

## **Bakalářská práce**

# **Stanovení vlivu rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností při statické zkoušce tahem za tepla**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Lukáš Sokolář**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

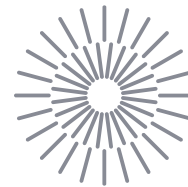
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Stanovení vlivu rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností při statické zkoušce tahem za tepla

*Jméno a příjmení:*

**Lukáš Sokolář**

*Osobní číslo:*

S20000108

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Zadávací katedra:*

Katedra strojírenské technologie

*Akademický rok:*

2023/2024

### Zásady pro vypracování:

1. Základní technologie tváření za tepla
2. Vliv teploty na změnu mechanických vlastností materiálu. Základní přehled způsobů tepelného zpracování kovových materiálů. Metody stanovení přetvárného odporu a způsoby aproximace křivky přetvárného odporu.
3. Pro zvolený materiál provést experimentální zjištění vlivu rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností při statické zkoušce za tepla.
4. Vyhodnocení a závěr



*Rozsah grafických prací:* obrázky, tabulky, grafy  
*Rozsah pracovní zprávy:* cca 30 stran textu  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* čeština

**Seznam odborné literatury:**

- [1] 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.
- [2] RAJAN, T. V., C. P. SHARMA a Ashok SHARMA. Heat treatment: principles and techniques. Second edition. Delhi: PHI Learning Private Limited, 2014. Eastern economy edition. ISBN 978-81-203-4095-4.
- [3] ASM handbook. 4: Heat treating. 9. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2009. ISBN 978-0-87170-379-8
- [4] ČSN EN ISO 6892-2 (420310) Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018
- [5] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.
- [6] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KRÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.

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

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

*Datum zadání práce:* 1. ledna 2023  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

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

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

29. prosince 2023

Lukáš Sokolář

# Stanovení vlivu rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností při statické zkoušce tahem za tepla

## Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením vlivu rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností při statické zkoušce tahem za tepla. Práce je rozdělena na teoretickou část a experimentální. V teoretické části je představeno tváření za studena a za tepla, přičemž následují základní technologie tváření za tepla. Dále přiblížení problematiky vlivu teploty na změnu mechanických vlastností a přehled tepelného zpracování kovových materiálů. Závěr teoretické části se věnuje stanovení přetvárného odporu a aproximace křivek tohoto odporu. Experimentální část obsahuje seznámení s materiálem Inconel 625 a jeho použitím, popis zkušebních vzorků a průběh zkoušky. Nezbytnou částí je pak vyhodnocení výsledků práce a diskuse.

## Klíčová slova

tváření za tepla, vliv teploty, mechanické vlastnosti, statická zkouška tahem za tepla, analýza rozptylu

# Determination of the effect of strain rate on the change in mechanical properties during static hot tensile testing

## Annotation

This bachelor thesis deals with the determination of the effect of strain rate on the change of mechanical properties during static hot tensile testing. The thesis is divided into theoretical and experimental parts. In the theoretical part, cold forming and hot forming are introduced, followed by the basic hot forming technologies. This is followed by an introduction to the effect of temperature on the change of mechanical properties and an overview of heat treatment of metallic materials. The theoretical part concludes with the determination of the remoulding resistance and the approximation of the curves of this resistance. The experimental part includes an introduction to the material Inconel 625 and its application, description of the test specimens and the course of the test. An essential part is then the evaluation of the results of the work and discussion.

## Keywords

hot forming, temperature effect, mechanical properties, static hot tensile test, analysis of variance

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za cenné rady, poskytnuté konzultace, přínosné poznatky při měření experimentu a vstřícný přístup. Dále děkuji své přítelkyni, celé své rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	10
1 Úvod.....	12
2 Teoretická část.....	13
2.1 Tváření.....	13
2.2 Tváření za studena.....	14
2.3 Tváření za tepla.....	15
2.3.1 Proces odpevnění materiálu.....	16
2.4 Základní technologie tváření za tepla.....	18
2.4.1 Kování.....	18
2.4.2 Volné kování.....	21
2.4.3 Zápustkové kování.....	25
2.4.4 Speciální metody kování.....	28
2.4.5 Válcování.....	30
2.4.6 Válcování trubek.....	33
2.4.7 Speciální způsoby válcování.....	36
2.4.8 Protlačování.....	37
2.5 Vliv teploty na změnu mechanických vlastností materiálu.....	40
2.6 Základní přehled způsobů tepelného zpracování kovových materiálů.....	41
2.6.1 Žihání.....	42
2.6.2 Žihání ocelí.....	42
2.6.3 Kalení.....	43
2.6.4 Martenzitické kalení.....	44
2.6.5 Baitické kalení.....	45
2.6.6 Popouštění.....	46
2.6.7 Chemicko-tepelné zpracování.....	46
2.7 Metody stanovení přetvárného odporu.....	47



2.7.1 Výpočet přetvárného odporu při pēchování válcového polotovaru.....	48
2.7.2 Výpočet přetvárné pevnosti.....	49
2.8 Způsoby aproximace křivky přetvárného odporu .....	49
2.8.1 Metoda nejmenších čtverců.....	49
2.8.2 Bézierovy křivky .....	50
2.8.3 Fergusonovy křivky .....	51
2.8.4 Coonsovy křivky.....	51
3 Experimentální část.....	53
3.1 Inconel 625.....	53
3.2 Zkušební vzorky a jejich rozlišení.....	54
3.4 Statická zkouška tahem za tepla.....	55
3.4.1 Analýza rozptylu - ANOVA .....	59
4 Vyhodnocení a diskuse výsledků .....	63
5 Závěr.....	64
Seznam obrázků .....	65
Seznam tabulek .....	67
Seznam příloh .....	67
Seznam použité literatury .....	69

## Seznam použitých zkratk a symbolů

a, b	Koeficienty určené vyřešením soustavy rovnic (6) a (7)	
$A_{16\text{mm}}$	Celková tažnost	[%]
$A_{c1}$	Teplota 600-650 (pro ocel)	[°C]
$A_{c3}$	Teplota 800-920 (pro ocel)	[°C]
$A_g$	Homogenní tažnost	[%]
$A_s$	Austenit	
B	Bainit	
$B_f$	Teplota konce bainitické přeměny	[°C]
$B_s$	Teplota počátku bainitické přeměny	[°C]
C	Koeficient tření	[-]
d	Průměr polotovaru	[mm]
$d_i$	Odchylky	
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Ferit	
F	Síla	[N]
h	Výška polotovaru	[mm]
$H_0$	Nulová hypotéza	
$H_1$	Alternativní hypotéza	
$k_o$	Přetvárný odpor	[MPa]
$k_{os}$	Střední hodnota přetvárného odporu	[MPa]
$k_p$	Přetvárná pevnost	[MPa]
M	Martenzit	
$M_f$	Teplota konce martenzitické přeměny	[°C]
$M_s$	Teplota počátku martenzitické přeměny	[°C]
n	Naměřené hodnoty	

P	Perlit	
p	Stupeň prokování	[-]
$P_i$	Množina reálných bodů	
$R_e$	Mez pružnosti v tahu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$S_0$	Plocha před tvářením	[mm <sup>2</sup> ]
$S_k$	Plocha po tvářením	[mm <sup>2</sup> ]
t	Parametr	
$T_{tav}$	Teplota tání	[°C]
v	Rychlost	[m/s]
$x_i, y_i$	Množina bodů	
Z	Kontrakce	[%]
$\alpha$	Hladina významnosti	[%]
$\varepsilon$	Poměrná deformace	[-]
$\mu$	Deformační tření	[-]
$\sigma$	Napětí	[MPa]
$\sigma_1$	1. hlavní napětí	[MPa]
$\sigma_2$	2. hlavní napětí	[MPa]
$\sigma_3$	3. hlavní napětí	[MPa]

# 1 Úvod

Tváření za tepla je jedna z nejstarších technologií. Zahrnuje kování, válcování a protlačování. Všechny tyto operace se pyšní vysokou efektivitou a rentabilitou. Je však nezbytné vědět, zda takto vyrobené strojní součásti se hodí do prostředí, kde mají pracovat. Z tohoto důvodu jsou znalosti materiálu a změny mechanických vlastností vlivem teploty a rychlosti deformace nepostradatelné. Právě proto se předkládaná bakalářská práce zabývá stanovením vlivu rychlosti deformace na změny mechanických vlastností při statické zkoušce tahem za tepla. Pro zvládnutí experimentu je nutné uvést informace, které se přímo vážou s danou problematikou. Tyto informace jsou podrobně uvedeny v teoretické části.

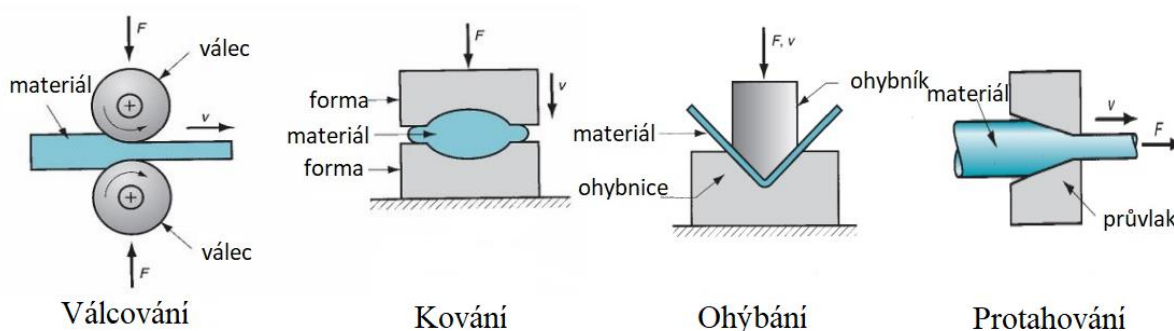
V experimentální části se pracuje s materiálem Inconel 625, který je detailněji představen v kapitole 3.1. Zmíněný materiál se nejčastěji používá pro výrobu lodních kol námořních lodí. Takové prostředí je, co se týče materiálu, jedno z nejvíce agresivních. Není pak divu, že vlivem mořské vody vznikají poruchy ve tvaru trhlin či prasklin. Takto vzniklé trhliny se svařují za následného tváření. Pro přiblížení stavu takto tepelně ovlivněného materiálu za následného tváření se zvolila statická zkouška tahem za tepla. Naměřené hodnoty se zpracovávaly v programu Microsoft Excel s použitím analýzy rozptylu – ANOVA.

## 2 Teoretická část

Tato část mé bakalářské práce uvede témata, která zahrnují znalosti a informace nezbytné k přiblížení problematiky stanovení vlivu rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností při statické zkoušce tahem za tepla. Počínáje charakteristikou procesu tváření za studena a za tepla. Následně seznámení se základními technologiemi tváření za tepla a vlivu teploty na změnu mechanických vlastností. Dále představí základní přehled způsobů tepelného zpracování kovových materiálů a metody stanovení přetvárného odporu. Závěr této kapitoly se bude věnovat způsobům aproximace křivky přetvárného odporu.

### 2.1 Tváření

Tváření je děj, při kterém dochází ke změně tvaru materiálu prostřednictvím deformací [1]. Mezi hlavní procesy tváření patří kování, válcování, ohýbání, stříhání, protlačování, protahování atd. [2]. Principy válcování, kování, ohýbání a protahování jsou znázorněny na **Obr. 1**.



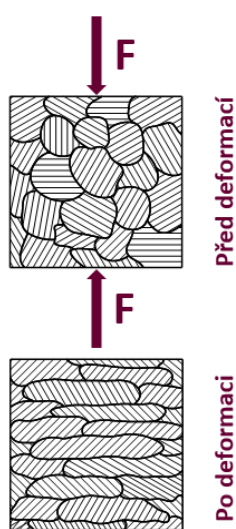
**Obr. 1** Některé základní procesy tváření. Upraveno dle [3]

V závislosti na tvářecí teplotě se rozděluje tváření za studena a za tepla. Hranicí mezi těmito způsoby je rekrystalizační teplota. U tváření za studena nedochází k rekrystalizaci ani k zotavení, naopak je tomu u tváření za tepla [4].

Tváření je dále možno dělit podle tepelného efektu. Při tomto procesu dochází k přeměně části energie, která se uplatnila během tváření, na teplo. Velikost vzniklého tepla je podmíněna rychlostí deformace a odporem materiálu. Podle místa odvodu tepla se tváření dělí na izotermické, adiabatické a polytropické. Z hlediska působení vnějších sil se dělí tváření kovů na objemové a plošné. U objemového tváření dochází k deformaci ve všech třech směrech, zatímco u plošného pouze ve dvou směrech [5].

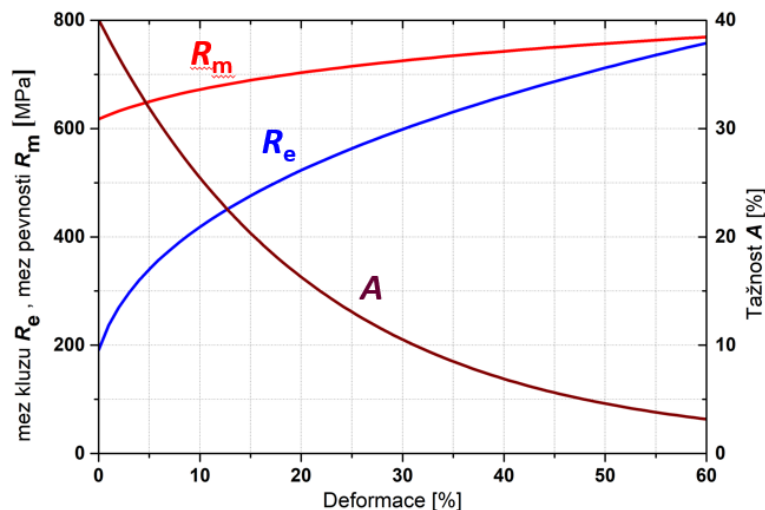
## 2.2 Tváření za studena

Během tohoto děje dochází k zpevňování materiálu. Tento proces se odehrává při teplotách nižších než je teplota rekrytalizační, což je zhruba 0,2 až 0,3  $T_{\text{tav}}$ . Základním principem deformace je dislokační skluz. Při pohybu dislokací dochází k vzájemnému ovlivňování se substitučními atomy, vakancemi a ostatními dislokacemi. V počátku tváření dochází k deformaci skluzem pouze u zrn, která jsou vhodně orientovaná vůči směru zatížení [6]. Deformací zrn se vytváří textura, viz **Obr. 2**. Při této metodě se zvyšuje mez pevnosti a mez kluzu, naopak se snižuje tažnost. Pokud by došlo ke zvýšení teploty kovů bylo by možné obnovit deformační schopnosti [5].



**Obr. 2** Změna tvaru zrna. Přejato z [7]

Výhody této metody v porovnání s tvářením za tepla jsou: možnost dosažení přesnějších rozměrů, dobrá povrchová úprava, díky zpevnění se projevuje vyšší pevnost a tvrdost, žádné náklady spojené s ohřevem materiálu [3]. Diagram, který znázorňuje změnu mechanických vlastností při tváření za studena lze najít na **Obr. 3**.

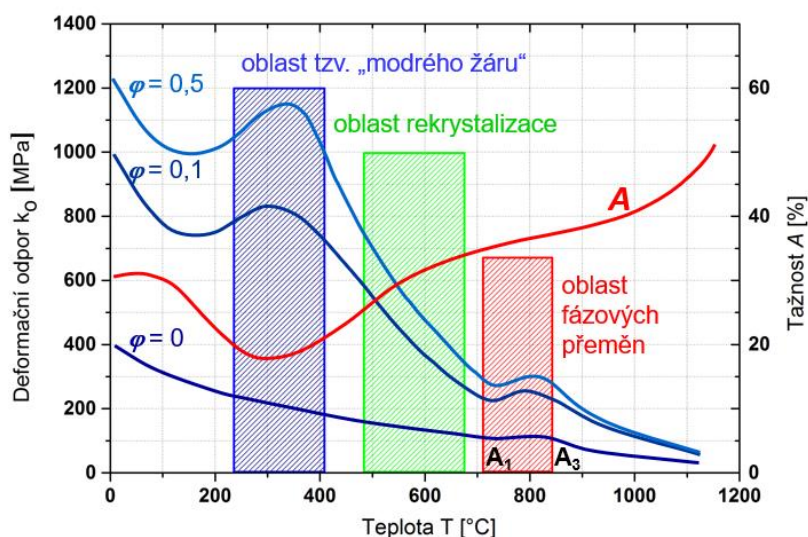


**Obr. 3** Diagram změny mechanických vlastností při tváření za studena. Přejato z [7]

Protože se má bakalářská práce zajímat hlavně o namáhání materiálu za tepla, bude následujícím kapitolám věnována větší pozornost než tomu bylo u tváření za studena.

## 2.3 Tváření za tepla

Proces tváření za tepla se odehrává nad rekrystalizační teplotou. V závislosti na rychlosti rekrystalizace dochází ke zpevnění a odpevnění současně. Tváření se provádí při teplotě, která odpovídá hodnotě nad  $0,7 T_{\text{tav}}$  tvářeného materiálu. V důsledku nezpevnění materiálu jsou tvářecí síly až desetkrát menší než u tváření za studena. Tento proces je časově náročný a celkem drahý, výhodou mu je však odstranění různých trhlin, bublin atd. Dalším následkem tváření za tepla je hrubnutí zrna. To může být problém pro kvalitu některých dalších technologických operací. Z hrubé dendritické struktury vzniká vláknitá, kterou nelze změnit či odstranit dalším tvářením ani tepelných zpracování. Vlákňitá struktura v podstatě vzniká vlivem nečistot, které jsou obsaženy v povrchových vrstvách krystalů. A právě tato struktura ovlivňuje mechanické vlastnosti, kterými je tažnost a deformační odpor, a anizotropii, viz **Obr. 4** [5, 7].



**Obr. 4** Diagram vlivu teploty na deformační odpor a tažnost. Přejato z [7]

### 2.3.1 Proces odpevnění materiálu

Další odlišností, kterou se dělí tváření za tepla a za studena, je průběh odpevňovacích procesů. Tyto procesy jsou charakterizovány jako tendence materiálu snížit termodynamické nerovnováhy, které vznikly tvářením. Pokud se tak děje v oblasti nízkých teplot, uvažuje se tento metastabilní stav jako neměnný. Může být řečeno, že zvýšená teplota a uložená energie v tvářeném materiálu pohání tyto odpevňovací pochody, které se dělí na: zotavení, primární rekrytalizaci a sekundární rekrytalizaci [6, 8].

#### Zotavení

K zotavení dochází při teplotách  $0,25$  až  $0,3 T_{\text{tav}}$  [°K]. Nedochozí zde k tvorbě nových zrn ani ke změně tvaru velkoúhlých hranic. Naopak zde dochází k zániku bodových poruch, uvolnění dislokací tzv. šplhem a polygonizací (viz **Obr. 5**) s částečnou anihilací dislokací a bodových poruch, kdy nahromaděním intersticiálních atomů a vakancí dojde ke snížení těchto poruch na rovnovážnou úroveň. Dislokační zotavení způsobí výrazný pokles vnitřních pnutí a mírné snížení pevnosti, tvrdosti a meze kluzu. Jde zde o nepatrnou změnu mechanických vlastností. Proto může být tvrzeno, že k nijak výrazným změnám těchto vlastností nedochází. U fyzikálních vlastností to však tvrzeno být nemůže, protože zde dochází k výrazným změnám korozní odolnosti, tepelných a elektrických vodivostí [6, 8].

Dynamické zotavení je změkčovací mechanismus tváření kovů, které mají kubickou prostorově centrovanou nebo hexagonální mřížku [6].





**Obr. 5** Schéma polygonizace. Přejato z[8]

### Primární rekrytalizace

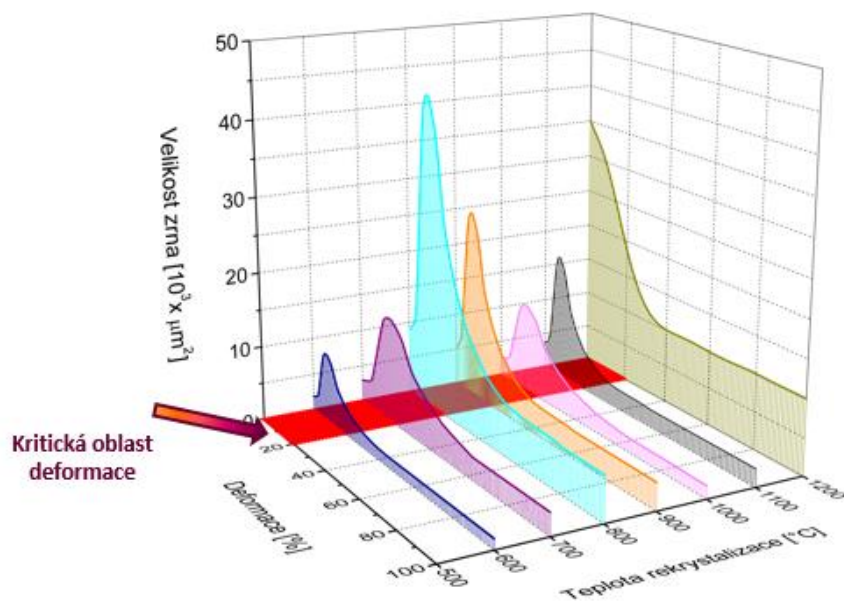
Dochází zde k přesunu velkoúhlových hranic počátečních zrn. Tam, kde je největší energie, dojde k vyvolání zárodků nových zrn. Nově vzniklá zrna se liší svou velikostí i tvarem oproti počáteční struktuře. Dislokační hustota je stejná jako u netvářeného stavu. Dále jsou zde zaznamenávány velké změny mechanických vlastností a vznik rekrytalizační struktury. Ve chvíli, kdy dojde ke styku hranic nových zrn je primární rekrytalizace ukončena. Celý tento proces je přímo ovlivněn velikostí počáteční plastické deformace, rekrytalizační teplotou, ale i rozměrem nebo tvarem výrobku [8].

### Sekundární rekrytalizace

O sekundární rekrytalizaci je hovořeno v případě, kdy teplota stále roste nebo dochází k prodloužení doby ohřevu. V důsledku toho se napojí na rekrytalizace fáze růstu zrna rekrytalizované mřížky. Tyto jevy mají za následek zhrubnutí zrna, což je pro tváření nežádoucí. Vlivem zhrubnutí materiálu také klesne termodynamická nestabilita [6, 8].

Shrnou-li se poznatky nabyté z primární rekrytalizace a sekundární rekrytalizace, může být tvrzeno, že rekrytalizaci lze obecně rozdělit do několika fází: vznik zárodků nových zrn, růst nových zrn, až dojde k nahrazení předešlé deformované struktury, zhrubnutí rekrytalizovaných zrn a jejich dodatečný růst [6].

