



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TVÁŘENÍ TITANOVÝCH SLITIN

FORMING OF TITANIUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Bednařík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Josef Bednařík
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.
Akademický rok:	2021/22

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

Tváření titanových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Titan má při srovnatelných pevnostních vlastnostech jako ocel, výrazně nižší hmotnost a řadu výborných užitečných charakteristik, jako jsou korozivzdornost, biokompatibilita, chemická stálost apod. Jeho využití je však limitováno, např. vysokými náklady na výrobu, obtížným obráběním i obtížným zpracováním vratného odpadu. Tváření se proto stalo základní zpracovatelskou technologií titanu a jeho slitin.

Cíle diplomové práce:

- Zpracovat charakteristiku titanu a jeho slitin.
- Sestavit literární studii věnovanou tvářitelností slitin titanu.
- Navrhnout, připravit a realizovat experiment pro prověření tvárných vlastností vybrané titanové slitiny.
- Vyhodnotit provedený experiment.

Seznam doporučené literatury:

LEYENS, Christoph end, Manfred PETERS. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 513 s. ISBN 3-527-30534-3.

SEDLÁČEK, Vladimír. Neželezné kovy a slitiny. 1.vyd. Praha: SNTL, 1979. 398 s.

PTÁČEK, Luděk a kol. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 4th ed. New York: Cambridge University Press. 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření I. Brno: Univerzita obrany. 2008. 105 s. ISBN 978-80-7213-579-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce byla orientována do oblasti tváření titanu a jeho slitin s cílem prověřit tvárné vlastnosti titanové slitiny VT 3-1. Pomocí pēchovací zkoušky provedené na lisu CZR 600, zpracované v programu Dewesoft, byly sestaveny křivky zpevnění pro pēchování za teploty 25 °C až 800 °C. Na základě provedených experimentů lze titanovou slitinu VT 3-1 doporučit pro tváření výhradně za vyšších teplot. Jako dolní mezní kovací teplotu je doporučeno zvolit teplotu 700 °C. Materiál pēchovaný při nižších teplotách vykazoval špatnou tvařitelnost zapříčiněnou zpevněním materiálu. Mez kluzu při pēchování za pokojové teploty byla naměřena 1 100,8 MPa. Oproti tomu při 800 °C má hodnotu 321,7 MPa. Jako doplňující měření bylo provedeno stanovení tvrdosti před zkouškou a po zkoušce. Po zkoušce bylo měření provedeno na čele vzorku a také v řezu. U teploty 700 °C a 800 °C se u tvrdosti projevil důsledek dynamická rekrystalizace, která měla za následek pokles tvrdosti. Největší tvrdost byla u všech teplot zaznamenána uprostřed vzorku. Tento výsledek potvrdil tézi, že se zde nachází pásmo nejintenzivnější deformace v kolmém a osovém směru vzorku.

Klíčová slova

Tváření, titan, titanová slitina VT 3-1, pēchovací zkouška, křivky zpevnění, tvrdost

ABSTRACT

The work was focused on the forming of titanium and its alloys in order to verify the ductile properties of titanium alloy VT 3-1. Using the upsetting test performed on the CZR 600 press and processed in the Dewesoft application, the strengthening curves for compaction at temperatures ranging from 25 °C to 800 °C were compiled. Based on the performed experiments, the titanium alloy VT 3-1 can be recommended for forming only at higher temperatures. It is recommended to select 700 °C as the lowest forging temperature limit. The material when being upset at lower temperatures showed poor formability due to the strengthening of the material. The yield strength during upsetting at room temperature was measured to be 1 100,8 MPa. In contrast, at 800 °C it has a value of 321,7 MPa. Hardness was determined before and after the test as an additional measurement. After the test, the measurement was performed on the front of the sample and in section. At 700 °C and 800 °C, the hardness resulted in dynamic recrystallization, which resulted in a decrease in hardness. The highest hardness was recorded in the middle of the sample at all temperatures. This result confirmed the thesis that there is a band of the most intense deformation in the perpendicular and axial direction of the sample.

Key words

Forming, titanium, titanium alloy VT 3-1, upsetting test, consolidation curves, toughness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BEDNAŘÍK, Josef. *Tváření titanových slitin* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139684>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Lidmila.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Tváření titanových slitin vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně dne 19. 05. 2022

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále také děkuji za pomoc a ochotu při zpracování experimentální části panu Ing. Janu Říháčkovi, Ph. D. a panu Vojtěchu Říháčkovi. Závěrem bych rád poděkoval také mé rodině a přítelkyni za podporu ve studiu.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 TITAN A JEHO SLITINY	11
2.1 Titan.....	11
2.2 Výroba titanu	13
2.3 Slitiny titanu	14
2.4 Vlastnosti titanu a jeho slitin	16
3 TVÁŘITELNOST KOVŮ.....	20
3.1 Materiáloví činitelé.....	20
3.2 Termomechanické podmínky deformace	21
3.3 Stav napjatosti	24
3.4 Technologické podmínky	25
3.5 Hodnocení tvařitelnosti	26
3.5.1 Limitní diagramy	29
3.6 Stanovení velikosti přirozeného přetvárného odporu.....	31
3.6.1 Řešení dle Siebela.....	32
3.6.2 Řešení dle Unksova	33
4 EXPERIMENT	36
4.1 Příprava experimentu	36
4.1.1 Lis CZR 600	37
4.1.2 Zesilovač, AD převodník, Dewesoft	39
4.1.3 Tvrdoměr	40
4.1.4 Další pomocná zařízení	42
4.2 Průběh experimentu.....	44
4.2.1 Popis průběhu experimentu na vzorku č. 12 a č. 13	48
4.2.2 Křivky zpevnění	53
4.3 Vyhodnocení experimentu	56
ZÁVĚR.....	60
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	63

