

Vliv teploty tváření na velikost přetvárného odporu při zkoušce tlakem

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Jakub Kameník

Vedoucí práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Vliv teploty tváření na velikost přetvárného odporu při zkoušce tlakem

Jméno a příjmení: **Jakub Kameník**
Osobní číslo: S18000053
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Základní rozdělení technologií objemového tváření.
2. Metody stanovení přetvárného odporu při tváření.
3. Pro zvolený materiál provést experimentální zjištění vlivu teploty tváření na velikost přetvárného odporu při zkoušce tlakem.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Diskuze a závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tabulky, grafy
cca 30
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] ASM INTERNATIONAL, Howard KUHN a ASM INTERNATIONAL, ed. *Mechanical testing and evaluation*. [11. ed.], 1. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000. ASM handbook, prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; Vol. 8. ISBN 978-0-87170-389-7.
- [2] SEMIATIN, S. L. a ASM INTERNATIONAL, ed. *Forming and forging*. 9. ed., 5. print. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1998. Metals handbook, prepared under the direction of the ASM Handbook Committee; Vol. 14. ISBN 978-0-87170-020-9.
- [3] HERTZBERG, Richard W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 4th ed. New York: J. Wiley & Sons, 1996. ISBN 978-0-471-01214-6.
- [4] PÖHLANDT, Klaus. *Materials testing for the metal forming industry*. Berlin u.a: Springer, 1989. ISBN 978-3-540-50651-5.
- [5] TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes – machines – tools*. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.
- [6] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 15. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2022

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

27. června 2021

Jakub Kameník

Název práce

Vliv teploty tváření na velikost přetvárného odporu při zkoušce tlakem

Anotace

Tématem této bakalářské práce je vliv teploty tváření na velikost přetvárného odporu při zkoušce tlakem. Teoretická část je věnována popisu technologií objemového tváření a metodám stanovení přetvárného odporu při tváření. V experimentální části bylo provedeno měření konstrukční oceli. Byly provedeny zkoušky petchováním za určitých teplot potřebné k následnému určení jednotlivých přetvárných odporů. Dále se experimentální část zabývá popisem materiálu, dále pak popisem strojů a zařízení použitých při měření.

Klíčová slova

Přetvárný odpor, zkouška petchováním, konstrukční ocel, teplota tváření, objemové tváření, TESTOMETRIC FS100CT

Title

Influence of forming temperature on the amount of deformation resistance during the pressure test

Annotation

The topic of this bachelor's thesis is effect of forming temperature on the amount of deformation resistance during the compression test. The theoretical part is devoted to the description of forming and methods for determining the deformation resistance during forming. In the experimental part, the measurement of structural steel was performed. Tests were performed by upsetting at certain temperatures necessary for the subsequent determination of individual deformation resistance. Furthermore, the experimental part deals with the description of the material, then the description of machines and equipment used in the measurement.

Key words

Deformation resistance, upsetting test, construction steel, forming temperature, forming, TESTOMETRIC FS100CT

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat rodině za jejich podporu během celého studia. Dále poděkování patří vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Solfonkovi , Ph.D. za jeho vynaložený čas a velmi cenné rady při tvorbě této bakalářské práce. Dále pak za jeho odbornou pomoc při jednotlivých měřeních.

Obsah

1. Úvod	12
2. Teoretická část	13
2.1 Objemové tváření.....	13
2.1.1 Volné kování.....	13
2.1.1.1 Operace volného kování	13
2.1.2 Zápustkové kování.....	16
2.1.3 Postupové zápustkové kování na bucharech	17
2.1.4 Přesné kování	17
2.1.5 Kování na vodorovných kovacích strojích	18
2.1.6 Rotační kování.....	19
2.1.7 Podélné válcování	19
2.1.8 Podélné válcování tyčí.....	20
2.1.9 Podélné válcování čtvercových tyčí	20
2.1.10 Příčné válcování	21
2.1.11 Kosé válcování.....	21
2.1.12 Příčné klínové válcování	22
2.1.13 Válcování prstenců	22
2.1.14 Podélné válcování závitů	23
2.1.15 Protlačování	23
2.1.15.1 Druhy protlačování.....	23
2.1.16 Tažení profilů.....	24
2.2 Přetvárný odpor	24
2.2.1 Ukázka výpočtu pro metodu pěchování:	25
2.2.2 Vlivy třecí síly na technologii pěchování	26
2.2.3 Přetvárná pevnost.....	27
2.2.3.1 Metalurgický charakter kovu M	27
2.2.3.2 Tvářecí teplota T.....	28

2.2.3.3	Poměrná deformace „ ϵ “	28
2.2.3.4	Deformační rychlost „ $\dot{\epsilon}$ “	29
3.	Experimentální část.....	30
3.1	Zkoušený materiál.....	31
3.1.1	Označování ocelí	31
3.1.2	Zkouška tahem	32
3.1.2.1	Zjištění mechanických vlastností materiálu S550J2 zkouškou tahem.....	34
3.2	Zkouška pětčováním.....	35
3.2.1	Samotný průběh měření	40
3.2.2	Vyhodnocení dat	45
4.	Diskuze výsledků	54
5.	Závěr.....	56
	Literatura.....	58
	Seznam příloh.....	60

Seznam použitých zkratk

A	[%]	tažnost
A_g	[%]	homogenní tažnost
$A_{40\text{mm}}$	[%]	tažnost pro délku zkušební vzorku 40 mm
c	[-]	koeficient deformačního odporu
d	[mm]	průměr
D	[mm]	okamžitý průměr vzorku během zkoušky
D_0	[mm]	počáteční průměr vzorku
$\dot{\epsilon}$	[s ⁻¹]	deformační rychlost
F	[N]	zatěžující síla
H	[mm]	výška vzorku v průběhu zkoušky
H_0	[mm]	počáteční výška vzorku
k_o	[MPa]	přetvárný odpor
k_{os}	[MPa]	střední hodnota přetvárného odporu
k_p	[MPa]	přetvárná pevnost
l	[mm]	výsledná dosažená dráha
ΔL	[mm]	poměrné stlačení
L_u	[mm]	konečná měřená délka po lomu
L_0	[mm]	počáteční měřená délka
M	[-]	metalurgický charakter kovu
n	[-]	počet měření
q	[MPa]	odpory
R	[MPa]	smluvní napětí

R_e	[MPa]	výrazná mez kluzu
R_f	[MPa]	napětí při kterém dojde k porušení materiálu
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
S	[mm ²]	aktuální plocha průřezu vzorku v průběhu zkoušky
S_0	[mm ²]	počáteční průřezová plocha zkoušené délky
S_x	[J]	výsledná plocha pod křivkou
T	[K]	teplota
V	[m ³]	objem po zkoušce
V_0	[m ³]	objem před zkouškou
x_i	[dle veličiny]	naměřené hodnoty
\bar{x}	[dle veličiny]	aritmetický průměr
Z	[%]	kontrakce
α	[°]	úhel nástroje
β	[°]	třecí úhel
ε	[-]	poměrná deformace
μ	[-]	deformační tření
π	[-]	Ludolfovo číslo
σ	[MPa]	napětí

1. Úvod

I přesto, že dnes existuje spousta technologických možností zpracování kovů, patří technologie tváření k jedné z nejzákladnějších a stále hojně využívané technologii ve strojním průmyslu. Tato bakalářská práce se zabývá technologiemi objemového tváření, zvláště pak veličinou, která je pro tyto technologie velice významná. Touto veličinou je tzv. přetvárný (deformační) odpor. Ve stručnosti lze definovat přetvárný odpor jako materiálovou charakteristiku určující míru odporu proti přetvoření tvářeného materiálu. Znalost tohoto odporu má velký význam u technologií objemového tváření. Je známo, že technologie objemového tváření zvláště pak technologie kování jsou často prováděny za tepla. Důvodem je snížení tvářecí síly. Je tedy nutné znát deformační odpor a jeho chování za vyšších teplot.

Cílem této bakalářské práce je určit vliv teploty tváření na velikost přetvárného odporu, případně určit charakteristickou funkci pro výpočet přetvárného odporu pro určitou teplotu. Pro tento experiment byla vybrána zkouška tlakem, z důvodu její podobnosti s technologií pěchování. K určení závislosti přetvárného odporu pro různé teploty je nutné provést zkoušky tlakem za rozdílných teplot a následně určit hodnoty přetvárného odporu pro tyto zkoušené teploty. Experiment vyžaduje zkušební stroj, který zahřeje materiál na požadovanou teplotu a následně dokáže zajistit průběh zkoušky tlakem při konstantní teplotě.

2. Teoretická část

2.1 Objemové tváření

Technologie objemového tváření je proces, při kterém dochází ke komplexní deformaci ve všech směrech. Mezi objemové tváření patří kování, válcování, protlačování a tažení profilů.

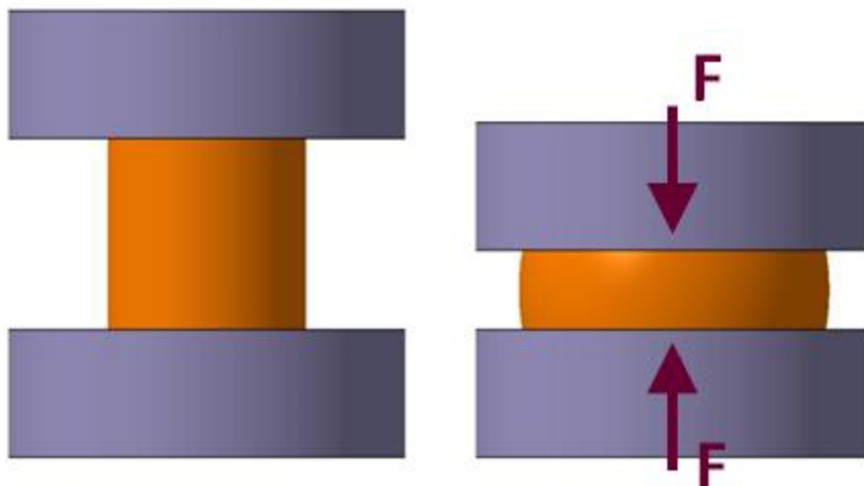
2.1.1 Volné kování

Volným kováním se dosáhne tvaru, který je přibližně podobný tvaru hotové součásti. Požadovaného tvaru dosahujeme operacemi volného kování s použitím univerzálního nářadí a pracovních pomůcek. Nářadím je myšleno například ploché a tvarové kovadlo. [1–3]

2.1.1.1 Operace volného kování

1) Pěchování

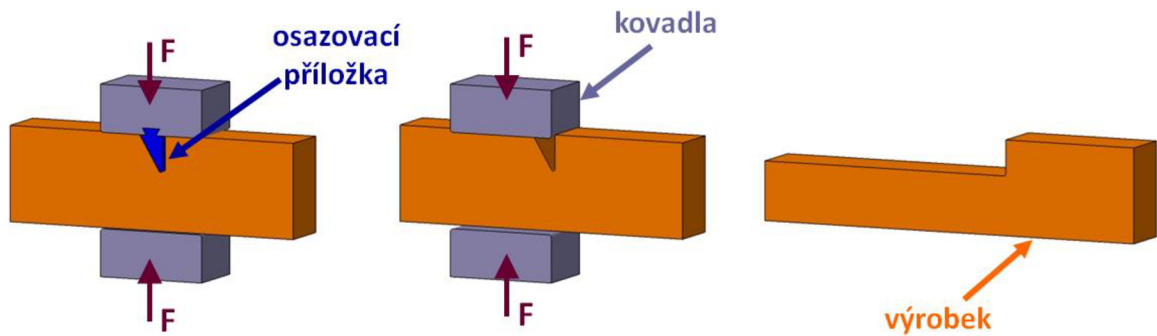
Při operaci pěchování dochází ke zmenšení délky a ke zvětšení průřezu kovaného materiálu. Cílem je homogenizace chemického složení materiálu, zjemnění struktury, dále odstranění vnitřních objemových vad. V případě tváření za studena dochází ještě ke zpevnění materiálu. Uplatňuje se též jako přípravná operace před prodlužováním a děrováním. Na obr. 1 je vyobrazeno schéma pěchování. [2]



Obr. 1 Schéma pěchování [4]

2) Osazování

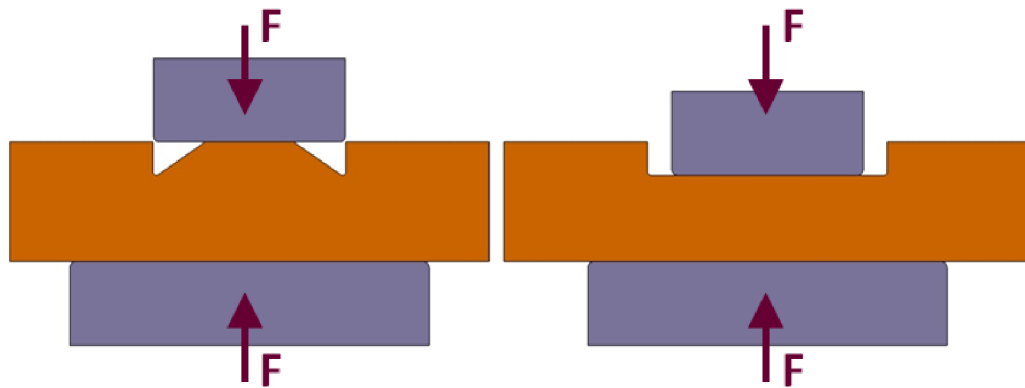
Jde o prodlužování vymezených částí výkovku (viz obr. 2). Osazování se provádí na koncových částech výkovku a vzniká tzv. osazení. Cílem je v dané části zmenšit průřez materiálu a tím dojde k jeho prodloužení.[2]



Obr. 2 Jednostranné osazování [4]

3) Prosazování

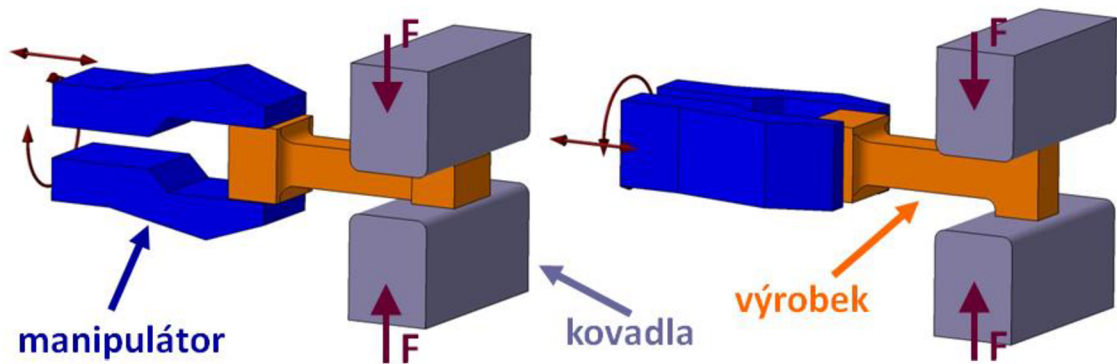
Jde o prodlužování vymezených částí výkovku. Je založeno na podobném principu jako osazování. Od osazování se liší tím, že se provádí ve středových částech výkovku (viz obr. 3). [2]



Obr. 3 Prosazování [4]

4) Dloužení

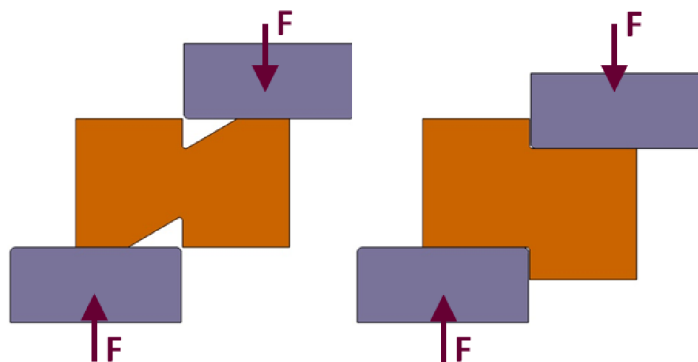
Dloužení je operace, při které dochází k prodlužování materiálu vlivem zmenšování průřezu. Princip spočívá v opakování jednotlivých úderů po celé délce výkovku, při současném otáčení výkovku. Můžou být dva způsoby dloužení (viz obr. 4). Prvním způsobem je, že po každém zdvihu kovádky se výrobek otočí o 90°. Tímto způsobem je dosahováno vyššího stupně prokování. Nevýhodou je však nutná manipulace s výkovkem, která zapříčiňuje snižování jeho teploty. U druhého způsobu dochází k otočení výkovku o 90° až po vykování celé jeho délky. Výhodou jsou menší časové prodlevy. Nevýhodou je dosažení nižšího stupně prokování. [2, 3]



Obr. 4 Dloužení [4]

5) Přesazování

Jde o příčné posouvání vymezeného objemu výkovku. Osy posunuté a neposunuté části jsou vůči sobě vzájemně rovnoběžné. [2]



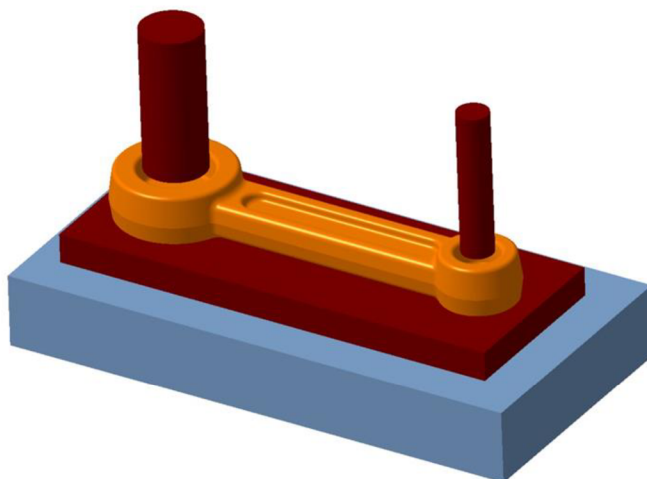
Obr. 5 Přesazování [4]

6) Sekání

Sekání se používá k dělení výchozího materiálu na jednotlivé polotovary. Častěji se však používá k oddělování přebytečného a odpadového materiálu od výkovků. [2]

7) Děrování

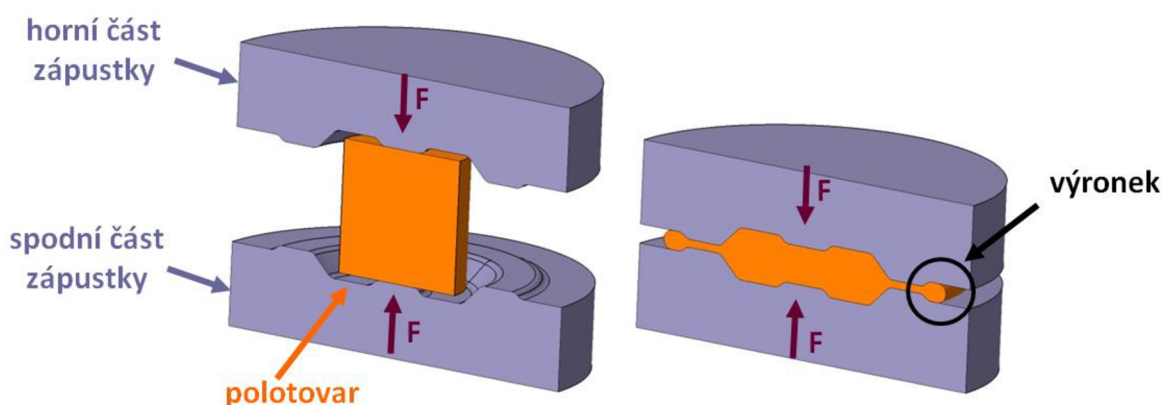
Prostřednictvím této operace se dosahuje ve výkovku průchozí díry. Nástroj musí mít stejnou velikost jako budoucí otvor. [2, 5]



Obr. 6 Děrování [4]