Teplota rekrytalizace se pohybuje od 0,35 do 0,45  $T_{\text{tav}}$  [°K]. Tato teplota charakterizuje izotermický ohřev, při kterém proběhne kompletní rekrytalizace kovu za 1 hodinu. Stejně jako zotavení, tak i rekrytalizace je děj vyvolaný ohřevem. Z tohoto důvodu samotný průběh rekrytalizace závisí stejně tak i na čase. Dalším faktorem, který může rekrytalizaci urychlit nebo ji provést při nižší teplotě, je uložená deformační energie. Neméně významný důsledek rekrytalizovaného kovu je velikost zrna. Při intenzivním tváření kovu dojde při žíhání ke vzniku velkého množství rekrytalizačních zárodků, což způsobí jemnozrnnou strukturu. Opačně u menších deformací dojde k růstu nových zrn u menšího počtu zárodků, to způsobuje výrazné zhrubnutí. K tomuto jevu dochází v oblasti, která se nazývá kritická oblast viz **Obr. 6** [6].



**Obr. 6** Diagram velikosti zrna, deformace a teploty rekrystalizace. Přejato z[8]

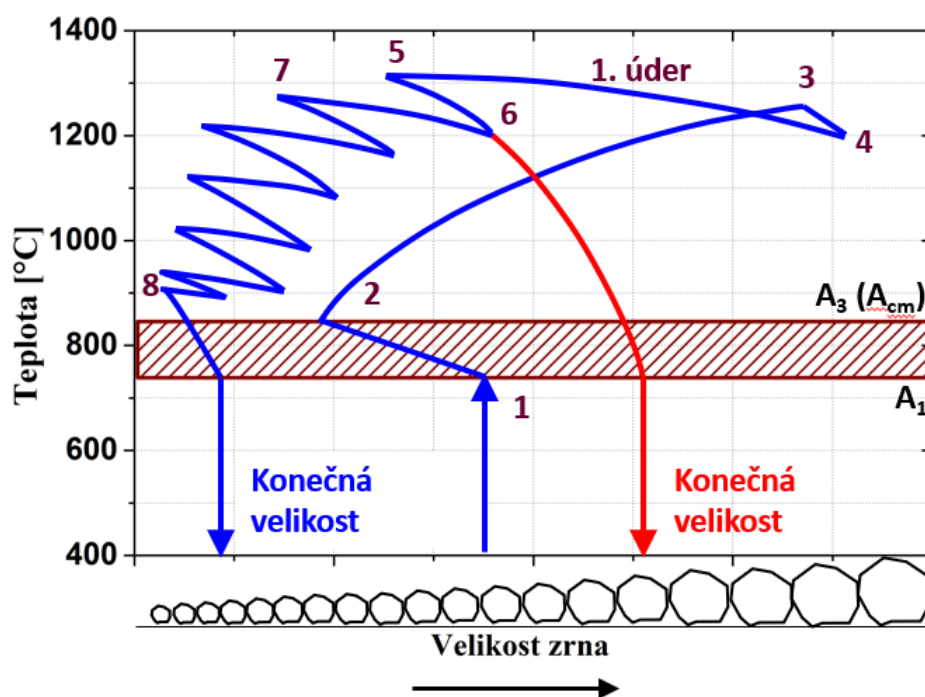
## 2.4 Základní technologie tváření za tepla

Za základní technologie tváření za tepla se považují kování, válcování a protlačování.

### 2.4.1 Kování

Kování spadá do objemového tváření za tepla, které je realizováno úderem nebo stálou působící silou. Tato technologie je pro lidstvo velmi historicky významná, protože kování pomocí kladiva a kovádky – ruční je známo již několik tisíců let. Jako u všech metod tváření, tak i zde jde o dosažení požadovaného tvaru, vhodné makrostruktury a mikrostruktury, ale i růst mechanických a fyzikálních vlastností [5]. Zmiňovaný růst mechanických a fyzikálních vlastností je důsledkem změny struktury vlivem dynamické rekrystalizace, výrazným zjemněním nebo dokonce úplnou eliminací původní dendritické struktury, poklesem nehomogenity materiálu způsobeným difúzními procesy, zlepšením jakosti hranic zrn a tlakově svařenými trhlinami a vnitřními dutinami. Nově pak vzniká vláknitá a řádkovitá textura [7]. Ke kování jsou vhodné téměř všechny kovy. Produktivitu výrazně zvyšuje strojní kování, výrobou malých a středně velkých výkovek [5]. Materiálové změny jsou nejvýrazněji ovlivněny průběhem kovacího režimu, který je znázorněn v kovacím diagramu viz **Obr. 7** a **Obr. 8**, a stupněm prokování [7].

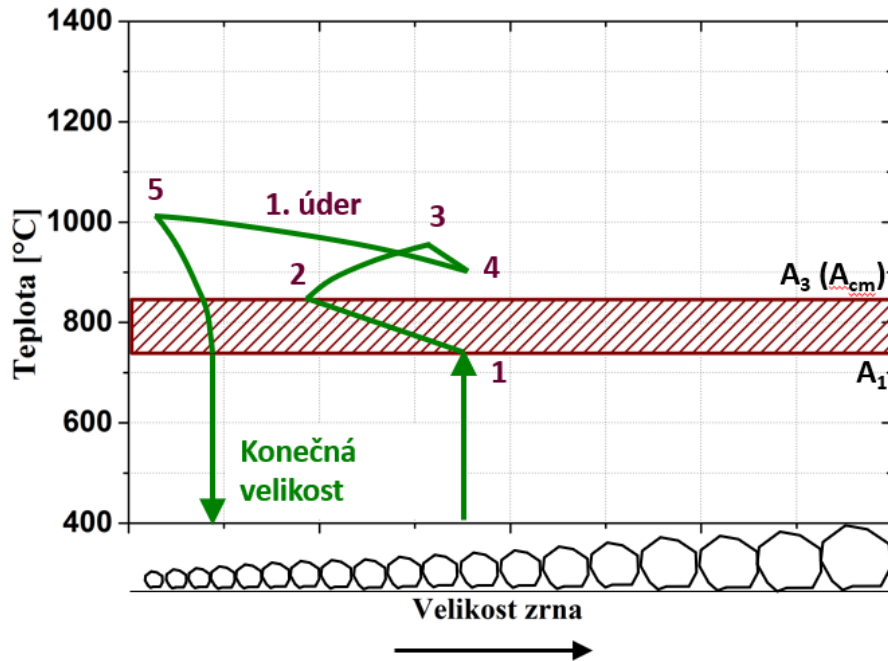
## Kovací diagramy



Obr. 7 Kovací diagram pro buchar. Přejato z [7]

Popis fází kovacího diagramu pro buchar (Obr.6):

- 1-2: zjemnění zrna způsobené překrytalizací
- 3: konec ohřevu
- 3-4: hrubnutí zrna, manipulace
- 4-5: 1. úder, zjemnění zrna a zvýšení teploty vlivem plastické deformace
- 5-6: další manipulace, hrubnutí zrna
- 6-7: 2. úder, zjemnění zrna a zvýšení teploty vlivem plastické deformace
- 8: konec tvářecího procesu po 7. úderu



**Obr. 8** Kovací diagram pro mechanický lis. Přejato z [7]

Popis fází kovacího diagramu pro mechanický lis (Obr.7):

- 1-2: zjemnění zrna způsobené překrytalizací
- 3: konec ohřevu
- 3-4: hrubnutí zrna, manipulace
- 4-5: 1. úder, zjemnění zrna a zvýšení teploty vlivem plastické deformace
- 5: konec tvářecího procesu po 1. úderu

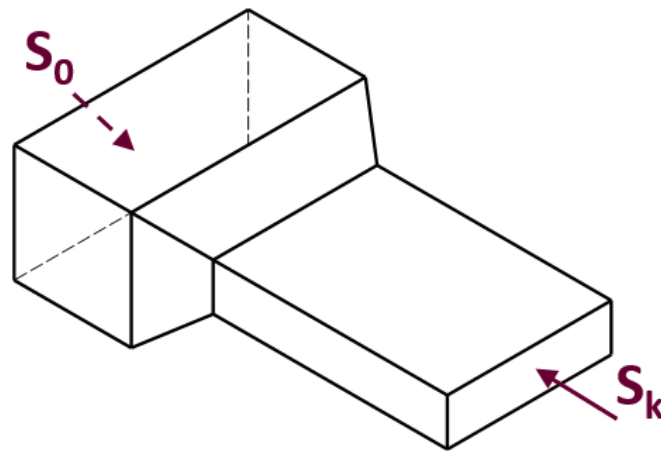
Při kování na mechanických lisech je nezbytné volit počáteční teplotu nižší než při kování na bucharech [7].

### Stupeň prokování

Při kování se rozrušují primární krystaly (dendrity) a dochází ke vzniku vláken. Tato vláknitá textura je již nevratná a nelze se jí zbavit. Vlákňitost ovlivňuje anizotropii vlastností materiálu ve směru vláken i příčném směru. Hlavně se ale mění se stupněm prokování. Z toho důvodu je důležité si dát pozor na správný směr vláken, protože výsledný směr největšího normálového napětí musí souhlasit se směrem vláken. Analogicky pak tečné napětí musí být k němu kolmé [5].

Stupeň prokování je v podstatě míra velikosti přetvoření materiálu. K jeho vyjádření se běžně používá změna velikosti plochy ve směru tváření, viz **Obr. 9**. Poslední dobou se však upřednostňuje deformační vyjádření v daném souřadném systému-  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ . Dále jsou stup-

něm prokování ovlivněny i vnitřní procesy odpevnění materiálu a to má za následek i změnu mechanických vlastností [7]. V praxi se běžně používá stupeň prokování 3 až 4 [5].



**Obr. 9** Poměr počáteční plochy a plochy po kování. Přejato z [7]

$$p = \frac{S_0}{S_k} \quad (1)$$

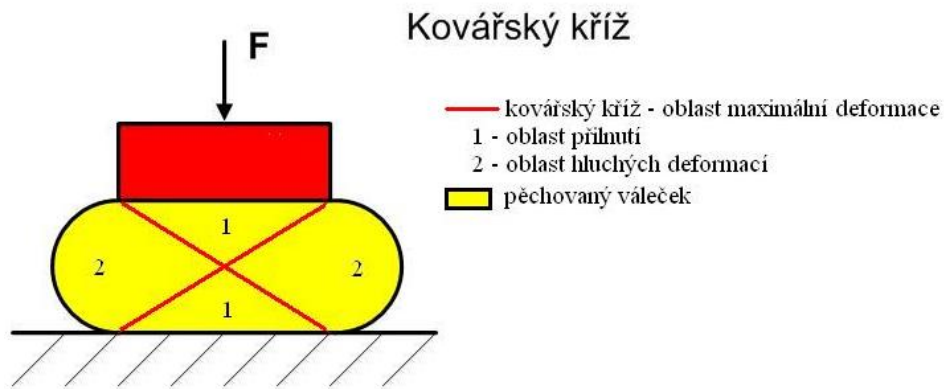
Kde : p- stupeň prokování [-]

$S_0$ - plocha před tvářením [ $\text{mm}^2$ ]

$S_k$ - plocha po tvářením [ $\text{mm}^2$ ]

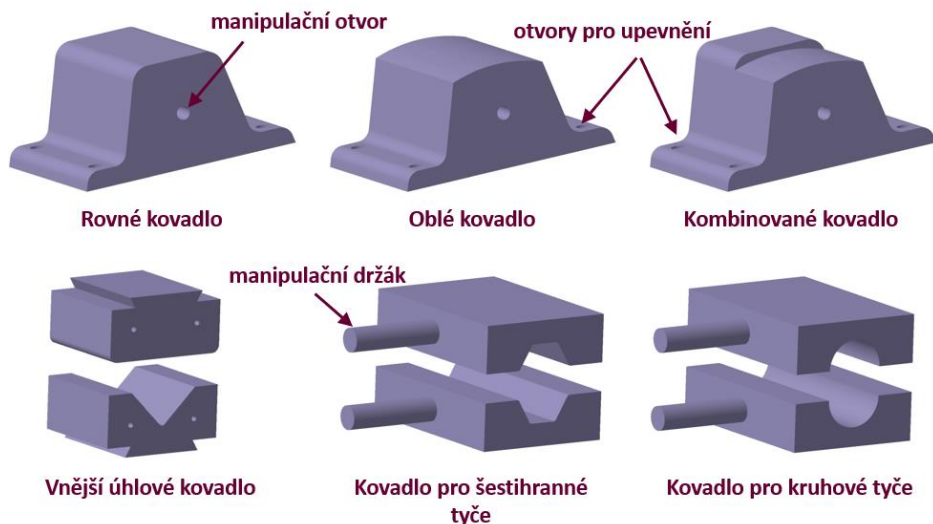
### 2.4.2 Volné kování

Obecně se může volné kování rozdělit na strojní a umělecké [7]. Strojní kování je prováděno nejčastěji pomocí bucharu nebo lisu. U bucharu, který deformuje materiál rázy, dojde k prokování pouze do určité hloubky materiálu. Zatímco lis, využívající pozvolný tlak, prokovává materiál v celém průřezu. Při volném kování dochází ke tření materiálu a nástroje, to má na svědomí vznik soudečkovitého výkovku. Aby bylo předcházeno tomuto jevu a zajištěno prokování ve všech částech výkovku, musí se výkovek otáčet. Oblast maximální deformace se nazývá kovářský kříž viz **Obr. 10** [5, 6].



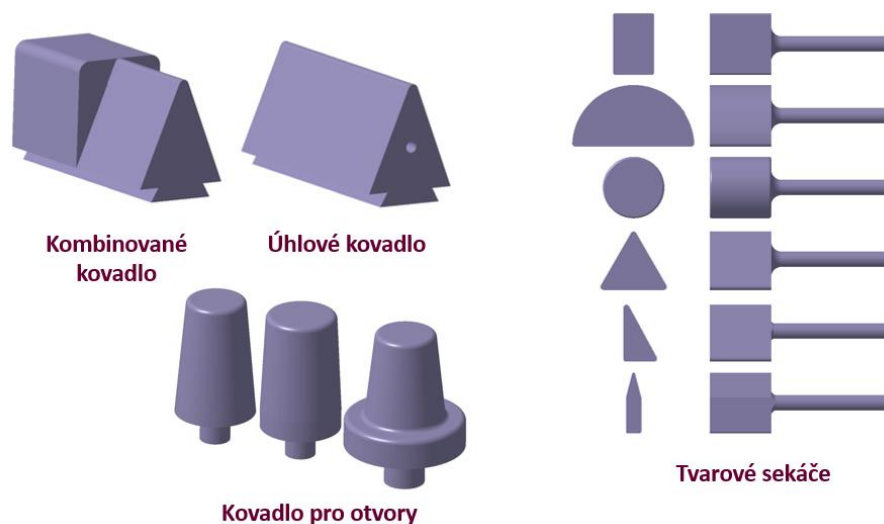
**Obr. 10** Kovářský kříž. Přejato z [5, 6]

Počátečním materiálem pro volné kování jsou ingoty a předvalky. Ty se deformují do požadovaného tvaru pomocí jednoduchých nástrojů, přípravků, univerzálních kovadel či speciálním polohování výkovku. Povrch výkovku je drsný a nerovný, tolerance rozměrů jsou velké. Nejvíce se používají kovadla, která jsou jednoduché geometrické tvary např. válcová, klínová, rovná viz **Obr. 11**. Tyto kovadla se upevňují k bucharu nebo lisu pomocí rybinovité části [5].



**Obr. 11** Nástroje pro volné kování. Přejato z [7]

Dále se používají i složitější kovadla jako jsou např. kombinovaná a úhlová, nebo také kovadla pro otvory či tvarové sekáče viz **Obr. 12** [5, 7].

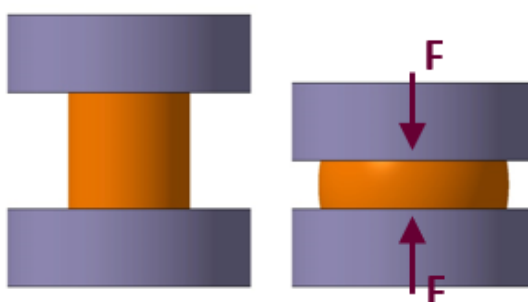


**Obr. 12** Nástroje pro volné kování. Přejato z [7]

Základními operacemi volného kování jsou: pěchování, prodlužování, osazování a děrování.

### Pěchování

Pěchování je charakteristické plastickou deformací, která se uskutečňuje mezi plochými nebo tvarovými čelistmi, možné i v dutině. Smyslem této operace je dosáhnout dokonalého prokování, pokles anizotropie nebo to může být samotná kovářská operace pro ploché výkovky. Plocha průřezu roste a výška výkovku klesá, viz **Obr. 13**. Důležité je zajistit rovnoměrný ohřev celého materiálu, mít rovnoběžné čelní plochy, vyvarovat se riziku ohybu vlivem štihlosti polotovaru a mít zajištěnou kolmost k ose stroje [5].

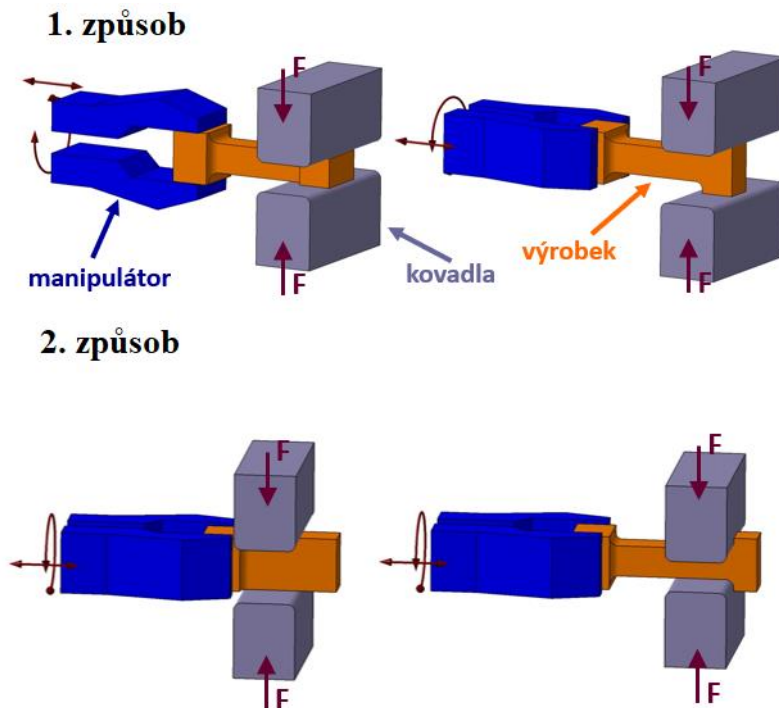


**Obr. 13** Operace pěchování. Přejato z [7]

### Prodlužování

Prodlužování nebo také vytahování, dloužení či kování do délky je nejpoužívanější operace při volném kování. Smyslem je sled pěchovacích operací provedené těsně vedle sebe. Tím získáme prodloužení a zmenšení plochy příčného řezu [5]. Je možné tuto operaci provádět

dět dvěma způsoby. První způsob je otočení výkovku po každém zdvihu o 90°, to zaručí lepší prokování ale kvůli časové prodlevě dochází ke snížení teploty. Druhý způsob je, že k otočení výkovku o 90° dojde až po vykování celé délky polotovaru. Tím docílíme menších časových prodlev, takže nedochází ke chladnutí. Na druhou stranu ale nedojde k tak kvalitnímu prokování jako v prvním případě [7]. Oba způsoby jsou vyobrazeny na **Obr. 14**.

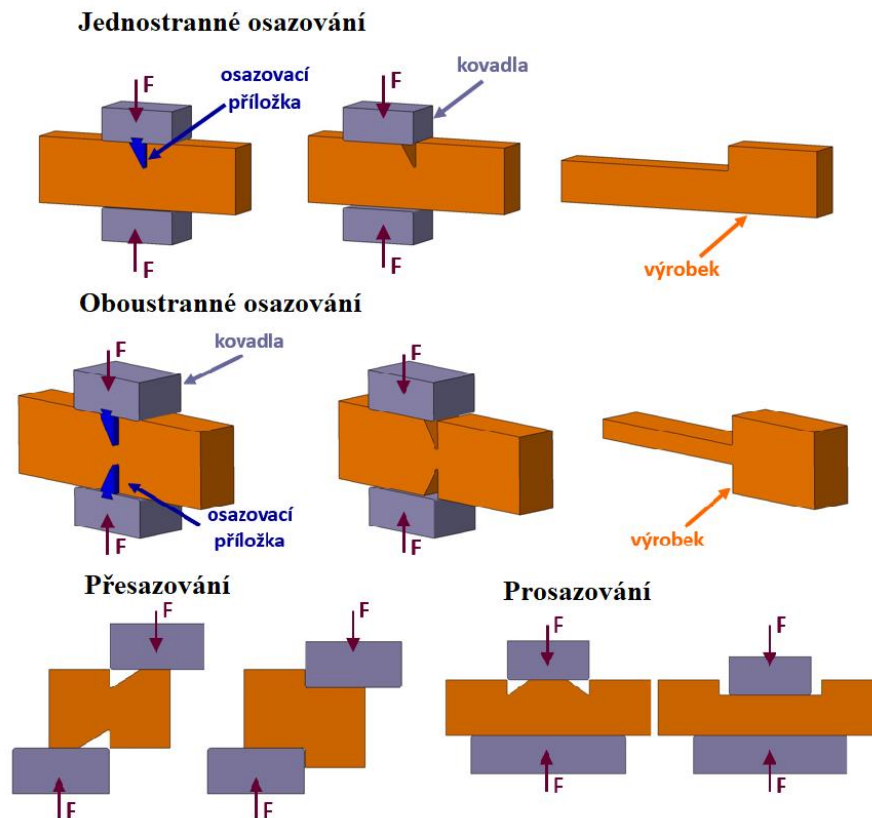


**Obr. 14** Operace prodlužování. Upraveno dle [7]

## Osazování

Pod touto tímto pojmem si lze představit opět několik dalších operací jako jsou: naznačování, prosazování, přesazování a děrování. Osazuje se z jedné strany nebo z obou stran. Přesazení lze zhotovit naznačením dvou míst na protějších stranách, viz **Obr. 15**. Pokud se provede dvojí přesazení, vznikne zalomení. Při děrování se vtláče kuželový trn do materiálu zhruba po 1/2 své délky. Následně se děrování dokončí stejným způsobem z druhé strany [5].

