E (GPa)	R _{p0.2, nom} (MPa)	R _{m, nom} (MPa)	A _{gt} (%)	R _m /R _{p0.2} (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
1	Střed / KOCH	116,26	183	572	688	6,94	1,21	0,9122
2	Střed / KOCH	116,26	189	543	666	8,00	1,22	0,9102
3	Střed / KOCH	115,66	180	559	671	6,54	1,20	0,9062
4	Střed / KOCH	116,39	178	544	671	7,44	1,23	0,9136
5	Střed / KOCH	116,81	176	566	681	5,79	1,20	0,9158
6	Střed / KOCH	116,82	159	580	683	6,42	1,18	0,9151
7	Střed / KOCH	116,60	133	565	681	5,89	1,20	0,9125
8	Střed / KOCH	116,78	183	533	673	6,69	1,26	0,9159
9	Střed / KOCH	116,92	168	561	671	5,09	1,20	0,9178
10	Střed / KOCH	116,89	173	562	694	7,43	1,23	0,9160
11	Střed / KOCH	116,41	186	573	687	6,31	1,20	0,9122
12	Střed / KOCH	116,62	171	555	684	7,59	1,23	0,9147
13	Střed / KOCH	116,26	172	577	681	8,12	1,18	0,9104
14	Střed / KOCH	116,70	173	561	676	7,41	1,20	0,9144
15	Střed / KOCH	116,58	160	547	679	7,78	1,24	0,9151
16	Střed / KOCH	115,91	189	557	679	8,15	1,22	0,9079
17	Střed / KOCH	116,04	170	558	672	7,56	1,20	0,9095
18	Střed / KOCH	116,43	167	557	671	5,86	1,21	0,9129
Průměr	Střed / KOCH	116,46	172,78	559,44	678,22	6,95	1,21	0,9129
Směr. od.	Střed / KOCH	0,3527	13,2911	12,2581	7,4008	0,9109	0,0207	0,0031
Minimum	Střed / KOCH	115,66	133,00	533,00	666,00	5,09	1,18	0,9062
Maximum	Střed / KOCH	116,92	189,00	580,00	694,00	8,15	1,26	0,9178
Rozpětí	Střed / KOCH	1,26	56,00	47,00	28,00	3,06	0,08	0,0116

Z uvedených dat a vypočtených průměrných hodnot je zřejmé, že drát po následném natažení za studena splňuje požadavky jak na minimální (525 MPa), tak průměrné (535 MPa) hodnoty meze kluzu. Minimální (1,08) a průměrné (1,15) hodnoty poměru pevnosti k mezi kluzu jsou také s rezervou splněny. U výsledné naměřené tažnosti celkem 4 naměřené hodnoty nesplňují minimální požadavky (5,9 %). Celková průměrná tažnost (6,5 %) vyhovuje požadavkům normy velmi těsně.

Tabulka 17 Výsledky tahové zkoušky ze začátku svitku po válcování za tepla s následným natažením za studena. Výsledné naměřené hodnoty vyznačené červeně, nesplňují minimální hodnotu pro jakost oceli B500B

Č. vz.	Část vz. / stav	S ₀ (mm ²)	E (GPa)	R _{p0,2, nom} (MPa)	R _{m, nom} (MPa)	A _{gt} (%)	R _m /R _{p0,2} (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
1	Úp. zač. / KOCH	117,93	174	596	709	7,36	1,19	0,9258
2	Úp. zač. / KOCH	117,83	162	599	704	7,23	1,18	0,925
3	Úp. zač. / KOCH	117,86	197	583	706	7,21	1,21	0,9252
Průměr	Úp. zač. / KOCH	117,87	177,67	592,67	706,33	7,27	1,19	0,9253
Směr. od.	Úp. zač. / KOCH	0,0513	17,7858	8,5049	2,5166	0,0814	0,0153	0,0004
4	St. zač. / KOCH	117,76	175	575	706	7,51	1,23	0,9244
5	St. zač. / KOCH	117,67	187	584	707	7,61	1,21	0,9237
6	St. zač. / KOCH	118,02	208	586	707	6,35	1,21	0,9264
Průměr	St. zač. / KOCH	117,82	190,00	581,67	706,67	7,16	1,22	0,9248
Směr. od.	St. zač. / KOCH	0,1818	16,7033	5,8595	0,5774	0,7004	0,0115	0,0014
7	Zač. / KOCH	117,56	189	568	705	7,44	1,24	0,9228
8	Zač. / KOCH	117,72	193	572	705	7,12	1,23	0,9241
9	Zač. / KOCH	116,88	175	578	696	6,5	1,2	0,9175
Průměr	Zač. / KOCH	117,387	185,67	572,67	702,00	7,02	1,22	0,9215
Směr. od.	Zač. / KOCH	0,4460	9,4516	5,0332	5,1962	0,4779	0,0208	0,0035
Cel. Průměr	KOCH	117,69	184,44	582,33	705,00	7,15	1,21	0,9239
Cel. směr. od.	KOCH	0,3343	14,1608	10,4043	3,6742	0,4391	0,0196	0,0026
Cel. min.	KOCH	116,88	162,00	568,00	696,00	6,35	1,18	0,9175
Cel. max.	KOCH	118,02	208,00	599,00	709,00	7,61	1,24	0,9264
Cel. rozpětí	KOCH	1,14	46,00	31,00	13,00	1,26	0,06	0,0089