2.1.2 Zápustkové kování

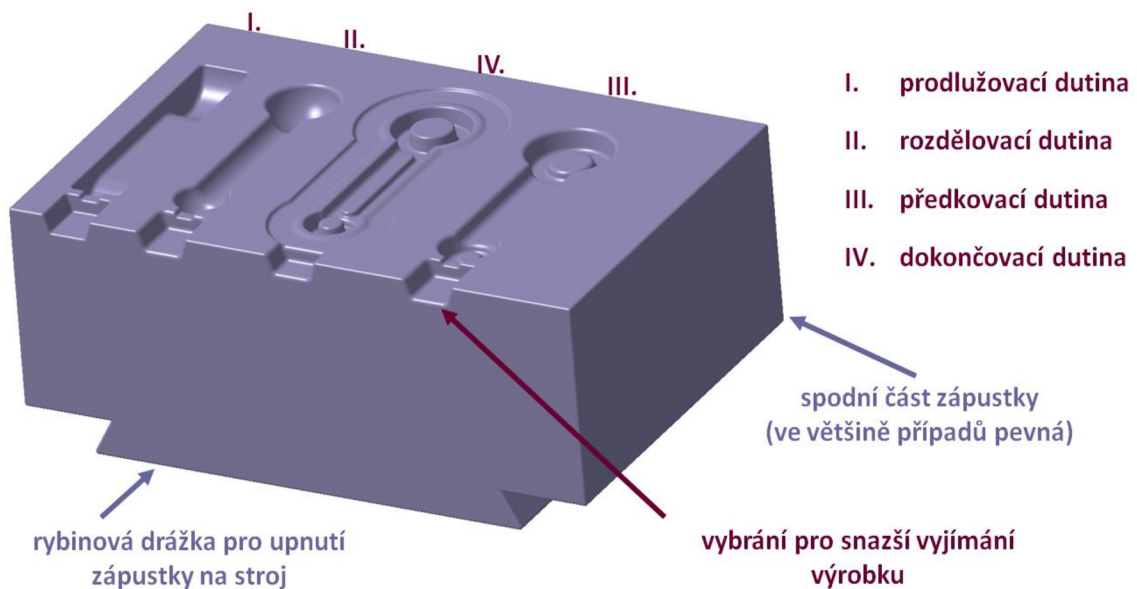
Zápustkové kování je proces, kdy je přehřátý materiál tvářen zpravidla ve dvoudílném nástroji tzv. zápustce (viz obr. 7). Tvar dutiny zápustky odpovídá negativu zhotoveného výkovku. Polotovar pro zápustkové kování má větší objem než budoucí výrobek. Přebytečný materiál je vytlačován do výronkové drážky a tvoří tzv. výronek. Ten je následně ostříhován. K přednostem zápustkového kování patří vysoká produktivita, tvorba tvarově členitých výkovků, ve srovnání s volným kovááním má hospodárnější využití kovu a nižší nároky na kvalifikaci pracovníka. Zápustkové kování nachází využití všude tam, kde je potřeba **velkého množství** tvarově shodných součástí (kolejová vozidla, letadla, zemědělské stroje, zámečnické a zemědělské nářadí, lékařské nástroje atd.). [1–3, 6]



Obr. 7 Zápustkové kování [4]

2.1.3 Postupové zápustkové kování na bucharech

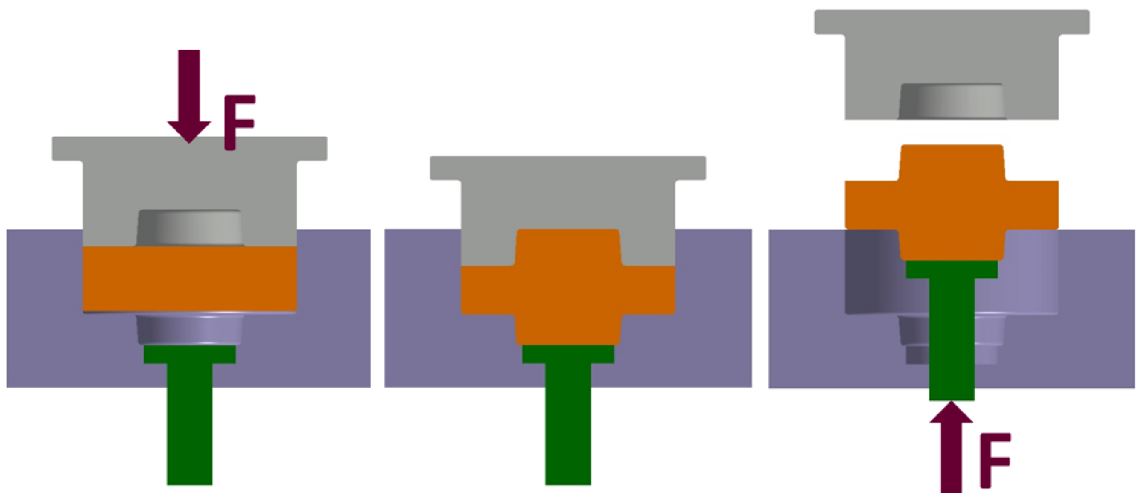
Postupové zápustkové kování se používá pro složité výkovky, u kterých nelze výkovek zhotovit na jednu operaci. Používá se postupový nástroj (postupová zápustka viz obr. 8). V nástroji je několik dutin, které mění polotovary na konečný výkovek. Dutiny v zápustce můžeme rozdělit na prodlužovací, rozdělovací, předkovací a dokončovací dutinu. V prodlužovací dutině se kove zpravidla na jeden úder, dochází k malé redukci průřezu materiálu. V rozdělovací dutině je cílem dosáhnout ideálního předkovku. Kove se zpravidla na 2 až 4 údery dle složitosti výrobku se současným otáčením o 90°. Předkovací dutina má za úkol vytvořit přibližně konečný tvar. Kove se na 1 až 3 údery dle složitosti výkovku. V dokončovací dutině výkovek získává požadovaný tvar a přebytečný materiál je vytlačován do výronkové drážky. Dokončovací dutina se z důvodu největších tvářecích sil umísťuje na střed nástroje. Při zápustkovém kování nelze vykovat průchozí otvor. Proto po vyjmutí výkovku ze zápustky dochází k ostřížení výkovku a k tzv. probíjení otvorů. [3, 4, 7]



Obr. 8 Postupová zápustka [4]

2.1.4 Přesné kování

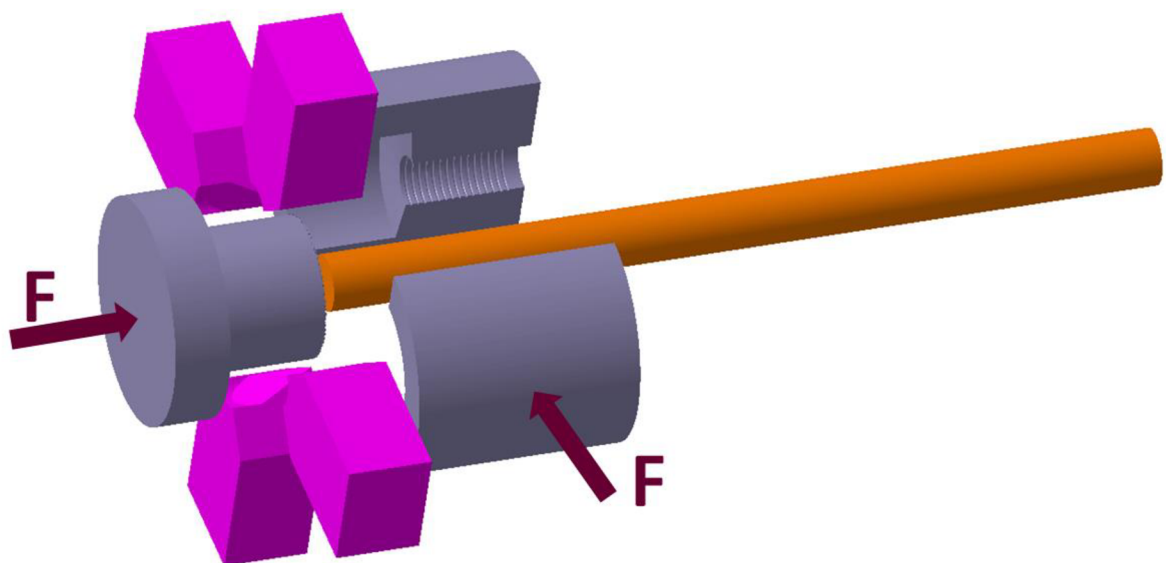
Přesné kování je proces, při kterém se využije veškerý materiál polotovaru. Dutina nástroje má tvar negativu budoucího výrobku. Polotovar musí mít stejný objem jako výkovek. Velké namáhání stroje i nástroje je zapříčiněno velkými tvářecími silami. Touto technologií dosahujeme vysoké kvality výrobků. [2, 3, 6, 7]



Obr. 9 Přesné kování na lisech [4]

2.1.5 Kování na vodorovných kovacích strojích

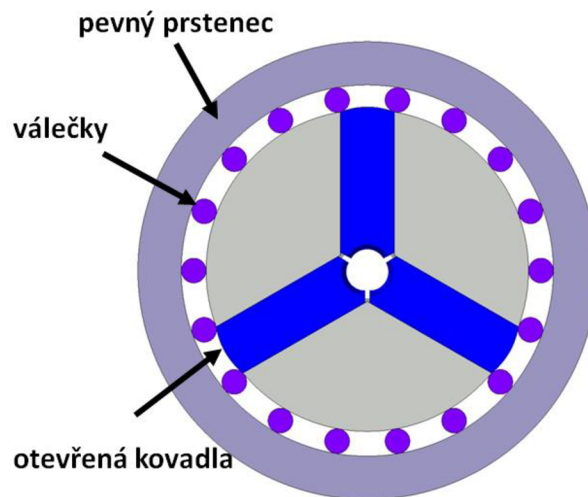
Kování na vodorovných kovacích strojích umožňuje částečnou, ale i úplnou automatizaci výrobního procesu. Stroj má dva spřažené, nebo samostatně ovládané berany. Používá se pro výrobu hřebíků, šroubů a dalších úchytných výrobků. Stroj pracuje tak, že se polotvar ve formě tyče, nebo drátu posune do kovací polohy na zarážku. Následně se uzavře dvoudílný nástroj a tím sevře polotovár. Poté se odsune zarážka vymezující krajní polohu polotovaru v kovacím nástroji. Konec tyče se ohřívá a materiál se kove spřaženými kovacími válci. Po vykování nůž odřízne hotový výrobek a celý proces se může opakovat. Schéma kování na vodorovných kovacích strojích je vyobrazeno na obr. 10. [2, 6]



Obr. 10 Kování na vodorovných kovacích strojích [4]

2.1.6 Rotační kování

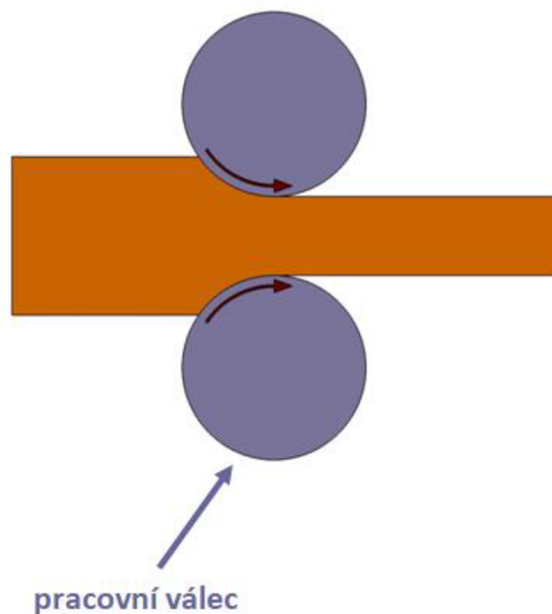
Při rotačním kování se materiál kove radiálně pohybujícími se kovádky (viz obr. 11). Za pomoci odstředivých sil se kovádky vytlačují na vnější obvod prstence, kde se odrážejí od válečků. Touto metodou lze kovat pouze rotační díly. [1, 3, 4]



Obr. 11 Rotační kování [4]

2.1.7 Podélné válcování

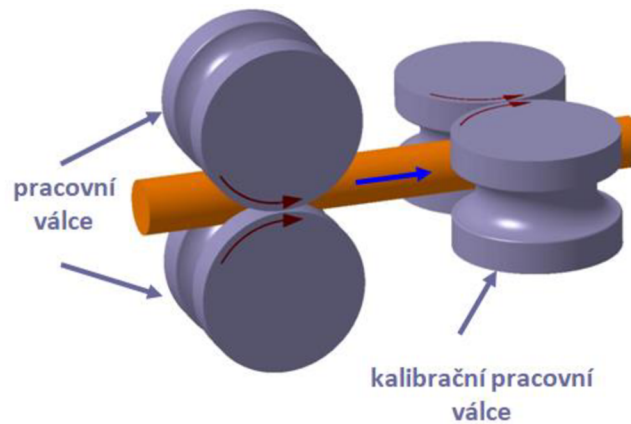
Při podélném válcování se válce viz obr.12 pohybují dle směru šipek. Vtahují materiál mezi sebe a tím dochází ke tváření materiálu. Materiál se prodlužuje a tím dochází k mírnému rozšíření. Válcování je jedním z nejrozšířenějších způsobů kování. [1, 2]



Obr. 12 Podélné válcování [8]

2.1.8 Podélné válcování tyčí

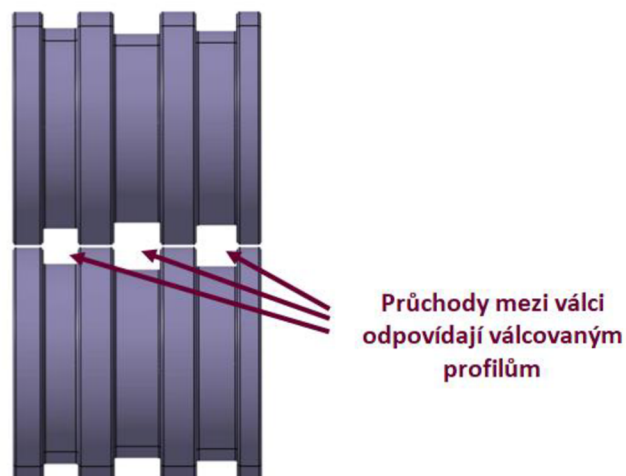
Při podélném válcování tyčí viz obr. 13 se polotovar kove prostřednictvím válců, které mají profil odpovídající negativu budoucí tyče. Pracovní válce se vzájemně nedotýkají. Tím může nastat nedokonalost tvaru výsledného výrobku. [4]



Obr. 13 Podélné válcování tyčí [8]

2.1.9 Podélné válcování čtvercových tyčí

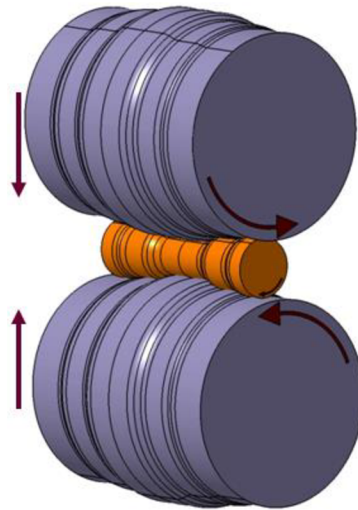
Při podélném válcování čtvercových tyčí se využívá stejného principu jako u technologie válcování kruhových tyčí. Tvar nástroje rovněž odpovídá negativu výrobku (viz obr. 14).



Obr. 14 Válcování čtvercových tyčí [8]

2.1.10 Příčné válcování

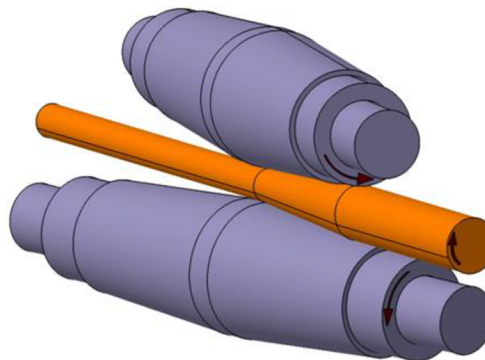
U technologie příčného válcování je osa výkovku rovnoběžná s osami pracovních válců. Válce se otáčejí stejným směrem. Materiál se pohybuje proti směru otáčení pracovních válců. Touto technologií lze vyrábět pouze rotační díly. Tvar výrobku je dán geometrií nástroje, ale také vzdáleností os pracovních válců. Používá se například pro výrobu hřídelů. Schéma této technologie je vyobrazeno na obr. 15. [1, 2]



Obr. 15 Příčné válcování [8]

2.1.11 Kosé válcování

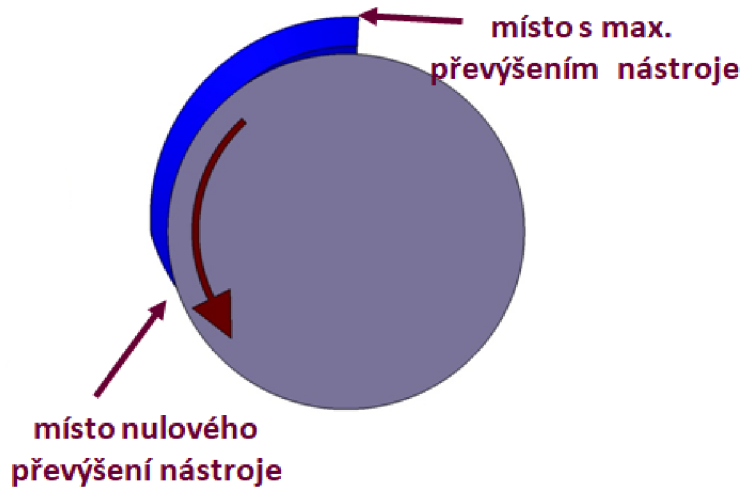
Kosé válcování je zvláštním případem příčného válcování. Osy pracovních válců jsou navzájem mimoběžné (viz obr. 16). Výrobek nejen rotuje, ale díky mimoběžnosti válců se pohybuje vpřed ve směru své podélné osy. Nejčastěji se tento způsob používá pro válcování bezešvých trubek. [2]



Obr. 16 Kosé válcování [8]

2.1.12 Příčné klínové válcování

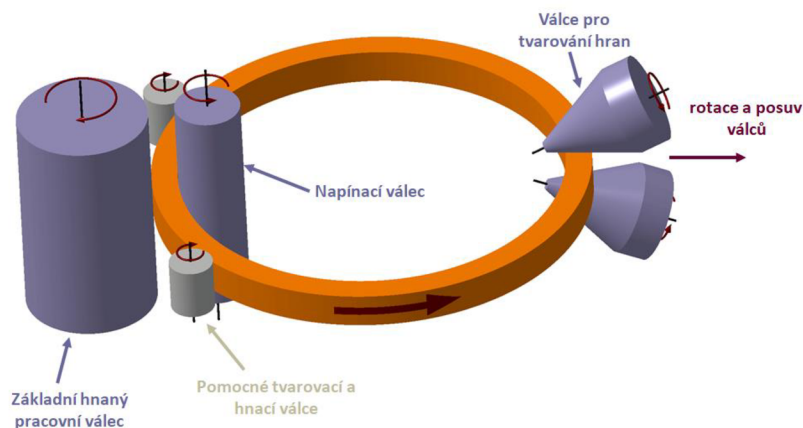
U příčného klínového válcování je na válci umístěn nástroj ve tvaru klínu (viz obr. 17), jehož výška se po obvodu válce zvyšuje. Polotovar válcového tvaru se vloží mezi dva pracovní válce s klíny. Výrobek vzniká na jedno otočení pracovních válců. Tato metoda nachází své využití zejména při hromadné výrobě rotačních výkovek. [1, 4]



Obr. 17 Příčné klínové válcování [8]

2.1.13 Válcování prstenců

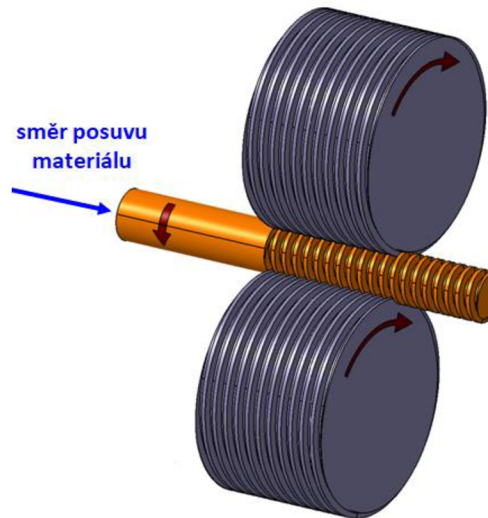
Válcování prstence je proces používaný k výrobě bezešvých válcových prstenců s předem určeným tvarem. Pro tuto metodu je typické, že vyžaduje menší objem materiálu a díky tomu méně obrábění hotových dílů. Při výrobě prstence je na trn položen předehřátý polotovar, který má předtvarovaný otvor. Základní hnaný pracovní válec spolu s tvarovacími válci a napínacím válcem vytvářejí průměr prstence. Válce pro tvarování hran zmenšují šířku prstence (viz obr. 18). Nejčastěji se prstence válcují z kovaných polotovarů. [1, 3]



Obr. 18 Válcování prstence [8]

2.1.14 Podélné válcování závitů

Podélné válcování závitů je proces tváření za studena. Používá se pro výrobu závitů všech typů. Válce mají na sobě profil, který odpovídá negativu budoucího závitu (viz obr. 19). Průměr výchozího polotovaru odpovídá střednímu průměru vyrobeného závitu. Závit vzniká tak, že se polotovar otáčí proti směru pohybu válců a zároveň je posouván ve směru vlastní osy. [5, 9]