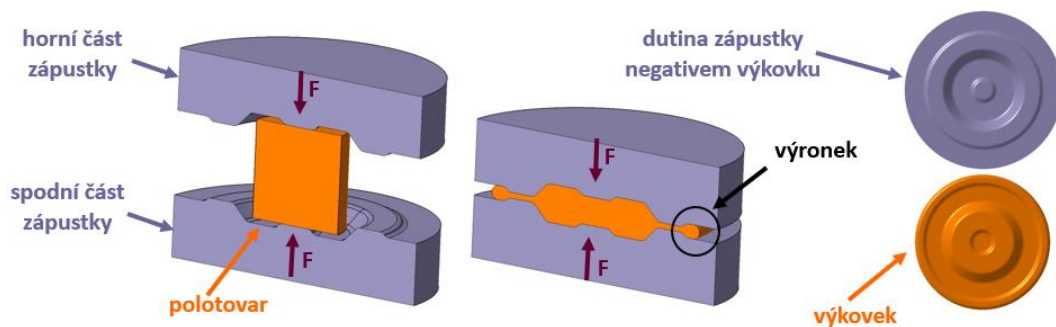




Obr. 15 Operace osazování. Upraveno dle [7]

### 2.4.3 Zápustkové kování

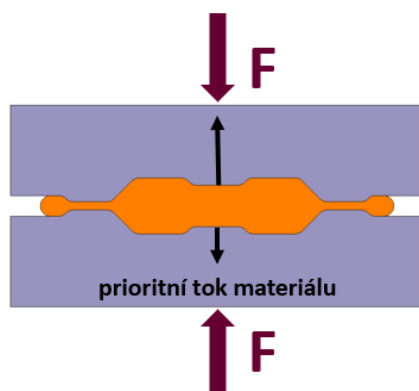
Při tomto typu kování se ohřátý materiál vloží do dutiny zápustky, kde se také tváří. Zápustka je nejčastěji tvořena ze dvou dílů. Má tvar negativu zhotoveného výkovku a její rozměry jsou zvětšeny o hodnotu smrštění materiálu. Hlavní výhodou oproti volnému kování je přesnost výkovku. Následným kalibrováním se dá zlepšit přesnost a jakost povrchu natolik, že již není třeba další obrábění. Další výhodou je dosažení vysokého stupně prokovaní. Provádí se na bucharech nebo lise stejně jako volné kování. Polotovár má větší objem než hotový výrobek. Prebytečný materiál se vytlačí po obvodu výkovku tzv. výronek (viz Obr. 16), který se následně ostříhuje [5, 7].



**Obr. 16** Zápustkové kování. Přejato z [7]

### Zápustkové kování na bucharech

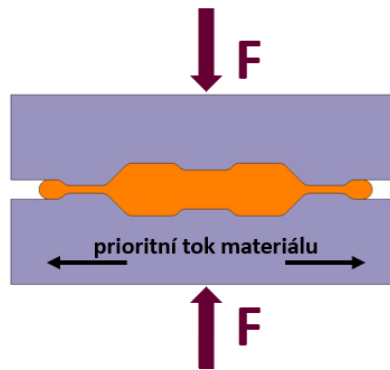
Tvářecí síla zde působí dynamicky a prioritní směr deformace je rovnoběžný se směrem zatěžující síly, viz **Obr. 17** [7]. Dutina zápusťky se zaplňuje postupně v rozmezí několika úderů. Pro buchary je velmi důležité upnutí zápusťkového bloku k bucharu, protože vlivem rázů se zápusťka snadno uvolní. Proto se zápusťka určena pro buchar vybaví rybinou a upne se za pomoci pera a klínu [5].



**Obr. 17** Zápustkové kování na bucharu. Přejato z [7]

### Zápustkové kování na lisech

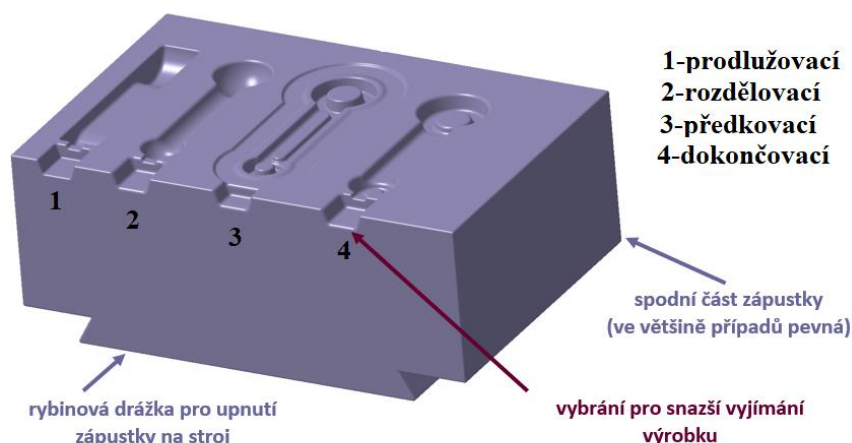
Tvářecí síla zde působí spojitě a roste. Prioritní směr deformace je kolmý na směr zatěžující síly, viz **Obr. 18** [7]. Docílení tvaru výkovku je během jediného zdvihu lisu. Nejčastěji se používají svislé klikové lisy, na nich lze vyrábět jednoduché tvaru výkovků pro velké série. Zápustky pro lisy se upínají přes stopky, šrouby a příložky. Lze zde docílit velké produktivity použitím sdužených vícenásobných dutin. V takových dutinách spolu výkovky sdílí výronek, z toho vyplývá, že k jejich oddělení dojde až po odstrižení výronku [5].



**Obr. 18** Zápustkové kování na lisu. Přejato z [7]

### Postupové zápustkové kování na bucharech

Nelze vytvářet složité výkovky na jednu operaci, proto se používají postupové zápustky. Zápustka má několik dutin, které postupně mění tvar polotovaru na požadovaný výkovek, viz **Obr. 19**. První dutina se nazývá prodlužovací či zužovací. V té se kove na jeden úder, redukuje se průřez velmi málo a dochází k posunu kovu v osovém směru. Druhá dutina je rozdělovací. V té se kove dva až čtyři údery s 90° otočením. Dochází k pěchování spolu s pohybem kovu ve směru osy. Nyní je vytvořen tzv. ideální předkovek. Třetí dutina je předkovací dutina. V ní počet úderů závisí na složitosti tvaru. Běžně ale stačí jeden až tři údery. Pohyb kovu v ose je už minimální a z kruhového průřezu se již stává konečný tvar. Poslední dutina je dokončovací. Zde se provádí už jen jeden úder a výkovek již dostává tvar konečného výrobku. Materiál, který je navíc se vytlačuje do výronkové drážky. Protože v této dutině dochází k největším tvářecím silám, je tato dutina umístěna na střed nástroje. Nakonec se výkovek vyjme, ostříhne se výronek a probijí otvory pokud na výkovku jsou [7].

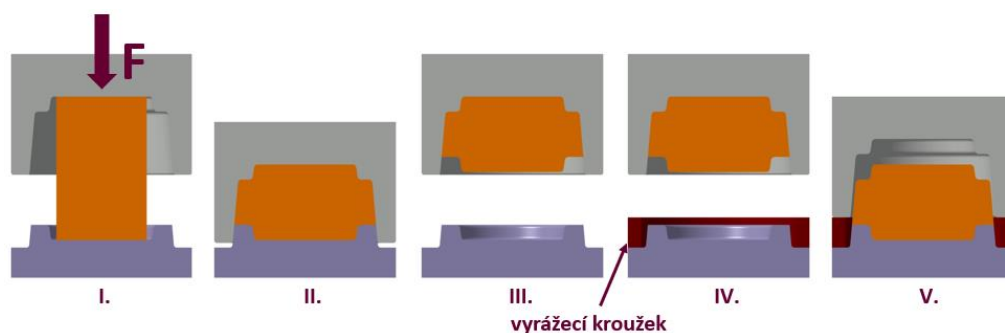


**Obr. 19** Dutiny postupové zápusky. Upraveno dle [7]

## 2.4.4 Speciální metody kování

### Přesné kování na bucharech

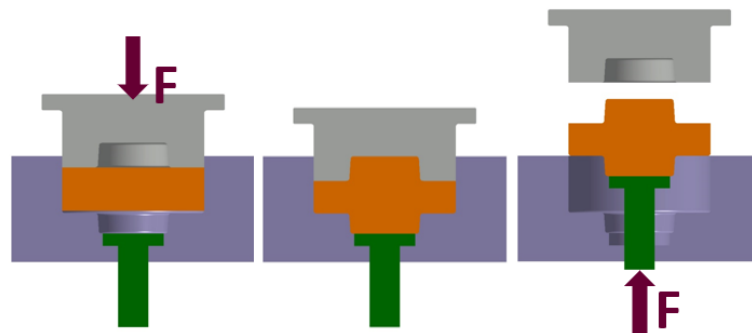
Přesné výkovky s vysokou kvalitou, které mají malé přídavky na další obrábění, se dostanou z uzavřených zápusetek přesným kovááním. Jedná se hlavně o rotační tvary. Je nutné dodržet shodnost objemu polotovaru s objemem výrobku. Další podmínkou jsou malé úkosy do  $3^\circ$ . Protože zde dochází k velkým tvářecím silám, stroje i nástroje jsou velmi namáhány. Někdy bývá nelehké vyjmutí výrobku viz **Obr. 20** pozice III.. V těchto případech lze použít vyřázečcí kroužek a vlivem setrvačné síly výrobek vyjmout viz **Obr. 20** pozice IV. a V. [5, 7].



**Obr. 20** Princip přesného kování na bucharu. Přejato z [7]

### Přesné kování na lisech

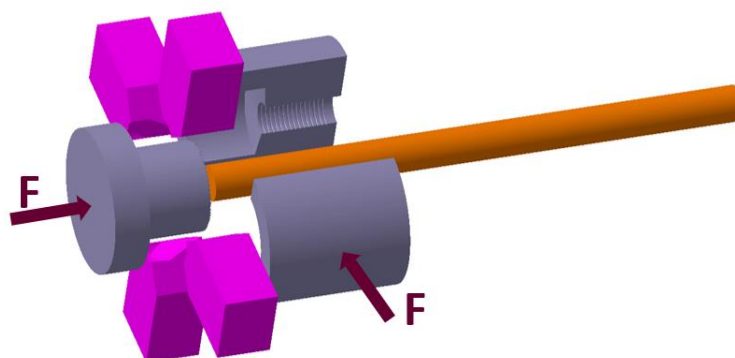
Princip je téměř totožný s přesným kovááním na bucharech, pouze nesmí mít výkovkek vnějších úkosy a pro vyjímání se použije spodní vyhazovač dle **Obr. 21** [7].



**Obr. 21** Princip přesného kování na lisech. Přejato z [7]

### Kování na vodorovných kovacích strojích

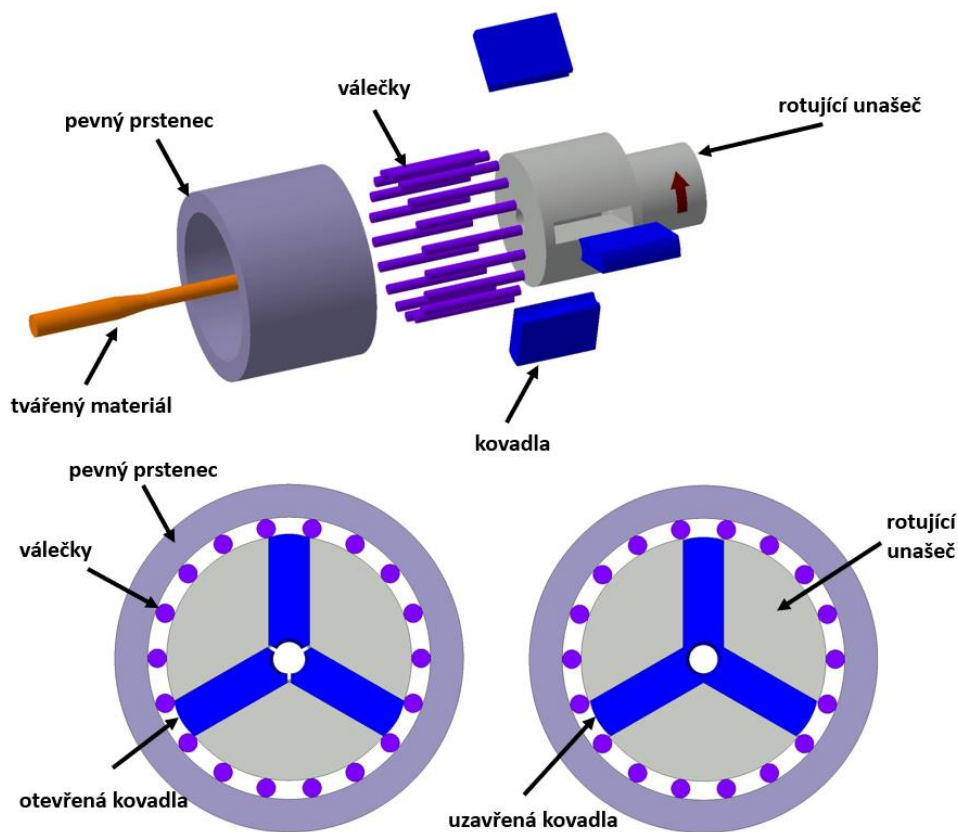
Tento proces umožňuje částečnou či celkovou automatizaci. Zápustka je zde třídílná, uzavřená a bez výronkové drážky. Dutina má dva díly, které jsou rozděleny vodorovně nebo svisle. Když dojde k přiblížení obou dílů, sevře se materiál tyčového tvaru. V tuto chvíli se třetí díl, který pěchuje, zasouvá ve směru osy. Objem materiálu je přesně určen zarážkou. Nakonec pomocí posuvného nože se oddělí výkovek od tyčového materiálu a celý proces se může opakovat. Je to typická výroba hlav hřebíků a šroubů, viz **Obr. 22**. Tyto stroje dosahují vysokého počtu zdvihů, až 1000/min [5, 7].



**Obr. 22** Kování na vodorovných kovacích strojích. Přejato z [7]

### Rotační kování

Při tomto kování lze kovat pouze rotační tvary. Princip této metody spočívá v tom, že vlivem odstředivé síly jsou kovádla tlačena na vnější okraj pevného prstence. Tam ale dojde ke srážce a odrazu od válečků. Tím se dosáhne redukce průřezu [7]. Názorné schéma je na **Obr. 23**.



Obr. 23 Rotační kování. Upraveno dle [7]

### 2.4.5 Válcování

Válcování je děj, kdy se materiál tváří mezi tzv. pracovními válci, které se otáčejí při působení tlaku ze všech stran. Tvářený polotovár mění svoji výšku, šířku a délku. Finální produkt po válcování se nazývá vývalek. V závislosti na směru válcování, na variantě uložení válců oproti válcovanému materiálu a také průběhu deformace lze válcování rozdělit na podélné, příčné či kosé [5, 6].

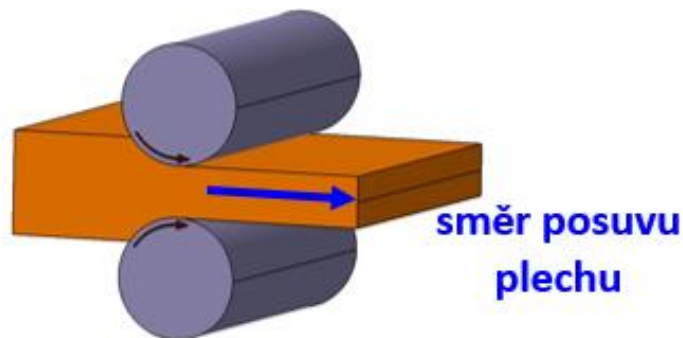
Nejdůležitější podmínkou, kterou je nutné u válcování dodržet je tzv. podmínka pro záběr válce. Ta říká, že tečná síla musí být větší než síla normálová. Přičemž tečná síla je ovlivněna koeficientem tření mezi válcovaným materiálem a pracovním válcem, a sílu normálovou ovlivňuje velikost záběru, deformační odpor válcovaného materiálu a poloměr pracovního válce [9].

Pokud se za sebe seřadí několik válcovacích stolic, vznikne válcovací trať. Válcovací trať zajistí efektivitu a produktivitu procesu. Na hrubé válcování je v tratích méně stolic

s většími úběry, zatímco pro jemné válcování je počet stolic větší a úběry menší s následnými kalibrovacími válci [5, 6].

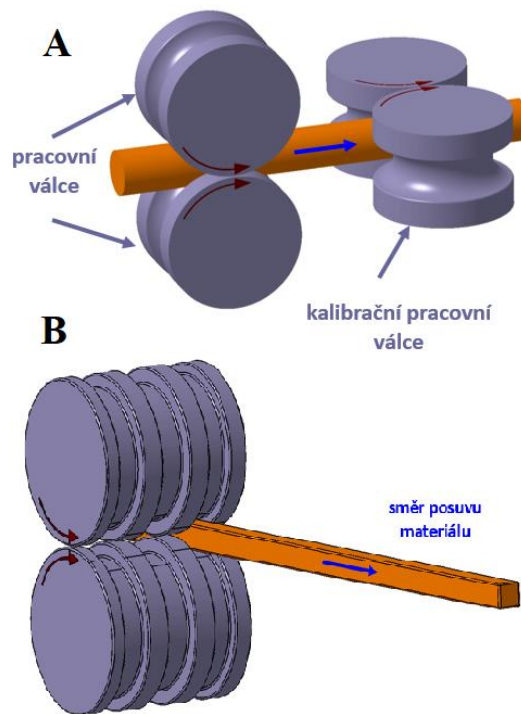
### Podélné válcování

Jak název napovídá, válcuje se v podélném směru, viz **Obr. 24**. Při této operaci vznikají plechy, tyče, kolejnice a další dlouhé polotovary. Je možné vyrábět profily s kruhovým i čtvercovým průřezem. Plastické deformace se odehrává jen v malé části objemu materiálu. Nejvýraznější změnou rozměru je změna tloušťky, změna délky a šířky není tak markantní [5, 6].



**Obr. 24** Podélné válcování plechů. Přejato z [9]

Při podélném válcování tyčí se pracovní válce nedotýkají, to může způsobit nedokonalost tvaru. Profil válců odpovídá negativu profilu, který se vyrábí, viz **Obr. 25** [9].

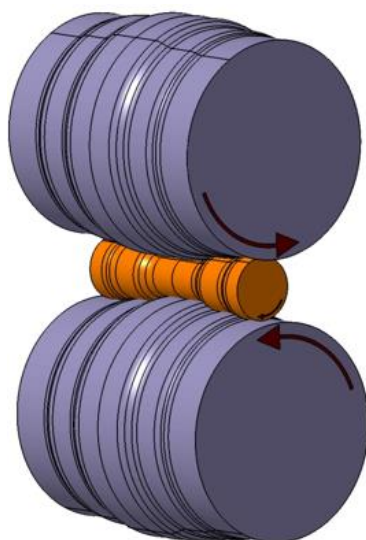


**Obr. 25** A-podélné válcování tyčí, B-podélné válcování čtvercových tyčí. Upraveno dle [9]

### Příčné válcování

Tímto typem je měněn příčný průřez pro zhotovení osazených hřídelů [5]. Hlavní rysem tohoto typu je rovnoběžnost os pracovních válců a materiálu. Profil válců je opět negativem požadovaného tvaru, viz **Obr. 26** [6]. Mírnou nevýhodou je skutečnost, že lze vyrábět pouze rotační součásti [9].

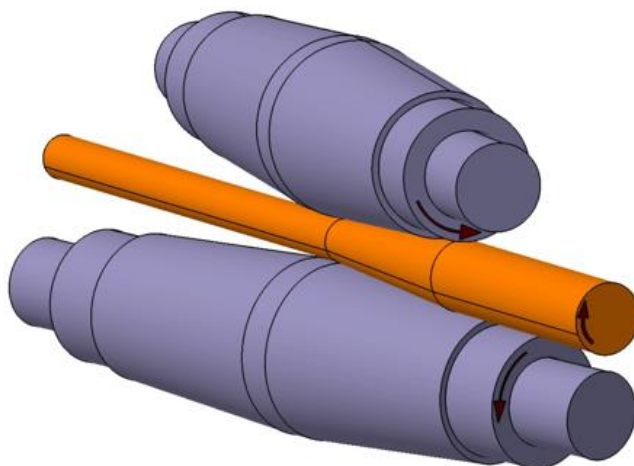




**Obr. 26** Příčné válcování. Přejato z [9]

### Kosé válcování

Kosé válcování se vyznačuje mimoběžností os, která lze vidět na **Obr. 27**. Materiál je posouvám vlivem axiální složky síly a radiální složky zvyšuje smykové napětí čímž přispívá k deformaci materiálu [5, 9].



**Obr. 27** Kosé válcování. Přejato z [9]

### 2.4.6 Válcování trubek

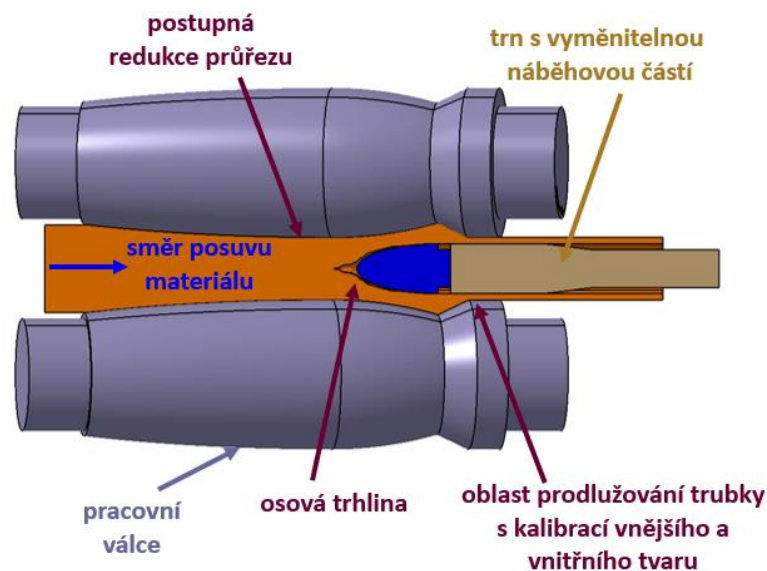
Bezešvé trubky se vyrábějí válcováním. Hlavní rozměry, na kterých u trubek záleží, jsou průměr a tloušťka stěny. Rozlišuje se výroba dutých trubek pomocí příčného nebo kosého

válcování (Mannesmanův způsob, Stiefelův způsob, atd.) a redukce průřezu s tloušťkou stěny (poutnická stolice, Asselův způsob, Diescherův způsob, atd.) [5, 6, 9].

Způsobů válcování je velké množství, proto bude zde uvedeno pouze pár nejpoužívanějších.