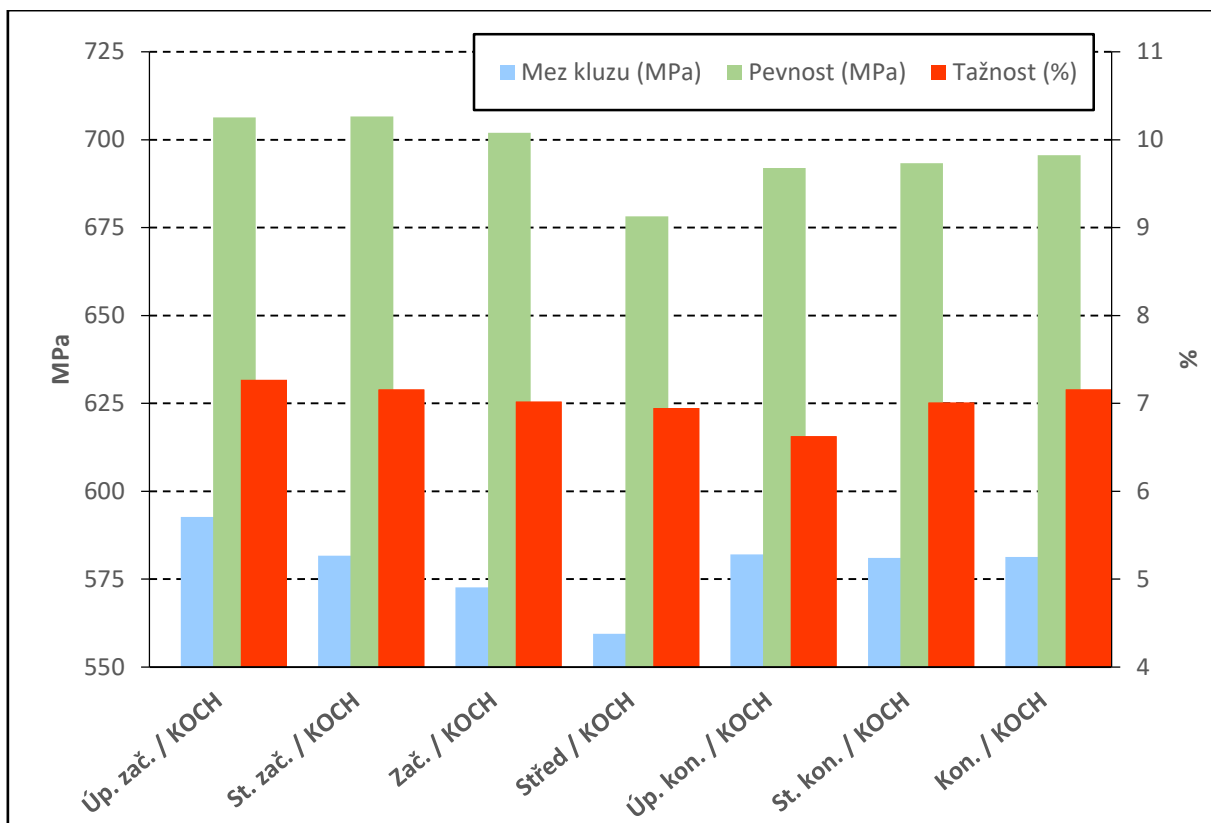
Naměřená data a vypočtené průměrné hodnoty mechanických vlastností pro ocel jakosti B500B ze začátku svitku jsou jak pro mez kluzu (525, 535 MPa), tažnost (5,9; 6,5 %) tak i pro poměr pevnosti k mezi kluzu (1,08; 1,15) s výsledkem vyhovující.

Tabulka 18 Výsledky tahové zkoušky z konce svitku po válcování za tepla s následným natažením za studena. Výsledné naměřené hodnoty vyznačené červeně, nesplňují minimální hodnotu pro jakost oceli B500B

Č. vz.	Část vz. / stav	S_0 (mm ²)	E (GPa)	$R_{p0,2, nom}$ (MPa)	$R_{m, nom}$ (MPa)	A_{gt} (%)	$R_m/R_{p0,2}$ (%)	Metr. hm. (kg·m ⁻¹)
1	Úp. kon. / KOCH	117,77	157	588	694	6,52	1,18	0,9245
2	Úp. kon. / KOCH	117,81	176	578	690	6,52	1,19	0,9248
3	Úp. kon. / KOCH	117,23	165	580	692	6,84	1,19	0,9203
Průměr	Úp. kon. / KOCH	117,60	166,00	582,00	692,00	6,63	1,19	0,9232
Směr. od.	Úp. kon. / KOCH	0,3239	9,5394	5,2915	2,0000	0,1848	0,0058	0,0025
4	St. kon. / KOCH	118,13	169	581	693	6,70	1,19	0,9273
5	St. kon. / KOCH	117,92	197	569	686	7,39	1,21	0,9256
6	St. kon. / KOCH	118,18	184	593	701	6,93	1,18	0,9277
Průměr	St. kon. / KOCH	118,08	183,33	581,00	693,33	7,01	1,19	0,9269
Směr. od.	St. kon. / KOCH	0,1380	14,0119	12,0000	7,5056	0,3513	0,0153	0,0011
7	Kon. / KOCH	118,20	183	582	696	7,10	1,2	0,9278
8	Kon. / KOCH	118,14	180	581	696	6,96	1,2	0,9274
9	Kon. / KOCH	117,80	178	581	695	7,41	1,2	0,9247
Průměr	Kon. / KOCH	118,05	180,33	581,33	695,67	7,16	1,20	0,9266
Směr. od.	Kon. / KOCH	0,2157	2,5166	0,5774	0,5774	0,2303	0,0000	0,0017
Cel. průměr	KOCH	117,91	176,56	581,44	693,67	6,93	1,19	0,9256
Cel. směr. od.	KOCH	0,3087	11,7379	6,5786	4,2131	0,3296	0,0100	0,0024
Minimum	KOCH	117,23	157,00	569,00	686,00	6,52	1,18	0,9203
Maximum	KOCH	118,20	197,00	593,00	701,00	7,41	1,21	0,9278
Rozptyl	KOCH	0,97	40,00	24,00	15,00	0,89	0,03	0,0075

Naměřená data a vypočtené průměrné hodnoty mechanických vlastností pro ocel jakosti B500B z konce svitku jsou jak pro mez kluzu (525, 535 MPa), tak i pro poměr pevnosti k mezi kluzu (1,08; 1,15) vyhovující. Výsledně vypočtená průměrná tažnost úplného konce splňuje stanovené požadavky (6,5 %). Minimální naměřené hodnoty tažnosti jsou s výsledkem vyhovující (5,9).

