



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE TAŽENÍ DRÁTŮ

WIRE DRAWING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Štys

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Michal Štys**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Technologie tažení drátů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o literární rešerši, zaměřenou na současný stav poznání v oblasti technologie tažení drátů.

Cíle bakalářské práce:

- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na technologii tažení drátů,
- popis jednotlivých činitelů procesu a jejich významu pro proces tažení drátů.

Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. Metals handbook volume 14: Forming and forging. 9. vyd. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1988. ISBN 978-0-871-70020-9.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

ŠTYS Michal: Technologie tažení drátů

Práce předkládá aktuální rešerši na téma technologie tažení drátu se zaměřením na rozbor činitelů procesu, jejich výpočet a vliv na průběh procesu. V rámci rešerše jsou uvedeny jednotlivé metody tažení a technologický postup tažení drátu. Práce se dále zabývá geometrií a materiály průvlaků a jejich vlivy na kvalitu procesu a opotřebení nástroje. Následně jsou rozebrány aktuálně používané stroje, shrnuty jejich výhody, nevýhody a vhodnost použití v závislosti na materiálech tažených drátů a ekonomické rentabilitě. V závěru práce jsou uvedeny nekonvenční metody tažení drátu a budoucí vývoj těchto metod.

Klíčová slova: tváření, tažení drátu, průvlak, redukce, tažná stolice

ABSTRACT

ŠTYS Michal: Wire drawing technology

The paper presents current research on the technology of wire drawing with focusing on the analysis of process factors, their calculation and influence on the process itself. The research describes drawing methods and technological process of wire drawing. The work also deals with geometry and die materials and their effects on process quality and tool wear. Subsequently this thesis analyses currently used machines and their advantages and disadvantages. As well as their suitability for use depending on the materials of the drawn wires and economic profitability. At the end of the thesis, unconventional methods of wire drawing and their future development estimation are presented.

Keywords: forming, wire drawing, drawing die, reduction, drawing machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTYS, Michal. *Technologie tažení drátů*. Brno, 2018. 28s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 25.5.2018

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za psychickou podporu v průběhu tvorby bakalářské práce i celého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 TECHNOLOGIE TAŽENÍ DRÁTU	10
1.1 Teorie tažení drátu	10
1.1.1 Redukce a přetvoření	10
1.1.2 Tažná síla a práce	11
1.1.3 Tažná rychlost	12
1.1.4 Tažný výkon	13
1.1.5 Vznik a regulace tepla	13
1.2 Tření a mazání	14
1.3 Metody tažení drátu	15
1.4 Technologický postup tažení drátu	16
1.4.1 Přípravné procesy	16
1.4.2 Tažný proces	18
1.5 Defekty drátu	19
2 NÁSTROJE PRO TAŽENÍ DRÁTU	20
2.1 Geometrie průvleků	20
2.2 Materiály průvleků	21
2.3 Životnost a vady průvleků	23
3 STROJE PRO TAŽENÍ DRÁTU	24
3.1 Tažné stroje pro tandemové tažení	24
3.2 Tažné stroje pro jednoduché tažení	25
4 NEKONVENČNÍ METODY TAŽENÍ	27
5 ZÁVĚRY	28

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD [2], [6], [13], [18], [19], [20], [21]

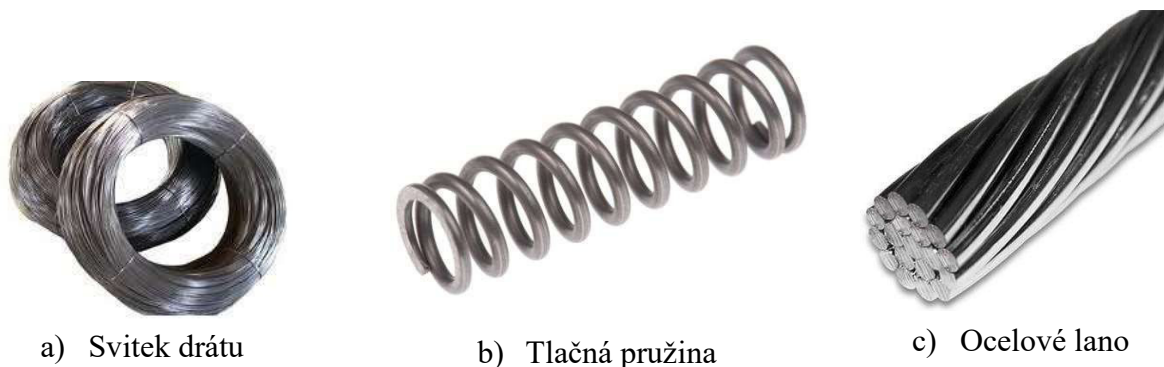
Mezi výrobní technologie lze zařadit mimo jiné také technologii tváření. Tato technologie, při níž zpravidla nedochází k porušování celistvosti polotovaru, slouží ke zpracování materiálu, při kterém dochází ke změně jeho tvaru a fyzikálních vlastností. Dělí se na dvě základní oblasti, a to na objemové tváření a plošné tváření.

Objemové tváření je proces, při kterém probíhá přetvoření polotovaru ve všech směrech objemu. Hlavními výhodami objemového tváření jsou produktivita, rozměrová přesnost finálního výrobku a minimální odpad. Mezi základní metody objemového tváření se řadí válcování, kování, tažení, protlačování aj. Pomocí tažení se při objemovém tváření nejčastěji zpracovávají polotovary ve formě drátu či tyče kruhového průřezu.

Principem této metody je protahování polotovaru přes nástroj neboli průvlak. V průběhu tažení dochází k redukci průřezu a zvětšení délky výrobku. Ve velkosériové výrobě se používají tažné stolice viz obr. 1, ve kterých se drát protahuje více průvlaků na jeden tah. Při použití této metody jsou konečnými výrobky například svitky drátů viz obr. 2a, pružiny viz obr. 2b a při dalším zpracování například i ocelová lana viz obr. 2c.



Obr. 1 Tažná stolice [18]



Obr. 2 Výrobky z drátu [19], [20], [21]

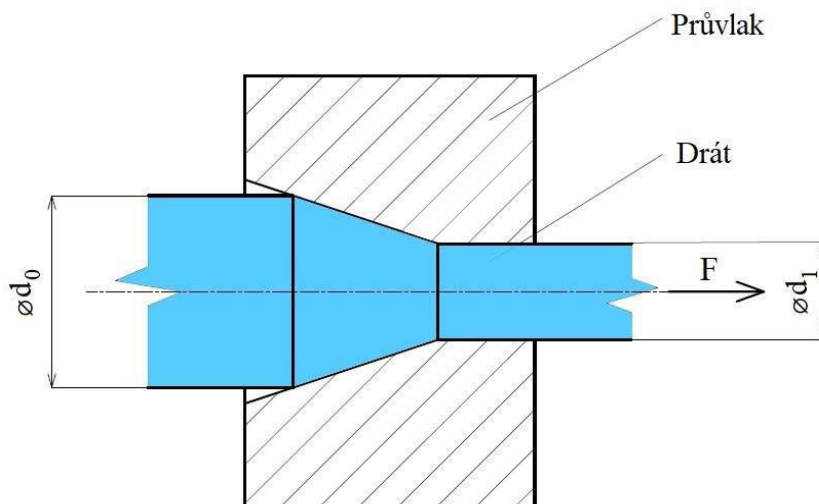
1 TECHNOLOGIE TAŽENÍ DRÁTU [1], [3], [4], [6], [8]

Polotovarem pro tažení drátu jsou tyče a dráty kruhového průřezu, zpravidla bývají smotány do svitku. Před začátkem tažení je nutné polotovary vyrovnat a zmenšením přizpůsobit průměr konce, aby jej bylo možno vsunout do průvlatu. Toto zúžení se nejčastěji provádí při pokojové teplotě lisováním, válcováním nebo v případě větších průměrů soustružením. Polotovary se za průvlatem připevní buď

na bubnu, na který je následně navíjen drát, nebo se upne do tažných čelistí. Tažné čelisti jsou umístěny na tažném vozíku, který poté začne pojíždět. Tímto je vyvinuta tažná síla F , která začne protahovat drát přes průvlat viz obr. 3. Do nástroje tedy vstupuje drát s větším průměrem

(d_0) a vystupuje s menším průměrem (d_1). V případě větších redukcí průměru

lze použít více průvlatů, jimiž drát postupně prochází, což je označováno za tzv. tandemové tažení. V místě tváření drátu dochází k působení tahu a tlaku a vzniká zde zbytkové napětí, které je možné eliminovat následným tepelným zpracováním.



Obr. 3 Zjednodušený náčrtek procesu [6]

1.1 Teorie tažení drátu [1], [6]

Deformace při tažení drátu je ovlivněna velkým počtem faktorů. Nejdůležitějšími faktory jsou velikost redukce, rychlost tažení, vstupní úhel průvlatu a chemické složení drátu. Největší důraz je kladen na pochopení a definování vztahů, které existují mezi těmito faktory, a to z důvodu jejich vlivu na průběh procesu tažení.

1.1.1 Redukce a přetvoření [1], [5], [6], [8], [13]

V procesu tažení drátu se změna tvaru udává pomocí poměrného přetvoření, které je vyjádřeno plošnou redukcí r . Definováno je dle následujícího vztahu:

$$r = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = 1 - \frac{A_1}{A_0}, \quad (1.1)$$

kde: r je redukce plochy [-],

A_0 je vstupní plocha průřezu drátu [mm^2],

A_1 je výstupní plocha průřezu drátu [mm^2].

Pokud by se při procesu tažení nevyskytovalo žádné tření ani další ztrátové faktory, hlavní logaritmické přetvoření ve směru redukce plochy by se vypočetlo následovně:

$$\varphi = \ln \frac{A_0}{A_1} = \ln \frac{1}{1 - r}, \quad (1.2)$$

kde: φ je logaritmické přetvoření [-].

U jednoduchého tažení se logaritmické přetvoření u ocelových drátů pohybuje mezi 1,5 až 2, u mědi a jejích slitin je přibližně 2 a u hliníku a jeho slitin se pohybuje též okolo 2. Přetvoření v jednom tahu a celkové přetvoření u tandemového tažení v závislosti na materiálu a jeho mezi pevnosti je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1 Celkové přetvoření při tandemovém tažení [6]

Materiál	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Vstupní průměr d_0 [mm]	Přetvoření v jednom tahu [-]	Celkové přetvoření [-]	Počet tažných stanic
Ocel	400	4–12	0,18–0,22	3,8–4,0	8–21
	1 200	4–12	0,18–0,22	3,8–4,0	
	1 200	0,5–2,5	0,12–0,15	1,2–1,5	
Měď a její slitiny	250	8–10 za mokra	0,40–0,50	3,5–4,0	5–13
		1–3,5	0,18–0,20	2,0–3,0	
Hliník a jeho slitiny	80	12–16 za mokra	0,20–0,25	2,5–3,0	5–13
		1–3,5	0,15–0,20	1,5–2,0	

1.1.2 Tažná síla a práce [1], [5], [6], [8], [13]

Z důvodu působení tahových a tlakových sil, které jsou generovány mezi povrchem průvlastku a povrchem drátu, je výpočet působících sil složitý. Schéma uvolněného tělesa neboli působících síly na drát při jeho průchodu průvlastkem je vyobrazeno na obrázku 4. Tažná síla F představuje celkovou sílu, která musí působit na tažený polotovár, aby byl překonán odpor materiálu proti deformaci a tření působící mezi povrchem drátu a průvlastkem. Jelikož je tváření materiálu vykonáváno tažnou a nikoli tlačnou silou, dosahuje se menší stability procesu z hlediska možného porušení polotovaru během tváření.