ÚVOD

Dnešní svět je doslova zaplavený spleť různých materiálů, bez nichž bychom si nedokázali představit každodenní život. Moderní technologie, jenž nám napomáhají ve vývoji nových typů materiálů posouvají kvalitu života čím dál na vyšší úroveň. Zkvalitněním technologií výroby, opracováním materiálů, ochrannými vrstvami či dalšími úpravami není problém pro dnešní moderní svět, který požaduje čím dál specifičtější vlastnosti materiálů, vytvoření struktury jedinečných vlastností, o kterých by v minulosti nebylo ani zdání. Důležitost správné volby materiálu pro daný výrobek hraje tedy bezesporu jednu z nejdůležitějších rolí a díky tomu můžeme například ve zdravotnictví již zcela bez problémů využívat různých implantátů aj., které nejsou pro tělo nijak škodlivé. Existuje tedy obrovská škála možností výběru materiálů, ať už od základních ocelí, plastů, skla, keramiky, až po různé slitiny kovů. Právě poslední zmiňované materiály se velmi často vyznačují specifickými vlastnostmi, jež jsou nedílnou součástí výroby v mnoha závodech. [1; 2; 3; 4; 5]

Všechny klady však přináší také zápory. Při zpracování různých materiálů narážíme na problémy, kdy některé typy materiálů jsou například těžce obrobitelné, svařitelné, dochází v nich při opracování k zpevňování či jiným nežádoucím účinkům, které je potřeba brát v potaz a hledat nejideálnější metody opracování. Každý materiál je tedy jedinečný, nabízí nám spoustu výhod, ale naopak i mnoho nevýhod. Vždy je na jednotlivém technologovi, aby posoudil, jaký materiál je pro naplnění podmínek potřeba a jakou technologií se bude zpracovávat, jelikož v dnešním světě hraje primární roli ekonomická náročnost dané výroby. [1; 2; 3; 4; 5]

Velkou skupinou materiálů jsou neželezné kovy, mezi něž patří například titan (obr. 1), měď, olovo, hliník, cín, zinek atd. Neželezné kovy oproti ocelím, které tvoří dominantní podíl ve výrobě, nabízí většinou výhodu v nižší hmotnosti, odolnost proti korozi či lepší el. vodivost. Titanu patří v přírodě sedmé místo z hlediska zastoupení obsahu kovu v půdě. Jedná se o stříbrně lesklý kov, který se vyznačuje dobrou elektrickou vodivostí, má dobrou odolnost proti korozi, nízkou hustotu nebo také dobré mechanické vlastnosti. Tento neželezný kov je také hojně používán ve formě tzv. slitin. Jedna z ukázek, jenž nám aplikace titanu ve zdravotnictví nabízí je operace holčičky v liberecké nemocnici. Ta měla v roce 2007 celý život před sebou a čekala ji implantace čtvrtiny lebky. Pomocí scanu hlavy a následného výtisku z titanu ve 3D tiskárně se mohla tato část lebky implantovat a holčička díky unikátním vlastnostem titanu dále užívat života. [1; 2; 3; 4; 5]



Obr. 1 Titanová kostka (99,7 %) [4].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Moje diplomová práce je orientována na titan a titanové slitiny s cílem prověřit tvárné vlastnosti tohoto materiálu. Titan má při srovnatelných pevnostních vlastnostech jako ocel výrazně nižší hmotnost. Dále má také celou řadu výborných užitných charakteristik. Mezi ně patří například vysoká odolnost v korozním prostředí, biokompatibilita, chemická stálost aj. Vyznačuje se také poměrně dobrými mechanickými vlastnostmi, nízkou tepelnou a elektrickou vodivostí. Jeho využití v praxi je však částečně limitováno. Výroba součástí z titanu je finančně velmi náročná, problémy též skýtá samotná obtížnost obrábění a následné zpracování vratného odpadu. Tváření se tedy stalo pro tento materiál a jeho slitiny základní zpracovatelskou technologií. [1; 2; 6]

Stěžejním bodem práce je navržení a následné realizování experimentu, pomocí něhož bude možné posoudit tvářitelnost vybrané titanové slitiny. Pro provedení experimentu mám k dispozici titanovou slitinu VT 3-1. Vybrané mechanické vlastnosti slitiny VT 3-1 jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Vybrané mechanické vlastnosti slitiny VT 3-1 [6].

Vlastnost	Značka	Hodnota	Jednotka
Mez pevnosti	R _m	980	MPa
Mez kluzu	R _e	840	MPa
Tažnost	A	10	%
Kontrakce	Z	25	%

Chemické složení této slitiny je uvedeno v tabulce 2. Jedná se o slitinu alfa + beta, která je využívána zejména v leteckém průmyslu. Vyrábí se z ní například lopatky kompresorů proudových motorů a obdobné komponenty, při jejichž výrobě lze s výhodou využívat technologie objemového tváření. Proto bude má studijní část diplomové práce zaměřena na charakteristiku titanu a jeho slitin s dalším posouzením jeho tvářitelnosti primárně v oblasti objemového tváření. [1; 2; 6]

Tab. 2 Chemické složení titanové slitiny VT 3-1 [6].

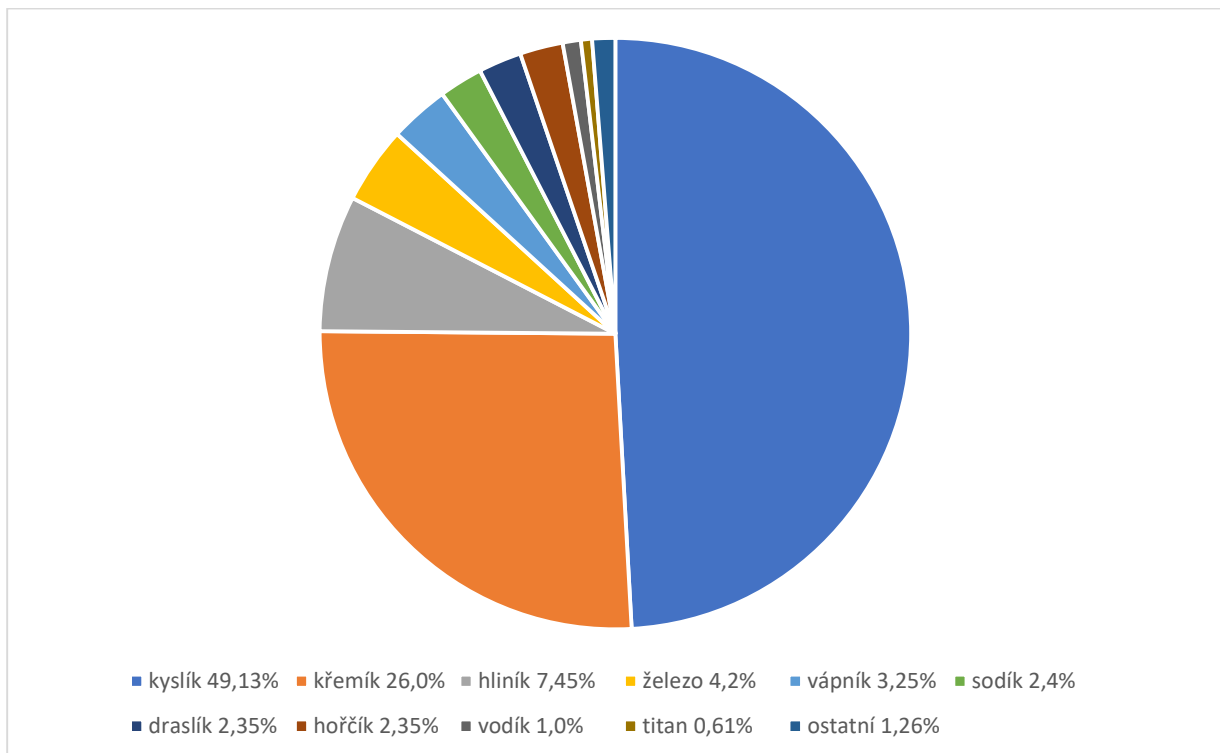
Prvek	Hodnota	Jednotka
Hliník	5,5 – 7,0	%
Molybden	2,0 – 3,0	%
Chrom	0,8 – 2,3	%
Železo	0,2 – 0,7	%
Křemík	0,15 – 0,4	%
Uhlík	≤ 0,1	%
Dusík	≤ 0,05	%
Vodík	≤ 0,015	%
Kyslík	≤ 0,18	%

