



Stanovení vlivu teploty na deformační odpor

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Radek Čeřovský**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek Čeřovský**
Osobní číslo: **S15000042**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Stanovení vlivu teploty na deformační odpor**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Základní principy tváření za tepla a za studena. Způsoby ohřevu materiálu. Rozdělení operací kování. Materiály používané pro kování za tepla a za studena.
2. Možnosti stanovení velikosti deformačního odporu při výpočtu operací tváření.
3. Pro zvolené slitiny (ocel a slitina Al) zjištění závislosti vlivu teploty na velikost deformačního odporu.
4. Vyhodnocení experimentu.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **ASM HANDBOOK. Volume 14 - Forming and Forging. 6th ed. Materials Park: ASM International, 2004. s. 978. ISBN 0-87170-020-4.**
- [2] **ASM HANDBOOK. Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.**
- [3] **HOSFORD, W.F., CADDEL, R. Metal Forming (Mechanics and Metallurgy). 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007. s. 312. ISBN 978-0-521-88151-0.**
- [4] **PTÁČEK, L. et al. Nauka o materiálu I. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademickénakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.**
- [5] **POLMEAR, I. Light Alloy - From traditional Alloys to Nanocrystals. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.**
- [6] **TSCHAETSCH, H. Metal Forming Practise (Processes Machines Tools). Berlin: Springer-Verlag, 2006. s. 405. ISBN-10: 3-540-33216-2.**
- [7] **MICHNA, Š., NOVÁ, I. Technologie a zpracování kovových materiálů. Prešov: Adin, 2008. s. 326. ISBN 978-80-89244-38-6.**
- [8] **MICHNA Š. a kol. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin s.r.o., 2005. 700 s. ISBN: 80-89041-88-4.**
- [9] **ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.**

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

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **1. února 2019**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



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

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, 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 (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 29.6.2018

Podpis: 

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem teploty na deformační odpor u oceli S460NL a hliníkové slitiny AW-5754. Rozdílnost v základních vlastnostech těchto materiálů je jistě známá. Avšak deformační odpor je méně známá veličina, ale její význam v technické praxi je podstatný. Informace o této veličině lišící se pro různé materiály se využívá v rozsáhlé technologii tváření, především pak u tváření za tepla.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. V teoretické části je popsána technologie kování, ve které se deformační odpor vyskytuje, strukturní teorie ocelí a hliníkových slitin a v závěru je shrnuta zkouška tahem, kterou se hledaná veličina deformačního odporu zjišťuje.

Experimentální část se zabývá přiblížením materiálových vlastností měřených materiálů, popisem průběhu měření, strojů a pomocných zařízení, které byly při měření použity. Závěrem práce je grafické zhodnocení naměřených hodnot.

Klíčová slova

ocel S460NL, slitina AW-5754, kování, deformační odpor, teplota, Gleeble 3500

Annotation

This Bachelor thesis deals with the influence of temperature on the deformation resistance of S460NL steel and aluminium alloy AW-5754. Differences in the basic properties of these materials are certainly known. However, deformation resistance is a lesser-known quantity, but its importance in technical practice is essential. Information about this variable varies for different materials is used extensively in forming technology, especially for hot forming.

The thesis is divided into the theoretical and experimental part. The theoretical part describes the technology of forging in which the deformation resistance occurs, the structural theory of steels and aluminium alloys, and further, the tensile test, in which the sought quantity of deformation resistance is determined, is summarized at the end.

The experimental part deals with the approximation of the material properties of measured materials, the description of the measurements course, the machines and the auxiliary devices used during the measurements. The conclusion of the work is a graphical evaluation of the measured values.

Key words

steel S460NL, alloy AW-5754, forging, deformation resistance, temperature, Gleeble 3500

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za jeho časovou dispozici, pomoc po dobu měření a mnoho potřebných rad k měření i zpracování práce.

Dále bych chtěl velice poděkovat mé rodině a přátelům, kteří mě v práci pomáhali a podporovali.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek.....	9
1 ÚVOD.....	11
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	12
2.1 Tváření.....	12
2.2 Kování.....	13
2.2.1 Základní tvářecí zákony.....	14
2.2.2 Deformační odpor.....	14
2.2.3 Struktura materiálu při kování.....	15
2.2.4 Kovací teploty kovů.....	15
2.2.4.1 Kovací teploty v diagramu Fe-Fe ₃ C.....	16
2.2.5 Ohřívací doby kovů.....	17
2.2.6 Ohřívací kovářské výhně a pece.....	17
2.2.6.1 Kovářské výhně.....	17
2.2.6.2 Kovářské pece pro volné kování.....	18
2.2.6.3 Kovářské pece pro zápusťkové kování.....	18
2.2.7 Výpočet síly a práce při kování.....	20
2.2.8 Základní kovářské operace.....	22
2.2.9 Volné kování ruční.....	24
2.2.10 Volné kování strojní.....	24
2.2.10.1 Volné kování strojní na bucharech.....	25
2.2.10.2 Volné kování strojní na hydraulických lisech.....	25
2.2.11 Zápusťkové kování.....	26
2.2.11.1 Zápusťky.....	26
2.2.11.2 Postup zápusťkového kování.....	28
2.2.11.3 Zápusťkové kování na bucharech.....	29
2.2.11.4 Zápusťkové kování na hydraulických lisech.....	30
2.2.12 Speciální způsoby kování.....	30
2.3 Kovy.....	31

2.3.1	Struktura kovů.....	31
2.3.1.1.	Krystalografické soustavy.....	31
2.3.1.2	Poruchy krystalové mřížky.....	33
2.4	Hliník.....	35
2.4.1	Výroba hliníku.....	35
2.4.2	Slitiny hliníku.....	35
2.4.3	Tepelné zpracování hliníku.....	36
2.5	Zkouška tahem.....	37
2.5.1	Výstup zkoušky.....	38
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	40
3.1	Zkoušené materiály.....	40
3.1.1	Ocel EN S460NL.....	40
3.1.2	Hliník EN AW-5754 [AlMg3].....	41
3.2	Příprava zkušebních vzorků.....	42
3.2.1	Soustružení zkušebních vzorků.....	42
3.2.2	Měření teploty.....	43
3.2.3	Instalace termočlánků.....	43
3.3	Stroj Gleeble3500.....	44
3.4	Postup měření.....	45
3.5	Vyhodnocení dat.....	47
3.5.1	Měření slitiny Al.....	48
3.5.2	Měření oceli.....	54
4	ZÁVĚR.....	60
	Použitá literatura.....	61

Seznam symbolů a zkratk:

T_T [°C]	Teplota tání
EN	Evropská norma
σ_D [MPa]	Deformační odpor
σ [MPa]	Napětí
σ_1 [MPa]	Primární napětí
σ_3 [MPa]	Třetí hlavní napětí
d [mm]	Průměr
h [mm]	Výška
μ [-]	Činitel smykového tření
R_e [MPa]	Mez kluzu
R_m [MPa]	Mez pevnosti v tahu
A [%]	Tažnost
Z [%]	Kontrakce
L_o [mm]	Počáteční délka
L_u [mm]	Konečná délka
S_o [mm ²]	Počáteční průřez
S_u [mm ²]	Konečný průřez
x [mm]	Obecná vzdálenost
S_x [mm ²]	Průřez na obecné vzdálenosti x
F [N]	Síla
ε [-]	Poměrné prodloužení
S [mm ²]	Průřez průmětu výkovku kolmého na směr rázu
k [-]	Koeficient vyjadřující vliv deformační rychlosti a jiných činitelů
W [J]	Práce
A_1 [°C]	Nejnižší teplota, do které zůstává austenit při rovnovážném ochlazování zachován
A_3 [°C]	Teplota určující překristalizaci tuhého roztoku austenitu
E [MPa]	Modul pružnosti v tahu
l [mm]	Délka součásti

s	Směrodatná odchylka
\bar{x}	Aritmetický průměr hodnot
N	Počet měření
S_{in}	Plocha pod křivkou po integraci
x_{in}	Interval integrace
x_i	Naměřené hodnoty

1 Úvod

V dnešní době mnoha materiálových a výrobních možností se stále velmi dobře uplatňuje výrobní proces tváření. Výsledky této práce se však týkají především technologie kování. V technologii kování má velký význam veličina, kterou nazýváme deformační nebo přetvárný odpor. Tento odpor se dá velmi stručně definovat jako snaha materiálu bránit se proti změně tvaru při působení rázů nebo síly lisu. Pokud víme něco o kování, je známo, že se především za vysokých teplot (závislé na druhu materiálu), abychom nemuseli vytvářet tak velkou tvářecí sílu. Tento fakt je důležitý pro obsah této práce, která se zabývá právě vlivem teploty na tváření materiálu, tedy závislostí deformačního odporu na teplotě.

Pro zjištění této závislosti je třeba uskutečnit několik měření, kde se postupně mění teplota a případně materiál. Tato měření se provádějí na zařízení, které umožňuje vytvořit tahovou sílu na normovaný vzorek a to vše za konstantní teploty po dobu konání měření. Dle požadavků na měření, které musí zařízení splňovat je patrné, že toto zařízení a jeho další pomocná zařízení, která jsou využita (jako je chlazení, kompresor vytvářející vakuum, propojený počítač, řídicí jednotka), nejsou levnou záležitostí.

Zařízení, které spolupracuje s programem v PC, poté zpracuje výsledky měření jako je růst tahové síly a prodloužení vzorku až jeho destrukce. Ty nám poté zprostředkuje pomocí tabulky hodnot. Z těchto výsledků je pak třeba vybrat potřebné hodnoty, které se musí následně transformovat do podoby, která je nám příjemná pro výpočet a nejlépe nám ukáže výsledek celého měření. U této práce je nejvhodnější tabulkové hodnoty vložit do grafů závislosti deformačního odporu na teplotě.

Celý tento proces je tedy spíše vědecká záležitost, na jejíž podstatě dále vytváříme poznatky, které se využijí v praxi. Důležitost těchto vzniklých poznatků z měření lidé pohybující se v praxi velmi ocení, jelikož mohou mít vliv na produktivitu výroby a kvalitu výsledného výrobku, což jsou hlavní požadavky firem v dnešní době. Bez kvalitního výrobku firma nezíská zakázky a při časové náročnosti na výrobu výrobku firma ztrácí finance.

V práci se dá také zjistit stručná teorie struktury kovů a hliníku, jež jsou důležitým zdrojem informací pro pochopení děje, který se uskutečňuje uvnitř materiálu při jeho ohřevu nebo tváření. I samotná znalost těchto informací o struktuře materiálu těchto dvou kovů může mít na člověka pozitivní vliv chápání materiálu kolem nás, jelikož tyto materiály jsou v dnešní době velmi rozsáhlé v našem okolí.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Tváření

Tváření je technologický proces, při kterém dochází ke změně tvaru polotovaru za působení vnějších sil bez odběru třísek. Podstatou tváření je vznik plastických deformací. Toho dosáhneme při překročení meze kluzu daného materiálu. Při tváření se mění vnitřní struktura materiálu, což má následně vliv na mechanické vlastnosti.

Výhodami tváření je vysoké využití materiálu (nevzniká odpad ve formě třísek), vysoká produktivita a velmi dobrá rozměrová přesnost materiálu. Nevýhodou jsou však vysoké pořizovací ceny strojů a nástrojů určených k tváření.

Tváření se rozděluje:

- tváření za studena
- tváření za tepla
- tváření za poloohřevu

Tváření za studena

Tváření za studena probíhá pod teplotou rekrystalizace, jejíž hodnota je přibližně $0,4T_T$. Při tváření za studena dochází ke zpevňování materiálu a nárůstu odporu proti dalšímu tváření.

Mezi výhody patří vysoká přesnost rozměrů, kvalitní (neokujený) povrch a zlepšení mechanických vlastností jako je pevnost a mez kluzu. Nevýhodami je nutnost použití velkých tvářecích sil a nerovnoměrné zpevňování.

Tváření za tepla

Probíhá nad rekrystalizační teplotou. Díky těmto teplotám lze materiál tvářet o hodně menšími silami než je tomu u tváření za studena. Hlavní technologií je kování, kde se materiál tváří za pomoci vysokých teplot údery bucharu nebo silou lisu.

Výhodami tváření za tepla jsou tedy menší tvářecí síly a dochází k odstranění případných trhlin, bublin atd. Nevýhodou je poměrně zdlouhavý a nákladný proces a horší kvalita povrchu materiálu.

Tváření za poloohřevu

Tato metoda je kompromisem mezi tvářením za studena a tvářením za tepla. Probíhá za teplot $0,3 \div 0,7T_T$. Využívá se, protože dohází ke zlepšení přetvárných vlastností oproti tváření za studena, snížení deformačních odporů, zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností a získání lepších povrchů než u tváření za tepla.

Materiály pro kování za studena a za tepla

Kovat se dají za vyšších teplot téměř všechny technické materiály současnosti. Avšak při kování za studena se zvětšuje potřebná síla ke tváření a některé kovy za studena nejsou tvářitelné vůbec kvůli jejich struktuře (např. titan, hočík, aj.).

2.2 Kování

Kování je beztržková technologie tváření za tepla při působení rázů a sil. Materiál se zahřívá v kovací výhni nebo pecích na tzv. kovací teploty pro zlepšení tvárnosti materiálu, který se následně tváří za pomoci úderů bucharu nebo síly lisu.

Materiál, který vznikne kováním, se nazývá výkovek. Polotovarem pro kování je zpravidla válcový polotovár.

Při kování se mění mechanické vlastnosti materiálu, zjemňuje se struktura kovu a zvětšuje se houževnatost. Kvalita povrchu kovaného materiálu a přesnost rozměrů je velmi malá pro dnešní technický svět. Výkovek se často ještě dokončuje jinou technologií, nejčastěji však technologií obrábění.

Historie technologie

Kování patří mezi nejstarší technologie vůbec. Železná ruda se v minulosti zpracovávala v hliněných jámách. Vyredukované svářské železo obsahovalo mnoho strusky, která se následným, dříve ještě ručním kováním odstranila a zároveň se tvaroval materiál na požadovaný tvar a rozměry.

Postupem času již nestačila lidská síla na tváření materiálů, které šly také vpřed a jejich vlastnosti již neumožňovaly působení pouze lidské síly pro získání výsledného tvaru výkovku. Proto v 16. století vznikla první mechanická kladiva, která byla poháněna vodním kolem. To zapříčinilo, že se kovárný stavěly v blízkosti řek a zavedl se pro ně název "hamry".

Rozvoj strojního kování nastal v polovině 19. století při vynalezení parního stroje, který poháněl buchar.



Obr.1 Kování v období 16.století [18]

2.2.1 Základní tvářecí zákony

1. *Zákon stálosti objemu*- objem materiálu před deformací se rovná objemu materiálu po deformaci

Tento zákon je u kování poněkud diskutabilní, protože při kování odpadá z kovaného materiálu struska, což je také část materiálu. Ovšem tato změna objemu je zanedbatelná.

2. *Zákon nejmenšího odporu*- materiál deformovaného tělesa se přemísťuje vždy ve směru nejmenšího odporu

Tento zákon je v kování velmi důležitý. Díky němu se v kování využívá různě tvarovaných bucharů a zápustek.

2.2.2 Deformační odpor

Deformační odpor materiálu představuje součet všech napětí, které musí překonat tvářecí síla k realizaci tváření.

Při tváření materiálu vnější silou vyvozenou určitým tvářecím nástrojem vzniká vnější napětí σ_1 . Materiál odporuje tváření, jeho tok během tváření je však usměřňován nástrojem. Ve směru nejmenšího odporu (kam tedy teče materiál) pak vzniká napětí σ_3 a ve směru největšího odporu napětí σ_D , které je rovno vnějšímu napětí σ_1 . Napětí σ_D však působí opačným směrem než hlavní napětí σ_3 . Z toho plyne, že deformační odpor σ_D je součtem meze kluzu a třetího hlavního napětí.

$$\sigma_D = R_m + \sigma_3 \quad (2.1)$$

kde značí: σ_D - deformační odpor
 R_m - mez kluzu
 σ_3 - třetí hlavní napětí

Deformační odpor závisí na teplotě, rychlosti deformace, chemickém složení materiálu a stupni deformace.

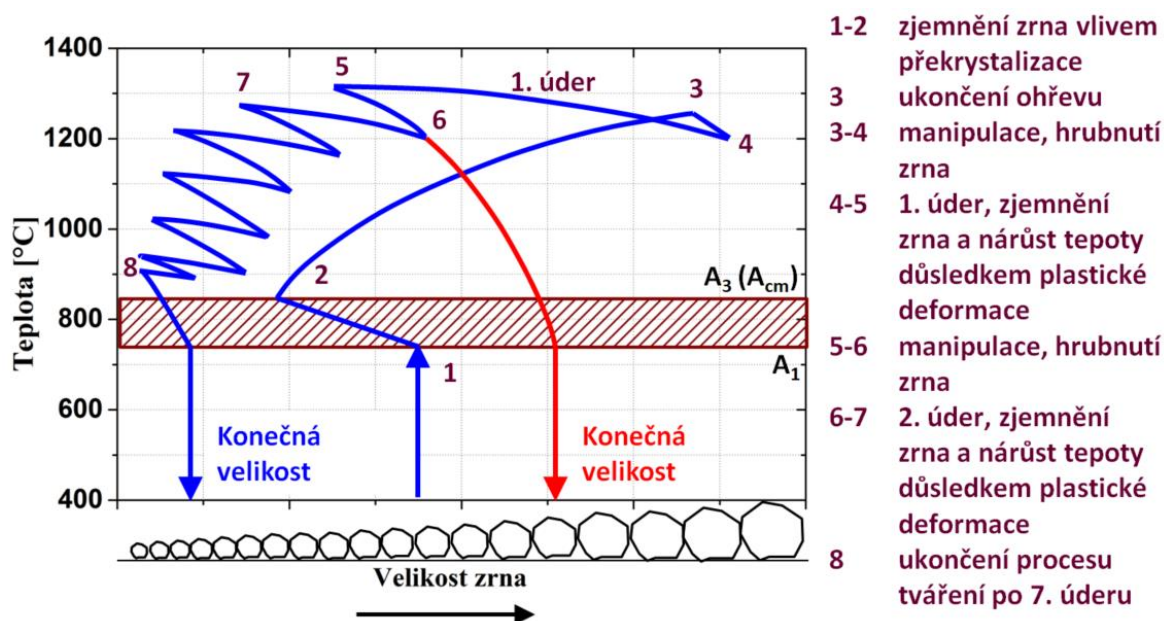
Například u pěchování válců kruhového průřezu mezi rovnoběžnými plochami je deformační odpor roven:

$$\sigma_D = \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h}\right) \quad (2.2)$$

kde značí: μ - činitel smykového tření
 d - průměr válce
 h - výška válce

2.2.3 Struktura materiálu při kování

Počet úderů při kování ovlivňuje výslednou velikost zrna výkovku a tím i jeho mechanické vlastnosti viz Obr.2.



Obr.2 Kovací diagram [11]

2.2.4 Kovací teploty kovů

Ohřejeme-li materiál na určitou teplotu, snaží se částice přejít do rovnovážného stavu, zmenší se vnitřní pnutí a nastává "zotavení".

Dalším zvyšování teploty dojde k rekrystalizaci, při které poklesne pevnost materiálu, zvýší se tažnost a změní se tvar zrn. Nedochozí však ke změně krystalické mřížky.