V praxi je nejčastěji limitováno tažné napětí na přibližně 60 % hodnoty meze pevnosti materiálu drátu. Tažné napětí se vypočte podělením tažné síly plochou průřezu drátu. Dle Siebela [6] lze tažnou sílu vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$F = A_1 \cdot k_{strm} \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{2 \cdot \hat{\alpha}}{3 \cdot \varphi_p} + 1 \right),$$

kde: A_1 je výstupní průřez drátu [mm²],

k_{strm} je střední napětí [MPa],

ε je poměrné přetvoření [-],

μ je třecí koeficient [-],

α je poloviční úhel rozevření tažného kužele [°],

$\hat{\alpha}$ je poloviční úhel rozevření tažného kužele [rad].

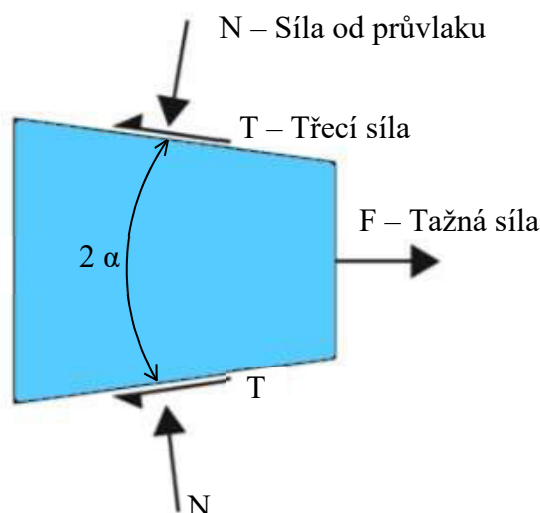
Tažnou sílu je možno jednodušeji vypočítat s menší ale dostačující přesností pomocí vzorce doporučeného komisí pro tažení drátu Ferrous Drawing Committee [8], který má tvar:

$$F = 1,6 \cdot R_m \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \right) \cdot \ln \frac{d_0}{d_1}, \quad (1.4)$$

kde: R_m je mez pevnosti v tahu [MPa],

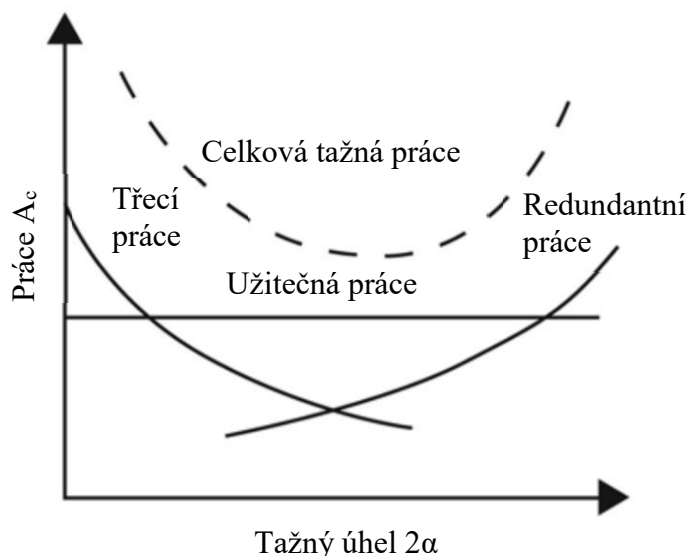
d_0 je vstupní průměr [mm],

d_1 je výstupní průměr [mm].



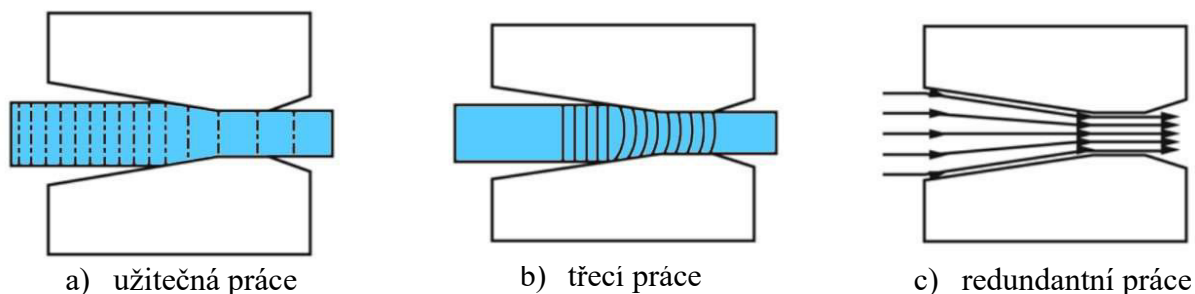
Obr. 4 Schéma působících sil v místě redukce [8] (1.3)

V průběhu tažení vznikají neefektivnosti, které způsobují, že skutečná spotřebovaná energie v jednom tahu je znatelně vyšší než energie potřebná na redukci průměru drátu. Vzniklé neefektivnosti, které nemají užitečné příspěvky k redukci průřezu, pouze nepříznivě ovlivňují kvalitu povrchu drátu. Je možné je ale ovlivnit pomocí změny tažného úhlu. Celková práce potřebná v průběhu jednoho tahu může být rozdělena na tři jednotlivé složky. Podíl jednotlivých prací na práci celkové v závislosti na velikosti tažného úhlu je znázorněn na obrázku 5. Jedná se o užitečnou (homogenní) práci potřebnou pro redukci průřezu, třecí (nehomogenní) práci potřebnou pro překonání třecího odporu a redundantní práci (nehomogenní), která je potřebná pro změnu směru toku materiálu.



Obr. 5 Graf rozložení prací [8]

Jak lze vidět v grafu na obrázku 5, užitečná práce má konstantní průběh v závislosti na tažném úhlu, ale třecí a redundantní práce exponenciálně klesá, respektive roste. Třecí a redundantní práce mají navzájem opačnou závislost na změně tažného úhlu. Za běžných podmínek se třecí práce podílí 20 % a redundantní práce 12 % na celkové práci. Vyobrazení průběhu jednotlivých typů prací je znázorněno na obrázku 6.



Obr. 6 Vyobrazení průběhu prací [8]

1.1.3 Tažná rychlost [6], [8]

Tažná rychlost ovlivňuje množství vzniklého tepla v průběhu tažení a zároveň kvalitu povrchu drátu. Z doporučených rychlostí průchodu průvlakem (viz tabulka 2) lze vypočítat počáteční rychlost a v případě tandemového tažení i rychlost mezi jednotlivými tahy. Jelikož zde nedochází k redukci objemu, ale pouze ke změně tvaru, lze velikost rychlosti jednoduše vypočítat pomocí zákona o zachování objemu. Na vstupu je průměr drátu větší a na výstupu menší, proto musí být rychlost na vstupu vyšší než na výstupu z průvlakem a tudíž platí:

$$v_i \cdot d_i^2 = v_f \cdot d_f^2, \quad (1.5)$$

kde: v_i je vstupní rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

d_i je vstupní průměr [mm],

v_f je výstupní rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

d_f je výstupní průměr [mm].

U jednoduchého tažení se vstupní rychlost a průměr drátu rovnají počátečním hodnotám a výstupní rychlost a průměr se rovnají konečným hodnotám. V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty doporučených rychlostí v závislosti na mezi pevnosti jednotlivých materiálů.

Tab. 2 Doporučená rychlost v závislosti na mezi pevnosti v tahu. [6]

Materiál	Vstupní mez pevnosti v tahu [MPa]	Doporučená rychlost [m·s ⁻¹]
Ocel	400	20
	800	15
	1 300	10
Měď	250	20
Mosaz, bronz	400	
Hliník a slitiny hliníku	80–100	25

V případě vyvinutí tažné síly pomocí otáčení bubnu lze vypočítat jeho rychlost otáčení. Tato veličina slouží pouze pro výběr pohonu s vhodným kroutícím momentem v závislosti na průměru válce. Rychlost otáčení válce vyjádřená v otáčkách se vypočítá pomocí následujícího vztahu:

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D}, \quad (1.6)$$

kde: n je počet otáček [min⁻¹],
 v je tažná rychlost [m·s⁻¹],
 D je průměr bubnu [m].

1.1.4 Tažný výkon [6]

Výkon potřebný k tažení se zjistí z celkové tažné síly a tažné rychlosti pomocí vztahu:

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta_M}, \quad (1.7)$$

kde: P je výkon stroje [kW],
 F je tažná síla [kN],
 η_M je efektivita stroje.

U tandemového tažení je výsledný výkon součtem jednotlivých výkonů potřebných k pohonu jednotlivých válců, vypočítá se tedy takto:

$$P_c = \sum_{i=1}^{n_v} P_i, \quad (1.8)$$

kde: P_c je celkový výkon tažné stolice [kW],
 P_i jsou jednotlivé výkony na každém válci [kW],
 n_v je celkový počet válců v tažné stolici [-].

1.1.5 Vznik a regulace tepla [1], [8], [22]

Teplota v průběhu tažení je důležitý faktor, který často bývá limitující u tandemového tažení, a to z důvodu nedostatečného pasivního chlazení mezi jednotlivými průvlaky. V případě chybějícího chlazení mohou teploty dosahovat desítek až stovek °C, což může negativně ovlivnit vlastnosti taženého drátu, efektivnost mazání, stav povrchu drátu a způsobit i vyšší rychlost opotřebení průvlaku. Teplo je generováno z přibližně 15 % třením a z 85 % působením deformace. Výpočet změny teploty (vzniklé deformací) je velmi složitý z důvodu neustálého pasivního chlazení, avšak lze ji přibližně vypočítat dle Wilsona pomocí následujícího vztahu:

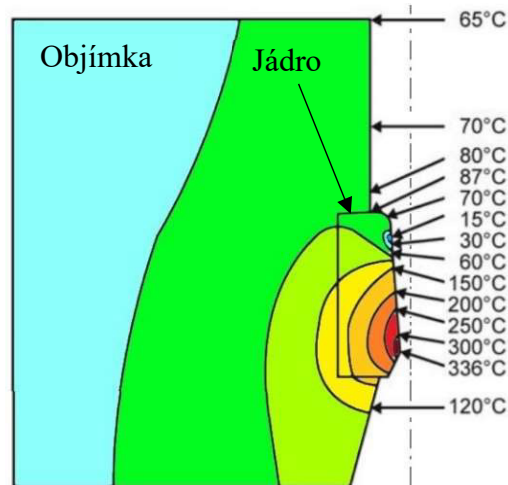
$$\Delta T = \frac{F}{c \cdot A_1 \cdot \rho} \cdot 10^6, \quad (1.9)$$

kde: ΔT je změna teploty [K],
 c je měrná tepelná kapacita [J·kg⁻¹·K⁻¹],
 A_1 je výstupní plocha průřezu [mm²],
 ρ je hustota taženého materiálu [kg·m⁻³].