### Mannesmanův způsob

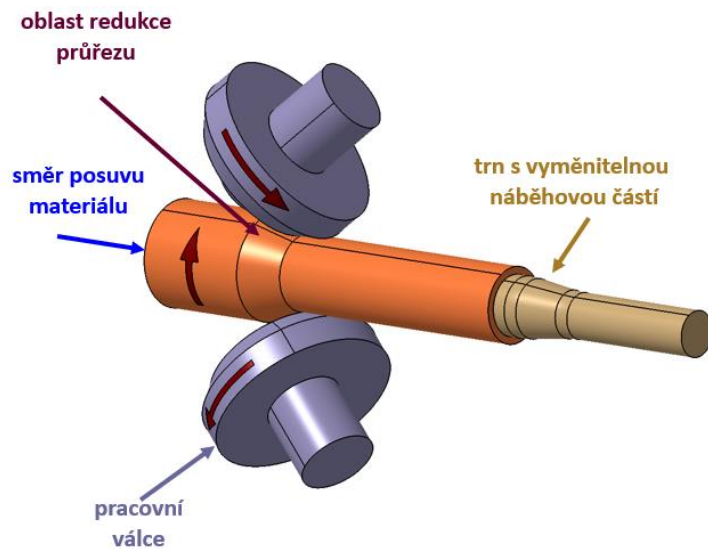
Pouze tyčový materiál je vhodný. Pracovní válce jsou kosé a konvexní. V první kroku materiál rotuje a posouvá se mezi pracovními válci. Vlivem změny profilu pracovních válců, docílí se značné plastické deformace. V druhém kroku materiál opouští část, kde dochází ke kompresi a vlivem smykových a obvodových napětí se objeví v ose výrobku trhlina. Tím, že se materiál stále posouvá na trn, dojde k rozšíření trhliny a ta pomalu získává tvar budoucího otvoru trubky [9]. Kompletní schéma viz **Obr. 28**.



**Obr. 28** Mannesmanův způsob. Přejato z [9]

### Stiefelův způsob

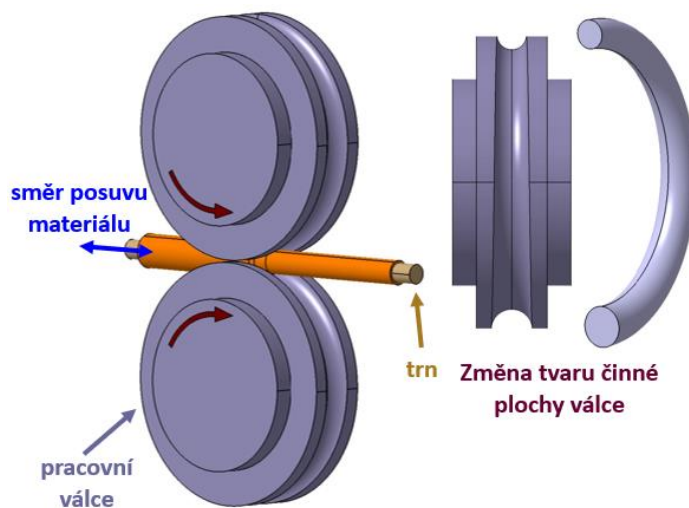
Materiál rotuje a posouvá se mezi pracovními válci. Opět se využívá kosé válcování. Pracovní válce mají vyšší tuhost než válce používané při Mannesmanovu způsobu a jsou natočeny vzhledem k ose o úhel, který nepřekračuje  $10^\circ$ , viz **Obr. 29** [9].



**Obr. 29** Stiefelův způsob. Přejato z [9]

### Poutnická stolice

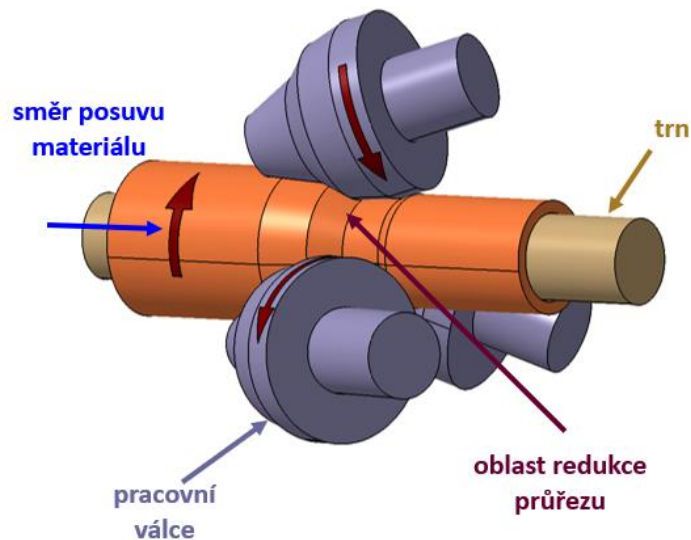
Opět se používá trn, který odpovídá požadovanému vnitřnímu průměru trubky. Osový posun materiálu je nucený a částečně vratný, kdy se po každém návratu pootočí, viz **Obr. 30**. To má za následek tváření díky přítržím neboli kroků či skoků, proto název poutnická stolice [5].



**Obr. 30** Poutnická stolice. Přejato z [9]

### Asselův způsob

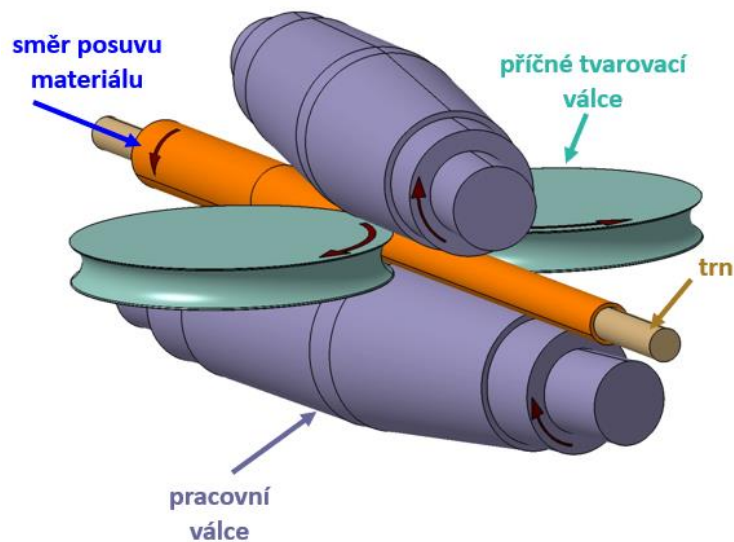
Asselův způsob neboli použití tříválcové kuželové stolice. První kužel je záběrový, druhý válcuje a třetí rozvaluje a kalibruje, viz **Obr. 31**. Úhel na točení kuželových válců je do  $10^\circ$  [5, 9].



**Obr. 31** Asselův způsob. Přejato z [9]

### Diescherův způsob

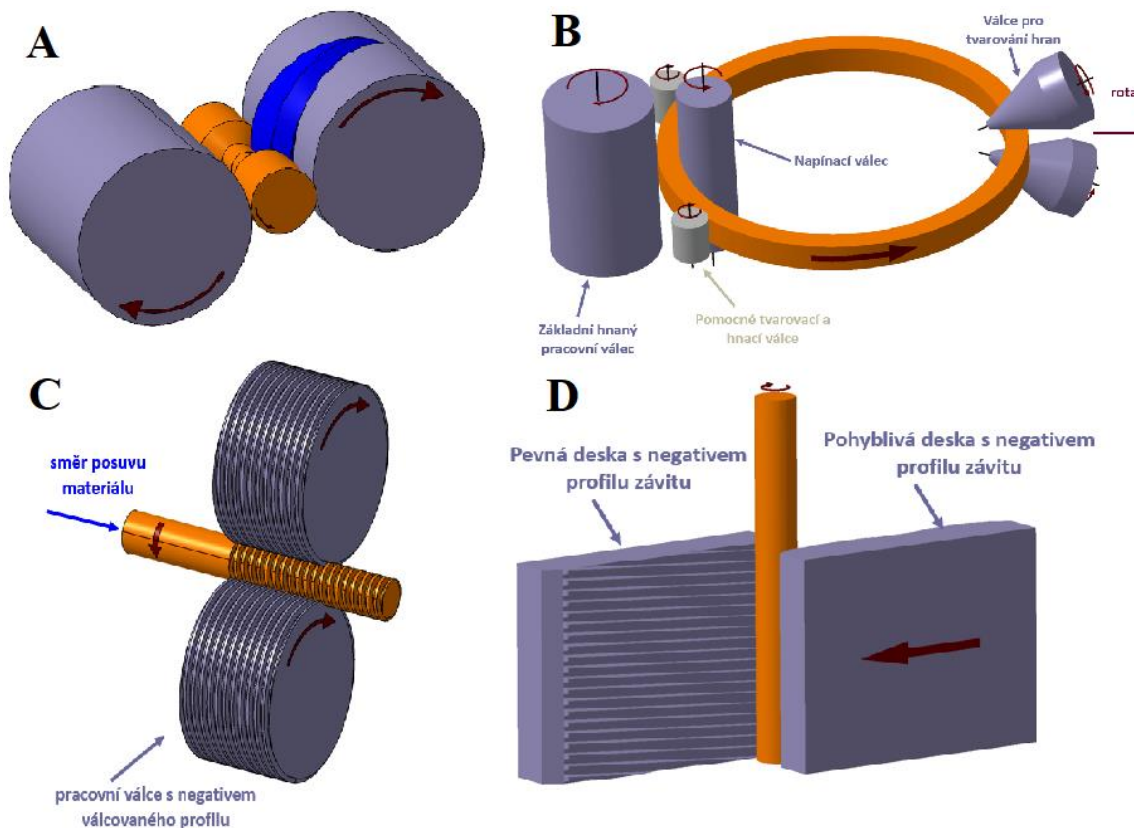
Je to v podstatě kontinuální výroba trubek, kde příčné tvarovací válce mají na starosti přesnost tvaru a rozměru, která je vysoká. Natočení pracovních válců je opět do  $10^\circ$ , viz **Obr. 32**. Tento způsob se používá pro výrobu trubek do průměru 150 mm a tloušťky stěny zhruba 3 mm [9].



**Obr. 32** Diescherův způsob. Přejato z [9]

### 2.4.7 Speciální způsoby válcování

Principy těchto dalších způsobů jsou graficky znázorněny na **Obr. 33**.



**Obr. 33** A-Přičné klínové válcování, B-Válcování prstence, C-Podélné válcování závitů, D-Válcování závitu pomocí desek. Upraveno dle [9]

## 2.4.8 Protlačování

Charakteristikou této technologie je deformace materiálu za působení síly do daného směru. Nástroj se nazývá průtlačnice a má takovou konstrukci, aby v ní vznikala tlaková napjatost do všech stran. Právě tento druh napjatosti umožňuje výrobu tvarově složitých výrobků. Výhodou je vysoké využití materiálu, které mezi 90 a 100%. Dále také dosahuje vysoké kvalitu povrchu i rozměrové přesnosti. Nevýhodou ale může být poměrně vysoká ceny nástrojů protože se vlivem vysoké plastické deformace zahřívají. Často se také není možné vyhnout použití hydraulických lisů v důsledku extrémních tvářecích sil [5, 6, 10]

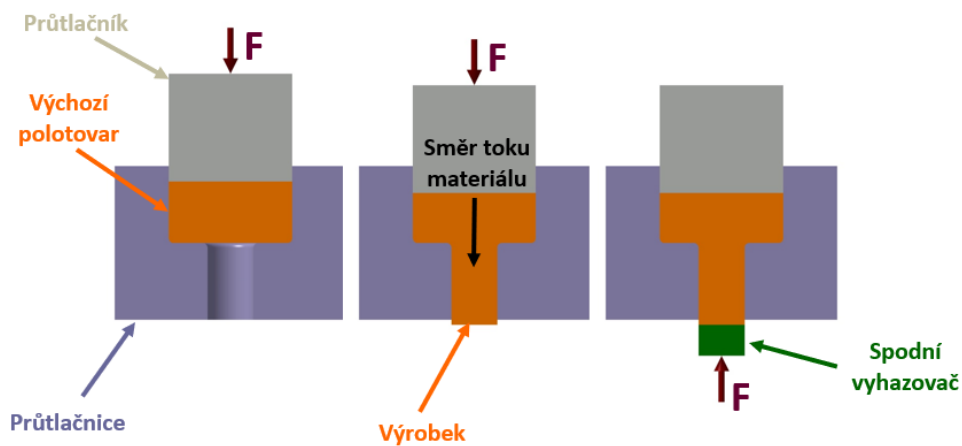
Důležitá je příprava materiálu která se skládá z části strukturální a části povrchové.

Strukturální část má za cíl snížit deformační odpor o co největší hodnotu. V drtivé většině se tak docílí žíhání na měkko nebo rekrytalizačním žíháním a následným žíháním na měkko.

V povrchové části se dělí materiál z tyče na tzv kaloty, odstraní se povrchová vrstva materiálu mechanicky tzv. loupáním, dále se mechanicky a chemicky očistí materiál. Při použití ocelí, nebo když je vyráběn složitý výrobek, je povrch fosfátován fosforečnanem zinečnatým [10].

### Dopředné protlačování

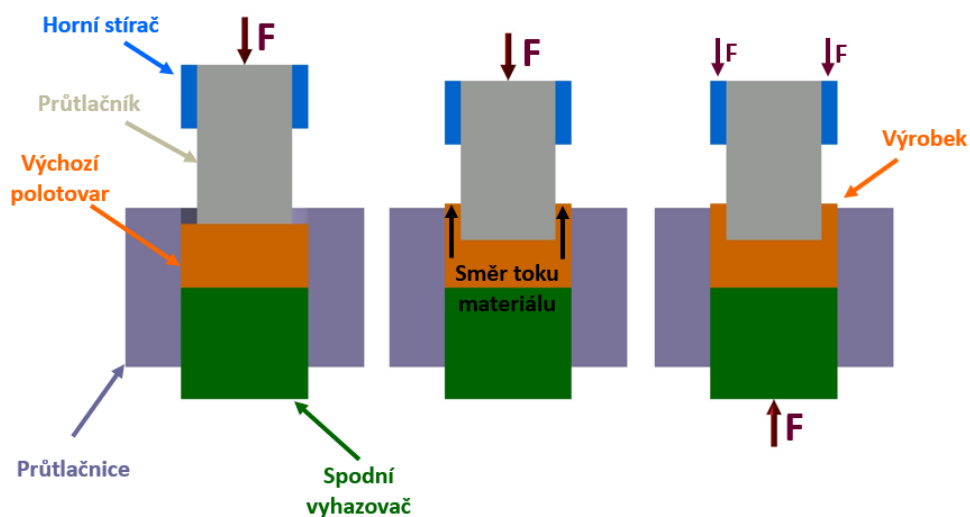
Směr zatěžující síly je stejný se směrem toku materiálu, viz **Obr. 34** [10]. Využití při výrobě čepů, šroubů a podobných výrobků, které nemají konstantní průřez [5].



**Obr. 34** Dopředné protlačování. Přejato z [10]

### Zpětné protlačování

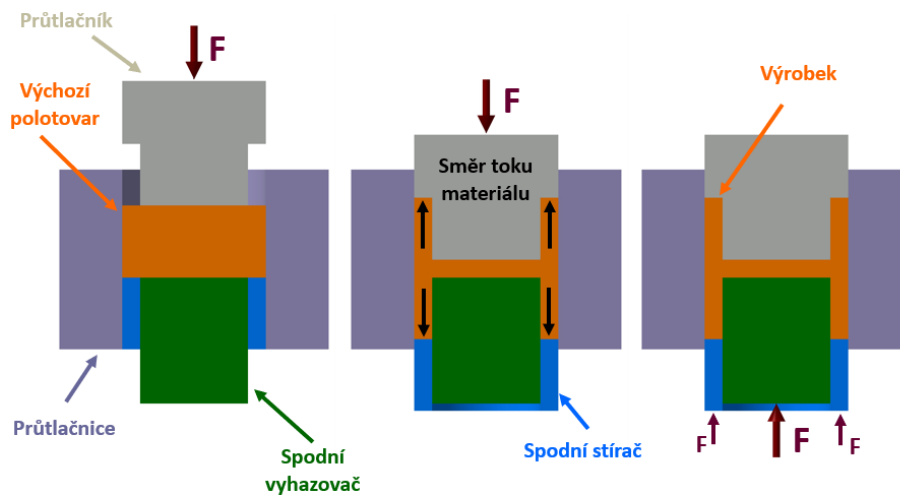
Směr zatěžující síly je opačný ke směru toku materiálu, viz **Obr. 35** [10]. Využití při výrobě průtlačků, které jsou duté a mohou mít i žebra [5].



**Obr. 35** Zpětné protlačování. Přejato z [10]

## Kombinované protlačování

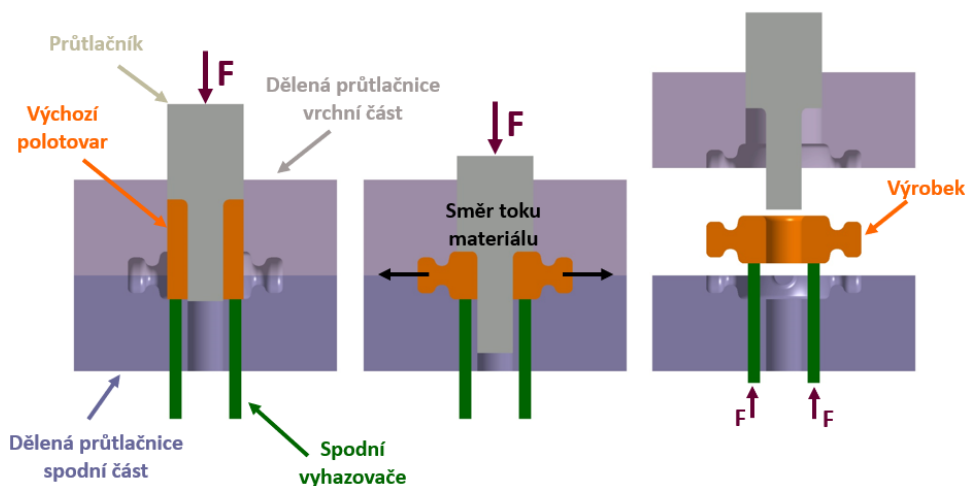
Materiál teče ve směru i proti směru zatěžující síly, viz **Obr. 36** [10]. U tohoto způsobu se musí dbát na to, aby stupeň deformace ve spodní části průtlačníku nebyla menší než v horní části. Pokud by se tak stalo, materiál by nezatekl až na dno [5].



**Obr. 36** Kombinované protlačování. Přejato z [10]

## Stranové protlačování

Tok materiálu je kolmý na směr zatěžující síly [10]. Výroba průtlačků, které mohou mít vnější i vnitřní osazení z obou stran, viz **Obr. 37** [5].



**Obr. 37** Stranové protlačování. Přejato z [10]

## Radiální protlačování

Směr toku materiálu je rovnoběžným i kolmý ke směru zatěžující síly [10].

## 2.5 Vliv teploty na změnu mechanických vlastností materiálu

Mezi mechanické vlastnosti řadíme pevnost, pružnost, tvrdost a houževnatost.

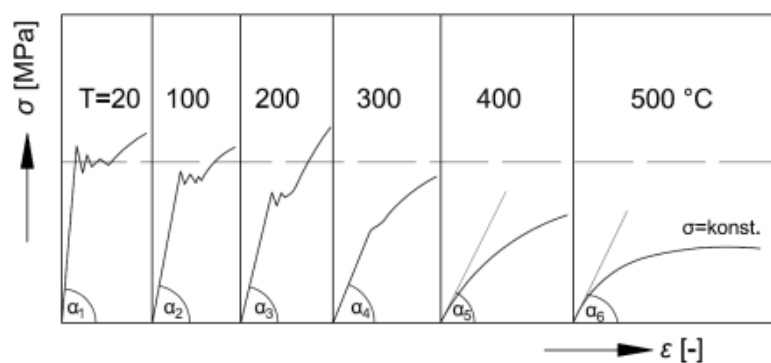
Pevnost je hodnota největšího napětí, které je zapotřebí k poruše materiálu.

Pružnost se rozumí jako vlastnost materiálu se deformovat za působení vnější síly a eliminaci této síly se vrátit do původního stavu.

Tvrdost neboli odpor působící proti vniknutí cizího tělesa do materiálu.

Houževnatost se může definovat jako velikost práce, která je potřeba k rozdělení materiálu na více částí [11, 12].

Většina železných kovů má svou maximální pevnost při teplotě okolo 200°C. U neželezných kovů tomu tak je při pokojové teplotě [13]. Dále při nízkých teplotách roste mez kluzu a zmenšuje se plasticita s houževnatostí. V praxi je ale běžné namáhání materiálu při vysokých teplotách. Na **Obr. 38** je zřejmé, že když teplota roste, zmenšuje se úhel mezi lineární částí a vodorovnou osou, klesá výrazná mez kluzu dokud zcela nezmizí a právě v tomto bodě kov začíná téci [14].

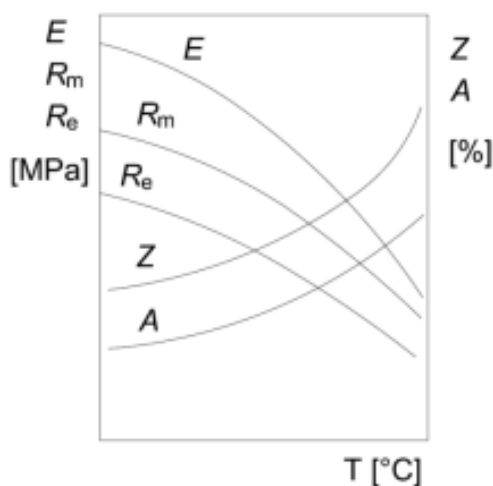


**Obr. 38** Vliv teploty na změnu tvaru křivky diagramu v tahu nízkouhlíkové oceli.

Přejato z [14]

Závislost modulu pružnosti  $E$ , meze pevnosti  $R_m$ , meze kluzu  $R_e$ , tažnosti  $A$  a kontrakce  $Z$  je vidět na **Obr. 39**. Na zmíněném obrázku, při rostoucí teplotě, je názorný pokles modulu pružnosti, meze pevnosti a meze kluzu, přičemž tažnost s kontrakcí zaznamenávají růst [14].

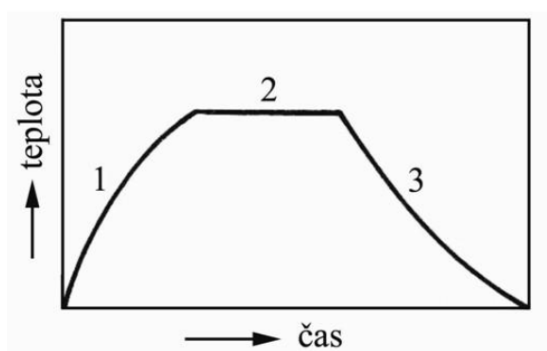




**Obr. 39** Změna mechanických vlastností v závislosti na teplotě. Přejato z [14]

## 2.6 Základní přehled způsobů tepelného zpracování kovových materiálů

Vlastnosti kovových materiálů nejsou ovlivněny pouze chemickým složením, ale hlavně jejich strukturou. A právě požadované struktury materiálu lze docílit vhodným tepelným zpracováním. Tepelné zpracování se definuje jako všechny procesy, při kterých zvyšujeme či snižujeme teplotu abychom získali požadované vlastnosti materiálu. Obecně lze tvrdit, že je vždy jedná o sled třech hlavních operací: ohřev, výdrž a ochlazení, viz **Obr. 40**. Přičemž rychlost ohřevu, doba výdrž nebo i rychlost ochlazení se mohou lišit podle konkrétního druhu tepelného zpracování a udává se v  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  při vysokých rychlostech a při malých rychlostech v  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  popř.  $^{\circ}\text{C}/\text{hod}$  [15].