Pro lepší orientaci je na **obr. 37** znázorněn graf pro podrobnější porovnání průměrných hodnot mechanických vlastností jednotlivých částí (začátku, středu a konce svitku) po válcování za tepla s následným natažením za studena. Začátek a konec svitku je rozdělen na tři části: Úplný začátek (konec), střed začátku (konce) a začátek (konec).



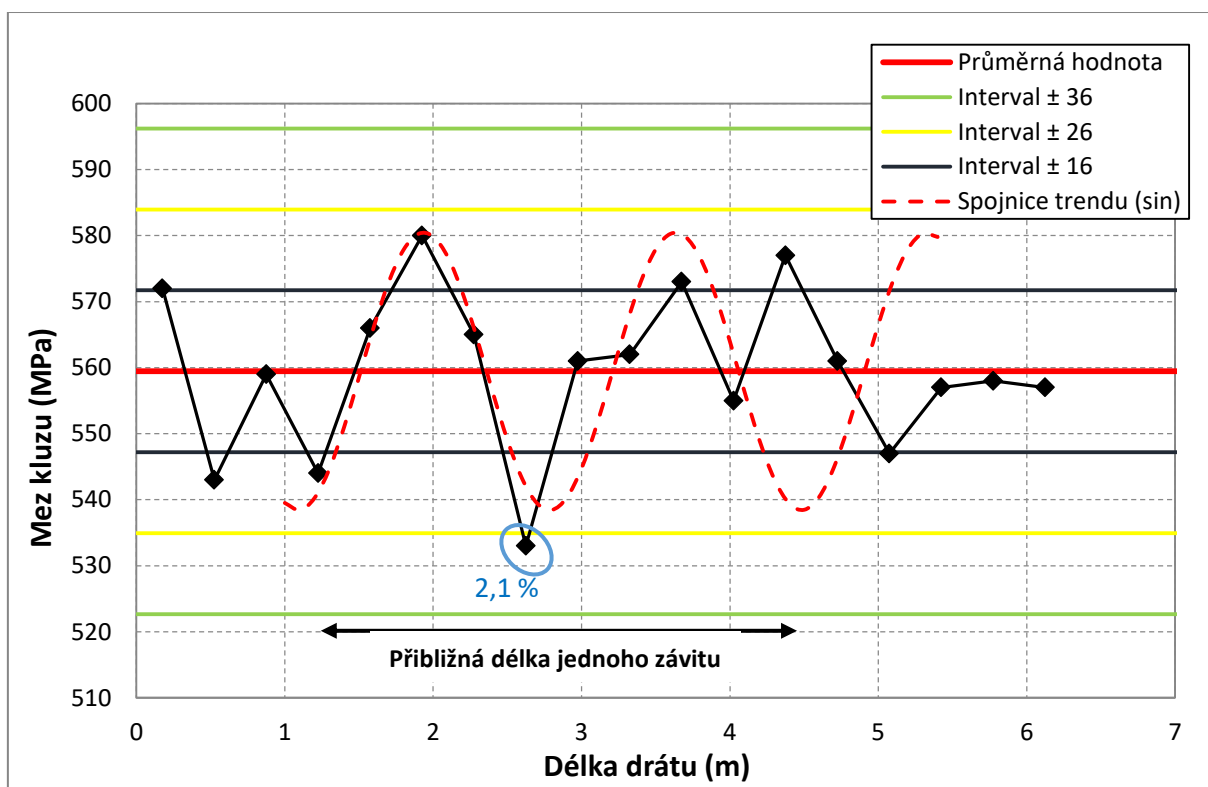
Obr. 37 Znávorňuje průměrné hodnoty mechanických vlastností začátku, středu a konce svitku po válcování za tepla s následným natažením za studena. Začátek a konec svitku je rozdělen na tři části: Úplný začátek (konec), střed začátku (konce) a začátek (konec)

Po porovnání naměřených a vypočtených hodnot vzorků ze středu svitku s naměřenými a vypočtenými hodnotami vzorků ze začátku a konce svitku je zřejmé, že naměřené hodnoty mechanických vlastností začátku a konce svitku vyšly podstatně lépe než naměřené mechanické vlastnosti středu svitku. Průměrná celková mez kluzu ve středu svitku je o 3,9 % nižší, než celková průměrná mez kluzu na začátku svitku a o 3,7 % nižší než na konci svitku.

