



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# STRUKTURNĚ-MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY VYBRANÉHO TYPU NÍZKOUHLÍKOVÉ OCELI PO TAŽENÍ ZA STUDENA A TEPELNÉM ZPRACOVÁNÍ

STRUCTURAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SELECTED TYPE OF LOW-CARBON  
STEEL AFTER COLD DRAWING AND HEAT TREATMENT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Maroš Stopka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.

BRNO 2023





## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství  
Student: **Maroš Stopka**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.**  
Akademický rok: 2022/23

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

### **Strukturně–mechanické charakteristiky vybraného typu nízkouhlíkové oceli po tažení za studena a tepelném zpracování**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Určete strukturně–mechanické charakteristiky vybraného typu oceli používané pro tažení drátů ve výchozím stavu, v jednotlivých stádiích redukce průměru a po následném tepelném zpracování v olověné lázni. Na základě naměřených výsledků vytvořte matematický model pro jednotlivá stadia tohoto procesu.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Provést literární studii se zaměřením na tváření za studena, při které se používá technologie tažení ocelového drátu průvlaky.

Popsat procesy probíhající v materiálu při následném tepelném zpracování– rekrytalizačním žihání.

Cílem experimentální části práce bude zhodnocení stavu vybraného typu oceli po různých stupních deformace a následném tepelném zpracování.

Budou provedeny podrobná metalografická hodnocení struktury materialu a měření základních mechanických charakteristik s možností vypracování matematického modelu.

#### **Seznam doporučené literatury:**

[1] ENGHAG, P. Steel wire technology, Repro Orebro University, 2008, ISBN 91-631-1962-

[2] MARCOL, J. Tažený ocelový drát- 1 a 2 díl, ŽDB 1996.

[3] BEUNENS, P. Technologies of wire – cold drawing. Interní dokument. N. V. Bekaert. Zvevegen 1992.

[4] HUMPHREYS, F. J. a HATHERLY, M.: Recrystallization and related annealing phenomena. 2nd ed. Boston: Elsevier, 2004, ISBN 978-0-08-044164-1

[5] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-858-6795-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na změny mechanických vlastností nízkouhlíkového drátu, který byl tažen za studena a následně tepelně zpracován. Mechanické zkoušky, z kterých byly změřeny hodnoty prodloužení, smluvní meze pevnosti, tažnost a počet krutů, byly provedeny na všech vzorcích do 24 hodin od jejich odebrání. Na galvanické lince byly stanoveny dvě různé rychlosti výroby, za účelem dosažení dvou různých časových intervalů žíhacího procesu. Experiment byl proveden po všech stupních redukce průměru drátu včetně vstupního materiálu. Tato práce také zahrnuje metalografické analýzy vzorků leštěných, ale také leptaných. Z těchto snímků byly následně vybrány nejvíce reprezentativní. Z výsledků vyplývá, že deformace způsobila změny v mechanických vlastnostech a zvýšení deformačního zpevnění, které bylo následně odstraněno tepelným zpracováním.

### **Klíčová slova**

tažení za studena; nízkouhlíkový ocelový drát; tepelné zpracování; rekrytalizační žíhání; mez pevnosti; tažnost; deformační zpevnění; mechanické zkoušky

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis focuses on changes in the mechanical properties of low-carbon wire that has been cold-drawn and subsequently heat-treated. Mechanical tests, from which the values of elongation, yield strength and tensile strength were measured, were performed on all samples within 24 hours after they were collected. Two different production rates were established on the hot dip galvanizing line to achieve different time intervals of the annealing process. The experiment was performed at all stages of wire diameter reduction, including the input material. This work also includes metallographic analyzes of samples that have been both polished and etched. The most representative samples were selected for analysis. The results show that deformation caused changes in mechanical properties and an increase in strain hardening, which was subsequently removed by heat treatment.

### **Key words**

cold drawing; low carbon steel wire; heat treatment; recrystallization annealing; ultimate tensile strength; ductility; strain hardening; mechanical tests



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

STOPKA, Maroš. *Strukturně-mechanické charakteristiky vybraného typu nízkouhlikové oceli po tažení za studena a tepelném zpracování* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149233>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Bohumil Pacal.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

---

Datum

---

Maroš Stopka

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Bohumilu Pacalovi, CSc. za cenné rady, užitečné připomínky a odborné vedení při psaní této závěrečné práce. Chtěl bych také poděkovat mým rodičům za podporu při studiu i mimo něj. Závěrem chci také poděkovat firmě Bekaert Bohumín, s.r.o. za nabídku vypracování této bakalářské práce.

## Obsah

ÚVOD .....	6
Cíl práce .....	7
1 Profil společnosti .....	8
1.1 Bekaert .....	8
1.2 Bekaert Bohumín .....	8
2 Tažení ocelového drátu .....	9
2.1 Tažení .....	9
2.2 Teorie tažení .....	9
2.3 Povrchová úprava ocelového drátu .....	11
2.3.1 Tvorba okují a proces odstranění okují .....	11
2.3.2 Povrchová úprava .....	12
2.4 Analýza deformace materiálu v průvlaku .....	13
2.5 Plastická deformace a deformační zpevnění .....	15
2.5.1 Plastická deformace .....	15
2.5.2 Deformační zpevnění .....	17
2.5.3 Exponent deformačního zpevnění .....	19
2.5.4 Hlavní strukturní změny .....	20
3 Tepelné zpracování .....	21
3.1 Žihání .....	22
3.1.1 Žihání s překrytí .....	23
3.1.2 Žihání bez překrytí .....	23
3.2 Rekrystalizační žihání .....	23
3.3 Žihání ke snížení pnutí .....	25
3.4 Žihání na měkko .....	25
4 Mechanické zkoušky .....	27
4.1 Zkouška tahem .....	27
4.2 Zkouška drátu krutem .....	28
5 Proces výroby drátu v Bekaert Bohumín .....	30
6 Experiment .....	31
6.1 Popis experimentu .....	31
6.2 Měření mechanických vlastností .....	32
6.2.1 Zkouška tahem .....	32



6.2.2	Zkouška krutem.....	33
6.3	Výsledky měření mechanických vlastností.....	34
6.3.1	Výsledky zkoušky tahem .....	34
6.3.2	Výsledky zkoušky krutem.....	36
6.4	Metalografická analýza .....	37
6.4.1	Metalografická analýza vměstků v materiálu .....	38
6.4.2	Detailní metalografická analýza mikrostruktury.....	39
6.4.3	Metalografická analýza mikrostruktury .....	43
6.5	Exponent deformačního zpevnění.....	45
7	Diskuse.....	47
8	Závěry .....	49
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	50
	SEZNAM PŘÍLOH.....	52

# ÚVOD

Výroba a zpracování ocelového drátu se řadí k nejrozšířenějším strojírenským oborům. Dráty všech druhů a provedení se vyskytují všude kolem nás. Nacházejí se jak v automobilech (kordy pneumatik), tak v betonových konstrukcích (armatury). Můžeme je nalézt také ve formě pletiva na plotech, jako sponky do vlasů a mnoho dalšího. Rozměry drátů mají velkou variabilitu od desetin milimetrů až po několik centimetrů tlustá ocelová lana. Drát je vyráběn zejména procesem zvaným tažení za studena. Při tomto procesu je vstupní materiál válcovaný drát o průměru až 30 mm navinut do svitků s hmotností dosahující až 2 tuny.

V teoretické části je popsán princip výroby ocelového drátu, proces povrchové úpravy a také popis plastické deformace s následným tepelným zpracováním. Další část teoretické práce je věnována základním mechanickým zkouškám, které jsou použity pro námi zvolený ocelový drát.

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na popis a následné vyhodnocení mechanických zkoušek prováděných ve firmě Bekaert Bohumín, s.r.o., s doplněním metalografických analýz prováděných ve firmě Bekaert Hlohovec, a.s. Experiment je sestaven z tažení drátu o počátečním průměru 5,5 mm na finální průměr 1,97 mm. Poté následovalo tepelné zpracování, které bylo prováděno ve dvou různých rychlostech průtahu olověnou lázní. Po každém průtahu průvlakem a olověnou lázní byl odebrán vzorek, který byl následně podroben měření, mechanickým zkouškám a metalografické analýze. Experiment byl prováděn za účelem sledování vlivu postupné deformace na změnu mechanických vlastností a mikrostruktury.

Cílem bakalářské práce je vyhodnocení změny mechanických vlastností a mikrostruktury nízkouhlíkového ocelového drátu taženého za studena vlivem deformací při tažení s následným tepelným zpracováním v lázni s tekutým olovem.

## **Cíl práce**

Provést literární studii se zaměřením na tváření za studena, při kterém se používá technologie tažení ocelového drátu průvlnky. Popsat procesy probíhající v materiálu při následném tepelném zpracování – rekrytalizačním žhání. Cílem experimentální části práce bude zhodnocení stavu vybraného typu oceli po různých stupních deformace a následném tepelném zpracování. Budou provedena podrobná metalografická hodnocení struktury materiálu a měření základních mechanických charakteristik s možností vypracování matematického modelu.

# 1 Profil společnosti

## 1.1 Bekaert

Firma Bekaert, kterou založil pan Leo Leander Bekaert v roce 1880, je nadnárodní společností se sídlem v Belgii. Zaměstnává přibližně 28 000 lidí po celém světě a dodává své průmyslové výrobky do více než 120 zemí světa. Výrobní závody společnosti se nacházejí především v Latinské Americe, Asii, Severní Americe, Pacifiku a Evropě. Produkty firmy Bekaert jsou dodávány do širokého spektra průmyslových odvětví. Příkladem může být automobilový průmysl (ocelové kordy, dráty a vlákna pro výrobu autosedaček), dále stavební průmysl (ocelová vlákna Dramix do beton) nebo také průmyslová odvětví zaměřená na energetiku, zemědělství a spotřební průmysl. Ve střední Evropě má se nacházejí celkem čtyři výrobní závody. Dva závody se nacházejí v České republice (Bekaert Petrovice, s.r.o. a Bekaert Bohumín, s.r.o.) a dva na Slovensku (Bekaert Slovakia, s.r.o. a Bekaert Hlohovec, a.s.) [1].

## 1.2 Bekaert Bohumín

Závod Bekaert Bohumín se specializuje na výrobu taženého drátu s následným žárovým pozinkováním. Výroba zde byla zahájena na jedné pozinkovací lince v roce 1998. Další linka byla instalována až v roce 2004 spolu s několika drátotahy. Dodnes se v závodě používají drátotahy typu Jupiter B a BAZ (OBX), které jsou umístěny ve výrobní části nazývané tažírna. Termín "tažírna" se obvykle používá k označení výrobní části podniku, kde se polotovar zpracovává do konečné podoby ve formě taženého drátu s určitým průměrem. Tažený drát může sloužit jako finalní výrobek nebo jako polotovar pro další zpracování, například na pozinkovací lince. Finalní výrobky ve formě svitků jsou následně expedovány převážně do zahraničí, kde se uplatňují zejména při výrobě plotů, klecí, hřebíků a výztuže do podmořských kabelů [1].

## 2 Tažení ocelového drátu

### 2.1 Tažení

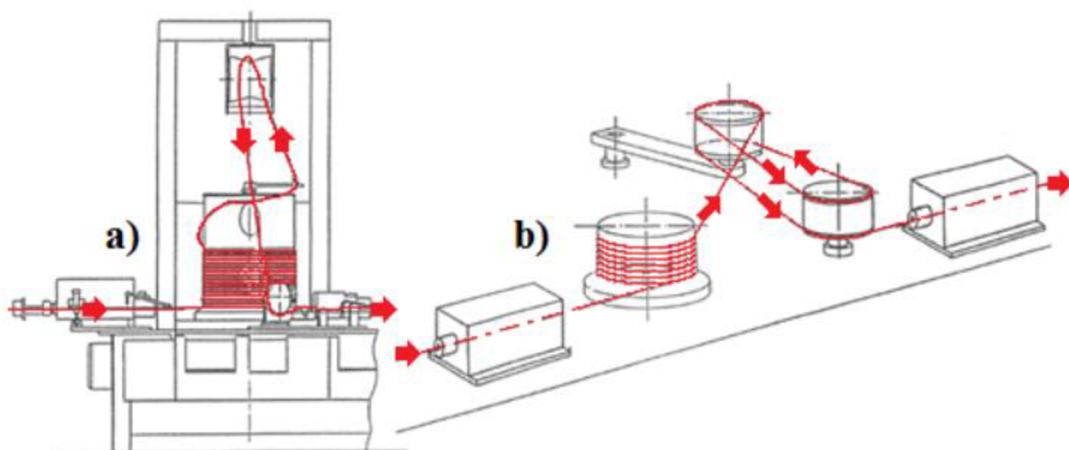
Výroba ocelového drátu tažením za studena probíhá při teplotách menších než 0,2 – 0,3 násobek teploty tavení. Při dosažení těchto teplot, nedochází k rekrytalizačním procesům, což má za následek zachování zpevnění drátů. Tento proces nazýváme tváření za studena a je charakteristický plastickou deformací. Při tváření za studena drát prochází průvlakem s kuželovitým otvorem a tím ve směru hlavního napětí dochází k jeho prodloužení.

Základním polotovarem je válcovaný drát o průměru více než 5 mm. Ten se dále rozděluje na:

- nízkouhlíkový drát – obsah C do 0,3 %,
- vysokouhlíkový drát – obsah C od 0,3 % do 1,0 %,
- drát z ušlechtilých slitinových ocelí [2].

### 2.2 Teorie tažení

Při procesu tažení se zvyšuje především pevnost v tahu, kdežto plastické vlastnosti, např. tažnost a kontrakce, klesají. V našem případě se používá technologie tažení drátu za sucha (**obr. 1**). Při použití této technologie se používá speciální mazivo pro tažení za sucha, které slouží k snížení třecích sil, zamezení přímého kontaktu drátu s povrchem průvlaků, ale také k odvodu tepla a zajištění kvality (požadované drsnosti) povrchu. Nejvhodnější volbou v našem případě se jeví použití vápenatého maziva (ve vodě nerozpustného) na počátku tažení (1 až 3 tři první tahy), kdy jsou počáteční rychlosti tažení relativně nízké, a naopak tlakové síly značně vysoké. Poté následuje mazivo sodné, které lépe odolává vyšším teplotám a vysokým rychlostem [3].



Obr. 1 Schéma drátotahu pro tažení za sucha: a) první tah s bubnem pro akumulaci drátu b) napínací kladky mezi dalšími tahy. [4]

Výrobní proces je založen na zákonu zachování objemu drátu procházející průvlastkovou sadou za jednotku času. Jeho důležitost spočívá ve snaze o eliminaci protržení samotného drátu při tažení.

$$S_0 \cdot L_0 = S_1 \cdot L_1 = S_2 \cdot L_2 = \dots = S_n \cdot L_n \quad (1)$$

nebo také

$$S_0 \cdot v_0 = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \dots = S_n \cdot v_n \quad (2)$$

kde symbolika znamená:

$S_0, S_1, S_2 \dots$  až  $S_n$  průřezy drátu [ $\text{mm}^2$ ]

$L_0, L_1, L_2 \dots$  až  $L_n$  délky drátu [ $\text{mm}$ ]

$v_0, v_1, v_2 \dots$  až  $v_n$  rychlosti drátu [ $\text{m/min}$ ]

Při tažení drátu nastává deformace v kuželové části průvlastku s tažným úhlem  $2\alpha$ , **obr. 2** [3].