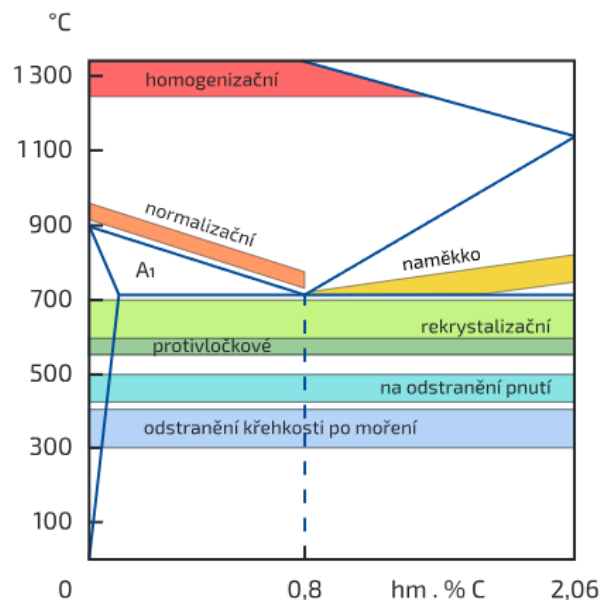
**Obr. 40** Schéma tepelného zpracování, 1-ohřev, 2-výdrž na teplotě, 3-ochlazení. Přejato z [16]

## 2.6.1 Žihání

Žihání je proces, který způsobuje pokles tvrdosti materiálu nebo odstranění pnutí, které vzniklo předchozím tvářením, obráběním či svařováním [17]. Charakteristika žihání je ohřátí součásti, výdrž na žihací teplotě, která je odlišná pro různé materiály, a pomalé až často velmi pomalé ochlazení. Žihání lze rozdělit na: žihání ocelí, žihání liti a žihání neželezných kovů [15].

## 2.6.2 Žihání ocelí

Žihání ocelí se dělí na žihání s překrystalizací a bez překrystalizace. Tyto jevy jsou odděleny překrystalizační teplotou, která u ocelí je 400 až 700°C. Hlavními druhy žihání ocelí jsou rekrytalizační, ke snížení pnutí, na měkko, normalizační a homogenizační dle **Obr. 41** [15, 17].



**Obr. 41** Oblasti žihacích teplot v rovnovážném diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C. Přejato z [17]

### Žihání rekrytalizační

Důvodem použití rekrytalizačního žihání je schopnosti odstranit deformované zrna a zpevnění, které vzniklo při tvářením za studena, a obnovení schopnosti plastické deformace. Začne se ohřevem na rekrytalizační teplotu, která je 550 až 700°C, následuje výdrž na této teplotě, která může trvat pár desítek sekund ale i několik hodin, a jako poslední je ochlazení. Vše probíhá bez změny krystalografické mřížky [15].

## **Žihání k snížení pnutí**

Díky tomuto žihání je možné zajisti pokles vnitřních pnutí, které běžně vznikají při obrábění, sváření, za určitých podmínek i při tváření za tepla ale i při rychlém a nerovnoměrné ochlazování na vzduchu. Teplota, kterou se materiál ohřívá se pohybuje od 500 do 650°C. Dále se provádí výdrž trvající klidně až 10 hodin. Ochlazení je realizováno na dvě části a záleží na velikosti a tvaru součásti. V první části se ochlazuje v peci do teplot 250 až 300°C, druhá část ochlazování je dochlazení na vzduchu [15, 17].

## **Žihání na měkko**

Toto žihání se používá za účelem co největšího snížení tvrdosti a tím získání snadné obrobitelnosti. Nejčastěji se používá pro nástrojová oceli či některé konstrukční legované oceli. Podle chemického složení se materiál ohřeje na 650 až 720°C, následuje výdrž po dobu 2 až 8 hodin (běžně však stačí 4 hodiny) [17]. Posledním krokem je pomalé ochlazování v peci rychlostí zhruba 20°C/hod na teplotu 450 až 550°C s dalším dochlazením na vzduchu [15].

## **Žihání normalizační**

Normalizační žihání má uplatnění u odlitků a výkovků, ty totiž mají nehomogenní strukturu a velká zrna, která mají nepříznivý vliv vlastností ocele [17]. Je to první druh žihání u kterého dochází k překrytalizaci. Opět v závislosti na chemickém složení se materiál ohřívá na 800 až 920°C. Výdrž musí být dostatečná aby se docílilo homogenního austenitu a ochlazení na vzduchu. Výsledný materiál má vyšší pevnost a celkem jemnozrnnou strukturu. Normalizační žihání je možné provádět i v modifikacích jako např. základní, s částečnou austenitizací a izotermické [15].

## **Žihání homogenizační**

Hlavním rysem homogenizačního žihání jsou bezkonkurenčně nejvyšší teploty ze všem typů žihání. Cílem je eliminace rozdílů chemického složení, které má na svědomí odlévání. Ohřev se provádí na teplotu okolo 1300°C [17], výdrž trvá cca 6 hodin [18] a ochlazení na vzduchu [17].

## **2.6.3 Kalení**

Kalením se docílí nárůst tvrdosti oceli. Skládá se z ohřevu na kalící teplotu, která je 800 až 920°C, výdrží na této teplotě a kritickým ochlazením. Tím, že se materiál ochladí tato vysokou rychlostí dojde k potlačení vzniku perlitu s feritem a místo nich se nestabilní austenit, který se zachoval, pod teplotou 500°C přemění na martenzit či bainit.

Kalitelnost je schopnost materiálu získat zvýšenou tvrdost pomocí kalení.

Prokalitelnost se definuje jako schopnost materiálu dosáhnout zvýšené tvrdosti do dané hloubky pod povrchem [15].

Kalící prostředí se používají: voda, oleje či minerální oleje, roztavené solné lázně, roztavené kovové lázně, vzduch (pro samokalitelné oceli) [15, 19].

## 2.6.4 Martenzitické kalení

### Nepřetržitě kalení

Je to jeden z nejběžnějších způsobů. Začíná se ohřevem na kalící teplotu, následuje výdrž nutná k získání homogenního austenitu a ochlazení ve vhodném kalícím prostředí, které musí mít teplotu nižší než je počáteční teplota martenzitické přeměny. Je vhodné po ochlazení zařadit popouštění [15, 19].

### Lomené kalení

Od nepřetržitého kalení se liší pouze ve fázi ochlazení. A to tak, že se provádí ve dvou lázních. První lázeň má za úkol snížit teplotu aby byla nepatrně vyšší než teplota  $M_s$ . Následně se součást dochládí ve druhé lázni přímo v oblasti martenzitické přeměny vlivem menšího chladicího efektu této druhé lázně [15, 19].

### Částečné kalení

Využívá se nejčastěji pro kalení jednobřítých nástrojů. Smysl spočívá v tom, že se zakalí pouze ta část nástroje, která má mít požadovanou tvrdost [15, 19].

### Termální kalení

Toto kalení má za cíl snížit pnutí současně s deformacemi v kalené součásti. Součást je ohřáta na austenitizační teplotu a vlivem solné lázně, která má teplotu lehce nad  $M_s$ , se ochladí přičemž setrvání na této teplotě nezapočne bainitický rozpad [15].

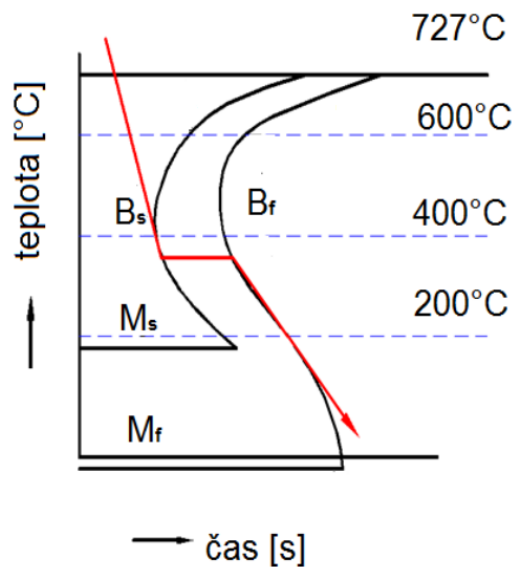
### Kalení se zmrazováním

Toto ochlazení následuje po martenzitickém kalení. Provádí se tak, že ochlazená ocel má teplotu  $M_f$ , která leží pod  $0^\circ\text{C}$ , se dále ochladí pod bod mrazu čímž se docílí maximálního rozpadu zbylého austenitu na martenzit [15, 19].

## 2.6.5 Baitické kalení

### Izotermické baitické kalení

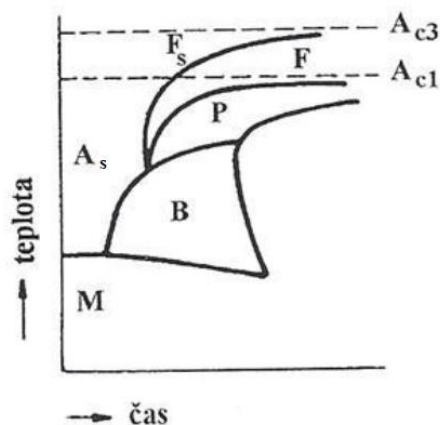
Neodmyslitelnou součástí tohoto kalení je znalost IRA diagramu podle kterého dochází k rozpadu nestabilního austenitu po ochlazení z teploty austenitizace díky kovovým či solným lázním. Jakmile se izotermická přeměna dokončí, součást je vyjme a dochladí na vzduchu. IRA diagram má tvar, který odpovídá ideální inkubační době rozpadu, viz **Obr. 42**. Tento druh kalení je vhodný pro nízko a středně legované oceli a oceli středně prokalitelné [15].



**Obr. 42** IRA diagram. Upraveno dle [20]

### Nepřetržité baitické kalení

U tohoto typu kalení jde hlavně o rychlost a plynulost ochlazení teplotu kalení po austenitizaci, což zaručí rozpad austenitu na bainit nebo také směs bainitu a martenzitu. Oceli vhodné k tomuto kalení musí mít tzv. předsunutou baitickou oblast, která je znožorněna v ARA diagramu, viz **Obr. 43** [15].



Obr. 43 ARA diagram. Upraveno dle [21]

## 2.6.6 Popouštění

Popouštění vždy následuje po kalení. Vlivem kalení má materiál vysoký obsah martenzitu a vnitřního pnutí, což z něj dělá křehký s malou houževnatostí a z pohledu struktury nestabilní.

Popouštění má za cíl dosáhnout modifikované struktury, která zajistí kompromis mezi požadované houževnatosti při dané tvrdosti. Teplota popouštění se volí nižší než  $A_{c1}$ . Délka výdrže na této teplotě se volí podle toho aby došlo k rovnoměrnému prohřátí celého průřezu. Platí jednoduché pravidlo, že čím vyšší je teplota popouštění, tím dostaneme nižší tvrdost a vyšší houževnatost. V praxi se používá nízkoteplotní a vysokoteplotní popouštění. Nízkoteplotní popouštění se pohybuje v rozsahu teplot 150 až 300°C, přičemž vysokoteplotní popouštění v rozsahu 350 až 700°C. Lepšího rozpadu zbytkového austenitu je možné docílit vícenásobným popouštěním [17].

## 2.6.7 Chemicko-tepelné zpracování

Tímto zpracování chceme dosáhnout odolnosti proti opotřebení a zvýšené tvrdosti při zachování houževnatého jádra. V podstatě jde o modifikaci chemického složení vrchních vrstev povrchu. Nejčastěji se používá cementování, nitridování a nitrocementování [17].

### Cementování

Jedná se o sycení povrchu uhlíkem, které probíhá při teplotě nad  $A_{c3}$  tj. cca 920°C. Vhodné pro konstrukční a uhlíkové oceli. Zachovává vysokou houževnatost jádra. Hloubka nasycení je od 0,5 do 1,5 mm při koncentraci uhlíku 0,7-1,1%. Tato vrstva pak dosahuje tvrdosti 800 HV [15, 17]

## Nitridování

Nitridování je sycení povrchu oceli dusíkem. Vznikají pod povrchem tzv. nitridy, které mají vysokou tvrdost. Celý tento proces se odehrává při teplotě zhruba 500°C a může trvat i 60 hodin. Hloubka vrstvy nitridace je od 0,2 do 0,6 mm při obsahu dusíku až 12%. Nitridovaná vrstva má běžně tvrdost i 1200 HV [15, 17].

## Nitrocementování

Kombinace cementování a nitridování se nazývá nitrocementování. Provádí se současné sycení uhlíkem a dusíkem, přičemž čím nižší teplotu použijeme, tím více převládá nasycení dusíkem a naopak. Děje se tak v kyanidových solných lázních nebo v plynné atmosféře s přísadou čpavku za teplot od 750 do 880°C [15].

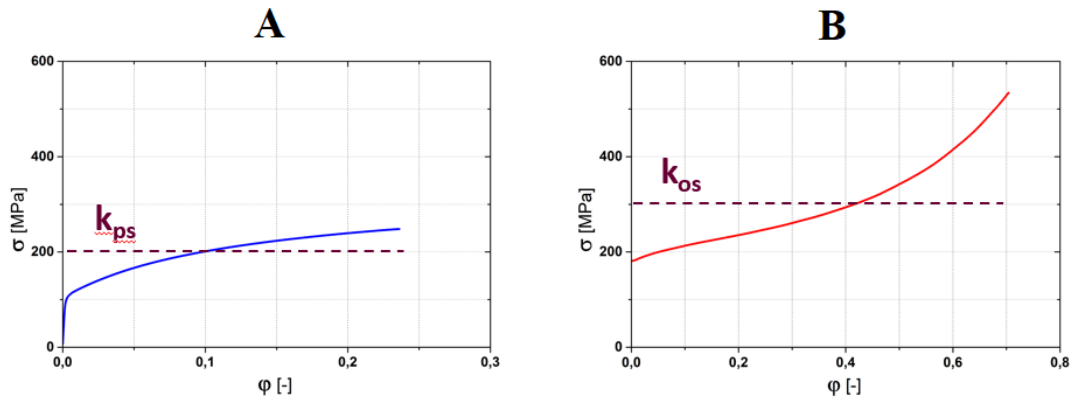
## 2.7 Metody stanovení přetvárného odporu

Přetvárný odpor je definován jako materiálová vlastnost, která přímo určuje míru odporu působící proti přetvoření. Přetvárný odpor je ovlivněn stavem napjatosti, ten se liší podle použité tvářecí technologie, velikostí deformace a koeficientem tření mezi materiálem a nástrojem. Přetvárný odpor se značí  $k_o$ . Dalším aspektem, který má vliv na přetvárný odpor je tzv. přetvárná pevnost  $k_p$ . Ta určuje počátek meze kluzu a závisí na teplotě tváření, rychlosti deformace a stupni deformaci materiálu. Z důvodu, že se hodnoty  $k_p$  a  $k_o$  mění při tváření, používá se tzv. střední hodnota přetvárného odporu  $k_{os}$  [4, 7]. Křivky přetvárné pevnosti při statické zkoušce tahem a přetvárného odporu při zkoušce pěchováním jsou na **Obr. 44**.

$$k_o = k_p + odpor \quad (2)$$

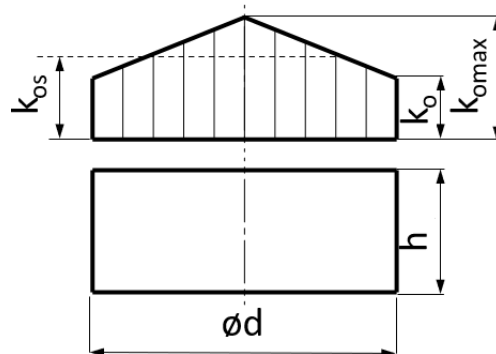
Kde :  $k_o$ - přetvárný odpor [MPa]

$k_p$ - přetvárná pevnost [MPa]



**Obr. 44** A:křivka přetvárné pevnosti při statické zkoušce tahem, B:křivka přetvárného odporu při zkoušce pěchováním. Upraveno dle [7]

### 2.7.1 Výpočet přetvárného odporu při pěchování válcového polotovaru



**Obr. 45** Průběh deformačního odporu při pěchování válcového polotovaru. Přejato z [7]

$$k_o = k_p * \left(1 + \frac{\mu}{3} * \frac{d}{h}\right) \quad (3)$$

Kde:  $k_o$ - přetvárný odpor [MPa]

$k_p$ - přetvárná pevnost [MPa]

$\mu$ -deformační tření [-]

$d$ -průměr polotovaru [mm]

$h$ -výška polotovaru [mm]



## 2.7.2 Výpočet přetvárné pevnosti

Určuje se bez vlivu deformačního tření. To znamená, že se hovoří o intenzitě napětí, který mají vliv všechna hlavní napětí. Může však nastat zvláštní případ při statické zkoušce tahem za studena kdy  $k_p$  se bude rovnat mezi pružnosti. To nastane pokud první hlavní napětí se bude rovnat právě mezi pružnosti a druhé se třetím hlavním napětím budou nulové [4].

$$k_p = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4)$$

Kde:  $\sigma_1$ - 1. hlavní napětí [MPa]

$\sigma_2$ - 2. hlavní napětí [MPa]

$\sigma_3$ - 3. hlavní napětí [MPa]

## 2.8 Způsoby aproximace křivky přetvárného odporu

V oblasti modelování křivek se rozlišují dvě hlavní metody. První metodou je interpolace výsledků. Ta spočívá v tom, že všechny naměřené hodnoty leží na výsledném obrazci, který se nazývá úsečka interpolační křivky. Druhá metoda je aproximace, tou se budeme zabývat. Hlavní princip aproximace je, že všechny naměřené hodnoty nemusí ležet na výsledném obrazci. Ten se pak nazývá úsečka aproximační křivky [22].

### 2.8.1 Metoda nejmenších čtverců

Nejnámější a nejnázornější aproximační křivkou je polynom tvoření metodou nejmenších čtverců. Graf tohoto polynomu znázorňuje závislost dvou veličin, viz. **Obr. 46**, které byly naměřeny. Tato metoda počítá i s chybami, které měření obsahuje. To je důvod proč většina naměřených hodnot neleží na proložené křivce. Tyto rozdíly mezi hodnotami a proloženou křivkou se pak uvádí jako chyby měření [23]. V rovnici (6) je uveden předpis pro lineární funkci, aproximovat můžeme však funkci libovolnou.

**Vzorec**

$$y = ax + b \quad (5)$$

Kde:  $x_i, y_i$ - množina bodů

a, b- koeficienty určené vyřešením soustavy rovnic (6) a (7)

$$a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (6)$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i \quad (7)$$

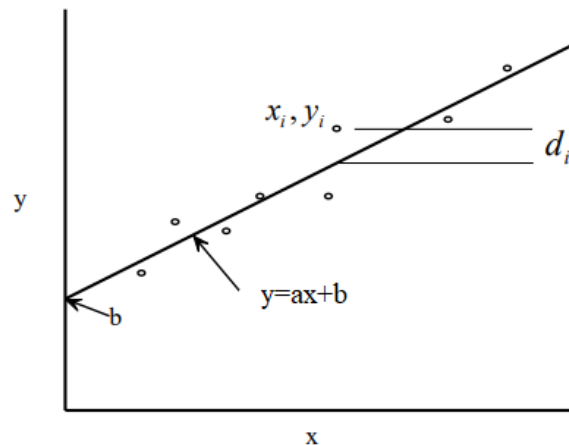
Kde:  $n$ - naměřené hodnoty

### Nepřesnost

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n d_i^2}{n-2}} \quad (8)$$

Kde:  $d_i$ - odchylky

$$d_i = y_i - y \quad (9)$$



**Obr. 46** Graf aproximace metodou nejmenších čtverců. [vlastní]

### 2.8.2 Bézierovy křivky

Bézierova aproximační křivka je dána minimálně čtyřmi reálnými body  $P_0, \dots, P_n$ , viz.

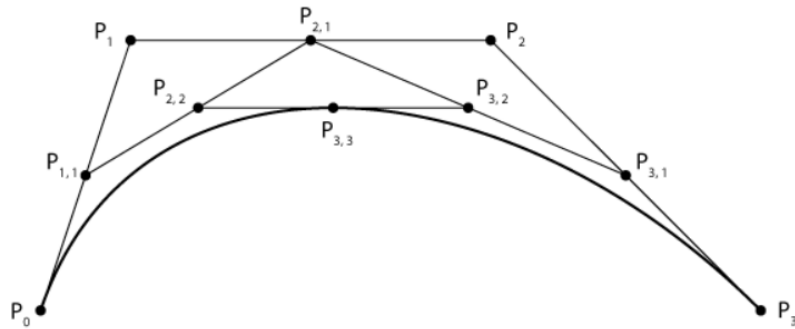
**Obr. 47.** Aproximace je dále určena tzv. Bernsteinovými kubickými polynomy [22] a tzv. de Casteljau algoritmus. Ten spočívá v opakování lineární interpolace a usnadňuje konstrukci parabol pro křivky vyšších stupňů [24].

#### Vzorec

$$P_{(t)} = \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P^i; t \in \langle 0, 1 \rangle \quad (10)$$

Kde:  $P_i$ - množina reálných bodů

$t$ -parametr



**Obr. 47** Bézierova křivka pro hodnotu parametru  $t=0,5$ . Přejato z [25]

### 2.8.3 Fergusonovy křivky

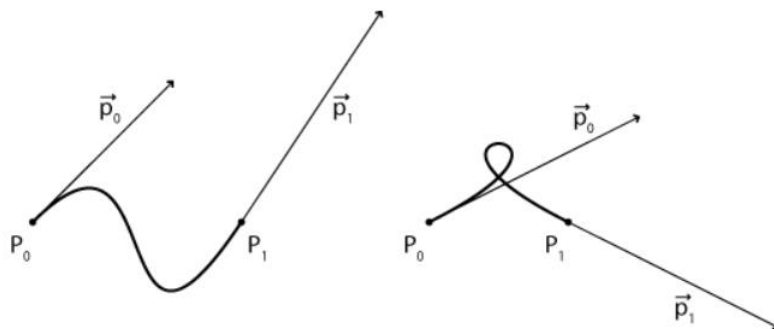
Tyto křivky charakterizují dva krajní body ( $P_0, P$ ) a dva tečné vektory ( $\mathbf{P}_0\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$ ), viz. **Obr. 48**. Tyto vektory mají vliv, svou velikostí, na druhou derivace křivky. Lze říci, že rostoucí velikost vektorů nutí křivku se k vektoru tzv. přimyká. Křivku lze vyjádřit parametrickými rovnicemi [23].