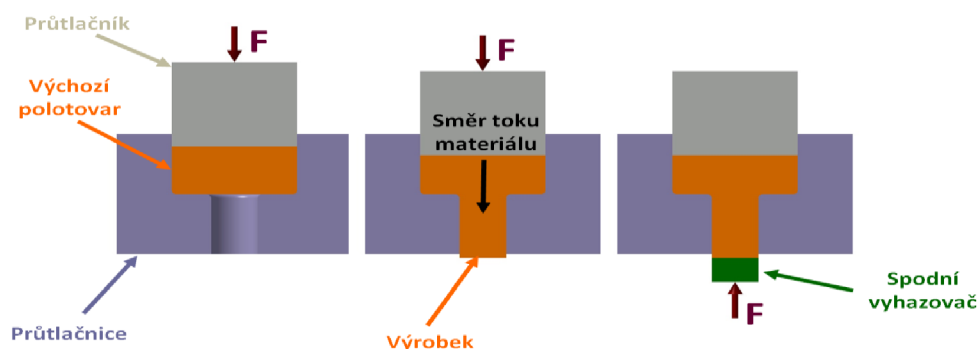
Obr. 19 Podélné válcování závitů [8]

2.1.15 Protlačování

Protlačování je metoda tváření materiálu za studena nebo za tepla, při které průtlačník protlačuje polotovar skrz průtlačnici (viz obr. 20). Tím vzniká budoucí výrobek tzv protlaček. Touto metodou je možné vyrábět výkovky s průchozími dírami. Technologie protlačování se nejčastěji používá pro výrobky s velmi složitým průřezem. Výhodou je dosažení vysoké rozměrové přesnosti a vysoké kvality drsnosti povrchu výrobku. Naopak nevýhodou jsou velké tvářecí síly, vznikající při protlačování. Další nevýhodou je zahřívání nástroje vlivem deformace tvářeného materiálu. [1–3, 10]

2.1.15.1 Druhy protlačování

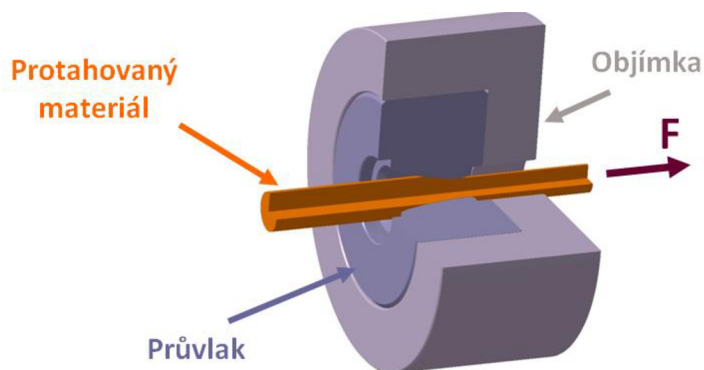
- a) dopředné protlačování – „směr zatížení síly je totožný se směrem toku materiálu“ [10]
- b) zpětné protlačování – „směr zatížení síly působí proti směru toku materiálu“ [10]
- c) kombinované protlačování – „kombinace obou předešlých druhů“ [10]
- d) stranové protlačování – „materiál teče kolmo na směr zatěžující síly“ [10]
- e) radiální protlačování – „materiál teče kolmo i rovnoběžně vzhledem ke směru zatěžující síly“ [10]



Obr. 20 Protlačování [10]

2.1.16 Tažení profilů

U technologie tažení profilů vzniká profil při průchodu polotovaru kuželovým otvorem, průvlakem (viz obr. 21). Tím dochází k prodloužení polotovaru ve směru působení hlavního napětí. Zmenšuje se plocha příčného průřezu a současně se zvyšuje mez pružnosti, pevnost a tvrdost materiálu výrobku. Tažnost a celkově všechny ostatní plastické vlastnosti se snižují. Tažení se provádí za studena, aby bylo zachováno zpevnění materiálu. Dosahuje se tak vysoké rozměrové a tvarové přesnosti výrobku. [2]



Obr. 21 Tažení profilů [10]

2.2 Přetvárný odpor

Přetvárný odpor je odpor materiálu proti plastické deformaci a tvářitelnosti. Je to projev tlaku a reakcí proti zatěžující síle, která má za úkol vyvolat změnu stavu tělesa. Jeho označení je k_o . Běžně se jeho hodnota udává v MPa. Jelikož se hodnoty přetvárného odporu a přetvárné pevnosti během procesu tváření mění, byla pro další potřebu zavedena střední hodnota přetvárného odporu k_{os} . [2, 4, 11, 12]

Přetvárný odpor se stanoví ze vztahu:

$$k_o = k_p + \text{odpory} \quad (2.1)$$

V grafech na obr. 22 a 23 jsou odpory znázorněny značkou q

Kde:

k_o – přetvárný odpor:

„Přetvárný odpor je materiálová charakteristika, která určuje míru odporu proti přetvoření. Pro daný materiál závisí na stavu napjatosti, koeficientu tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem a na velikosti deformace.“ [4]

k_p – přetvárná pevnost:

„Přetvárná pevnost je materiálová charakteristika, která určuje počátek vzniku plastické deformace. Pro daný materiál závisí na teplotě tváření, rychlosti deformace a na stupni deformace (počáteční stav materiálu).“ [4]

Odpory:

Jedná se o všechny možné vznikající odpory při tváření. Jejich výpočet je závislý na určitém druhu tváření.

2.2.1 Ukázka výpočtu pro metodu pýchování:

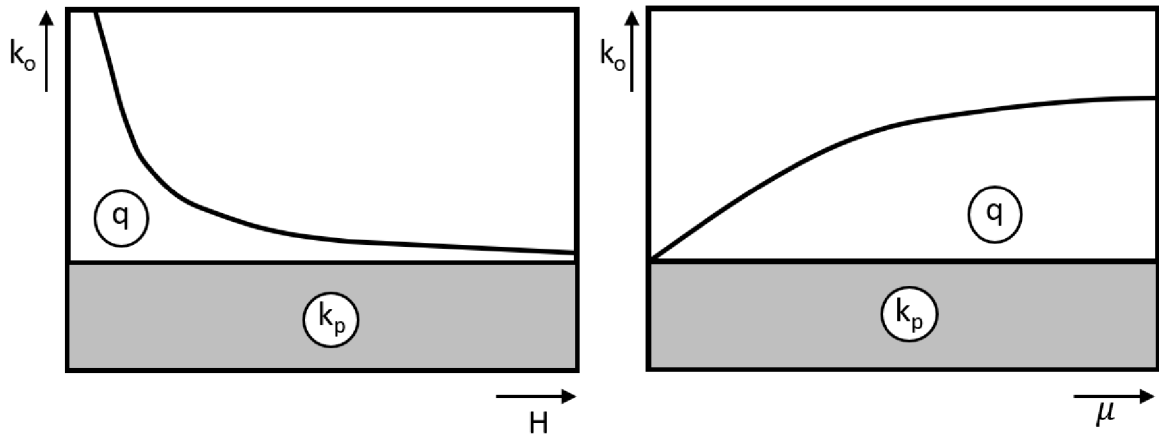
Tato práce se zabývá zkouškou tlakem, což je v podstatě technologie pýchování. Pro technologii pýchování bude vztah pro výpočet přetvárného odporu vypadat viz rovnice 2.2. Obecně lze rovnici 2.2 přepsat do tvaru viz rovnice 2.3, kde c je koeficient deformačního odporu, který zahrnuje podmínky tváření (např. koeficient tření) a také tvar budoucího výkovku. [4]

$$k_{os} = k_p \cdot \left(1 + \frac{\mu}{3} \cdot \frac{d}{h}\right) \quad (2.2)$$

$$k_{os} = k_p \cdot c \quad (2.3)$$

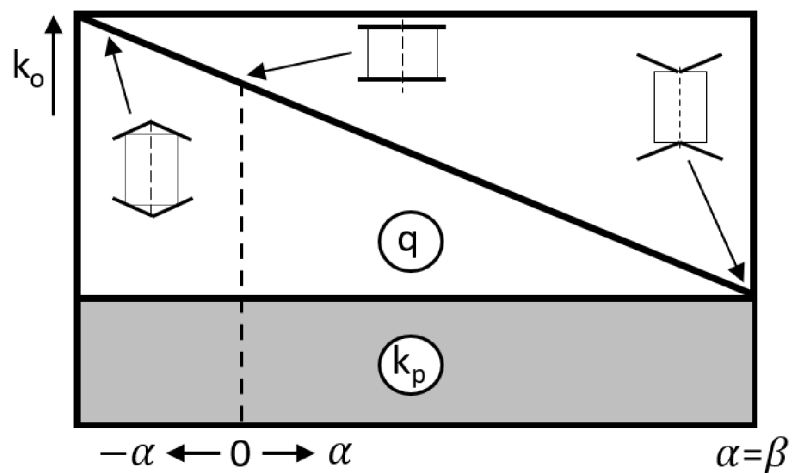
2.2.2 Vlivy třecí síly na technologii pēchování

Informace uvedené níže se týkají přímo technologie pēchování. Třecí síla je ovlivňována třemi parametry. Stykovou plochou (obr. 22 a), deformačním třením μ (obr. 22 b) a tvarem nástroje (obr 23). [2]



Obr. 22 a) Vliv velikosti stykové plochy na deformační odpor b) Vliv tření na deformační odpor[2]

Nástroje mohou mít různý tvar. Základní rozdělení tvaru nástrojů se dělí na rovné, vypuklé a vyduté. Tvar nástroje určuje úhel nástroje α . Pokud nastane stav $\alpha = \beta$, což odpovídá třecímu úhlu, který se stanoví jako $tg\beta = \mu$, dojde k úplnému potlačení třecích sil. Tím lze dosáhnout podmínek, které jsou blízké rovnoměrné deformaci. Obr. 23 vyobrazuje vliv tvaru nástroje na velikost přetvárného odporu u technologie pēchování. [2]



Obr. 23 Vliv tvaru nástroje na deformační odpor [2]

2.2.3 Přetvárná pevnost

Jde o materiálovou konstantu. Jedná se o nejmenší nutné napětí, které je potřeba k vyvolání plastické deformace při smluvních podmínkách. Určuje se při podmínkách lineárního stavu napjatosti materiálu. To znamená bez vlivu deformačního tření. Jedná se o intenzitu napětí, což je kumulovaný vliv všech hlavních napětí. Přirozený deformační odpor je dán vztahem: [2]

$$k_p = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (2.4)$$

V případě zkoušky tahem za studena může ve zvláštních případech při lineárním stavu napjatosti nastat, že $\sigma_1 = R_e$ a $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, poté je přirozený deformační odpor $k_p = R_e$. [2]

Obecná rovnice pro výpočet přetvárné pevnosti:

$$k_p = f(M, T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) \quad (2.5)$$

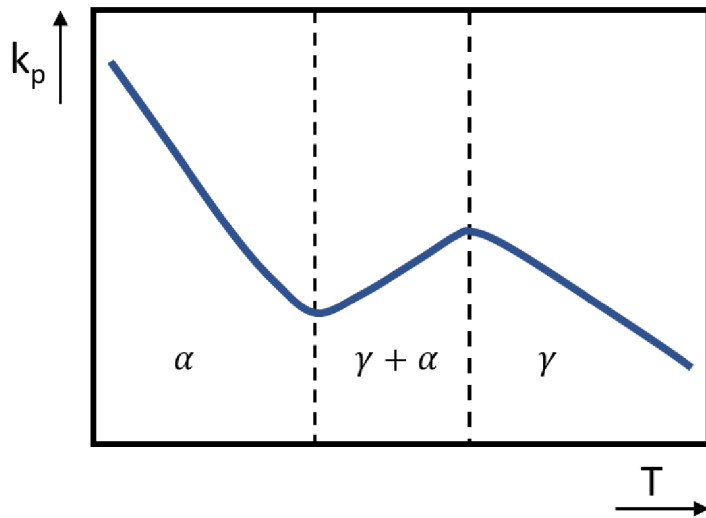
Kde M vyjadřuje metalurgický charakter kovu, kde T je teplota, ε je deformace a $\dot{\varepsilon}$ vyjadřuje deformační rychlost. Tyto veličiny jsou hlavní veličiny ovlivňující přirozený deformační odpor. [2]

2.2.3.1 Metalurgický charakter kovu M

Jedná se o chemické složení, strukturu a čistotu daného kovu. Čisté kovy mají nejnižší k_p . Těžké kovy a intersticiálně rozpuštěné prvky a dále precipitáty karbonitridů výrazně zvyšují k_p . U struktury kovů má hlavní vliv na přirozený přetvárný odpor počet skluzových systémů daného materiálu. *V závislosti na strukturním stavu se k_p zvyšuje v tomto daném pořadí: ferit → nelegovaný austenit → dvoufázová struktura → struktura s výskytem heterogenních útvarů.* Dále čím jsou menší zrna, tím je větší hodnota k_p . [2]

2.2.3.2 Tvářecí teplota T

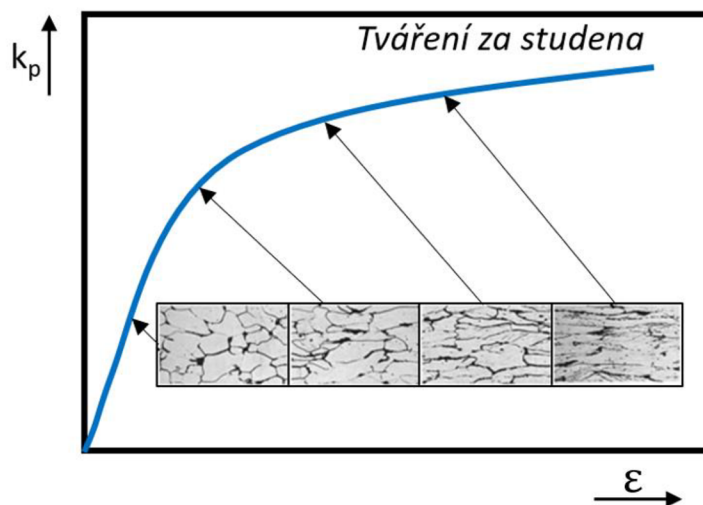
Vlivem vzrůstající teploty klesá přirozený deformační odpor (Obr. 24). [2]



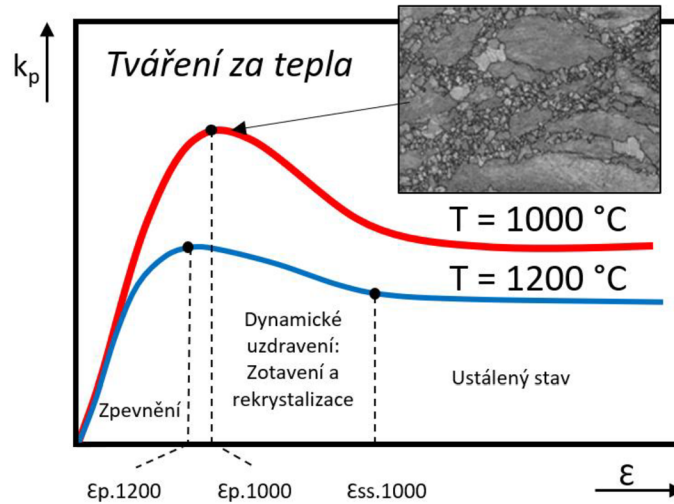
Obr. 24 Závislost přirozeného deformačního odporu na teplotě [2]

2.2.3.3 Poměrná deformace „ ϵ “

Při zvyšující se plastické deformaci dochází ke zvýšení hustoty dislokací. Dislokace se začínají vzájemně prolínat a dostávají se na hranice zrn. Tímto vlivem dochází ke zpevnění materiálu. Při tváření za studena nedochází k uzdravovacím dějům. Proto má křivka napětí – deformace monotónní průběh (obr. 25). U tváření za tepla dochází k odpevňovacím procesům po překročení kritické deformace. Křivka napětí – deformace vykazuje pík (obr. 26). Kritická deformace pro počátek dynamické rekrystalizace se zmenšuje v závislosti na zvyšující se teplotě tváření a snižující se rychlosti deformace. [2]



Obr. 25 Závislost přirozeného deformačního odporu na deformaci při tváření za studena [2]



Obr. 26 Závislost přirozeného deformačního odporu na deformaci při tvářeni za tepla [2]

Na obr. 27 je ϵ_p píkóvá deformace a ϵ_{ss} je deformace při ustáleném stavu.

2.2.3.4 Deformační rychlost „ $\dot{\epsilon}$ “

Deformační rychlost se projevuje výrazně při vyšších teplotách. Větší deformační rychlost má za následek vyšší přírůstek přirozeného deformačního odporu. [2]

3. Experimentální část

Cílem experimentální části je stanovit závislost přetvárného odporu na teplotě tváření. Pro experiment byla zvolena konstrukční ocel s označením S550J2 (označení dle ČSN EN 10027). V experimentu bylo provedeno měření přetvárného odporu pro různé teploty. Výsledkem by měly být jednotlivé hodnoty přetvárného odporu pro dané zkoušené teploty. Dále pak závislost poklesu přetvárného odporu na zvyšující se teplotě. Pro experiment byla zvolena zkouška petchováním.

Následující přehled popisuje postup jednotlivých kroků zhotovených pro dosažení cíle bakalářské práce:

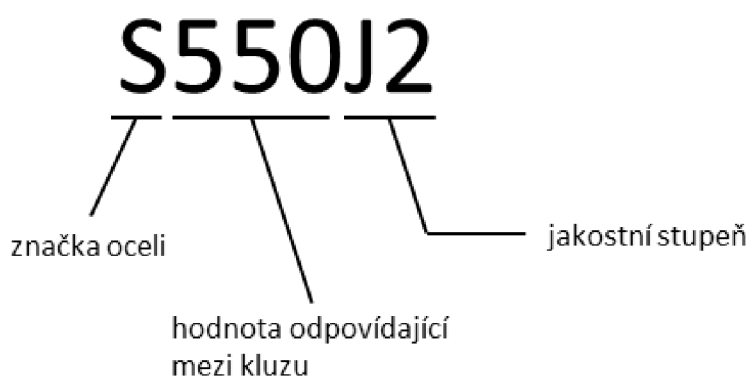
- 1) Volba teplotního intervalu zkoušeného materiálu. Byl zvolen teplotní interval v rozmezí 300-1100 °C. Postup teplot byl z důvodu velké časové náročnosti samotného měření zvolen po 200 °C. Přestože hodnoty deformačních odporů a dalších vlastností jsou pro standartní teplotu (23 °C) známy, byla provedena zkouška petchováním i pro pokojovou teplotu. Tzn. měření bylo provedeno pro teploty 23, 300, 500, 700, 900, 1100 °C.
- 2) Příprava zkušebních vzorků z tyčového polotovaru o kruhovém průřezu za pomoci pásové pily. Jako materiál byla použita konstrukční ocel s označením S550J2.
- 3) Provedení statické zkoušky tahem pro získání základních mechanických vlastností zkoušeného materiálu. Teoretické podklady ke zkoušce tahem jsou uvedeny v kapitole 3.1.2
- 4) Provedení zkoušky tlakem pro získání závislosti zatěžující síly na poměrném stlačení zkoušeného vzorku pro jednotlivé teploty. Závislost zatěžující síly na poměrném stlačení vzorku dále slouží pro určení průběhu přetvárného odporu. Pro každou teplotu bylo změřeno pět vzorků.
- 5) Určení průběhu přetvárných odporů pro jednotlivé teploty a následné grafické znázornění těchto průběhů. Dále pak výpočet středních hodnot přetvárných odporů pro jednotlivé teploty.
- 6) Vyhodnocení a porovnání získaných, ale i vypočtených dat ze zkoušky tlakem za účelem dosažení požadovaných cílů bakalářské práce.

3.1 Zkoušený materiál

Pro zkoušku byla zvolena konstrukční ocel S550J2. Pro zjištění jejích mechanických vlastností byla provedena zkouška tahem na trhacím stroji TIRA Test 2300.

3.1.1 Označování ocelí

Označováním ocelí se zabývá norma ČSN EN 10027. Tato norma má dvě části. První je ČSN EN 10027-1 (Systém označování ocelí – Část 1: Stavba značek oceli). Druhá je ČSN EN 1027-2 (Systém označování ocelí – Část 2: Systém číselného označování).



Obr. 27 Značení ocelí

Na prvním místě v označení na obr. 27 se nachází písmeno S. Toto písmeno udává, že se jedná o konstrukční ocel určenou pro ocelové konstrukce. Následuje trojčíslí, které udává horní mez kluzu v MPa. Poslední dvě pozice jsou určeny k údajům určujícím jakostní stupeň, nebo k údajům o tepelném zpracování dané oceli.

Další možná označení písmen na první pozici:

P = oceli pro tlakové nádoby a zařízení

E = oceli na strojní součásti

B = oceli pro výztuž do betonu

D = oceli na ploché výrobky k tváření za studena

atd.