7.2.2 Analýza trendu ve středu svitku

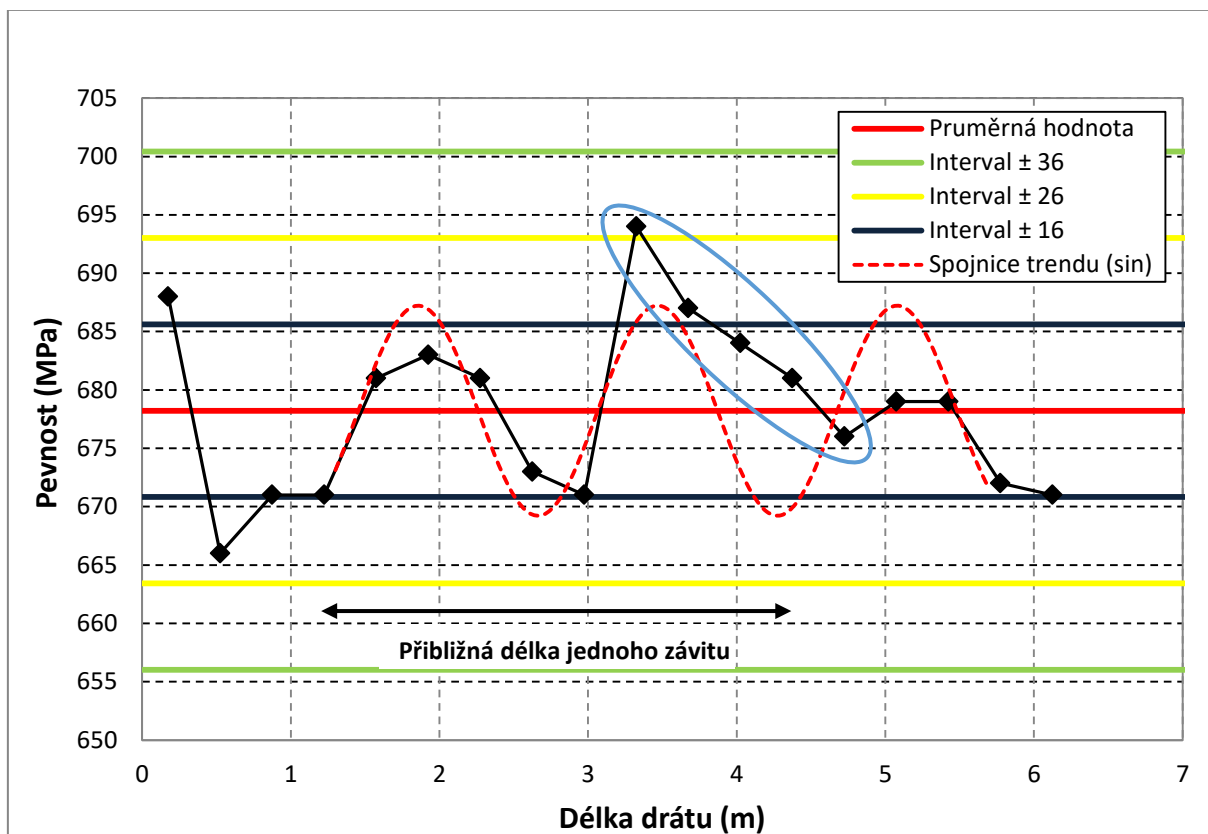
Princip je popsán v kapitole 6.1.2 Analýza trendu ve středu svitku. Stejně jako v kapitole věnované válcovanému drátu budeme hledat málo pravděpodobné situace na datech seřazených postupně po délce drátu. V následujících grafech na obr. 38, 39 a 40 jsou uvedeny hodnoty meze kluzu, pevnosti a tažnosti (černá křivka), které byly naměřeny z osmnácti zkušebních vzorků v závislosti na délce drátu. V grafech jsou vyneseny průměrné hodnoty a také hranice intervalů $\mu \pm 3\sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ a $\mu \pm \sigma$, které nám v grafech znázorňují pravděpodobnost výskytu naměřených hodnot (σ je směrodatná odchylka). Výsledky blízké se střední hodnotě (μ – červená čára) jsou pravděpodobnější, než výsledky odlehlejší.

V grafu na **obr. 38** jsou znázorněny naměřené hodnoty meze kluzu. V uvedeném grafu jsme identifikovali jednu málo pravděpodobnou situaci. Naměřené hodnoty na délce 1,92 m a 4,3 m (maxima meze kluzu) pravděpodobně odpovídají středům závitů při chladnutí drátu na řetězovém dopravníku. Naměřené minimum meze kluzu na délce 2,62 m pravděpodobně odpovídá kraji závitu. Identifikovatelný bod je označen modře a je u něj uvedena jeho procentuální pravděpodobnost.