**Vzorec**

$$Q(t) = \sum_{i=0}^3 P_i F_i(t); t \in \langle 0, 1 \rangle \quad (11)$$

$$F_0(t) = 2t^3 - 3t^2 + 1; F_1(t) = -2t^3 - 3t^2; F_2(t) = t^3 - 2t^2 + t; F_3(t) = t^3 - t^2 \quad (13)$$

Kde:  $F_i$ -polynomy 3. stupně



**Obr. 48** Ukázka tvarů Fergusonových křivek. Přejato z [25]

### 2.8.4 Coonsovy křivky

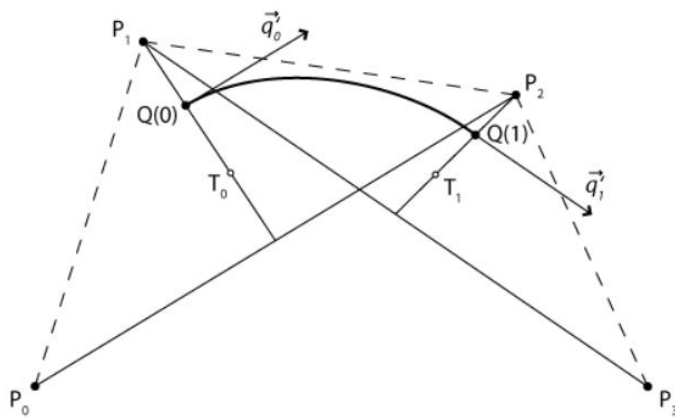
Tyto křivky se opět definují čtyřmi tzv. řídicími body  $P_0, P_1, P_2, P_3$  a kubickými polynomy  $C_0, C_1, C_2, C_3$ , viz. **Obr. 49** [23].

## Vzorec

$$Q(t) = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^3 P_i C_i(t); t \in (0, 1) \quad (12)$$

$$C_0(t) = (1-t)^3; C_1(t) = 3t^3 - 6t^2 + 4; C_2(t) = t^3 + 3t^2 + 3t + 1; C_3(t) = t^3 \quad (13)$$

Kde:  $C_i$ -polynomy 3. stupně



**Obr. 49** Coonsova křivka. Přejato z [25]

### 3 Experimentální část

Cílem experimentální části předkládané bakalářské práce bylo stanovení vlivu rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností materiálu Inconel 625 při namáhání za tepla. Motivací pro realizaci tohoto experimentu byl fakt, že zmíněný materiál Inconel 625 je používán k výrobě strojích součástí pracujících v agresivním prostředí, kde dochází ke vzniku povrchových vad a defektů. Jednou z možností jak tyto vady opravit je použití technologie laserového navařování s následným tvářením vzniklého spoje (návaru). Pro navařování jsou používány dva základní způsoby návaru a to bodový ohřev s překrývajícími se body a kontinuální navařování v rádcích. Podstata technologie navařování neumožňuje vytvořit homogenní svar, a proto byla dále zjišťována anizotropie vzniklého návaru ve směru návaru a kolmo na směr návaru. Změna mechanických vlastností byla hodnocena na základě statické zkoušky tahem za tepla provedené na zkušebním stroji Zwick Roell KAPPA 50 SS-CF na Katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. Řešení bakalářské práce lze shrnout do následujících bodů:

- Výroba 4 sad zkušebních vzorků s respektováním technologie výroby návaru a směru odebrání vzorků (výroba bodovým a kontinuálním navařováním, směry odebrání  $0^\circ$  a  $90^\circ$ )
- Realizace statické zkoušky tahem při teplotě  $650^\circ\text{C}$  a rychlosti deformace  $0,001\text{ s}^{-1}$ ,  $0,01\text{ s}^{-1}$  a  $0,1\text{ s}^{-1}$ .
- Statistické vyhodnocení.

#### 3.1 Inconel 625

Jedná se o slitinu niklu a chromu s velkým podílem molybdenu a dalších přísad jako např. železo, niob, kobalt, mangan, uhlík, křemík, hliník, titan, fosfor a síra. Hlavním rysem této slitiny je vysoká pevnost a výborná zpracovatelnost. Precipitační vytvrzování se již neprovádí, protože vytvrzení matrice slitiny je způsobeno vysokým výskytem molybdenu a niobu. Zmíněné množství přísad dále pomáhá odolat i vysoce agresivním prostředím jako je mořská voda nebo teploty do  $982^\circ\text{C}$ . Nejširší využití tohoto materiálu lze najít v lodním průmyslu. Vyrábí se lopatková kola námořních lodí a ponorek, nebo opláštění podmořských optických kabelů, potrubí a armatur. Uplatnění se ale najde i v leteckém průmyslu v oblasti výfukových systémů proudových motorů [26].

### 3.2 Zkušební vzorky a jejich rozlišení

Zkušební vzorky byly vyrobeny z materiálu Inconel 625 na Katedře obrábění a montáže Technické univerzity v Liberci. S ohledem na vysokou cenu materiálu Inconel 625 a použité technologie výroby polotovaru (laserové navařování) byly zvoleny ploché vzorky o průřezu 4x4 mm s celkovou délkou 57 mm, viz **Obr. 50**. Tvar vzorku odpovídá možnostem upínání na zkušebním zařízení Zwick Roell KAPPA 50 SS-CF.



**Obr. 50** Zkušební vzorek materiálu Inconel 625 pro statickou zkoušku za tepla

Tak jak bylo uvedeno výše, byly vyrobeny 4 skupiny vzorků vždy po 18 ks v každé skupině s označením:

- AX – A- vzorky vyrobené technologií bodového navařování  
X - směr odebrání vzorků rovnoběžný se směrem posuvu laseru - 0°
- AY – A- vzorky vyrobené technologií bodového navařování  
Y - směr odebrání vzorků kolmý na směr posuvu laseru - 90°
- BX – B- vzorky vyrobené technologií kontinuálního navařování  
X - směr odebrání vzorků rovnoběžný se směrem posuvu laseru - 0°
- BY – A- vzorky vyrobené technologií kontinuálního navařování  
Y - směr odebrání vzorků kolmý na směr posuvu laseru - 90°

### 3.4 Statická zkouška tahem za tepla

Pro statickou zkoušku tahem za tepla byla zvolena teplota 650 °C, která se používá při tváření materiálu po navaření v místě opravy. Rychlost deformace byla volena s ohledem na možnosti stroje Zwick Roell KAPPA 50 SS-CF, který je primárně používán pro dlouhodobé creepové a únavové testy za tepla. Pro testy byly zvoleny 3 rychlosti deformace a to 0,001 s<sup>-1</sup>, 0,01 s<sup>-1</sup> a 0,1 s<sup>-1</sup>.

Testovací zařízení Zwick Roell KAPPA 50 SS-CF je vybaveno 3-zónovou teplotní komorou viz **Obr. 51** s přesným regulátorem teploty „Zwick Roell Universal 3 zone furnace controller“ viz **Obr. 52** umožňující nastavení požadované teploty do 1200°C s přesností až ±0,5°C od cílové hodnoty. Pro měření deformace byl použit kontaktní extenzometr Epsilon model 3549, jehož použitelnost odpovídá maximální možné teplotě v komoře 1200 °C. Pro vyhodnocení zkoušky byly použity software testXpert III a LabTest v.4, které umožňují stanovení všech požadovaných hodnot smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$ , meze pevnosti v tahu  $R_m$  a celkové tažnosti  $A_{16mm}$ . Kompletní výsledky všech naměřených zkoušek jsou uvedeny v přílohách **Příloha 1** až **Příloha 12**.

Průměrné naměřené hodnoty jednotlivých sledovaných veličin jsou uvedeny v tabulkách **Tab. 1**, **Tab. 2** a **Tab. 3**, kde je vidět vliv rychlosti deformace a směr odebrání vzorku na výsledek zkoušky. Dále na obrázcích **Obr. 53**, **Obr. 54** a **Obr. 55**, je srovnání vždy jedné významné pro náš případ mechanické vlastnosti v rámci všech skupin vzorků.

**Tab. 1** Průměrné naměřené hodnoty pro mez pevnosti v tahu  $R_m$

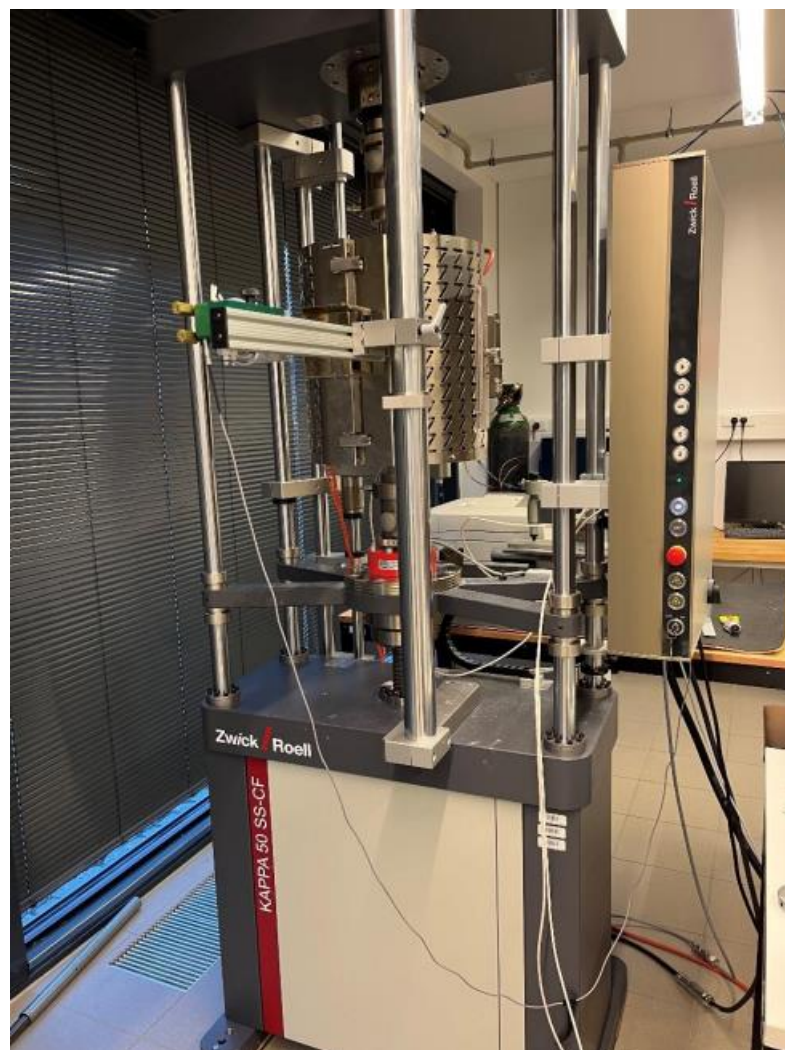
Tabulka pro mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]				
Rychlost deformace [1/s]	Bodové navařování		Kontinuální navařování	
	Směr 0°	Směr 90°	Směr 0°	Směr 90°
0,001	670,7±5,72	611,2±4,21	736,2±10,74	734,1±12,05
0,01	665,1±5,45	562,4±3,41	774,2±6,28	697,2±3,43
0,1	659,7±4,91	565,9±5,05	790,7±2,42	656,4±1,91

**Tab. 2** Průměrné naměřené hodnoty pro smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$

Tabulka pro smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]				
Rychlost deformace [1/s]	Bodové navařování		Kontinuální navařování	
	Směr 0°	Směr 90°	Směr 0°	Směr 90°
0,001	430,0±4,92	353,5±2,93	381,3±5,12	384,6±6,86
0,01	434,8±3,65	351,5±14,77	404,6±4,32	369,8±3,60
0,1	422,6±3,15	346,1±5,82	414,8±5,01	342,6±5,32

**Tab. 3** Průměrné naměřené hodnoty pro celková tažnost  $A_{16mm}$

Tabulka pro celkovou tažnost $A_{16mm}$ [%]				
Rychlost deformace [1/s]	Bodové navařování		Kontinuální navařování	
	Směr 0°	Směr 90°	Směr 0°	Směr 90°
0,001	62,9±3,84	52,1±0,36	42,6±2,26	48,3±2,11
0,01	57,3±1,01	43,0±2,28	44,4±1,65	49,3±0,81
0,1	43,2±0,95	33,1±0,77	43,8±1,68	48,1±0,73

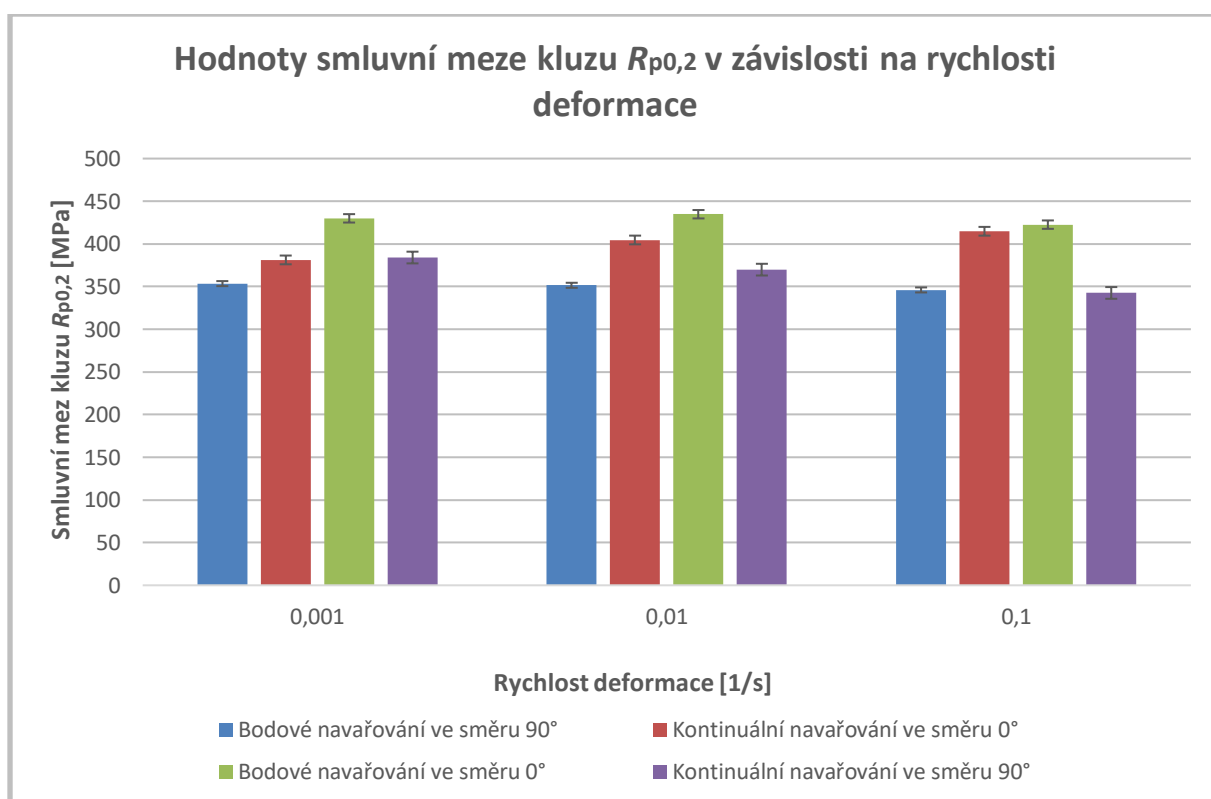


**Obr. 51** Zkušební stroj Zwick Roell KAPPA 50 SS-CF

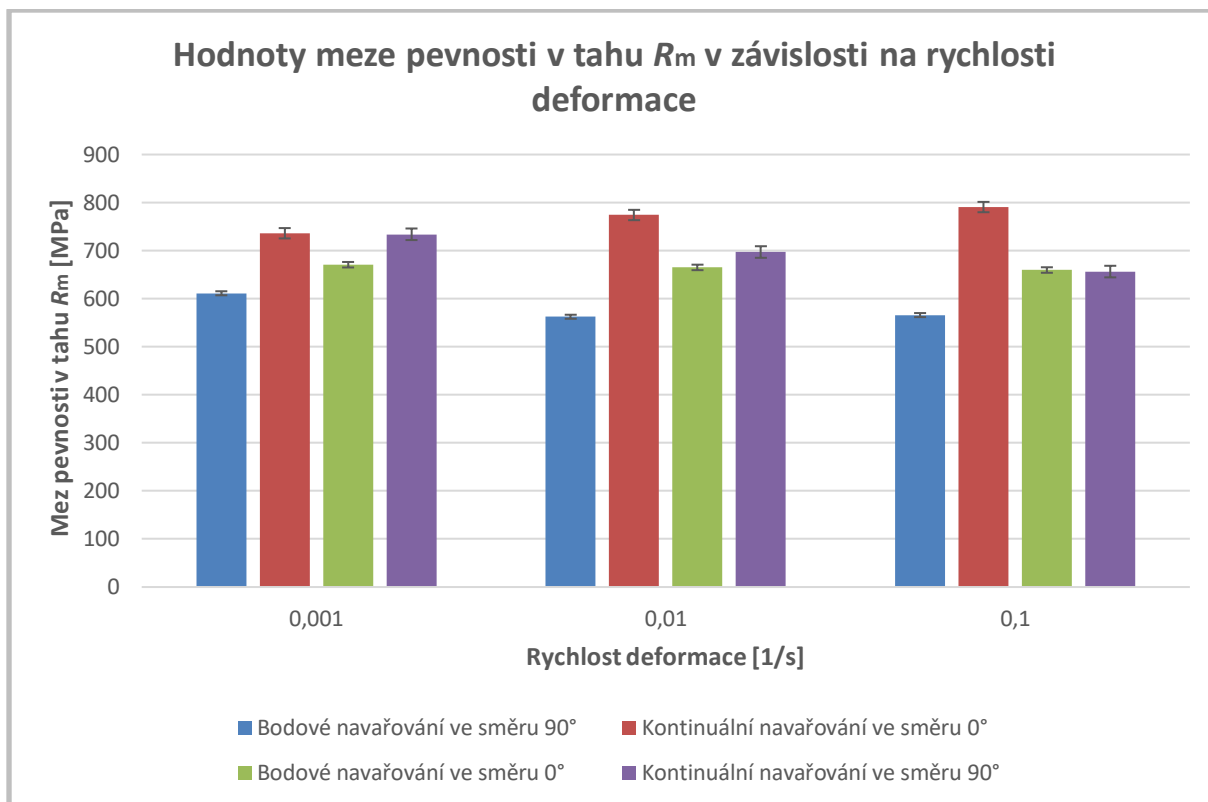




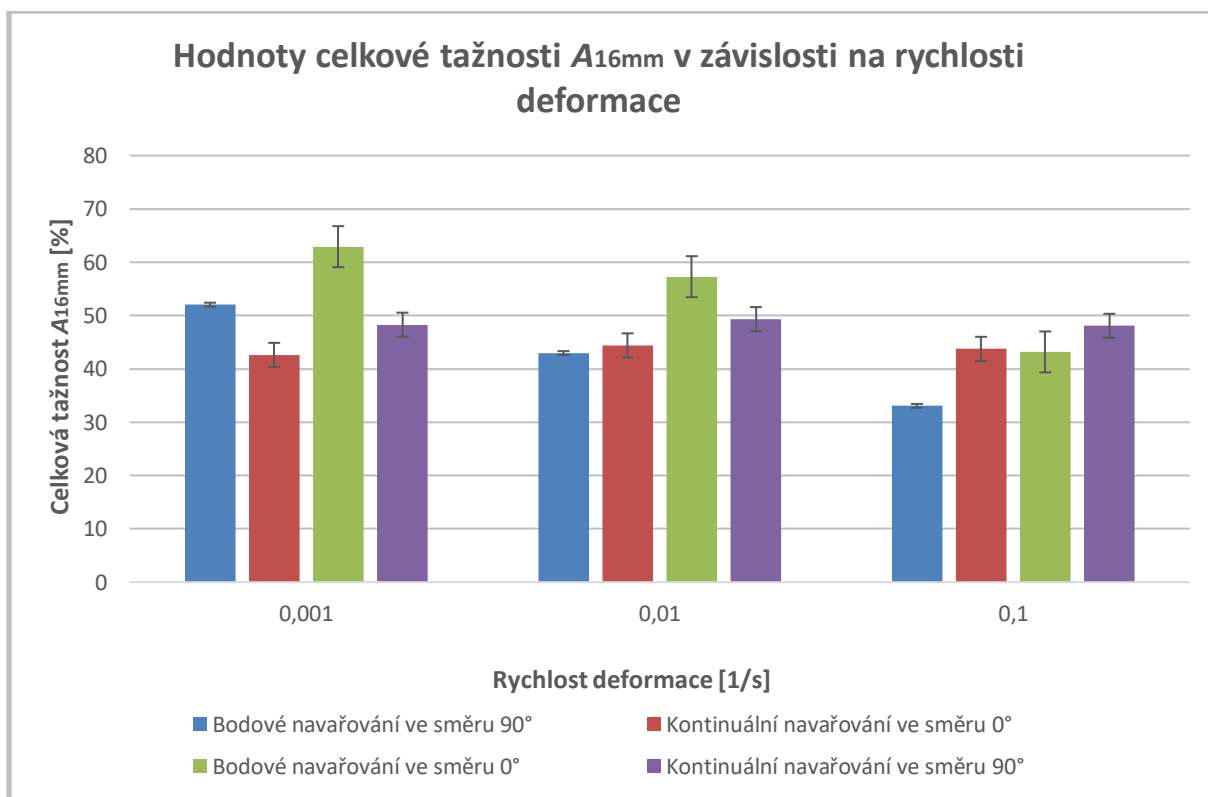
Obr. 52 Regulátor Zwick Roell Universal 3 zone furnace controller



Obr. 53 Graf srovnání smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  při jednotlivých rychlostech deformace



**Obr. 54** Graf srovnání meze pevnosti v tahu  $R_m$  při jednotlivých rychlostech deformace



**Obr. 55** Graf srovnání celkové tažnosti  $A_{16mm}$  při jednotlivých rychlostech deformace

### 3.4.1 Analýza rozptylu - ANOVA

Aby se určilo, zda má vliv metoda navařování (metoda A nebo B) a rychlost deformace na změnu mechanických vlastností, použila se statistická metoda analýza rozptylu – ANOVA.

Analýzu rozptylu lze definovat jako vztah mezi dvěma jevy vyjadřující jejich vzájemný vliv. Prvním jevem se rozumí tzv. faktor neboli vysvětlující proměnná. Analogicky, druhým jevem je vysvětlovaná proměnná. V podstatě ANOVA určuje, zda a jaký vliv má faktor na sledovanou proměnnou. ANOVA pak dále rozlišuje, zda se jedná o jednofaktorovou nebo více faktorovou analýzu [27].

V experimentu, kterým se zabývá tato bakalářská práce, se vyskytují tři faktory. Těmi budou rychlost deformace, metoda svařování a směr odebrání materiálu. Pro zjednodušení se však použije vždy pouze dvojice. Z tohoto důvodu je na následujících řádcích vysvětlena podstata analýzy rozptylu dvojného třídění, to znamená dva faktory.