2 TITAN A JEHO SLITINY

2.1 Titan

Titan byl před mnoha lety s nadsázkou označován jako tzv. kov budoucnosti. Člověk se s tímto neželezným kovem seznámil až na konci 18. století, konkrétně roku 1791. Objev provedl nezávisle na sobě anglický chemik William Gregor a M. K. Klaproth. Vlastnosti tohoto potenciálního materiálu byly určeny až na začátku 20. století, kdy byly provedeny rozborů a v roce 1925 byl v laboratoři připraven první tvárný titan. O tom, že se tento kov prodíral na svět velmi laxe, svědčí také zavedení do výroby, které přišlo až po druhé světové válce, někdy okolo roku 1951. V dalších letech však dochází k velkému boomeru tohoto materiálu a začíná se vyrábět ve velkém. [2; 3; 7]

Tento stříbře lesklý kov je v periodické tabulce prvků označen jako **Ti**. Jedná se o sedmý nejrozšířenější kov, respektive desátý nejrozšířenější prvek, nacházející se v zemské kůře. Kompletní složení zemské kůry lze vidět na obrázku 2. Čistý titan se v laboratorních podmínkách nedařilo mnoho let vyrobit. První úspěšný pokus zaznamenal až roku 1910 M.A. Hunter. V přírodě se tento neželezný kov vyskytuje cca v 80 základních minerálech. Jedná se například o rutil, ilmenit aj. Oddělení **Ti** od zbytku minerálu je velmi složitý proces, jehož zdokumentování trvalo dalších 40 let a úspěšně ho zaznamenal až roku 1950 W. Kroll. Vyrobit čistý titan je velmi složité z důvodů výrazné sloučenosti s kyslíkem, dusíkem a dalšími prvky. Proto je výroba titanu rozdělena hned na několik složitých procesů, které se skládají v první řadě z výroby chloridu titaničitého, jenž probíhá v šachtové elektrické peci, dále se po tzv. rafinaci redukuje tato sloučenina pomocí sodíku či hořčíku v ochranné atmosféře na tzv. titanovou houbu. Možností výroby jsou i další mezi ně patří například výroba elektrolýzou bezkyslíkatých solí. Získávání titanu se bude podrobně věnovat kapitola 2.2. [2; 3; 4; 7; 8]



Obr. 2 Kompletní složení zemské kůry [8].

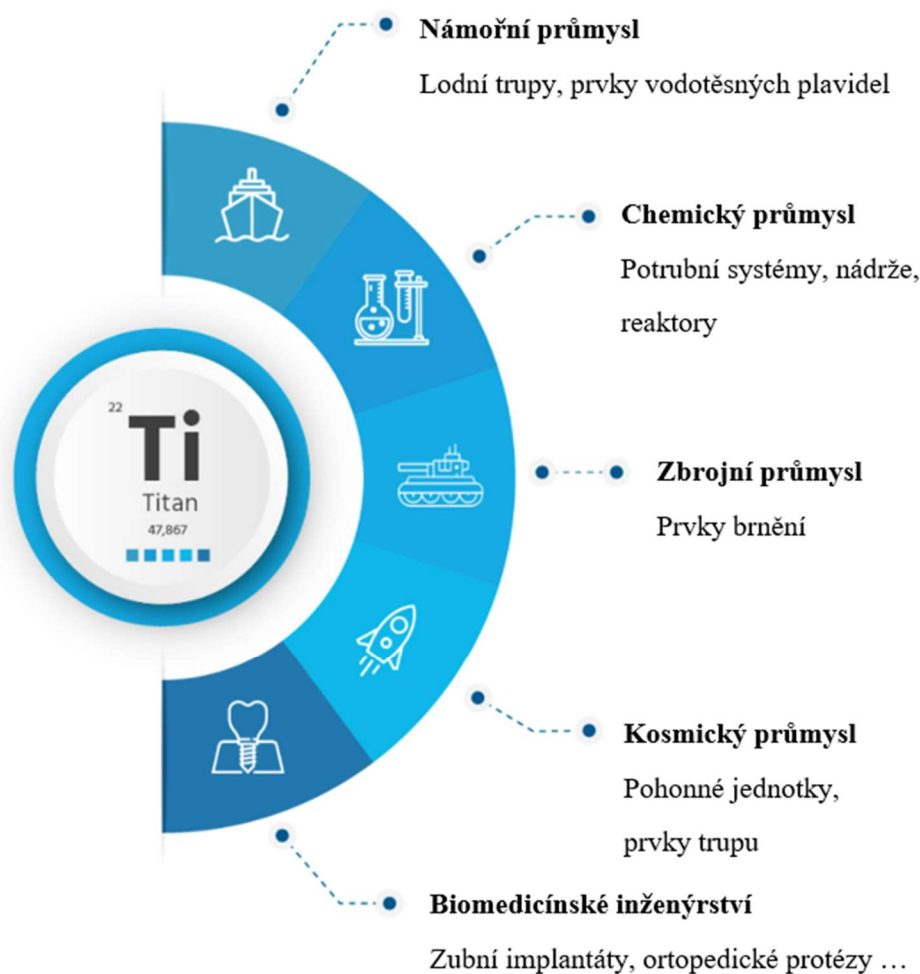
Vyznačuje se primárně svou skvělou odolností proti korozi, řadí se mezi kovy s nízkou hustotou, dobrými mechanickými vlastnostmi či nízkou tepelnou a elektrickou vodivostí. Shrnutí základních vlastností je uvedeno v tabulce 3. Jednotlivé vlastnosti jsou vždy ovlivněny