Příklad rozložení teplot ve vodou chlazeném průvlastku je znázorněn na obrázku 7. Kontrolování teploty je zvlášť důležité u drátů s vysokým obsahem uhlíku, kde vyšší mez kluzu zapříčiňuje větší tvorbu tepla, což může způsobit zrychlení stárnutí oceli. Dále vyšší teplota může vytvořit nepříznivé zbytkové napětí, které je způsobeno nerovnoměrnou teplotní roztažností. Teplotní rozložení není rovnoměrné v rovině průřezu drátu. Nejvyšších teplot je dosahováno na povrchu jako následek tření a deformace.

Je známo, že teplota se zvyšuje s rostoucí tažnou rychlostí. Při tandemovém tažení se po každém průtahu teplota zvýší. V případě jednorůchodového tahu bývá výsledný nárůst teploty zanedbatelný, natož aby měl negativní vliv na strukturu drátu nebo průvlastku. Pasivní chlazení je v tomto případě dostatečné.

Průvlastky jsou schopny odvést pouze malé množství tepla generovaného v drátu, tudíž je nutné je chladit mezi jednotlivými tahy. Bylo experimentálně zjištěno, že množství odvedeného tepla průvlastky se pohybuje kolem 5 %, přičemž s rostoucí rychlostí se toto procento dále snižuje. Je to dáno především tím, že daná část drátu je v kontaktu s průvlastkem pouze velmi krátkou dobu. V komerčním využití se nejčastěji chladí přímým vstřikováním vody nebo jiného chladiva na drát, na průvlastek nebo se vstřikuje do průvlastku.

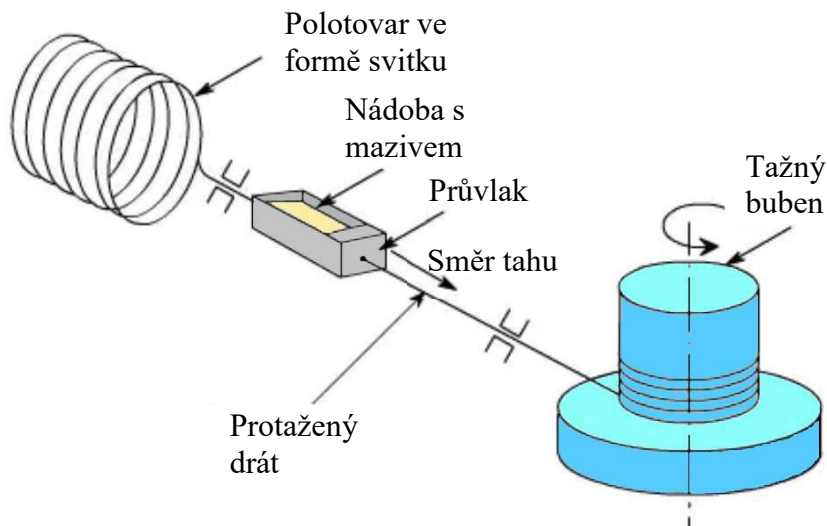


Obr. 7 Příklad rozložení teploty v průvlastku [8]

1.2 Tření a mazání [1], [4], [5], [8], [9], [23], [24]

V technologii tažení drátu tření není potřebné a ani žádoucí. Proto je nezbytné správné mazání. Hlavními kritérii pro výběr maziva jsou jeho schopnost snížit tření na minimální možnou hodnotu, materiál taženého drátu a požadovaná kvalita jeho povrchu. U tandemového tažení je dalším důležitým faktorem schopnost odvádět teplo, proto se používají kapaliny například ve formě emulze. V případě jednoduchého tahu postačí různá pevná maziva ve formě prášků atd.

Mazivo pro mokré tažení je vybíráno podle jeho tribologických vlastností a dle jeho chladicích schopností. Může být na olejové nebo vodní bázi, a to v závislosti na materiálu drátu a jeho dalších vlastnostech. Například pro tažení drátu z hliníku a jeho slitin se používá směs velmi viskózního ropného oleje (s viskozitou $250 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), mastného oleje a mýdla. Při jemném tahu se využívá maziv s menší viskozitou (okolo $20 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Při tažení drátu z mědi a jejích slitin se maže pomocí emulze vody a oleje. Zvolená koncentrace oleje ve vodě závisí na typu tahu. S větší jemností tahu se koncentrace oleje snižuje (pro hrubý tah je koncentrace přibližně 15 %, pro střední kolem 7 %, pro jemný kolem 4 % a pro velmi jemný je 1-2 %).



Obr. 8 Schéma procesu mazání [23]

Při nízkých tažných rychlostech je důležitější vlastností maziva jeho mazivost, kdežto pro velké tažné rychlosti je to jeho viskozita. Mazivo lze aplikovat přímo do vstupního kužele nebo na drát ponořením do lázně tak, jak je znázorněno na obrázku 8.

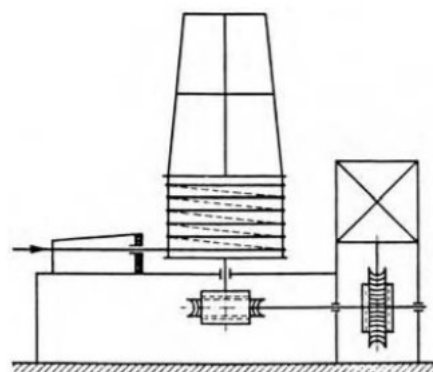
Suché tažení se používá při malých redukcích, malé pevnosti materiálu a tam, kde nejsou vysoké nároky na kvalitu povrchu. Mazivo se vybírá dle jeho tribologických vlastností. Na rozdíl od mokrého tažení již výběr maziva nezávisí na chladicích schopnostech, a to z důvodu dostatečného pasivního chlazení. Jako mazivo se obvykle používá suchý mýdlový prášek nebo grafit. Před nanesením maziva je nutné upravit povrch tak, aby se na něm mazivo zachytilo. Toho dosáhneme pomocí fosfátování, louhování vápnem nebo moření boraxem. U tažení za sucha se mazivo nanáší průchodem drátu přes nádobu, kde dojde k jeho zachycení na povrch drátu. Viz obrázek 8.

1.3 Metody tažení drátu [1], [5], [6]

Tažení drátů se dělí podle redukce průměru taženého drátu nebo podle použitého stroje. Podle redukce průměru se dělí na hrubé tažení (průměr drátu mezi 4,2 mm až 16 mm), střední tažení (průměr drátu mezi 1,6 mm až 4,2 mm), jemné tažení (průměr drátu mezi 0,7 mm až 1,6 mm) a velmi jemné tažení (průměr drátu menší než 0,7 mm). Proces tažení drátu přes jeden průvlak se nazývá jednorůchodové tažení. Při použití více průvlaků na jeden tah se proces nazývá víceprůchodové tažení nebo také tandemové tažení.

- **Jednorůchodové tažení**

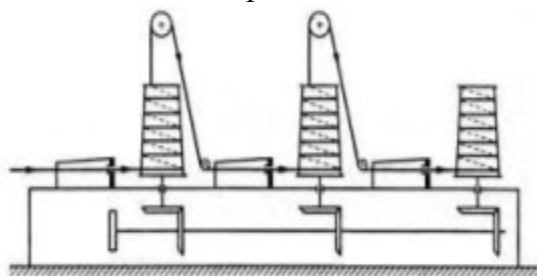
Jednorůchodové tažení, někdy také nazýváno jako jednoduché, se používá nejčastěji při potřebě pouze malé redukce průřezu polotovaru. Stroje pro jednoduché tažení jsou používány na dokončovací operace, tudíž pro střední až velmi jemné tažení. Tato metoda spočívá v průchodu pouze jedním průvlakem v jednom tahu (viz obr. 9), přičemž pro větší redukce se musí drát znovu zavést do jiného průvlaků. V případě přímočaré stolice, kde jsou taženy velké průměry, se neklade velký důraz na kvalitu povrchu. V malosériové a domácí výrobě se používá výhradně tento způsob tažení. Mezi její výhody patří praktičnost a nízká náročnost výpočtů vstupních parametrů.



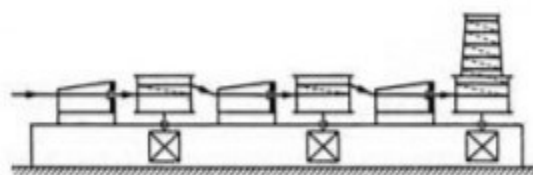
Obr. 9 Schéma jednorůchodového tažení [6]

- **Víceprůchodové tažení**

Víceprůchodové neboli tandemové tažení je metoda, která se používá ve velkosériových výrobcích, kde jsou potřeba velké úběry. Jsou zde zároveň vysoké požadavky na kvalitu povrchu drátu. Na obrázku 10 je vyobrazen princip tandemového tažení. Používají se dva typy tažných stolic, a to s vertikálním (viz obr. 10a) nebo horizontálním (viz obr. 10b) postavením tažných bubnů. Tato metoda tažení je vhodná pro všechny materiály a všechny druhy tažení. Mezi výhody této metody tažení patří možnost velkých úběrů na jeden tah bez nutnosti další manipulace s drátem.



a) Vertikální postavení bubnu



b) Horizontální postavení bubnu

Obr. 10 Schéma víceprůchodového tažení [6]

1.4 Technologický postup tažení drátu [1], [5]

Před samotným tažením musí proběhnout přípravné procesy. Stav drátu před tažením a požadovaná výsledná kvalita hotového drátu rozhodují o nutnosti provedení jednotlivých přípravných kroků. Po provedení přípravných prací se drát upne buď na buben, nebo do tažných kleštín. Poté otáčením bubnu, potažmo pojezdem tažných kleštín, dochází k prokluzu drátu přes průvlak a samotné redukci průměru. Ve chvíli, kdy dojde k vyčerpání plastičnosti, je nutné drát znovu tepelně zpracovat, aby nedošlo ke defektu.

1.4.1 Přípravné procesy [1], [5], [8], [10], [25], [26], [27]

Mezi přípravné procesy se řadí vyrovnání polotovaru (v případě, že je polotovar ve formě svitku), zúžení konce, který se bude vsouvat do průvlaku, tepelné zpracování a úprava povrchu.