„Na kuželovém povrchu průvlastku délky  $l$  působí (zjednodušeně) v pásmu deformace příčná síla  $Q$ , která je vyvolaná působením vnější tahové síly  $F$ .“ [3] Vlivem tření a tažného (vrcholového) úhlu kužele mezi stykovými plochami drátu a pracovní části průvlastku vzniká příčná síla, která působí pod úhlem  $\alpha + \rho$  k vertikální složce síly  $N$ .

Tahovou sílu jsme schopni odvodit z trojúhelníku:

$$F = Q \cdot \sin(\alpha + \rho) \quad (3)$$

$$F = N \cdot \text{tg}(\alpha + \rho) \quad (4)$$

kde symbolika znamená:

$d_0, d_1$  vstupní a výstupní průměr drátu [ $\text{mm}$ ]

$2\alpha$  úhel tažné části průvlastku [ $^\circ$ ]

$\rho$  třecí úhel [ $^\circ$ ]

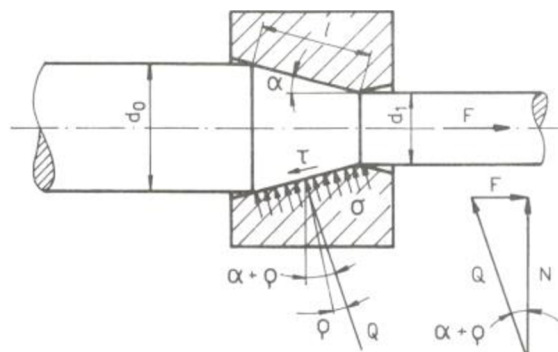
$\tau$  smykové napětí [ $\text{MPa}$ ]

$\sigma$  střední tlakové napětí [ $\text{MPa}$ ]

$F$  tahová síla [ $F$ ]

$Q$  příčná síla [ $F$ ]

Díky tomu, že se tažný úhel  $2\alpha$  nejčastěji pohybuje v rozpětí od  $10^\circ$  do  $20^\circ$  a zároveň třecí koeficient  $\mu = \text{tg} \cdot \rho$  při zvolení správného mazání dosahuje hodnot pod 0,05 ( $\rho < 3^\circ$ ), dosahuje velikost příčné síly 4 a 7násobku hodnoty síly tahové. [3,5]



Obr. 2 Rovnováha sil v otvoru průvlastku podle E.Siebela [3]

Vysoká tvářitelnost nízkouhlíkového drátu je možná, především díky struktuře tvořené z feritu s malým podílem perlitu. Tažení má za důsledek zvýšený výskyt mřížkových poruch. Dále nastává vzájemné působení dislokací již se stávajícími poruchami v původním materiálu. Při této interakci dochází k vzájemnému protínání dislokací a vzniku tzv. dislokačních stupňů, dále nastává interakce dislokací s hranicemi zrn. Nastává proces anihilace dislokací a zaškrcování rozštěpených dislokací a dislokačních smyček. Zároveň dochází k deformacím nekovových vměstků a precipitátů. Tyto jevy často zapříčiňují zpevnění materiálů (kovu) a zároveň vedou k vyčerpání jeho plastických vlastností [2].

## 2.3 Povrchová úprava ocelového drátu

Kvalita povrchu taženého drátu je závislá na vlastnostech vstupního polotovaru a na jednotlivých fázích výrobního procesu tažení drátů. Válcovaný drát, který slouží jako vstupní materiál, vyžaduje před samotným procesem dodatečné úpravy, aby byl vhodný pro další zpracování.

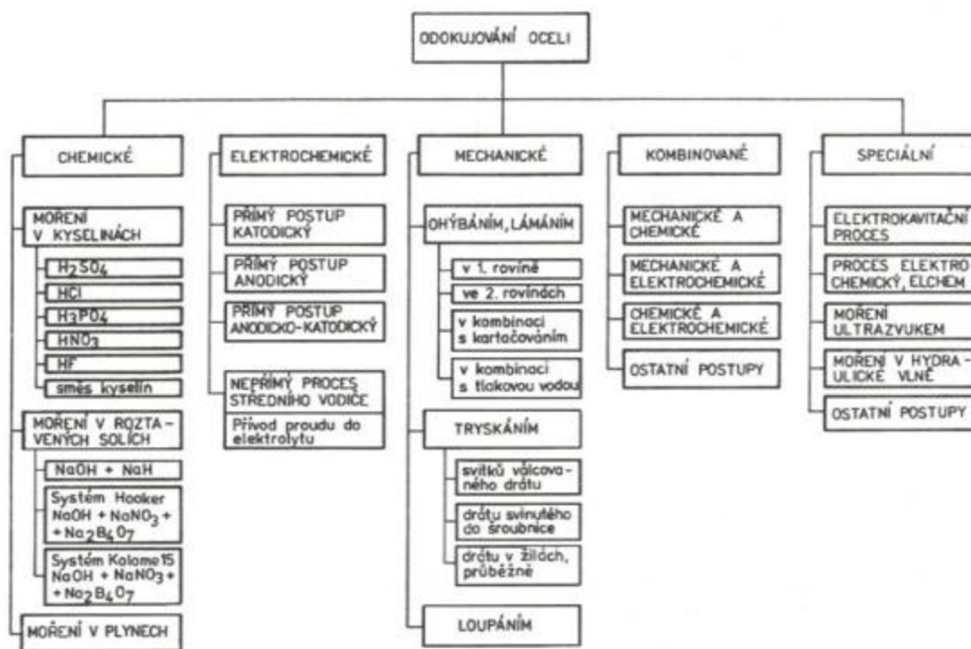
### 2.3.1 Tvorba okují a proces odstranění okují

Okuje a rez vznikají na povrchu drátu důsledkem koroze oceli, při níž dochází k samovolnému porušení povrchu oceli v důsledku působení elektrochemické a chemické reakce s okolním prostředím. Okuje tedy vznikají při vzájemném kontaktu povrchu oceli s kyslíkem obsaženým ve vzduchu za zvýšené teploty. Vzhledem k technologii výroby nepůsobí okuje a rez větší problémy, jelikož je lze lehce odstranit [2].

Okuje lze rozdělit dle pořadí vzniku na povrchu drátu. Na povrchu nejdříve vznikne vrstva wüstit ( $\text{FeO}$ ), po ní následuje magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a nakonec vrstva hematitu ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Se rzi na povrchu ocelového drátu se lze setkat v případech, kdy je drát dlouhodobě nevhodně uskladněn, a po procesu moření, kdy není povrch dostatečně neutralizován a opláchnut, případně povrch není po moření protikorozně ochráněn. [3,6]

Při chemickém odstranění okují je ocelový drát mořen na mořicích linkách. Moří se celé svitky drátů ve speciálních mořicích vanách. Moření se provádí až z 90 % v kyselině sírové a kyselině chlorovodíkové [3]. „Je známo, že kyselina chlorovodíková rozpustí okuje rychleji než kyselina sírová o stejné koncentraci.“ [3] Z tohoto důvodu se pro odstranění okují válcovaného drátu mořením používá výhradně kyselina chlorovodíková. „Mechanické odstranění okují probíhá ohýbáním drátu v žílách s následným kartáčováním povrchu drátu pro odstranění zbytků okují. Další proces mechanického odstranění okují je tryskání drátu v žílách, svitcích, nebo ve šroubovici.“ [7] Jednotlivé procesy a jejich řazení jsou popsány na **obr. 3**.



Obr. 3 Metody odstraňování okují z oceli [2]

### 2.3.2 Povrchová úprava

Po procesu moření ocelového drátu následují povrchové úpravy v několika technologických variacích.

Cílem povrchové úpravy je docílení povlaku na povrchu drátu, který funguje jako nosič maziva. Toto mazivo pak dále zabezpečuje dobrý průběh plastické deformace, požadovanou jakost povrchu drátu a menší opotřebení průvlaků.

Technologické varianty moření a následné povrchové úpravy:

- moření, vodní oplach, fosfátování, vodní oplach, nanesení mýdla, sušení;
- moření, vodní oplach, vápnění nebo boraxování, sušení;
- moření, vodní oplach, mědění nebo fosfátování, vodní oplach, vápnění nebo boraxování, sušení.

Základní vlastnosti nosiče maziva:

- pevná vazba s kovem,
- vysoká odolnost proti tlaku a teplotě,
- dobrý náběr maziva,
- odolnost vůči chemické reakci s mazivem,
- rovnoměrné pokrytí povrchu drátu,
- v praxi se používá několik druhů nosičů dělených dle jejich využití.



Mezi hlavní druhy se řadí:

- nosiče s mechanickou vazbou na kov – fosfáty,
- nosiče s mechanickou přilnavostí k povrchu – borax a vápno,
- kovové povlaky – měď a zinek.

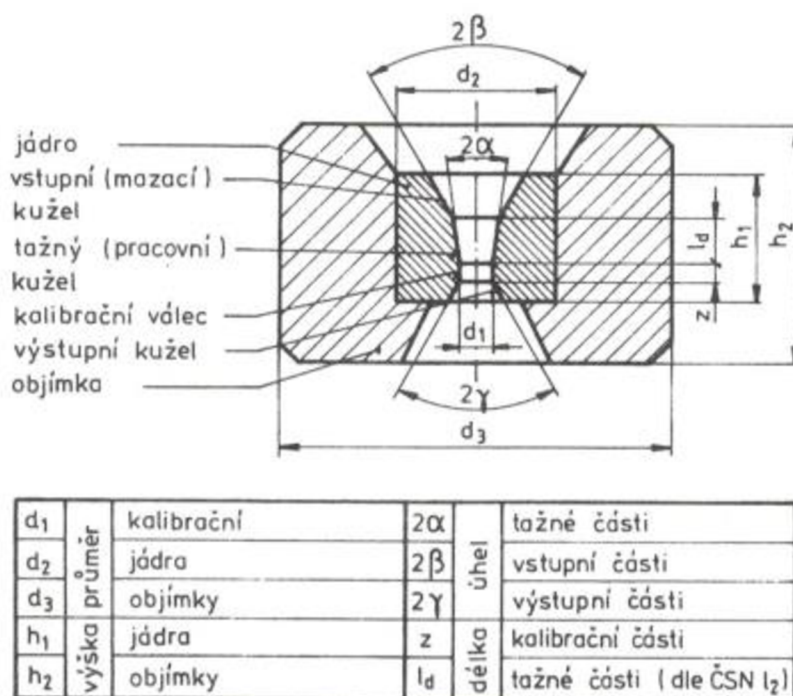
Mezi neekonomičtější metody povrchové úpravy se řadí vápnění. Účelem vápnění je neutralizování kyselých zbytků po moření a vytvoření nosné vrstvy pro mazivo používané při suchém tažení.

Více nákladná metoda je poté boraxování, jehož vrstva je však oproti vápnu celistvější a lépe na sebe váže mazivo. Používá se převážně při výrobě drátů z uhlíkových ocelí. Lze jej využívat samostatně nebo v kombinaci s fosfátováním.

O něco dražší je pak fosfátování, které je převážně používáno při výrobě ocelového patentovaného drátu. [2,3]

## 2.4 Analýza deformace materiálu v průvlaku

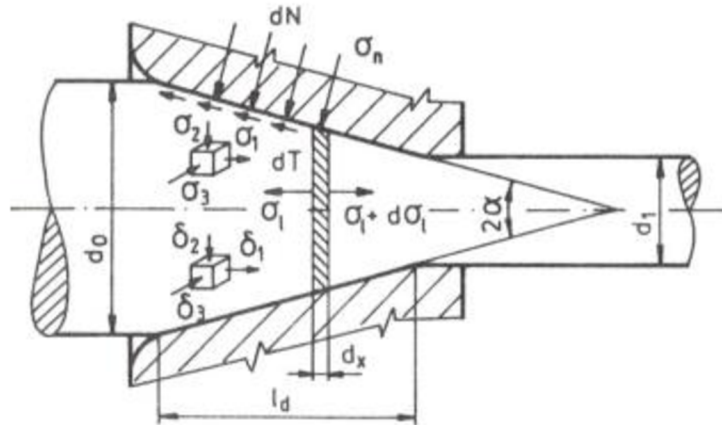
Při tažení je drát deformován v kuželovité části průvlaku, která je také hlavní pracovní částí průvlaku, znázorněné na obr. 4. Následuje část kalibrační, která má za úkol vytvořit přesný rozměr drátu, tato část je válcová.



Obr. 4 Schéma průvlaku z tvrdokovu [3]

„Na kuželovitém povrchu taženého drátu působí v pásmu deformace na povrchu elementární normálové tlaky  $dN$  a elementární třecí síly  $dT = \mu \cdot dN$ .“ [2] Tyto síly rozhodují o celkovém stavu napjatosti v pásmu deformace. Působení třecích tlaků a normálových sil v kalibrační části průvlaku je podstatně menší než v kuželové části a lze je z hlediska průběhu deformace zanedbat.

Na libovolný příčný element materiálu o nekonečně malé tloušťce  $dx$  viz **obr. 5**, působí normálové napětí  $\sigma_n$  a napětí tečné  $\tau = \mu \cdot \sigma_n$ . V obvodovém řezu působí tlakové napětí  $\sigma_0$  a ve směru příčného řezu působí nerovnoměrně rozdělené podélné tahové napětí  $\sigma_1$  a  $(\sigma_1 + d\sigma_1)$ . [3,6]



*Obr. 5 Podstata tažení v průvlaku [3]*

Třiosý stav napjatosti, nacházející se v libovolném bodě části pásma deformace, je charakterizován těmito hlavními napětími:

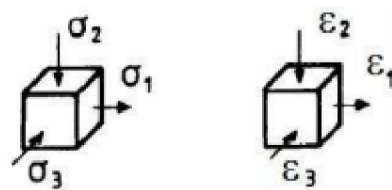
- napětí tahové podélné  $\sigma_1$ , jedná se o největší napětí;
- napětí tlakové radiální  $\sigma_2$ ;
- napětí tlakové v obvodovém směru  $\sigma_3$ , které je nejmenším napětím.

Tomuto tříosému stavu napjatosti odpovídá tříosý stav hlavních deformací:

$$+\sigma_1; -\sigma_2; -\sigma_3$$

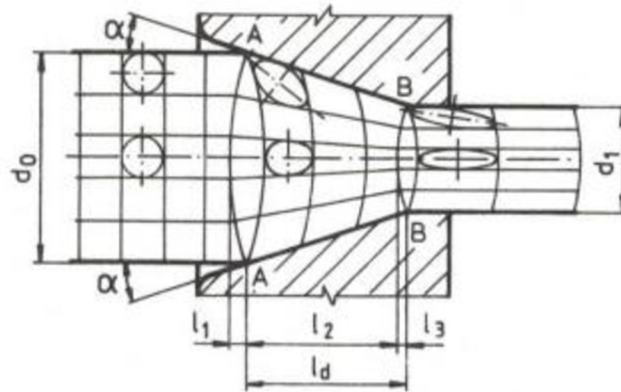
$$+\varepsilon_1; -\varepsilon_2; -\varepsilon_3$$

Napětí a deformace jsou schematicky zobrazeny na **obr. 6**.