nečistotami, mezi které patří kyslík, dusík či uhlík. Předností titanu je kromě výše zmíněných také vysoká mez únavy v korozním prostředí. V měřítku pevnosti se tento kov dorovná běžným konstrukčním ocelím. Podrobnou charakteristiku vlastností obsahuje kapitola 2.4. [2; 3; 9]

Tab. 3 Vybrané vlastnosti titanu [3].

Název veličiny:	Hodnota:
Bod tání	1665 °C
Měrné teplo	0,130 cal·g ⁻¹ ·°C ⁻¹
Elektrický odpor	45·10 ⁻⁶ μ·Ω·cm
Měrná váha	4,5 g·cm ⁻³
Tepelná vodivost	0,045 cal·cm
Tepelná roztažnost	8,15·10 ⁻⁶ cm·cm ⁻¹ ·°C ⁻¹

Naopak mezi jeho nevýhody patří vysoký součinitel tření, spojen s vysokým otěrem a také zadíráním. Proto se titanový materiál nedoporučuje používat například při protlačování či tažení. Částečně lze předejít zadírání, a tedy citelnému opotřebení nástroje či vytvoření nežádoucího povrchu, vhodnou volbou maziva, menší volbou úběrů či například povrchovou úpravou materiálu. Velký pozor se musí dávat také při tepelném zpracování, jelikož může dojít k povrchovým reakcím s plyny. Za zvýšené teploty ztrácí Ti vcelku rychle jeho pevnost. Proto se jeho vhodných vlastností využívá zhruba od teploty 300 °C. Při nízkých teplotách se materiál vyznačuje vysokou pevností, zvyšující se mezi kluzu i modulu pružnosti. Během samotného tváření také dochází k postupnému zpevňování materiálu. [2; 3; 7]



Obr. 3 Použití titanu v jednotlivých odvětvích [2].

Jelikož se v dnešní době již nejedná o exotický materiál, jako tomu bylo v první polovině 20. století, využití titanu se postupně dostalo do mnoha odvětví průmyslu. Nenahraditelný je titan bezesporu ve zdravotnictví. Jedná se totiž o kov, který je odolný proti lidským tekutinám a v těle člověka nijak nekoroduje a není tedy lidskému tělu nebezpečný. Toto kouzlo spočívá v ochranné vrstvě, kterou si titanový materiál na svém povrchu vytvoří. Vrstva, jenž je odolná proti tělním tekutinám přilne ke tkáním a znemožní jakoukoli chemickou reakci, a to až do cca 500 °C. Ve zdravotnictví se tedy hojně využívá různých titanových výztuží, výplní, implantátů například ortopedii, neurochirurgii, stomatologii, ale také v obličejové či plastické chirurgii. Kromě zdravotnictví se titan využívá také například v kosmonautice, leteckém průmyslu, lodním průmyslu nebo jsou z titanu vyrobeny části elektroniky aj. Například v roce 2002 firma Nokia uvedla na trh telefon 8910 o rok později pak 8910i, jenž mají titanová pouzdra. Část odvětví i s konkrétními příklady využití titanu lze vidět na obrázku 3. [2; 3; 10; 11]

2.2 Výroba titanu

Jak již bylo nastíněno v kapitole 2.1. Titan se vyskytuje v půdě, jílech, bauxitech, ale také mořské vodě či rostlinách a dohromady vytváří přes 80 minerálů. Pro průmysl je jeden z nejvýznamnějších titaničitan železnatý (FeTiO_3), tedy tzv. ilmenit, jenž obsahuje 31,6 % **Ti**. Dále rutil s polymorfními formami anatasem a brookitem TiO_2 , jenž obsahuje titan ve výši 60 %. Výroba samotného titanu je velmi složitá a také finančně náročná. Tento aspekt navyšuje vysoká citlivost titanu k reagování s plyny (**N**, **O**, **H**, aj.) a tedy nutnosti výroby ve vakuu či ochranné atmosféře, což dlouhou dobu ztěžovalo oddělení titanu z rud. [2; 3; 12]