Další možná označení písmen pozice na konci:

A = precipitačně vytvrzeno

M = termomechanicky válcováno

N = normalizačně žíháno nebo normalizačně válcováno

Q = zušlechtěno

C = se zvláštní tvářitelností za studena

D = pro žárové pokovování ponorem

F = pro kování

atd. [13, 14]

Z výše uvedených informací vyplývá, že se v tomto případě jedná o konstrukční ocel. Výroba, složení, chemické a mechanické vlastnosti, dále pak použití a další doprovázející informace jsou dány dle normy ČSN EN 10025 (Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí). Ocel S550J2 spadá přímo pod normu ČSN EN 10025-6 (Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 6: Technické dodací podmínky pro ploché výrobky z ocelí s vyšší mezí kluzu v zušlechtěném stavu). Hlavní použití této konstrukční oceli je výroba zušlechtěných plechů. Používá se jako materiál pro výrobu svařovaných, šroubovaných a nýtovaných konstrukcí, výhradně ve stavebním průmyslu v místech, kde je nutné použít ocel s vysokou mezí pevnosti. [15–19]

3.1.2 Zkouška tahem

Jedná se o mechanickou statickou zkoušku tzn. určuje vlastnosti materiálu při plynulém rostoucím zatížení. Zkušební těleso (kruhového nebo obdélníkového průřezu) je zatěžováno až do porušení. Z hlediska plasticity je dbán důraz na změnu meze kluzu jako výsledku zpevnění. Tato zkouška je dána normou ČSN EN ISO 6892-1. [1, 20–22]

Vlastnosti zjišťované zkouškou tahem:

- **Mez pevnosti v tahu R_m**

Je maximální možné napětí, které je materiál schopen vydržet bez porušení. [20]

- **Výrazná mez kluzu R_e**

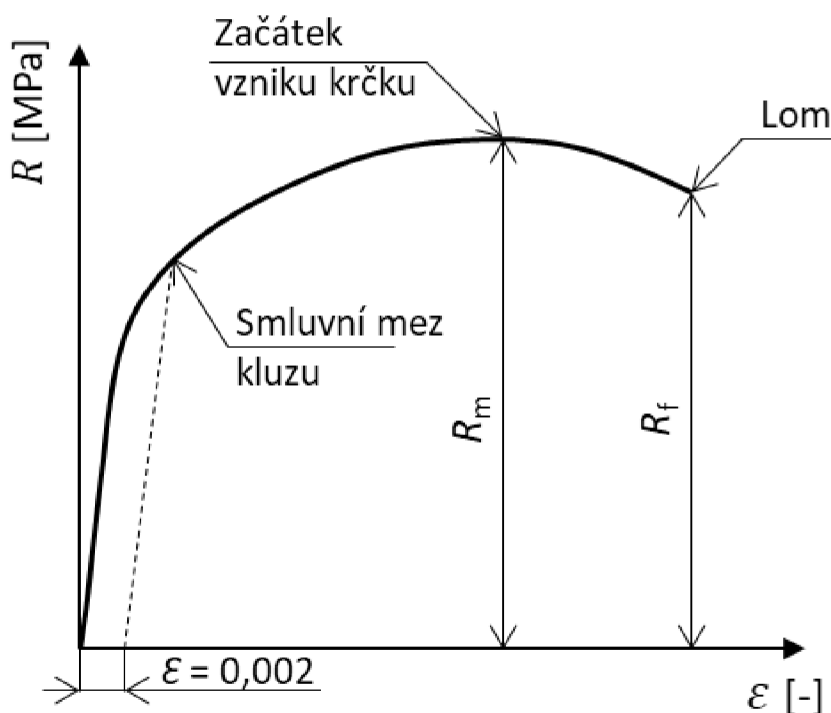
Jedná se o napětí, při kterém začínají vznikat plastické deformace. Za mez kluzu by mělo být považováno napětí, které odpovídá místu, kde se přímková část diagramu mění na nelineární křivku. Takto určená hodnota je závislá na citlivosti snímače. Z tohoto důvodu byla zavedena takzvaná smluvní mez kluzu. [20–22]

- **Tažnost A**

Jedná se o trvalé prodloužení v okamžiku, kdy dojde k přetržení zkušební tyče. [20]

- **Kontrakce Z**

Jedná se o poměrné trvalé zúžení průřezu tyče, ke kterému dojde po přetržení zkušebního vzorku. [20]



Obr. 28 Smluvní diagram napětí – deformace [21]

Smluvní veličiny:

- Smluvní napětí: $R = \frac{F}{S_0} [MPa]$ (3.1)

- Poměrná deformace: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [-]$ (3.2)

- Smluvní mez kluzu $R_{p0,2} [MPa]$

Je napětí v místě kde poměrná deformace dosáhne hodnoty 0,2 %.

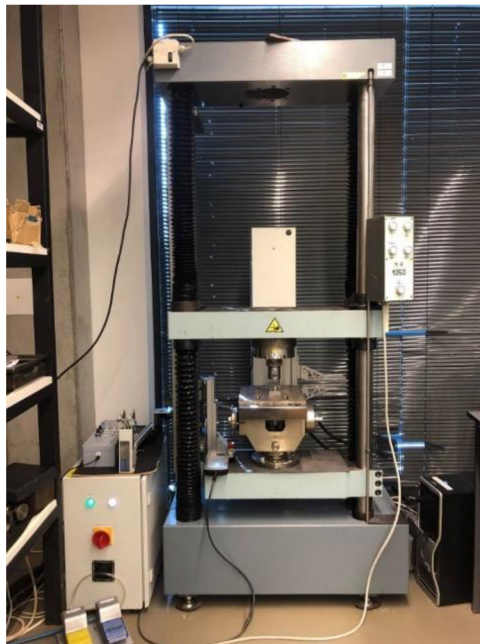
Výpočet tažnosti a kontrakce:

- Tažnost: $A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%]$ (3.3)

- Kontrakce: $Z = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100 [\%]$ (3.4)

3.1.2.1 Zjištění mechanických vlastností materiálu S550J2 zkouškou tahem

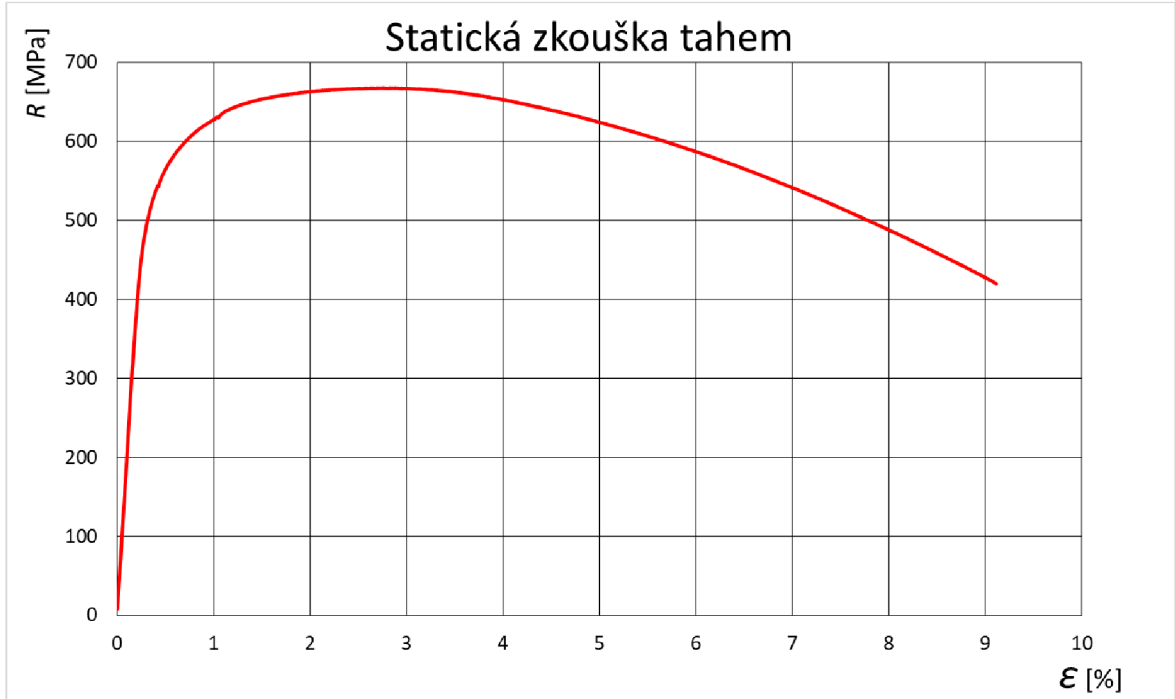
Pro určení základních mechanických vlastností materiálu za standardní teploty (RT) byla provedena zkouška tahem na trhačím stroji TIRA Test 2300 viz obr. 29. Zkouška byla provedena pro pět vzorků. Průběh zkoušky a následné vyhodnocení je provedeno a ukázáno na jednom z pěti vzorků. Pro zpracování naměřených dat z trhačeho stroje byl použit program LabNet. Tento program dokáže zaznamenat průběh zkoušky a následně vypracovat protokol o provedené zkoušce. V tomto protokolu jsou uvedeny průběhy jednotlivých zkoušek a základní mechanické vlastnosti materiálu, jako je například smluvní mez kluzu, mez pevnosti a tažnost. Protokol všech naměřených průběhů zkoušky je součástí přílohy bakalářské práce (Příloha 1).



Obr. 29 Trhačí stroj TIRA Test 2300 Zdroj: autor práce, 2021 (vlastní)

Výsledky zkoušky tahem:

Z naměřených dat byl vytvořen pracovní diagram tahové zkoušky (obr. 30). Následně byla určena smluvní mez kluzu, tažnost a mez pevnosti zkoušeného materiálu. Tyto získané hodnoty byly pro větší přehlednost zaneseny do tabulky (viz tab. 1).



Obr. 30 Graf zkoušky tahem konstrukční oceli S550J2

Tab. 1 Výsledné mechanické vlastnosti

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{40mm} [%]
S550J2	$575,7 \pm 4,8$	$683,6 \pm 4,7$	$2,4 \pm 0,1$	$8,9 \pm 0,2$

3.2 Zkouška pëchováním

Zkouška pëchováním za pokojové teploty byla rovněž provedena na trhačím stroji TIRA Test 2300. Pro vyšší teploty byla zkouška pëchováním provedena na stroji TESTOMETRIC FS100CT s tepelnou komorou SOP 40x200/140. Zkouška spočívá v zatěžování zkušebního vzorku tlakovou silou dle předem nastavené definice průběhu zkoušky, tak jak bude uvedeno dále. Pro zkoušky byly nařezány válečky z tyče průměru 10 mm s tolerancí h9 (skutečný naměřený rozměr tyče stanovený z pěti měření byl $9,98 \pm 0,012$). Tyto válečky byly nařezány na pásové pile a následně u nich byla zarovnána čela na soustruhu z důvodu požadavku na co nejvyšší rovnoběžnost čelních ploch. U řezaných válečků byla snaha docílit výšky 22 mm. Vlivem zarovnávaní čela se část

materiálu ztrácí, dochází ke změně délky zkušební vzorku. Proto byly jednotlivé válečky měřeny před každou zkouškou a jejich reálná hodnota byla zadávána do softwaru.

TESTOMETRIC FS100CT

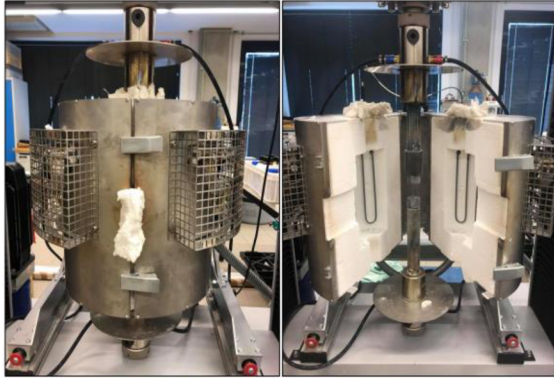
Jedná se o dvou-sloupový univerzální zkušební trhací stroj. Na tomto stroji lze provádět zkoušky pevnosti materiálu v tahu, tlaku a ohybu se zatížením maximálně do 100 kN. Obsahuje plně digitální zkušební systém s vysokou přesností. Jako řídicí software je využíván program LabNet v.4, který podporuje specifikace mezinárodních norem jako jsou např. normy ISO, EN a zároveň národních norem včetně české normy.



Obr. 31 Trhací stroj TESTOMETRIC FS100CT Zdroj: autor práce, 2021 (vlastní)

Tepelná komora SOP 40x200/140

Jde o vertikální vysokoteplotní dělenou pec s výhřevem až do 1400 °C. Tato pec je řízena PID regulátorem. Fotka regulátoru a jeho štítkových údajů je vyobrazena na obr. 34 a 35.



Obr. 32 Tepelná komora SOP 40x200/140

Zdroj: autor práce, 2021 (vlastní)

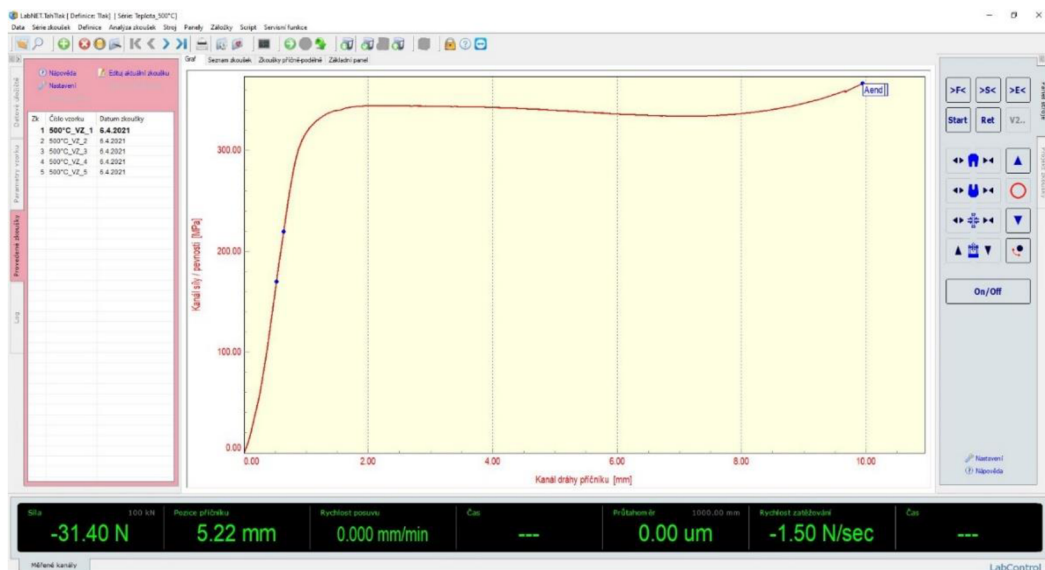


Obr. 33 Regulátor teploty a jeho štítkové údaje

Zdroj: autor práce, 2021 (vlastní)

Příprava stroje

Při zkoušce za pokojové teploty na trhacím stroji TIRA Test 2300 byl nejprve zapnut trhací stroj a PC s požadovaným softwarem. V tomto softwaru byly nastaveny definice zkoušky. Pro zkoušku za vyšších teplot na TESTOMETRIC FS100CT s tepelnou komorou došlo k zapnutí stroje, PC s požadovaným softwarem a k zapnutí tepelné komory. Teplota v tepelné komoře je řízena digitálním PID regulátorem. Na tomto regulátoru byly nastavovány příslušné hodnoty teplot pro jednotlivé zkoušky.



Obr. 34 Ukázka programu LabNet

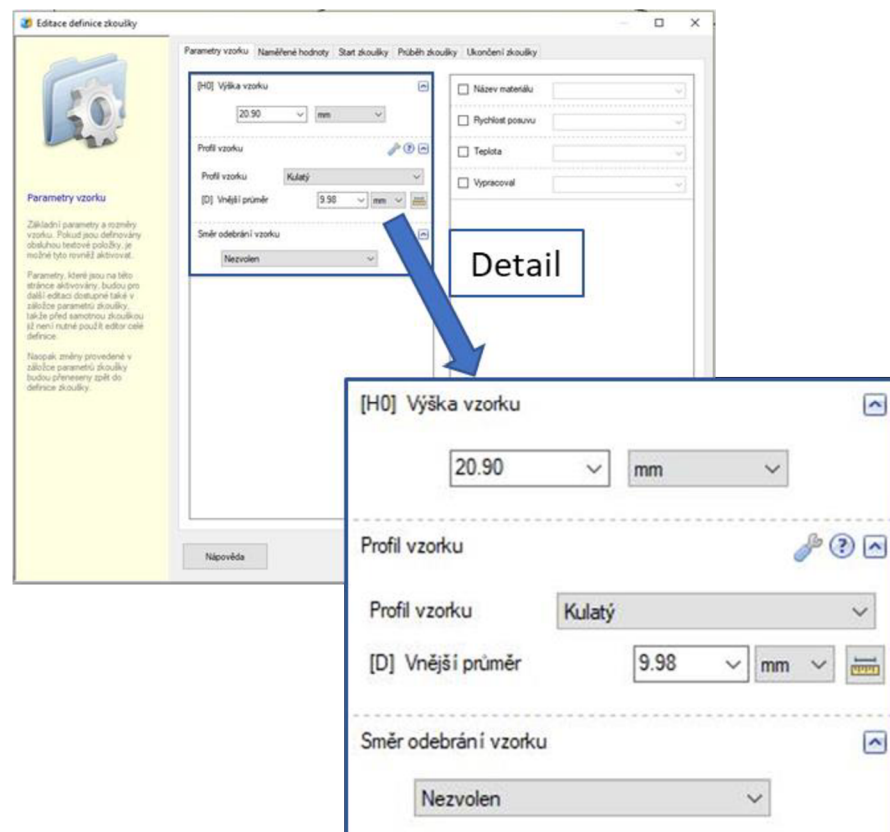
Na obr. 31 lze vidět prostředí programu LabNet v.4. V levé části obrazovky se nachází záložka provedené zkoušky (viz obr. 31). V této záložce se nachází seznam všech již provedených zkoušek. Dále je zde možno najít záložku parametry vzorku, která udává informace o rozměrech právě zkoušeného vzorku. Spodní lišta znázorňuje měřené kanály. Zde se nachází jednotlivé definice zkoušky. Dále je zde kanál znázorňující sílu, který udává, jakou silou právě působí stroj na zkoušený materiál. Na obr. 31 lze vidět přímo průběh zkoušky. K jeho vykreslování dochází postupně během průběhu samotné zkoušky.

Definice zkoušky

Pro zpracování dat ze stroje byl použit software LabNet v.4. V tomto programu byly zadány definice jednotlivých zkoušek.

1. Parametry vzorku

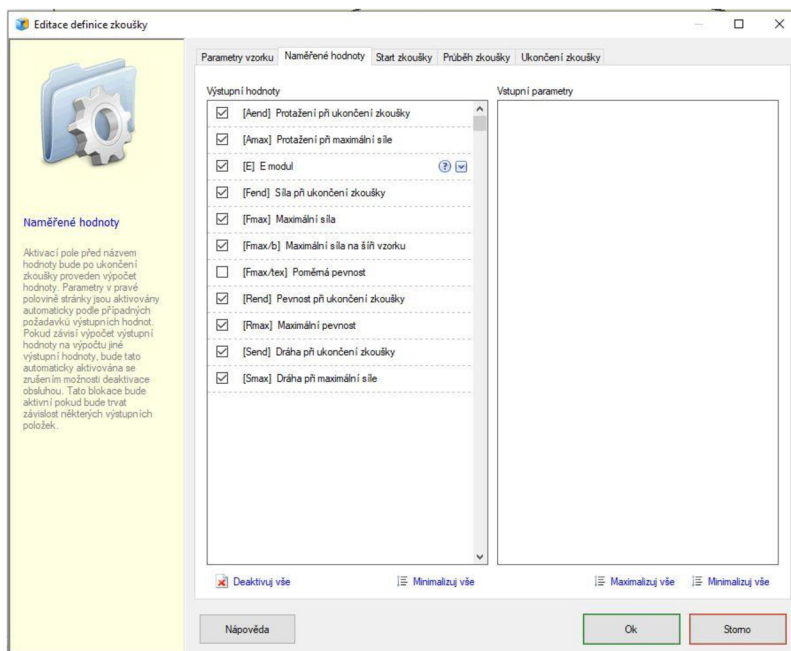
Do této části byl zadán profil vzorku, a to na kulatý (viz obr. 35) a následně byly zadávány výšky jednotlivých vzorků H_0 pro určitou zkoušku.



Obr. 35 Ukázka nastavení parametrů vzorku

2. Naměřené hodnoty

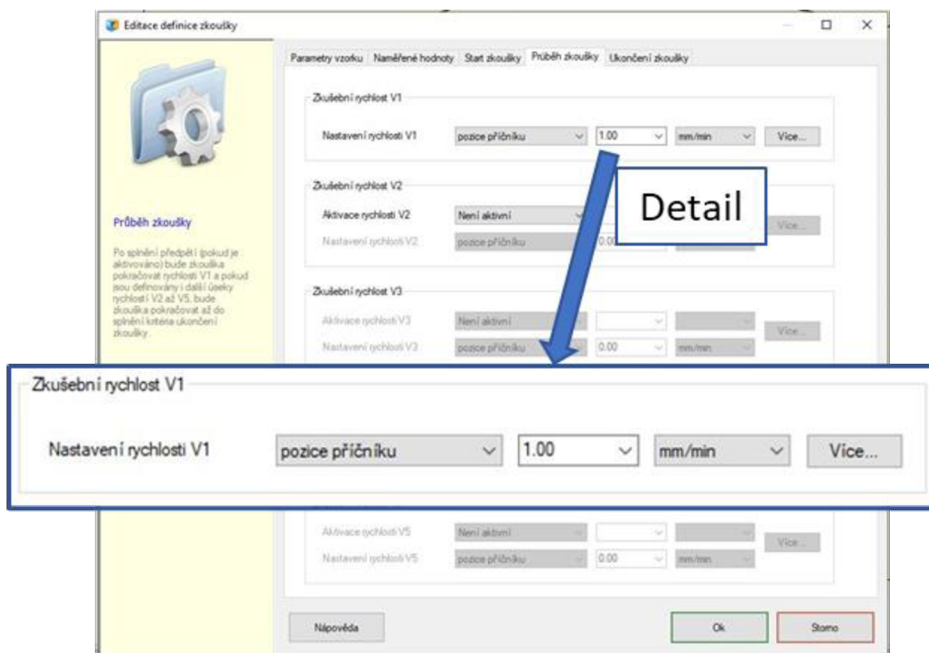
V této části je možné vybrat hodnoty, které mají být změřeny. Pro potřebu této bakalářské práce je nutné znát pouze záznam síly.