Nejprve se stanoví hypotézy. Jsou dvě a stojí proti sobě. První z nich je tzv. nulová hypotéza  $H_0$ . Nulová hypotéza má všechny střední hodnoty stejné. V případě, že bude nulová hypotéza statisticky zamítnuta, vytvoří se alternativní hypotéza  $H_1$ , která nemá všechny střední hodnoty stejné. V závislosti na počtu skupin, které se srovnávají, se určí počet nulových a alternativních hypotéz. Pro náš případ se tak stane následovně:

- 1) Faktor 1 - metoda navařování
- 2) Faktor 2 - rychlost deformace
- 3) Faktor 3 – směr odebrání

Hypotézy pak dostávají tvar:

- 1)  $H_0$ : Vliv faktoru 1 je statisticky nevýznamný  $\rightarrow H_1$ : Vliv faktoru 1 je statisticky významný
- 2)  $H_0$ : Vliv faktoru 2 je statisticky nevýznamný  $\rightarrow H_1$ : Vliv faktoru 2 je statisticky významný
- 3)  $H_0$ : Vliv faktoru 3 je statisticky nevýznamný  $\rightarrow H_1$ : Vliv faktoru 3 je statisticky významný

Tím se dostane závěr testování, které má dvě metody. První z nich je pomocí F-testu. F-test určí, zda je rozdíl mezi rozptyly výběrových souborů na dané hladině významnosti  $\alpha$ . Následně se vypočtené testovací kritérium F srovná s tabulkovou hodnotou  $F_{krit}$ . Pokud nastá-

ne, že  $F$  je menší než  $F_{krit}$ , zamítne se  $H_0$  a přijme se  $H_1$ . Druhou metodou vyhodnocení vlivu významnosti je metoda určení podle pravděpodobnosti  $p$ . Zjednodušeně se jedná o pravděpodobnost se kterou nastane právě  $H_0$ . Lze pak tvrdit, že čím menší hodnota  $p$  je, tím ubývá  $H_0$  na věrohodnosti. Nakonec se opět porovnává s hladinou významnosti  $\alpha$ , a pokud je  $p$  menší než  $\alpha$ , dojde k zamítnutí  $H_0$  [28].

Pro vyhodnocení byla opakovaně použita dvoufaktorová analýza rozptylu kombinující vlivy sledovaných faktorů s cílem zjistit, zda mají faktory metoda navařování (faktor 1), rychlost deformace (faktor 2) a směr odebrání (faktor 3) vliv na změnu mechanických vlastností. Nejprve byla použita zvlášť pro vzorky ve směru  $0^\circ$  a zvlášť pro vzorky ve směru  $90^\circ$  (tzn. faktor 1 a faktor 2) kde se zjišťoval vliv metody navařování a rychlosti deformace, a následně se zjišťoval vliv směru odebrání a rychlosti deformace pro obě metody navařování (tzn. faktor 2 a faktor 3). Výpočet byl realizován v programu Microsoft Excel, kde byla použita hladina významnosti 5 %. Testovalo se pouze F-testem. Hodnoty získané tímto testováním jsou zpracovány v tabulkách **Tab. 4**, **Tab. 5**, **Tab. 6** a **Tab. 7**.

**Tab. 4** Vliv metody navařování a rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností pro vzorky odebrané ve směru  $0^\circ$

ANOVA - vzorky směru $0^\circ$			
Mez kluzu $R_{p0,2}$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Metoda navařování	1341,7097	4,1709	Má
Rychlost deformace	74,2940	3,3158	Má
Mez pevnosti v tahu $R_m$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Metoda navařování	171,7859	4,1709	Má
Rychlost deformace	119,3502	3,3158	Má
Celková tažnost $A_{16mm}$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Metoda navařování	70,3654	4,1709	Má
Rychlost deformace	73,5253	3,3158	Má

**Tab. 5** Vliv metody navařování a rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností pro vzorky odebrané ve směru 90°

ANOVA - vzorky směru 90°			
Mez kluzu $R_{p0,2}$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Metoda navařování	338,5509	4,1709	Má
Rychlost deformace	8,8120	3,3158	Má
Mez pevnosti v tahu $R_m$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Metoda navařování	7313,5762	4,1709	Má
Rychlost deformace	6,9867	3,3158	Má
Celková tažnost $A_{16mm}$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Metoda navařování	2,1816	4,1709	Nemá
Rychlost deformace	73,0164	3,3158	Má

**Tab. 6** Vliv směru odebírání a rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností pro vzorky navařované bodově

ANOVA - Bodové navařování			
Mez kluzu $R_{p0,2}$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Směr odebírání	906,1465	4,1709	Má
Rychlost deformace	4,3549	3,3158	Má
Mez pevnosti v tahu $R_m$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Směr odebírání	2316,7013	4,1709	Má
Rychlost deformace	108,6700	3,3158	Má
Celková tažnost $A_{16mm}$	$F$	$F_{krit}$	Vliv
Směr odebírání	276,3439	4,1709	Má
Rychlost deformace	254,1842	3,3158	Má

**Tab. 7** Vliv směru odebrání a rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností pro vzorky navařované kontinuálně

<b>ANOVA - Kontinuální navařování</b>			
<b>Mez kluzu <math>R_{p0,2}</math></b>	<b><math>F</math></b>	<b><math>F_{krit}</math></b>	<b>Vliv</b>
Směr odebrání	343,0654	4,1709	Má
Rychlost deformace	6,9240	3,3158	Má
<b>Mez pevnosti v tahu <math>R_m</math></b>	<b><math>F</math></b>	<b><math>F_{krit}</math></b>	<b>Vliv</b>
Směr odebrání	708,9804	4,1709	Má
Rychlost deformace	8,7196	3,3158	Má
<b>Celková tažnost <math>A_{16mm}</math></b>	<b><math>F</math></b>	<b><math>F_{krit}</math></b>	<b>Vliv</b>
Směr odebrání	68,3298	4,1709	Má
Rychlost deformace	1,9084	3,3158	Nemá

## 4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

Experimentální část této bakalářské práce měla za cíl stanovit vliv rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností.

Díky naměřeným hodnotám bylo, za využití analýzy rozptylu – ANOVA, zkoumáno zda má zvolená metoda svařování a rychlost deformace vliv na změnu mechanických vlastností materiálu Inconel 625. Hladina významnosti byla zvolena 5 %. V tabulce **Tab. 4** jsou rozdíly  $F$  a  $F_{krit}$  vždy o řád, u některých i o dva až tři řády. Proto můžeme tvrdit, že zvolená metoda navařování i rychlost deformace mají významný vliv na změnu mechanických vlastností pro vzorky odebrané ve směru  $0^\circ$ . Podíváme-li se na tabulku **Tab. 5**, zjistíme, že zvolená metoda navařování a rychlosti deformace má vliv na téměř všechny mechanické vlastnosti vzorků odebraných ve směru  $90^\circ$ . Jediné kde tomu tak není, je u celkové tažnosti  $A_{16mm}$ . Na tuto mechanickou vlastnost nemá vliv zvolená metoda navařování. Při pohledu na tabulku **Tab. 6** je jasné, že směr odebírání i rychlost deformace mají vliv na všechny zmiňované mechanické vlastnosti.  $F$  a  $F_{krit}$  se liší o jeden, tři nebo v jednom případě dokonce o čtyři řády. V poslední tabulce **Tab. 7**, která je pro vzorky navařené kontinuálně, je zaznamenáno, že na smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  a mez pevnosti v tahu  $R_m$  má vliv směr odebírání i rychlost deformace. Na celkovou tažnost  $A_{16mm}$  má vliv pouze směr odebírání, rychlost deformace nikoliv.

Porovnáme-li naměřené hodnoty pomocí grafů, které jsou na obrázcích **Obr. 53**, **Obr. 54** a **Obr. 55**, můžeme z toho vyvodit následující:

Použije-li se bodové navařování, jeví se o něco vhodněji směr  $0^\circ$ . U kontinuálního navařování jsou rozdíly natolik malé, že je jedno zda se rozhodneme navařovat ve směru  $0^\circ$  či  $90^\circ$ . Kvůli těmto skutečnostem je výhodnější zvolit navařování kontinuální. Další důvod je, že pro následné tváření je rozhodujících rychlost deformace. Na první pohled je vidět, že s rostoucí rychlostí deformace klesá celková tažnost  $A_{16mm}$ . Proto jako nejvhodnější metodu můžeme označit kontinuální navařování při pomalém tváření. Tím zaručíme vysokou celkovou tažnost a dobré mechanické vlastnosti.

## 5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovit vliv rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností při statické zkoušce tahem. Stěžejní body této práce byly: teoretická část, experimentální část, vyhodnocení výsledků a diskuse.

V teoretické části byl uveden přehled a popis základních technologií tváření za tepla spolu s představením jednotlivých operací tváření a popis problematiky vlivu teploty na změnu mechanických vlastností. V návaznosti na vliv teploty na mechanické vlastnosti byl uveden i přehled tepelného zpracování kovových materiálů. Závěr teoretické části se věnoval metodám stanovení přetvárného odporu a způsobů aproximací křivky přetvárného odporu.

V experimentální části byl zjišťován vliv rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností materiálu Inconel 625 při namáhání za tepla. Díky naměřeným hodnotám a použití statistickou metodou lze vyvodit tyto závěry:

- 1) Volba metody navařování má vliv na všechny mechanické vlastnosti kromě celkové tažnosti  $A_{16mm}$ . Pro vzorky odebrané ve směru  $90^\circ$  nemá metoda navařování vliv na tuto mechanickou vlastnost.
- 2) Volba rychlosti deformace má vliv na všechny mechanické vlastnosti vzorků navařených bodově. U vzorků navařených kontinuálně nemá deformační rychlost vliv na tažnost.
- 3) Volba směru odebrání má vliv na všechny mechanické vlastnosti pro obě metody navařování. Na kontinuální navařování však velice malý.

Při použití materiálu Inconel 625 na opravy strojních součástí doporučuji s ohledem na předešlé závěry používat technologii kontinuálního navařování, kde se dosahuje vyšší homogenity návaru současně s vyššími mechanickými hodnotami. Z naměřených výsledků je dále patrné, že rychlost deformace má negativní vliv na deformační schopnost testovaného materiálu Inconel 625, kdy s rostoucí rychlostí deformace klesá tažnost materiálu. Pro opravy s následným tvářením za tepla je tak vhodné používat co nejmenší rychlosti deformace a vyvarovat se rychlému tváření, které může vyvolávat tvorbu trhlin v místě opravy, nebo v jeho bezprostředním okolí.



## Seznam obrázků

<b>Obr. 1</b> Některé základní procesy tváření. Upraveno dle [3] .....	13
<b>Obr. 2</b> Změna tvaru zrna. Přejato z [7] .....	14
<b>Obr. 3</b> Diagram změny mechanických vlastností při tváření za studena. Přejato z [7]	15
<b>Obr. 4</b> Diagram vlivu teploty na deformační odpor a tažnost. Přejato z [7].....	16
<b>Obr. 5</b> Schéma polygonizace. Přejato z[8].....	17
<b>Obr. 6</b> Diagram velikosti zrna, deformace a teploty rekrystalizace. Přejato z[8] .....	18
<b>Obr. 7</b> Kovací diagram pro buchar. Přejato z [7] .....	19
<b>Obr. 8</b> Kovací diagram pro mechanický lis. Přejato z [7] .....	20
<b>Obr. 9</b> Poměr počáteční plochy a plochy po kování. Přejato z [7].....	21
<b>Obr. 10</b> Kovářský kříž. Přejato z [5, 6].....	22
<b>Obr. 11</b> Nástroje pro volné kování. Přejato z [7] .....	22
<b>Obr. 12</b> Nástroje pro volné kování. Přejato z [7] .....	23
<b>Obr. 13</b> Operace pěchování. Přejato z [7].....	23
<b>Obr. 14</b> Operace prodlužování. Upraveno dle [7] .....	24
<b>Obr. 15</b> Operace osazování. Upraveno dle [7].....	25
<b>Obr. 16</b> Zápustkové kování. Přejato z [7].....	26
<b>Obr. 17</b> Zápustkové kování na bucharu. Přejato z [7] .....	26
<b>Obr. 18</b> Zápustkové kování na lisu. Přejato z [7].....	27
<b>Obr. 19</b> Dutiny postupové zápustky. Upraveno dle [7] .....	28
<b>Obr. 20</b> Princip přesného kování na bucharu. Přejato z [7].....	28
<b>Obr. 21</b> Princip přesného kování na lisech. Přejato z [7] .....	29
<b>Obr. 22</b> Kování na vodorovných kovacíh strojích. Přejato z [7].....	29
<b>Obr. 23</b> Rotační kování. Upraveno dle [7].....	30
<b>Obr. 24</b> Podélné válcování plechů. Přejato z [9].....	31
<b>Obr. 25</b> A-podélné válcování tyčí, B-podélné válcování čtvercových tyčí. Upraveno dle [9].....	32
<b>Obr. 26</b> Příčné válcování. Přejato z [9].....	33
<b>Obr. 27</b> Kosé válcování. Přejato z [9].....	33
<b>Obr. 28</b> Mannesmanův způsob. Přejato z [9].....	34
<b>Obr. 29</b> Stiefelův způsob. Přejato z [9].....	35
<b>Obr. 30</b> Poutnická stolice. Přejato z [9].....	35
<b>Obr. 31</b> Asselův způsob. Přejato z [9] .....	36

<b>Obr. 32</b> Diescherův způsob. Přejato z [9].....	36
<b>Obr. 33</b> A-Příčné klínové válcování, B-Válcování prstence, C-Podélné válcování závitu, D-Válcování závitu pomocí desek. Upraveno dle [9].....	37
<b>Obr. 34</b> Dopředné protlačování. Přejato z [10].....	38
<b>Obr. 35</b> Zpětné protlačování. Přejato z [10].....	38
<b>Obr. 36</b> Kombinované protlačování. Přejato z [10] .....	39
<b>Obr. 37</b> Stranové protlačování. Přejato z [10].....	39
<b>Obr. 38</b> Vliv teploty na změnu tvaru křivky diagramu v tahu nízkouhlíkové oceli. Přejato z [14].....	40
<b>Obr. 39</b> Změna mechanických vlastností v závislosti na teplotě. Přejato z [14] .....	41
<b>Obr. 40</b> Schéma tepelného zpracování, 1-ohřev, 2-výdrž na teplotě, 3-ochlazení. Přejato z [16].....	41
<b>Obr. 41</b> Oblasti žíhacích teplot v rovnovážném diagramu Fe-Fe <sub>3</sub> C. Přejato z [17].....	42
<b>Obr. 42</b> IRA diagram. Upraveno dle [20] .....	45
<b>Obr. 43</b> ARA diagram. Upraveno dle [21].....	46
<b>Obr. 44</b> A:křivka přetvárné pevnosti při statické zkoušce tahem, B:křivka přetvárného odporu při zkoušce pýchováním. Upraveno dle [7] .....	48
<b>Obr. 45</b> Průběh deformačního odporu při pýchování válcového polotovaru. Přejato z [7] .....	48
<b>Obr. 46</b> Graf aproximace metodou nejmenších čtverců. [vlastní] .....	50
<b>Obr. 47</b> Bézierova křivka pro hodnotu parametru t=0,5. Přejato z [25].....	51
<b>Obr. 48</b> Ukázka tvarů Fergusonových křivek. Přejato z [25] .....	51
<b>Obr. 49</b> Coonsova křivka. Přejato z [25] .....	52
<b>Obr. 50</b> Zkušební vzorek materiálu Inconel 625 pro statickou zkoušku za tepla .....	54
<b>Obr. 51</b> Zkušební stroj Zwick Roell KAPPA 50 SS-CF .....	56
<b>Obr. 52</b> Regulátor Zwick Roell Universal 3 zone furnace controller.....	57
<b>Obr. 53</b> Graf srovnání smluvní meze kluzu R <sub>p0,2</sub> při jednotlivých rychlostech deformace.....	57
<b>Obr. 54</b> Graf srovnání meze pevnosti v tahu R <sub>m</sub> při jednotlivých rychlostech deformace.....	58
<b>Obr. 55</b> Graf srovnání celkové tažnosti A <sub>16mm</sub> při jednotlivých rychlostech deformace .....	58

## Seznam tabulek

<b>Tab. 1</b> Průměrné naměřené hodnoty pro mez pevnosti v tahu $R_m$ .....	55
<b>Tab. 2</b> Průměrné naměřené hodnoty pro smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ .....	56
<b>Tab. 3</b> Průměrné naměřené hodnoty pro celková tažnost $A_{16mm}$ .....	56
<b>Tab. 4</b> Vliv metody navařování a rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností pro vzorky odebrané ve směru $0^\circ$ .....	60
<b>Tab. 5</b> Vliv metody navařování a rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností pro vzorky odebrané ve směru $90^\circ$ .....	61
<b>Tab. 6</b> Vliv směru odebírání a rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností pro vzorky navařované bodově .....	61
<b>Tab. 7</b> Vliv směru odebírání a rychlosti deformace na změnu mechanických vlastností pro vzorky navařované kontinuálně .....	62


## Seznam příloh

<b>Příloha 1</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru X, rychlosti 1 .....	71
<b>Příloha 2</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru X, rychlosti 2 .....	72
<b>Příloha 3</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru X, rychlosti 3 .....	73
<b>Příloha 4</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru Y, rychlosti 1 .....	74
<b>Příloha 5</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru Y, rychlosti 2 .....	75
<b>Příloha 6</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru Y, rychlosti 3 .....	76
<b>Příloha 7</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru X, rychlosti 1 .....	77
<b>Příloha 8</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru X, rychlosti 2 .....	78
<b>Příloha 9</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru X, rychlosti 3 .....	79

<b>Příloha 10</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru Y, rychlosti 1 .....	80
<b>Příloha 11</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru Y, rychlosti 2 .....	81
<b>Příloha 12</b> Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru Y, rychlosti 3 .....	82

## Seznam použité literatury

- [1] MEYERS, Robert Allen. *Encyclopedia of physical science and technology*. 3rd ed. San Diego, Calif. London: Academic, 2001. ISBN 978-0-12-227410-7.
- [2] GALLEGO-JUÁREZ, Juan A.; Karl F. GRAFF a M. LUCAS (ed.). *Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound*. Second edition. Oxford: Woodhead Publishing, 2022. ISBN 978-0-323-85144-2.
- [3] NARAYANAN, Ganesh R. *Metal forming processes\_full.pdf*. online. Dostupné z: [https://www.iitg.ac.in/engfac/ganu/public\\_html/Metal%20forming%20processes\\_full.pdf?fbclid=IwAR11aoU3qFn1YkSdHS1FtIgfHhHqjL4W-QRV4-aOgPiv5eKk0NtrRcK-3FY](https://www.iitg.ac.in/engfac/ganu/public_html/Metal%20forming%20processes_full.pdf?fbclid=IwAR11aoU3qFn1YkSdHS1FtIgfHhHqjL4W-QRV4-aOgPiv5eKk0NtrRcK-3FY).
- [4] FABÍK, Richard. *Tváření kovů*. online. 2012. ISBN 978-80-248-2572-4. Dostupné z: [http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf?fbclid=IwAR1QXOotcDo\\_O-bYeHQbOiwP63dtiLY3WkCk1uU6vwapKMAEa6JGOT6nZo0](http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf?fbclid=IwAR1QXOotcDo_O-bYeHQbOiwP63dtiLY3WkCk1uU6vwapKMAEa6JGOT6nZo0).
- [5] *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta*. Webové sídlo. Dostupné z: [https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm#011](https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#011). [citováno 2023-07-30].
- [6] BENEŠOVÁ, Soňa a Vladimír BERNÁŠEK. *Technologie tváření*. online. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 978-80-261-0449-0. Dostupné z: <http://www.zcu.cz/pracoviste/vyd/online/TechnologietvareniTTSS.pdf>.
- [7] SOLFRONK, Pavel. *2.přednáška-Kování*. Technologie II. Technická univerzita v Liberci, 2021.
- [8] SOLFRONK, Pavel. *1.přednáška-Stavba kovu*. Technologie II. Technická univerzita v Liberci, 2021.
- [9] SOLFRONK, Pavel. *3.přednáška-Válcování*. Technologie II. Technická univerzita v Liberci, 2021.
- [10] SOLFRONK, Pavel. *4.přednáška-Protlačování a tažení*. Technologie II. Technická univerzita v Liberci, 2021.
- [11] HLUCHÝ, Miroslav a J. KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1. 1. díl, Nauka o materiálu*. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [12] BOTHE, Otakar. *Strojírenská technologie I pro strojírenské učební obory*. ISBN 978-80-85920-42-0.
- [13] *Temperature Effects on Metal Strength*. online. In: *Roymech*. Dostupné z: [https://www.roymech.co.uk/Useful\\_Tables/Matter/Temperature\\_effects.html](https://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Matter/Temperature_effects.html). [citováno 2023-12-01].
- [14] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Alfa slovenske vydavatelstvo. ISBN 063-552-89.

- [15] HLUCHÝ, Miroslav; Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování*. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN 978-80-7183-265-2.
- [16] *Tepelné zpracování ocelí (druhy a způsoby) - ppt stáhnout*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2810347/>. [citováno 2023-12-01].
- [17] Tepelné a chemicko tepelné zpracování. online. 2023. In: *Kovintrade* . Dostupné z: <https://www.kovintrade.cz/tepelne-a-chemicko-tepelne-zpracovani/>. [citováno 2023-12-02].
- [18] *Knife.cz - Fórum - Tepelné zpracování ocelí*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://www.knife.cz/Default.aspx?tabid=53&g=posts&t=10415>. [citováno 2023-12-02].
- [19] *Studijní materiály nejen do strojírenství*. Dostupné z: 3.6.9.2 KALICÍ PROSTŘEDÍ | Studijní materiály nejen do strojírenství, <https://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/03/3692-kalici-prostredi.html>. [citováno 2023-12-02].
- [20] *VY\_32\_INOVACE\_B-06-17.pdf* online. Dostupné z: [https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/\\_sablon/STT\\_I/VY\\_32\\_INOVACE\\_B-06-17.pdf](https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablon/STT_I/VY_32_INOVACE_B-06-17.pdf). [citováno 2023-12-03].
- [21] *Strojírenství Strojírenská technologie Tepelné zpracování kovů (ST12) - ppt stáhnout*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2763926/>. [citováno 2023-12-03].
- [22] *APPROXIMATION and INTERPOLATION CURVES*. Webové sídlo. Dostupné z: <http://www.evln.stuba.sk/~velichova/Geometria/PREDNASKY/lecture4.htm>. [citováno 2023-12-04].
- [23] *MATEMATIKA online - Aproximační křivky*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://mathonline.fme.vutbr.cz/Aproximacni-krivky/sc-1199-sr-1-a-225/default.aspx>. [citováno 2023-12-04].
- [24] *GM1\_lecture04.pdf* online. Dostupné z: [https://home.zcu.cz/~bastl/GM1/GM1\\_lecture04.pdf](https://home.zcu.cz/~bastl/GM1/GM1_lecture04.pdf). [citováno 2023-12-04].
- [25] *Centre of Computer Graphics and Data Visualisation*. Webové sídlo. Dostupné z: [https://home.zcu.cz/~smolik/zpg/cviceni/cv\\_08.html](https://home.zcu.cz/~smolik/zpg/cviceni/cv_08.html). [citováno 2023-12-04].
- [26] *inconel-alloy-625.pdf* online. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. [citováno 2023-12-27].
- [27] NEUBAUER, Jiří; Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. 3., rozšířené vydání. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-3421-2.
- [28] *ANOVA*. Webové sídlo. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>. [citováno 2023-12-28].