- **Vyrovnání polotovaru**

Polotovary ve formě svitku se vyrovnávají na rovnačkách. Tyto stroje bývají často součástí tažných stolic, ale mohou být umístěny i samostatně. Drát v rovnacím stroji prochází přes střídavě umístěné válce. Dochází tak k postupnému prohýbání v opačných směrech a následnému vyrovnání. Příklad rovnacího stroje je znázorněn na obrázku 11.



Obr. 11 Rovnací stroj [25]

- **Zúžení konce drátu**

Zúžení, též nazývané jako zkosení, zahrnuje zmenšení průměru drátu polotovaru na velikost nepatrně menší, než je průměr průvlaku. Tento proces se provádí na malé délce počáteční části, která se následně protáhne přes průvlak a připevní na buben nebo do tažných kleštín. Zúžení se provádí za pokojových teplot lisováním, válcováním nebo soustružením. Ve velkosériové výrobě se používají na tyto procesy speciální stroje. Ukázka zužovacího stroje je uvedena na obrázku 12. Drát lze také zúžit pomocí broušení, kyselinového leptání nebo poklepání kladivem.



Obr. 12 Stroj na zúžení konce drátu [26]

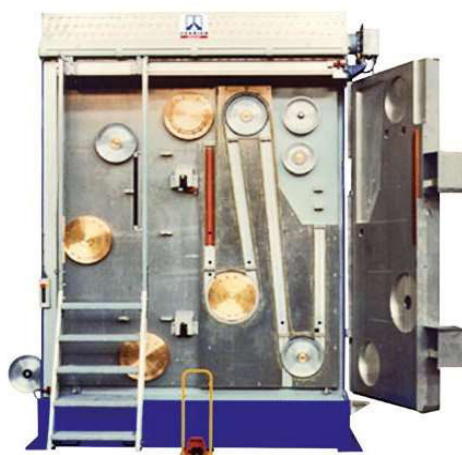
V některých případech lze tyto operace obejít pomocí protlačení drátu přes průvlak. Krátká koncová část se protlačí průvlakem, přičemž na tento proces je potřeba mnohem větších sil než na samotné tažení. Tento typ zúžení nelze použít u menších průměrů drátů z důvodu ztráty vzpěrné stability. Tento jev se dá minimalizovat pomocí důkladné podpěry. U drátů o průměru 9,5 mm nebo méně musí být obecně použita jedna z metod popsanych v přechozím odstavci.

- **Tepelné zpracování**

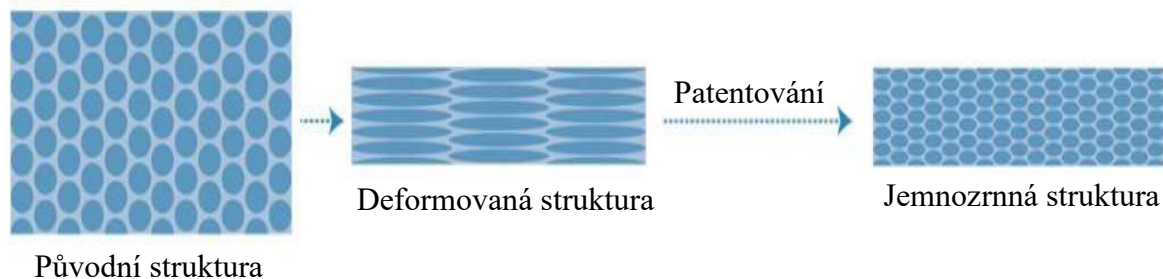
Před samotným tažením je nutné snížit tvrdost materiálu, a tím zajistit jeho dostatečnou tvárnost. Zvýší se tak procenta možné redukce. Za tímto účelem se provádí žíhání. Obzvláště nutné je to u kovů, které jsou tvrdé či křehké nebo pokud již byly deformačně vytvrzeny při předchozím tváření. Žíhání se nejčastěji provádí pomocí elektrického odporu, přičemž k tomuto procesu slouží ve velkosériové výrobě speciální stroje, viz obrázek 13.

Pro přípravu tažení drátu je k dispozici mnoho druhů žíhání, které zajistí zvýšení tvarovatelnosti, tažnosti a obrobitelnosti. Aby výsledný materiál dosáhl potřebných vlastností, je nutno vybrat vhodný žíhací proces, který je kompromisem mezi optimálními parametry žíhacího procesu a proveditelností. Například u žíhání sviteků nelze použít ideální žíhací teplotu, při které by se dosáhlo optimální měkkosti. Tato teplota by způsobila změny rozměrů sviteků drátů a mohlo by dojít k jejich vzájemnému propojení.

Při přípravě i průběhu tažení drátu se používá patentování, což je speciální forma žíhání, která se používá pro středně až vysoce uhlíkaté oceli. Rozvinutá část drátu je dopravena do austenitizující stanice, kde se dráty zahřívají nad žíhací teploty po dobu dostatečně dlouhou k dosažení úplné transformace na jemnou perlitickou strukturu. Poté se prudce zchladí. Na obrázku 14 je vyobrazena struktura materiálu před a po patentování. Toto zpracování výrazně zvyšuje velikost následně možné redukce. Lze tak zajistit výrobu vysoce pevného drátu.



Obr. 13 Odporový žíhací stroj [27]



Obr. 14 Struktura v průběhu tepelného zpracování [10]

- **Úprava povrchu**

Aby se minimalizovalo poškození polotovaru nebo průvlaku v průběhu tažení, musí být povrch polotovaru očištěn ve více separátních procesech, a díky tomu zbaven například okují nebo rzi. Čištění se provádí pomocí moření. V případě větších průměrů pomocí otryskávání. Povrch polotovarů je možno též povlakovat nebo předmazat fosfátováním, pokovováním nebo vápněním. Využívá se zejména fosfátování zinkem, železem nebo hořčíkem. Hlavním důvodem fosfátování je zvýšení přilnavosti povrchu drátu vůči mazivu. V případě, že není nutno u tandemového tažení polotovar žíhat mezi jednotlivými průvlaky, lze po předmazání protáhnout drát několika průvlaky bez nutnosti opakování ošetření povrchu.

Polotovar ve formě drátu nebo tyče vyrobený válcováním za tepla musí být očištěn v samostatné operaci. Pouze v případě pokročilého kontinuálního lítí je možné tento krok vynechat, neboť při tomto procesu je docíleno lepší kvality povrchu. Polotovar následně projde čistící stanicí před opuštěním válcovny.

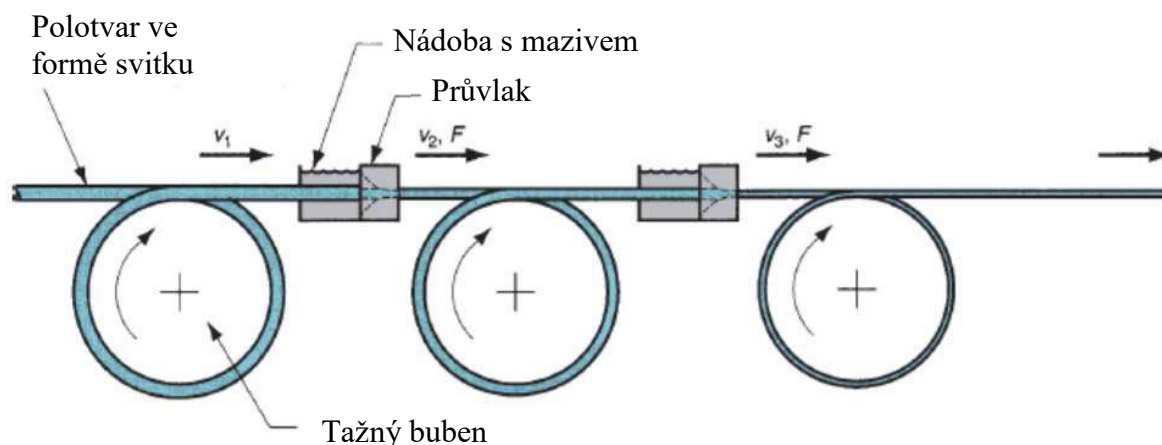
1.4.2 Tažný proces [1], [5], [8], [10], [28]

Nejprve se očištěný a povlakovaný svitek drátu umístí na odvíjecí buben nebo na stojan. Následně se přední konec polotovaru, poté co byl zúžen a vyrovnán, protáhne přes průvlak a připevní se pomocí upínacího zařízení na poháněný tažný buben, nebo se upne do tažných



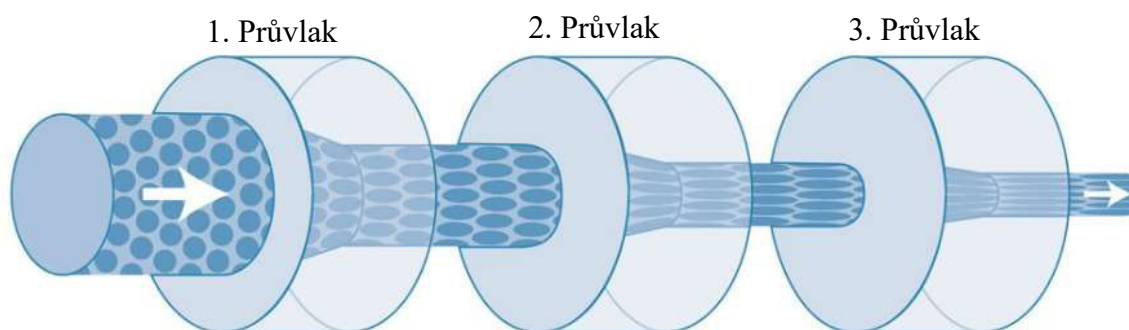
Obr. 15 Schéma jednoduchého tažení [28]

čelistí, jak je vyobrazeno na obrázku 15. U stolic pro tažení za sucha je průvlak umístěn do nádoby obsahující mazivo ve formě prášků. Před vstupem do samotného průvlaku tak drát nejdříve prochází mazivem, viz obrázek 16. V případě tažných stolic pro tažení za mokra není nutné průvlak umisťovat do nádoby s mazivem. Nanesení maziva je možné pomocí trysky přímo do průvlaku nebo na drát. Následně se začne tažný buben otáčet s požadovanou



Obr. 16 Schéma tandemového tažení [5]

obvodovou rychlostí, respektive tažné čelisti se začnou pohybovat směrem od průvlaku. Drát následně prochází určitým počtem tažných operací než dojde k vyčerpání jeho plasticity. Pokud je potřeba dále průměr redukovat je nutno drát opět vyžít. Poté, co drát projde všemi průvlakly



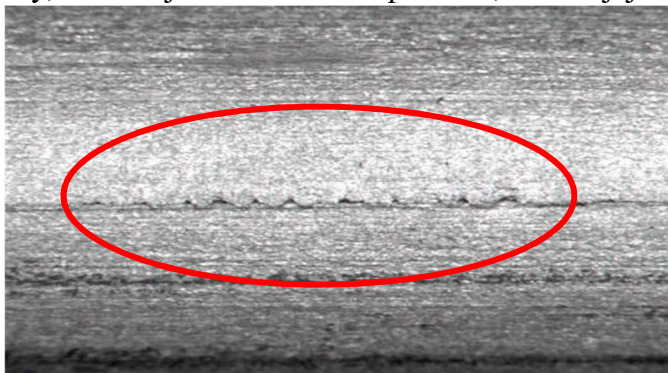
Obr. 17 Struktura drátu při tandemovém tažení [10]

a docílí se požadovaného finálního průměru, je opět navinut do svitku. Dále je nutné ověřit, zda má drát odpovídající mechanické vlastnosti a s tím i související strukturu. Schéma změny struktury v průběhu tažení je znázorněno na obrázku 17. V případě potřeby je možné protažené dráty následně tepelně zpracovat nebo povlakovat. Povrch drátu se upravuje například pozinkováním, které zajistí zvýšení korozivzdornosti a odolnosti proti lehkému mechanickému poškození.