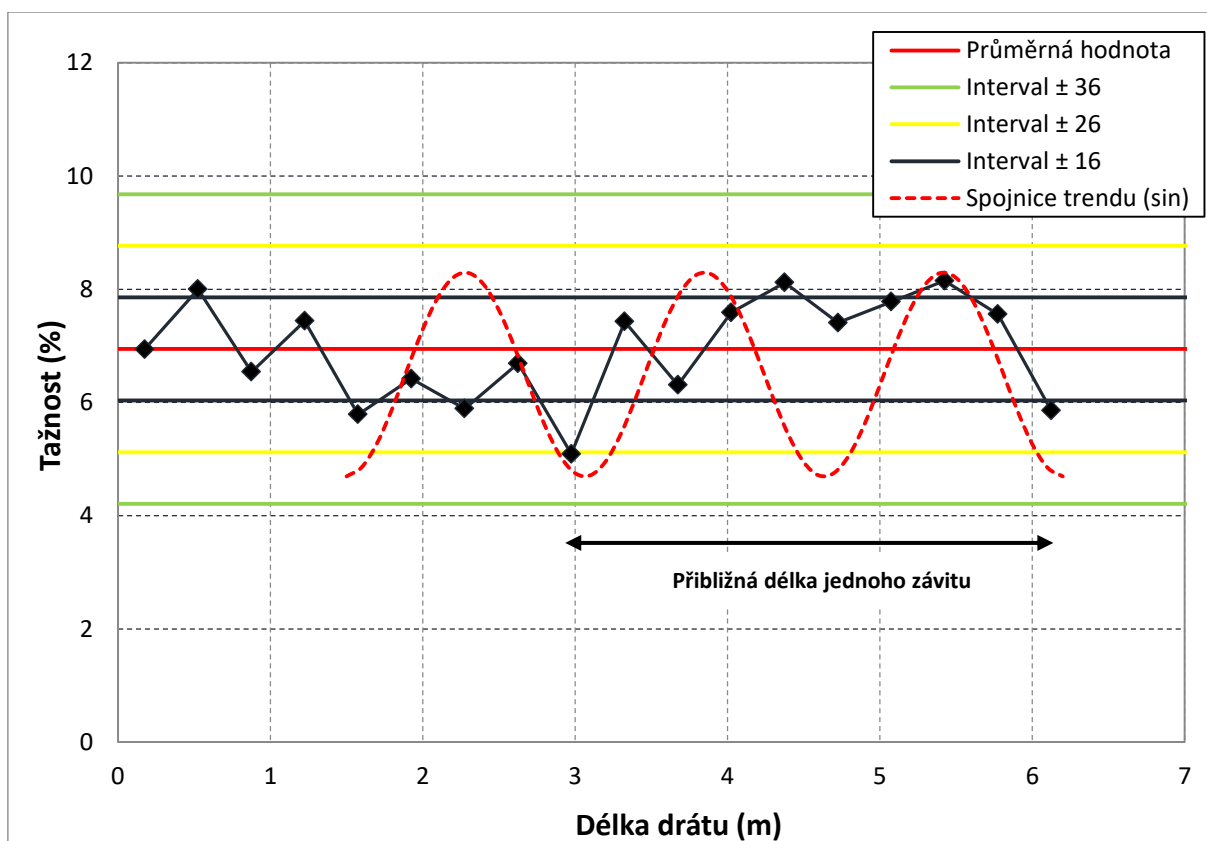
Obr. 38 Naměřené hodnoty meze kluzu z 18 zkušebních vzorků (černá čára) proložené sinusovkou (červená čárkovaná). Porovnáním sinusovky s naměřenými hodnotami je zřejmé, že data vykazují trend. Minima meze kluzu odpovídají okrajům závitu umístěných na dopravníku. Naopak maxima meze kluzu odpovídají středu závitu na dopravníku. Body označené modře uvádějí málo pravděpodobné situace s procentuálním vyjádřením. Na proces vliv nějaká vymežitelná příčina pravděpodobně vysoká teplota resp. nízká rychlost ochlazování

V grafu na **obr. 39** jsou znázorněny naměřené hodnoty pevnosti. V uvedeném grafu jsme identifikovali jednu málo pravděpodobnou situaci, kdy pět po sobě jdoucích bodů klesá (označeno modře). Naměřené hodnoty na délce 0,17 m a 3,32 m (pevnostní maxima) by měly odpovídat středům závitů. Naopak hodnota na délce 2,97 m (pevnostní minimum) by měla odpovídat kraji závitu.



Obr. 39 Naměřené hodnoty pevnosti z 18 zkušebních vzorků (černá čára) proložené sinusovkou (červená čárkovaná). Porovnáním sinusovky s naměřenými hodnotami je zřejmé, že data vykazují trend. Pevnostní minima odpovídají okrajům závitu umístěných na dopravníku. Naopak pevnostní maxima odpovídají středu závitu na dopravníku. Body označené modře uvádějí málo pravděpodobnou situaci. Na body označené modře má vliv nějaká vymežitelná příčina pravděpodobně vysoká teplota, resp. nízká rychlost ochlazování

V grafu na **obr. 40** jsou znázorněny naměřené hodnoty tažnosti na délku drátu.



Obr. 40 Naměřené hodnoty tažnosti z 18 zkušebních vzorků (černá čára) proložené sinusovkou (červená čárkovaná). Porovnáním sinusovky s naměřenými hodnotami nám data žádný trend nevykazují. Minima a maxima tažnosti neodpovídají krajům ani středům závitu, jak jsme mohli pozorovat na **obr. 38 a 39**

7.3 Analýza vlivu cold stretchingu na rozložení naměřených hodnot meze kluzu

7.3.1 Vliv cold stretchingu na průměrné hodnoty

V **tabulce 19** jsou pro porovnání uvedeny průměrné hodnoty mechanických vlastností drátu válcovaného za tepla a drátu válcovaného za tepla s následným natažením za studena. Procentuální vyjádření uvádí, jak moc se po natažení za studena zvýšila mez kluzu a pevnost na úkor tažnosti. Svitek jsme rozdělili na tři části začátek, střed a konec, kde začátek, střed i konec svitku jsou znázorněny z celkového průměru mechanických vlastností.