*Obr. 6. Schéma napětí a deformace procesu tažení [2]*

Velikost podélné deformace lze zjišťovat pomocí deformací kružnic v podélném směru, které na **obr. 7** znázorňují elementární částice kovu. Původní čtvercová síť je deformovaná do té míry, že dochází k jejímu protažení ve směru tažení a k zúžení ve směru kolmém na směr tažení, ze čtvercové sítě následně vzniká síť obdélníková. Hlavní osy kružnic, původně rovnoběžné s osou tažení a kolmé vůči této ose, mění během tažení svůj sklon vztahovaný k této ose, výjimku tvoří elementy ležící v ose tažení.



*Obr. 7 Tok materiálu v pásmu deformace [3]*

## 2.5 Plastická deformace a deformační zpevnění

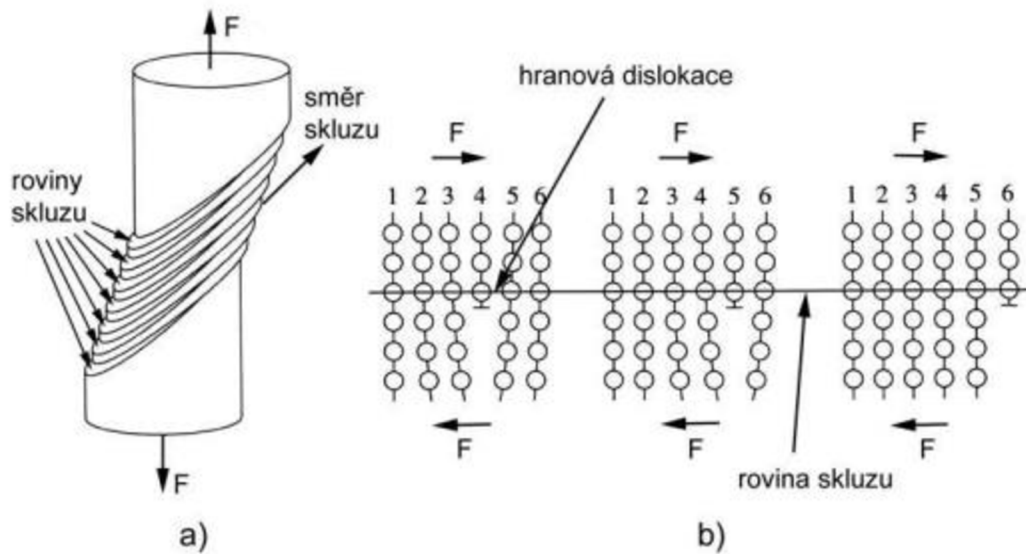
### 2.5.1 Plastická deformace

Plastická deformace je deformace, při které nastává trvalá změna rozměrů materiálů. Tato deformace je také nazývána deformací nevratnou a platí pro ni zákon zachování objemu.

Mezi základní mechanismy plastické deformace se řadí:

- skluz dislokací,
- dvojčatně (vytváření deformačních dvojčat),
- difuzní tečení,
- dislokační tečení.

Hlavním mechanismem plastické deformace u tažení drátu je skluz dislokací, viz **obr. 8**, který je způsoben pohybem dislokací ve skluzovém systému. Pro skluz platí, že probíhá pouze v určitých krystalografických směrech a rovinách [8]. Tyto roviny jsou charakteristické především tím, že obsahují nejméně překážek pro pohyb dislokací a jsou nejhustěji obsazené atomy [9].



Obr. 8 Vzájemné posunutí (skluz) dvou částí krystalu (a), ke kterému dochází pohybem dislokací ve skluzových rovinách a jejich výstupem na povrch krystalu (b) [10]

Pro tyto směry a roviny dále platí tzv. zákony skluzu:

1. Skluz probíhá v atomy nejhustěji obsazených rovinách.
2. Směr skluzu je shodný se směrem roviny s nejhustěji obsazenými atomy.
3. Ze skupiny skluzových systémů je aktivní právě ten systém, který má nejoptimálnější orientaci vzhledem k smykovému zatížení  $\tau$  a dosahuje tedy hodnoty  $\tau_{\max}$ .

Pro pohyb dislokací je nutné překročit kritické napětí  $\tau_{kr}$ . Toto napětí je definováno jako napětí, které způsobuje pohyb dislokací v reálném krystalu za přítomnosti jiných poruch a nečistot.

Kritické napětí  $\tau_{kr}$  je závislé na:

- struktury,
- čistotě kovu,
- teplotě,
- rychlosti deformace,
- tepelném a mechanickém zpracování [8].

## 2.5.2 Deformační zpevnění

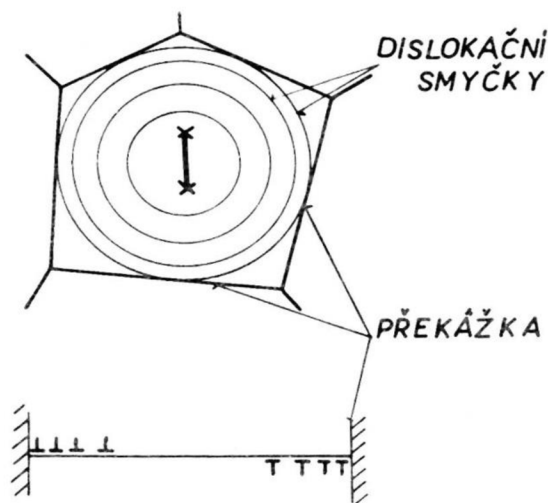
Jedná se o odezvu materiálu na působení vnějšího napětí. Deformační zpevnění je charakteristické tím, že je potřeba zvýšení napětí, aby bylo možné pokračovat v tváření. Tažený drát a jeho výroba je založena na principu tohoto deformačního zpevnění. Při tváření za studena dochází u drátu ke zvýšení mechanických vlastností a snížení plastických vlastností.

Plastické vlastnosti jsou při velkých deformacích zhoršeny natolik, že dochází k porušení soudržnosti samotného drátu. Pro obnovu plastických vlastností se poté používá vhodné tepelné zpracování.

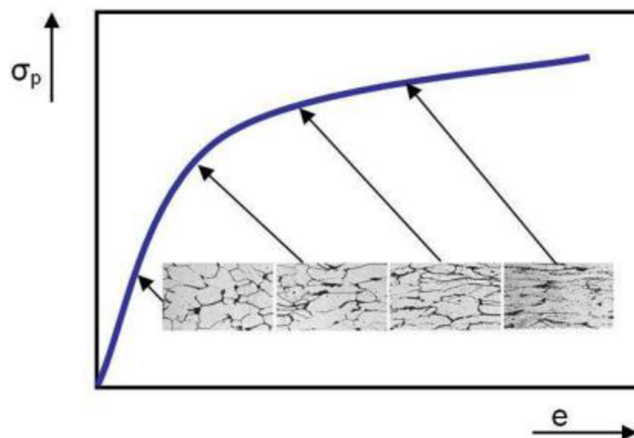
Faktory ovlivňující vlastnosti taženého drátu z uhlíkových ocelí:

- struktura oceli,
- obsah uhlíku,
- deformační stárnutí,
- dílčí a celková deformace (úběry).

Zpevnění materiálu drátu lze popsat jako následek odporu struktury vůči plastické deformaci zapříčiněné odpovídajícím napětím. Samotný odpor struktury je závislý na počtu a druhů blokád (bariér) působících vůči plastické deformaci, viz **obr. 9** [3]. Přírůstek deformačního odporu oceli je graficky znázorněn na **obr. 10**.



Obr. 9 Zpevnění hranicemi zrn [8]



Obr. 10 Křivka zpevnění při tažení nepatentovaného drátu [2]

Uhlíková ocel je běžně tvořena ze dvou fází, tvrdého a křehkého cementitu a měkkého a tvárného feritu. Cementit, jeho množství a tvar má úlohu takzvané překážky plastické deformace, naopak ferit je nositelem tvářitelnosti oceli. Deformační zpevnění je způsobeno vlivem dislokací ve feritu a následným vznikem napětí mezi feritem a cementitem. [3,9]

„Dráty z nízkouhlíkové oceli mají feritickou strukturu s malým podílem cementitu, a proto jsou vysoce tvářitelné a vykazují relativně malé zpevnění.“ [3]

Mezi mechanismy zpevnění při tažení drátu patří:

- zpevnění hranicemi zrn –  $\sigma_z$ ,
- zpevnění intersticiálními atomy –  $\sigma_{ia}$ ,
- zpevnění texturou –  $\sigma_{tex}$ ,
- zpevnění přítomností perlitu –  $\sigma_{per}$ ,
- dislokační zpevnění.

Nejvýznamnější podíl na zpevnění má zpevnění hranicemi zrn. Tento mechanismus je popsán Hallův-Petchovým vztahem:

$$R_{eL} = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

kde symbolika znamená

$\sigma_0$  třecí napětí potřebné pro pohyb dislokací v monokrystalu [MPa]

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

$d$  střední velikost zrna [mm] [8]

### 2.5.3 Exponent deformačního zpevnění

Exponent deformačního zpevnění  $n$  nám popisuje chování ocelí a ostatních kovů při tváření, kdy dochází k nárůstu plastické deformace, která vede k zpevnění materiálu. Tento exponent nám popisuje příkrost křivky napětí, jinými slovy, čím je exponent větší, tím je příkřejší křivka napětí (deformace).

Rovněž platí, že při deformaci při maximálním zatížení se hodnota exponentu  $n$  zvyšuje a zároveň se zvětšuje rozdíl mezi pevností v tahu a pevností v kluzu. [12,13] Typickým příkladem, kde se dá sledovat zpevnění při zatěžování, je zkouška tahem. Jejím výsledkem je průběh reálného napětí ku reálné deformaci.

Exponent  $n$  lze vyjádřit z Holomonova vztahu:

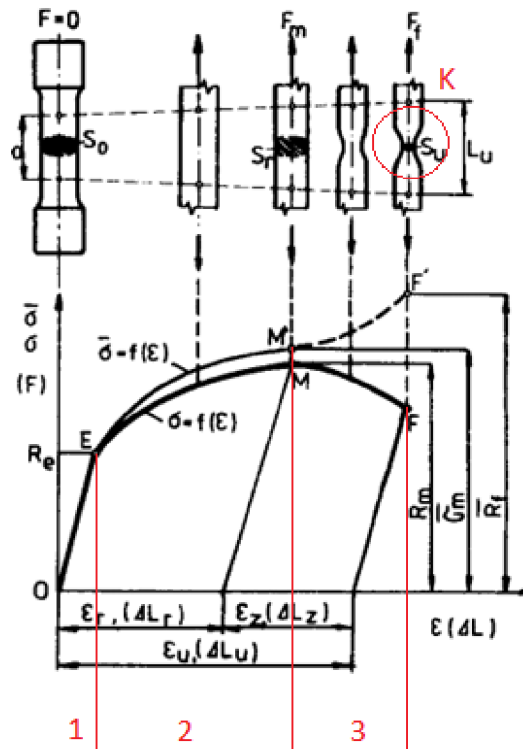
$$\sigma = k \cdot \varepsilon_p^{-n} \quad (6)$$

kde symbolika znamená

$k$  koeficient deformačního zpevnění

$n$  exponent deformačního zpevnění

Diagram závislosti skutečného napětí na skutečné deformaci viz **obr. 11** [13].



Obr. 11 Závislost skutečného napětí na skutečné deformaci [13]

Tento diagram lze rozdělit na 3 oblasti:

1. oblast elastické deformace,
2. oblast rovnoměrné plastické deformace,
3. oblast nerovnoměrné plastické deformace.



Pro oblast 1 platí, že zde nastává pouze elastická deformace, kdy se testovaný vzorek po odlehčení napětí vrátí do svého původního stavu a zachovává si své původní rozměry.

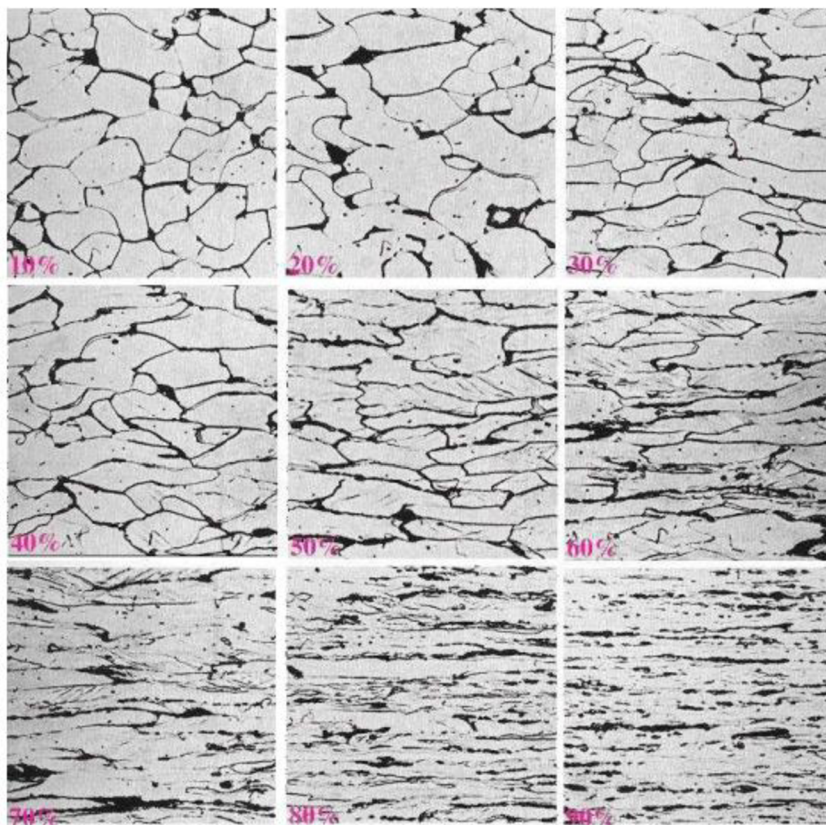
V oblasti 2 nastává již rovnoměrná deformace, kdy se vzorek prodlužuje a ztenčuje rovnoměrně v celém objemu a zároveň nenastává změna objemu.

Pro oblasti 1 a 2 dále platí, že se zde vyskytuje trojosá napjatost a dvouosá deformace a jedná se o oblast plastické stability.

Oblast 3 je poté charakteristická tím, že je zde nerovnoměrná deformace. Vzniká zde také dvouosé napětí a trojosá deformace, což má za následek vznik tzv. krčku (oblast **K**). Pro tuto oblast dále platí, že se jedná o oblast plastické nestability, která je rozdělena bodem **M**, případně **M'** [14].