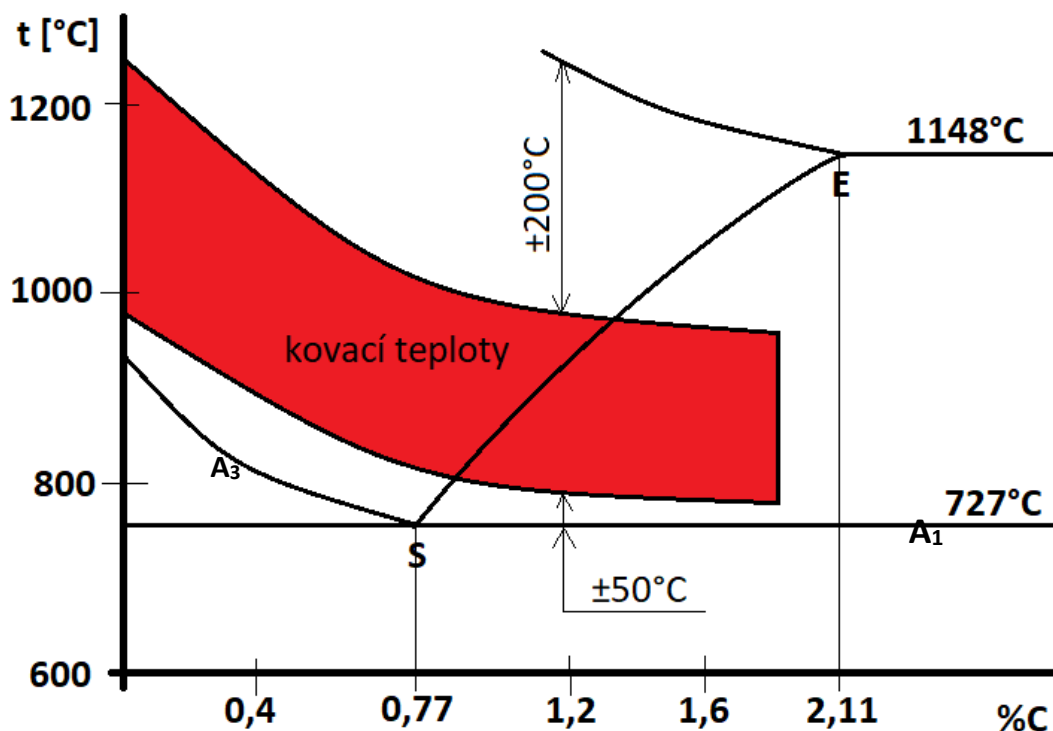
Pokud dojde ke změně krystalické mřížky mluvíme už o pojmu "překrystalizace".

Právě kování a tváření kovů za tepla obecně realizujeme nad rekrystalizační teplotou daného materiálu. Uvádí se, že tato teplota je přibližně 70% teploty tání materiálu.

Správná kovací teplota a její udržení je předpokladem pro správné tváření materiálu. Kovací teploty by měly být nejvyšší únosné, kterých můžeme dosáhnout pro nejsnadnější tváření materiálu, ale zároveň nesmíme přesáhnout teplotu, kde by materiál začal téci. Čím vyšší je teplota, tím menší je deformační odpor a tím menší opotřebení zápustek.

2.2.4.1 Kovací teploty v diagramu Fe-Fe₃C

Kovací teploty kovů je oblast nacházející se v diagramu železu-uhlík (Fe-Fe₃C).



Obr.3 Schéma oblasti kovacíh teplot v úseku diagramu Fe-Fe₃C

Oblast kovacíh teplot se nachází 30-50°C nad teplotami A_3 pro podeutektoidní oceli a A_1 pro nadeutektoidní oceli a oblast končí zhruba 200°C pod křivkou solidu.

Hlediska určení kovacíh teplot

K určení správného technologického postupu ohřevu materiálu by se mělo vzít v úvahu:

1. Chemické složení materiálu.
2. Teplota nebo interval teplot, při kterém má materiál největší tvárnost se zohledněním k rovnovážnému diagramu materiálu tak, aby tváření probíhalo v jedné fázi. To proto, že reálné technické materiály jsou heterogenní => může dojít k nerovnoměrné deformaci vlivem různých vlastností v různých místech kovaného materiálu. To by mohlo vést ke zvětšení odporu a snížení tvárnosti kovaného materiálu.
3. Změny struktury během ohřevu a ochlazování materiálu.
4. Vlastnosti materiálu dané případným předchozím tvářením.
5. Stupeň deformace a dokovací teploty.
6. Náchylnost různých materiálů k přehřátí.
7. Změnu teploty v průběhu tváření (při tváření mohou vznikat další zdroje tepla).

2.2.5 Ohřivací doby kovů

Sledování ohřevu materiálu rozdělujeme na 2 druhy:

1. Doba ohřevu potřebná k dosažení určité teploty
2. Teplota ohřívaného materiálu za určitou dobu ohřevu.

Na ohřivací dobu materiálu má vliv jeho tloušťka. U tenkých těles je při ohřevu teplotní spád malý až zanedbatelný. Avšak u silných těles je rozdíl teplot v tělese značný a je příčinou tepelných pnutí.

Při matematickém řešení ohřivacích dob závisí na 4 kritériích vycházejících ze základů termodynamiky. Tyto vztahy jsou však složité, proto se v praxi nepoužívají. Místo toho se používají praxí osvědčené empirické údaje. Například v závislosti na tloušťce, jdou ohřivací doby přibližně určit takto:

tloušťka materiálu < 30 mm 3 - 4 min/cm

tloušťka materiálu < 65 mm 6 - 8 min/cm

tloušťka materiálu < 130 mm až 12 min/cm

2.2.6 Ohřivací kovářské výhně a pece

Kovářské výhně a pece slouží k ohřátí polotovaru na kovací teplotu daného materiálu. V technologickém procesu výroby kování musí být umístěny co nejbližše samotnému kování z důvodu minimalizace úniku tepla z polotovaru.

2.2.6.1 Kovářské výhně

Kovářské výhně se používají především u volného ručního kování. Dříve to byla nezbytná součást každé kovárny.

Kovářská výhně musí být zhotovena z materiálu velmi odolnému teple, jelikož je v přímém styku s ohněm. Její konstrukce se skládá ze stolu, ve kterém je dutina s roštem. Po zapálení ohně v oblasti roštu a důkladném rozhoření ohně se přivádí dutinou ze spodní části stolu vzduch, který dodá ohni potřebnou intenzitu a tím i teplotu. Dříve se používaly k přívodu vzduchu kožené měchy. Pro odvod kouře by měla mít výhně nad sebou prostor k úniku kouře.



Obr.4 Kovářská výhně [8]

2.2.6.2 Kovářské pece pro volné kování

K ohřevu polotovaru k volnému kování se téměř výhradně používá komorových pecí. Ty umožňují dobré řízení tepelného režimu a mohou být opatřeny zařízením pro využití odpadového tepla.

Nejčastěji se vytápí plynem. Pro ohřev větších polotovarů se využívá možnosti uložení nístěje na podvozek, čímž vzniká možnost jejího vytažení před pec, uložení polotovaru a opětovného zasunutí. V tomto případě hovoříme o komorové peci vozové.

2.2.6.3 Kovářské pece pro zápustkové kování

Pro ohřívání materiálu pro zápustkové kování je více možností ohřevu. Možné jsou tyto druhy pecí:

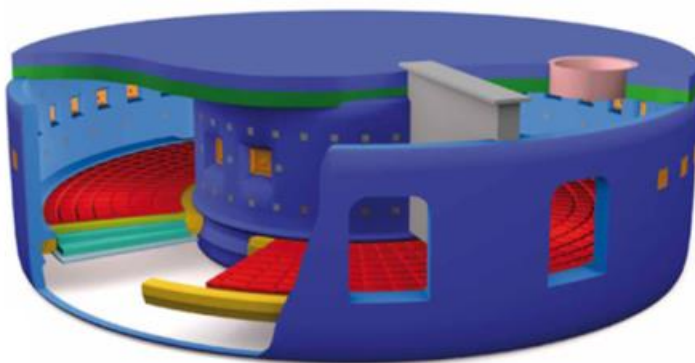
- a. karuselové pece
- b. talířové pece
- c. komorové pece (nejčastěji strkací)
- d. štěrbinové pece

Karuselové pece

Jedná se o pec průchozí, která je vhodná pro velký rozsah materiálů, jejich tvarů a rozměrů.

U tohoto typu pece jsou hořáky umístěny na vnějším plášti pece a to tak, že směřují proti směru pohybu nístěje. Nístěj pece je pak uložena na koulích pomocí opěrných vodících drážek. Dalším způsobem uložení nístěje je využití pevně uložených nosných kladek. Pracovní prostor je omezen velikostí vyzdívky a má část předehřívací, ohřívací a vyrovnávací.

Výhody této pece je rovnoměrné ohřátí materiálu a redukovatelnost ohřevu (automatická). Nevýhodou tohoto typu pece je, že vyžaduje poměrně velký zástavbový prostor.



Obr.5 Schéma karuselové pece [11]

Talířové pece

Talířové pece jsou poddruhem karuselových pecí. Mají charakter průběžných pecí, protože ohřívání materiálu se zde pohybuje uvnitř pece po stále stejném uzavřeném prostoru. Teplota v celém pracovním prostoru je homogenní a odpovídá požadujícím teplotám kování daného ohřívajícího materiálu.

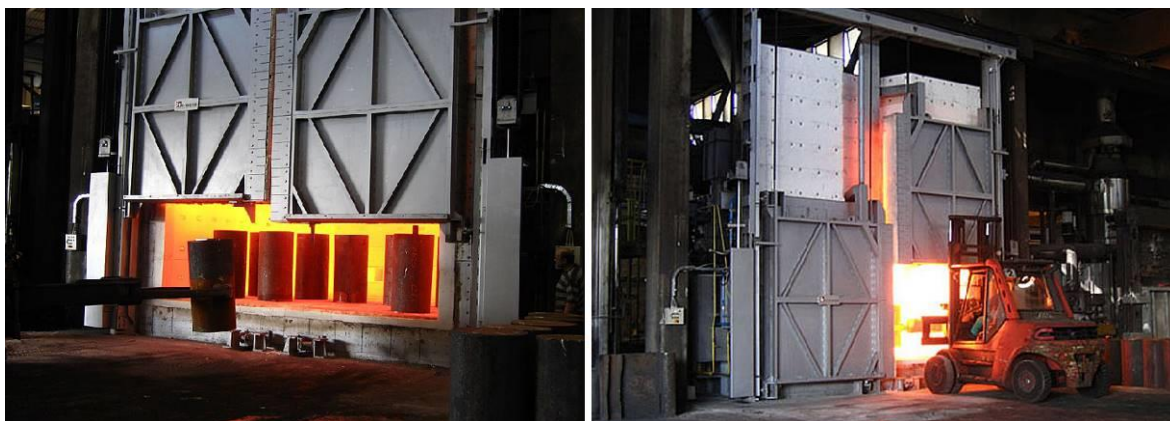
Talířová pec má pouze jeden otvor, jímž se materiál do pece vkládá i odebírá. Hořáky jsou uloženy tangenciálně na plášti pece směrem do pracovního prostoru. Nístěje pece je otočná a je uložena na ocelových kuličkách nebo kladkách a má tvar plné desky.

Výhodou tohoto druhu pecí je jejich cyklický chod a snadná obsluha. Nevýhodou například oproti karuselovým pecím je ekonomické hledisko, jelikož se zde nevyužívá odpadové teplo vzniklé odchodem spalin.

Pece komorové (strkací)

Po karuselových pecích se jedná o nepoužívanější ohřívací zařízení pro větší série. Na rozdíl od talířových a karuselových pecí je zde využito pevné nístěje s mechanizovaným průchodem ohřívajícího materiálu. Strkací zařízení je pak umístěno mimo pracovní prostor.

Pracovní prostor se dělí na předehřívací a ohřívací část a hořáky jsou zde umístěny v bočních stěnách.



Obr.6 Komorová pec [14]

Pece štěrbinové

Pece štěrbinové se využívají především pro ohřev konců tyčí a trubek. Mohou být dvojího druhu - štěrbinové pece s otevřenou či uzavřenou štěrbinou.

Pracovní prostor tvoří komora, která má v čelní straně štěrbinu. Hořáky jsou umístěny v zadní nebo boční stěně a jsou uloženy pod ohříváním materiálem. Manipulace s ohříváním materiálem je buď ruční (uzavřená štěrбина), nebo se využívá dopravníku (otevřená štěrбина), kde materiál prochází komorou.

2.2.7 Výpočet síly a práce při kování

Výpočet síly

Tvářecí síla F je síla vytvářena tvářecím nástrojem. Právě tato síla je potřebná k překonání deformačního odporu tvářeného materiálu. Velikost deformační síly je dána součinem deformačního odporu a průmětu plochy materiálu do roviny kolmé na směr působící síly.

$$F = \sigma_D * S \quad (2.3)$$

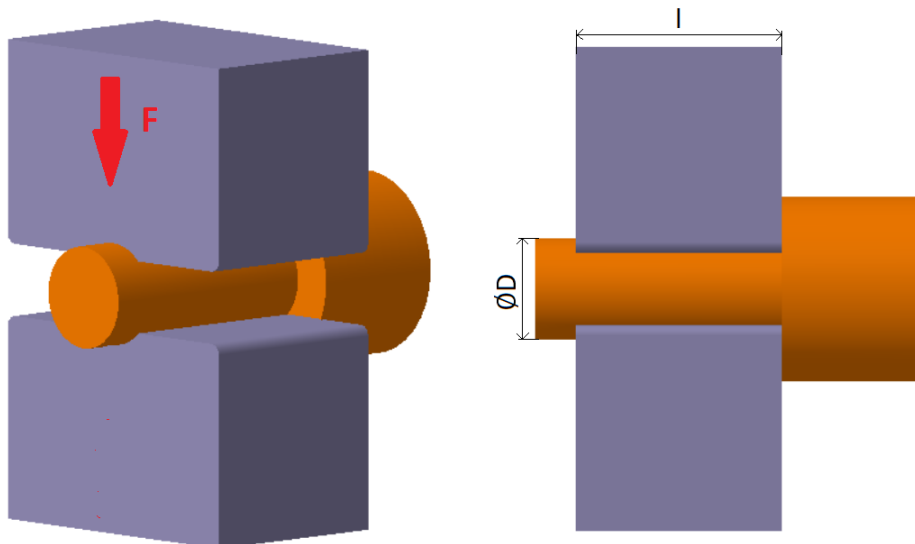
kde značí: F - deformační síla

S - průmět plochy do roviny kolmé na směr působící síly

pro pěchování válce plochými kovadly bude vztah pro působící sílu:

$$F = \sigma_D * m * S = \sigma_D * \left(1 + \frac{\mu}{3} * \frac{d}{h}\right) * \frac{\pi d^2}{4}$$

pro kování kruhového průřezu ve tvarových kovadlech:



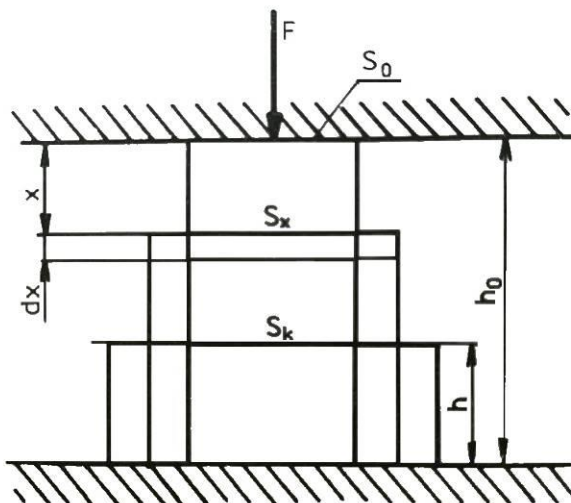
Obr.7Kování kruhového průřezu ve tvarových kovadlech

$$F = \sigma_D * m * S = \sigma_D * \left(1 + \frac{2}{3} * \mu * \frac{l}{d}\right) * \frac{\pi d^2}{4} * l \quad (2.4)$$

kde značí: l - délka kovadel

Výpočet práce

Obecný postup výpočtu práce se provádí za předpokladu konstantního deformačního odporu a rovnosti objemů.



Obr.8 Pěchování mezi plochými kovadly[1]

Obecný vzorec pro práci:

$$dW = F dx \quad (2.5)$$

po dosazení za F ze vzorce 2.5 dostáváme:

$$dW = (k_d * S) dx \quad (2.6)$$

Velikost průřezu S je závislá na vzdálenosti x a lze ji vyjádřit za pomoci stálosti objemů pro jakoukoliv vzdálenost x :

$$S_x = \frac{V}{h_0 - x} \quad (2.7)$$

dosazením vzorce 2.7 do vzorce 2.6 získáváme vztah:

$$dW = \sigma_D * \frac{V}{h_0 - x} dx \quad (2.8)$$

následnou integrací v mezích $x=0$ a $x=h_0 - h$ získáme výsledný vztah pro práci ve tvaru:

$$W = \sigma_D * V * \ln \frac{h_0}{h} \quad (2.9)$$

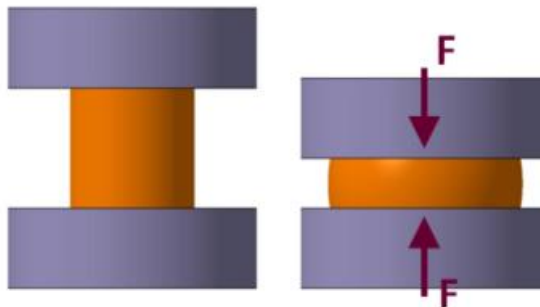
kde značí:

- W - práce
- S - průřez materiálu
- S_x - průřez materiálu na obecné vzdálenosti x
- V - objem materiálu
- h_0 - původní výška válce
- h - konečná výška válce

2.2.8 Základní kovářské operace

a. Pěchování

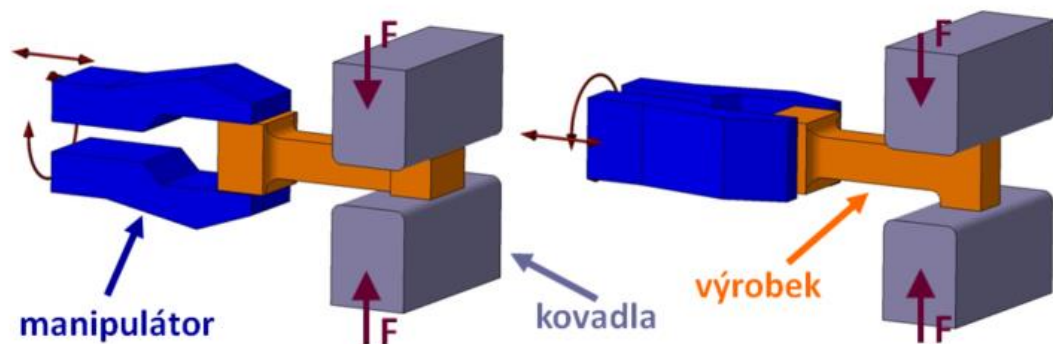
Pěchování je kovářská operace, kde chceme docílit zpevnění materiálu. Tedy nashromáždění krystalů kovu na co nejmenším prostoru. Dochází zde ke snížení délky a zvětšení průřezu materiálu.



Obr.9 Schéma operace pěchování [11]
a) v celé délce, b) uprostřed, c) na konci

b. Prodlužování

Prodlužování je v kovářství operace, kdy jednotlivými údery po celé délce kovaného materiálu prodlužujeme jeho délku za stálého otáčení materiálu. Tím však zmenšujeme průřez výsledného výrobku.