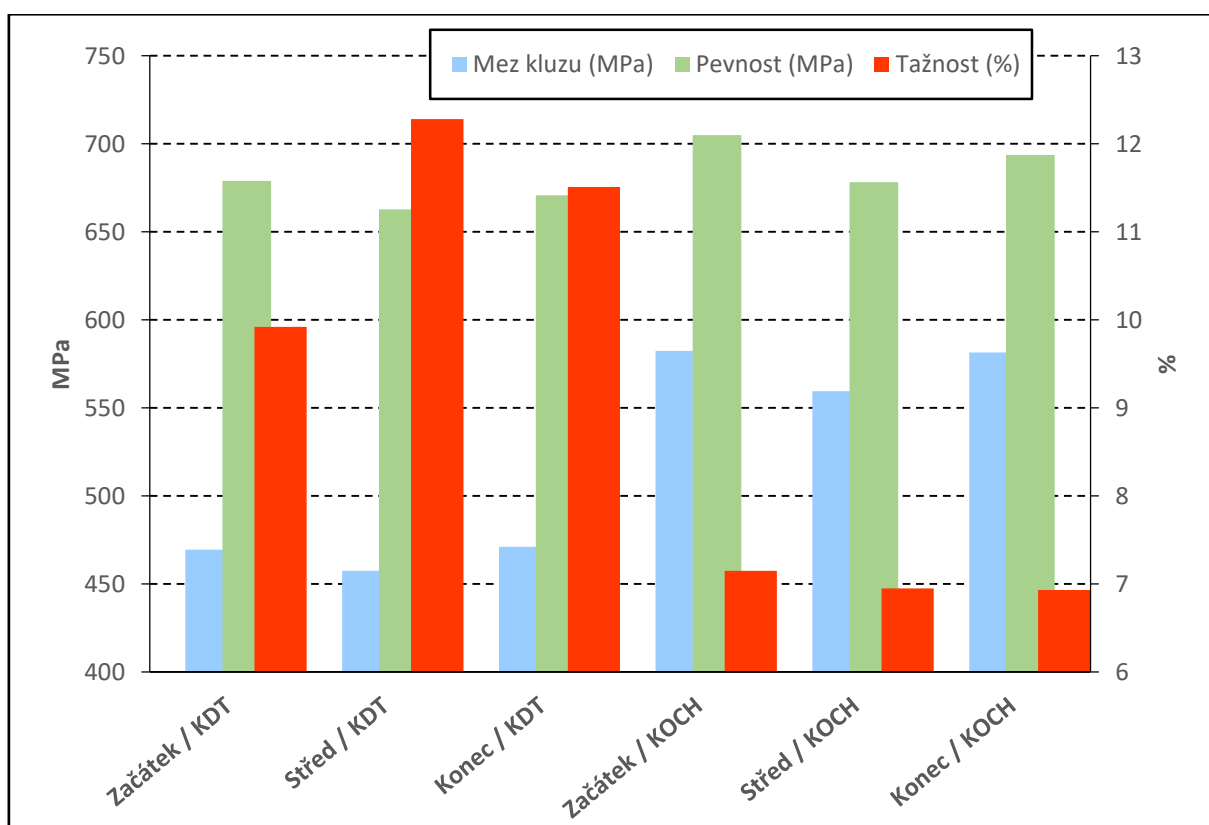
Tabulka 19 Znárodnuje procentuální rozdíl mechanických vlastností svitku po válcování za tepla a svitku, který je následně protahován za studena. Průměrné hodnoty vyznačené červeně nesplňují interní předpis AMO či minimální hodnoty pro žebírkový drát jakosti B500B s průměrem 12 mm

	Mechanické vlastnosti	KDT	KOCH	Procentuální rozdíl (%)
Začátek	$R_{p0,2, \text{nom}}$ (MPa)	469,33	582,33	19,4
	$R_{m, \text{nom}}$ (MPa)	679	705	3,68
	A_{gt} (%)	9,92	7,15	-27,92
Střed	$R_{p0,2, \text{nom}}$ (MPa)	457,47	559,44	18,22
	$R_{m, \text{nom}}$ (MPa)	662,77	678,22	2,27
	A_{gt} (%)	12,28	6,95	-43,4
Konec	$R_{p0,2, \text{nom}}$ (MPa)	471,11	581,44	18,97
	$R_{m, \text{nom}}$ (MPa)	670,67	693,67	3,31
	A_{gt} (%)	11,51	6,93	-39,79

Procentuálním porovnáním mechanických vlastností svitku po válcování za tepla a po natažení za studena na lince KOCH je zřejmé, že ve všech částech (začátku, středu a konce svitku) platí pro tažnost a pevnost následující pravidlo. Čím vyšší tažnost po válcování za tepla, tím více se po natažení na lince KOCH tažnost sníží. Pro pevnost toto pravidlo platí přesně naopak. Čím menší pevnost po válcování za tepla, tím méně se po natažení na lince KOCH pevnost zvýší. U meze kluzu jsme žádné podobné pravidlo nepozorovali. Za povšimnutí ovšem stojí rozdíl meze kluzu začátku a konce svitku oproti středu svitku, kde začátek a konec svitku nebyl chlazen vodou a měl po válcování za tepla vyšší mez kluzu

oproti středu svitku. Po protažení za studena se tento rozdíl ještě zvýšil. Náš předpoklad, že místa s nižší hodnotou meze kluzu se budou deformovat více, se ukázal jako chybný. Dostatečná zásoba plasticity po válcování za tepla umožnila použít při následném natažení za studena (cold stretchingu) větší deformaci a tím dohnat chybějící úroveň meze kluzu na úkor tažnosti.

V následujícím grafu na **obr. 41** jsou pro porovnání znázorněny průměrné hodnoty mechanických vlastností jednotlivých částí (začátku, středu a konce svitku) po válcování za tepla a po válcování za tepla s následným natažením za studena.