#### 2.5.4 Hlavní strukturní změny

S narůstající deformací za studena taženého ocelového drátu dochází ke ztenčování a prodlužování zrn ve směru tažení. Tento proces protahování zrn je znázorněn na **obr. 12**. Během deformace zrn dochází také k částečné deformaci určitých typů vměstků. Pokud je struktura drátu obsahuje perlit, pak se deformace převážně odehrává v měkčím feritu [2].



*Obr. 12 Vývoj mikrostruktury drátu při tažení za studena s deformací v rozmezí 10 až 90 % [2]*

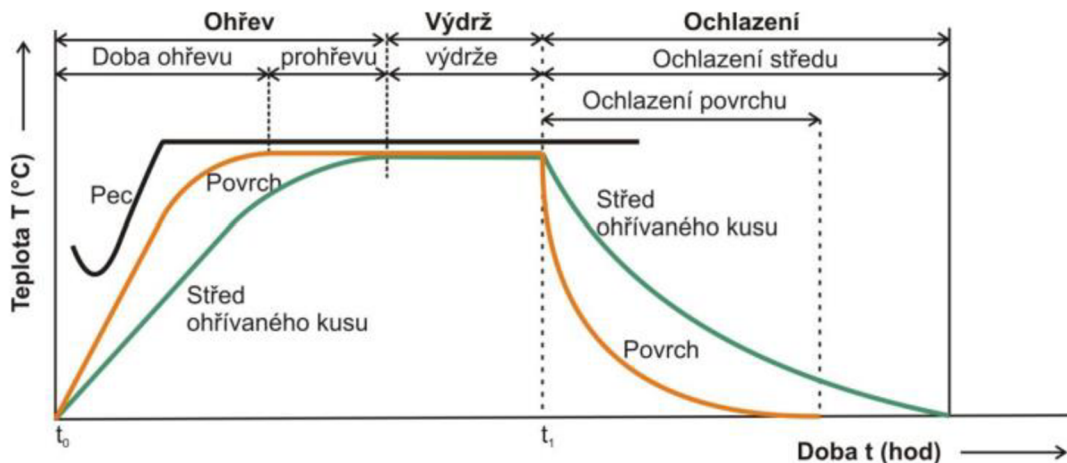


### 3 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování je proces, sloužící k modifikaci vnitřní struktury materiálu s cílem dosáhnout požadovaných vlastností. Hlavním faktorem při tepelném zpracování je změna teploty v závislosti na čase. Tento proces se skládá ze tří hlavních fází. První fází je ohřev, při kterém se součást zahřívá na požadovanou teplotu. Nejprve se zahřívá povrch součástí, a poté dochází k rovnoměrnému zahřátí povrchu i středu součástí. Druhá fáze se nazývá výdrž na teplotě a jejím úkolem je udržovat součást na požadované teplotě dostatečně dlouhou dobu, aby se mohly uskutečnit potřebné chemické a fyzikální přeměny, například rekrytalizace. Třetí a poslední fází je ochlazení, při kterém nejprve dochází k ochlazení povrchu a následně s určitým zpožděním dochází k ochlazení i středu součástí. Obecný diagram tepelného zpracování, popisující jednotlivé fáze je na **obr. 13** [15].

Z termodynamického hlediska dochází při tepelném zpracování materiálu ke změně vnitřní struktury ve dvou směrech. Prvním směrem je dosažení termodynamické rovnováhy. To se obvykle dosahuje pomocí tepelných zpracování s pomalým ochlazováním, tento proces se nazývá žihání. Při žihání dochází k postupnému ochlazování materiálu, což umožňuje difuzní fázové přeměny a vyrovnání vnitřních napětí v materiálu.

Druhým směrem je dosažení nerovnovážné struktury, což se dosahuje prudkým ochlazováním materiálu. Při rychlém ochlazování dochází k potlačení difuze a vzniku nerovnovážné struktury. Tento proces se nazývá kalení. Po kalení následuje fáze popouštění, při které dochází k částečnému odstranění vnitřních napětí a přiblížení zakalené struktury k rovnovážnému stavu. Tím se zlepšují mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost a tvrdost, a snižuje se křehkost. [9,15]



Obr. 13 Schematický popis zpevňování a etap rekrytalizačního žihání [15]

### 3.1 Žihání

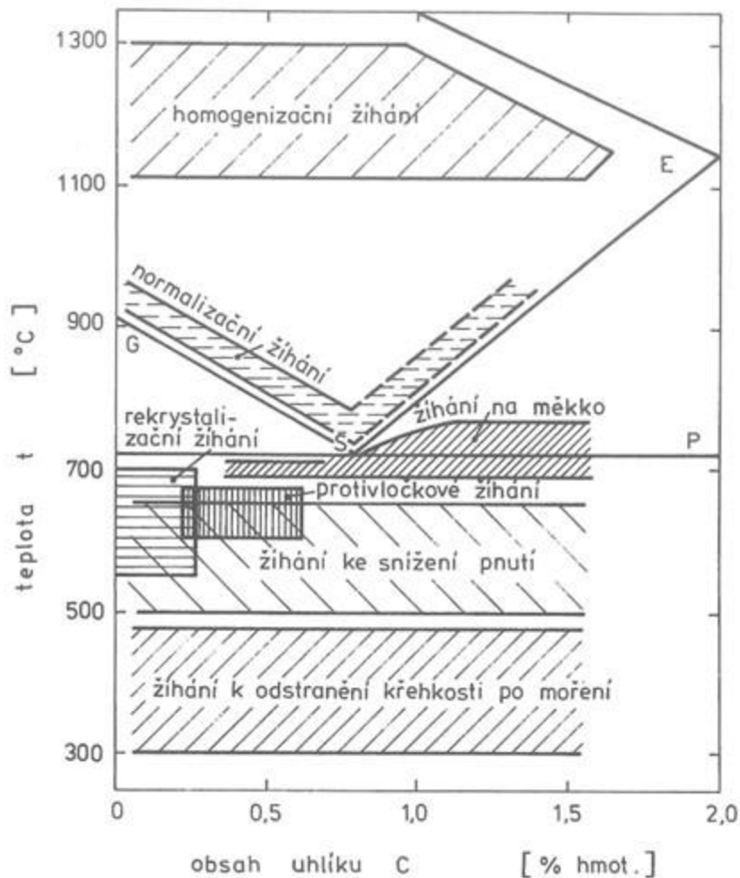
Žihání je způsob tepelného zpracování, při kterém je polotovar ohříván na určitou teplotu, následuje výdrž na této teplotě a poté nastává pozvolné ochlazení. To se provádí na vzduchu nebo v peci, za účelem dosažení stabilní struktury. Jednotlivé druhy žihání jsou dále zobrazeny na **obr. 14** [16].

Účelem žihání je zejména:

- snížení vnitřního pnutí,
- snížení tvrdosti,
- odstranění vlivů předchozích výrobních procesů
- vytvoření struktury pro další výrobní procesy.

Žihání lze rozdělit dle fázových přeměn na dva základní typy:

- s překrytalizací,
- bez překrytalizace [17].



Obr. 14 Oblast žihacích teplot v rovnovážném diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>c [17]

### 3.1.1 Žihání s překrystalizací

Žihání s překrystalizací je využíváno k zvýšení homogenity chemického složení a zajišťuje lepší rovnoměrnost oceli. Žihací teplota je nad teplotou  $A_{c1}$  a pro podeutektoidní oceli je teplota nad  $A_{c3}$ . Zároveň nastává úplná nebo částečná přeměna výchozí feriticko-cementické struktury na austenit.

Mezi žihání s překrystalizací patří:

- homogenizační žihání,
- normalizační žihání,
- izotermické žihání,
- kombinované žihání [15].

### 3.1.2 Žihání bez překrystalizace

Žihání bez překrystalizace probíhá převážně pod teplotu  $A_{c1}$ . Nastávají strukturální změny v oceli a nedochází ke změně krystalické mřížky a tvorbě austenitu. Mění se rozpustnost dusíku i uhlíku, velikost a tvar zrn a také množství a rozdělení mřížkových poruch.

Mezi žihání bez překrystalizace patří:

- žihání ke snížení pnutí,
- žihání na měkko,
- rekrystalizační žihání,
- protivločkové žihání,
- žihání k odstranění křehkosti po moření [15].

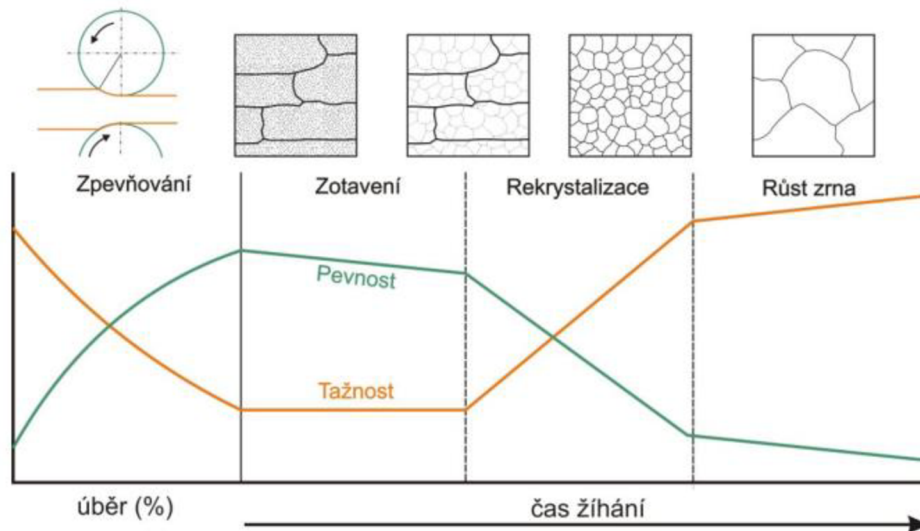
Pro tažení ocelových drátů se používají postupy tepelného zpracování detailně uvedené v následujících kapitolách.

## 3.2 Rekrystalizační žihání

Rekrystalizační žihání se používá především u ocelí tvářených za studena s cílem eliminovat deformační zpevnění a obnovit plastické vlastnosti téměř na hodnoty před tvářením. Po tvářením za studena jsou zrna feritu deformována, prodloužena ve směru tvářením, a materiál má zvýšenou vnitřní energii a je deformačně zpevněn, avšak jeho plastické vlastnosti jsou značně sníženy. Rekrystalizačním žiháním se materiál přivede do stabilního stavu ekvivalentního stavu před tvářením.

Proces rekrystalizačního žihání se skládá ze dvou hlavních etap: zotavení a rekrystalizace. Etapa zotavení je určena k redukci počtu dislokací a zbývající dislokace se s narůstající teplotou více uspořádají do stabilnější konfigurace. Současně v jednotlivých zrnech vznikají zárodky budoucích zrn, nazývané také subzrna, což se označuje jako polygonizace. Druhou etapou je rekrystalizace, která se dělí na primární a sekundární. Primární rekrystalizace se vyznačuje vznikem zrn o velikosti řádově desítek mikrometrů a dalším snižováním počtu dislokací. Pevnost materiálu klesá a tažnost stoupá. Dochází tak k obnovení původních mechanických vlastností materiálu před tvářením.

Zde je primární rekrystalizace ukončena. Při dalším zvyšování teploty pak dochází k sekundární rekrystalizaci, která je nežádoucí, protože vede ke zvětšování zrn a poklesu pevnosti materiálu. [15,18] Schematický popis procesů a etap je znázorněn na **obr. 15**.



*Obr. 15 Schematický popis zpevňování a etap rekrystalizačního žihání [15]*

Rekrystalizační žihání u nízkouhlíkových ocelí probíhá nad teplotou rekrystalizace, která se pohybuje v rozmezí 550–700 °C. Teplota žihání závisí především na stupni tváření materiálu. Po dosažení požadované teploty následuje fáze výdrže na této teplotě po dobu 1–5 hodin, následovaná pomalým ochlazováním nejčastěji na vzduchu.

Při žihání nízkouhlíkových ocelových drátů dochází k výraznému poklesu pevnosti až při dosažení teploty 520 °C. Další zvyšování teploty již nezpůsobuje výraznější pokles pevnosti. Naopak tažnost drátu výrazně roste po dosažení teploty 520 °C. [17,19]

Pro ocelový drát je nežádoucí růst zrna doprovázený hrubozrnnou strukturou. Ta je považována za nežádoucí. Vzhledem k této struktuře, totiž dochází k velkému poklesu možných ohybů drátu při mechanickém namáhání a také k nárůstu pravděpodobnosti křehkého lomu. Tento jev se zejména projevuje u nízkouhlíkových ocelí s deformací v rozmezí 8–16 %, což odpovídá nízkému stupni deformace. Po této deformaci je vhodné provést následný ohřev na teplotu mezi 650–850 °C označovanou také jako oblast kritického stupně deformace. V této oblasti je vhodné provést normalizační žihání.

Při normalizačním žihání dochází k transformaci mikrostruktury materiálu a získání jemnozrnné struktury. S narůstajícím obsahem uhlíku v oceli klesá výskyt hrubých zrn. Při obsahu uhlíku 0,3 % a vyšším již tato hrubozrnná struktura obvykle nevyskytuje [17].

### 3.3 Žihání ke snížení pnutí

Žihání ke snížení pnutí má za úkol snížit pnutí ve výrobcích, vzniklé z předchozího tepelného zpracování. To je způsobeno nestejným ochlazením zejména tvarově složitých a velkoobjemových výrobků (odlitky nebo výkovky), lokálním ohřevem při svařování a třískovém obrábění (hrubování) nebo při tváření za studena (rovnání plechu, tažení drátů) [15].

Žihací teplota se pohybuje v rozpětí 450–650 °C, ohřev musí být rovnoměrný a pomalý (100–200 °C /hod), výdrž na teplotě v rozmezí několika hodin. Doba výdrže je závislá na požadovaném stupni redukce vnitřního pnutí. Ochladuje se výhradně v peci až do teploty 200 °C, poté následuje pozvolné ochlazování na vzduchu [20].