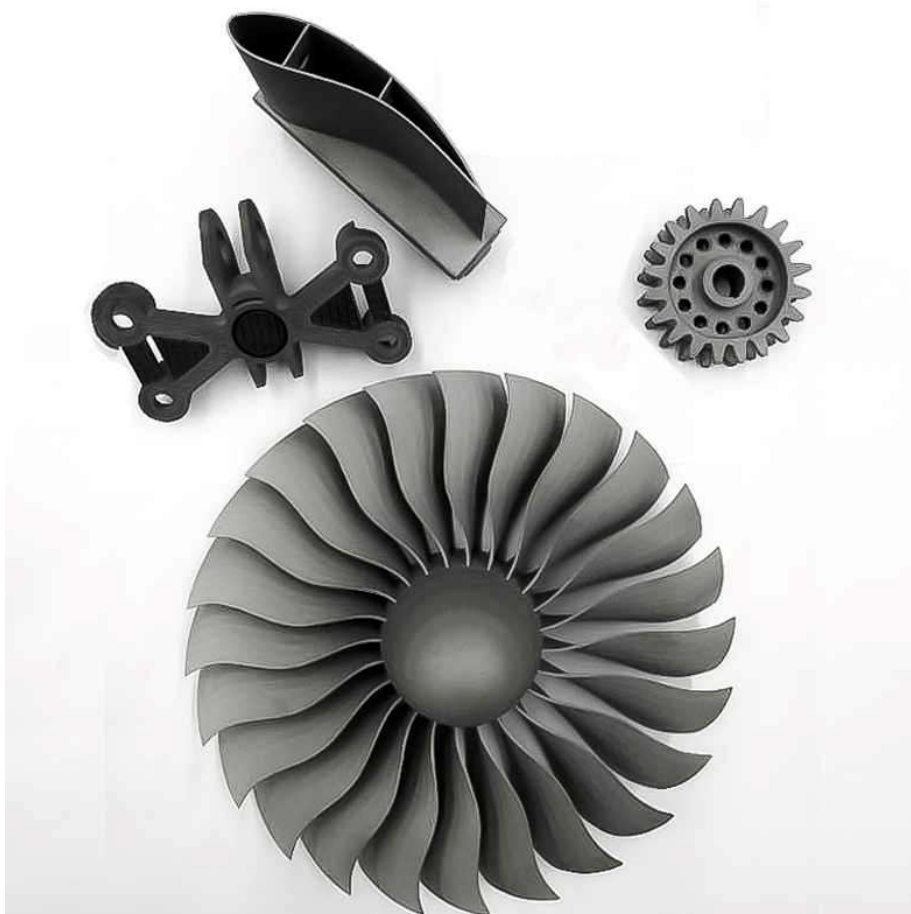
Získat titan lze hned několika způsoby. Nejčastěji se využívá tzv. Krollův proces, který byl objeven mezi lety 1937 až 1942 W. Krollm. Jedná se o metodu, kdy je využito redukce pomocí hořčíku. Metoda spočívá v tom, že do roztaveného hořčíku je postupně přidáván chlorid titaničitý, a to zcela bez přístupu vzduchu. Proces tedy probíhá buďto ve vakuu nebo při ochranné atmosféře, např. argonu. Teplota se pohybuje okolo 800 °C. Jakmile je reakce dokonána, je nutné nechat tzv. titanovou houbu vychladnout v atmosféře z inertního plynu. Kov se po celou dobu reakce postupně vytvářel na stěnách kelímku, a to od spodu nahoru a do středu. Na titanové houbě lze nalézt také zbytky hořčíku, jenž je zapotřebí následně odstranit například vakuovou destilací. [2; 3; 11; 12]

Při redukci je kromě hořčíku možné použít také sodík. Tento způsob výroby nese název Hunterův proces. Jedná se o podobný princip výroby. Před samotnou výrobou je nutné sodík vakuově destilovat. Během redukce je nutné dosáhnout nižších teplot, díky čemuž se titan nepřivaruje na boky reakční nádoby a lépe se tedy následně vytahuje. [3; 11; 12]

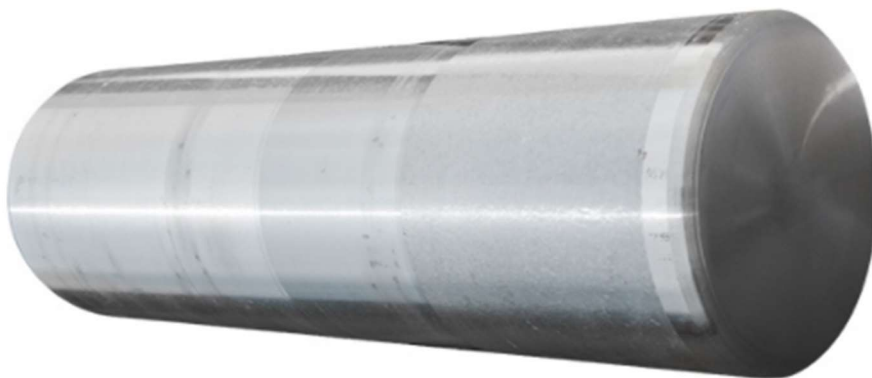
Mezi další způsoby výroby titanu patří výroba elektrolýzou. Během mnoha let se postupně zkoumalo využití a funkčnost složení jednotlivých elektrolytů. Vždy se muselo počítat se skutečností, že teplota tání titanu je mnohonásobně vyšší než teplota samotné lázně. Proto vznikal problém, že se titan vylučuje ve velmi malinkých částech, což následně paralyzuje možnosti odstranění oxidu titaničitého, jak chemicky, tak i mechanicky. Tento problém se nakonec podařilo vyřešit pomocí elektrolýzy bezkyslíkatých solí. Konkrétně fluorotitaničnanem draselným. [3; 11; 12]

Jelikož výroba titanu, jak již bylo zmíněno je velmi finančně náročná, je snaha vymyslet levnější varianty výroby. Mezi další typy výroby titanu byly také zařazeny například termický rozklad chloridu titanatého či redukce chloridu titaničitého pomocí vodíku. Ze všech výše zmíněných procesů vzniká jako výsledek tzv. titanová houba, která však není vhodná pro další výrobu. Proto je tato houba většinou tavením převedena na odlitky (obr. 4) či ingoty (obr. 5). Ty jsou pak dále např. tvářeny. Při tavení se však naráží na problém ve formě reakce titanu

s dalšími plyny v peci či materiály vyzdívky. Ohřev může probíhat například v plazmové peci, indukční peci či elektronové peci. [3; 12; 13]



Obr. 4 Odlitky z titanových slitin [2].



Obr. 5 Vysoce čistý ingot [13].

2.3 Slitiny titanu

Po vyzkoumání jednotlivých vlastností čistého titanu se začalo uvažovat, jak by se daly zlepšit mechanické vlastnosti tohoto materiálu pomocí přidání dalších kovů. Zkoušely se tedy vytvářet různé slitiny na bázi titanu, které konec konců přichází na svět i v současné době. Titanové slitiny by měly mít jedinečné vlastnosti, které budou splňovat speciální podmínky použití. Vývoj těchto nových materiálů probíhal v jednotlivých zemích od prvo počátku odděleně.