Obr. 36 Ukázka výběru měřených hodnot

3. Zahájení zkoušky

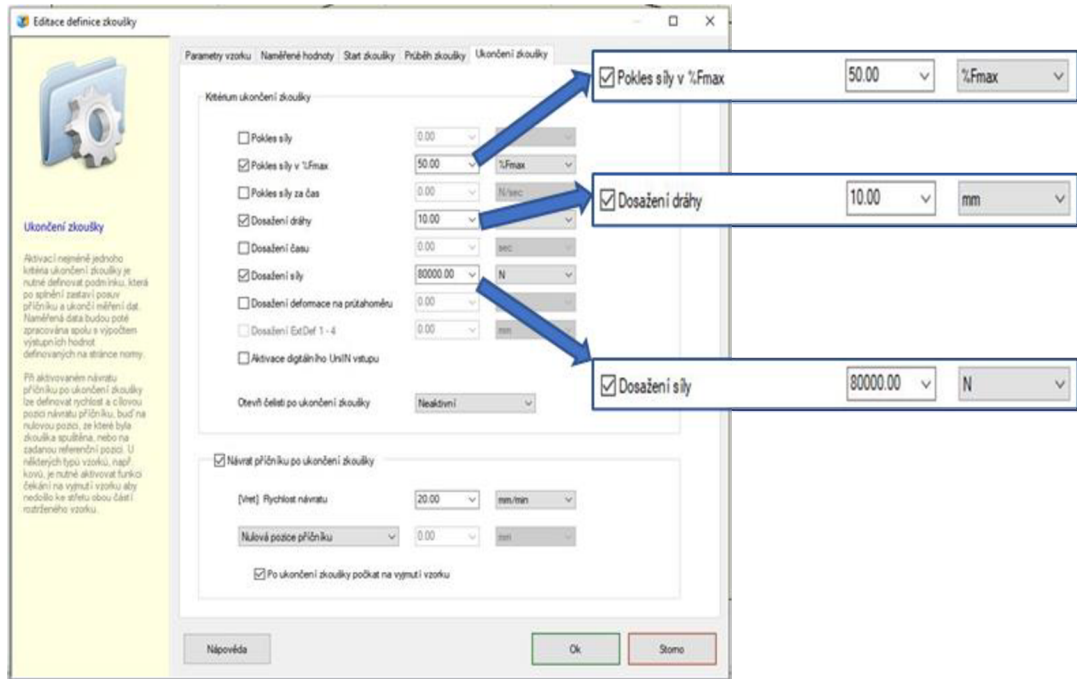
Pro zahájení zkoušky bylo nastaveno předpětí 500 N, tzn. nejprve dojde k nárustu síly z 0 na 500 N, následuje dvě sekundy prodleva a poté začne zkouška pěchováním předem stanovenou rychlostí posuvu příčnicku stroje 1 mm/min.



Obr. 37 Ukázka definice průběhu zkoušky

4. Ukončení zkoušky

V této části se nastavují kritéria, při kterých má být zkouška ukončena. Nastaven byl pokles zatěžující síly o 50 %, které vyjadřuje kritérium ukončení testu při porušení vzorku, dále dosažení dráhy 10 mm (vyjadřuje kritérium stlačení vzorku na cca poloviční výšku vzorku) a dosažení maximální síly 80 kN. Tato síla je tzv. bezpečnostní kritérium, které zabraňuje přetížení siloměrného snímače.



Obr. 38 Ukázka definice ukončení zkoušky

3.2.1 Samotný průběh měření

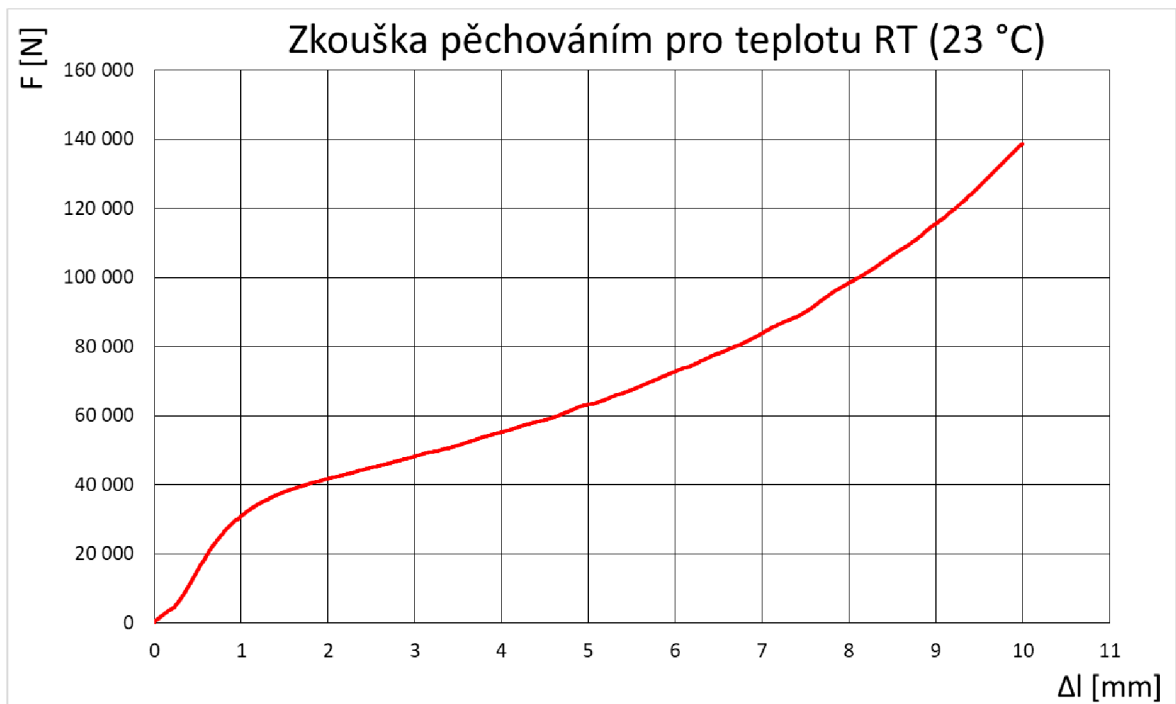
Měření probíhalo postupně podle jednotlivých teplot. Měření pro pokojovou teplotu (23 °C) bylo provedeno na trhacím stroji TIRA Test 2300, ostatní zkoušky za vyšších teplot byly provedeny na trhacím stroji TESTOMETRIC FS100CT s tepelnou komorou. Průběh zkoušky za pokojové teploty je v podstatě stejný jako průběh zkoušky za vyšších teplot, pouze je proveden na stroji bez tepelné komory. Zkoušení za vyšších teplot probíhalo následovně. Nejprve byla otevřena tepelná komora. Následovalo uložení vzorku na spodní upínací čelisti trhacího stroje. Upínací čelist s plochým čelem byla nastavena ve vzdálenosti cca 1-2 mm nad zkušebním vzorkem. Dále byl vzorek namazán, aby se co nejvíce zamezilo tvorbě soudečkovitosti, kterou je možno následně při určování přetvárného odporu zanedbat. Po uzavření tepelné komory byla nastavena počáteční teplota 300 °C. Samotný ohřev na požadovanou teplotu 300 °C trval asi 20 minut. Po dosažení teploty 300 °C následovala prodleva cca 15 minut z důvodu úplného prohřátí v celém

průřezu vzorku. Po této prodlevě byl spuštěn průběh zkoušky tlačítkem start v programu LabNet. Konec zkoušky nastal po dosažení jednoho z parametrů, nastavených v definici ukončení zkoušky. Zkoušky byly prováděny pro teploty 300, 500, 700, 900, 1100 °C. Zkoušky pro ostatní teploty vzorků byly prováděny analogicky, jako zkouška za teploty 300 °C. Průběh zkoušky byl časově velice náročný, protože ohřev na finální teplotu 1100 °C trval několik hodin. Pro každou jednotlivou teplotu bylo zkoušeno pět vzorků. Níže uvedené grafy (obr. 40-45) jsou uvedeny jako ukázka pro jeden vzorek za dané teploty. Grafy zkoušek za určité teploty pro ostatní vzorky jsou uvedeny v přílohách. Na obr. 39 je vyobrazen průběh zkoušky pro pokojovou teplotu na trhacím stroji TIRA Test 2300.

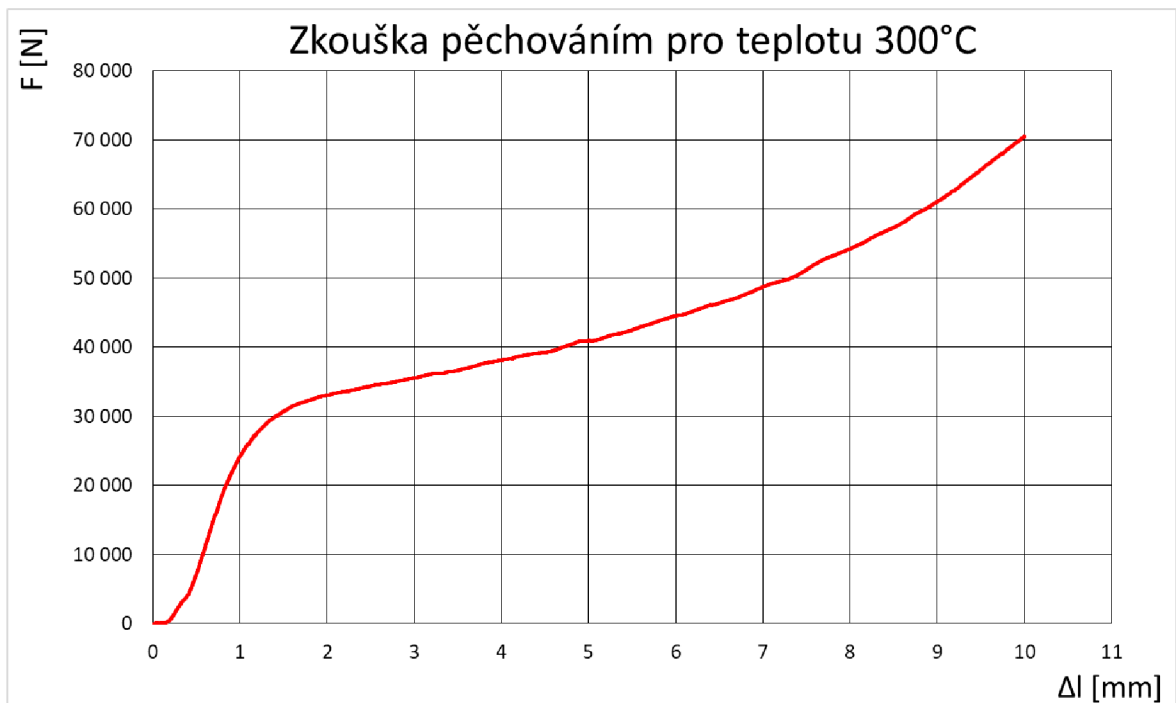


Obr. 39 Průběh zkoušky za teploty RT (23 °C) Zdroj: autor práce, 2021 (vlastní)

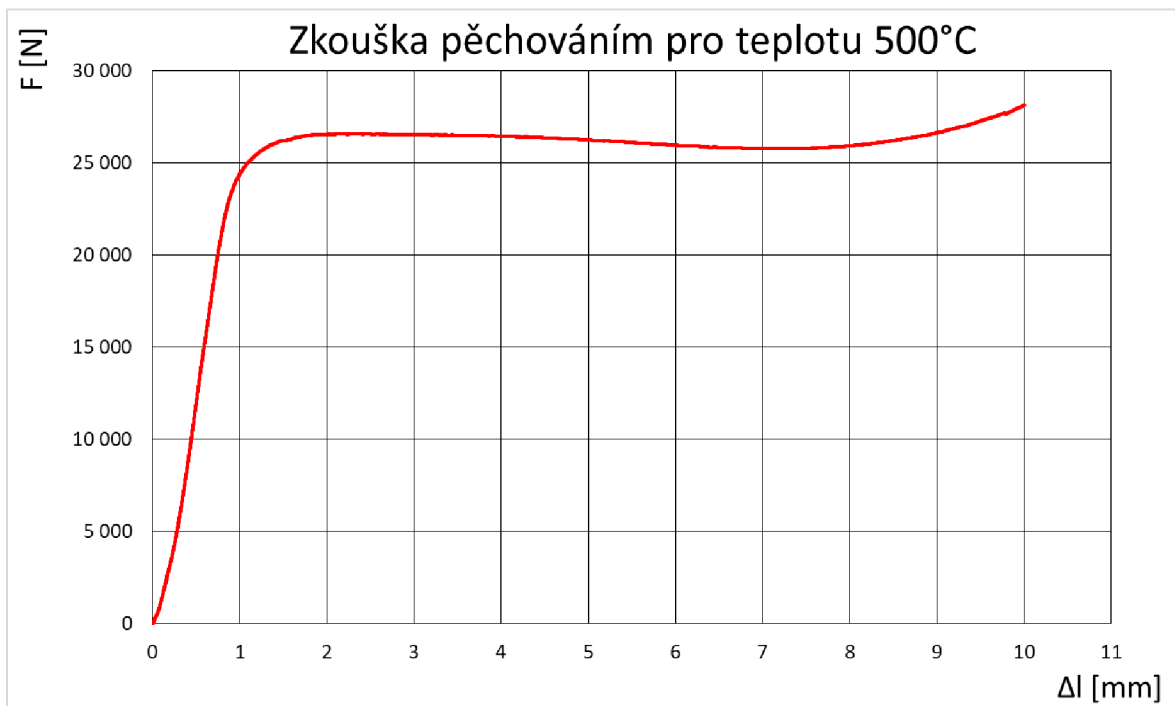
Získané průběhy zkoušek pro jednotlivé teploty:



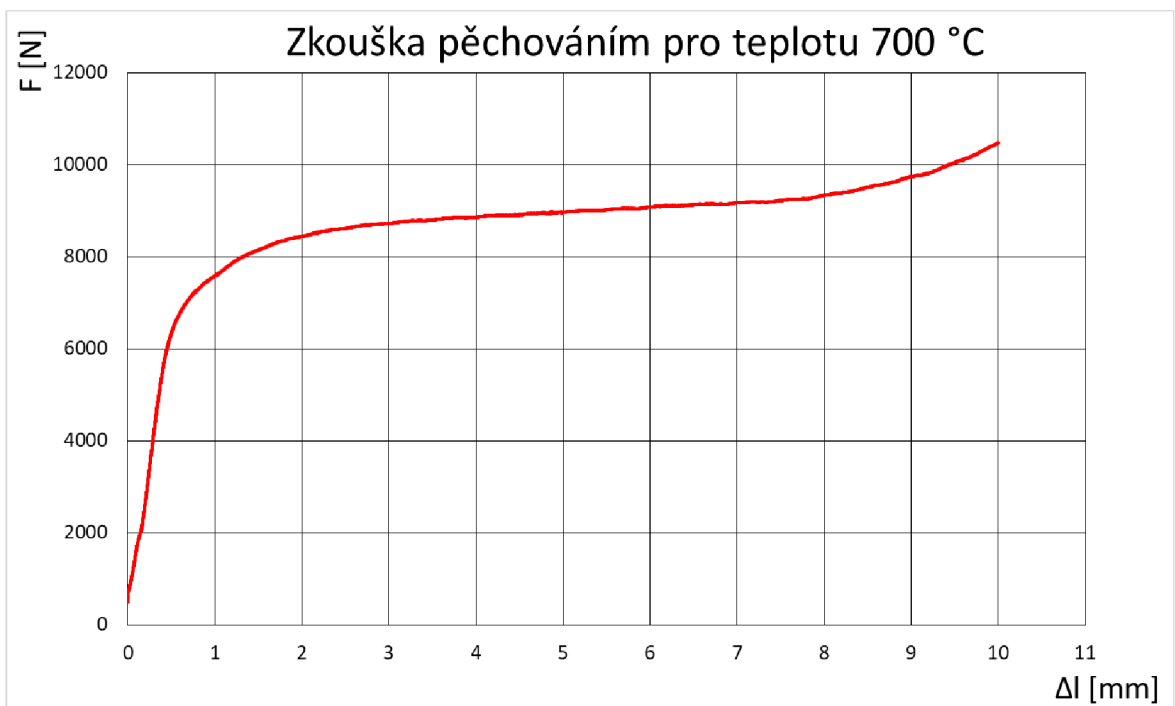
Obr. 40 Charakteristický průběh zkoušky pro teplotu RT (23 °C)



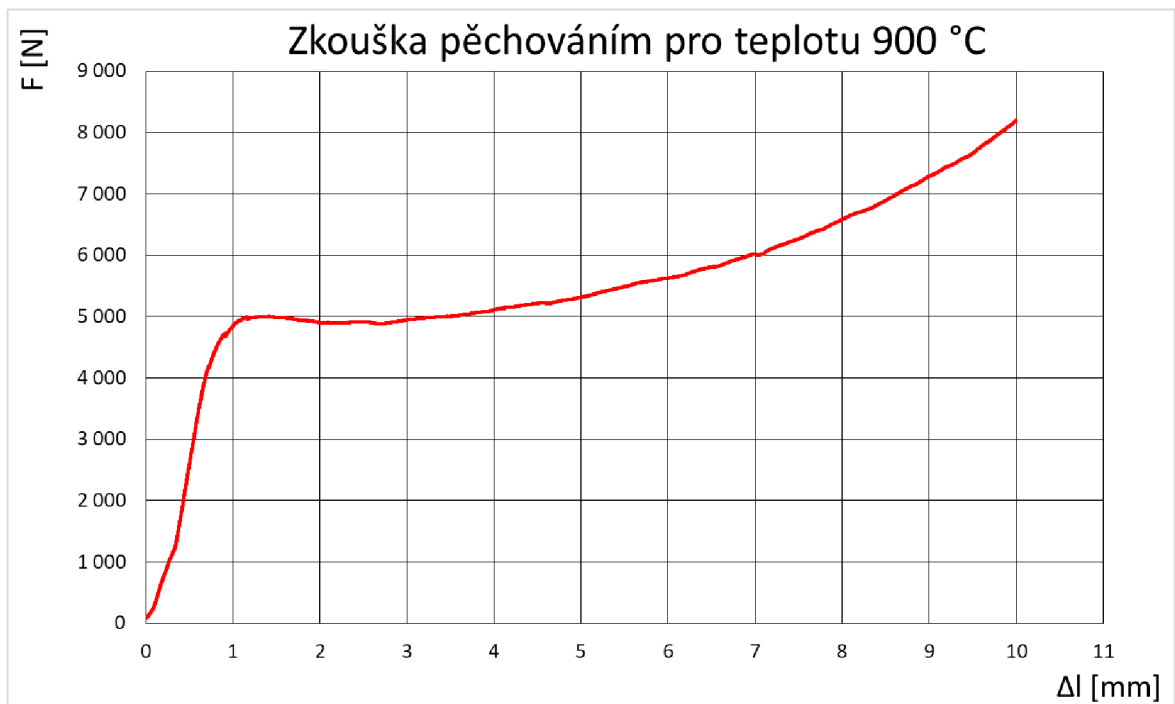
Obr. 41 Charakteristický průběh zkoušky pro teplotu 300 °C