1.5 Defekty drátu [1], [5], [12], [16], [17], [27]

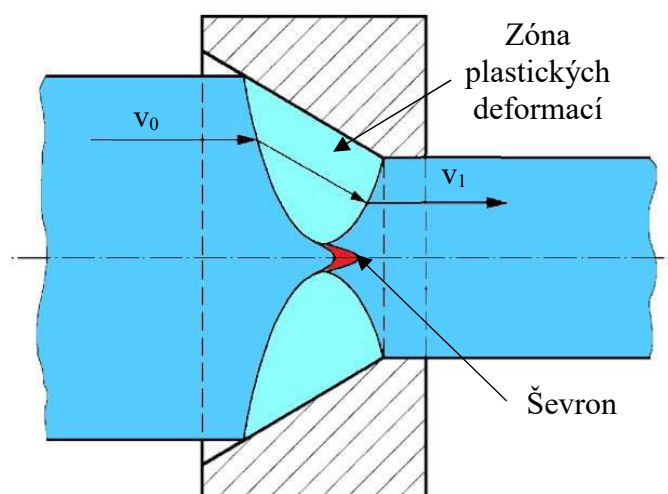
Mezi typické defekty, vznikající v průběhu tažení, patří švy (viz obrázek 18). Švy jsou nežádoucí podélné záhyby na povrchu drátu. Během dalšího zpracování, například ohýbání, se totiž mohou rozevřít.

Dále se mezi typické defekty řadí ševrony, které nejsou viditelné na povrchu, a tak k jejich odhalení slouží rentgen. Tato vada je výsledkem tažného porušení v ose tažení drátu a vzniká v důsledku zpomalování rychlosti průchodu povrchu polotovaru vůči rychlosti průchodu jeho osy. Schéma vzniku vady je vyobrazeno na obrázku 19. V případě včasného neodhalení vady se trhlinka prodlužuje během dalšího tahu a může vést až k destrukci drátu. Bylo experimentálně zjištěno, že nejnáchylnějším materiálem k tvorbě ševronu je měď s vyšším obsahem kyslíku (0,1 %).



Obr. 18 Švy na povrchu drátu [17]

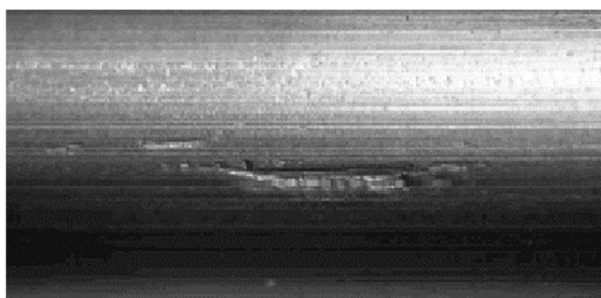
Dalšími povrchovými defekty jsou rýhy (viz obrázek 20) a bubliny (viz obrázek 21). Vznik bublin je nejčastěji způsoben použitím špatně odlitého polotovaru, který má již tyto bublinky pod povrchem. Tento defekt nelze opravit, tudíž při zjištění musí být poškozená část drátu vyřazena.



Obr. 19 Vznik ševronu [29]

Rýhy vznikají zpravidla poškozením od prův laku. Dochází k nim při nesprávném zvolení procesních parametrů, zhoršeném mazání, zhoršeném stavu povrchu prův laku nebo při přítomnosti nečistot na povrchu drátu nebo prův laku.

Jelikož v průběhu tažení dochází k nerovnoměrné deformaci, výrobky tažené za studena mají obvykle zbytkové povrchové napětí. Toto napětí může působením času způsobit praskání, zkroucení atd.



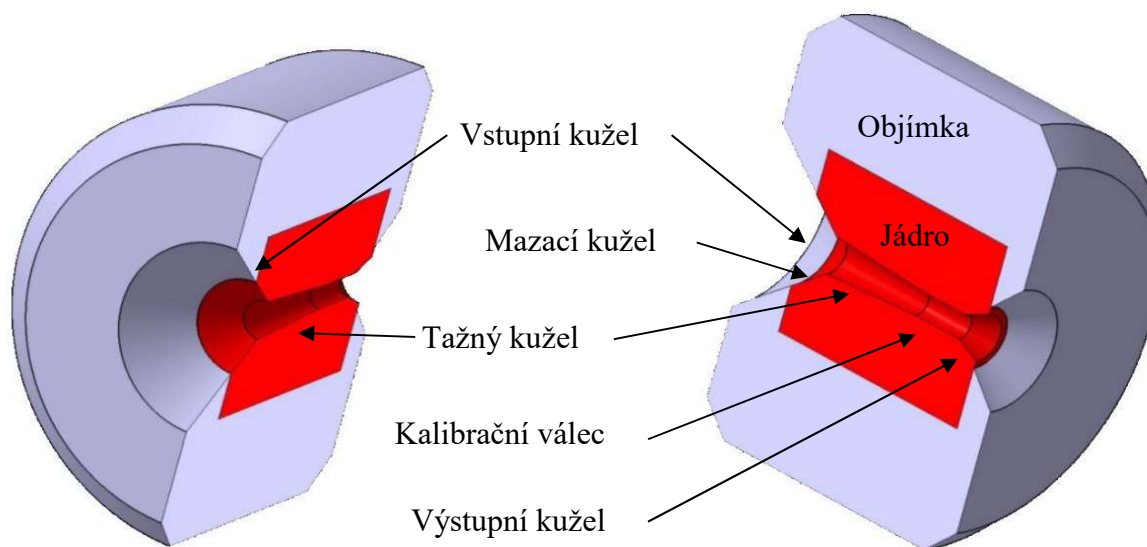
Obr. 20 Rýha na povrchu drátu [12]



Obr. 21 Bublina na povrchu drátu [16]

2 NÁSTROJE PRO TAŽENÍ DRÁTU [1], [6], [13]

Nástroj pro tažení drátu se nazývá průvlak a dělí se na jádro a objímku (viz obr. 22). Průvlak je tvořen pěti hlavními částmi. První neboli vstupní část (viz obr. 22) je kuželovitého tvaru. Její vstupní úhel, též nazýván jako zaváděcí, má úhel rozvěvení 2β . Následující částí je mazací kužel (viz obr. 22). I tato část je kuželovitého tvaru a zachovává stejnou velikost úhlu otevření jako vstupní část. Třetí část nazývaná tažný kužel (viz obr. 22) slouží k redukci průměru drátu. V tomto místě působí největší tlaky. Další částí průvlaku je kalibrační válec, který slouží ke kalibraci povrchu drátu (viz obr. 22). Zde již nedochází ke změně průměru. Poslední část je výstupní kužel, kde je materiálu navracena jeho elasticita.



Obr. 22 Schéma průvlaku [13]

2.1 Geometrie průvlaků [1], [5], [6], [13]

Dle materiálu polotovaru, tažné rychlosti a způsobu tažení (za sucha nebo za mokra) je volena geometrie průvlaku. Nejdůležitějším parametrem je tažný úhel. Dále se upravuje délka kalibračního válce, a to dle následujícího vztahu:

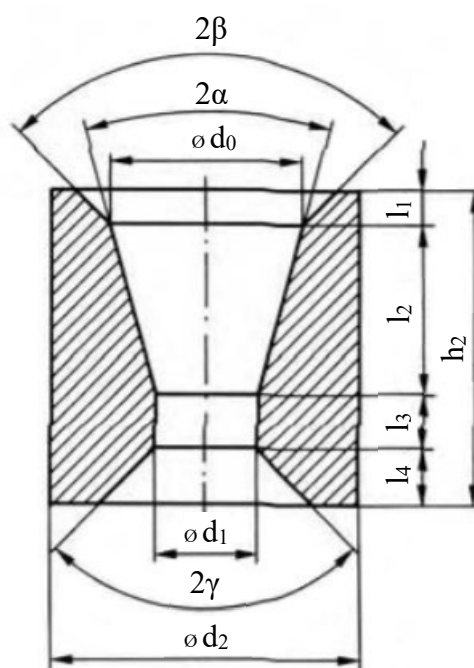
$$l_3 = 0,15 \cdot d_1, \quad (2.1)$$

kde: l_3 je délka kalibračního válce [mm],

d_1 je průměr protaženého drátu [mm].

- **Tažný úhel**

Tažný úhel 2α (viz obr. 23) ovlivňuje tažnou sílu a také kvalitu povrchu protaženého drátu. Je to tedy jeden z nejdůležitějších parametrů průvlaku pro většinu druhů tažení. V případě nevhodně zvoleného úhlu může dojít k přetržení drátu nebo ke vzniku vad na povrchu drátu. V tabulce 3 jsou uvedeny optimální hodnoty velikosti úhlu v závislosti na materiálu, rozsahu deformací a typu tažení.



Obr. 23 Označení úhlů a rozměrů průvlaku [6]

Tab. 3 Optimální tažný úhel 2α [6]

Materiál				φ [-]
Ocel (C < 0,4 %), bronz, mosaz		Ocel (C > 0,4 %)		
Mokrý tažení	Suché tažení	Mokrý tažení	Suché tažení	
11°	9°	10°	8°	0,10
16°	14°	15°	12°	0,22
19°	17°	18°	15°	0,35

• **Δ (delta) faktor**

Tok materiálu je ovlivňován tažným úhlem. Míra tohoto ovlivnění je však dále podmíněna velikostí plošné redukce v průběhu tažení. Z tohoto důvodu moderní teorie tažení zavádí Δ faktor, který oba tyto parametry spojuje. Delta faktor se tedy vypočte dle následujícího vztahu:

$$\Delta \cong \left(\frac{\hat{\alpha}}{r} \right) \cdot (1 + \sqrt{1 - r})^2, \quad (2.2)$$

kde: $\hat{\alpha}$ je tažný úhel (jedna polovina rozevření tažného kužele) [rad]
 r je redukce plochy [-].

Velikost redukce plochy se vypočítá pomocí vztahu 1.1.