Obr.10 Schéma operace prodlužování [11]

Musí být splněn zákon zachování hmoty:

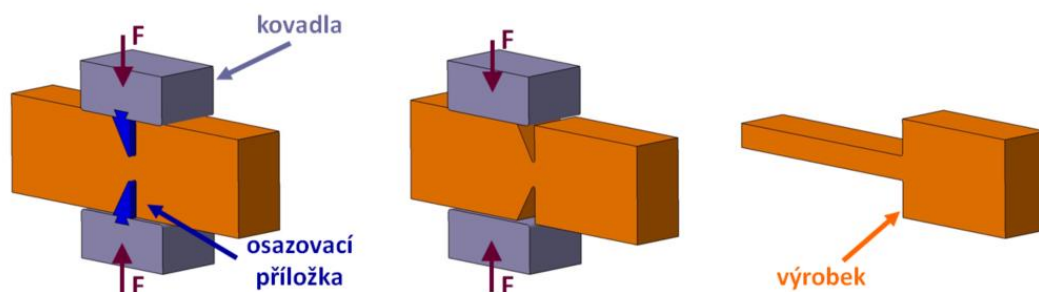
$$b * h * l = b_1 * h_1 * l_1 \quad (2.10)$$

kde značí:

- b - šířka po prodlužování
- b₁ - šířka před prodlužováním
- h - výška po prodlužování
- h₁ - výška před prodlužováním
- l - délka po prodlužování
- l₁ - délka před prodlužováním

c. Osazování (prosazování, přesazování)

Je zeslabení tyče v určité délce. Provádí se zaškracením polotovaru osazovacím kladivem nebo oblíkem a to jednostranně nebo oboustranně s následujícím prodloužením osazené části. Osazování se také využívá pro změnu geometrie v určitém místě.



Obr.11 Operace oboustranného osazování [11]

d. Ohýbání

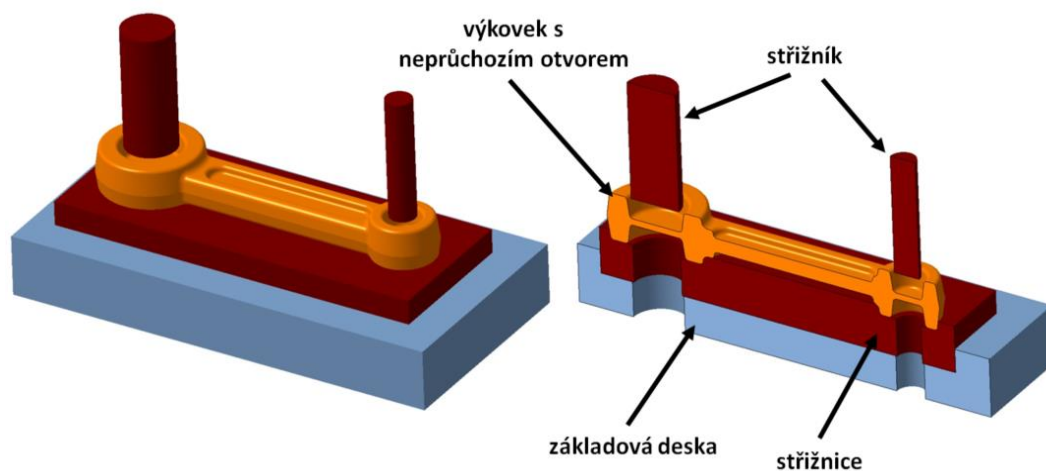
Ohýbat materiál v technologii kování lze za pomoci hrany kovadliny nebo v zápustkách. Protože se však v místě ohybu zeslabuje průřez, je třeba ho poté opětovným pěchováním uvést do původního rozměru.

e. Sekání, nasekávání

Sekání a nasekávání je pomocná operace např. k operacím osazování, přesazování a prosazování.

f. Děrování

Děruje se pomocí otvoru, který je v kovadlině a průbojníku nebo pomocí přípravků. Avšak děrování pomocí kovadliny se již nepoužívá. Pro vytvoření otvoru, který např. nebyl zakomponován v zápustce se využívá téměř výhradně technologie stříhání. Technologie stříhání patří mezi technologie tváření za studena.



Obr.12 Schéma operace děrování [11]

2.2.9 Volné kování ruční

Volné kování ruční se provádí na kovadině za pomoci ručního náradí. Materiál se ohřívá především v kovářských výhních nebo menších ohřívacích pecích a následně je tvarově upravován úderem kladiva. Tato metoda patří mezi dnes již nevyužívané. Velmi zde záleží na kvalifikaci pracovníka.

Volně kované výkovky se navrhují v jednodušším tvaru, než bude vypadat finální výkovek. K požadovanému tvaru je přidán tzv. technologický přídavek. Tento přídavek slouží pro další zpracování, jelikož tvar a drsnost povrchu po volném kování je velmi neuspokojivá.



Obr. 13 Náradí používané při ručním kování [5]

2.2.10 Volné kování strojní

Volné kování na strojích se využívá především pro výkovky velkých rozměrů a hmotností, kde nestačí lidská síla. Pozitivem je vyvození větších sil než lidských, i když to není hlavní důvod, jelikož materiál je nahřátý právě kvůli zmenšení potřebných sil ke změně tvaru výkovku. Jedná se tedy především o usnadnění lidské práce.

Volné kování strojní je kování mezi horním a dolním bucharem. Horní kovadlo je rybinovitou částí připevněno k beranu bucharu, dolní kovadlo je připevněno k tzv. šalotě neboli stolu bucharu.

Strojně se kove pod buchary o váze až 5 tun. Pro kování výkovků, které potřebují větší působící sílu (rozměrově velké výkovky) se používají hydraulické lisy.

2.2.10.1 Volné strojní kování na bucharech

Kování na bucharech je specifické opakovanými údery bucharu na kovaný materiál.

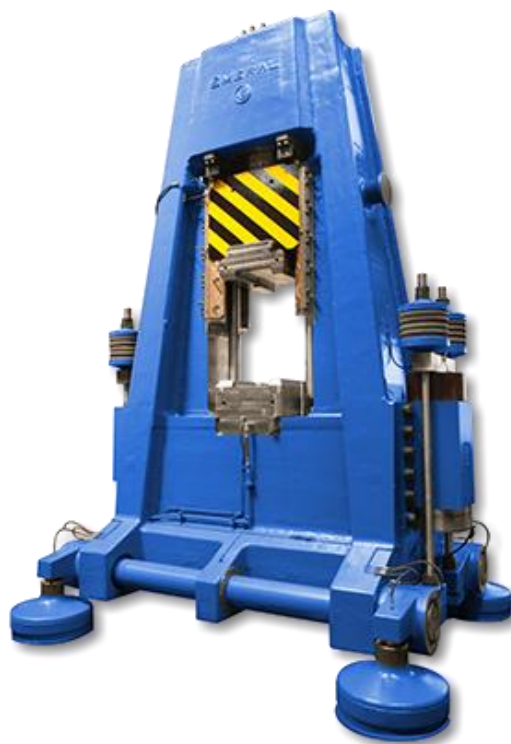
Pružinový buchar:

Elektromotor pohánějící klikový mechanismus přes nejčastěji řemenový převod nebo v současné době třecí spojku působí na ploché pružiny. Tyto pružiny mění otáčivý pohyb klikového mechanismu na pohyb přímočarý vratný, jež je převáděn na zadní konec ploché pákové pružiny, která kýváním uvádí beran do pohybu.

Pneumaticko-hydraulický buchar (Obr. 14):

Tento buchar také využívá klikového mechanismu, který pohání klikový mechanismus. Ovšem zde je hlavní pružící element vzduch uzavřený v pracovním válci. Prudkost úderů můžeme regulovat při stálých otáčkách klikového mechanismu pomocí změny množství vzduchu ve válcích mezi písty.

Současné pneumatické buchary jsou konstruovány dvojčinně. To znamená, že kompresor vytváří střídavě přetlak a podtlak vzduchu pod pístem beranu i nad ním. Tím získáme rychlý chod a tvrdší údery kovádla na kovaný materiál.



Obr. 14 Pneumaticko-hydraulický buchar [13]

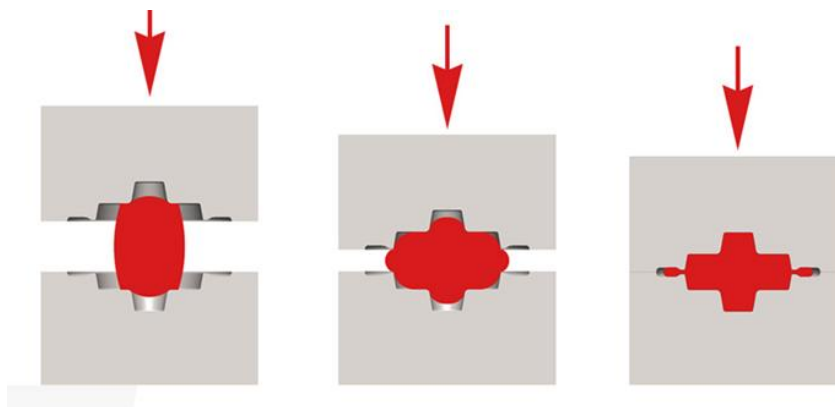
2.2.10.2. Volné strojní kování na hydraulických lisech

Kování na hydraulických lisech se vyznačuje klidnou konstantní nebo lineární silou. Kovací lisy v současné době dosahují tvářecí síly až 120 MN. Slouží nejčastěji k volnému kování velkých výkovků až do hmotnosti 350 tun. Lisy jsou obvykle svislé, dvousloupové nebo čtyřsloupové.

2.2.11 Zápustkové kování

Zápustkové kování je tváření nahřátého materiálu uvnitř zápustky, která má tvar požadovaného výkovku. Výkovky tvářené v zápustce se vyznačují větší přesností, drsností a vyšší pevností než výkovky kované volným způsobem. Vyšší pevnosti je dosaženo především usměrněním vláken materiálu podle obrysu zápustky a zjemněním struktury.

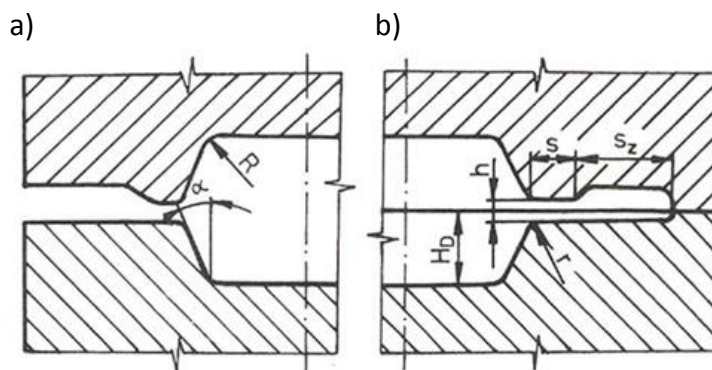
Tento druh kování se používá zejména kvůli jeho vysoké produktivitě. Použitelnost je však omezena cenou zápustky, která je velmi drahá => pro velkosériovou výrobu. Další velkou výhodou tohoto způsobu kování je dosažitelnost velkého množství tvarů a velké přesnosti.



Obr.15 Schéma zápustkového kování a výkovku [11]

2.2.11.1 Zápustky

Zápustka je dutá ocelová tvárnice neboli forma, která má dutinu ve tvaru výkovku doplněnou o drážku pro výronek, která se nachází většinou po největším obvodu výkovku. Drážka pro výronek ve formě slouží jako prostor pro přebytek materiálu při samotné operaci kování. Výsledný výronek je tedy odpad, který je třeba z výkovku odstranit. To se provádí nejčastěji technologií stříhání.



Obr.16 Výronková drážka [11]
a) uzavřená (buchar), b) otevřená (lis)

Tvar zápustky a samozřejmě tedy i výkovku musí mít sražené vnější hrany pro manipulaci s výkovkem. I z tohoto důvodu se dělají zápustky ze dvou částí, jejichž styku se říká dělicí rovina. Jejím návrh je taktéž velmi důležitý.

Zápustky jsou v provozu velmi mechanicky a tepelně namáhané. Zápustka by měla být především odolná proti tlakům (pevná), odolná proti otěru (tvrdá) a houževnatá, aby nepraskla. Se zvyšující se pracovní teplotou se snižuje pevnost ploch dutiny. To má vliv především pokud je zápustka vystavována častému střídání teplot (dlouhé prodlevy mezi jednotlivými výrobky). To vede ke změně objemu a tím pádem ztratě požadovaného tvaru dutiny a následně výkovku, nebo ke vzniku mikrotrhlinek, které se postupně šíří a mohou vést až k deformaci zápustky.

Materiál zápustek tedy musí být velmi odolný proti výše uvedeným jevům při kování. Používají se především oceli třídy 19.

- Pro malé bucharové zápustky s jednoduchými dutinami se používají např. chromové oceli.
- Pro malé tolerance a ostré tvary výkovku se používají wolframové oceli. Těmto ocelím nevadí delší styk zápustky s materiálem, tudíž jsou vhodné pro zápustkové lisy.

Jednodutinová zápustka

Tyto zápustky jsou vhodné pro jednoduché tvary a malé hmotnosti. V krajních případech a po změně některých parametrů se využívají pro zvláště těžké výkovky. Při použití této zápustky pro složitější tvary se musí polotovary nejprve předkovat. To však vyžaduje další stroj pro volné kování a značně kvalifikovaného kováře. Z toho plyne zvýšení časových i finančních nákladů na výrobu výkovku, proto se využívají více postupové zápustky.

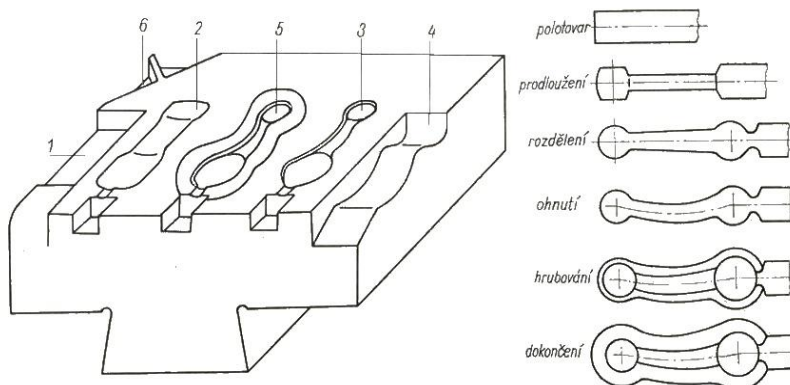
Postupová zápustka

Tento typ zápustek je určený především pro velkosériovou výrobu, kde rozhodující kritérium výběru před jednoduchou zápustkou, je ekonomické hledisko.

Výchozí např. válcový polotovar je zde postupně kován v jednotlivých dutinách jedné zápustky. Dutiny se musí vhodně navrhnout, aby se kování uskutečnilo při jednom ohřevu.

Druhy dutin postupné zápustky:

- Předkovací- v této dutině zápustky se válcový polotovar předková do tvaru podobného výkovku.
- Zápustkové- zde se předkovaný materiál dokončuje v podobě operací hrubování a dokončování. Výsledný tvar se téměř, nebo úplně shoduje s požadovaným výkovkem.
- Pomocné- slouží k tvarové úpravě předkovku nebo výkovku (např. dutiny ohýbací, sekáč, apod.)



Obr.17 Postupová zápustka [1]

Hrubovací dutina je tedy nejdůležitějším a také nejnamáhavějším článkem postupové zápustky. Jejím účelem je dát materiálu podobný nebo úplný tvar výkovku. Používá se především u složitějších výkovků, kde snižuje opotřebení dokončovací dutiny, která by měla jinak velmi malou trvanlivost. Hrubovací dutina neobsahuje výronkovou drážku a je opatřena plynulými zaobleními.

2.2.11.2 Postup zápustkového kování

Polotovar

Správně připravený polotovar je základ úspěchu. Nejčastější jsou to čtvercové bloky a sochory nebo válcovaná tyčová ocel.

Velmi složitým procesem je určení velikosti objemu polotovaru. Nesmí totiž dojít jak k přesažení objemu dutiny a výronkové drážky, ani naopak k nedostatečnému objemu polotovaru, což by vedlo k nehomogennímu rozložení materiálu v dutině a vzniku propadlin, dutinek apod.

Ohřev pro kování v zápustkách

Možnosti ohřátí materiálu pro zápustkové kování

- Karuselová pec
Tento typ pece je průchozí, tzn. že je vhodný pro ohřev materiálu široké škály tvarů a rozměrů.
- Komerová pec strkací
Po nístěji je materiál postrkován a ohříván na potřebnou teplotu.
- Elektrický ohřev
Ohřev indukční nebo odporový zajišťuje malé okujení kovaného materiálu, je rychlý a čistý.

Zhotovení výkovku

Rozměry dutiny jsou vzhledem ke studenému výkovku zvětšeny o 1 až 1,5% kvůli smrštění materiálu.

Na snaze je kovat s co nejmenším počtem úderů pro co nejmenší styk zápustky s pomalu chladnoucím materiálem, což by zapříčiňovalo tepelné a mechanické namáhání zápustky. Kování jedním úderem by bylo velmi efektivní, avšak v tomto postupu je riziko nedokonalého vyplnění dutiny zápustky a vzniku trhlinek vlivem rychlého přesouvání částic při síle, která by musela být pro kování jedním úderem vyvozena.

Po vytvoření výkovku se odstřihne výronek za studena nebo za tepla, podle obsahu uhlíku výkovku a jeho velikosti.

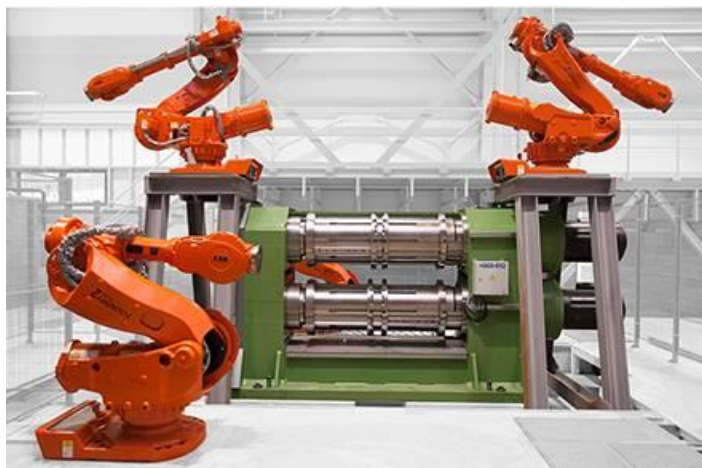
Dále můžou následovat operace jako rovnání, kalibrování, tepelné zpracování a čištění.

2.2.11.3 Zápustkové kování na bucharech

Upevňování zápustek na buchary, kde působí rázy, se realizuje prostřednictvím rybiny. V beranu a v podložce na šabotě jsou zhotovené upínací prostory do kterých se zasunují rybiny, které se následně ještě zajistí klíny a pery.

Kovací válce

Ohřátá tyč je vkládána ručně nebo automaticky do stroje. Zápustky jsou upevněny na válcích, které se otáčejí a naráží do nahřátého polotovaru. Válce jsou poháněny přes setrvačnick elektromotorem, který musí být navržen tak, aby dobře snášel přerušovaný chod.



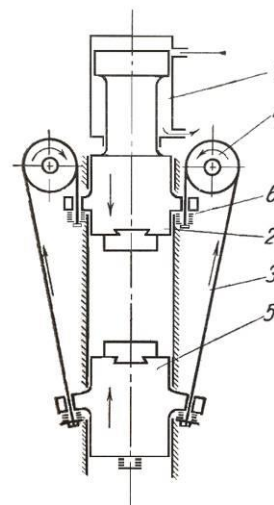
Obr.18 Kovací válce [13]

Padací buchary

U této metody se využívá pouze vlastní váhy bucharu, který po vytažení do určité výšky padá volným pádem na kovaný materiál. Rychlost dopadu bývá kolem 6m/s. Buchar může být zvedán buď řemenem nebo prknem, které je svíráno dvěma kladkami.