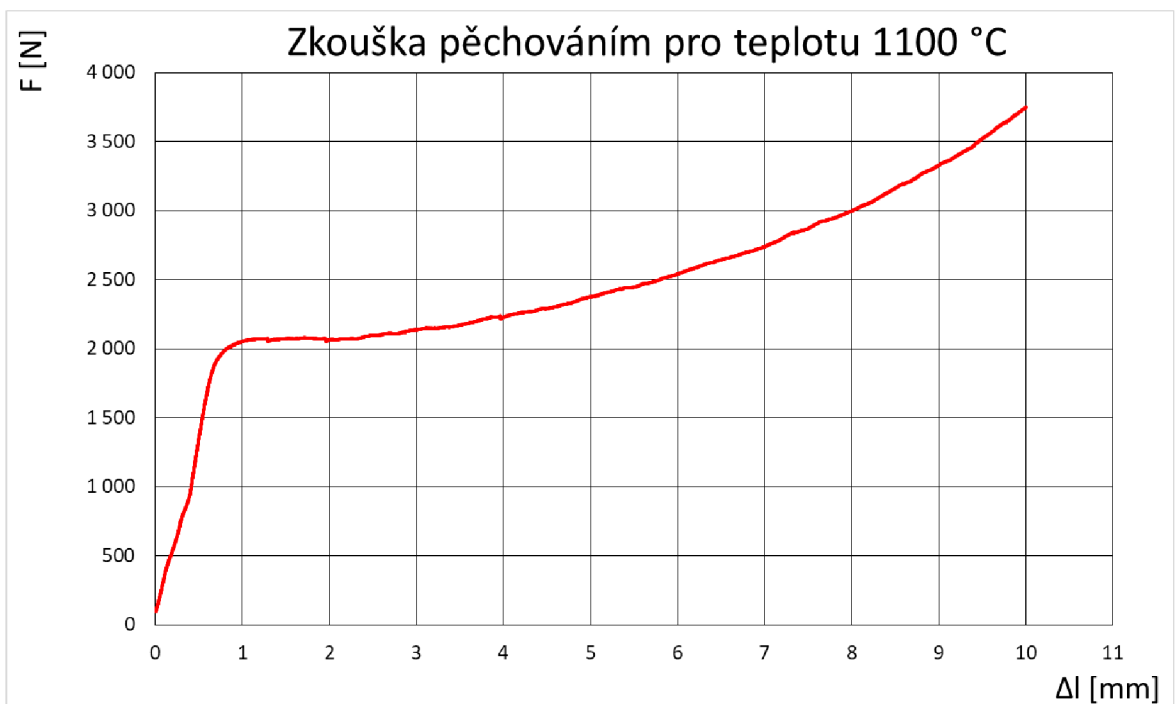
Obr. 42 Charakteristický průběh zkoušky pro teplotu 500 °C



Obr. 43 Charakteristický průběh zkoušky pro teplotu 700 °C

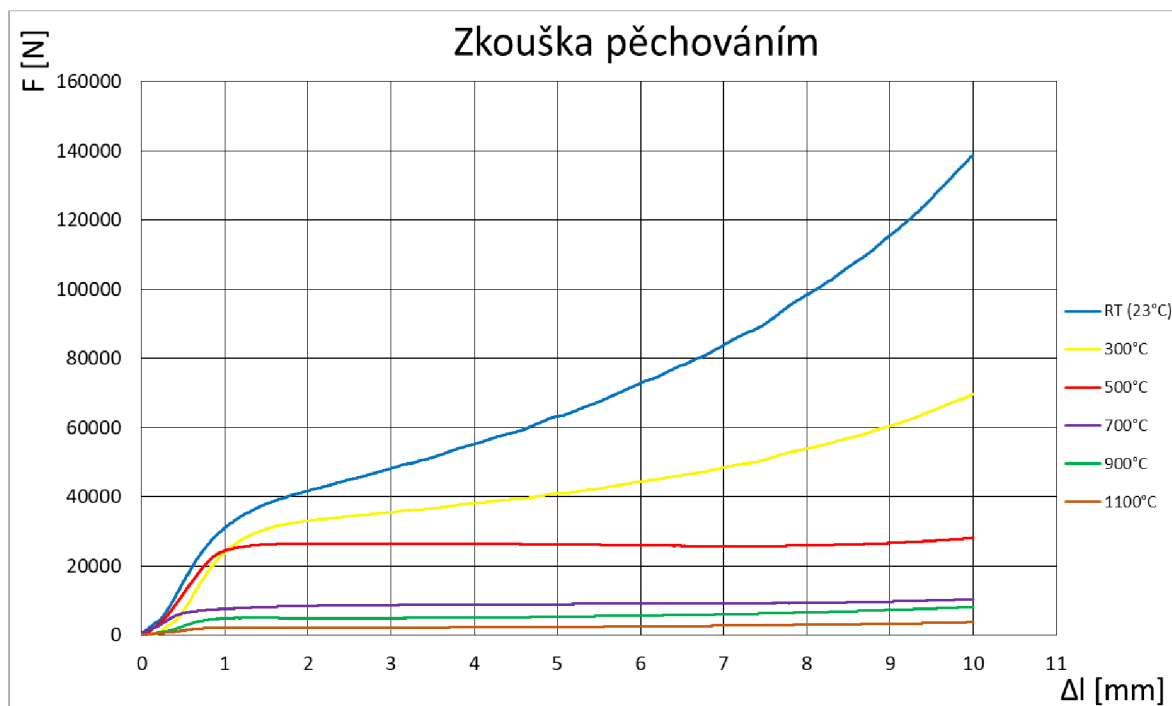


Obr. 44 Charakteristický průběh zkoušky pro teplotu 900 °C



Obr. 45 Charakteristický průběh zkoušky pro teplotu 1100 °C

Sestaven byl také graf znázorňující průběhy všech jednotlivých zkoušek. Graf (obr. 47) slouží jako porovnávací graf mezi jednotlivými provedenými zkouškami. Z grafu je patrný rozdíl průběhu jednotlivých zkoušek pro určité teploty.



Obr. 46 Charakteristické průběhy jednotlivých zkoušek pro určité teploty

V grafu (obr. 47) kde jsou uvedeny všechny průběhy měření za určitých teplot, můžeme pozorovat jednotlivé odlišnosti měření při zvyšující se teplotě. Z grafu (obr. 47) je patrné, že velikost maximální zatěžující síly pro zvyšující se teplotu rapidně klesá. Lze také pozorovat, že tvary průběhu jednotlivých zkoušek se od sebe liší. Dále můžeme vidět, že meze kluzu je dosaženo velmi rychle. Následuje dlouhý nárůst zatěžující síly až do ukončení zkoušky pēchováním. Ukončení nastane při dosažení jedné z předem stanovených definic konce zkoušky.

3.2.2 Vyhodnocení dat

Data získaná zkouškou pēchováním byla vyexportována a pro další práci uložena do ASCII formátu (.csv). Vyhodnocování jednotlivých zkoušek a tvorba grafů byla provedena v programu Microsoft EXCEL. Dále byly z programu LabNet vygenerovány protokoly o měření příslušných zkoušek, které jsou uvedeny v přílohách. V těchto protokolech jsou uvedeny základní informace o zkoušeném vzorku, dále pak výstupní hodnoty jako je maximální napětí v tlaku a také výsledný pracovní diagram tlakové zkoušky (síla – poměrné stlačení).

Pro potřebu vyhodnocení přetvárného odporu jsou z naměřených hodnot nejdůležitější dvě veličiny, a to zatěžující síla a poměrné stlačení zkoušeného válečku. Z těchto dvou veličin lze následně určit všechny ostatní potřebné veličiny k určení průběhu přetvárného odporu. Pro získání grafu přetvárného odporu je nutné nejprve určit přetvárný odpor v jednotlivých naměřených bodech zkoušky. Přetvárný odpor lze určit jako poměr síly k ploše zkoušeného vzorku viz rovnice 3.5. Jelikož se síla i plocha při probíhající zkoušce mění, je nutné z naměřených dat

v jednotlivých bodech určit přetvárný odpor a následně průběh přetvárného odporu vykreslit v grafu. Určení síly není nijak náročné, protože průběh síly a jednotlivé hodnoty v bodech jsou určeny přímo zkouškou tlakem. Pro získání plochy S rozšiřujícího se zkušební vzorku se vychází ze zákona zachování objemu (viz rovnice 3.6, 3.7), ze kterého lze určit průměr rozšiřujícího se vzorku v jednotlivých bodech zkoušky. Vzhledem k zanedbání soudečkovitosti vzorků je uvažován válcový tvar vzorku i po jeho deformaci. Následně lze vypočítat plochu rozšiřujícího se vzorku pro každý bod zkoušky viz rovnice 3.8. Ze získaných hodnot k_o lze následně sestavit diagram $k_o - \Delta L$.

Přetvárný odpor pro jednotlivé body zkoušky:

$$k_o = \frac{F}{S} \quad (3.5)$$

F ... zatěžující síla

S ... plocha průřezu zkoušeného vzorku

Zákon zachování objemu:

$$V_0 = V \quad (3.6)$$

$$\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot H_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \quad (3.7)$$

D_0 ... průměr zkušební vzorku před zkouškou

D ... průměr zkušební vzorku v průběhu zkoušky

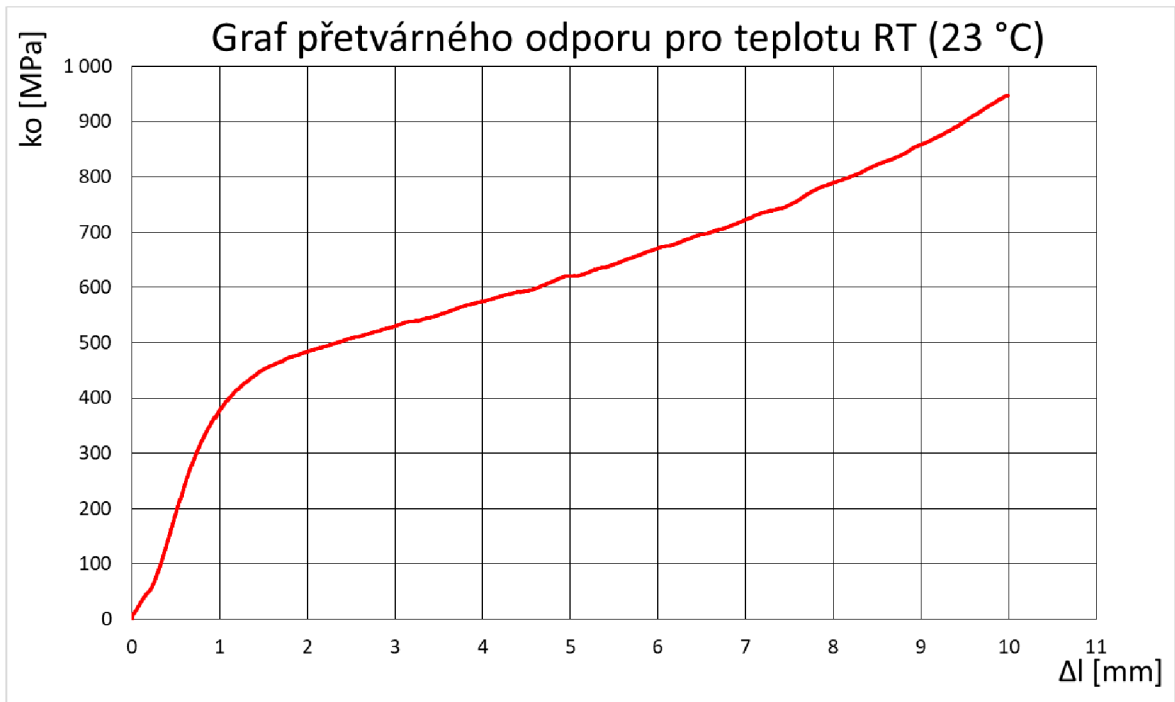
H_0 ... výška zkušební vzorku před zkouškou

H ... výška zkušební vzorku v průběhu zkoušky

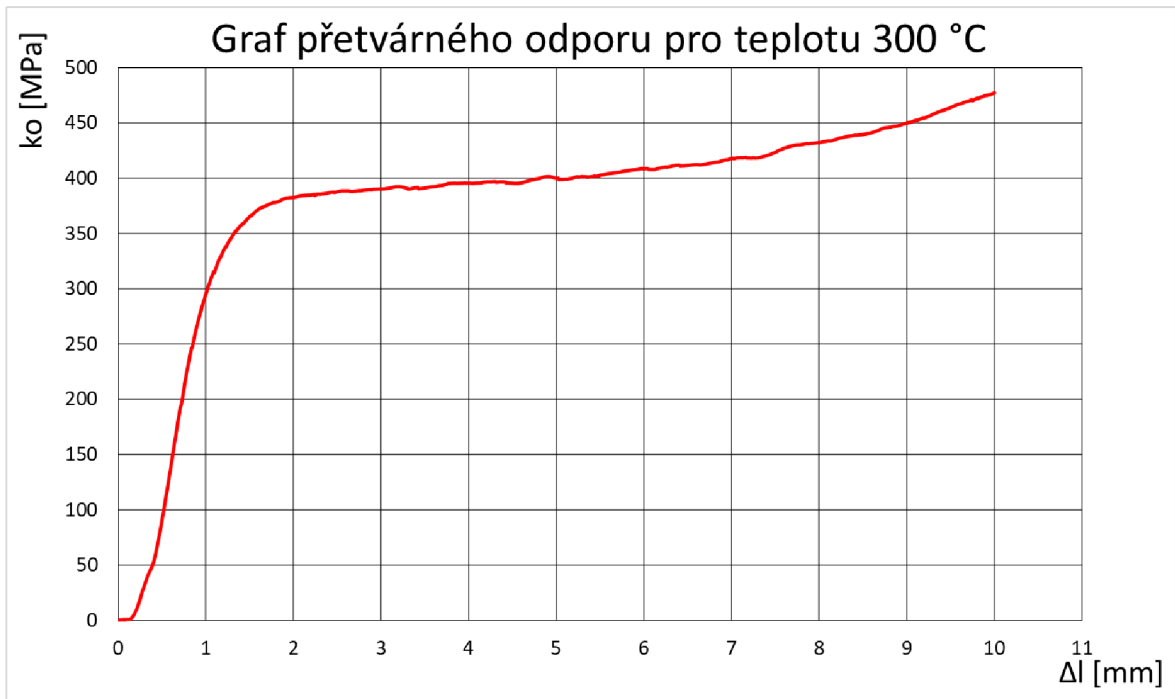
Plocha kruhu:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.8)$$

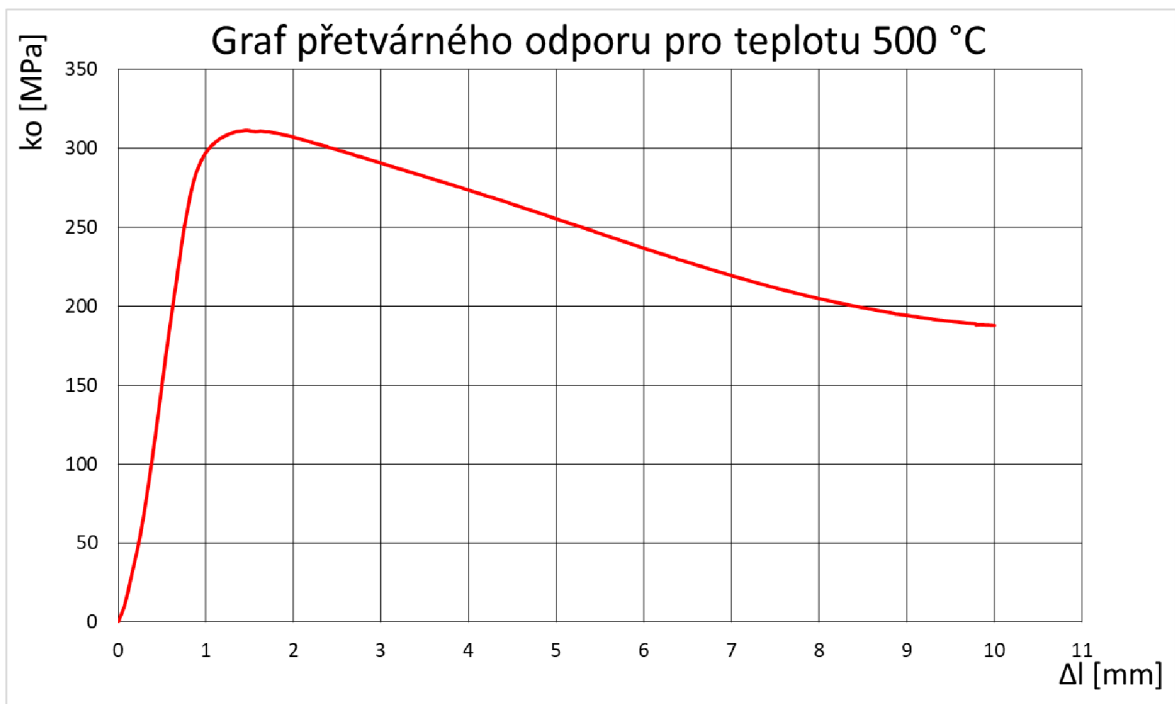
Průběhy přetvárných odporů pro jednotlivé teploty:



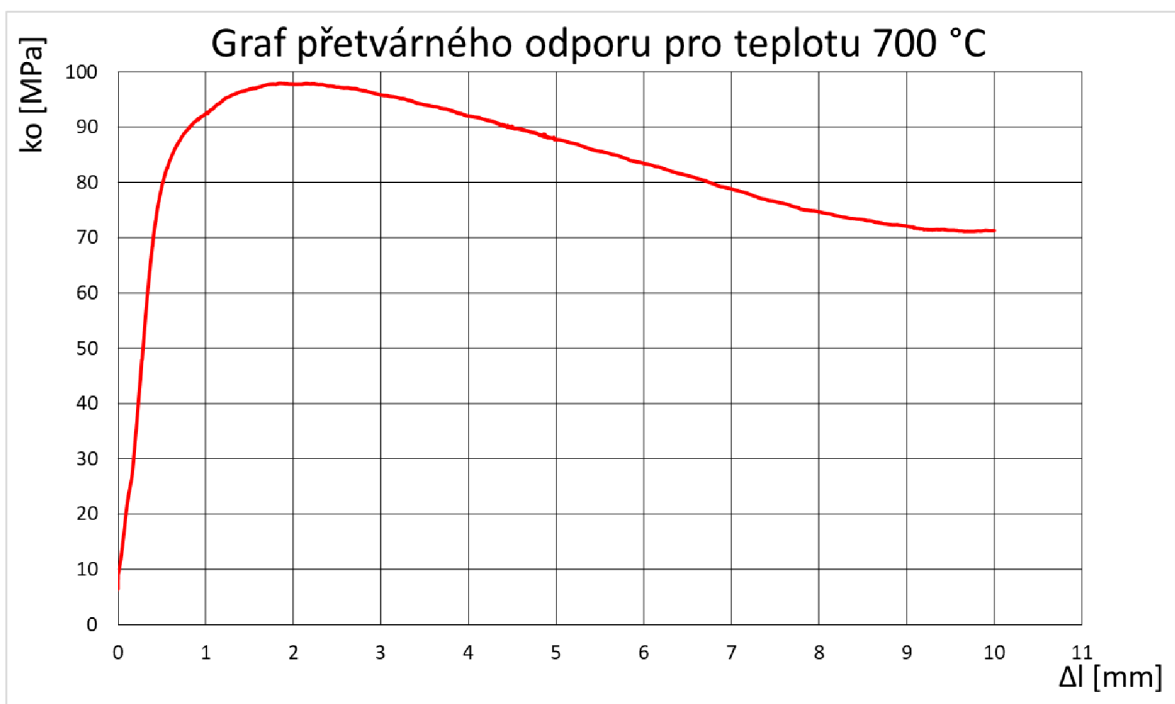
Obr. 47 Charakteristický průběh přetvárného odporu pro teplotu RT



Obr. 48 Charakteristický průběh přetvárného odporu pro teplotu 300 °C



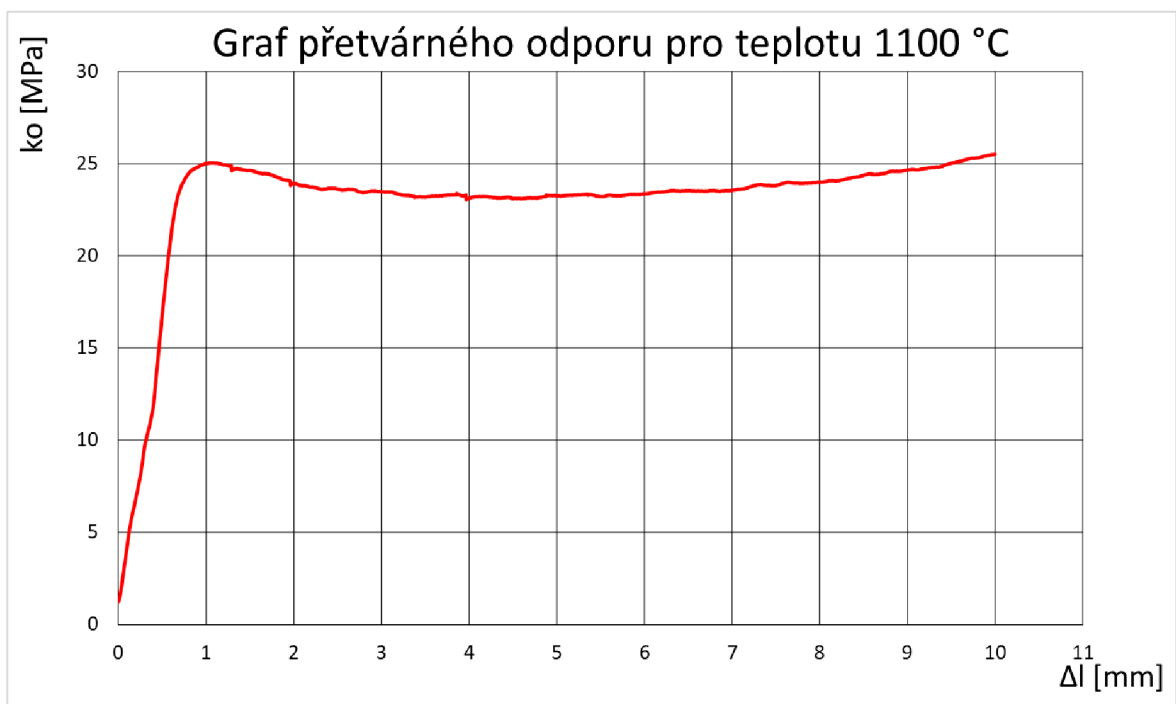
Obr. 49 Charakteristický průběh přetvárného odporu pro teplotu 500 °C