Ve velkosériové výrobě se nejčastěji používá tažný úhel mezi 12° a 20° a redukce přibližně 0,2. Velikost delta faktoru tedy většinou dosahuje hodnot mezi 2 a 3. Vyšší hodnoty delta faktoru odpovídají nižším redukcím a větším tažným úhlům. Nižší hodnoty naopak odpovídají vyšším redukcím a menším tažným úhlům.

Při nižších hodnotách delta faktoru dochází ke zvýšení třecí práce mezi drátem a tažným kuželem. Naopak při vyšších hodnotách delta faktoru se zvyšuje redundantní práce a plastická deformace. S rostoucí hodnotou delta faktoru se redundantní práce zvyšuje, ale třecí práce se snižuje. Z toho vyplývá, že vybraná střední hodnota delta faktoru zahrnuje minimální práci i minimální tažnou sílu, jelikož tažná práce spotřebovaná za jednotku času se rovná tažné síle vynásobené tažnou rychlostí.

2.2 Materiály průvleků [1], [5], [6], [11], [13], [30], [31]

Při výběru vhodného materiálu nástroje se zohledňuje především požadovaný průměr drátu, tvar a chemické složení polotovaru. Dalším rozhodujícím faktorem je bezpochyby cena. Materiály průvleků pro tažení jsou zpravidla vyrobeny z ocelí anebo karbidů. Díky tomu dobře odolávají abrazivnímu opotřebení. V případě vyššího požadavku na kvalitu povrchu se používají pro tažení drátu diamantové průvlekky. Tyto průvlekky mohou být vyrobeny z monokrystalického diamantu nebo jsou tvořeny ocelovou maticí, do které jsou jednotlivě umístěny malé diamanty. Diamantové průvlekky jsou velmi křehké, proto se často vyrábí pouze jako diamantové vložky do ocelových krytů. V případě malosériové výroby se používá nástrojová ocel, a to především z ekonomického důvodu. V tabulce 4 jsou uvedeny vhodné materiály pro průvlak v závislosti na materiálu a průměru drátu. Nástrojová ocel, kterou používá například americká firma Hudson, je vysokouhlíková ocel s vysokým obsahem vanadu s označením CPM-10V dle normy AISI A11.

V poslední době se vývoj zaměřuje také na keramické průvlekky. Jejich výhodou je hlavně vysoká tvrdost, kvalita povrchu a stálost průměru.

Tab. 4 Vhodné materiály v závislosti na materiálu a průměru drátu. [1]

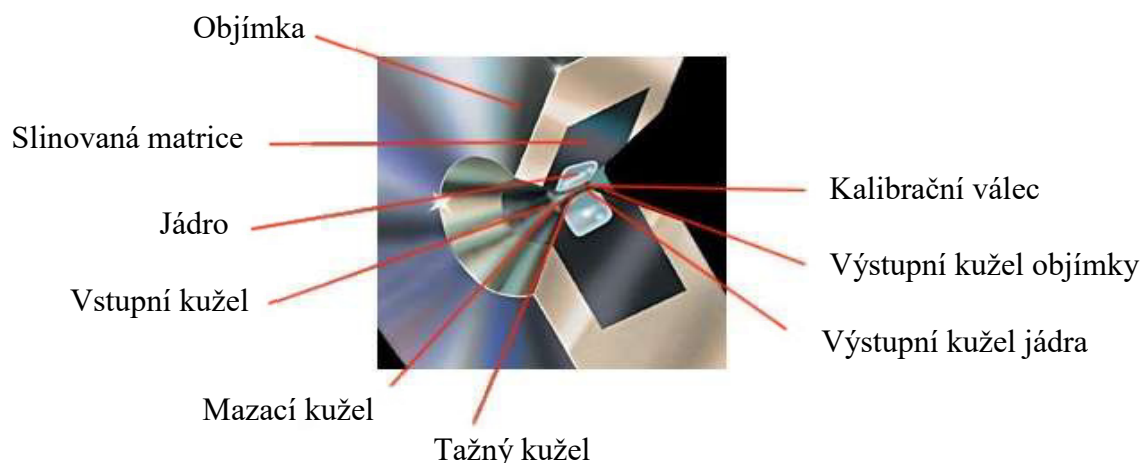
Materiál drátu	Průměr drátu [mm]	Vhodný materiál prův laku	
		Drát kruhového průřezu	Speciální tvary
Uhlíkové oceli a slitiny oceli	<1,57	Přírodní nebo syntetický diamant	Nástrojová ocel nebo karbid wolframu
	>1,57	Karbid wolframu	
Korozivzdorné oceli, titanové, wolframové a niklové slitiny	<1,57	Přírodní nebo syntetický diamant	Nástrojová ocel nebo karbid wolframu
	>1,57	Karbid wolframu	
Měď	<2,06	Přírodní nebo syntetický diamant	Nástrojová ocel nebo karbid wolframu
	>2,06	Karbid wolframu	
Slitiny mědi a slitiny hliníku	<2,5	Přírodní nebo syntetický diamant	Nástrojová ocel nebo karbid wolframu
	>2,5	Karbid wolframu	
Slitiny hořčíku	<2,06	Přírodní nebo syntetický karbid	
	>2,06	Karbid wolframu	

- **Karbidové prův laky**

Tyto prův laky se používají hlavně u polotovarů z ocelí s vyšším procentem uhlíku, kde dochází ke značné abrazi. Karbid wolframu je ekonomicky výhodný při tažení větších redukci, kde nelze použít diamant. Firma Wirex vyrábí prův laky z karbidu wolframu až do průměru 50 mm, ale například firma Esteves Group dovede vyrobít prův laky až do průměru 76 mm. Měkčí karbidy, které obsahují přibližně 8 % kobaltu, jsou méně křehké a jsou schopné odolat tlaku při větších redukci, aniž by se porušily. Nevýhodou těchto prův laků je vyšší rychlost opotřebení oproti prův lakům s nižším procentem kobaltu. Pokud nedojde k poškození nebo destrukci prův laku, může být prův lak přepracován – upraven k použití pro tažení větších průměrů.

- **Diamantové prův laky**

Diamantové prův laky se používají zejména při jemném tažení s malým úběrem. Výroba takovýchto prův laků o větších průměrech by byla náročná a zároveň velmi nákladná, tudíž



Obr. 24 Složení diamantového prův laku [30]

se v případě velkých úběrů dává přednost karbidovým průvlakům. Například dříve zmiňovaná firma Esteves Group vyrábí průvlaký ze syntetických nebo přírodních diamantů o průměrech 0,01 mm až 2 mm. V případě polykrystalických průvlaků až do průměru 35 mm. Na obrázku 24 je vyobrazeno složení průvlaků – objímka je z korozi vzdorné oceli a jádro z přírodního diamantu. Diamantové průvlaký mají oproti karbidovým průvlakům mnohem větší trvanlivost, a to 10 až 200násobně v závislosti na taženém materiálu.

- **Průvlaký z nástrojové oceli**

Nástrojová ocel sloužící pro výrobu průvlaků disponuje tvrdostí 62 až 64 HRC. Tyto průvlaký se využívají zejména v malosériové výrobě a při nižších redukcích, které nepřesahují 20 %. Pro větší redukce je nutné tvrdost oceli snížit na 60 až 58 HRC, aby se předešlo vzniku lomu na průvlak. Bohužel se tak zvýší rychlost opotřebení nástroje.

- **Keramické průvlaký**

Průvlaký z keramiky vynikají svojí tvrdostí, odolností proti otěru a nízkou náročností na údržbu. Díky vysoké tvrdosti jsou keramické průvlaký schopny odolávat velkým napětím. Jejich výroba je však náročná. Vyrábí se slinováním. Povrch je nutné následně zbrousit, což se provádí pomocí diamantových brusných kotoučů. Mezi další výhody patří vysoká docílená kvalita povrchu protaženého drátu a konzistentní průměr. Dále je nižší pravděpodobnost vzniku defektu průvlak, a tak je usnadněna údržba stroje. Na obrázku 25 je keramický průvlak vyrobený firmou CeramTec. Tato firma, která se specializuje na vývoj a výrobu keramických nástrojů, uvádí ve svém katalogu, že tyto nástroje jsou vhodné pro všechny typy drátů z neželezných kovů.



Obr. 25 Keramický průvlak [31]

2.3 Životnost a vady u průvlaků [1], [5], [8], [32]

Životnost průvlak je udávána jako délka nebo jinak definované množství drátu protažené přes průvlak, které způsobí zvětšení původního průměru tažného kužele na maximální povolený. Průvlaký se tedy dle doporučení vyměňují po uplynutí výrobcem udávané doby životnosti. Faktory, které ovlivňují životnost průvlak, jsou rychlost tažení, dosažená teplota během procesu, velikost redukce v jednom tahu, složení kovu, který je tažen, a materiál průvlak. Nejčastějšími příčinami rychlého opotřebení průvlak jsou volba nevhodné geometrie průvlak pro danou velikost redukce, nadměrná tvrdost průvlak, nedostatečné mazání, příliš vysoká rychlost tažení a další extrémní podmínky. I velmi tvrdé průvlak nejsou schopny odolat tepelnému a třecímu opotřebení, pokud nemají dostatečnou údržbu.

Abrazivní opotřebení, ke kterému dochází nejvíce na povrchu tažného kužele a kalibračního válce, se v průvlak projeví zesvětlením nebo vyleštěním povrchu drátu, který prochází průvlakem. Při tomto opotřebení dochází ke vzniku prstenců uvnitř průvlak, jako následek zanesení částicemi uvolněnými abrazy. Tyto částice dále brání toku maziva, což vede k vyšším tlakům a tvorbě tepla. Může dojít až k destrukci průvlak, jak je patrné na obrázku 26. Doporučuje se tedy pravidelně čistit a udržovat povrch průvlak, jelikož včasným vyleštěním těchto prstenců lze životnost průvlak prodloužit až o 200 %. V případě zanedbání údržby životnost průvlak prudce klesá.



Obr. 26 Vady na povrchu průvlak [32]

3 STROJE PRO TAŽENÍ DRÁTU [1], [5], [13], [18]

Stroje pro tažení drátu neboli tažné stolice se dělí dle počtu průchodů průvlastky na jednoduché stroje a tandemové stroje. Dle použitého maziva se dělí na stroje pro suché tažení a na stroje pro mokré tažení. Podle způsobu tažení drátu se rozlišují stolice s přímočarým pohybem (řetězové nebo hřebenové) a stolice s navíjením taženého materiálu (bezskluzové a skluzové).

V případě tandemového tahu je stroj v naprosté většině poháněn elektromotory, zatímco jednoduché stroje lze pohánět i ručně. Tyto ručně poháněné stroje se ale používají jen v domácí výrobě nebo při malosériové výrobě.