Protiúderové buchary

Využívá se pro větší výkovky, kde je třeba větší síly a tím i větší energie k tváření kovaného materiálu. Místo šaboty je ve stroji spodní buchar, který se v době kování pohybuje proti hornímu bucharu. Pro menší výkovky bývá mechanicky spojen horní i dolní buchar. Horní buchar je pak poháněn pístem kam vhnáme páru a jeho pohyb je napojen na kladkový mechanismus, který přenáší pohyb i na spodní buchar. Pro větší výkovky má spodní a horní buchar vlastní zdroj pohybu.



Obr.19 Schéma protiúderového bucharu [5]
1) pracovní válec, 2) horní beran, 3) pás, 4) kladka, 5) spodní beran, 6) tlumič

2.2.11.4 Zápustkové kování na lisech

Hydraulické lisy

Využívají se pro lisování vysokých a dutých tlustostěnných těles protlačováním za tepla.

Vřetenové lisy

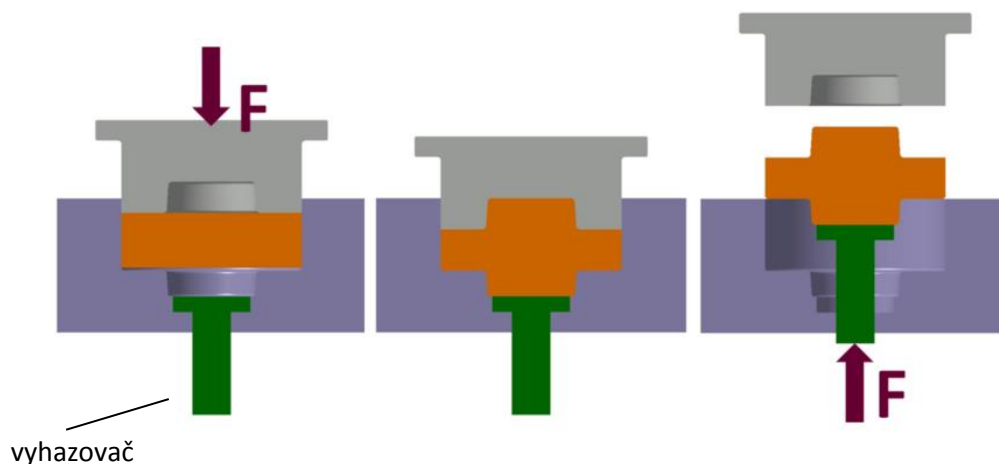
Vhodné pro malosériové výroby pro kování v otevřených i uzavřených zápustkách, rovnání, kalibrování a ohýbání pro oceli i neželezné kovy. Výhodou je využití v širokém sortimentu výkovků. Nevýhodou je poněkud malá výrobnost.

2.2.12 Speciální způsoby kování

Speciální způsoby kování lze využít především při velkosériové výrobě, jelikož jejich realizace i příprava je finančně náročná. Avšak za tuto cenu můžeme získat přesnější rozměry výkovku, lepší povrch nebo můžeme uspořit více času na vytvoření jednoho dílu.

Přesné kování

Přesné kování je kování v zápustkách, kde jsou minimální, spíše žádné, technologické přídavky. Základem úspěchu této metody je dobré rozvržení vkládaného materiálu do zápustky, jejichž objemy musejí být stejné. Touto metodou se dosahuje kvalitního povrchu.



Obr.20 Operace přesného kování [11]

Kování protlačováním

Jedná se o kombinaci protlačování a kování, kdy nahřátý polotovár tlačíme do průtlačníku a tím určujeme jeho rozměr. Tento způsob se využívá především pro slitiny hliníku a mědi. U této metody se však setkáváme s velkým negativním vlivem tření a opotřebením nástrojů.

Vícestranné kování

Vícestranné kování je metoda kdy na nahřátý materiál působíme více lisovnicí a to z více stran.

2.3. Kovy

Kovy patří i v dnešní době stále mezi nejpoužívanější materiály - především kvůli jejich ojedinělým mechanickým a fyzikálním vlastnostem a snadné zpracovatelnosti.

2.3.1. Struktura kovů

Každý kov je tvořen částicemi- atomy a molekulami. Velmi záleží na jejich uspořádání, které poté určuje vlastnosti kovu.

Struktura kovů a jejich slitiny tuhém stavu je tvořena takzvanými krystaly = částice uspořádány v prostoru periodicky pravidelně dle daných zákonitostí.

U kovů poté hovoříme o oboru zvaném geometrická krystalografie. Tento obor se zabývá zkoumáním krystalických mřížek kovů a jejich případným přetvořením. Krystalická mřížka= atomy uspořádané ve zcela přesném pořadí díky působícím vnitřním silám mezi jednotlivými atomy. Ty jsou v místech tzv. uzlových bodů.

Při přeměně kovu z pevného skupenství (těleso) na kapalné (tavenina) vzniká tzv. primární krystalizace.

Přetvoření mřížky neboli překrystalizace vzniká také při změně modifikace kovu. Tento jev také můžeme nazvat jako sekundární krystalizace.

2.3.1.1 Krystalografické soustavy

Krystalické mřížky jsou dány 6 parametry:

- a. vzdálenostmi a, b, c [mm]
- b. úhly α, β, γ [°]

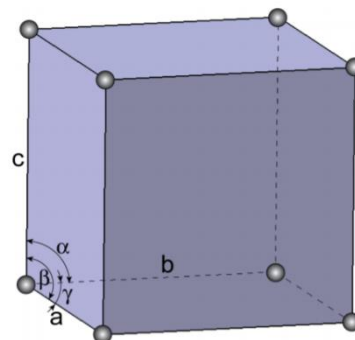
Rozeznáváme několik krystalografických soustav. Většina technických kovů však krystalizuje pouze v soustavě krychlové a šesterečné.

Parametry krychlové(kubické) soustavy:

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Prvky krystalizující v kubické soustavě: železo, chrom, molipden, wolfram, vanad a další...

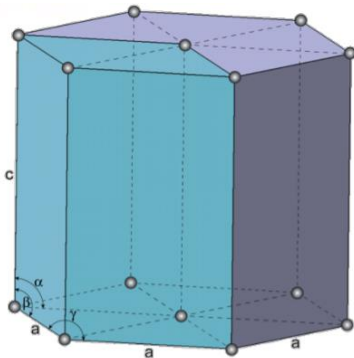


Obr. 21 Schéma kubické mřížky [6]

Parametry šesterečné(hexagonální) soustavy:

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$$



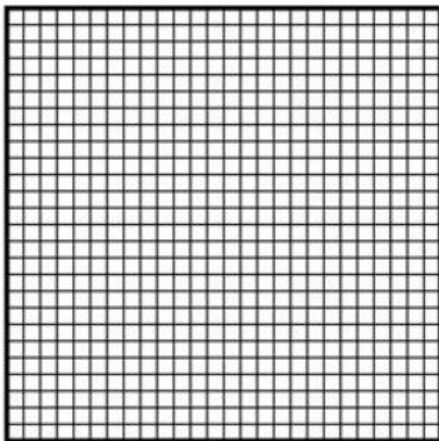
Obr.22 Schéma šesterečné soustavy [6]

Prvky krystalizující v šesterečné soustavě: zinek, berylium, titan, cobalt a další...

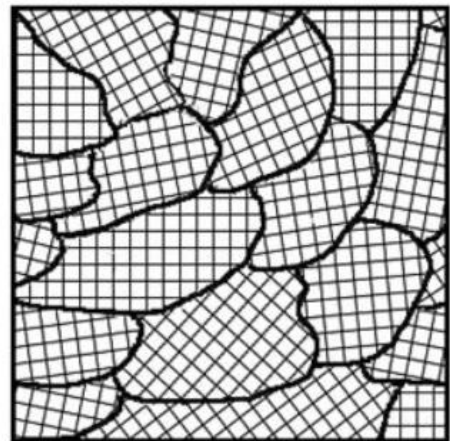
Další druhy krystalových soustav:

- Tetragonální
- Ortorombická
- Romboedrická
- Monoklinická
- Triklinická

Kovové materiály tvoří většinou shluk neboli konglomerát krystalů- mají polykrystalickou strukturu. V polykrystalické látce se mřížky liší především orientací.



a) ideální



b) polykrystalická látka

Obr. 23 Schéma orientace krystalových mřížek [9]

2.3.1.2. Poruchy krystalové mřížky

a) bodové

1. *Vakance*

Vakance je druh poruchy, kde chybí atom v uzlovém bodě krystalové mřížky.

2. *Intersticiál vlastní*

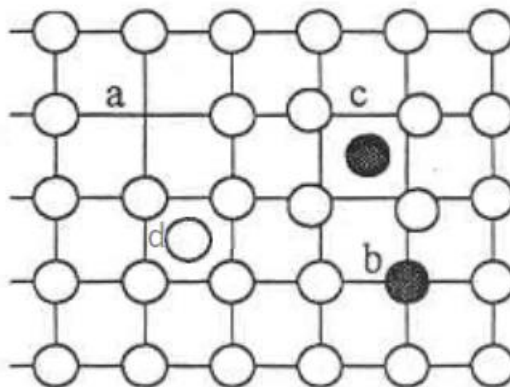
Druh poruchy kdy vlastní atom není uložený v uzlovém bodě. V mřížce se vyskytuje atom navíc, který je uložen mezi 4 sousedními atomy.

3. *Intersticiál cizí*

Druh poruchy kdy cizí atom není uložený v uzlovém bodě a okolo něj jsou vlastní atomy kovu rozloženy ve všech uzlových bodech.

4. *Substituce*

Substituce se týká atomu cizí látky nebo nečistot. Při tomto druhu poruchy je místo vlastního atomu kovu v uzlovém bodě již zmiňovaný cizí atom kovu nebo nečistota.



Obr.24 Bodové poruchy v krystalové mřížce [20]

a) Vakance, b) Substituce, c) Intersticiál cizí, d) Intersticiál vlastní

b) čarové (dislokace)

1. Hranové

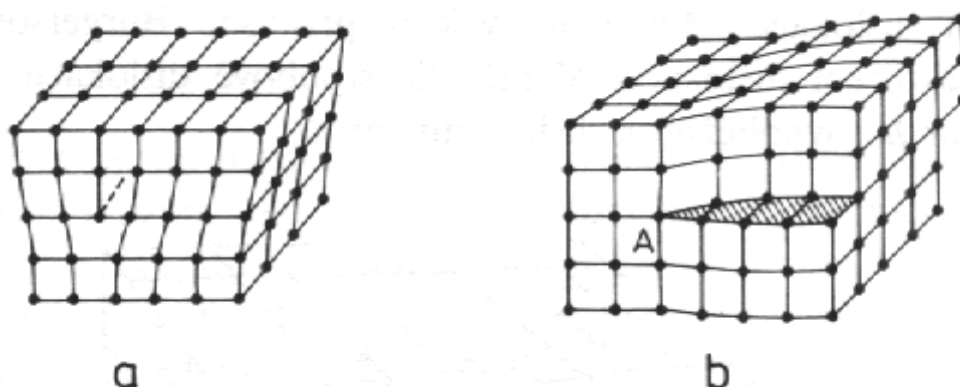
Hranové dislokace se dají popsat také pojmem přímková vakance. V mřížce totiž chybí souvislá část atomů.

2. Šroubové

Při této poruše dochází k hromadnému posunu částic. Nejčastěji po šroubovici.

3. Kombinované

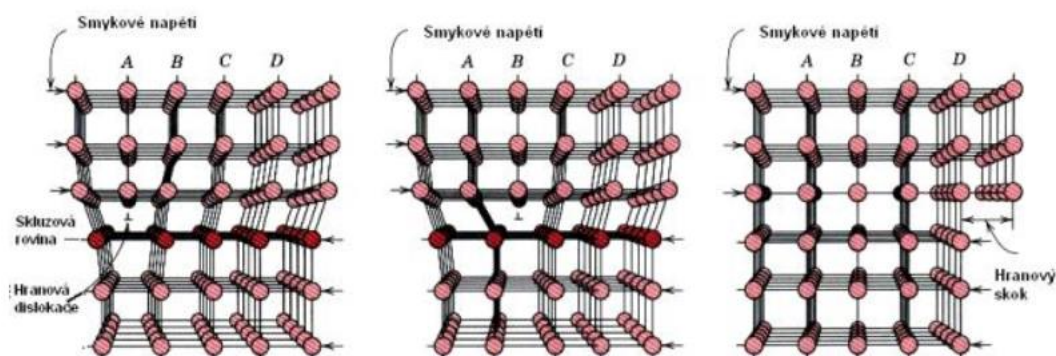
Hranová + šroubová dislokace v jedné mřížce.



Obr.25 Čarové poruchy v krystalové mřížce [15]
a) hranová, b) šroubová

Teorie skluzu (pohyb dislokací)

Skluzový pohyb nastává v případě, že se atomy v mřížce začnou nepatrně pohybovat bez změny konfigurace atomů. Při tomto pohybu dislokací se vytváří určitá konfigurace atomů, která se pohybuje po tzv. skluzné rovině. Rychlost skluzu závisí na typu mřížky, působící síle a ostatních poruch v mřížce.



Obr.26 Schéma skluzu dislokací [16]

- c) plošné
- d) objemové

2.4 Hliník

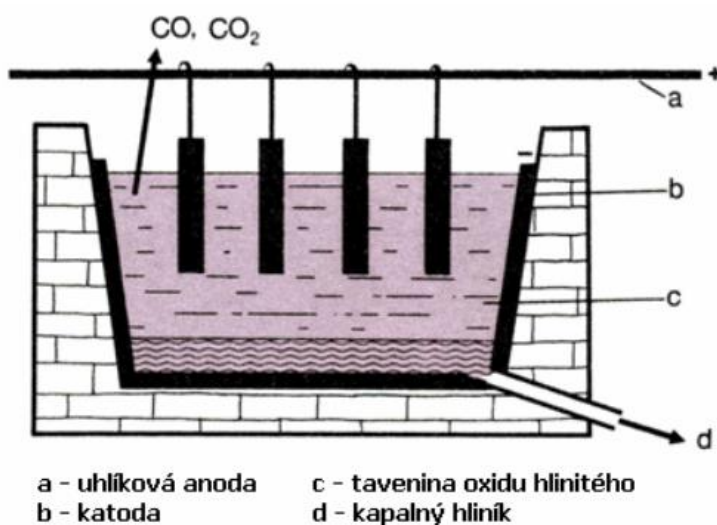
Hliník je v současné době velmi používaný technický neželezný kov. Používá se v mnoha odvětvích jako například v medicíně, potravinářství, technickém průmyslu aj.

Hliník má kubickou plošně centrovanou mřížku- z tohoto důvodu je měkký a tvárný, ale má nízkou pevnost. Dále se vyznačuje vysokou tepelnou i elektrickou vodivostí. Na vzduchu je stabilní a oproti kovům nepodléhá okolním vlivům jako je například koroze a to díky tvorbě pasivní ochranné oxidické vrstvy (Al_2O_3). Nevýhodou hliníku je špatná tavná svařitelnost.

Hliník se dostal mezi nepoužívanější technické materiály právě díky jeho odolnosti proti korozi a také díky jeho malé hmotnosti. Jeho měrná hmotnost činí $2,7\text{g}/\text{cm}^3$.

2.4.1 Výroba hliníku

Hlavní surovinou pro výrobu technického hliníku je oxid hlinitý, který se získává z bauxitu. Pro samotnou výrobu hliníku se poté využívá elektrolýzy, roztavené směsi oxidu hlinitého a kryolitu (hexafluorohlinitan sodný). Při tomto postupu putují ionty Al ke katodě, kterou tvoří dno elektrolyzéry. Tam se poté shromažďuje i vzniklý kovový hliník.



Obr.27 Schéma elektrolyzéry pro výrobu hliníku [17]

2.4.2 Slitiny hliníku

Mezi hlavní legury hliníku patří měď, hořčík, mangan, křemík, zinek, případně lithium.

Podle obsahu legur se hliník dělí na:

- a) slitiny hliníku pro tváření
 - mají nižší obsah přísadových legur, tzn. že ve struktuře převládá plastický tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$
 - vyrábí se z nich plechy, trubky, tyče, apod.

b) slitiny hliníku ke slévárenství

- mají menší obsah přísadových legur, proto mají po ztuhnutí heterogenní strukturu
- špatně tvářitelné, vhodné pro slévání
-

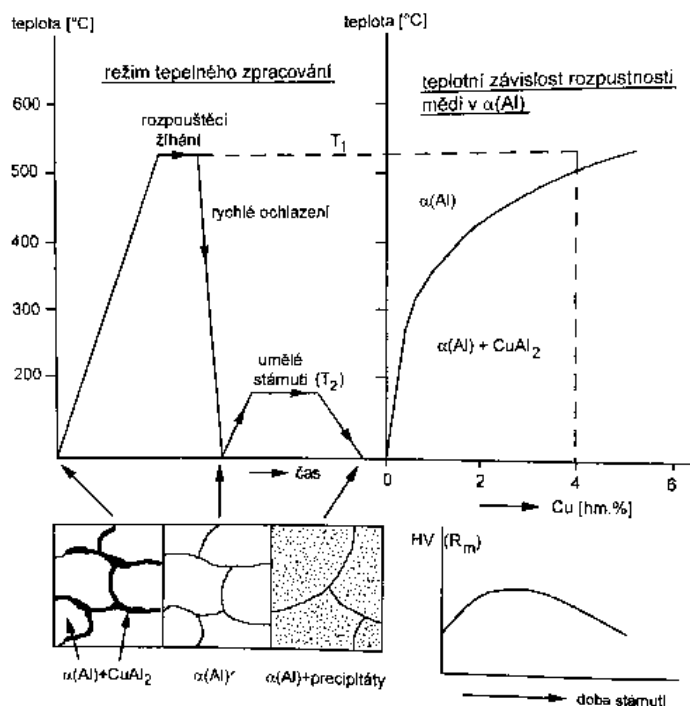
Za zmínku stojí především slitina hliníku a mědi, který nese technický název **dural**. Tato slitina je v technické praxi velmi používaná díky její malé měrné hmotnosti, vyšším mechanickým vlastnostem a dobré odolnosti proti korozi.

2.4.3 Tepelné zpracování hliníku

Hliník je vhodné tepelně zpracovávat ke zlepšení jeho pevnostních vlastností. U hliníkových slitin tento proces nazýváme precipitační žíhání.

Postup precipitačního žíhání je podobný jako u kalení a následného popouštění ocelí. Skládá se z rozpouštěcího žíhání, rychlého ochlazení a následného umělého stárnutí. Základní hledisko použitelnosti metody je aby legující prvek měl dostatečnou rozpustnost v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$.

Rozpouštěcí žíhání se provádí na teplotě T_1 , která leží v oblasti homogenního tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Tyto teploty se pohybují okolo teploty 500°C . Po tomto procesu následuje *rychlé ochlazení*, nejčastěji do vody. Na snaze je tak rychlé ochlazení, aby se nestihl vyloučit CuAl_2 (příklad duralu) a vznikl tzv. přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$. Poté se uchylujeme k tzv. *umělému stárnutí*, což zahrnuje ohřev a potřebnou výdrž na teplotě $200\text{--}260^\circ\text{C}$. Při tomto kroku dochází k vylučování velice malých částic intermediálních fází- tzv. precipitátů. Tyto precipitáty vytváří určitou překážku pro skluz dislokací, což má za vznik vytvrzení a zpevnění.