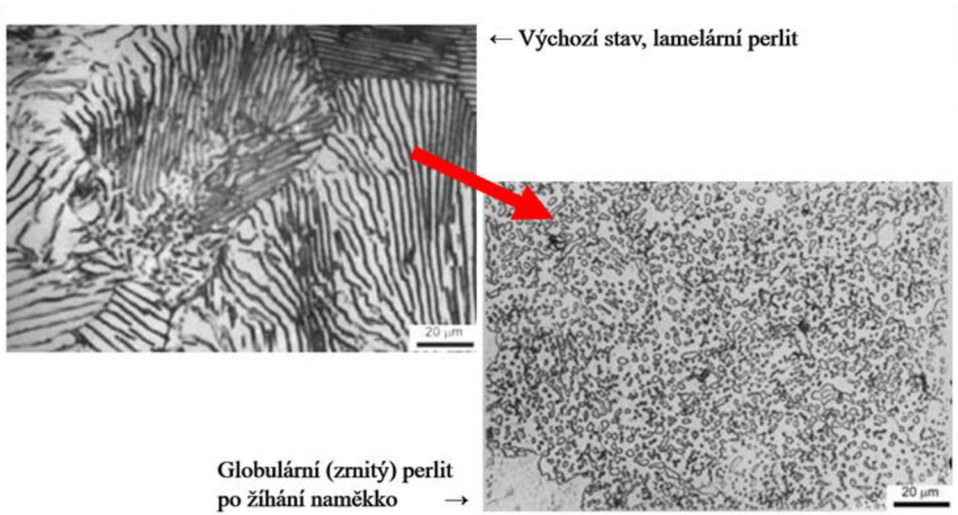
V procesu výroby drátu se technologie žihání na odstranění vnitřního pnutí používá z důvodu snížení vnitřního pnutí, které vzniká při tažení za studena, kdy drát prochází olověnou lázní při teplotě 450 °C. Po výstupu z olověné lázně následuje ochlazení na vzduchu (2–5 sekund) s následným dochlazením ve vodě. Tento proces je aplikován v případě, že je požadováno zachování vysoké pevnosti a zároveň částečné obnovení houževnatosti [21].

### 3.4 Žihání na měkko

Žihání na měkko slouží k snížení tvrdosti oceli a tím zvýšení její obrobitelnosti. Hlavním mechanismem tohoto tepelného zpracování je změna lamelární struktury perlitu na strukturu globulární. Tento proces se nazývá sferoidizace. Během tohoto procesu dochází k sbalování lamel perlitu do globulí, viz **obr. 16**. Oblast použití je pro nízko, středně a vysokouhlíkové dráty [15].

Žihací teplotu pro nízkouhlíkový tažený ocelový drát volíme těsně pod teplotou  $A_{C1}$ . Výdrž na této teplotě se pohybuje v řádu několika hodin. Během této doby se vlivem povrchového napětí zabaluje lamelový cementit do kuliček, pak následuje pomalé ochlazování [17]. „Vysoká žihací teplota, stejně jako dlouhá doba výdrže na teplotě způsobují příliš velkou homogenizaci austenitu. Následující ochlazování proto musí být pomalejší.“ [15] Tímto procesem dosáhneme výrazného zlepšení mechanických vlastností ocelového drátu po procesu tažení za studena.

Žihání na měkko je běžně používáno pro dráty určené na výrobu řetězů a v běžné praxi se používá zejména ke zlepšení obrobitelnosti oceli díky měkčí globulární struktuře perlitu [17]. Žihací teplota pro nízkouhlíkové oceli se pohybuje nad teplotou  $A_{C1}$ , zároveň je nutné nepřekročit teplotu  $A_{C3}$ , díky tomu nedochází k rozpuštění zbytků cementitu, které následně při pomalém ochlazování mají funkci zárodků, na něž se dále nabaluje vylučovaný cementit a vznikají tak tzv. cementitové globule. [17,19]



*Obr. 16 Přeměna lamelárního perlitu na globulární perlit [22]*

## 4 Mechanické zkoušky

Mechanické zkoušky zkoumají mechanické vlastnosti materiálu vystaveného různým namáháním, jako je krut, ohyb, tah, tlak a smyk. V praxi je materiál vystaven kombinaci těchto namáhání a je nutné, aby splňoval určitou sérii vlastností, a to pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost a další. Užití mechanických zkoušek se v praxi využívá zejména pro získání podkladů k pevnostním výpočtům konstrukčních materiálů.

Mechanické zkoušky lze rozdělit do několika kategorií:

- statické zkoušky,
- dynamické zkoušky,
- zvláštní zkoušky (extrémní teploty, korozivní prostředí).

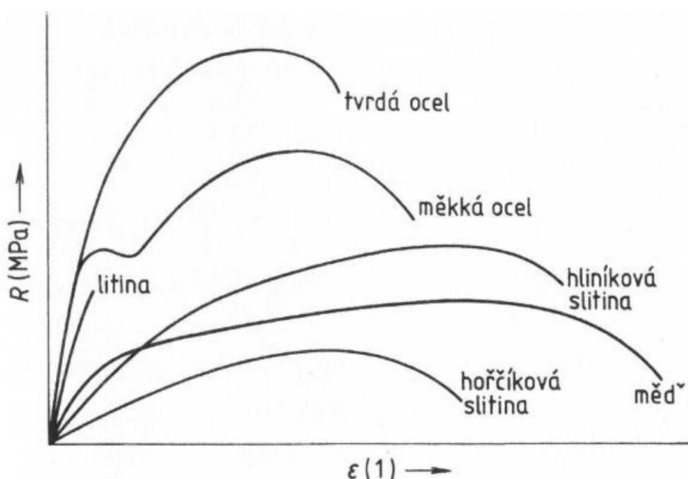
Rozdělení statických zkoušek:

- zkouška tahem,
- zkouška tlakem,
- zkouška ohybem,
- zkouška krutem,
- zkouška stříhem [23].

Při zkoušení drátů se využívá především zkoušek statických a to konkrétně:

### 4.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem je jednou ze základních zkušebních metod v technické praxi. Zkouška je prováděná na zkušebním vzorku, který je vložen do zkušebního stroje. Výstupem této zkoušky je křivka závislosti zatížení na prodloužení, je také nazýván trhací (pracovní) diagram, viz **obr. 17**.



Obr. 17 Pracovní diagram různých kovů a slitin [24]

Při zkoušení vzniká ve vzorku jednoosé napětí. Zatěžování probíhá klidně, bez rázů. Síla roste až do porušení tělesa, kdy je zkouška ukončena. Chování zkušebního vzorku je v první fázi elastické, po překročení meze kluzu již nastává trvalá deformace a těleso se chová plasticky. Nastává prodloužení, které není po délce vzorku rovnoměrné.

Deformace vzorku je rovnoměrná do bodu, kdy vzniká takzvaný krček, od této chvíle se již deformace šíří pouze v oblasti krčku [23]. Dle ČSN EN ISO 6892-1 se zkouška skládá z postupného zatěžování zkušební tyče až do přetržení.

Ze zkoušky se určí tyto parametry:

- $R_m$  – mez pevnosti v tahu,
- $R_e$  – mez kluzu v tahu,
- $A$  – tažnost,
- $Z$  – kontrakce [25].

V praxi se často vyskytuje tzv. smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ , kdy toto napětí způsobuje 0,2 % trvalé deformace. Využití je zejména u polykrystalických látek, kde se fyzikální mez pružnosti téměř nevyskytuje a pro reprodukovatelnost zachycení první plastické deformace bylo nutné určit toto smluvní napětí [2].

## 4.2 Zkouška drátu krutem

Zkouška drátu krutem se provádí převážně k zjištění tvárnosti a stejnorodosti materiálu, případně k zjištění povrchových a vnitřních vad. Zkouška je provedena kroucením zkušební vzorku kolem vlastní osy až do porušení, případně po dosažení požadovaného počtu krutů. Měřitkem houževnatosti materiálu je počet krutů.

Dle normy ČSN ISO 7800 je zkouška drátu krutem sestavena zkrucováním vzorku kolem své osy do bodu lomu nebo do dosažení požadovaného počtu krutů.

Při kroucení drátu dochází k dynamickému namáhání, a to ve velkém objemu materiálu, díky tomu je vysoká pravděpodobnost odhalení vady. Pro tuto zkoušku je také neméně důležité, že se podmínky zkoušky mění skokově, zejména parametr délky  $L_z$  v závislosti na průměru drátu.

Pro potřeby odhadu počtu krutů  $N_t$  lze využít parametr  $\gamma_t$  vyjádřený pomocí vztahu:

$$\gamma_t = \frac{\pi \cdot d \cdot N_t}{L_z} \quad (7)$$

kde symbolika znamená:

$d$  průměr drátu [mm]

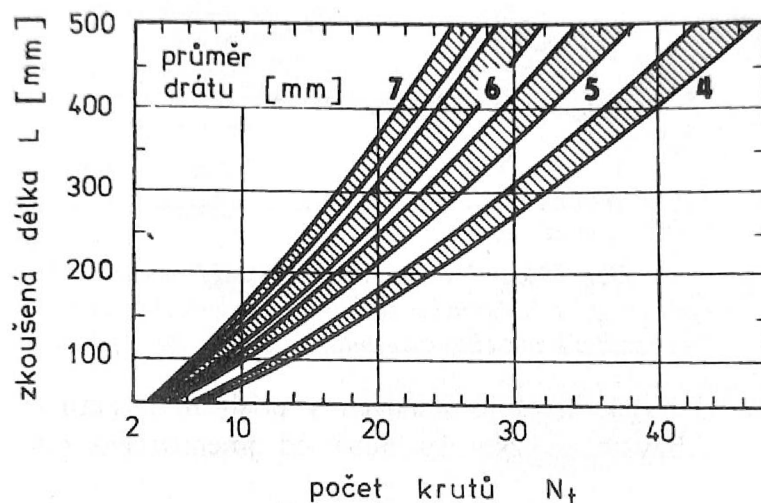
$N_t$  počet krutů

$L_z$  zkušební délka drátu [mm]

Parametr  $\gamma_t$  je tangenta úhlu, který je svírán přímkou na povrchu drátu viditelnou na vzorku po zkoušce kroucením a osou drátu. Jedná se o charakteristický konstantní parametr materiálu, z kterého je drát vyroben, dále platí, že počet krutů je lineárně závislý na délce zkušební vzorku. Závislost počtu krutů na délce vzorku je znázorněna na obr.

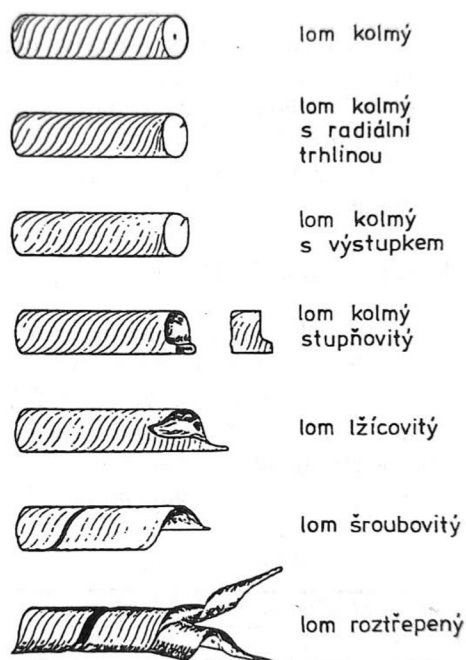
**19.** na délce zkušební vzorku.





Obr. 18 Závislost počtu krutů na zkušební délce a průměru drátu [17]

Po zkoušce se vyhodnocuje vzhled lomu, povrch drátu a počet krutů do přetržení. Obecně se dá říct, že čím je větší průměr drátu, tím je počet krutů menší. Příklady možných lomů drátu po zkoušce kroucením jsou na **obr. 120** [17].



Obr. 19 Soubor etalonů pro hodnocení vzhledu povrchu a lomu po zkoušce kroucením [17]

## 5 Proces výroby drátu v Bekaert Bohumín

Výrobu ve firmě Bekaert Bohumín lze rozdělit do dvou základních částí. První část s názvem tažírna je tvořena 14 drátotahy různých typů. Tato část je určena k přípravě taženého polotovaru, který je následně zpracováván na jedné ze dvou galvanických linek. Tepelné zpracování probíhá ponorem v lázních s tekutým olovem za účelem odstranění vnitřního pnutí a dále k rekrytalizačnímu žihání. Tepelné zpracování v roztaveném olovu je využíváno především z důvodu rychlého přestupu tepla vedením a homogenního ohřevu po průřezu drátu. To má za následek nižší riziko tvarové deformace a ve velké míře také eliminaci nehomogenní struktury po průřezu drátu. Nevýhodou této metody jsou však jedovaté páry oxidu olovnatého, z tohoto důvodu je důležité izolovat hladinu olovené lázně od okolního vzduchu. V závodě Bohumín se pro tento účel využívá jemný granulát křemičitanu hlinitého, prodáváný pod obchodním názvem Perlit. Ten mimo jiné funguje také jako tepelný izolant, což vede k omezení tepelných ztrát a snížení nákladů na ohřev lázni.

Tyto galvanické linky fungují na principu kontinuálního procesu výroby, kdy drát vyrobený na tažírně putuje přímo na odvíjecí centrum, kde je odvíjen a zároveň narovnávan. Narovnaný drát je dále protahován olovenou lázní. Na každé lince jsou nainstalovány dvě lázně s tekutým olovem za sebou. První lázeň je využívána pro odstranění přebytečného maziva po tažení a pro částečné odstranění vnitřního pnutí vzniklého při tažení za studena. Tato lázeň má teplotu 560 °C. Druhá lázeň je poté ohřívána na teplotu 710 °C. Každá olovená vana má délku 8 m. Společnost Bekaert Bohumín, s.r.o. využívá pro výrobu drátů dvou technologií tepelného zpracování. První s názvem HARD, která využívá pouze první olovené lázně s teplotou 560 °C. Druhá technologie s názvem SOFT, využívající obou lázní, je určena k rekrytalizačnímu žihání ocelových drátů. Během výstupu z lázně drát prochází vrstvou jemného antracitu, který má za úlohu stírání tekutého olova z drátu a zamezení jeho výnosu do dalších částí výrobní linky. Po výstupu z olovené lázně je drát ochlazován na vzduchu v délce 15 m, s následným ochlazením ve vodní lázni. Po ochlazení ve vodě drát následně prochází několika vanami s kyselinou chlorovodíkovou, která odstraňuje povrchovou oxidaci vzniklou na povrchu drátu po výstupu z olovené lázně. Po výstupu z lázně s kyselinou chlorovodíkovou drát následně prochází oplachem ve vodě za účelem zastavení chemické reakce a odstranění zbytků oxidů a chloridů z povrchu drátu. Následně drát prochází lázní z tavidla, které je tvořeno směsí chloridu zinečnato-amonného a demineralizované vody. Po výstupu z lázně s tavidlem a následném vysušení povrchu drát vstupuje přímo do lázně s tekutým zinkem.

Ve firmě Bekaert Bohumín se využívá galvanického pokovení ocelového drátu čistým zinkem, případně může být následně aplikován povlak na základě slitiny zinku s hliníkem, který je známý pod obchodním názvem Bezinal, případně Bezinal 2000. Tyto povlaky obsahují kromě zinku také hliník, díky kterému mají vyšší odolnost vůči korozi [21].

## 6 Experiment

Experiment probíhal za provozu ve firmě Bekaert Bohumín, s.r.o. Všechny odběry, měření a mechanické zkoušky týkající se experimentu byly provedeny v této továrně. Výjimku tvoří metalografické analýzy jednotlivých vzorků, které dodala společnost Bekaert Hlohovec, a.s.

### 6.1 Popis experimentu

Pro tento experiment byl zvolen nízkouhlíkový válcovaný drát dodaný Třineckými železárnami o jakosti A02D006 (dle interní specifikace) a průměru 5,5 mm. Tato interní specifikace je uváděna dle firemního označení jakosti (nemá ekvivalent v DIN normě). Požadované chemické složení dané jakosti je uvedeno v **tabulce 1**.