Stroje se skládají ze třech základních částí. Mezi tyto části patří odvíjecí buben, průvlastka a tažný buben. U tandemových tažných stolic se průvlastka a tažný buben opakují dle počtu potřebných tahů. Tažné bubny jsou zpravidla vyrobeny z oceli o tvrdosti až 60 HRC. V případě bezskluzového stroje dochází k navinutí více závitů drátu na jeden buben. Tato skutečnost zlepšuje možnosti pasivního chlazení. U skluzového stroje, kde je na bubnu pouze jeden závit, je nutné klást větší důraz na aktivní chlazení.

3.1 Tažné stolice pro tandemové tažení [1], [5], [18], [33], [34]

Tandemové tažné stolice se používají pro všechny typy tažení a využívají se zde všechny druhy mazání. Uplatňují se hlavně při procesech, kde dochází k velké redukci materiálu. Tyto víceprůvlastkové stolice se dále dělí dle pozice tažného bubnu na vertikální a horizontální. Dle dráhy drátu se rozlišují stolice s přímým pohybem a tzv. OTO (Overhead Take-Off) stolice, což znamená tažení přes „závěsné kladky“.

- **Vertikální tažné stolice**

U tohoto typu tažných stolic se používá pouze suché mazivo, a proto se zde uplatňuje tažení bez prokluzu. Stroje pro přímé tažení drátu byly vyvinuty pro zajištění lepší tažnosti a nižšího tření (tření je sníženo díky omezení plochy pro jeho možný vznik). Další výhodou je omezení nutnosti zásahu obsluhy do procesu. Společnost Assomac, která se specializuje na vývoj a výrobu těchto strojů, nabízí velkou variabilitu parametrů tažných stolic. Například při volbě vhodného tažného bubnu je na výběr několik průměrů, a to od 300 mm až do 900 mm. Stolice tohoto typu mohou redukovat průměr drátu z 16 mm až na 0,5 mm při velkých tažných rychlostech (až $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Na



Obr. 27 Tažná stolice s přímým pohybem [18]

obrázku 27 je čtyřprůvlastková vertikální tažná stolice s přímým pohybem určená pro střední tažení ocelových drátů od firmy Koch. Katalog této firmy uvádí maximální rychlost tažení až $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Mezi výhody toho typu stolic patří velká variabilita použitých průvlastků, vyšší

produktivita díky vysokým tažným rychlostem, velmi dobrá efektivita chlazení, jednoduchá obsluha stroje a vysoká kvalita povrchu finálního výrobku. Na obrázku 28 je tažná stolice se závěsnými kladkami, jejíž použití je v dnešní době na ústupu. Dosahuje nižších tažných rychlostí oproti strojům s přímým pohybem polotovaru.



Obr. 28 Tažná stolice OTO [33]

- **Horizontální tažné stolice**

Horizontální tažné stolice jsou víceprůvlakové stroje, jejichž tažné bubny mají horizontální osu otáčení. Viz obrázek 29. Tyto stolice se nejčastěji používají pro tažení ocelí s vysokým i nízkým obsahem uhlíku.



Obr. 29 Horizontální tažná stolice [34]

3.2 Tažné stolice pro jednoduché tažení [1], [5], [18], [35], [36]

Stroje pro jednoduché tažení drátu se skládají z litinové lavice nebo stolu s konzolou držící průvlak, vertikálně stojícího bubnu, na který je navíjen drát a odvíjecího bubnu, na kterém je navinutý polotovar. Stroje s přímočarým pohybem se skládají z rámu, ližin, po kterých se pohybuje vozík s tažnými čelistmi a navijákem, který může být poháněn hydraulicky nebo elektricky.

- **Jednoduchá tažná stolice**

Tento typ tažných stolic je vhodný pro většinu druhů materiálů. Například stolice na obrázku 30 je určena pro tažení ocelových drátů. Na těchto strojích lze provádět střední až velmi jemné tažení, a tak docílit vysoké kvality povrchu protaženého drátu. U moderních jednoduchých tažných stolic je velká variabilita tažných rychlostí. I tak jsou ale nižší oproti tandemovým tažným stolicím (firma Koch uvádí maximální tažnou rychlost až $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Samozřejmostí je možnost použití a snadná výměna průvlaků s různými průměry (rozmezí psané v katalogu firmy Koch je 2,5 mm až 17 mm). Mezi výhody těchto strojů patří vcelku jednoduchý výpočet parametrů a predikce činitelů procesu.



Obr. 30 Stolice pro jednoduché tažení [18]

- **Ruční tažný stroj**

Tyto stroje se používají výhradně v domácím prostředí pro malé redukce drátu a v případě nízkých nároků na kvalitu povrchu. Například firma Fischer, která vyrábí stroj na obrázku 31, uvádí ve svém katalogu možnost dvou tažných rychlostí díky jednoduchému převodu rychlosti otáčení. Výhodou tohoto stroje je snadná obsluha a jednoduché založení polotovaru a následné vyjmutí hotového výrobku.



Obr. 31 Ruční stroj [35]

- **Stroj s přímočarým pohybem**

Tento typ strojů (viz obrázek 32) se využívá zejména při tažení drátů větších průměrů a při velkých redukcích průměru. Z důvodu nutnosti vysokých tažných sil se často používá hydraulický pohon navijáku. Elektrický pohon se používá spíše pro vyšší rychlosti, které jsou ale i tak nižší než u bubnových tažných stolic (cca $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), a v případě menších redukcí. Mezi výhody tohoto typu strojů patří velmi jednoduché počítání vstupních parametrů.



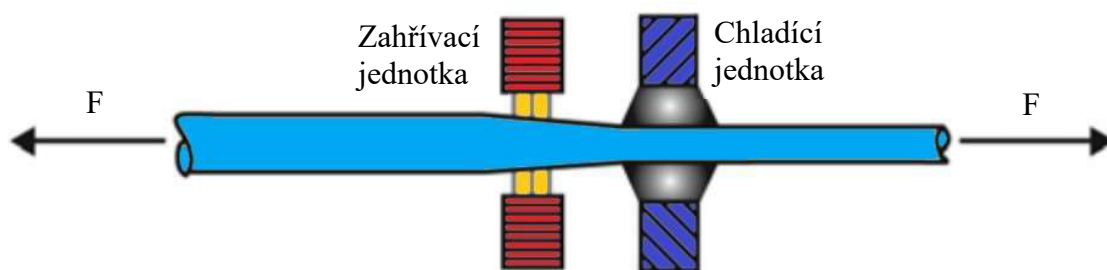
Obr. 32 Stolice s přímočarým pohybem [36]

4 NEKONVENČNÍ METODY TAŽENÍ [8], [15], [16]

Mezi nekonvenční metody tažení drátu patří bezprůvlakové tažení pomocí zahřátí a tažení při ultrazvukových vibracích. Bezprůvlakové tažení je pouze ve fázi výzkumu a experimentů. Tažením při ultrazvukových vibracích se vyrábí těžko tažitelné materiály jako například titan.

- **Bezprůvlakové tažení pomocí zahřátí**

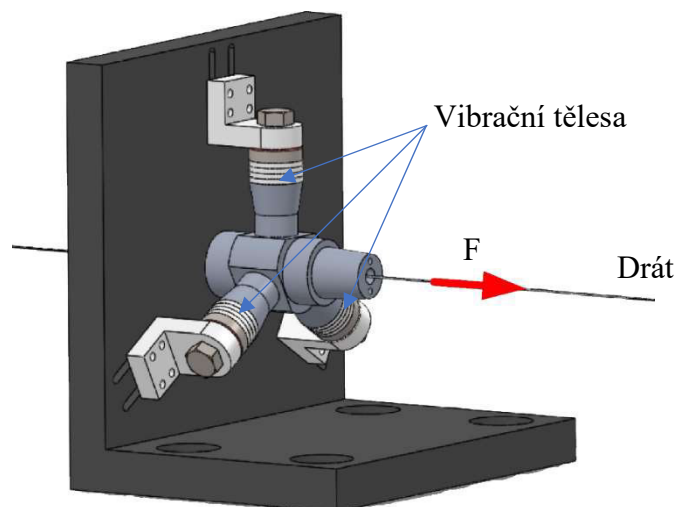
Princip bezprůvlakového tažení zahrnuje zahřátí na 400 °C až 900 °C dle taženého materiálu a následné protažení drátu napětím pomocí diferenciálních rychlostí jednotlivých tažných válců. Drát musí být ihned po opuštění zahřívací zóny zchlazen, aby se zpevnila zredukovaná část a potlačil se vznik krčku. Tato metoda je vyobrazena na obrázku 33. Tahová síla působící na drát určuje konečný průměr drátu, tudíž její velikost v průběhu procesu musí být kontrolována. Výhodou této technologie je velký rozsah průměrů drátů, které jsou protaženy z jednoho průměru polotovaru. Dále je výhodná eliminace nutnosti zásob mnoha druhů průvlaků. Bohužel tento proces je velmi náročný na kontrolu finálního průměru a zároveň potřebné vybavení je cenově náročné.



Obr. 33 Schéma bezprůvlakového tažení pomocí zahřátí [8]

- **Tažení s ultrazvukovými vibracemi**

Tato metoda spočívá v působení ultrazvukových vibrací na průvlak. Vibrační zařízení je vyobrazeno na obrázku 34. Bylo experimentálně zjištěno, že při tažení s ultrazvukovými vibracemi jsou potřeba nižší tažné síly a zároveň jsou možné vyšší redukce na jeden průchod. Vyšší finanční náklady však omezují využití této technologie pouze na případy, kdy i náklady konvenčních metod převyšují náklady této metody tažení. Například při tažení titanových drátů je konvenčními metodami nutné polotovar táhnout za zvýšených teplot. Díky této metodě je možné tyto dráty táhnout za studena a zároveň bez použití maziva.



Obr. 34 Průvlak s vibračními tělesy [16]

5 ZÁVĚRY

Technologie tažení drátu slouží ke zmenšení průměru polotvaru drátu bez porušení jeho celistvosti. Práce byla zaměřena na aktuální rešerši technologie tažení, popis jednotlivých činitelů procesu a jejich význam pro daný proces.

V úvodu práce byl uveden teoretický rozbor daných technologií se zaměřením na stanovení jednotlivých parametrů ovlivňujících proces tažení. Bylo zde teoreticky analyzováno působení tažné síly, práce, rychlosti, teploty a tření. Na základě toho pak i postup volby vhodného maziva. Tažný proces byl analyzován pro dvě základní metody, a to pro jednoduché a tandemové tažení. Byly zde přiblíženy jejich technologické postupy a variabilita.

Následně se práce věnovala geometrii a materiálům nástrojů pro tažení drátu, s ohledem na požadovanou kvalitu povrchu protahovaného materiálu, a jejich vlivu na opotřebení nástrojů. Z provedené studie je zřejmé, že mezi nejčastěji používané průvlaky pro velkosériovou výrobu se řadí karbidové a diamantové. Pro malosériovou výrobu to jsou průvlaky z nástrojové oceli. Keramické průvlaky zatím nemají vysoké zastoupení, a to z důvodu jejich náročnější výroby. V nadcházející době se dá ale očekávat zdokonalení a snížení náročnosti výroby keramických průvlaků, a tím i rozšíření jejich využití.