Nedocházelo tedy ke spolupráci mezi pracovníky jednotlivých zemí, jak je tomu nyní, což bezesporu přinášelo prodloužení samotného vývoje titanových slitin. Zkoumaly se především základní rovnovážné diagramy v závislosti na přidání jednotlivých prvků do slitiny. [2; 3; 7]

Slitiny lze dělit do mnoha kategorií. Proto bude uvedeno pouze hlavní rozdělení, a to dle struktury v rovnovážném stavu. Titan má dvě alotropické modifikace, první z nich se nachází v oblasti do tzv. bodu transformace, tj. okolo teploty 880 °C a značí se řeckým písmenem α . Druhá oblast se vyskytuje za teplot vyšší než 880 °C, označená jako β . Obě fáze se od sebe liší svou krystalickou mřížkou, která v materiálu zapříčiňuje rozdílné mechanické vlastnosti. Tím, že se do struktury přidají legující prvky, dojde k posuvům teploty transformace a také fázových podmínek. Přidáním těchto prvků dochází k změně struktury slitin v rovnovážném stavu. Některé prvky například teplotu transformace zvýší a díky tomu dochází k zvětšení oblasti tuhého roztoku α . Vznikne tedy slitina složená z fáze alfa s daným prvkem. Stejně tomu je i v opačném případě, kdy následně vzniká rozšířená oblast fáze beta. V tomto případě je však mnohdy obtížné dosáhnout rovnovážné pouze čisté fáze beta, proto tedy vznikají velmi často dvoufázové slitiny alfa plus beta. Vhodnou kombinací prvků lze tedy dosáhnout různých vlastností slitin. Výše uvedené rozdělení do skupin je důležité nejen pro určení mechanických vlastností Ti slitin, ale také nám pomůže určit technologické vlastnosti výroby či specifika využití slitiny. [3; 7; 14]

Přísadové prvky se mohou buďto rozpouštět zcela či jen částečně. Tvoří tedy jednotlivé roztoky alfa nebo beta. Vybrané typy prvků mohou také s titanem tvořit různé sloučeniny. Mezi tzv. alfa stabilizátory, kterých mimo jiné není mnoho, patří například dusík, uhlík či kyslík. Z kovů pak hliník. Pro samotné legování lze brát z tohoto výčtu pouze hliník, který společně s titanem zajistí vhodné mechanické vlastnosti až do teploty 600 °C. Naprostý opak však ve slitinách titanu dělají první tři zmíněné prvky. Kyslík, dusík i uhlík již při desetinovém zastoupení ve slitině citelně zhoršují tvářitelnost, jelikož narůstá pevnost materiálu. Jsou označovány jako nečistoty a mají pevně dané množství, ve kterém se mohou ve slitinách nacházet. [3; 7; 11]

Nejčastěji vznikají titanové slitiny tzv. dvoufázové. Tato struktura se totiž tvoří snadno. Jak již bylo zmíněno výše, poměr fází je dán charakteristikou rovnovážného diagramu, obsahem legujících prvků či podmínkami zpracování. Další důležitou roli hraje také beta stabilizující prvek, kde je rozlišováno, zda má v beta fázi malou či velkou rozpustnost. Výhodou dvoufázových slitin bývá velká pevnost při pokojové teplotě a většinou také dobrá tvářitelnost. Oproti tomu mínusem je malá pevnost při vyšších teplotách. Tyto dvoufázové slitiny bývají také velmi citlivé na tepelné zpracování a nečistoty. Právě kvůli nečistotám se může zvyšovat křehkost materiálu. Eliminovat dopady těchto ω částic, které měří desítky nanometrů, se snaží mnoho vědců. V roce 2014 byl publikován odborný článek, kde jedním z autorů je také v tomto čase studentka doktorského studia RNDr. Jana Šmilauerová z katedry fyziky materiálů MFF UK, jejíž výzkum se právě zabýval těmito drobnými částicemi. Cílem bylo zjistit, proč tyto částice materiál vytvrzují a zároveň zajišťují křehnutí. Důsledkem je jiné uspořádání těchto ω částic, tedy podél krystalografických směrů kubické beta fáze titanu. Poznatky ze studie mohou vést k navrhování a vývoji nových slitin pro velkou škálu aplikací. Dvoufázové slitiny titanu jsou tedy neustále ve vývoji a vědci postupně přichází s různými poznatky, které zdokonalují struktury těchto slitin. Také se proto zkouší různé kombinace prvků s rozpustností v beta fázi. Mezi další nevýhody silně stabilizovaných slitin patří například omezená svařitelnost či jejich malá tepelná stabilita. [3; 9; 14]

Díky navýšení obsahu beta stabilizujících prvků lze posléze dosáhnout složení slitin pouze z této fáze. Tyto typy slitin byly do provozu zavedeny až o mnoho let později než slitiny předešlých fází. Vytvořit totiž samotnou beta fázi při nízké teplotě je mnohem obtížnější. Aby bylo dosaženo přeměny alfa fáze na beta fázi je nutné buďto citelně snížit teplotu fázové přeměny nebo je zapotřebí dosáhnout zpomalení průběhu transformace. Těchto dvou podmínek

lze dosáhnout pomocí přidání velkého obsahu přídavných prvků, případně jejich kombinací. Mezi beta stabilizátory patří například vanad či chrom. K získání beta struktury lze dospět pomocí chlazení či zakalení. Díky přidaným prvkům získávají slitiny vysokou pevnost, ale oproti slitinám v předešlých fázích ztrácí výhodu malé měrné váhy. Beta slitiny jsou velmi náchylné k přítomnosti nečistot, které citelně potlačují stabilitu fáze. [3; 9; 14]

Vědci díky nespočtu množství různých kombinací, množství obsahu přídavných prvků nachází, i v dnešní době mnoho různých slitin titanu, které mohou v budoucnosti nalézt uplatnění v mnoha odvětvích. Například v roce 2017 po cca 4letém vývoji tým Lenky Kunčické a Radima Kocicha z Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské Technické univerzity Ostrava přivedl na svět optimální technologický postup pro výrobu nejpevnější biokompatibilní slitiny titanu na světě. Jedná se o binární slitinu titanu, jenž druhým kovem ve slitině je zirkonium. Specifických vlastností slitina dosáhla díky vyladění optimálního poměru kovů v kombinaci s následným zpracováním. Nejen tento objev tedy slibuje ještě mnohé další nálezy ve světě titanových slitin, které bezesporu další roky přinesou. [3; 14; 15]

2.4 Vlastnosti titanu a jeho slitin

Vlastnosti titanu a jeho slitin lze rozdělit hned do několika skupin. Na fyzikální vlastnosti, mechanické, technologické, chemické, odolnost proti korozi či dalším nežádoucím vnějším účinkům. Díky neupadajícímu výzkumu těchto slitin, dochází i v současnosti například pomocí přidání přídavných prvků do slitin, změny zpracování slitiny aj. k vylepšení jednotlivých vlastností titanových slitin. [3; 9; 11]