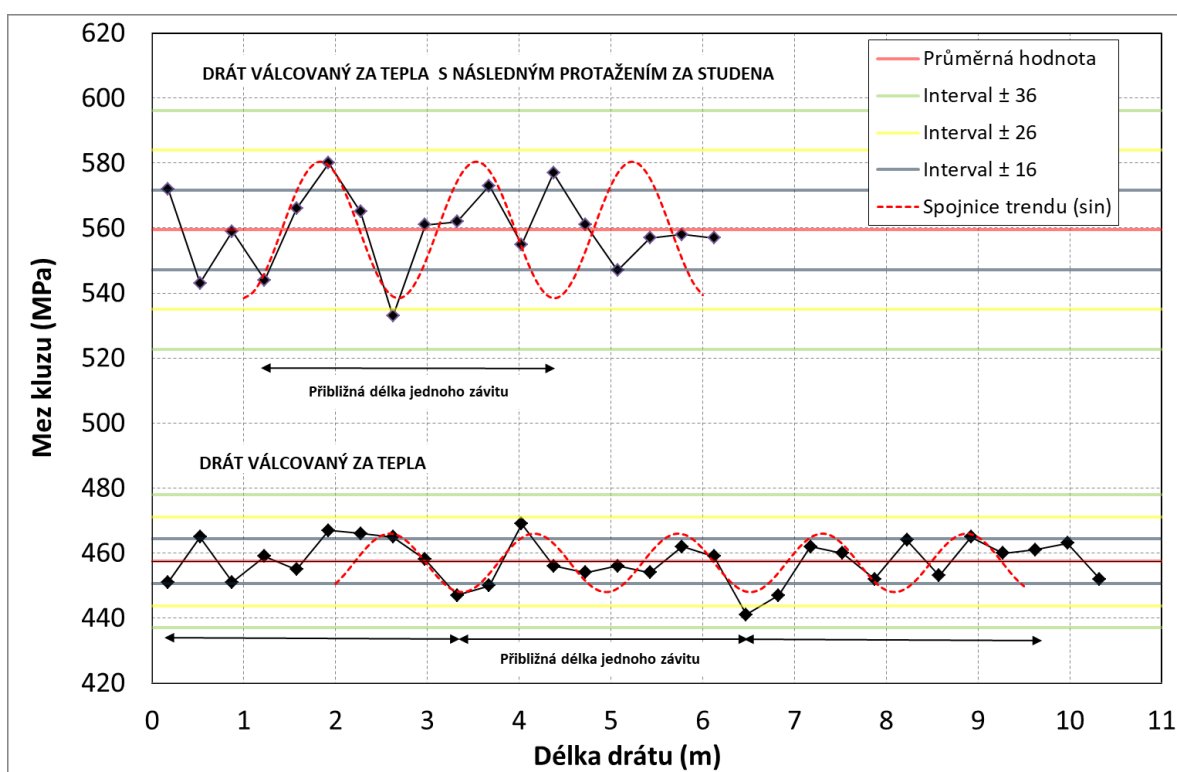


Obr. 41 Znáznorňuje pro porovnání průměrné hodnoty mechanických vlastností jednotlivých částí (začátku, středu a konce svitku) po válcování za tepla a po válcování za tepla s následným natažením za studena

7.3.2 Vliv cold stretchingu na rozptyl

Cílem této analýzy je rozhodnout, jak moc a v jakém smyslu se změní mez kluzu a jeho rozložení po délce drátu po protažení za studena ve středu svitku. Vycházíme z principu linky KOCH, kdy je tahovému napětí vystaven drát mezi kladkami a S-rollerem, což je asi 6 metrů. Předpokládáme, že deformace v drátu nebude probíhat úplně rovnoměrně ale, že místa s nižší mezí kluzu se budou deformovat a tím i zpevňovat dříve a dojde tím k vyrovnání hodnoty meze kluzu po délce drátu. Podle našeho principu by výsledný drát měl mít po celé délce

téměř stejné hodnoty meze kluzu. Všechny hodnoty meze kluzu by měly ležet co nejbližně průměrné hodnoty (červená čára na obr. 42). V grafu na obr. 42 jsou pro porovnání znázorněny hodnoty meze kluzu drátu válcovaného za tepla a drátu válcovaného za tepla s následným natažením za studena. Na základě naměřených hodnot meze kluzu po natažení za studena si můžeme všimnout, že naměřené hodnoty po natažení na lince KOCH nejsou příliš vyrovnané v porovnání s naměřenými hodnotami po válcování za tepla. Náš předpoklad, že místa s nižší hodnotou meze kluzu se budou deformovat více a místa vyšší hodnotou meze kluzu se budou deformovat méně, se ukázal jako chybný.



Obr. 42 Znázorňuje hodnoty meze kluzu na délku drátu válcovaného za tepla (dolní část grafu) a válcovaného za tepla s následným natažením za studena (horní část grafu). Porovnáním rozptylu obou souborů dat je zřejmé, že po natažení za studena se rozptyl hodnot meze kluzu zvýšil

8 Závěr

Natažením za studena na lince KOCH jsme téměř po celé délce drátu ve středu svitku dosáhli požadovaných vlastností pro žebírkový drát jakosti B500B o průměru 12 mm. Z 18 odebraných vzorků, 4 naměřené hodnoty tažnosti nedosáhli požadovaných vlastností. Pouze po válcování za tepla byla výsledná mez kluzu a pevnost s výsledkem nevyhovujícím, ale zde se jednalo jen o provozní doporučení, které se bude dále (jak se rozjede běžná výroba) zpřesňovat. Dostatečná zásoba plasticity po válcování za tepla umožnila použít při následném natažení za studena (cold stretchingu) větší deformaci a tím dohnat chybějící úroveň meze kluzu na úkor tažnosti. Zpracování drátu na lince KOCH má zásadní vliv na dosažení požadovaných mechanických vlastností.