Obr.28 Schematické znázornění postupu precipitačního vytvrzení slitiny AlCu_4 [1]

Použití hliníku:

- obaly (fólie, plechovky)
- dopravní prostředky (kostry letadel, karoserie automobilů)
- stavebnictví (rámy oken a dveří, střešní krytina)
- elektrotechnika (dálkové rozvody elektrického proudu)

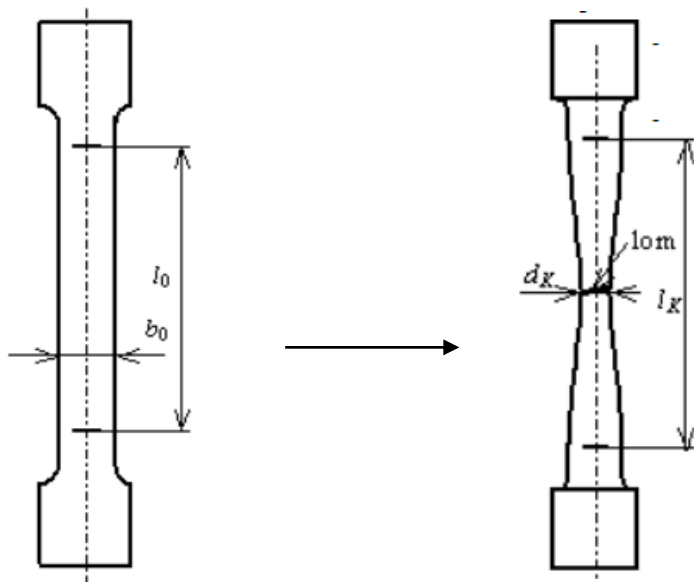
2.5 Zkouška tahem

Zkouška tahem patří mezi mechanické zkoušky materiálu, které používáme ke zjištění mechanických vlastností materiálu jako je pevnost a tažnost. Dále se řadí do metod zkoušek nepřímých, které jsou specifické tím, že se provádí mimo provoz za normalizovaných podmínek. Jsou levné, spolehlivé a rychlé. Zatěžující síla zde působí staticky a to tak, že síla působí stále nebo se mění velmi pomalu obvykle až do prasknutí materiálu.

Při zkoušce tahem se tedy zjišťují následující hodnoty:

- R_e : smluvní napětí na mezi v kluzu
- R_m : smluvní napětí na mezi pevnosti
- A : tažnost
- Z : kontrakce

Podstatou zkoušky tedy je, že zkušební vzorek je při stanovené rychlosti deformace zatěžován tahem zpravidla až do úplné destrukce, která by měla nastat uprostřed vzorku. Materiál, který takto zkoumáme, nazýváme zkušební vzorek, který může mít kruhový průřez nebo plochý průřez (plasty).

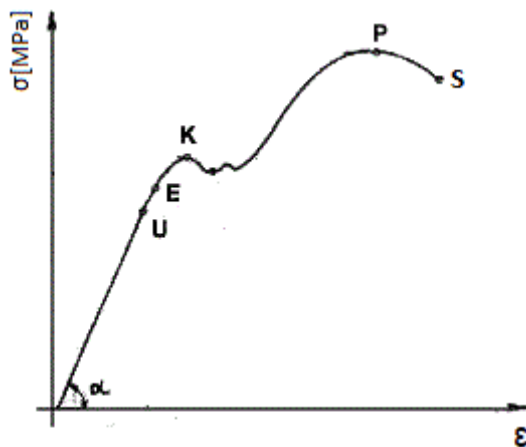


Obr.29 Zkušební vzorek [10]
a) před zkouškou, b) po zkoušce

V místě lomu, tedy uprostřed zkušebního vzorku, se nejprve vytváří vlivem tahové síly zúžení, které nazýváme krček. Průřez se v tomto místě zmenšuje až do prasknutí vzorku kdy zkouška končí.

2.5.1 Výstup zkoušky

Výsledkem každé takové zkoušky je (po zpracování) graf se závislostí působící síly na deformaci. Při takovéto zkoušce je tedy výsledkem závislost zatěžující síly na prodloužení zkušební vzorku (pracovní diagram). To se však v praxi nevyužívá, proto zavádíme tzv. smluvní hodnoty z čehož plyne tzv. smluvní diagram, který vyobrazuje závislost napětí na poměrném prodloužení.



Obr. 30 Smluvní diagram [1]

Výpočet smluvních veličin:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.11)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad [-] \quad (2.12)$$

kde značí: α - napětí

S_0 - původní průřez

ε - poměrné prodloužení

L_u - konečná délka

L_0 - počáteční délka

- **U...mez úměrnosti**

- mezní napětí při které je ještě prodloužení přímo úměrné napětí

- platí zde Hookův zákon ve tvaru: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = tg\alpha$ (2.13)

kde značí: E - modul pružnosti v tahu

α - úhel sklonu křivky (viz. Obr. 30)

- **E... mez pružnosti(elasticity)**

- mezní napětí do kterého jsou deformace pouze pružného charakteru

- **K... mez kluzu**

- nejmenší napětí, při kterém nastávají podstatné deformace, které se mohou dále dočasně rozšiřovat, aniž by se dále zvyšovalo napětí

- **P... mez pevnosti v tahu**

- největší napětí, které odpovídá největšímu zatížení před porušením zkušební vzorku

- **S... napětí kdy se tyč přetrhne**

Další zjistitelné hodnoty:

- **tažnost A**

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100 [\%] \quad (2.14)$$

- **kontrakce Z**

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100 [\%] \quad (2.15)$$

kde značí: A - tažnost

Z - kontrakce

3 Experimentální část

Cílem experimentální části je zjištění vlivu teploty na velikost deformačního odporu dvou rozdílných materiálů. Jako materiály byly zvoleny ocel S460NL a slitina hliníku AW-5754.

Jelikož hodnoty deformačního odporu a jiných vlastností kovů při normálních (pokojových) teplotách jsou obecně známé, byl zvolen rozsah vyšších teplot. Pro slitinu hliníku byly zvoleny teploty v intervalu 100-500°C po 100°C. Teplota 600°C již nebyla měřena z důvodu blízkosti teploty tání hliníku ($T_{T(AI)} = 660^{\circ}\text{C}$). Ocel byla měřena při teplotách v intervalu 200-1200°C po 200°C. Horní teplota intervalu (1200°C) byla zvolena, protože v okolí této teploty se ocel běžně kove. Kvůli časové náročnosti přípravy a samotného měření byl zvolen postup teploty po 200°C.

Pro zjištění vlivu teploty na deformační odpor byla zvolena zkouška tahem. Ta však musela probíhat za výše uvedených teplotních podmínek. Proto bylo třeba využít stroj Gleeble 3500, který tyto podmínky dokáže vytvořit.

3.1 Zkoušené materiály

Pro měření byly využity dva odlišné materiály - hliník a ocel. Různorodost těchto materiálů jak ve struktuře, která materiál tvoří, tak v jejich mechanických, fyzikálních a chemických vlastnostech, byla podmětem ke zjištění informací o jejich závislosti deformačního odporu na teplotě.

3.1.1 Ocel EN S460NL

Oceli se značí podle jejich použití a vlastností. Konkrétně tato ocel je označena dle normy ČSN EN 10025-3, která je určena pro výrobky válcované za tepla ze svařitelných jemnozrnných konstrukčních ocelí normalizačně žíhaných a normalizačně válcovaných.



Obr. 31 Označení ocelí dle EN

Jako první je v označení k vidění písmeno S, které označuje, že tato ocel je určena pro ocelové konstrukce. Dále můžeme vidět v označení ocelí na prvním místě písmeno P označující oceli pro tlakové nádoby, L označující oceli určené na potrubí a písmeno E, které značí, že je ocel vhodná pro strojní součásti.

Uprostřed označení oceli se nachází trojčíferné číslo označující hodnotu horní meze kluzu v MPa dané oceli.

Písmena na konci označení oceli jsou určena k popisu dalšího použití nebo k popisu tepelného zpracování dané oceli. Konkrétně označení N značí, že ocel byla normalizačně žíhána nebo válcována. Písmeno L poté značí, že ocel je určena pro nízké teploty.

Další označení pozice písmen na konci označení:

C - oceli se zvláštní tvářitelností za studena

D - oceli pro žárové pokovování

E - oceli vhodné pro smaltování

F - oceli pro kování

H - oceli vhodné pro duté profily

M - oceli termomechanicky válcované

Q - oceli zušlechtnuté

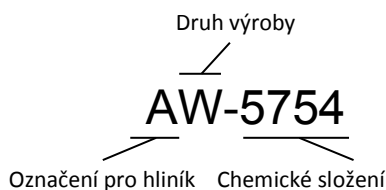
W - oceli odolné proti atmosférické korozi

Tab.1 Mechanická vlastnosti oceli S460NL

Značka	Pevnost v tahu v MPa	Horní mez v kluzu v MPa	Tažnost v % min.
S460NL	550 až 720	460	17

3.1.2 Hliník EN AW-5754 [AlMg3]

Tato hliníková slitina podléhá normě ČSN 424413. Slitina je tvořena hliníkem a třemi procenty hořčíku. Slitina je přirozeně tvrdá, nevytvrditelná a má dobrou odolnost proti korozi, zvláště pak proti mořské vodě. Výraznou vlastností je pak také chemická odolnost. Dá se dobře tvářet a obrábět.



Obr. 32 Označení hliníku dle EN

První písmeno A označuje, že se jedná o hliníkovou slitinu. Na této pozici proto nemůže být jiné písmeno.

Písmeno W značí, že tato hliníková slitina je již tvářena. Dalšími možnostmi na této pozici jsou označení B, jež označuje ingoty, C označující odlitky a M označující předslitiny.

Čtyřčíslí na konci označení ukazuje na chemické složení dané hliníkové slitiny. První z čísel označuje skupinu slitin. Pro číslo 5 je to hořčík. Druhá číslice označuje změny obsahu doprovodných prvků a dvojčíslí na konci rozlišuje hliníkové slitiny a druhá číslice vyjadřuje modifikaci těchto slitin.

Tab.2 Mechanická vlastnosti hliníkové slitiny AW-5754

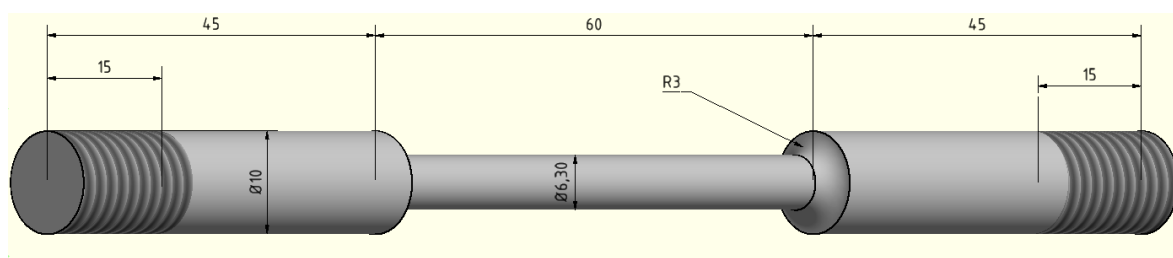
Značka	Mez kluzu v MPa	Pevnost v tahu v MPa	Tažnost v %
AW-5754	80	190 až 240	16 až 17

3.2 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky neboli zkušební tyče pro tahovou zkoušku mají normalizovaný tvar dle ČSN EN ISO 6892-1 přílohy D, která určuje tvar vzorku pro zkušební tělesa používaných u plechů a plochých výrobků o tloušťce nejméně 3mm a drátů, tyčí a profilů o průměru nebo tloušťce nejméně 4mm.

Tato norma nás informuje, že zkušební vzorky jsou obvykle obrobeny a zkoušená délka musí navazovat přechodovými poloměry na konce zkušebního vzorku, které jsou určeny k upnutí do tahového stroje, a mohou mít jakýkoliv tvar přizpůsobený čelistem tahového stroje.

Zkušební tělesa k tomuto měření byla vyrobena z tyče o průměru 10mm, nařezána na pásové pile a následně soustružena.



Obr. 33 Model vysoustruženého zkušebního vzorku

3.2.1 Soustružení zkušebních vzorků

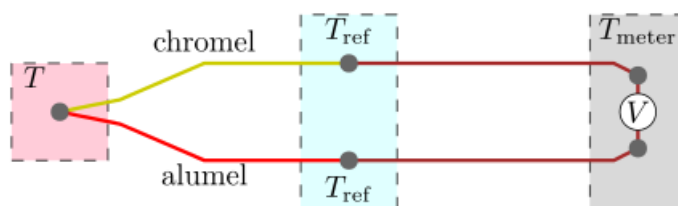
Při soustružení bylo nejprve třeba upravit čela zkušebního vzorku požadovanou vzdáleností 150 mm a to pomocí pravého vnějšího uběracího ohnutého nože. Po dosažení potřebného rozměru celého zkušebního vzorku následovalo soustružení prostřední části, která se nazývá zkoušenou délkou a má průměr, jež nazýváme také zkoušeným. Zkoušený průměr byl soustružen na hodnotu 6,3 mm, avšak manuální soustruh na kterém byly zkušební vzorky zhotovovány, byl již starý, tudíž nebylo možné dosáhnout vždy přesné hodnoty. To se však nepodepsalo na výsledcích práce, jelikož se tato hodnota zadávala do programu v PC a ten tak mohl pracovat vždy s jinou hodnotou. Zkoušený průměr a zkoušená délka byly vytvořeny zaoblovacím nožem uběracím s poloměrem 4 mm. Jako poslední byly vytvořeny závity na koncích zkušebního vzorku pro jeho zajištění do tahového stroje. Závit byl vytvořen ručně, bez pomoci soustruhu závitovým okem pro vytvoření závitů M10.



Obr. 34 Reálný vzhled vysoustruženého zkušebního vzorku(ocel)

3.2.2 Měření teploty

K měření potřebné teploty při průběhu měření bylo využito termočlánků, které pracují na základě termoelektrického jevu. To je spojení dvou vodičů z různého materiálu, na jejichž koncích můžeme měřit termoelektrické napětí a to i za podmínek, kdy je teplota měřeného místa jiná než teplota volných konců vodičů. Výše termoelektrického napětí je závislá na teplotě a na materiálu použitých ocelí vodičů. Při změnách teploty se mění i napětí termočlánku, takže hodnota napětí vždy odpovídá určité hodnotě teploty v místě, jehož teplotu zkoumáme.



Obr. 35 Schéma měření teploty pomocí termočlánku [19]

3.2.3 Instalace termočlánků

Termočlánky byly na zkušební vzorek připevněny pomocí kondenzátorové stolní svářečky (Obr. 3.6). Vodiče termočlánku typu K (Chromel + Alumel) byly navařeny co nejbliže k sobě pro co největší přesnost měření teploty. Ještě před přivařením bylo provedeno manuální broušení plochy zkušebního vzorku, kam se navařovali vodiče, pro možnost kvalitnějšího a tím pádem pevnějšího svaru. Pro kvalitnější svar byly také navařované konce sestříženy pod úhlem 45° pro dosažení bodového tvaru těchto konců. Vodiče byly přivařeny doprostřed zkušební délky, tudíž tam, kde by měl zkušební vzorek ideálně prasknout.



Obr. 36 Kondenzátorová svářečka u upnutým zkušebním vzorkem

3.3 Stroj Gleeble 3500

Celé měření bylo provedeno na tepelně-mechanickém zkušebním stroji Gleeble 3500 od firmy Dynamics Systems Inc. sídlící v USA. Tento stroj umožňuje vytvořit podmínky vyšší teploty při probíhající zkoušce tahem, čímž spojíme mechanické a fyzikální jevy působící na zkoušený materiál. Stroj se skládá ze tří hlavních částí (Obr. 3.7) a několika pomocných zařízení.



Obr. 37 Zkušební stroj Gleeble 3500 [12]

1) řídicí jednotka, 2) hydraulický servopohon, 3) pracovní komora, 4) měřicí zařízení

Tento stroj má však i jiná možná využití, mezi něž patří například simulace difúzního nebo laserového svařování, teplotní únava materiálu, tlaková zkouška nebo testování vzniku trhlin za působení tepla.

Zkušební stroj disponuje přímým odporovým topným systémem Gleeble 3500, který může ohřát vzorky při rychlostech až 10 000°C za sekundu nebo udržovat teplotu na konstantní hodnotě. Po skončení měření je chladicí zařízení schopno ochlazovat zkušební vzorek rychlostí až 6 000°C za sekundu.

Dále je tento stroj schopen svým hydraulickým servopohonem vyvinout tahovou či tlakovou sílu, která může dosahovat až 100kN. Ke zpětné vazbě k uživateli prostřednictvím řídicího panelu využívá LVDT snímače, dynamometry nebo bezkontaktní laserové extenzometry.

Další nezbytnou součástí stroje je pomocné zařízení typu vakuové pumpy pro vytvoření vakua v pracovním prostoru stroje. Vytvořené vakuum brání rozšíření vysoké teploty do okolí v pracovní komoře, čímž chrání ostatní součástky, které se v komoře nacházejí a zároveň chrání zkušební vzorek před vysokoteplotní oxidací. Pro měření bylo použito tlaku menšího než je 1×10^{-2} Pa.

3.4 Postup při měření

1. Příprava vzorku (viz. kap. 3.2)

2. Příprava stroje

Po zapnutí stroje příslušným tlačítkem a zapnutí PC pro zajištění komunikace stroje s řídicím programem, bylo dále nutné zapnout vakuový systém, který přibližně 15 minut připravoval správnou hodnotu tlaku. Poté bylo zapnuto chladicí zařízení, které nám na konci měření vzorek ochladilo na nízkou teplotu pro následnou manipulaci vzorku.

3. Upnutí vzorku

Na vzorek, na kterém již byly předem přivařené termočlánky (Obr. 38-1), se z obou jeho stran našroubovali na vytvořené závity šestihřanné matice (Obr. 38-3). Ty zajišťovali klínové čelisti (Obr. 38-2), které pomocí také klínové části pohybového ústrojí stroje vytvářeli tahovou sílu na vzorek. Jako pojistka jsou ještě za šestihřannými maticemi umístěny rozpěrné šrouby.

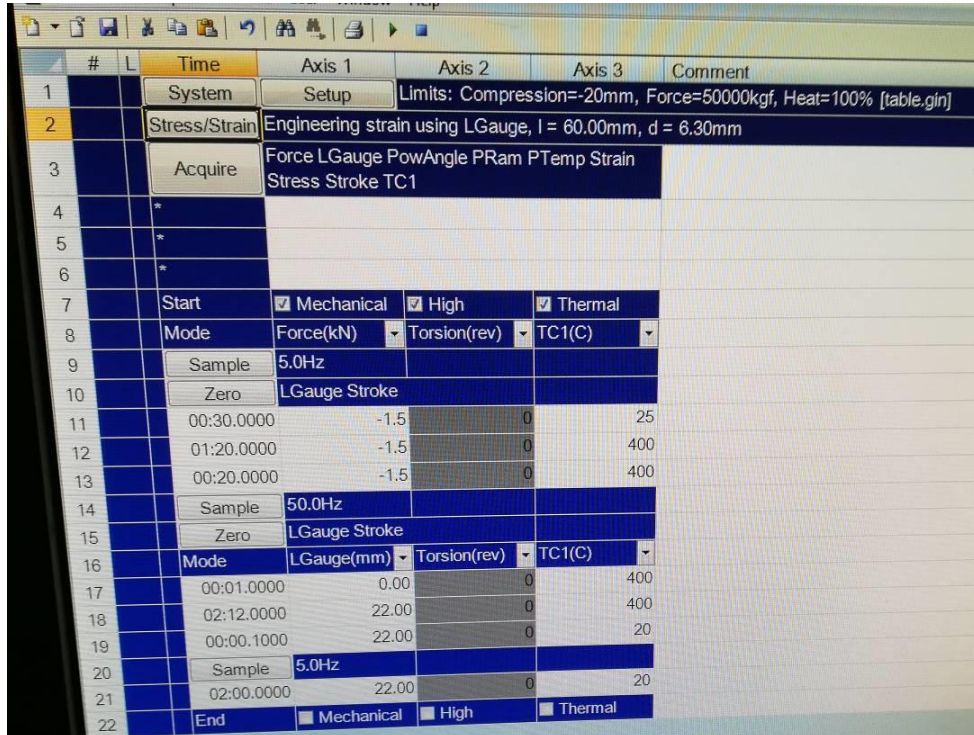
Další nezbytnou součástí bylo zapojení termočlánků. Ty se upevňovaly do jednoho ze čtyř možných kanálů stroje.