Hned několik fyzikálních vlastností titanu lze určit na základě postavení prvku v periodické tabulce (obr. 6), případně díky atomové stavbě či struktuře krystalografické mřížky. Atomové číslo titanu je 22. V Mendělejevově tabulce prvků je zařazen do čtvrté periody prvků. Zde se nachází například také vanad, chrom, železo, nikl či měď. [3; 9; 16]

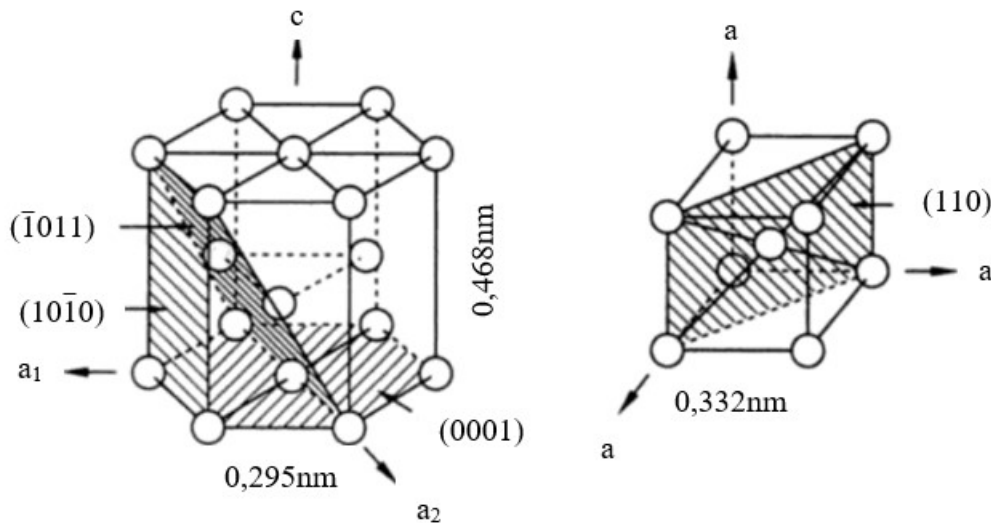
Periodická soustava prvků

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> alkalické kovy kovy alkalických zemin přechodné kovy kovy polokovy nekovy halogeny vzácné plyny </div>									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		III. B	IV. B	V. B	VI. B	VII. B	VIII. B	VIII. B	VIII. B	I. B	II. B
1,0079 1 H 2,20 Vodík	II. A										
6,94 3 Li 0,97 Lithium	9,01 4 Be 1,50 Berylium										
22,99 11 Na 1,00 Sodík	24,31 12 Mg 1,20 Hořčík										
39,10 19 K 0,91 Draslík	40,08 20 Ca 1,00 Vápník	44,96 21 Sc 1,20 Skandium	47,88 22 Ti 1,30 Titan	50,94 23 V 1,50 Vanad	52,00 24 Cr 1,60 Chrom	54,94 25 Mn 1,60 Mangan	55,85 26 Fe 1,60 Železo	58,93 27 Co 1,70 Kobalt	58,69 28 Ni 1,70 Nikl	63,55 29 Cu 1,70 Měď	65,38 30 Zn 1,70 Zinek
85,47 37 Rb 0,89 Rubidium	87,62 38 Sr 0,99 Stroncium	88,91 39 Y 1,10 Yttrium	91,22 40 Zr 1,20 Zirkonium	92,91 41 Nb 1,20 Niobium	95,94 42 Mo 1,30 Molybden	~98 43 Tc 1,40 Technecium	101,07 44 Ru 1,40 Ruthenium	102,91 45 Rh 1,40 Rhodium	106,42 46 Pd 1,30 Palladium	107,87 47 Ag 1,40 Stříbro	112,41 48 Cd 1,50 Kadmium

Obr. 6 Část periodické soustavy prvků včetně umístění titanu [16].

Tento tzv. přechodný kov má oproti ostatním kovům ve stejné periodě menší měrnou váhu a vyšší teplotu tání. Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, titan se vyskytuje ve dvou alotropických modifikacích, první z nich je alfa, která se vytváří do teploty 882 °C. Tato modifikace má hexagonální mřížku s těsně uloženými atomy. Nad výše zmiňovanou teplotou

se nachází beta modifikace, kde se vyskytuje mřížka krychlová, prostorově středěná. Obě mřížky je možné vidět na obrázku 7. [3; 9; 17]



Obr. 7 Krystalové mřížky modifikací titanu HCP α -Ti a BCC β -Ti [17]

Na jednotlivé parametry mřížek mají velký vliv nečistoty, především již zmiňovaný dusík, kyslík, ale také třeba uhlík, tyto prvky ovlivňují také mnoho vlastností. Proto se mnohdy v literatuře uváděné hodnoty například elektrické vodivosti mění v závislosti na čistotě titanu. Obecně lze tedy titan zhodnotit jako materiál odporový, jelikož hodnota vodivosti je velmi malá. S rostoucí teplotou kovu se také zvyšuje magnetická susceptibilita a to až do cca 1100 °C. Bod tání titanu je nejvyšší ze všech běžných kovů, proto se jedná o kov těžce tavitelný. Fyzikální vlastnosti titanu lze zhlédnout v tabulce 3, další poté v tabulce 4. [3; 9; 16]

Tab. 4 Další fyzikální vlastnosti titanu [3].