Dále byl vypracován souhrn v nynější době používaných strojů se zaměřením na jejich výhody, nevýhody a vhodnost použití v závislosti na materiálech tažených drátů, objemu výroby a využitelnosti potenciálu jednotlivých strojů. Z literární rešerše vyplývá, že v dnešní době se velmi často používají tandemové stroje pro velkosériovou výrobu a tam, kde se dociluje menších průměrů tažených polotovarů. Dále se hojně využívají jednoduché stroje pro malosériovou výrobu a dokončovací práce. A v neposlední řadě i stroje s přímočarým pohybem pro velké průměry zpracovávaného polotovaru.

Na závěr se práce věnovala nekonvenčním metodám tažení a byl proveden průzkum směřování vývoje speciálních metod tažení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [7]

1. ASM INTERNATIONAL. *Metals handbook volume 14: Forming and forging*. 9. vyd. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1988. ISBN 978-0-871-70020-9.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
4. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
5. Wire Drawing. *Mustansiriyah University* [online]. Bagdád, 2016 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2016_04_18!11_56_42_AM.pdf
6. TSCHÄTSCH, Heinz a Anne KOTH. *Metal forming practise: processes - machines - tools* [online]. New York: Springer-Verlag, 2006 [cit. 2018-05-05]. ISBN 978-3-540-33216-9. Dostupné z: [http://mirror.thelifeofkenneth.com/lib/SurvivalBooks/How-to%20and%20Bushcraft/Metal-Forming\(2\).pdf](http://mirror.thelifeofkenneth.com/lib/SurvivalBooks/How-to%20and%20Bushcraft/Metal-Forming(2).pdf)
7. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
8. Theory of Wire Drawing. ANTAAC [online]. Mexico City [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.antaac.org.mx/assets/10.-theory-of-wiredrawing.pdf>
9. Wire Drawing Soap Lubrication: Principles And Factors Affecting Selection. ANTAAC [online]. Mexico City, 2007 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.antaac.org.mx/descargas/InfluenciaDeLubricantesIII.pdf>
10. Processes. FRT [online]. Pescate [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.rotta.it/en/processi>
11. JINDAL, Harish a Asim JINDAL. Dies Management in Wire Drawing Industry. Wire and Cable INDIA [online]. Ghaziabád, 2015 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.wirecable.in/2015/04/dies-management-in-wire-drawing-industry/>
12. CANALE, Lauralice C.F., Renata Neves PENHA, George E. TOTTEN, Antonio C. CANALE a Maria Regina GASPARINI. Overview of factors contributing to steel spring performance and failure. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2007, 2(3/4), 262-309. DOI: 10.1504/IJMMP.2007.015310. ISSN 1741-8410. Dostupné také z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=15310>.
13. LENFELD, Petr. Technologie objemového tváření - tažení drátů a profilů. Technologie II [online]. Liberec [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/04.htm#042
14. TIERNAN, P. a M. T. HILLERY. Dieless wire drawing - an experimental and numerical analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. Limerick, 2004, (155-156), 1178-1183.
15. LIU, Shen, Xiaobiao SHAN, Kai GUO, Yuancai YANG a Tao XIE. Experimental study on titanium wire drawing with ultrasonic vibration. *Ultrasonics*. 2018, 83, 60-67. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.08.003. ISSN 0041624X. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0041624X17302032>
16. SAVENOK, A. N., T. P. KURENKOVA a A. A. SAKHARNAYA. Influence of surface defects inherited by wire rod on the quality of cold-drawn wire. *Steel in Translation*. 2012, 42(5), 452-455. DOI: 10.3103/S0967091212050130. ISSN 0967-0912. Dostupné také z: <http://www.springerlink.com/index/10.3103/S0967091212050130>

17. Pincher. Macro Defects in Steel [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.steeldata.info/macro/demo/data/435.html>
18. *Ernst Koch GmbH* [online]. Ihmert, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.koch-ihmert.de/>
19. Fotogalerie pružin. *IVEZA Plzeň* [online]. Plzeň [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.iveza.cz/fotogalerie-pruzin.htm>
20. 1x19 Stainless Steel Wire Rope. *S3i Group* [online]. Harworth [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.s3i.co.uk/1x19.php>
21. OTO type Wire Drawing Machine. *Amber machine* [online]. Su-čou [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.wiredrawingchina.com/wire-drawing-machine/Pulley-Type-Continuous-Wire-Drawing-Machine.htm>
22. Temperature distributions in the high speed drawing of high strength steel wire. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1985, 27(11/12), 803-8011.
23. SHINDE, Jyoti. Wire Drawing. In: *Unacademy* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://unacademy.com/lesson/wire-drawing-in-hindi/FXXU809>
24. Wire-drawing lubricants and soaps. *CONDAT* [online]. Chasse-sur-Rhône [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.condat-lubricants.com/product/wire-drawing-lubricants-soaps/>
25. Wire straightening and cutting machines. *IMachine* [online]. Tchaj-čung [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.imachine.com.tw/wire-straightening-cutting-machines/CYA-100A-101A.html>
26. Wire Pointers, Wire Shaving and Wire Feeding. *Howar Equipment Inc.* [online]. Concord [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.howarequipment.com/products/wire_pointer/
27. CONTINUOUS RESISTANCE ANNEALER EA-355. *Henrich Maschinenfabrik GmbH* [online]. Herborn [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://henrich.net/products/rod-breakdown-drawing-lines/continuous-resistance-annealer-ea-355/?lang=en&lang=en>
28. Metal Drawing. *The library of manufacturing* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://thelibraryofmanufacturing.com/metal_drawing.html
29. ZOMPI, Antonio a Raffaello LEVI. Advances in wire drawing process by theoretical and numerical analysis. *UTFscience*. 2008, 1(1), 1-8. Dostupné také z: www.umformtechnik.net/binary_data/101894_69261_ut_08_01_002xx0108ut.pdf
30. Products. *Wirex dies and steel* [online]. Dílí [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.wirexdiamonddies.com/Product.aspx>
31. Wire Drawing Tools with Optimized Ceramic Surfaces. *CeramTec* [online]. Plochingen [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/applications/forming-technology/wire-drawing/>
32. Recutting / Repolishing Services. *Laxmi drawing dies* [online]. Nová Bombaj [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://laxmidrawingdies.com/services.html>
33. Wire Drawing Machine. *Anber machine* [online]. Su-čou [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.wiredrawingchina.com/show-case/Kenya_Wire_Drawing_machine.htm
34. Horizontal Straight Line Machines. *Assomac* [online]. Ghaziabád [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.assomacmachines.com/horizontal-straight-line-machines.htm>
35. Hand Wire Drawing Machine. *Fischer* [online]. Pforzheim [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://www.goldschmiedebedarf.de/product_info.php?products_id=5042
36. *SCHUMAG* [online]. CÁCHY [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.schumag.de/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A_0	vstupní plocha drátu	[mm ²]
A_1	výstupní plocha drátu	[mm ²]
c	měrná tepelná kapacita	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
D	průměr bubnu	[m]
d_0	vstupní průměr drátu u jednoduchého tahu	[mm]
d_1	výstupní průměr drátu u jednoduchého tahu	[mm]
d_f	výstupní průměr	[mm]
d_i	vstupní průměr	[mm]
F	tažná síla	[N]
k_{strm}	střední napětí	[MPa]
l_3	délka kalibračního válce	[mm]
n	počet otáček	[min ⁻¹]
n_v	celkový počet válců v tažné stolici	[-]
P	výkon stroje	[kW]
P_c	celkový výkon tažné stolice	[kW]
P_i	jednotlivé výkony na bubnu tažné stolice	[kW]
r	redukce plochy	[-]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
v	tažná rychlost	[m·s ⁻²]
v_f	výstupní rychlost	[m·s ⁻²]
v_i	vstupní rychlost	[m·s ⁻²]
$\hat{\alpha}$	poloviční úhel rozevření tažného kužele	[rad]
α	poloviční úhel rozevření tažného kužele	[°]
Δ	delta faktor	[-]
ΔT	změna teploty	[K]
ε	poměrné přetvoření	[-]
η_M	efektivita stroje	[-]
μ	třecí koeficient	[-]
ρ	hustota taženého materiálu	[kg·m ⁻³]
φ	logaritmické přetvoření	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Tažná stolice [18].....	9
Obr. 2 Výrobky z drátu [19], [20], [21]	9
Obr. 3 Zjednodušený nákres procesu [6]	10
Obr. 4 Schéma působících sil v místě redukce [8]	11
Obr. 5 Graf rozložení prací [8].....	12
Obr. 6 Vyobrazení průběhu prací [8]	12
Obr. 7 Příklad rozložení teploty v průvlaku [8]	14
Obr. 8 Schéma procesu mazání [23]	14
Obr. 9 Schéma jednopřechodového tažení [6]	15
Obr. 10 Schéma vícepřechodového tažení [6]	15
Obr. 11 Rovnáč stroj [25].....	16
Obr. 12 Stroj na zúžení konce drátu [26]	16
Obr. 13 Odporový žíhací stroj [27]	17
Obr. 14 Struktura v průběhu tepelného zpracování [10].....	17
Obr. 15 Schéma upnutí do tažných čelistí [28]	18
Obr. 16 Schéma tažení drátu [5].....	18
Obr. 17 Struktura drátu při tandemovém tažení [10]	18
Obr. 18 Švy na povrchu drátu [17].....	19
Obr. 19 Vznik ševronu [29].....	19
Obr. 20 Rýha na povrchu drátu [12]	19
Obr. 21 Bublina na povrchu drátu [16]	19
Obr. 22 Schéma průvlaku [13]	20
Obr. 23 Označení úhlů a rozměru průvlaku [6]	20
Obr. 24 Složení diamantového průvlaku [30]	22
Obr. 25 Keramický průvlak [31]	23
Obr. 26 Vady na povrchu průvlaku [32]	23
Obr. 27 Tažná stolice s přímým pohybem [18].....	24
Obr. 28 Tažná stolice OTO [33].....	25
Obr. 29 Horizontální tažná stolice [34].....	25
Obr. 30 Tažná stolice pro jednoduché tažení [18]	26
Obr. 31 Ruční stroj [35]	26
Obr. 32 Stolice s přímočarým pohybem [36].....	26
Obr. 33 Schéma bezprůvlakového tažení pomocí zahřátí [8]	27
Obr. 34 Průvlak s vibračními tělesy [16]	27

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Celkové přetvoření při tandemovém tažení [6].....	11
Tab. 2 Doporučená rychlost v závislosti na mezi pevnosti v tahu [6]	13
Tab. 3 Optimální tažný úhel 2α [5]	21
Tab. 4 Vhodné materiály v závislosti na materiálu a průměru drátu [1].....	22