Obr. 38 Upnutý zkušební vzorek v pracovním prostoru stroje
1)zkušební vzorek, 2)klínové čelisti, 3)rozpěrné šrouby, 4) kanál pro upnutí termočlánků

4. Samotné měření

Jako poslední se sestavil program jehož pomocí bylo možno řídit průběh a podmínky měření. Do programu se zadávaly hodnoty zkoušeného průměru, zkoušené délky, rychlost ohřevu, rychlost chlazení, typ působící síly a pomocné nulování.



#	L	Time	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Comment
1		System	Setup	Limits: Compression=-20mm, Force=50000kgf, Heat=100% [table.gjn]		
2		Stress/Strain	Engineering strain using LGauge, l = 60.00mm, d = 6.30mm			
3		Acquire	Force LGauge PowAngle PRam PTemp Strain Stress Stroke TC1			
4		*				
5		*				
6		*				
7		Start	<input checked="" type="checkbox"/> Mechanical	<input checked="" type="checkbox"/> High	<input checked="" type="checkbox"/> Thermal	
8		Mode	Force(kN)	Torsion(rev)	TC1(C)	
9		Sample	5.0Hz			
10		Zero	LGauge Stroke			
11		00:30.0000	-1.5	0	25	
12		01:20.0000	-1.5	0	400	
13		00:20.0000	-1.5	0	400	
14		Sample	50.0Hz			
15		Zero	LGauge Stroke			
16		Mode	LGauge(mm)	Torsion(rev)	TC1(C)	
17		00:01.0000	0.00	0	400	
18		02:12.0000	22.00	0	400	
19		00:00.1000	22.00	0	20	
20		Sample	5.0Hz			
21		02:00.0000	22.00	0	20	
22		End	<input type="checkbox"/> Mechanical	<input type="checkbox"/> High	<input type="checkbox"/> Thermal	

Obr. 39 Ukázka řídicího programu

Dalším krokem bylo spuštění vakuování pracovní komory, což se provedlo stiskem tlačítka na řídicím panelu stroje. Tato akce trvala přibližně 5 minut, dokud nebylo dosaženo alespoň požadované minimální hodnoty tlaku v pracovní komoře 1×10^{-2} Pa.

Po stisknutí možnosti start v programu i na řídicím panelu stroje se spustil program a začalo samotné měření. Jako první probíhal ohřev zvolenou rychlostí nastavenou v řídicím programu. Po dosažení požadované teploty byl spuštěn posuv čelistí zkušebního stroje a prostřednictvím klínových čelistí a upínacích matic byla tímto způsobem vyvozena zatěžující síla na zkušební vzorek.

Měření skončilo ve chvíli, kdy došlo k destrukci zkušební vzorku. Tento děj byl signalizován akustickým signálem (při nízkých teplotách) nebo světelným signálem (při vyšších teplotách). Světelný signál po destrukci zkušební vzorku vznikl v důsledku snahy dále přenášet elektrický proud pro stabilitu teploty uprostřed měřené délky. Zkušební vzorek však už byl uprostřed měřené délky roztrhnut a procházející proud vytvořil elektrický oblouk mezi oběma již trochu vzdálenými částmi zkušební vzorku.

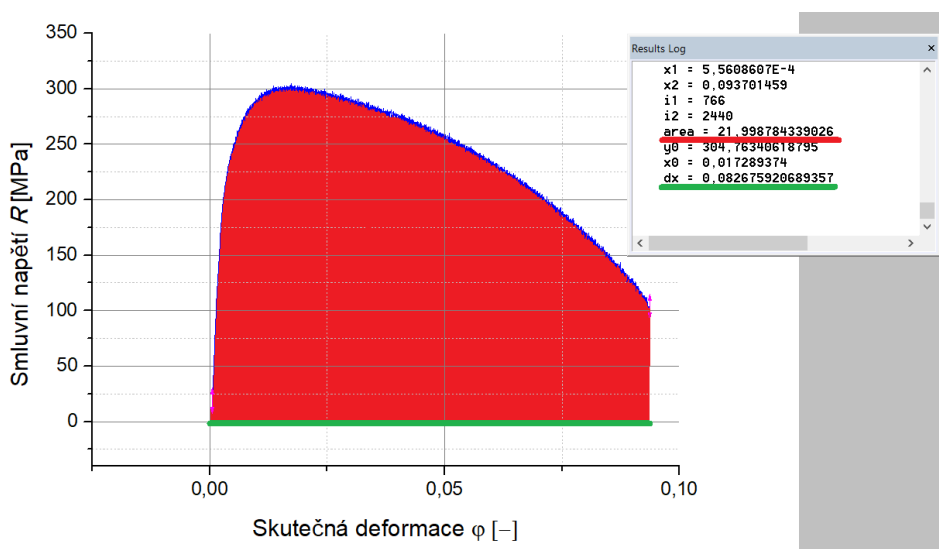
5. Po měření

Po destrukci zkušební vzorku bylo nutné nejprve vyrovnat tlak v pracovní komoře s atmosférickým tlakem. To se zprvu provedlo tlačítkem na řídicím panelu stroje a poté ventilem, který se nachází nad pracovní komorou. Po otevření dveří pracovního prostoru se opět příslušným klíčem uvolnil rozpěrný šroub a části zkušební vzorku se mohly vyndat ven. Následně byly odejmuty termočlánky, které bylo možno po odstřížení malé části opět použít na další zkušební vzorek. Jako poslední bylo třeba uvolnit matice z obou částí zkušební vzorku. Ty se spolu s klínovými čelistmi dali případně chladit do vody. Po vychladnutí rozpěrných šroubů a klínových čelistí se mohlo pokračovat s dalším zkušebním vzorkem. Takto byly tedy měřeny všechny zkušební vzorky.

3.5 Vyhodnocení dat

Data v podobě působící síly a změny délky vzorku, které byly zprostředkovány strojem se pomocí programu Origin 9 a řídicího programu rozvinuly na další hodnoty, jako jsou napětí, skutečná deformace, teplota v průběhu měření, aj. Tyto hodnoty se pak uložily pro další práci do ASCII formátu (.csv). Pro následnou tvorbu grafů byl zvolen program Origin 9, který umožňuje rychlou práci s daty a vytvoření stálého prostředí grafu pro data jednotlivých zkušebních vzorků.

Pro získání hodnoty deformačního odporu byl vybrán způsob, při kterém se ze získaných dat vytvoří tahový diagram, který zobrazuje závislost napětí na deformaci. Z tohoto grafu následně pomocí integrálu křivky zjistíme plochu pod křivkou. Ta nám následně pomůže pro samotný výpočet střední hodnoty napětí, která je rovna deformačnímu odporu. Deformační odpor se tedy vypočítá jako podíl získané plochy pod křivkou a intervalu ve kterém jsme integrovali.



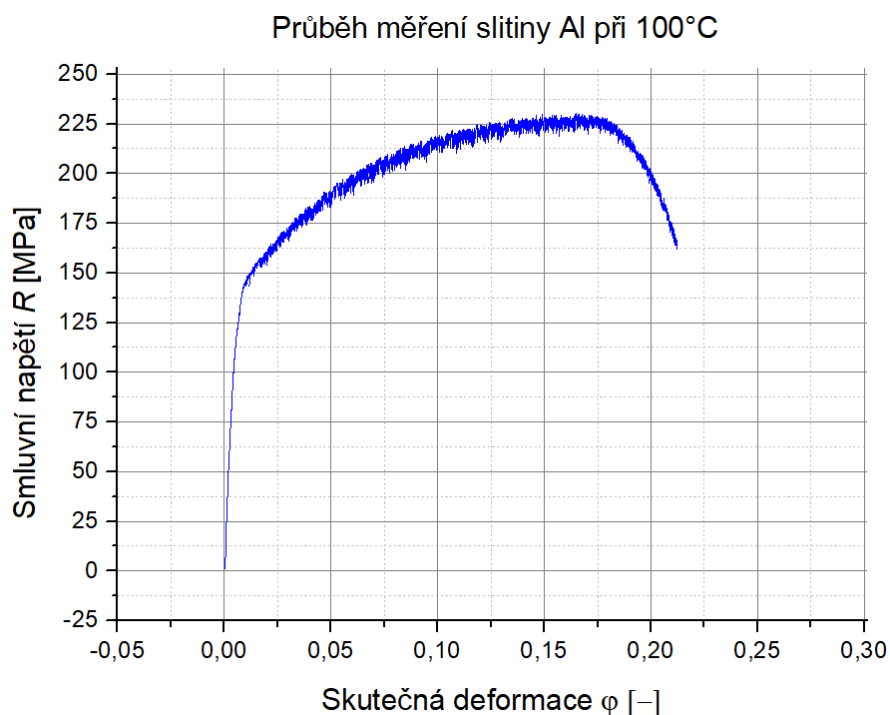
Obr.40 Ukázka integrace pro následný výpočet deformačního odporu

$$\sigma_s = \frac{S_i}{x_{in}} \quad (3.1)$$

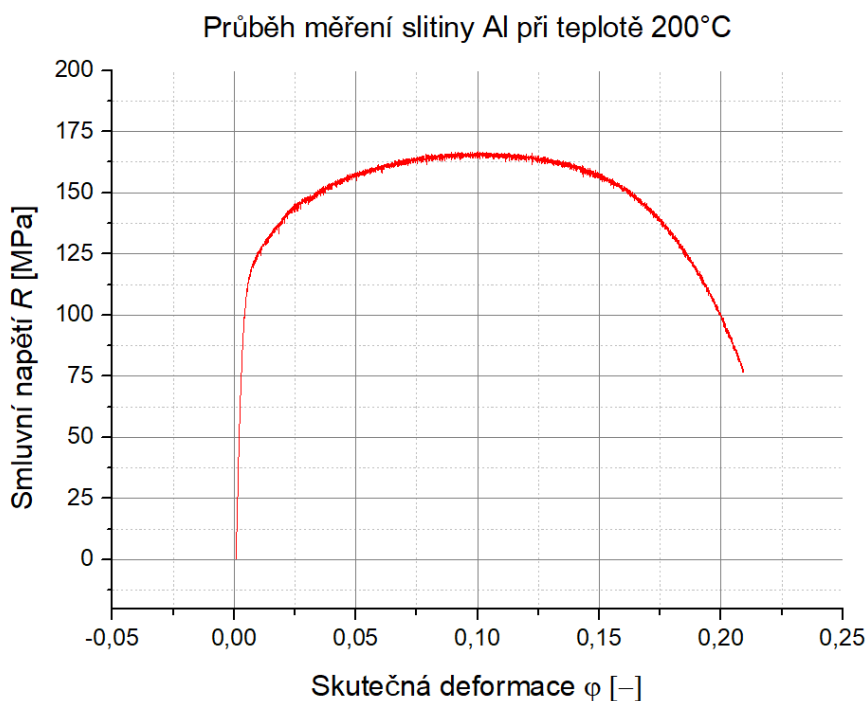
kde značí: S_i - plocha pod křivkou po integraci
 x_{in} - interval hodnot integrace

3.5.1 Měření slitiny Al

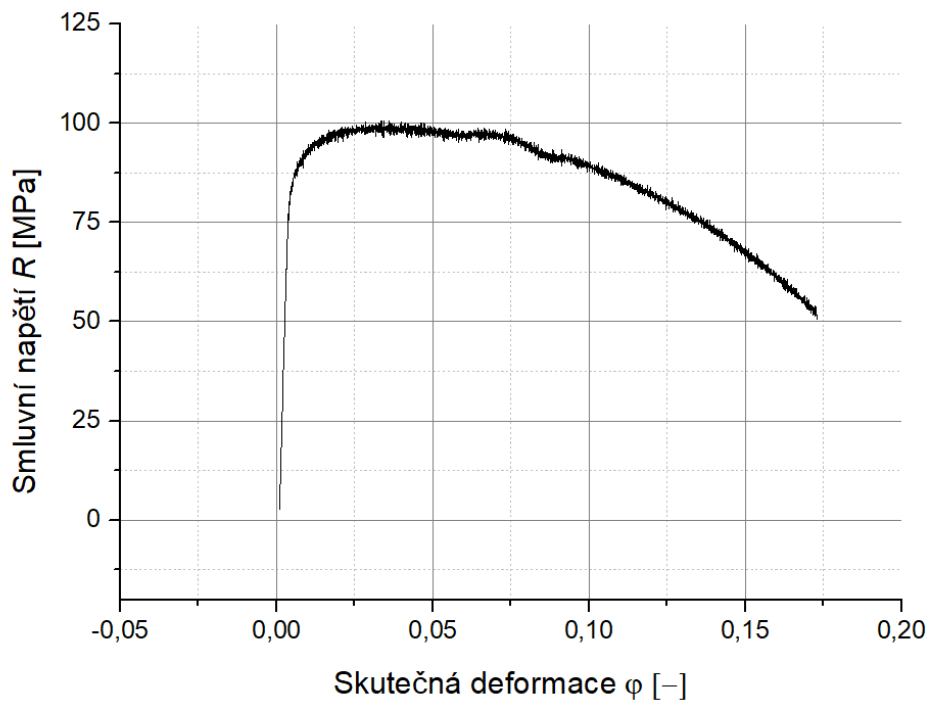
Jako první byla na stroji Gleeble 3500, který umožňuje vytvořit tepelné podmínky v průběhu měření měřena slitina hliníku. Slitina Al byla ohřívána oproti možnostem stroje Gleeble 3500 velmi pomalu rychlostí 5°C/s. K dispozici bylo vysoustruženo 10 vzorků slitiny Al. Pro jednotlivé teploty z intervalu 100-500°C po 100°C byly měřeny vždy dva vzorky pro zajištění správnosti měření. Vždy byly tedy odměřeny dva vzorky při jedné teplotě, pro možnost zanechání stejného naprogramovaného průběhu měření a poté se pokračovalo další teplotou v intervalu teplot.



Obr.41 Charakteristický průběh měření pro slitinu Al při teplotě 100°C

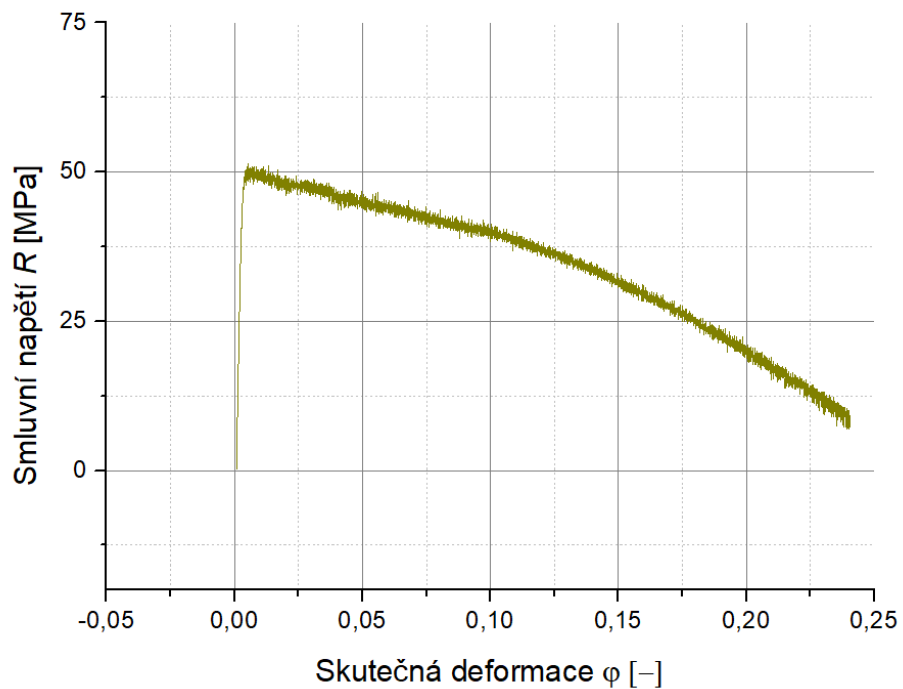


Obr.42 Charakteristický průběh měření pro slitinu Al při teplotě 200°C
Průběh měření slitiny Al při teplotě 300°C

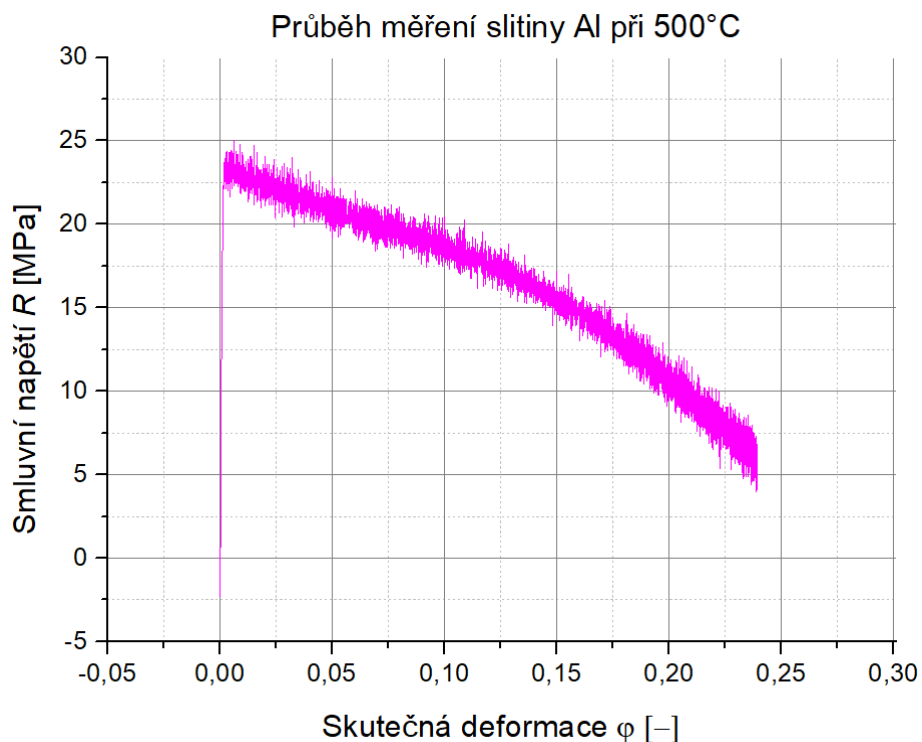


Obr.43 Charakteristický průběh měření pro slitinu Al při teplotě 300°C

Průběh měření slitiny Al při teplotě 400°C

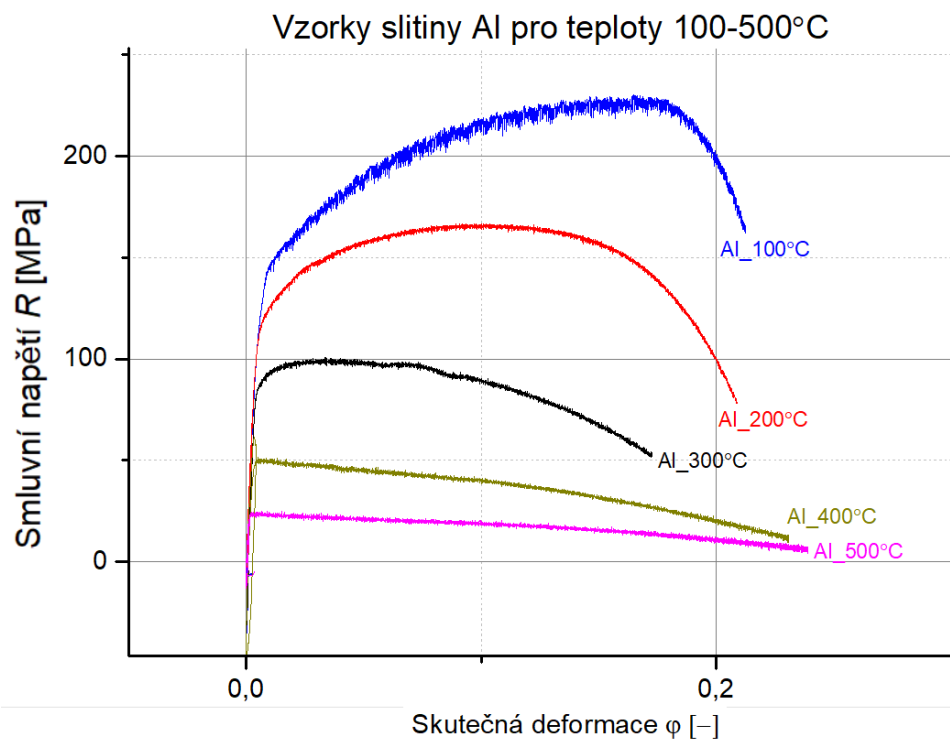


Obr.44 Charakteristický průběh měření pro slitinu Al při teplotě 400°C



Obr.45 Charakteristický průběh měření pro slitinu Al při teplotě 500°C

Jednotlivé průběhy měření při jednotlivých teplotách byly dále vloženy do jednoho grafu (Obr.46) pro ukázkou rozdílu jejich průběhu a případné meze pevnosti v tahu, jejíž velikost je rovna nejvyšší dosažené hodnoty napětí jednotlivých průběhů.