Na minimální nebo maximální naměřené hodnoty meze kluzu a pevnosti jak po válcování za tepla, tak po následném natažení za studena má vliv uložení závitů svitku na dopravník po válcování za tepla. Tato skutečnost byla zjištěna na základě analýzy naměřených hodnot. Vysoká teplota (resp. nízká rychlost ochlazování) na řetězovém dopravníku způsobí pokles meze kluzu. Můžeme říci, že oblast s minimální mezí kluzu odpovídá okrajům závitů na dopravníku. Při průměrné délce drátu v jednom závitu 3,14 m, můžeme v grafech proložit výsledné hodnoty sinusovkou. Srovnáním sinusovky s naměřenými daty je zřejmé, že data vykazují trend. Minima odpovídají okrajům závitů a maxima pak odpovídají rychleji ochlazovaným částem drátu ve středu dopravníku. Pokud bychom chtěli snížit rozptyl hodnot meze kluzu a pevnosti po válcování za tepla, byly by doporučeny tyto 2 možnosti řešení:

1) Přidat na okraje dopravníku přídavné chlazení krajů závitů.

2) Více roztáhnout závity na dopravníku a zpomalit rychlost dopravníku, čímž by se zvýšila doba chlazení. Toto řešení by mělo negativní dopad na produktivitu KDT.

Z naměřených hodnot začátku a konce svitku jsme dosáhli celkem překvapivých výsledků. Po válcování za tepla má začátek i konec svitku vyšší výslednou mez kluzu i pevnost a o něco nižší tažnost, než je tomu ve středu svitku. A to i přesto, že začátek a konec svitku není chlazen vodou. Vysvětlení, proč je tomu tak, najdeme na termovizních snímcích na **obr. 30**. Z obou termovizních snímků je patrné, že závity na začátku a na konci svitku jsou uspořádány volněji a chladnou tedy na dopravníku rychleji. Po sbalení do svitku se pak jedná o okraje svitku, které také chladnou rychleji. Tento fakt má zásadní dopad do provozní praxe,

kdy na základě našich výsledků můžeme doporučit, aby se nechlazené závity na začátku a na konci svitku nestříhaly. Dojde tak k úspoře cca 38 kg drátu u průměru 12 mm, což při hmotnosti svitku 1 200 kg představuje úsporu materiálu 3,2 %.

Předpokládaný vliv protažení na lince KOCH na snížení variability mechanických vlastností se se nám nepotvrdil. Po protažení za studena došlo ke zvětšení variability hodnot mechanických vlastností na začátku a na konci svitku oproti středu svitku. Podobný efekt jsme pozorovali v rámci jednoho závitu ve středu svitku, zde se také variabilita po protažení za studena znatelně zvýšila.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Betonářská výztuž*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Betonářská výztuž](https://cs.wikipedia.org/wiki/Betonářská_výztuž)
- [2] Manufacturing Process Route for Reinforcing Steels. *UK CARES, Certification for the Construction Industry* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.ukcares.com/downloads/guides/PART2.pdf>
- [3] KLEMM, Michael, WAGENFUHRER, Gerhard, WAGNER, Bernhard. *Der gereckte Betonstahl – ein einfaches Verfahren zur normgerechten Veredelung, Draht*. Vol. 44, N. 5, 1993, pp. 263-266
- [4] SCHINDLER, Ivo, KAWULOK Rostislav. *Teoretické základy tváření materiálu 1*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013.
- [5] TMT Temp curve. *Ispat Guru* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://ispatguru.com/quenched-and-tempered-reinforcement-bars-quenched-and-tempered-reinforcement-bars/tmt-temp-curve/>
- [6] GUO, Zhenhai. *Principles of reinforced concrete*. Oxford: Elsevier Butterworth-Hein, 2014. ISBN 978-0128008591.
- [7] DIN 488-1. *Betonstahl: Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009.
- [8] ÖNORM B 4707:2010. *Bewehrungsstahl – Anforderungen, Klassifizierung und Konformitätsnachweis*. Wien: Austrian Standards Institute, 2010.
- [9] ČSN 42 0139. *Ocel pro výztuž do betonu – Svařitelná betonářská ocel žebírková a hladká*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [10] POŠVÁROVÁ, Miloslava. *Technické podmínky TP 193 Svařování betonářské výztuže a jiné typy spojů: Monografie*. Mott MacDonald Praha, 2008. s 132. ISBN 978-80-904172-0-5.
- [11] DIN 488-3. *Betonstahl: Betonstahl in Ringen, Bewehrungsdraht*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009.

- [12] THIENEL Karl-Christian. *Werkstoffe I: Chemie und Eigenschaften metallischer Werkstoffe – Stahl und NE-Metalle*. München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2017.
- [13] SCHINDLER, Ivo a KAWULOK, Petr. *Deformační chování materiálů: Studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2013. ISBN 978-80-248-3361-3.
- [14] *Tuhý roztok*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tuh%C3%BD_roztok
- [15] PLUHARĚ, Jaroslav, PUŠKÁŘ, Anton, KOUTSKÝ, Jaroslav, MACEK, Karel a BENEŠ, Václav. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-411-87.
- [16] FABÍK, Richard. *Rozdělení a označování oceli: Studijní materiál*. 2017.
- [17] PECHÁČEK, Jiří. *Hodnocení podmínek vlivu zpracování na popouštěcí křehkosti oceli 22CrMoNiWV8-8*. Bakalářská práce. ČVUT, Praha, 2015.
- [18] HOU, Ziyong. *Study of precipitation in martensitic Fe-C-Cr alloys during tempering: Experiments and modelling*. Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015. ISBN 978-91-7595-756-2.
- [19] FABÍK, Richard. *Tváření kovů: učební text: studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [20] STAVINOHA, Jakub. *Mikrostruktura a mechanické vlastnosti ocelí*. Bakalářská práce. VUT, Brno, 2008.
- [21] Interní materiály společnosti ArcelorMittal Ostrava a.s.