**Tabulka 1** Chemické složení válcovaného drátu v hmotnostních procentech

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%N	%Al	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo
≤0,06	≤0,55	≤0,18	≤0,01	≤0,017	≤0,004	≤0,003	≤0,05	≤0,06	≤0,03	≤0,01

Polotovary byly připraveny na stroji typu HBZ v průměrech:

- 5,5 mm – polotovár (válcovaný drát) – feritická struktura
- 4,77 mm – 1.tah – redukce odpovídá 25 %
- 4,24 mm – 2. tah – redukce odpovídá 40 %
- 3,67 mm – 3. tah – redukce odpovídá 55 %
- 3,18 mm – 4. tah – redukce odpovídá 65 %
- 2,8 mm – 5. tah – redukce odpovídá 75 %
- 2,48 mm – 6. tah – redukce odpovídá 80 %
- 2,22 mm – 7. tah – redukce odpovídá 85 %
- 1,97 mm – 8. tah – redukce odpovídá 90 %

Polotovary o průměru 1,97 mm byly následně tepelně zpracovány v lázni s tekutým olovem o dvou různých teplotách a dvěma různými rychlostmi.

Parametry rychlostí a času pro tepelné zpracování:

- 560 °C 60 m/min
- 710 °C 60 m/min
- 560 °C 120 m/min
- 710 °C 120 m/min

## 6.2 Měření mechanických vlastností

Měření mechanických vlastností byla prováděna dvěma různými zkouškami. První zkouška tahem a druhá zkouška krutem.

### 6.2.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla prováděna za pokojové teploty dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Jednotlivé vzorky drátů byly označeny dle posloupnosti viz **tabulka 2**, narovnané a nastříhané na normalizovanou délku v závislosti na průměru zkoušeného drátu. Zkouška proběhla na zkušebním stroji společnosti Zwick model Roell Z050, viz **obr. 20**. Celkově byly odebrány tři testovací vzorky po jednotlivých tazích a tepelných zpracováních.

První měřená hodnota byla mez pevnosti v tahu  $R_m$ . Mez pevnosti je největší napětí, které vzorek zvládne dle smluvního digramu. Pevnost v tahu se vypočítá jako podíl maximální tahové síly  $F_{max}$  a počátečního průřezu  $S_0$  zkušebního vzorku.

Další měřená veličina byla tažnost  $A$  [%]. Tažnost je určena dle rozměru zkušebního vzorku před a po zkoušce. Vyjadřuje měřítko plasticity daného materiálu.

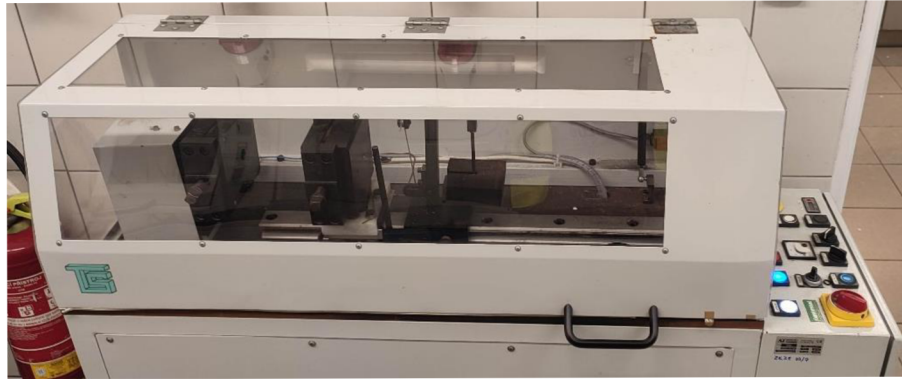


*Obr. 20 Zkušební stroj Zwick model Roell Z050*

### 6.2.2 Zkouška krutem

Zkouška krutem byla prováděna dle ČSN ISO 7800. Jednotlivé vzorky byly narovnány a nastříhány na normalizovanou délku 150 mm. Zkouška proběhla na zkušební stroji společnosti TS Stroje & zařízení model ZKZE 03/7, viz **obr. 21**.

Měřenou hodnotou byl počet krutů, z kterého jsme následně pomocí vzorce (7) vypočítali parametr  $\gamma_t$ .



*Obr. 21 Zkušební stroj TS Stroje & zařízení model ZKZE 03/7*

## 6.3 Výsledky měření mechanických vlastností

### 6.3.1 Výsledky zkoušky tahem

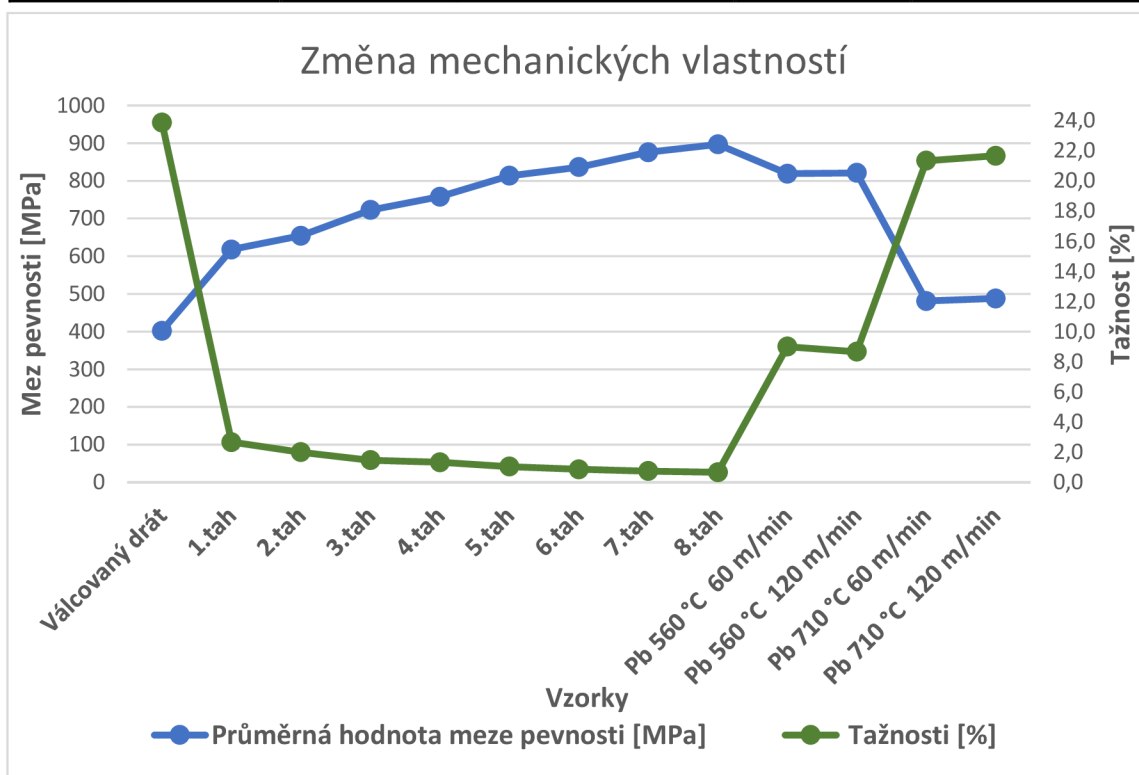
Pro všechny vzorky byla stanovena smluvní mez pevnosti a tažnost. Naměřené hodnoty mechanických vlastností jsou vypsány v **tabulce 2** a graficky vyobrazeny na **obr. 22**.

**Tabulka 2a** Hodnoty mechanických vlastností

Číslo vzorku	Typ vzorku	Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]	Průměrná hodnota meze pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]	Hodnota tažnosti A [%]	Průměrná hodnota tažnosti A [%]
1A	Válcovaný drát	403	402	23,6	23,9
1B		401		24	
1C		403		24	
2A	1.tah	616	618	2,8	2,7
2B		619		2,4	
2C		619		2,8	
3A	2.tah	659	654	2	2,0
3B		648		1,8	
3C		656		2,2	
4A	3.tah	724	723	1,4	1,5
4B		717		1,8	
4C		726		1,4	
5A	4.tah	763	758	1,4	1,3
5B		764		1,2	
5C		747		1,4	
6A	5.tah	810	814	1,2	1,1
6B		804		1,1	
6C		827		0,9	
7A	6.tah	836	836	1	0,9
7B		825		0,8	
7C		848		0,8	

**Tabulka 2b** Hodnoty mechanických vlastností

Číslo vzorku	Typ vzorku	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Průměrná hodnota meze pevnosti $R_m$ [MPa]	Hodnota tažnosti A [%]	Průměrná hodnota tažnosti A [%]
8A	7.tah	876	876	0,5	0,8
8B		889		1	
8C		863		0,75	
9A	8.tah	899	897	1	0,7
9B		883		0,5	
9C		908		0,5	
10A	Pb 560 °C 60 m/min	814	819	9,5	9,0
10B		812		8,5	
10C		832		9	
11A	Pb 560 °C 120 m/min	814	821	8,5	8,7
11B		815		8,5	
11C		835		9	
12A	Pb 710 °C 120 m/min	476	481	20,5	21,3
12B		481		21,5	
12C		487		22	
13A	Pb 710 °C 120 m/min	489	488	21,5	21,7
13B		484		22	
13C		491		21,5	



*Obr. 22 Grafické vyobrazení změny mechanických vlastností*

### 6.3.2 Výsledky zkoušky krutem

Všechny vzorky byly nastříhány na délku 150 mm stanovenou dle ČSN ISO 7800. Test byl proveden do ukroucení každého vzorku, kdy byla zkouška automaticky zastavena. Naměřené hodnoty jsou prezentovány v **tabulce 3**.

**Tabulka 3a** Hodnoty po zkoušce krutem

Číslo vzorku	Typ vzorku	Počet krutů	Průměrný počet krutů	Koeficient $\gamma_t$	Průměrná hodnota $\gamma_t$
1A	Válcovaný drát	21	21,67	2,41	2,49
1B		22		2,53	
1C		22		2,53	
2A	1.tah	43	43,33	4,30	4,34
2B		43		4,32	
2C		44		4,40	
3A	2.tah	33	30,33	2,93	2,69
3B		28		2,49	
3C		30		2,66	
4A	3.tah	28	30,33	2,15	2,33
4B		32		2,47	
4C		31		2,38	
5A	4.tah	29	30,33	1,93	2,02
5B		31		2,06	
5C		31		2,08	
6A	5.tah	29	28,00	1,70	1,64
6B		27		1,59	
6C		28		1,63	
7A	6.tah	22	22,00	1,14	1,14
7B		21		1,10	
7C		23		1,19	
8A	7.tah	22	21,67	1,02	1,01
8B		22		1,01	
8C		21		0,99	
9A	8.tah	29	28,33	1,20	1,17
9B		28		1,16	
9C		28		1,15	



**Tabulka 3b** Hodnoty po zkoušce krutem

Číslo vzorku	Typ vzorku	Počet krutů	Průměrný počet krutů	Koeficient $\gamma_t$	Průměrná hodnota $\gamma_t$
10A	Pb 560 °C 60 m/min	26	26,33	1,07	1,09
10B		27		1,12	
10C		26		1,07	
11A	Pb 560 °C 120 m/min	32	30,67	1,32	1,27
11B		30		1,24	
11C		30		1,23	
12A	Pb 710 °C 60 m/min	63	64,00	2,60	2,64
12B		65		2,70	
12C		64		2,63	
13A	Pb 710 °C 120 m/min	57	58,33	2,35	2,41
13B		58		2,41	
13C		60		2,46	

#### 6.4 Metalografická analýza

Ze všech vzorků experimentu byly vyhotoveny metalografické snímky jak leštěné, tak i leptané. Z těchto vzorků byly následně vybrány vzorky s reprezentativní ukázkou struktury a vměstků v materiálu. Tyto vzorky byly vyhotoveny v metalografických laboratořích VUT Brno ÚMVI (snímky 23 až 32) a v Bekaert Hlohovec, a.s. (snímky 33 až 45).

Všechny vzorky byly podélně nastříhány a za preparovány do pryskyřice používané pro metalografické analýzy. V laboratořích VUT byly vzorky zbroušeny a leštěny keramickou pastou. Po vyleštění následovalo opláchnutí v ethanolu. Takto vyleštěné vzorky byly následně zdokumentovány vměstky na světelném mikroskopu Olympus GX 71. Po zdokumentování byly vzorky opětovně přeštěněny a následně leptány v 3% roztoku  $\text{HNO}_3$  a opláchnuty v ethanolu. Následně byly vzorky opět zdokumentovány, tentokrát však byla prováděna dokumentace mikrostruktury.

V laboratořích Bekaert Hlohovec, a.s. byl postup obdobný. Zde se však provádělo pouze leptání vzorků s následným zdokumentováním mikrostruktury pomocí mikroskopu typu Olympus BX51M.

Čísla na obrázcích odpovídají číslu vzorku v **tabulce 2 a 3**.

#### 6.4.1 Metalografická analýza vměstků v materiálu

Z metalografických snímků leštěných, lze usoudit vysokou čistotu materiálu s občasným výskytem vměstků viz **obr. 23 a 24**. Ojedinelé se může vyskytnout větší vměstek viz **obr.25**. V tomto případě se však může jednat o zaválcované okuje či oxisulfid.



*Obr. 23 Struktura drátu – válcovaný stav 500x zvětšení*



*Obr. 24 Struktura drátu – 8.tah 500x zvětšení*



*Obr. 23 Struktura drátu – Tepelně zpracován Pb 710 °C 120 m/min  
500x zvětšení*

#### **6.4.2 Detailní metalografická analýza mikrostruktury**

Z metalografických snímků mikrostruktury lze vyzorovat u válcovaného drátu lamelární perlit viz **obr. 27**. Dále si lze povšimnout, že po prvním tahu nenastává viditelná změna mikrostruktury viz **obr 28**. Střední rozměr zrn byl určen dle normy ČSN 42 0463. Pro vzorek válcovaného drátu (**obr. 26**) byla zjištěna střední velikost zrna odpovídající číslu 5 (do **12 μm**) a pro drát tepelně zpracovaný (Pb 710 °C 120 m/min) (**obr. 31 a 32**) střední velikost zrna odpovídá číslu 8 (do **4 μm**).



*Obr. 24 Struktura drátu – válcovaný stav 500x zvětšení*



*Obr. 27 Struktura drátu – válcovaný stav 1000x zvětšení*



*Obr. 28 Struktura drátu – 1.tah 500x zvětšení*



Následující snímky jsou pro drát po rekrytalizačním žihání, kdy na **obr. 29** lze vidět výrazně protaženou mikrostrukturu, následně je na **obr. 30** tato mikrostruktura zvětšená a lze si povšimnout rozpadající se perlit.