Obr.46 Charakteristické průběhy měření vzorků slitiny Al pro zvolený interval teplot

Z Obr.46 kde je zobrazen průběh všech měření slitiny Al ve zvoleném intervalu teplot je dobře vidět odlišnost jednotlivých měření. Například je patrné, že při nižších teplotách je brzy dosaženo meze pevnosti. Vzorek se poté deformuje velmi dlouho pod menším smluvním napětím, než je mez pevnosti, až do jeho destrukce. Tato skutečnost vzniká právě díky zavedení smluvního napětí. Vzhledem k tomu, že smluvní napětí je v každém bodě grafu (v každém okamžiku měření) vypočteno jako poměr zatěžující síly a počátečního průřezu zkušební vzorku, může toto napětí klesat. Ve skutečnosti se však průřez v průběhu měření zmenšuje v podobě vzniklého krčku. Kdyby měl stroj Gleeble 3500 možnost měřit měnící se průřez v průběhu měření a ten by byl dosazován do vzorce pro napětí, vzniklo by tzv. skutečné napětí, které je vždy rostoucí. V závislosti na tomto napětí by pak zkušební vzorek praskl vždy v maximální hodnotě skutečného napětí.

Vypočtené hodnoty deformačního odporu a meze pevnosti

Velikost deformačního odporu byla vypočtena pomocí výše uvedeného postupu při kterém byla integrována křivka průběhu měření jednotlivých vzorků a následně vydělena rozdílem hodnot skutečné deformace (viz. 3.1). Tím byla získána střední hodnota napětí, která je rovna deformačnímu odporu.

Jelikož byly měřeny při každé teplotě dva vzorky, hodnota deformačního odporu vznikla aritmetickým průměrem těchto hodnot. K těmto hodnotám byla vypočtena směrodatná odchylka pro získání rozptylu vypočtených hodnot.

Vzorec pro určení aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.2)$$

Vzorec pro určení výběrové směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\frac{1}{1-N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.3)$$

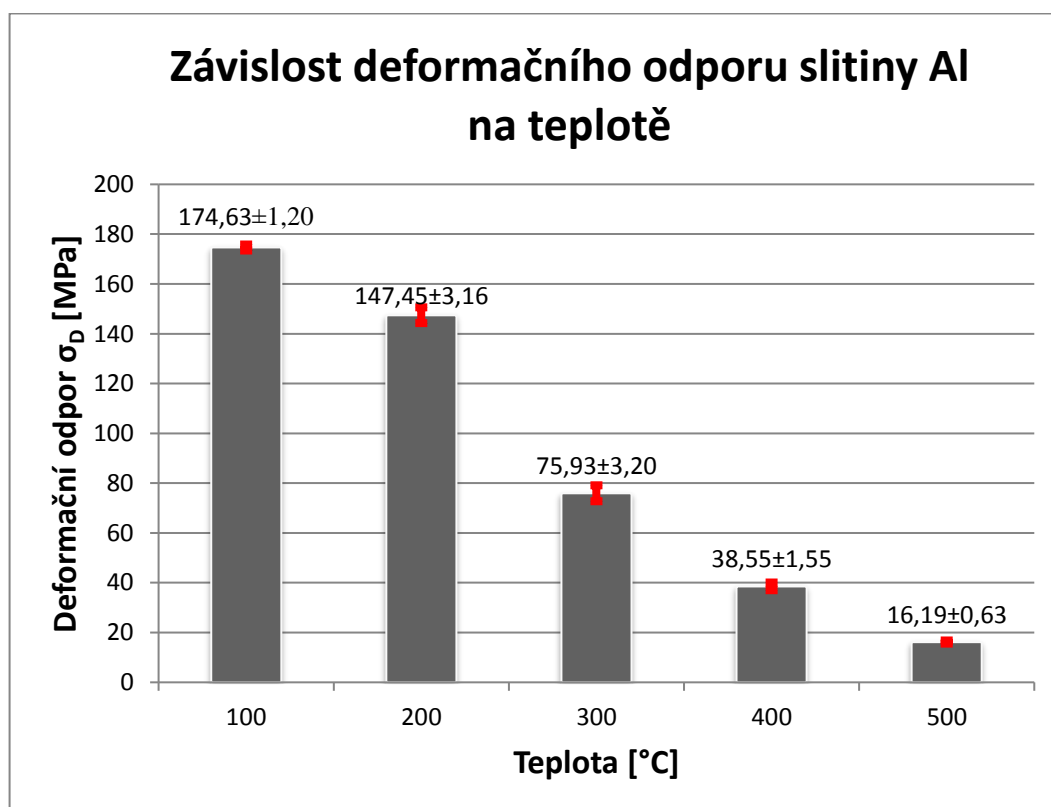
kde značí: \bar{x} - aritmetický průměr hodnot
 N - počet měření
 x_i - naměřené hodnoty

Mez pevnosti v tahu byla zjištěna z průběhu jednotlivých napětí. Je to tedy maximální hodnota napětí v průběhu měření. Z důvodu více měření byla hodnota meze pevnosti v tahu opět získána vytvořením aritmetického průměru s příslušnou směrodatnou odchylkou.

Tab.3 Vypočtené hodnoty deformačního odporu a meze pevnosti slitiny Al v závislosti na teplotě

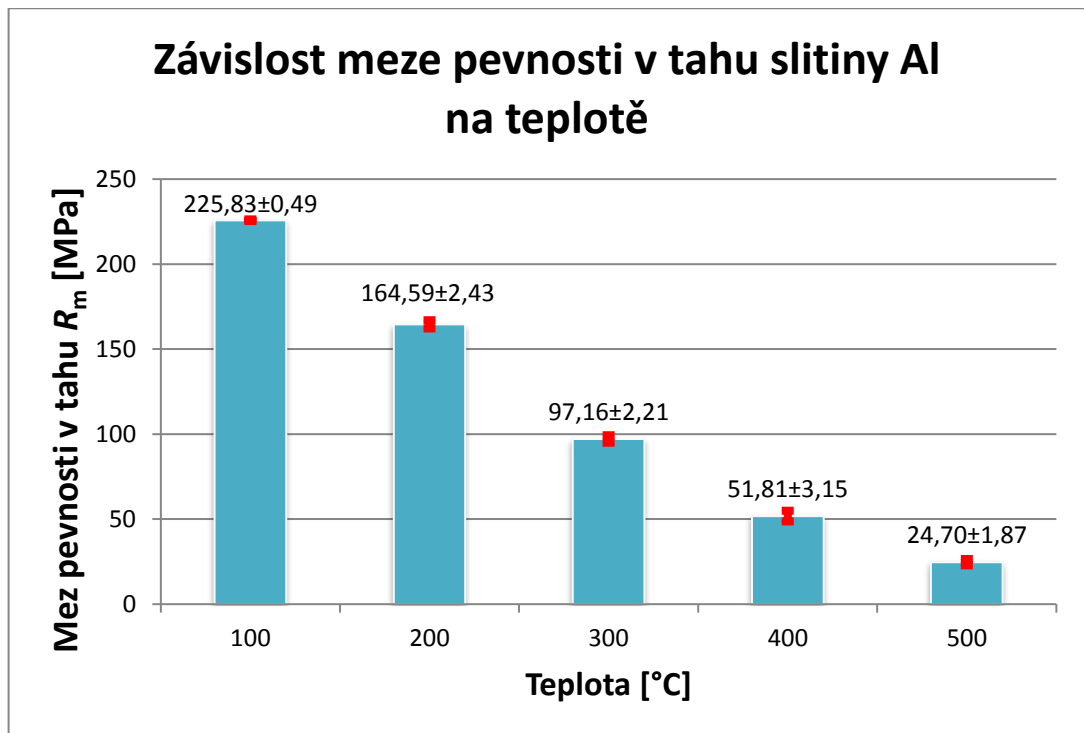
Teplota [°C]	Deformační odpor σ_D [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]
100	174,63±1,20	225,83±0,49
200	147,45±3,16	164,59±2,43
300	75,93±3,20	97,16±2,21
400	38,55±1,55	51,81±3,15
500	16,19±0,63	24,70±1,87

Z Tab.3 lze dále vytvořit grafické vyjádření, které nám více napoví o hledaných závislostech.



Obr. 47 Grafické znázornění deformačního odporu slitiny Al závislého na teplotě

Z Obr.47 je patrné, že deformační odpor se vzrůstající teplotou klesá. Například při tváření při teplotě 500°C je potřeba o 90,7% menší tvářecí síla než při teplotě 100°C. Při změně o 100°C z teploty 100°C na 200°C bude potřebná tvářecí síla už o 15,6% menší.



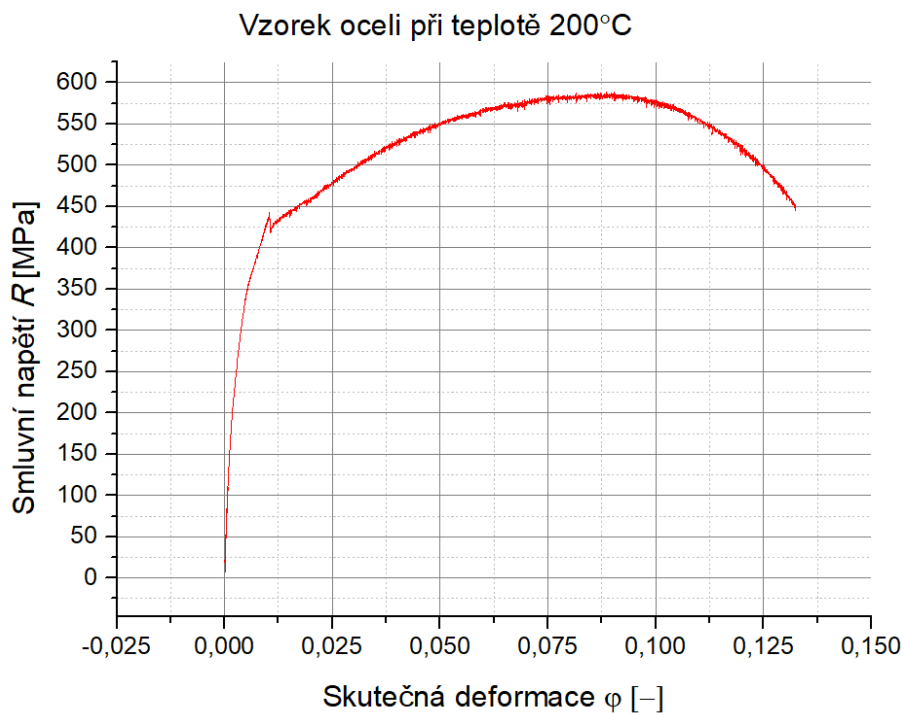
Obr.48 Grafické znázornění meze pevnosti v tahu slitiny Al závislé na teplotě

Mez pevnosti v tahu má závislost na teplotě podobného charakteru jako závislost deformačního odporu. Při opětovném srovnání teploty 100°C a 500°C vyjde, že mez pevnosti v tahu při teplotě 500°C je o 89,1% menší. Rozdíl mezi teplotou 100°C a 200°C činí pokles meze pevnosti v tahu o 27,1%.

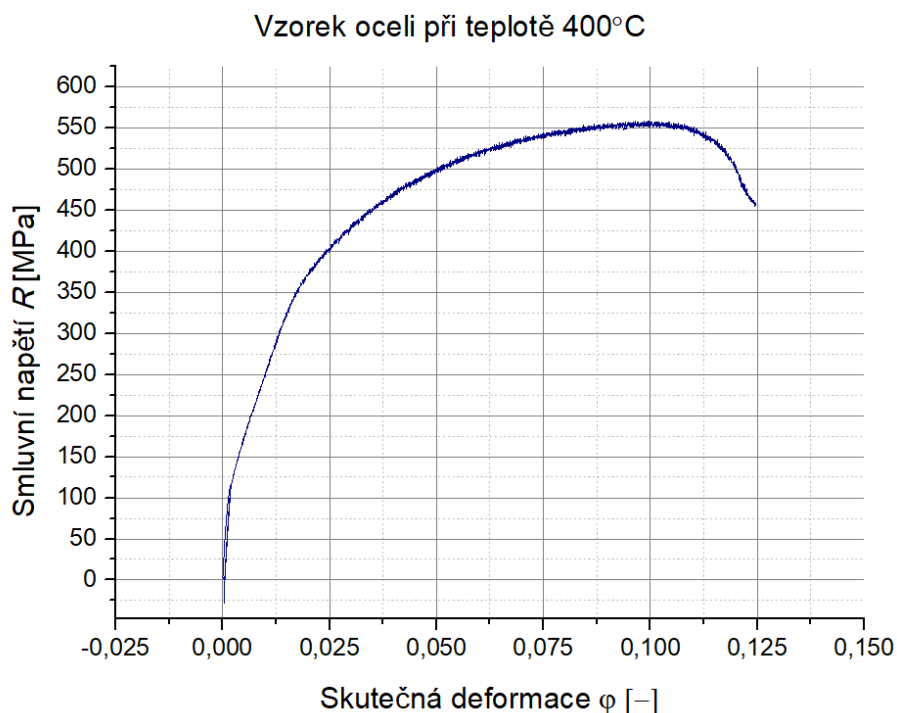
3.5.2 Měření oceli

Slitina oceli byla ohřívána také rychlostí 5°C/s. K dispozici bylo vysoustruženo 12 vzorků pro interval teplot 200-1200°C po 200°C. Opět tedy byly při každé teplotě měřeny vždy dva vzorky.

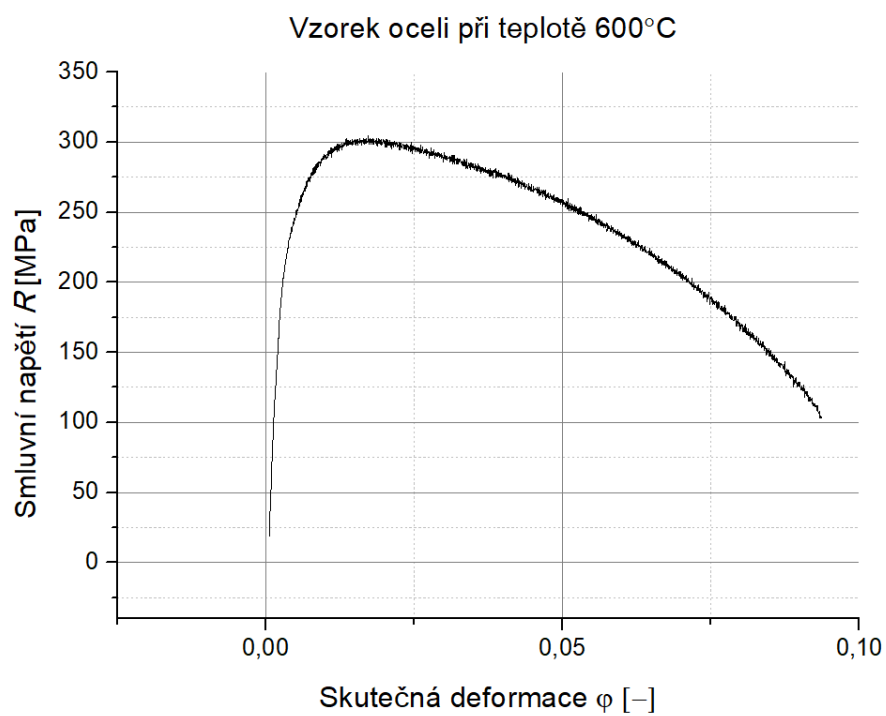
Postup měření se nijak nelišil od měření slitiny Al. Pouze při vyšších teplotách (800°C a více) bylo třeba pro rychlejší manipulaci mezi jednotlivými měřeními třeba ochlazovat nahřáté klínové čelisti. To se provádělo pouze ochlazením ve vodě.