Obr. 50 Charakteristický průběh přetvárného odporu pro teplotu 700 °C



Obr. 51 Charakteristický průběh přetvárného odporu pro teplotu 900 °C

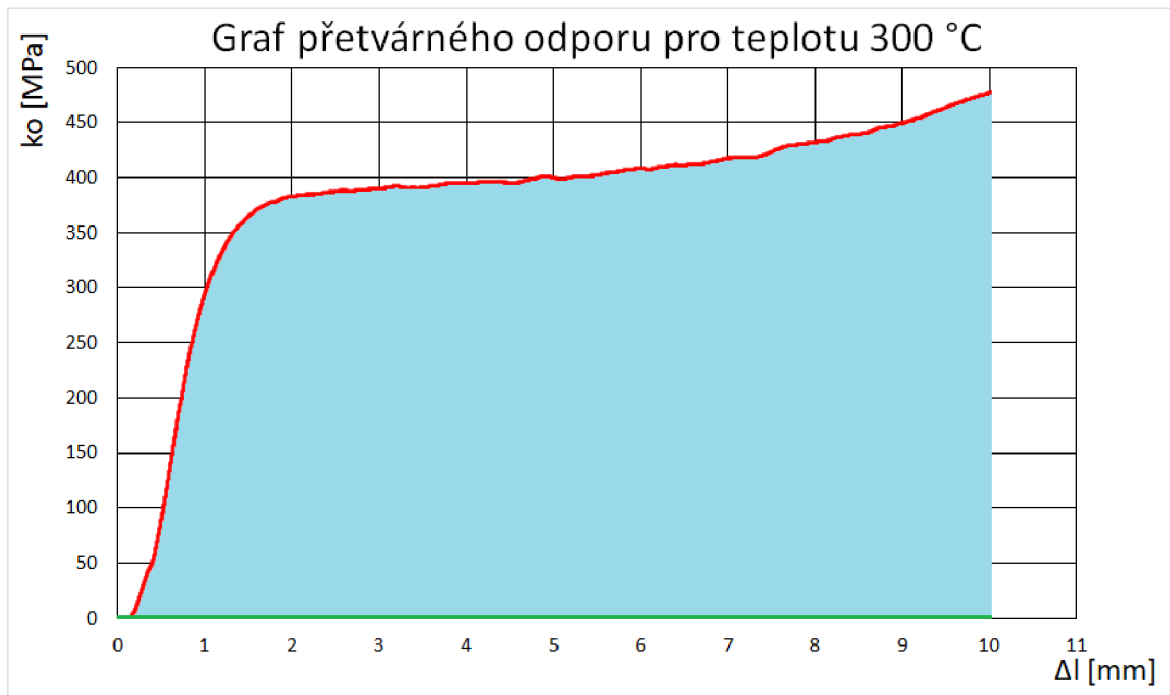


Obr. 52 Charakteristický průběh přetvárného odporu pro teplotu 1100 °C

Z výše uvedených grafů (obr. 47-52) lze porovnat odlišnost průběhů přetvárného odporu při jednotlivých teplotách. Dále lze pozorovat, že maximální hodnoty přetvárného odporu pro jednotlivé zkoušky se při zvyšující se teplotě snižují. Rozdíl maximálních hodnot přetvárných odporů mezi nejnižší teplotou (23 °C) a nejvyšší teplotou (1100 °C) je velmi výrazný. Pokud hodnoty maximálních přetvárných odporů pro tyto dvě teploty porovnáme, vyjde nám rozdíl cca 600 MPa. Dále je vidět, že se i tvary křivek jednotlivých průběhů přetvárného odporu pro různé teploty od sebe liší. Nyní lze u výše uvedených grafů (obr. 47-52) určit celkový přetvárný odpor (střední hodnota průběhu přetvárného odporu) k_{os} . Tento odpor se dá zjednodušeně určit jako plocha pod křivkou příslušného průběhu zkoušky, vydělená proběhlou dráhou.

Ukázka výpočtu přetvárného odporu k_{os} :

Ukázka výpočtu je provedena pro zkoušku za teploty 300 °C. Jedná se o vzorek měřený při druhé zkoušce. Jelikož výsledný přetvárný odpor lze určit jako plochu pod křivkou, dělenou proběhlou dráhou viz rovnice 3.9, je nejprve nutné určit plochu pod křivkou. Tu lze určit integrací výsledné křivky průběhu přetvárného odporu. Pro numerický výpočet požadované plochy pod křivkou bylo použito obdélníkové pravidlo.



Obr. 53 Graf přetvárného odporu pro teplotu okolí

Vztah pro určení výsledného přetvárného odporu:

$$k_{os} = \frac{S_x}{l} \quad (3.9)$$

Kde: S_x ...výsledná plocha pod křivkou

l ... výsledná dosažená dráha

Hodnoty přetvárného odporu:

Jelikož pro každou teplotu bylo změřeno pět vzorků, je výsledná hodnota přetvárného odporu rovna aritmetickému průměru (viz rovnice 3.10) všech přetvárných odporů jednotlivých vzorků. Z důvodu rozdílných výsledných hodnot přetvárného odporu je nutné určit směrodatnou odchylku, která určuje rozmezí vypočtených hodnot pro jednotlivá měření. Směrodatná odchylka se určí ze vztahu 3.11.

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.10)$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{1-n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.11)$$

Kde:

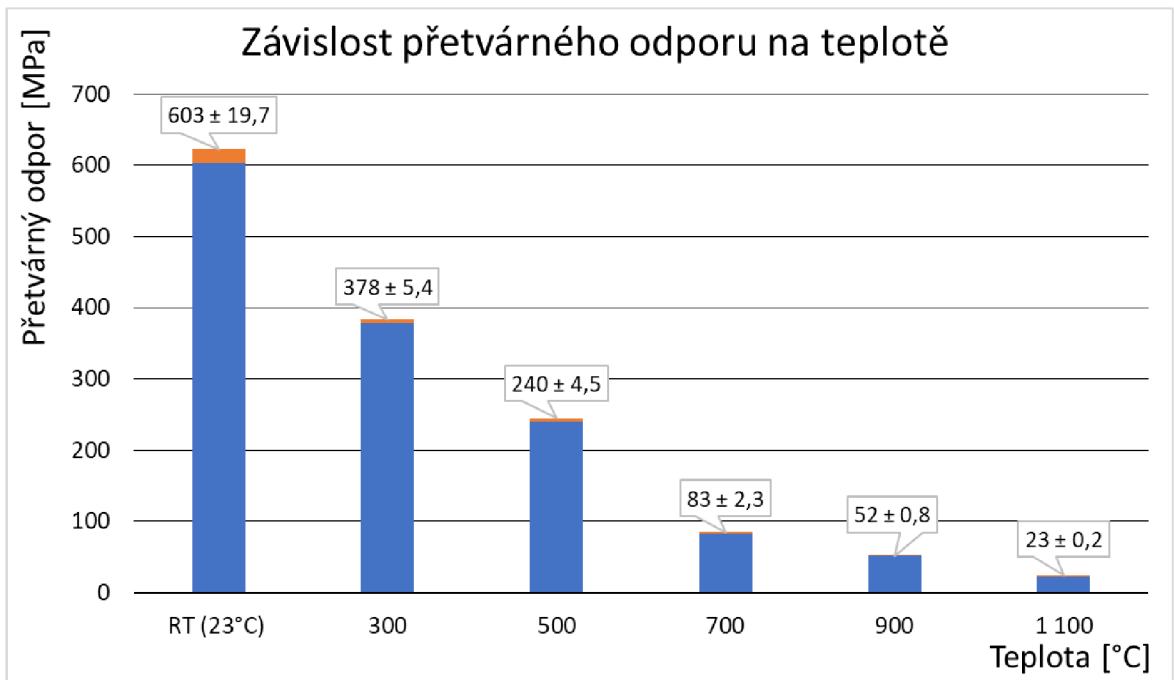
\bar{x} ... aritmetický průměr

x_i ... naměřené hodnoty

n ... počet měření

Tab. 2 Hodnoty výsledných přetvárných odporů a jejich směrodatné odchylky

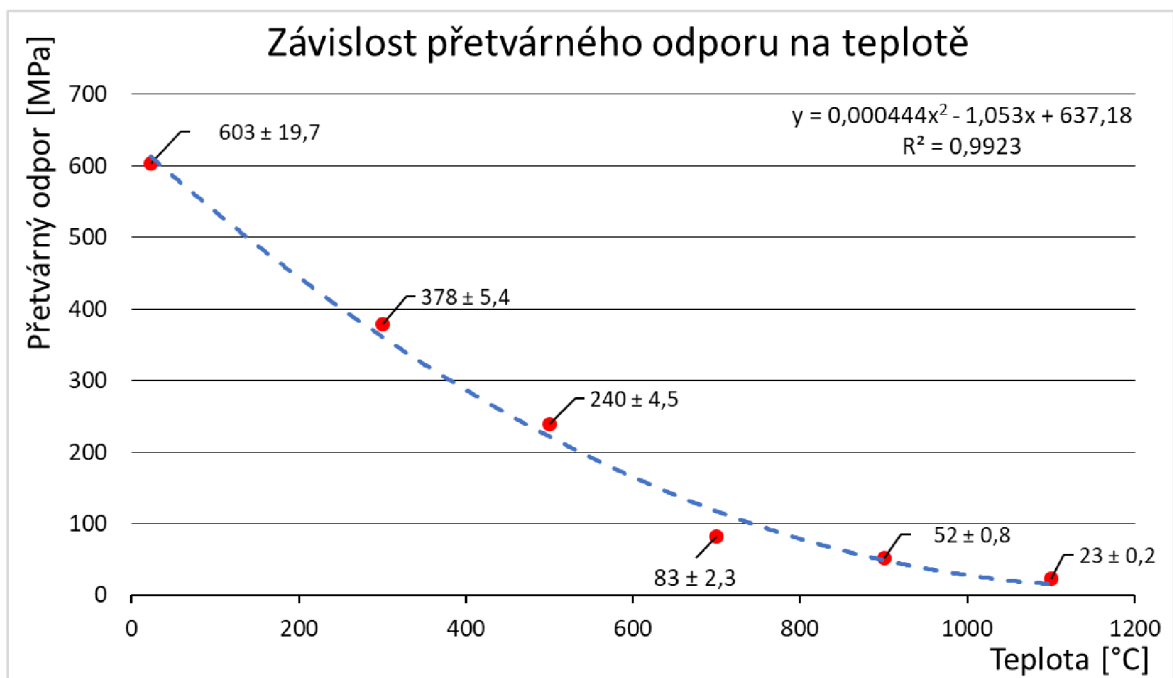
Teplota [°C]	23 °C	300	500	700	900	1 100
Přetvárný odpor [MPa]	603	378	240	83	52	23
Směrodatná odchylka [MPa]	19,7	5,4	4,5	2,3	0,8	0,2



Obr. 54 Závislost přetvárného odporu na teplotě tváření

Z grafu závislosti přetvárného odporu na teplotě (viz obr. 54) je patrné, že přetvárný odpor s rostoucí teplotou značně klesá. Pokud porovnáme hodnotu přetvárného odporu pro teplotu RT (23 °C) s hodnotou přetvárného odporu pro teplotu 1100 °C vyjde nám rozdíl cca 550 MPa. Je tedy patrné, že teplota má významný vliv na velikost tvářecí síly a na velikost přetvárného odporu. To znamená, že teplota má zásadní vliv na procesy tváření ocelí.

Další snahou bylo určit charakteristickou funkci průběhu přetvárného odporu závislého na rostoucí teplotě. Pro zjištění charakteristické funkce byly body v Excelu proloženy křivkami (exponenciálou, polynomickou funkcí, logaritmickou funkcí a mocninnou funkcí). Podle koeficientu korelace R^2 byla vybrána nejvhodnější funkce. Nejvhodnější funkce, která dokáže popsat tento průběh s hodnotou koeficientu korelace $R^2=1$ by byla polynomická funkce pátého řádu. Ovšem tato funkce je pro praxi takřka nepoužitelná. Proto byla zvolena polynomická funkce druhého řádu (kvadratická rovnice), která určí průběh přetvárného odporu v závislosti na rostoucí teplotě s velmi malou odchylkou oproti polynomické funkci pátého řádu. Pro porovnání koeficient R^2 při použití kvadratické rovnice je 0,9923. Lze tedy konstatovat, že velikost přetvárného odporu přibližně kvadraticky klesá s rostoucí teplotou. Dále je možné v grafu na obr. 55 vidět rovnici této kvadratické funkce.



Obr. 55 Průběh přetvárného odporu v závislosti na teplotě

4. Diskuze výsledků

Po určení všech přetvárných odporů pro zadané teploty zkoušení a vykreslení do grafů viz obr. 54 lze vidět, že teplota tváření významně ovlivňuje velikost přetvárného odporu. Je patrné, že velikost přetvárného odporu klesá s rostoucí teplotou. Rozdíly přetvárných odporů mezi jednotlivými zkoušenými teplotami jsou značné. Pokud porovnáme přetvárný odpor mezi nejnižší teplotou (23 °C) a nejvyšší teplotou (1100 °C) pro které byly provedeny zkoušky, vidíme velký rozdíl jednotlivých přetvárných odporů. Přetvárný odpor pro teplotu 1100 °C je cca 25x menší než v případě tváření za teploty 23 °C. Z hlediska tváření lze jednotlivé teploty porovnat také dle toho, zda se jedná o tváření za studena (obvykle pro tváření za studena platí, že $T_{\text{tváření}} < 0,3 \cdot T_{\text{tání}}$), nebo o tváření za tepla ($T_{\text{tváření}} > 0,7 \cdot T_{\text{tání}}$), či tváření za poloohřevu ($T_{\text{tváření}} 0,3 - 0,7 \cdot T_{\text{tání}}$). [4] Pokud uvažujeme, že teplota tání ocelí je přibližně 1539 °C, lze zkoušené teploty rozdělit do druhu tváření viz tabulka 3.

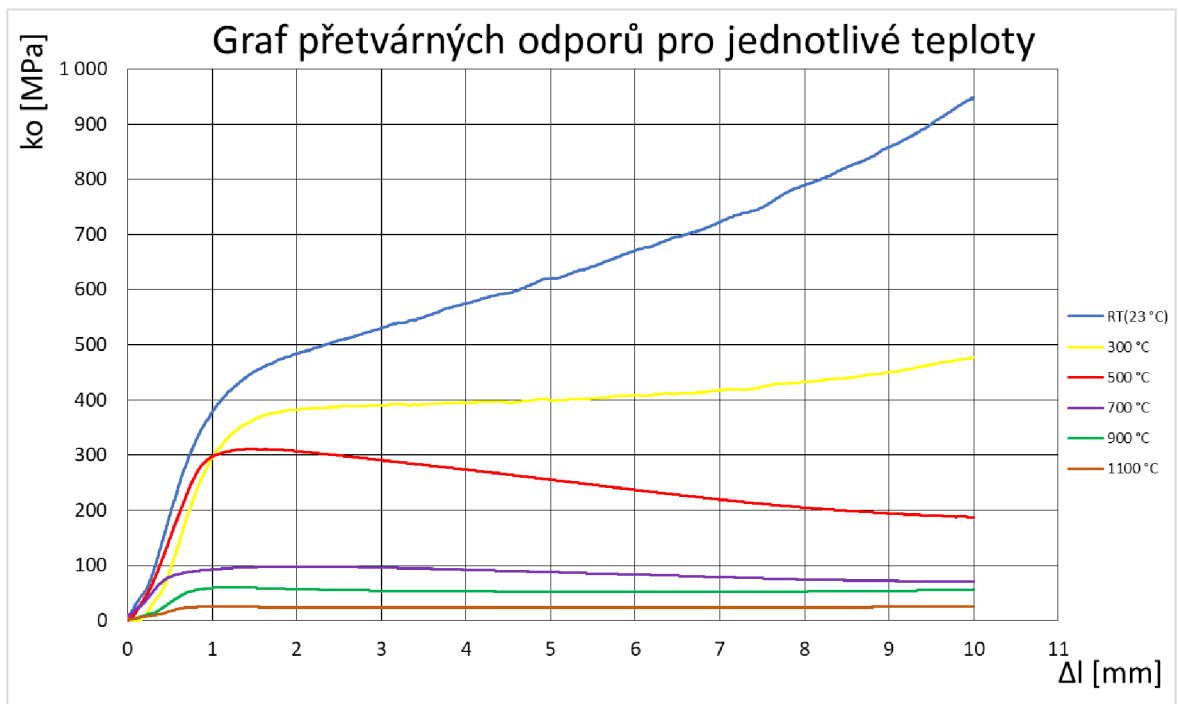
Z naměřených výsledků je patrné, že i přes to, že teplota 300 °C spadá do oblasti tváření za studena, je při použití této teploty již vidět značný pokles deformačního odporu oproti teplotě RT. Pokles činí cca 35 %. Z tabulky číslo 3 vyplývá, že správná volba teploty tváření může výrazně ovlivnit velikost deformačního odporu, a tedy i maximální zatěžující sílu potřebnou pro tváření. Pro porovnání například u tváření za poloohřevu, pokud zvolíme teplotu tváření 900 °C, namísto 500 °C, docílíme tím přibližně 4,5x menší přetvárný odpor než v případě tváření za teploty 500 °C. Je tedy patrné, že teplota tváření je pro přetvárný odpor základním parametrem ovlivňující jeho velikost při tváření. Ze znalosti jeho velikosti a na základě informace o dalších požadovaných vlastnostech tvářeného materiálu (např. kvalita povrchu výkovku, strukturní změny, požadavky na mechanické vlastnosti po tváření atd.) lze určit vhodné podmínky tváření. Pro matematický popis závislosti deformačního odporu na teplotě byla zvolena polynomická funkce druhého řádu. Z grafu na obr. 55 lze pozorovat, že daná funkce poměrně dobře aproximuje naměřené hodnoty, kde koeficient korelace dosahuje hodnoty $R^2=0,9923$. Předpis této rovnice je zobrazen v grafu na obr. 55. Aproximace naměřených hodnot pomocí matematické funkce je výhodná z hlediska možného určení hodnoty přetvárného odporu i pro teploty, pro které nebyl proveden experimentální test.

Tab. 3 Rozdělení teplot jednotlivých zkoušek dle druhu tváření děleného dle teploty tváření

Druh tváření	Tváření za studena		Tváření za poloohřevu			Tváření za tepla
Teplota [°C]	RT (23 °C)	300	500	700	900	1 100
Přetvárný odpor [MPa]	603 ± 19,7	378 ± 5,4	240 ± 4,5	83 ± 2,3	51 ± 0,8	23 ± 0,2

5. Závěr

Cílem předkládané bakalářské práce bylo určit závislost velikosti přetvárného odporu na teplotě tváření. Z důvodu snadné komerční dostupnosti byl pro experiment vybrán materiál S550J2. Pro stanovení velikosti deformačního odporu v závislosti na teplotě byla zvolena zkouška pětchování, prováděná na stroji TESTOMETRIC FS100CT s tepelnou komorou SOP 40x200/140, která umožňuje zajistit požadovanou teplotu zkoušeného vzorku. Výsledky této práce ukazují významný vliv teploty tváření na velikost deformačního odporu, kdy z výsledků prezentovaných v předchozích kapitolách je patrné, že velikost přetvárného odporu značně klesá s rostoucí teplotou. Tento fakt byl potvrzen i pro teplotu tváření 300 °C, kdy se předpokládal minimální vliv teploty na velikost deformačního odporu oproti teplotě 23 °C. Obě uvedené teploty leží v pásmu označovaném v odborné literatuře jako tváření za studena a neuvádí se významný rozdíl změny mechanických vlastností pro tuto oblast tváření. Rozdíl naměřených výsledků oproti teoretickým poznatkům lze pravděpodobně spatřovat v použitém materiálu pro experimenty, kdy byla použita ocel s vysokými mechanickými hodnotami a již při teplotě tváření 300 °C dochází k procesům odpevnění snižující vnitřní napjatosti v testovaném materiálu. Tento předpoklad podporují i výsledky měření pro teploty 500 °C a 700 °C zobrazené v grafech na obrázku 49 a 50, kdy je vidět, že s rostoucí deformací vlivem odpevnění deformační odpor klesá, tzn. výchozí vnitřní nestabilita (vnitřní pnutí) musí být u tohoto použitého materiálu vysoká (materiál s rostoucí deformací odpevňuje). Při tváření za studena (teploty RT a 300 °C) je charakter grafů znázorněných na obrázku 47 a 48 oproti teplotám 500 °C a 700 °C opačný (se vzrůstající deformací roste i deformační odpor – materiál zpevňuje). Pro teploty 900 °C a 1100 °C je vidět, že proces zpevnění a odpevnění je prakticky v rovnováze (křivky deformačního odporu jsou konstantní, viz obrázek obr. 56).