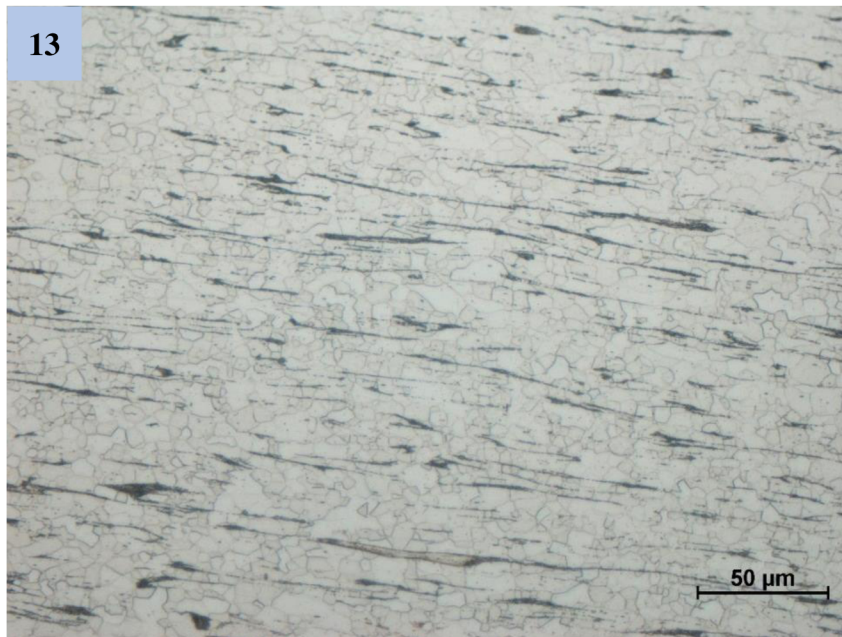


*Obr. 29 Struktura drátu – Tepelně zpracován Pb 560 °C 60 m/min  
500x zvětšení*

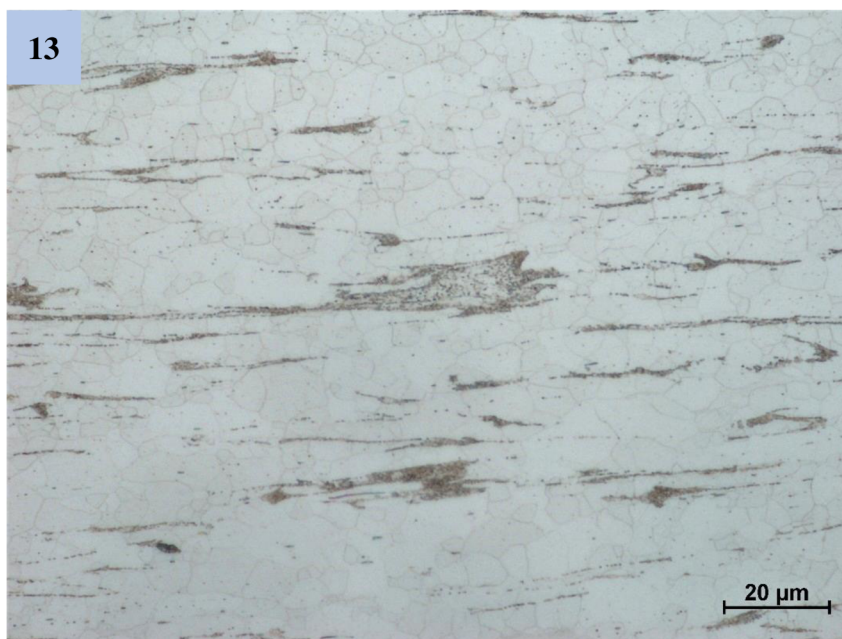


*Obr. 30 Struktura drátu – Tepelně zpracován Pb 560 °C 60 m/min  
1000x zvětšení*

Další snímky ukazují strukturu po žihání na měkko, kdy si na **obr. 32** lze povšimnout globulárního perlitu. Mikrostruktura se tvarově podobá válcovanému drátu.



*Obr. 31 Struktura drátu – Tepelně zpracován Pb 710 °C 120 m/min  
500x zvětšení*

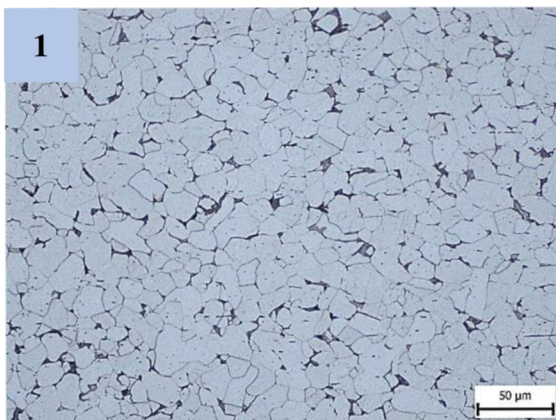


*Obr. 32 Struktura drátu – Tepelně zpracován Pb 710 °C 120 m/min  
1000x zvětšení*

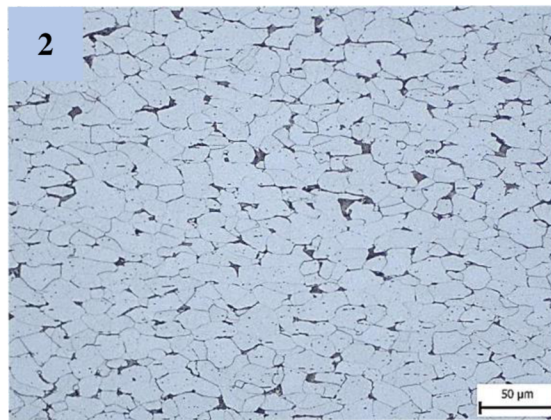


### 6.4.3 Metalografická analýza mikrostruktury

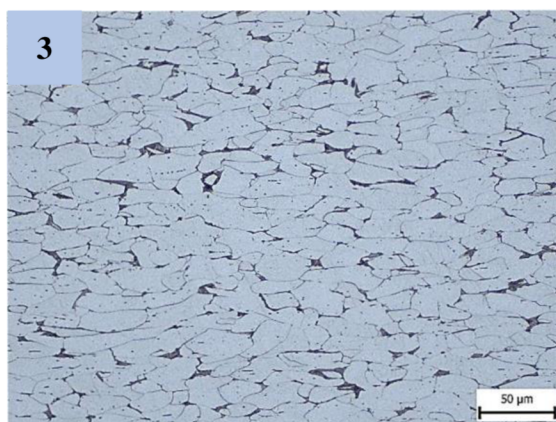
Metalografická analýza ukazuje postupné prodlužování zrn ve směru tažení (obr. 33 až 41). Následně po tepelném zpracování dochází k obnově krystalické struktury, kterou lze pozorovat na obr. 43 a 45.



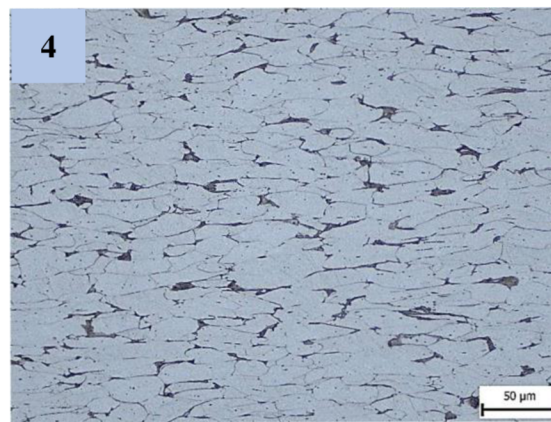
Obr. 33 Struktura drátu – válcovaný stav



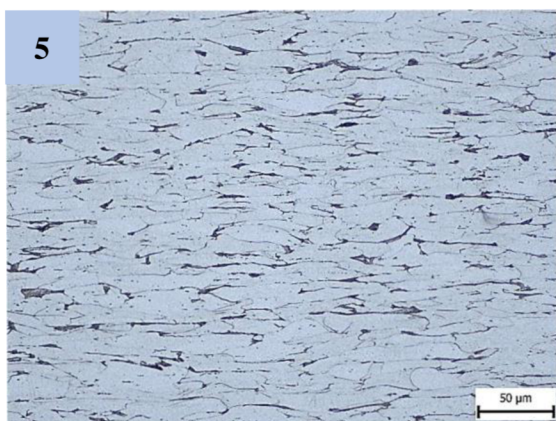
Obr. 34 Struktura drátu – 1.tah



Obr. 35 Struktura drátu – 2.tah



Obr. 36 Struktura drátu – 3.tah

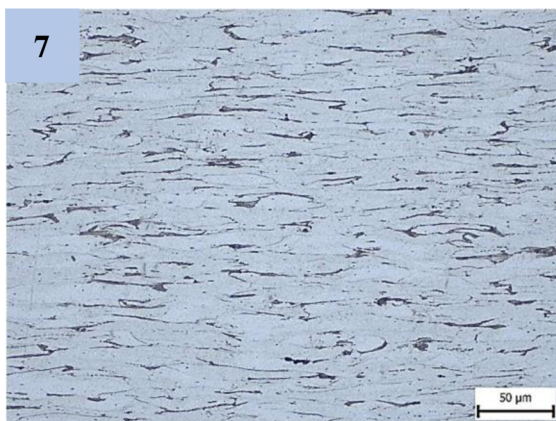


Obr. 37 Struktura drátu – 4.tah



Obr. 38 Struktura drátu – 5.tah

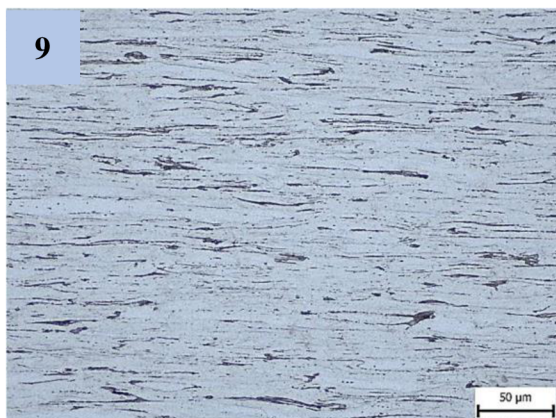




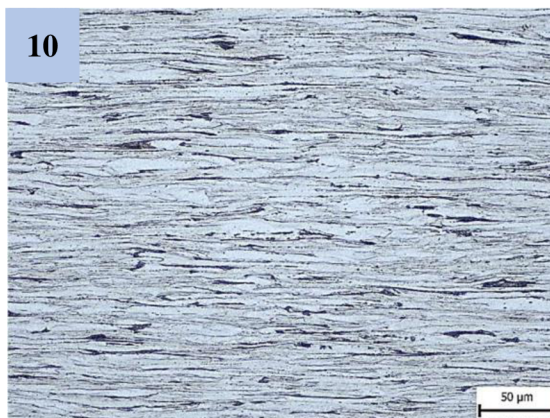
*Obr. 39 Struktura drátu – 6.tah*



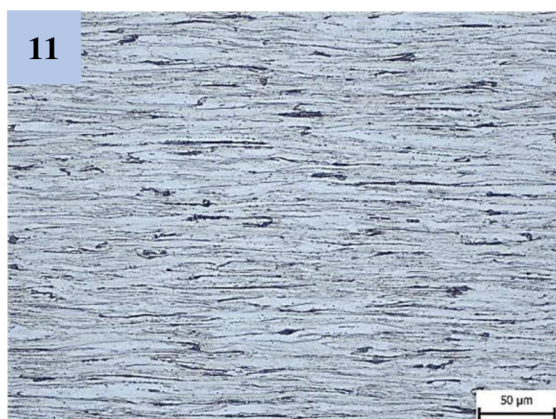
*Obr. 40 Struktura drátu – 7.tah*



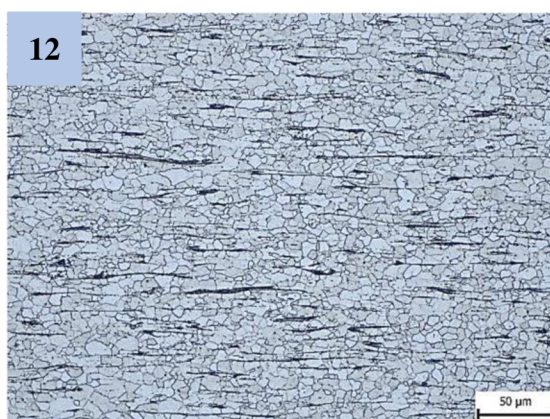
*Obr. 41 Struktura drátu – 8.tah*



*Obr. 42 Struktura drátu – Tepelně  
zpracován Pb 560 °C 60 m/min*

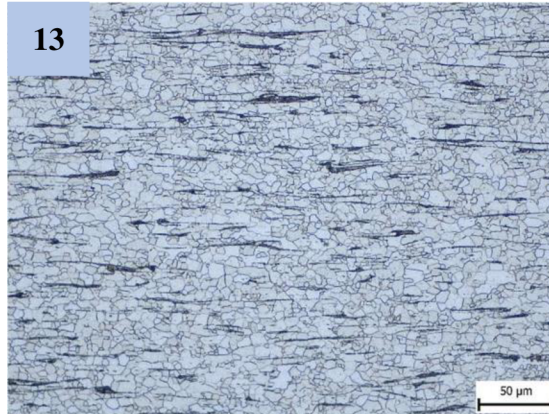


*Obr. 43 Struktura drátu – Tepelně  
zpracován Pb 560 °C 120 m/min*



*Obr. 44 Struktura drátu – Tepelně  
zpracován Pb 710 °C 600 m/min*





Obr. 45 Struktura drátu – Tepelně zpracován Pb 710 °C 120 m/min

## 6.5 Exponent deformačního zpevnění

Exponent deformačního zpevnění byl vypočítán dle rovnice (6) a jejího zlinearizovaného tvaru viz rovnice (8). Dále bylo potřebné dopočítat hodnoty skutečné poměrné deformace viz rovnice (9) a hodnoty skutečného napětí viz rovnice (10). Rovnice (8) představuje lineární regresní funkci  $y = b_1 + b_2 x$ .