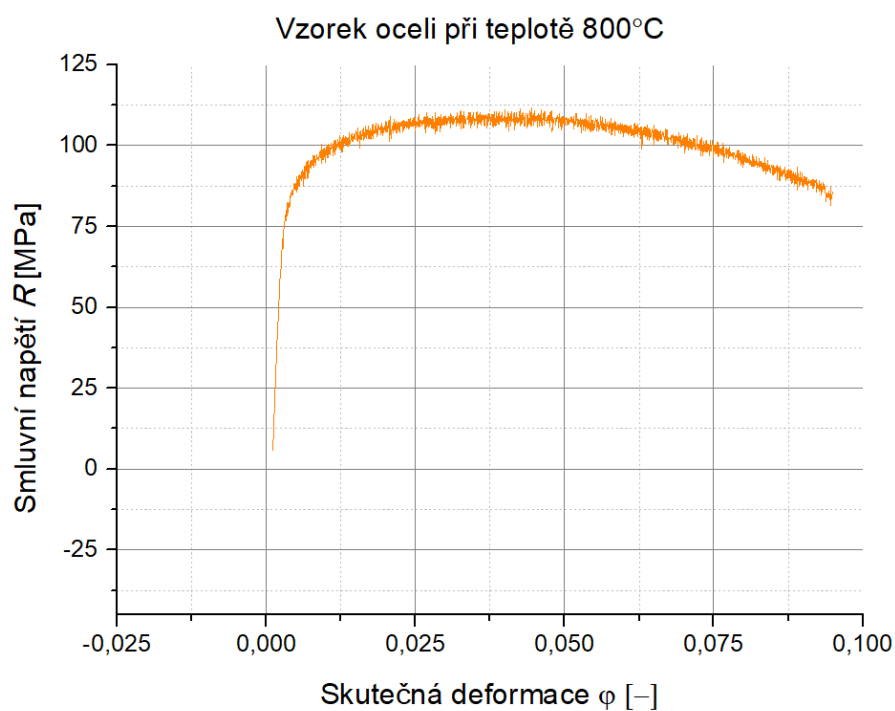
Obr.49 Charakteristický průběh měření pro ocel při teplotě 200°C



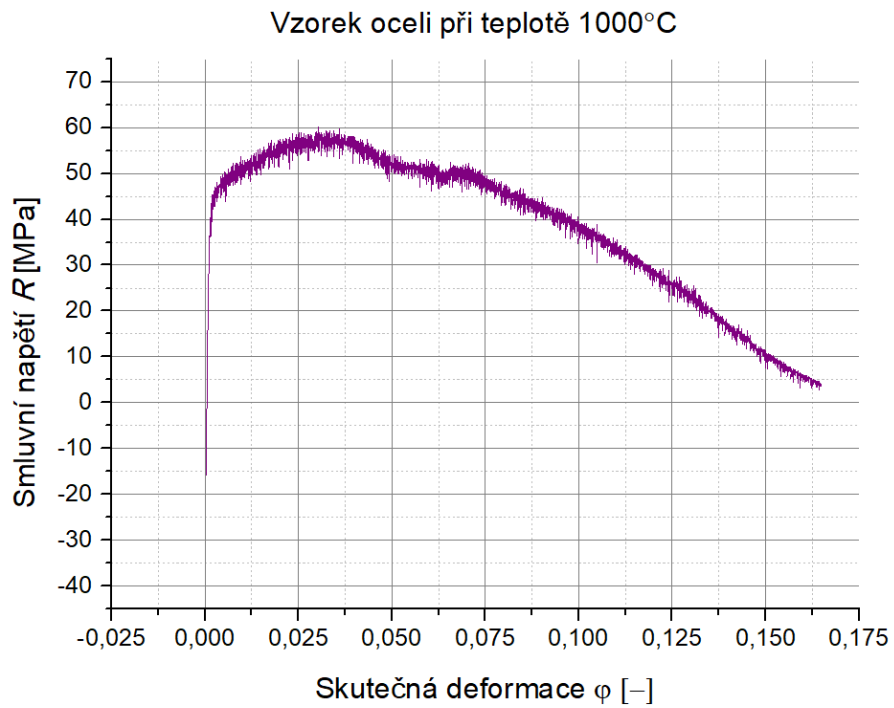
Obr.50 Charakteristický průběh měření pro ocel při teplotě 400°C



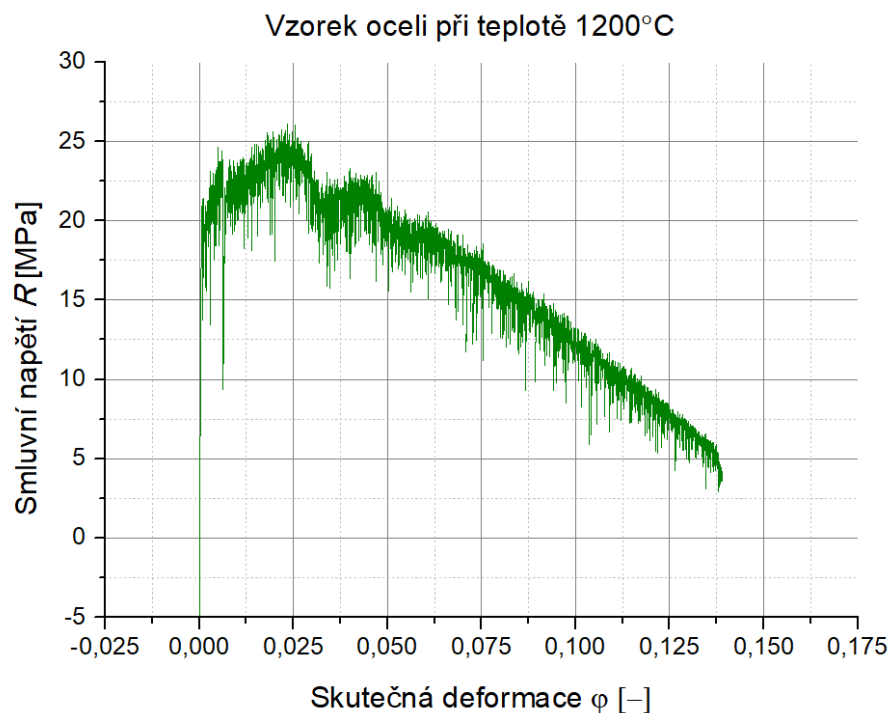
Obr.51 Charakteristický průběh měření pro ocel při teplotě 600°C



Obr.52 Charakteristický průběh měření pro ocel při teplotě 800°C



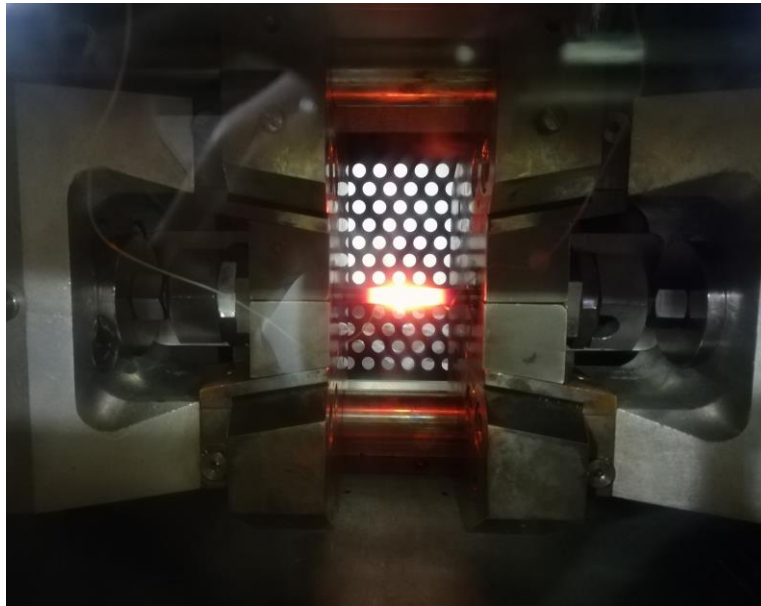
Obr.53 Charakteristický průběh měření pro ocel při teplotě 1000°C



Obr.54 Charakteristický průběh měření pro ocel při teplotě 1200°C

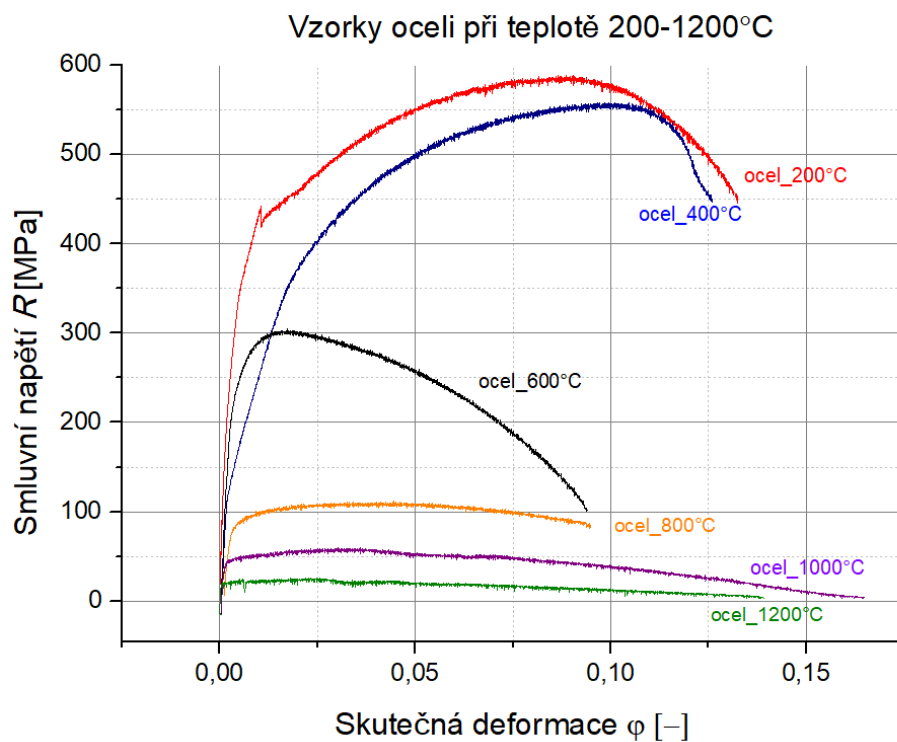
Při takto vysoké teplotě (1200°C) vznikalo již velké riziko odpadnutí termočlánku v průběhu měření. To by samozřejmě měření přerušilo, protože by nemohla být udržována teplota v průběhu měření. To se však naštěstí nestalo.

Měření teploty 1200°C bylo také zaznamenáno fotografií (Obr. 55) na které je vidět jak je materiál nahřátý, což lze poznat z jeho barvy. Na obrázku je také patrné, že materiál je nahřátý na nejvyšší teplotu (zadanou teplotu) pouze uprostřed měřené délky. Výrazně tak neovlivňuje tepelně další části, které se nachází v pracovní komoře.



Obr. 55 Fotografie nahřátého vzorku v průběhu měření

Jednotlivé průběhy měření byly opět vloženy do jednoho grafu (Obr.56) pro lepší přehlednost.

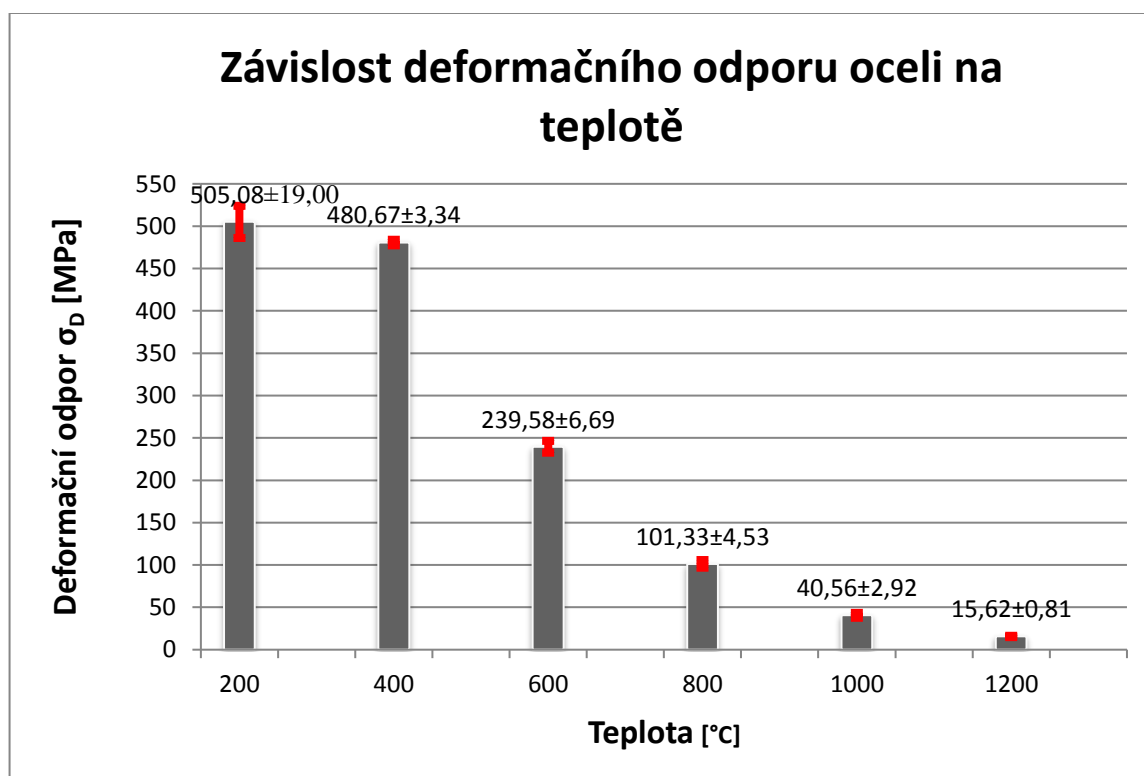


Obr.56 Charakteristické průběhy měření vzorků oceli pro zvolený interval teplot

Pomocí stejných předpokladů a stejných vzorců jako u slitiny Al byly vypočteny hodnoty deformačního odporu a meze pevnosti v tahu pro ocel a jejich směrodatné odchylky.

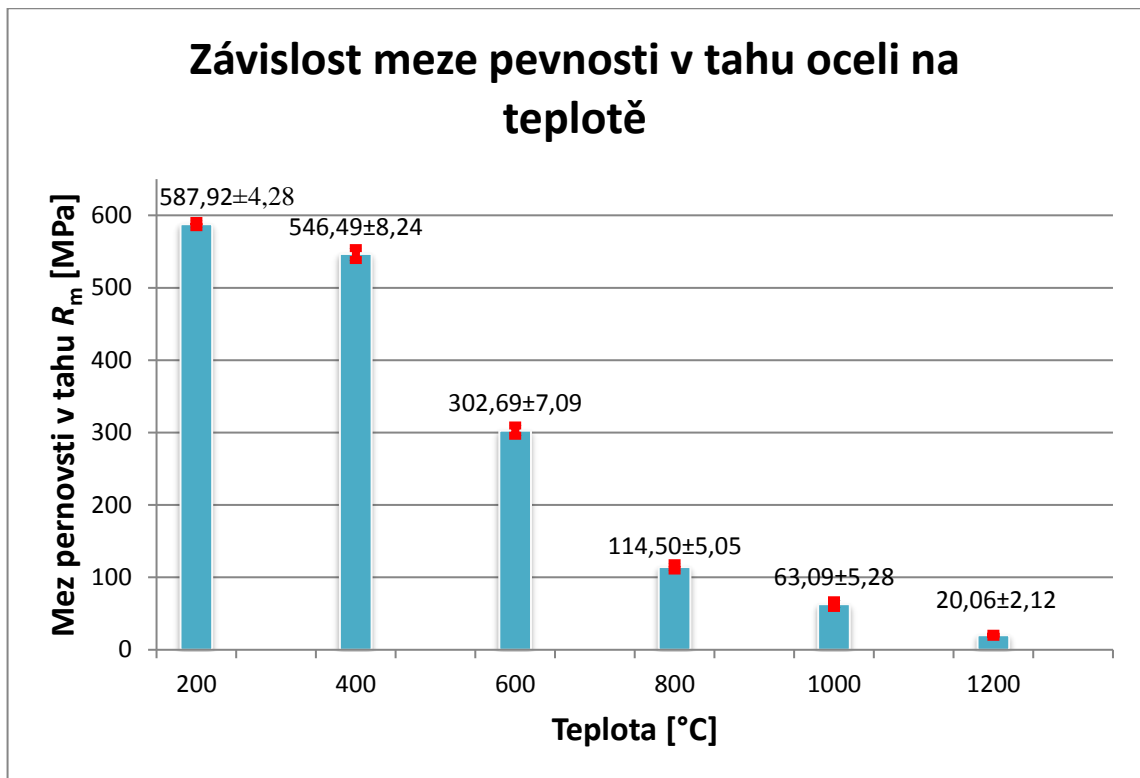
Tab.4 Vypočtené hodnoty deformačního odporu a meze pevnosti oceli v závislosti na teplotě

Teplota [°C]	Deformační odpor σ_D [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]
200	505,08±19,00	587,92±4,28
400	480,67±3,34	546,49±8,24
600	239,58±6,99	302,69±7,09
800	101,33±4,53	114,50±5,05
1000	40,56±2,92	63,09±5,28
1200	15,62±0,81	20,06±2,12



Obr. 57 Grafické znázornění deformačního odporu oceli závislého na teplotě

Z Obr. 57 a Tab.4 je patrné, že hodnoty deformačního odporu při teplotě 200°C a 400°C mezi sebou nemají tak velký rozdíl. Při minimálním deformačním odporu u teploty 200°C a maximálním deformačním odporu u teploty 400°C činí tento rozdíl mezi hodnotami pouze 2,79 MPa. Dále je již pokles deformačního odporu na teplotě strmější.



Obr. 58 Grafické znázornění meze pevnosti v tahu oceli závislé na teplotě

Pro hodnoty meze pevnosti v tahu nebyl rozdíl mezi teplotou 200°C a 400°C tak malý. Avšak hodnota 400°C je i tak odlišná oproti průběhu další závislosti.



Obr.59 Fotografie vzorků po měření

Na Obr.58 jsou vidět prasklé vzorky oceli. Na některých, které byly měřeny při teplotě 400°C a více je k vidění zbarvení v důsledku působení teploty v průběhu měření.

4 Závěr

V souladu se zadáním bakalářské práce byly v rámci experimentu provedeny testy s cílem zjištění závislosti velikosti deformačního odporu na teplotě. Pro testy byly vybrány dva odlišné, ale běžně používané, konstrukční materiály a to ocel S460NL a slitina hliníku AW-5754. Velikost deformačního odporu byla zjišťována pomocí tahové zkoušky na stroji Gleeble 3500, který umožňuje provádění testů při definované teplotě. Prezentované výsledky testů v podobě grafických závislostí dokazují významný vliv teploty tváření na velikost deformačního odporu. Pro oba testované materiály je patrný klesající průběh hodnoty deformačního odporu s rostoucí teplotou tváření.

U měřené oceli S460NL je při teplotě 400°C vidět jen mírný pokles velikosti deformačního odporu oproti teplotě 200°C. To však může být zapříčiněno tím, že zvolená teplota 400°C se nachází blízko oblasti tzv. modrého žáru, který u ocelí vyskytuje právě okolo 400°C v závislosti na případných dalších prvcích obsažených v oceli. Při této teplotě dochází ke zkřehnutí materiálu a v praxi se jí snažíme vyhnout.

Je zajímavé, že při případném tváření slitiny Al je třeba při teplotě 500°C vynaložit skoro 11x menší tvářecí sílu než při teplotě 100°C. U oceli je třeba při teplotě 1200°C vynaložit až skoro 33x menší tvářecí sílu než při teplotě 200°C. Tyto velké rozdíly jsou v technické praxi velmi důležité a každý technolog by měl tuto skutečnost znát.

Aby mohlo být měření označeno za naprosto věrohodné, z čehož by vyznívala vždy jedna konkrétní hodnota s velmi malou směrodatnou odchylkou muselo by být při každé teplotě naměřeno mnohem více vzorků než dva. To však vzhledem k časové náročnosti měření nemohlo být uskutečněno. Avšak ke zjištění závislosti jsou dva vzorky dostačující.

Použitá literatura

- [1] Kování- Vladimír Hašek + kolektiv
- [2] Kování I, Kování II- František Hodboď + kolektiv
- [3] <https://cs.wikipedia.org>
- [4] Sešity Strojírenské technologie a Kontroly měření ze Střední průmyslové školy v Mladé Boleslavi
- [5] <http://mlgeardesigns.blog.cz/1504/kovani>
- [6] <http://www.ksp.tul.cz>
- [8] <http://www.vzdelavanirikfer.cz>
- [9] <http://www.svobodaprokovare.cz>
- [10] <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
- [12] Volné ruční kování - Antonín Jícha
- [11] Internetový portál E-learning.tul
- [12] [gleeble.com](http://www.bleeble.com)
- [13] <http://www.smeral.cz>
- [14] <https://www.ethermtz.cz>
- [15] <http://www.xray.cz/>
- [16] <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>
- [17] <http://home.tiscali.cz/chemie/elektrolyza.htm>
- [18] http://katalog.umelecke-kovarstvi.eu/co_je.php
- [19] Norma pro zkoušky tahem oceli ČSN EN ISO 6892-1