Obr. 56 Srovnávací graf průběhů jednotlivých přetvárných odporů pro danou teplotu

V souladu se zadáním BP bylo dosaženo všech plánovaných výsledků. V případě pokračování dalších experimentů doporučuji provést před vlastním měřením strukturní a napěťovou analýzu výchozího materiálu, což by vedlo k snazšímu pochopení a vysvětlení procesů probíhajících při tváření za tepla.

Literatura

- [1] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *Úvod do tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 978-80-7078-877-6.
- [2] FABÍK, Richard. *Tváření kovů*. 1 vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [3] SEMIATIN, S. L. a ASM INTERNATIONAL, ed. *Forming and forging*. 9. ed., 5. print. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1998. Metals handbook, prepared under the direction of the ASM Handbook Committee; Vol. 14. ISBN 978-0-87170-020-9.
- [4] SOLFRONK, Pavel. *2_PR_TKP_II_Kovani*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, [7. 6. 2021]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=193205>
- [5] TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes - machines - tools*. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.
- [6] VAŠKO, Michal. *Technologie zápusťkového kování hřídele*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Miroslav Šlais.
- [7] FÜRST, Jürgen. *Kování výkyvnou zápusťkou a přesné kování*: In: MMSPEKTRUM. www.mmspektrum.com [online]. [7. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kovani-vykyvnou-zapustkou-a-presne-kovani.html>
- [8] SOLFRONK, Pavel. *3_PR_TKP_II_Valcovani*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, [7. 6. 2021]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=193206>
- [9] *Válcování závitů a profilů*. In Profiroll Technologies. www.profiroll.com [online]. [7. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.profiroll.com/cs/proces-tvareni/valcovani-zavitu.html>
- [10] SOLFRONK, Pavel. *4_PR_TKP_II_Protlačování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, [7. 6. 2021]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=193207>
- [11] PETRUŽELKA, Jiří a Jiří HRUBÝ. *Výpočetní metody ve tváření*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. 2002.
- [12] PETRUŽELKA, Jiří a Jiří HRUBÝ. *Strojírenské tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2001. ISBN 978-80-7078-878-3.
- [13] ČSN EN 10027-1. *Systém označování ocelí – Část 1: Stavba značek oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2017. Třídící znak: 420011
- [14] ČSN EN 1027-2. *Systém označování ocelí – Část 2: Systém číselného označování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2017. Třídící znak: 420012
- [15] POŠVÁŘOVÁ, Miloslava a Pavel RYJÁČEK. *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací. Kapitola 19 OCELOVÉ MOSTY A KONSTRUKCE Část A*. Im.: Ministerstvo dopravy Odbor pozemních komunikací. [online] 13. duben 2015. [7. 6. 2021]. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_6_TKP/TKP_19_A___15.pdf

- [16] ROTTER, Tomáš. *Ocel pro stavební ocelové konstrukce*. *tzbinfo* [online]. 15. únor 2016. [7. 6. 2021] Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13744-ocel-pro-stavebni-ocelove-konstrukce>
- [17] *Značení ocelí*. In: ONLINE/Ferona [online]. [7. 6. 2021]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-oceli/?typ=2>
- [18] ČSN EN 10025-6. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 6: Technické dodací podmínky pro ploché výrobky z ocelí s vyšší mezí kluzu v zušlechtěném stavu*. Praha.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2020. Třídící znak: 420940
- [19] ČSN EN 10025. *Výrobky válcované za tepla z nelegovaných konstrukčních ocelí. Technické dodací podmínky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2020. Třídící znak: 420940
- [20] ODEHNALOVÁ, Daniela. *Zkoušení materiálových vlastností I*. Technická univerzita v Liberci, 2010, [7. 6. 2021]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT_NMI_NM-P_PR04_CZE_Odehnalova_Zkouseni%20materialovych%20vlastnosti%20I.pdf
- [21] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.
- [22] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2010. Třídící znak: 420310

Seznam příloh

Příloha 1: Protokol zkoušky tahem při teplotě RT

Příloha 2: Protokol zkoušky tlakem při teplotě RT

Příloha 3: Protokol zkoušky tlakem při teplotě 300 °C

Příloha 4: Protokol zkoušky tlakem při teplotě 500 °C

Příloha 5: Protokol zkoušky tlakem při teplotě 700 °C

Příloha 6: Protokol zkoušky tlakem při teplotě 900 °C

Příloha 7: Protokol zkoušky tlakem při teplotě 1100 °C

Přílohy

Příloha 1: Protokol zkoušky tahem při teplotě RT

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

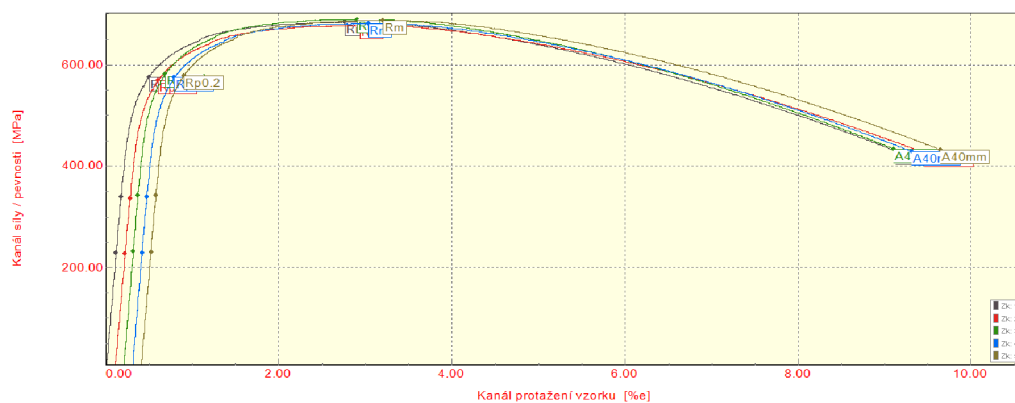
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : S550J2
Rozměry vzorku : pr. 7 mm
Směr odebrání vzorku :
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
Vypracoval : Jakub Kameník
Datum provedení testu : 18.3.2021
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A40mm %
1	575.38	683.2	2.42	8.90
2	568.76	677.3	2.48	9.13
3	581.80	689.2	2.36	8.69
4	574.36	681.2	2.39	8.79
5	577.94	687.2	2.45	9.02

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A40mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	575.65	683.6	2.42	8.91
Směrodatná odchylka	4.81	4.7	0.05	0.18
Minimální hodnota	568.76	677.3	2.36	8.69
Maximální hodnota	581.80	689.2	2.48	9.13



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

ČSN EN ISO 4506

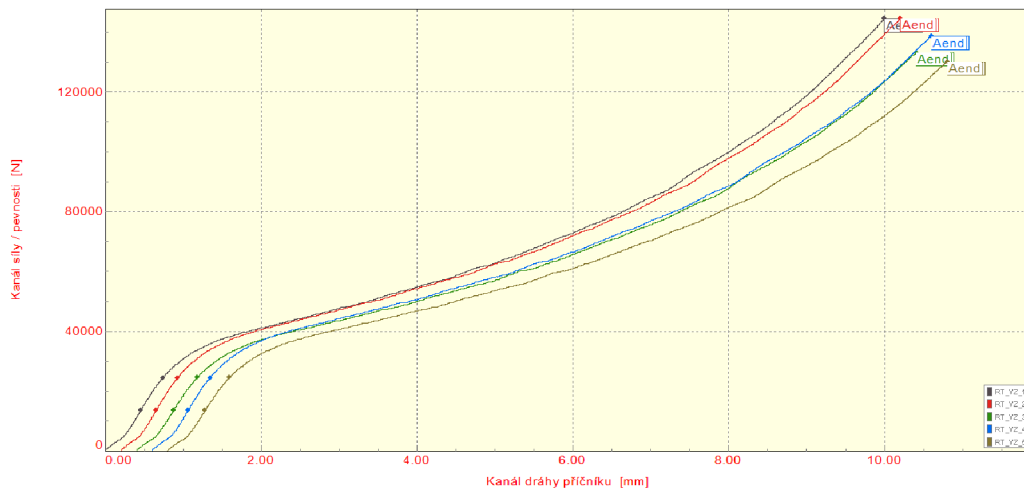
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : S550J2
Rozměr vzorku : pr. 10 mm
Směr odebrání vzorku : tyč
Rychlost posuvu : 1 mm/min.
Teplota : 23°C (RT)
Datum testu : 7.4.2021
Vypracoval : Jakub Kameník
Poznámka :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D mm	H0 mm	Fmax N
1	9.98	21.56	144634
2	9.98	21.36	144837
3	9.98	21.73	133266
4	9.98	21.47	138784
5	9.98	21.56	130291

Statistika	D mm	H0 mm	Fmax N
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	9.98	21.54	138363
Směrodatná odchylka	0.00	0.14	6568
Minimální hodnota	9.98	21.36	130291
Maximální hodnota	9.98	21.73	144837



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

ČSN EN ISO 4506

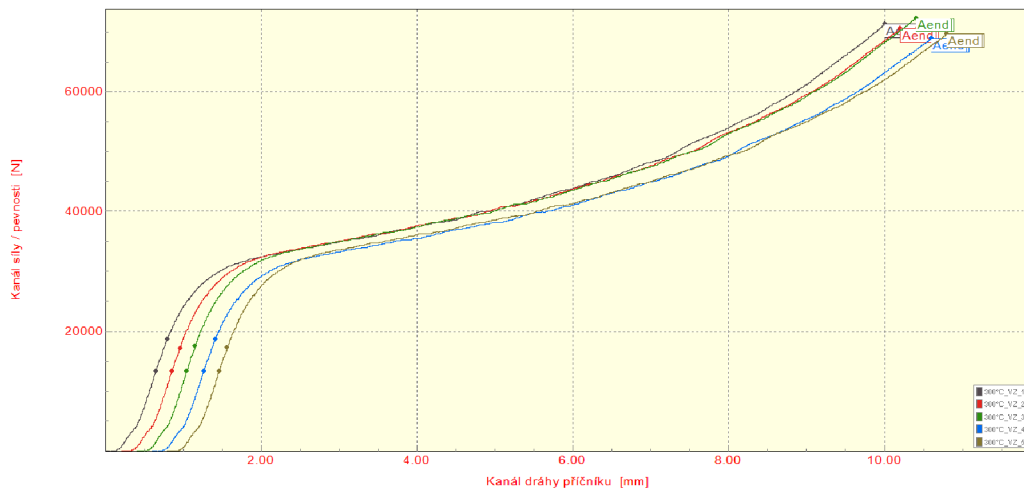
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : S550J2
Rozměr vzorku : pr. 10 mm
Směr odebrání vzorku : tyč
Rychlost posuvu : 1 mm/min.
Teplota : 300°C
Datum testu : 11.3.2021
Vypracoval : Jakub Kameník
Poznámka :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D mm	H0 mm	Fmax N
1	9.98	21.47	71317
2	9.98	21.24	70546
3	9.98	21.36	72317
4	9.98	21.39	68962
5	9.98	21.31	69676

Statistika	D mm	H0 mm	Fmax N
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	9.98	21.35	70564
Směrodatná odchylka	0.00	0.09	1322
Minimální hodnota	9.98	21.24	68962
Maximální hodnota	9.98	21.47	72317



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

ČSN EN ISO 4506

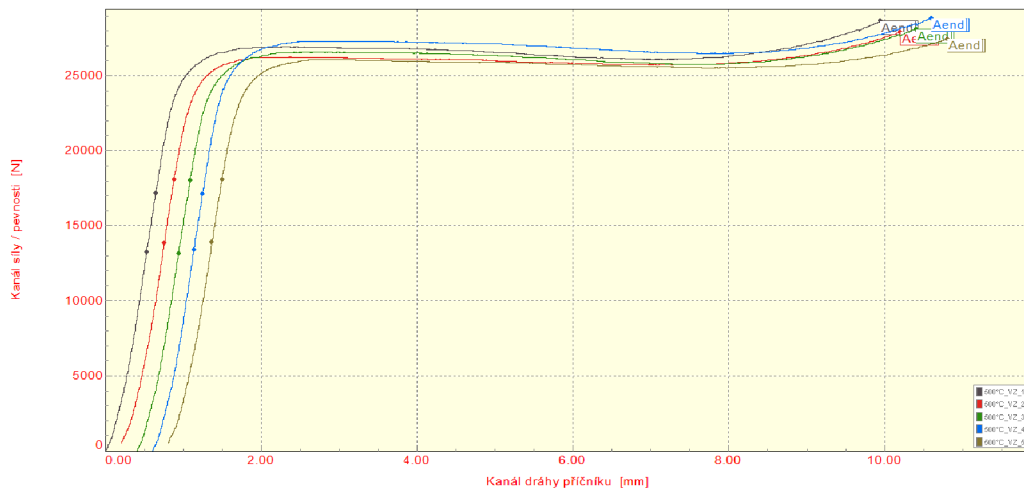
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : S550J2
Rozměr vzorku : pr. 10 mm
Směr odebrání vzorku : tyč
Rychlost posuvu : 1 mm/min.
Teplota : 500°C
Datum testu : 11.3.2021
Vypracoval : Jakub Kameník
Poznámka :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D mm	H0 mm	Fmax N
1	9.98	21.44	28631
2	9.98	21.16	27913
3	9.98	20.94	28122
4	9.98	21.09	28848
5	9.98	21.13	27441

Statistika	D mm	H0 mm	Fmax N
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	9.98	21.15	28191
Směrodatná odchylka	0.00	0.18	563
Minimální hodnota	9.98	20.94	27441
Maximální hodnota	9.98	21.44	28848



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

ČSN EN ISO 4506

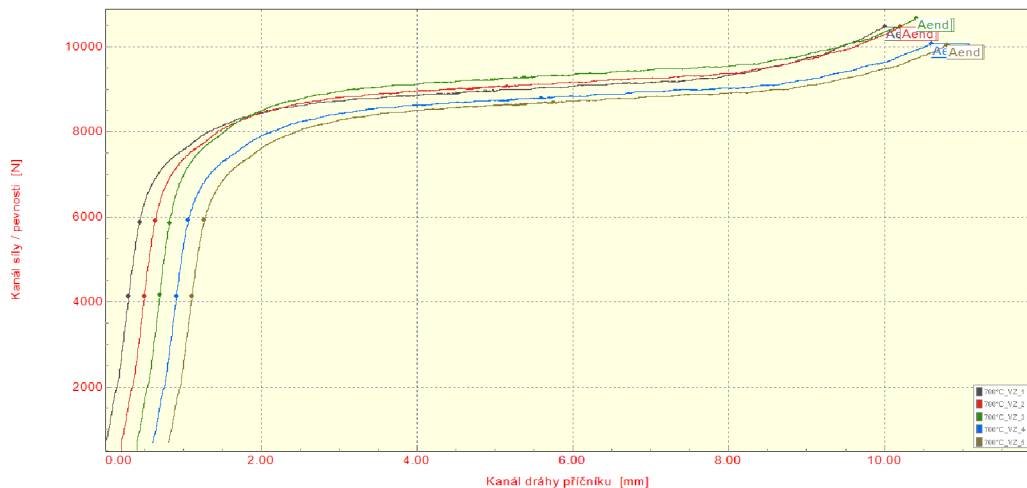
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : S550J2
Rozměr vzorku : pr. 10 mm
Směr odebrání vzorku : tyč
Rychlost posuvu : 1 mm/min.
Teplota : 700°C
Datum testu : 18.3.2021
Vypracoval : Jakub Kameník
Poznámka :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D mm	H0 mm	Fmax N
1	9.98	21.39	10475
2	9.98	21.16	10463
3	9.98	21.45	10666
4	9.98	21.05	10069
5	9.98	21.28	10033

Statistika	D mm	H0 mm	Fmax N
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	9.98	21.27	10341
Směrodatná odchylka	0.00	0.16	277
Minimální hodnota	9.98	21.05	10033
Maximální hodnota	9.98	21.45	10666



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

ČSN EN ISO 4506

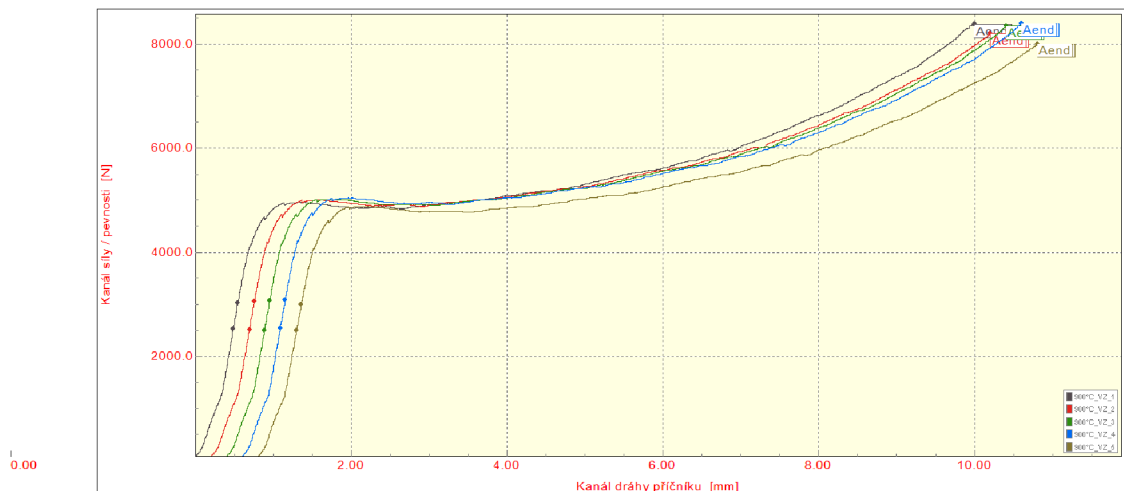
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : S550J2
Rozměr vzorku : pr. 10 mm
Směr odebrání vzorku : tyč
Rychlost posuvu : 1 mm/min.
Teplota : 900°C
Datum testu : 18.3.2021
Vypracoval : Jakub Kameník
Poznámka :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D mm	H0 mm	Fmax N
1	9.98	21.11	8384
2	9.98	21.49	8200
3	9.98	21.33	8351
4	9.98	21.42	8404
5	9.98	21.27	8003

Statistika	D mm	H0 mm	Fmax N
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	9.98	21.32	8268
Směrodatná odchylka	0.00	0.15	169
Minimální hodnota	9.98	21.11	8003
Maximální hodnota	9.98	21.49	8404



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

ČSN EN ISO 4506

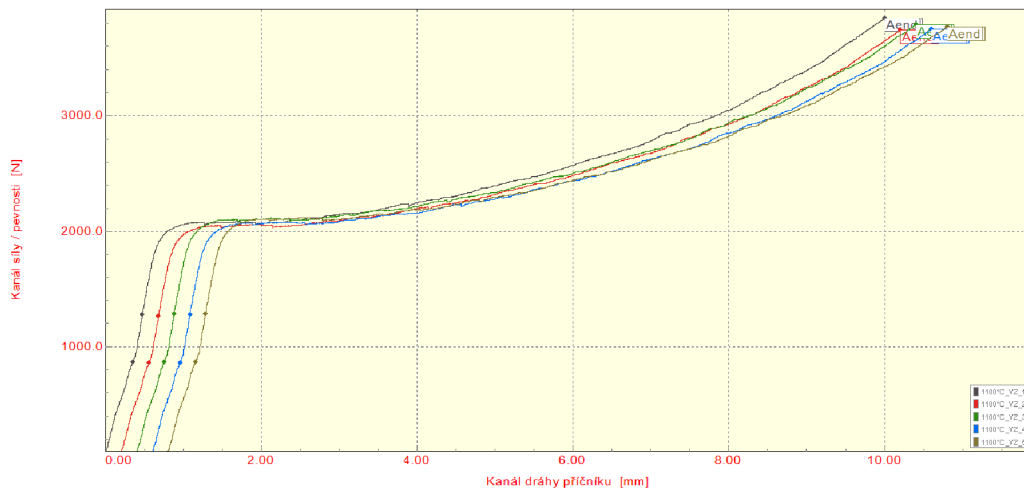
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : S550J2
Rozměr vzorku : pr. 10 mm
Směr odebrání vzorku : tyč
Rychlost posuvu : 1 mm/min.
Teplota : 1100°C
Datum testu : 25.3.2021
Vypracoval : Jakub Kameník
Poznámka :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D mm	H0 mm	Fmax N
1	9.98	21.38	3844
2	9.98	21.06	3740
3	9.98	21.22	3790
4	9.98	21.40	3748
5	9.98	21.19	3769

Statistika	D mm	H0 mm	Fmax N
Počet zkoušek	5	5	5
Průměrná hodnota	9.98	21.25	3778
Směrodatná odchylka	0.00	0.14	42
Minimální hodnota	9.98	21.06	3740
Maximální hodnota	9.98	21.40	3844



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