$$\ln \sigma = \ln k + n \ln \bar{\varepsilon} \quad (8)$$

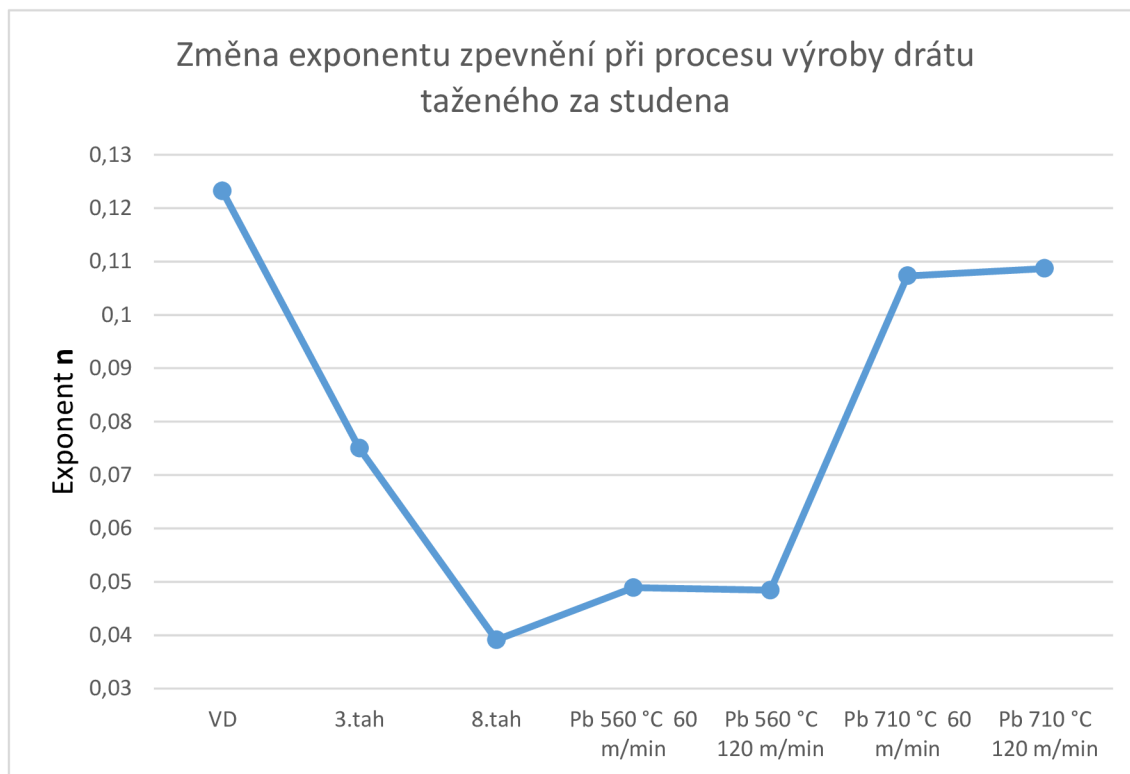
$$\bar{\varepsilon}_i = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \left( \frac{L_i}{L_0} \right) = \ln \left( \frac{L_0 + \Delta L_i}{L_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon_i) \quad (9)$$

$$\sigma_i = R_i(1 + \varepsilon_i) \quad (10)$$

kde symbolika znamená:

n	exponent zpevnění [-]
k	koeficient zpevnění [MPa]
$\bar{\varepsilon}$	skutečná poměrná deformace [%]
$\varepsilon_i$	smluvní poměrná deformace [%]
$\sigma_i$	skutečné napětí [MPa]
$R_i$	smluvní napětí [MPa]
$L_i$	koncová délka vzorku [mm]
$L_0$	počáteční délka vzorku [mm]
$\Delta L_i$	okamžité prodloužení měrné délky vzorku [mm]
y	$\ln \sigma$
x	$\ln \bar{\varepsilon}$
$b_1$	$\ln k$
$b_2$	n

Na **obr. 46** je vyobrazený změna exponentu deformační zpevnění v závislosti na části výrobního procesu drátu taženého za studena s následným tepelným zpracováním.



*Obr. 46 Změna exponentu zpevnění při procesu výroby drátu taženého za studena*

## 7 Diskuse

Výsledky měření mechanických vlastností při zkoušce tahem ukazují postupný nárůst meze pevnosti od 402 MPa u válcovaného drátu až po 897 MPa u drátu po 8. tahu a pokles tažnosti po jednotlivých stupních deformace od 23,9 % u válcovaného drátu až po 0,7 % u drátu po 8. tahu. Největší nárůst meze pevnosti a zároveň pokles tažnosti lze pozorovat po prvním stupni deformace viz **obr. 22**. Toto je zapříčiněno největší redukcí průřezu 25 % vůči výchozímu stavu materiálu, kdy dochází k výraznému zpevnění. Po jednotlivých krocích tepelného zpracování došlo k postupné obnově mechanických vlastností v důsledku odpevňovacích procesů, kdy nastal pokles meze pevnosti až na hodnotu 481 MPa a nárůstu tažnosti na hodnotu 21,7 %. Tyto hodnoty mechanických vlastností se přibližují hodnotám vstupního materiálu.

Ze zkoušky drátu v krutu byl stanoven koeficient  $\gamma_t$ , který lze použít k výpočtu přibližného počtu krutů do přetržení dle rovnice (7) pro materiál se stejným nebo podobným chemickým složením. Dále lze vyčíst z **tabulky 3** klesající trend koeficientu  $\gamma_t$  s postupným nárůstem stupně deformace indikující, přítomnost deformačního zpevnění. Nárůst počtu krutů po prvním tahu je způsoben příliš malou mezí pevnosti válcovaného drátu.

Metalografická analýza leštěných vzorků poukazuje na čistotu vstupního materiálu s ojedinělým výskytem nekovových vměstků, které mohou vzniknout při výrobě polotovaru. Na snímcích mikrostruktury je zřetelný výskyt lamelárního perlitu viz **obr. 27**. Při postupné deformaci materiálu dochází k dělení lamel perlitického cementitu, což lze pozorovat na **obr. 30**. Po žihání naměkko lze pozorovat ve struktuře na **obr. 32** výskyt globulárního perlitu.

Celkový průběh deformace krystalické struktury je zachycen na **obr. 33 až 41**, z těchto snímků je patrné postupné protahování zrn ve směru deformace, což vede ke vzniku textury. Dále na **obr. 42 až 45** lze pozorovat vliv tepelného zpracování na změnu mikrostruktury až do stavu, který připomíná vstupní polotovar.

Exponent deformačního zpevnění byl vypočten pro nejvíce reprezentativní vzorky a to:

- válcovaný drát,
- drát po 3. tahu,
- drát po 8. tahu.

Z **obr. 46** lze vyčíst postupný pokles exponentu deformačního zpevnění. Tento jev lze chápat jako zpevňovací proces způsobený deformací drátu v průvlaku. Dále se zde projevuje vliv odpevňovacích pochodů (tepelné zpracování), kterými lze téměř zcela eliminovat vliv výše zmíněného zpevňovacího procesu.

Při porovnání jednotlivých exponentů deformačního zpevnění s odpovídajícími snímky metalografické analýzy, lze dojít k závislosti stupně deformace na zpevnění materiálu.

Na základě naměřených experimentálních hodnot a historických dat poskytnutých firmou Bekaert, byl vytvořen matematický model, viz **Příloha 1.**, pro určení zpevnění materiálu v závislosti na obsahu uhlíku, typu průvlastkové sady a počtu tahů.

Matematický model je součástí přiloženého excelovského souboru. Model umožňuje predikovat nárůst zpevnění materiálu v závislosti na zvoleném typu průvlaku, počtu tahů a redukci průměru.

Vypočtená mez pevnosti koresponduje z reálně naměřenými hodnotami po jednotlivých tazích. Malé odchylky reálné pevnosti od vypočtených hodnot jsou způsobeny materiálovými charakteristikami polotovaru (rozptyl chemického složení, nečistoty apod.), případně nutnosti optimalizace průvlakové sady.

## 8 Závěry

Cílem této bakalářské práce bylo provést literární studii se zaměřením na změny mechanických vlastností nízkouhlíkových ocelových drátů vyrobených procesem tažení za studena s následným rekrytalizačním žiháním. Experimentální část bakalářské práce popisuje zhodnocení stavu vybraného typu ocelí při různých stupních deformace a následném tepelném zpracování.

Na základě analýzy výsledku lze konstatovat splnění hlavních i vedlejších cílů bakalářské práce v plném rozsahu.

Na tažirenském stroji byl ze stejného válcovaného drátu o průměru 5,5 mm natažen polotovár o finálním průměru 1,97 mm. Proces tažení byl realizován pomocí postupné redukce na osmi tazích. Po každém průvlastku (redukci) byly odebrány vzorky, na kterých byly měřeny základní mechanické vlastnosti jako je mez pevnosti, smluvní mez kluzu, tažnost a počet krutů.

Finální polotovár o průměru 1,97 mm byl následně tepelně zpracován v lázních s tekutým olovem při různých podmínkách, konkrétně při teplotě 560 °C a 710 °C a dvou výrobních rychlostech (60 m/min a 120 m/min). Měření meze pevnosti, smluvní meze kluzu, tažnosti a počtu krutů bylo provedeno na všech vzorcích ihned po jejich odebrání.

Měření mechanických vlastností prokázalo postupný nárůst hodnot meze pevnosti s největší hodnotou 892 MPa a pokles tažnosti po jednotlivých stupních deformace až na 0,7 % u drátu po 8. tahu. Měření bylo dále zjištěna částečná obnova mechanických vlastností po tepelném zpracování, přibližující se hodnotám vstupního materiálu. Na základě naměřených hodnot mechanických vlastností byl stanoven exponent deformačního zpevnění.

Ze všech vzorků experimentu byly vyhotoveny metalografické analýzy. Z těchto vzorků byly následně vybrány vzorky s reprezentativní ukázkou struktury a vměstků v materiálu. Metalografická analýza vměstku prokázala vysokou čistotu vstupního polotovaru s občasným výskytem nekovových vměstků. U metalografické analýzy mikrostruktury, byla zdokumentována postupná deformace zrn, která vedla ke vzniku textury. Dále byl pozorována deformace perlitu a jeho přeměna na perlit globulární po tepelném zpracování.

Na základě naměřených dat a historických hodnot poskytnutých firmou Bekaert, byl vytvořen matematický model, který umožňuje stanovit predikci změny mechanických vlastností ocelového drátu v závislosti na chemickém složení oceli, zvolené průvlastkové sady a stupni deformace.

Dále je doporučeno pracovat na rozšíření matematického modelu pro stanovení predikce zpevnění v závislosti na jiných typech průvlastku případně v závislosti na typu tepelného zpracování polotovaru (patentovaný polotovár, řízeně ochlazovaný polotovár apod.) Dále lze navázat na optimalizaci průvlastkových sad případně na optimalizaci suchých maziv tak, aby bylo možné zvýšit efektivnost procesu tažení, snížení výrobních ztrát a zvýšení objemu výroby při dané technologii.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Bekaert in a nutshell [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://www.bekaert.com/en/>
- [2] FABÍK, R. Vybrané kapitoly z tváření kovů-tažení. Ostrava, 2008. Studijní opora. VŠB-TU Ostrava.
- [3] MARCOL, J. a kol. Tažený ocelový drát 1. díl. ŽDB Group a.s. Bohumín, 1996
- [4] BEUNENS, P. *Technologies of wire – cold drawing*. Interní dokument. N. V. Bekaert. Zwevegem, 1992.
- [5] Fakulta strojní. Technická univerzita Liberec. Technologie II – tváření kovů, zpracování plastů. Kapitola 4 Technologie objemového tváření – Tažení drátů a profilů. [online]. 2013. [cit. 2022-11-06].
- [6] MARCOL, J., Příspěvek k problematice výroby ocelového drátu. Hutnické aktuality. Dobrá u Frýdku-Místku: VÚHT a. s., 1992. 68 s. ISSN 0322-8525.
- [7] KLEPAČ, Kamil. Optimalizace průvlekové řady při tažení drátu za studena. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2013. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [8] Deformace a odpeňovací pochody: Plastická deformace, deformační zpevnění, odpeňovací pochody kovů. In: *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. FSI VUT v Brně: Ústav materiálových věd a inženýrství, c 2012 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: [https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3A%2F%2Fime.fme.vutbr.cz%2Fimages%2Fumvi%2Fvyuka%2Ffyzika\\_materialu%2Fprednasky%2F07b\\_plasticka%2520deformace%2520a%2520odpevneni.ppt&wdOrigin=BROWSELINK](https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3A%2F%2Fime.fme.vutbr.cz%2Fimages%2Fumvi%2Fvyuka%2Ffyzika_materialu%2Fprednasky%2F07b_plasticka%2520deformace%2520a%2520odpevneni.ppt&wdOrigin=BROWSELINK)
- [9] PLUHAŘ, J. a J. KORITTA. *Strojrenské materiály*. Vydání druhé, přepracované. Praha: SNTL, 1977. ISBN 04-212-77.
- [10] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.
- [11] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 8021423749.
- [12] ZÁŠKODA, David. Zjišťování mechanických vlastností tvářených materiálů. Fakulta strojního inženýrství, 2008. Bakalářská práce. VUT – Vysoké učení technické v Brně.
- [13] Plastická deformace: Plasticita I+II. In: *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. FSI VUT v Brně: Ústav materiálových věd a inženýrství, c 2012 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: [https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3A%2F%2Fime.fme.vutbr.cz%2Fimages%2Fumvi%2Fvyuka%2Fmezni\\_stavy%2Fprednasky%2F6MS\\_04\\_plasticita.ppt&wdOrigin=BROWSELINK](https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http%3A%2F%2Fime.fme.vutbr.cz%2Fimages%2Fumvi%2Fvyuka%2Fmezni_stavy%2Fprednasky%2F6MS_04_plasticita.ppt&wdOrigin=BROWSELINK)
- [14] MOLLIKOVÁ, E. Exponent deformačního zpevnění [ústní sdělení]. VUT Brno. Technická 2896, Brno. 2. 3. 2023.

- [15] VÁŇOVÁ, P. *Základy tepelného zpracování*. Ostrava, 2011. Studijní opora. VŠB-TU Ostrava.
- [16] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2002. ISBN 80-7204-248-32.
- [17] MARCOL, J. a kol. *Tažený ocelový drát 2. díl*. ŽDB Group a.s. Bohumín, 1996
- [18] HUMPHREYS, F. J. a HATHERLY, M.: *Recrystallization and related annealing phenomena*. 2nd ed. Boston: Elsevier, 2004. ISBN 978-0-08-044164-1.
- [19] MESPLONT, C. *Heat treatments on steel wire*. TRAINING HLOHOVEC, 2011, 75 s. Interní prezentace.
- [20] *Kurz tepelného zpracování: učební texty*. Praha: Ecosond, 2009. ISBN 978-80-904462-1-2. Dostupné také z:  
<http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:98406020-3a06-11e7-8e0f-005056827e52>
- [21] WIDENKA, R. *Proces výroby drátu v Bekaert Bohumín* [ústní sdělení]. Bekaert Bohumín. Drátovenská 366, Bohumín. 22. 11. 2022.
- [22] VĚCHET, S a K NĚMEC. *Tepelné zpracování ocelí (druhy a způsoby)*. In: *SLidePlayer* [online]. SlidePlayer.cz Inc.: SlidePlayer.cz, c2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2810347/>
- [23] ČÍŽEK, Lubomír. *Praktikum ze zkoušení kovů I.: Základní zkušební metody*. [Díl] 1., Základní zkušební metody. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1990. ISBN (brož.).
- [24] MIKEL, Lukas. *Strojírenství – Engineering: Strojírenská technologie, 1. ročník Pružnost Pevnost*. In: *Strojírenství – Engineering* [online]. 2005–2023 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <http://www.strojirenstvi.wz.cz/image.php?subject=1&class=1&topic=8&image=0>
- [25] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Česká agentura pro standardizaci, 01/2021n. 1.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1.:

2023\_BP\_Stopka\_Maros\_229158\_Matematicky\_model\_predikce\_zpevneni.xlsx