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

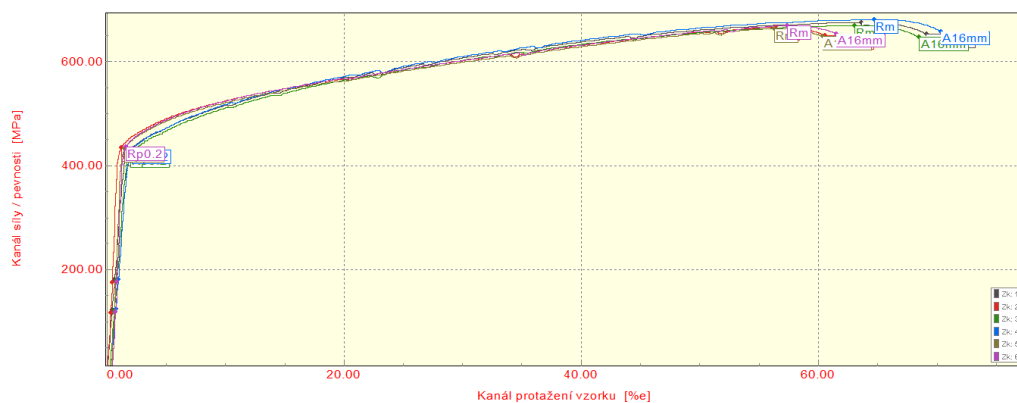
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,001 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser bodově

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	425.62	674.96	61.10	66.71
2	434.30	666.40	54.96	59.09
3	422.08	669.14	60.35	65.89
4	429.19	680.88	61.87	67.55
5	432.50	663.51	54.53	58.63
6	436.15	669.31	55.48	59.65

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	429.97	670.70	58.05	62.92
Směrodatná odchylka	5.39	6.27	3.40	4.21
Minimální hodnota	422.08	663.51	54.53	58.63
Maximální hodnota	436.15	680.88	61.87	67.55



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

**Příloha 1** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru X, rychlosti 1

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

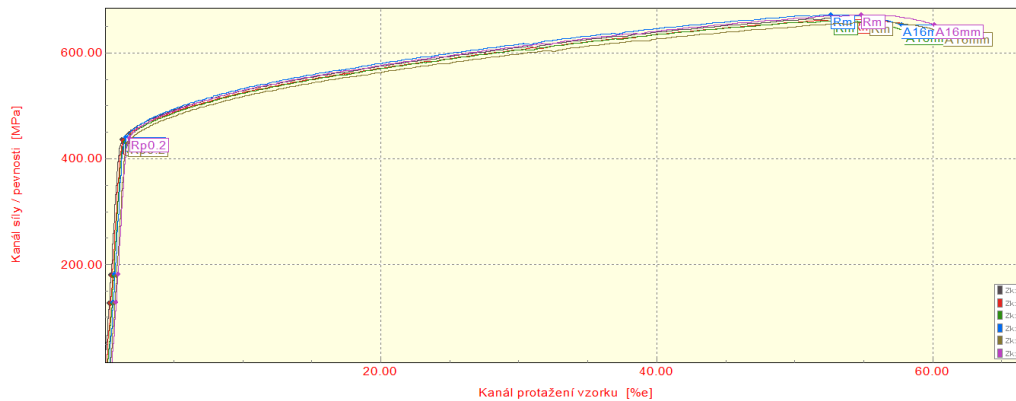
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,01 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser bodově

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	435.45	666.05	51.71	56.97
2	433.40	663.16	52.37	57.69
3	431.89	660.31	51.08	56.27
4	439.53	671.89	50.76	55.92
5	429.42	657.47	53.38	58.81
6	439.01	671.89	52.70	58.06

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	434.78	665.13	52.00	57.29
Směrodatná odchylka	4.00	5.97	1.00	1.10
Minimální hodnota	429.42	657.47	50.76	55.92
Maximální hodnota	439.53	671.89	53.38	58.81



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

**Příloha 2** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru X, rychlosti 2



# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,1 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser bodově

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	421.67	658.21	43.26	43.27
2	418.04	652.53	41.95	41.96
3	425.31	663.98	44.66	44.66
4	423.51	661.08	42.46	42.47
5	419.79	655.36	44.09	44.10
6	427.25	666.91	42.60	42.60

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	422.59	659.68	43.17	43.18
Směrodatná odchylka	3.45	5.38	1.04	1.04
Minimální hodnota	418.04	652.53	41.95	41.96
Maximální hodnota	427.25	666.91	44.66	44.66



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

**Příloha 3** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru X, rychlosti 3

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

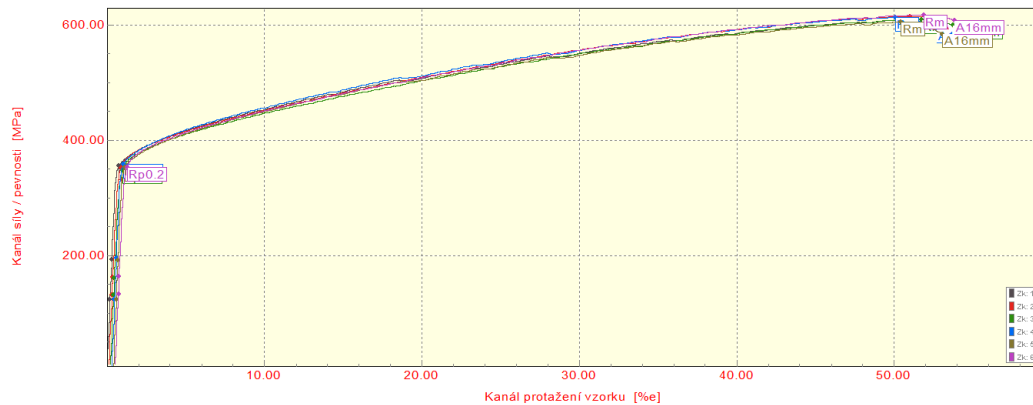
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,001 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser bodově

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	355.04	607.79	49.48	52.16
2	351.98	614.73	49.91	51.91
3	348.62	609.43	50.54	52.56
4	358.31	613.12	48.87	51.52
5	353.61	605.16	49.11	51.77
6	353.29	617.41	50.37	52.38

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	353.47	611.28	49.71	52.05
Směrodatná odchylka	3.21	4.60	0.68	0.39
Minimální hodnota	348.62	605.16	48.87	51.52
Maximální hodnota	358.31	617.41	50.54	52.56



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

**Příloha 4** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru Y, rychlosti 1

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

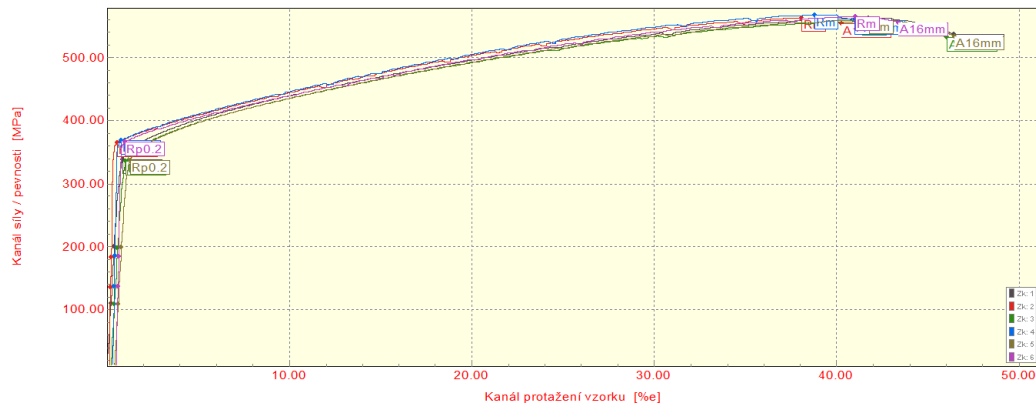
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,01 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser bodově

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	338.10	562.12	40.62	45.39
2	364.76	562.74	37.60	39.79
3	335.44	557.27	40.12	44.83
4	367.89	567.68	38.08	40.30
5	336.82	559.68	40.31	45.03
6	366.05	565.20	40.11	42.44

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	351.51	562.45	39.47	42.96
Směrodatná odchylka	16.18	3.73	1.29	2.49
Minimální hodnota	335.44	557.27	37.60	39.79
Maximální hodnota	367.89	567.68	40.62	45.39



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

**Příloha 5** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru Y, rychlosti 2

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

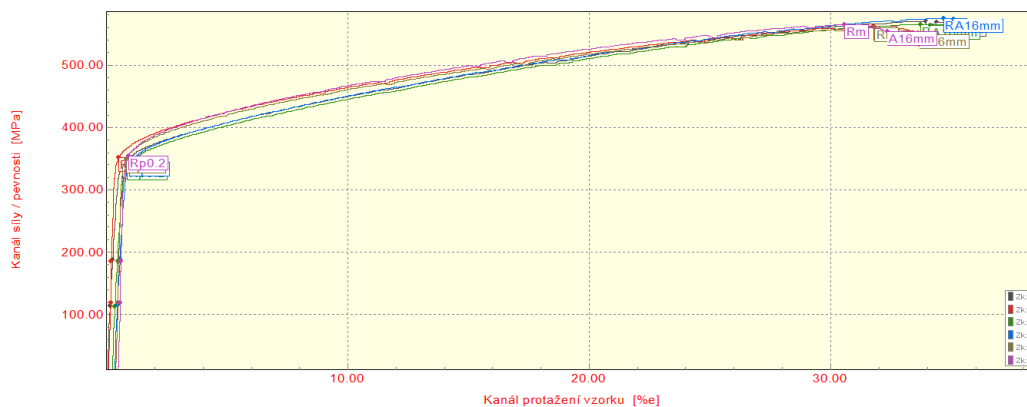
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,1 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser bodově

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	340.59	569.80	33.15	33.58
2	351.22	561.98	31.32	33.20
3	337.81	564.89	32.74	33.17
4	343.43	574.80	33.57	34.01
5	349.77	559.55	31.08	32.94
6	353.67	564.44	29.74	31.52

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	346.08	565.91	31.93	33.07
Směrodatná odchylka	6.37	5.54	1.46	0.85
Minimální hodnota	337.81	559.55	29.74	31.52
Maximální hodnota	353.67	574.80	33.57	34.01



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

**Příloha 6** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu A, směru Y, rychlosti 3

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

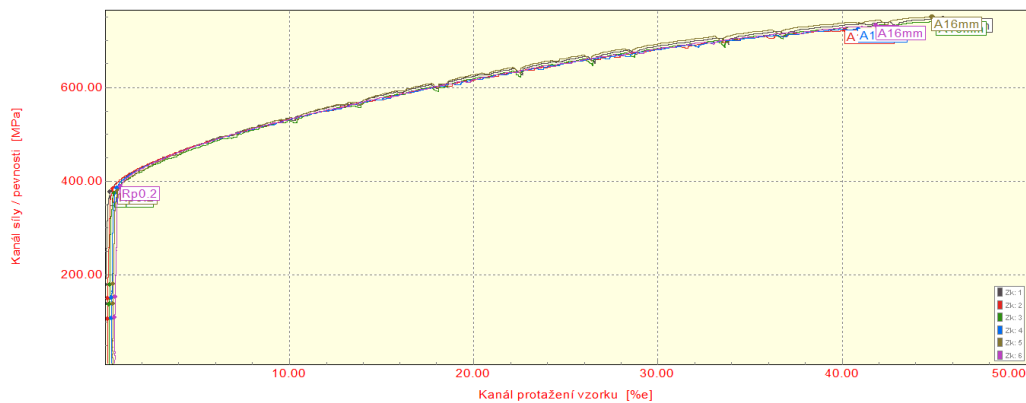
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,001 s<sup>-1</sup>  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser kontinuálně

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	376.79	747.24	45.30	45.35
2	384.00	722.00	39.79	39.82
3	373.84	740.80	44.74	44.79
4	385.51	725.16	40.30	40.32
5	378.96	750.50	44.29	44.34
6	388.41	731.55	41.08	41.10

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	381.25	736.21	42.58	42.62
Směrodatná odchylka	5.60	11.77	2.46	2.47
Minimální hodnota	373.84	722.00	39.79	39.82
Maximální hodnota	388.41	750.50	45.30	45.35



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

**Příloha 7** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru X, rychlosti 1

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

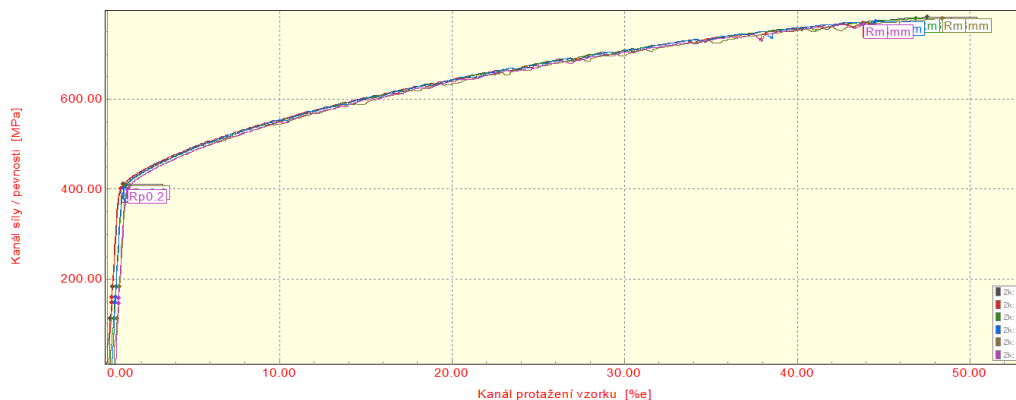
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,01 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser kontinuálně

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	409.94	782.27	46.13	46.13
2	400.43	768.28	42.74	42.74
3	408.37	778.89	45.28	45.28
4	402.09	771.63	43.28	43.28
5	408.04	778.89	46.56	46.56
6	398.79	764.95	42.41	42.41

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	404.61	774.15	44.40	44.40
Směrodatná odchylka	4.73	6.87	1.81	1.81
Minimální hodnota	398.79	764.95	42.41	42.41
Maximální hodnota	409.94	782.27	46.56	46.56



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

**Příloha 8** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru X, rychlosti 2

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

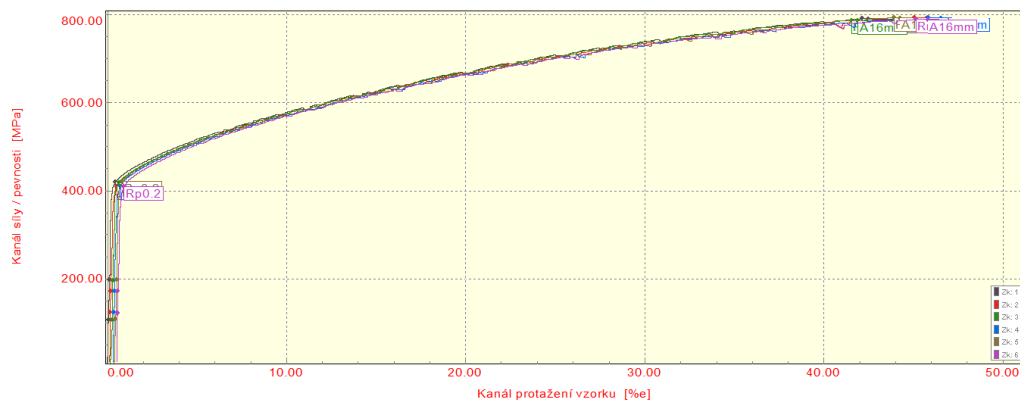
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,1 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser kontinuálně

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	419.80	789.90	41.68	42.02
2	410.53	792.64	44.53	45.21
3	418.15	786.48	40.92	41.25
4	410.28	792.64	45.09	45.78
5	421.19	793.34	43.03	43.38
6	408.92	789.21	44.19	44.86

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	414.81	790.70	43.24	43.75
Směrodatná odchylka	5.48	2.65	1.66	1.84
Minimální hodnota	408.92	786.48	40.92	41.25
Maximální hodnota	421.19	793.34	45.09	45.78



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

**Příloha 9** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru X, rychlosti 3

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

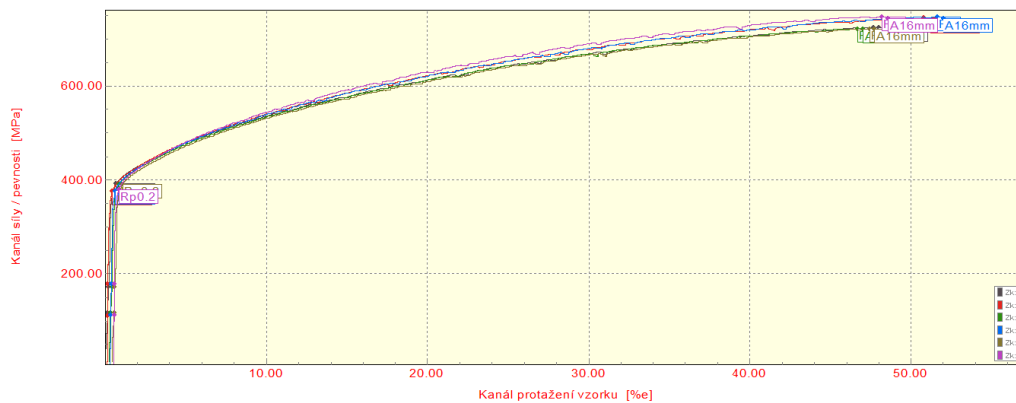
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,001 s<sup>-1</sup>  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser kontinuálně

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	391.85	724.19	46.77	47.12
2	375.84	743.84	50.41	50.82
3	390.40	721.06	45.63	45.97
4	377.17	747.09	51.05	51.47
5	390.30	721.06	46.14	46.48
6	378.79	747.09	47.45	47.83

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	384.06	734.05	47.91	48.28
Směrodatná odchylka	7.52	13.20	2.28	2.31
Minimální hodnota	375.84	721.06	45.63	45.97
Maximální hodnota	391.85	747.09	51.05	51.47



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

**Příloha 10** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru Y, rychlosti 1



# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

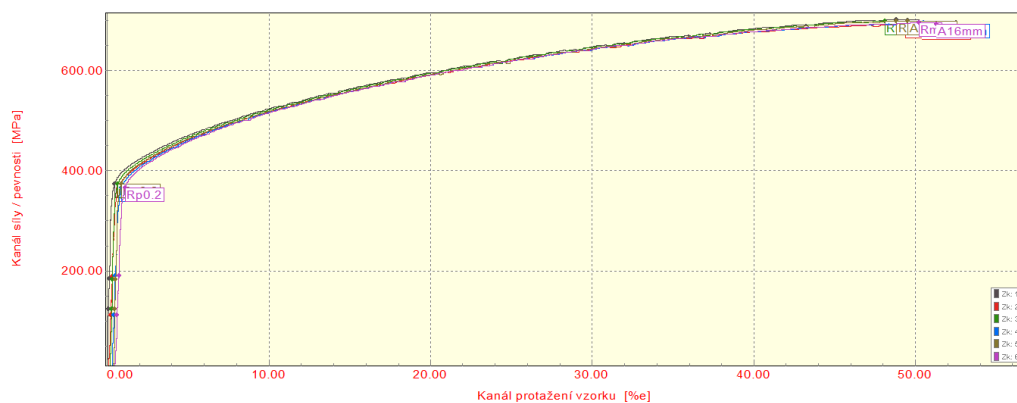
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,01 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser kontinuálně

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	374.30	702.30	48.32	49.04
2	365.45	692.01	48.50	49.56
3	373.05	699.26	47.43	48.14
4	366.61	695.04	49.43	50.50
5	372.82	699.26	47.95	48.67
6	366.82	695.04	48.96	50.03

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	369.84	697.15	48.43	49.32
Směrodatná odchylka	3.95	3.76	0.71	0.88
Minimální hodnota	365.45	692.01	47.43	48.14
Maximální hodnota	374.30	702.30	49.43	50.50



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

**Příloha 11** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru Y, rychlosti 2

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

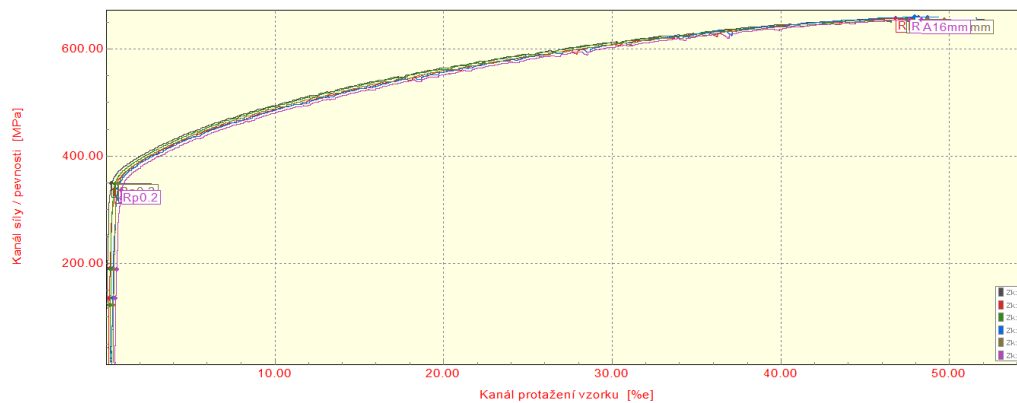
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : Inconel 625  
Rozměry vzorku : [4 x 4] mm  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Teplota : 650°C  
Deformační rychlost : 0,1 s-1  
Vypracoval : Lukáš Sokolář  
Datum provedení testu : květen - září 2023  
Pozn. : laser kontinuálně

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
1	348.73	658.16	47.89	48.92
2	337.50	656.59	46.32	47.05
3	347.51	655.31	47.01	48.02
4	338.53	659.46	47.21	47.95
5	347.17	655.31	48.04	49.07
6	335.91	653.75	46.70	47.44

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A16mm %
Průměrná hodnota	342.56	656.43	47.19	48.07
Směrodatná odchylka	5.83	2.09	0.67	0.80
Minimální hodnota	335.91	653.75	46.32	47.05
Maximální hodnota	348.73	659.46	48.04	49.07



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

**Příloha 12** Protokol statické zkoušky za tepla pro vzorky typu B, směru Y, rychlosti 3