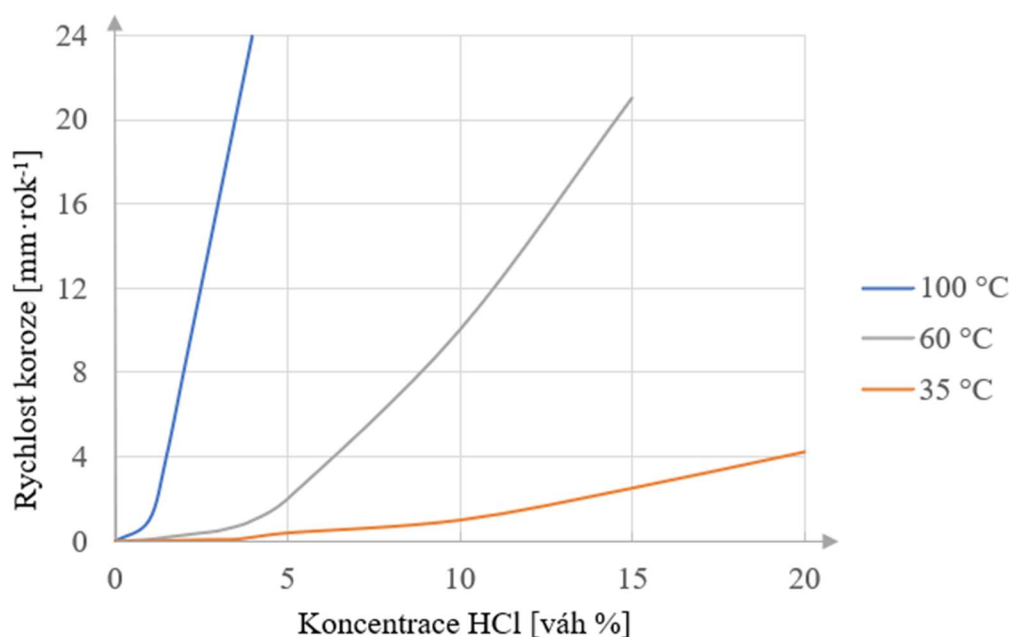
<i>Vlastnost</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
Atomové číslo	22	-
Atomová váha	47,9	-
Atomový poloměr	146,3	pm
Součinitel sálání	0,475	-
Součinitel pohltivosti	3,44	-
Součinitel odrazivosti	57,8	-
Skupenské teplo tání	104	cal·g ⁻¹
Teplota přeměny	882	°C
Teplota vypařování	3027	°C
Skupenské teplo vypařování	112,5	kcal·mol ⁻¹

Největší čistoty titanu se dosahuje u titanu jodidového, případně u titanu rafinovaného elektrolyticky. Na změny mechanických vlastností mají vliv například tyto nečistoty: bór, beryllium, rhenium, hliník. Každý prvek většinou zhoršuje určitou vlastnost. Například vodík vrubovou houževnatost, kyslík zase zvyšuje hodnotu meze pevnosti i kluzu, díky čemuž se zhoršují plastické vlastnosti materiálu. Dusík zvyšuje modul pružnosti a zhoršuje plastické vlastnosti atd. Mechanické vlastnosti však ještě více ovlivňuje rychlost zatěžování. Při velkých rychlostech se primárně zmenšuje pevnost, mez kluzu, a to až o 20 %. Hodnota tvrdosti se v měkkém stavu pohybuje dle čistoty titanu v rozmezí 130 až 240 HB. Titan vykazuje vcelku značnou odolnost proti cyklickému namáhání. Mez únavy u hladkých vzorků bývá větší než 50 % meze pevnosti v tahu. Naopak má titan relativně malou odolnost proti tečení. Při vyšších teplotách ztrácí titan velmi rychle pevnost a již při teplotách nad 300 °C má nižší pevnost než

běžné nízkouhlíkové oceli. Velmi zajímavý je také průběh změny tažnosti a kontrakce. Zprvu jejich hodnota roste a dosahuje maxima okolo teploty 250 °C, poté do cca 500 °C následuje pomalý pokles. Po překonání této hranice následuje prudký nárůst až na hodnoty přes 100 % při teplotě 880 °C. [3; 9; 18]

Technologické vlastnosti titanu jsou neméně tak důležité jako vlastnosti mechanické. Rozhodují o použití a typu zpracování polotovarů. Značným technologickým problémem je u titanu zadírání. Vhodné je proto u titanu uměle vytvořit kysličníkovou vrstvu, případně zvolit nějakou další povrchovou úpravu titanu. U titanu lze zadírání eliminovat téměř nulově pomocí mazadel. Je to z toho důvodu, že povrch titanu má velmi špatnou absorpci molekul běžných maziv. [3; 9; 18]

Z hlediska chemického se jedná o velmi reaktivní kov. Titan je velmi odolný proti korozi, jenž dokonce převyšuje v některých prostředích i speciální korozivzdorné oceli či slitiny. Tato ochrana vzniká díky fyzikálně chemickým pochodům na povrchu materiálu, které probíhají při styku s prostředím a díky nimž na povrchu vzniká ochranná povrchová vrstva. Tloušťka této vrstvy se po delší době ještě navíc zvětšuje. Pouze čtyři anorganické kyseliny mají na čistý titan za standardní teploty korozní účinek. Jedná se o kyselinu chlorovodíkovou, sírovou, fluorovodíkovou a ortofosforečnou. Korozní účinky kyseliny chlorovodíkové při různých teplotách jsou zaznačeny v grafu na obrázku 8. Korozní odolnost lze zvětšit úpravou složení, případně povrchovou úpravou titanu. [3; 9; 18]



Obr. 8 Závislost koroze na koncentraci kyseliny chlorovodíkové [3].

Všechny výše zmíněné vlastnosti se posléze posuzují při výrobě slitin. Vždy je snaha dosáhnout vhodnou kombinaci požadovaných vlastností, které jsou důležité pro využití dané slitiny. Taktéž je důležité uvést informace, zda byl materiál tepelně ovlivněn například rekrytalizačním žíháním, vytvrzením aj. Slitiny titanu se chovají velmi specificky. Slitina Ti-2Cr-2Fe-2Mo, která je středně stabilizovaná dosahuje značné pevnosti, a to i ve vyžíhaném stavu. Dále například slitina Ti-6Al-4V využívána nejdříve v leteckém průmyslu, nyní však i v průmyslu ropném či plynárenském, která i po tepelném zpracování, a to dokonce za různých podmínek pevnosti, se téměř nemění. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších slitin. Dosažení lepších mechanických vlastností je závislé také na průřezu daného polotovaru ze slitiny. Je to primárně důsledek toho, že při ochlazování v průběhu kalení se v průřezu

dosahuje různých rychlostí. Zde je důležité dosáhnout takové rychlosti, aby byla splněna podmínka pro vytvrzování. [3; 9; 19]

Většina titanových slitin je vyvíjena pro specifické podmínky využití. Tedy funkčnost za vyšších teplot, agresivnější prostředí atd. Proto je důležité dbát na jednotlivé zásady. Tedy zda je například slitina stabilní za vyšších teplot, jakou má citlivost na změny při dlouhodobém ohřevu, jakou výrobní technologii prošla, zda byla kována či válcována, za jaké teploty atd. Od plnění všech požadavků se následně také odvíjí cena výrobku. Níže v tabulce 5 lze vidět využití vybraných typů slitin v průmyslu. [3; 9; 19]

Tab. 5 Využití slitin titanu v průmyslu [19].

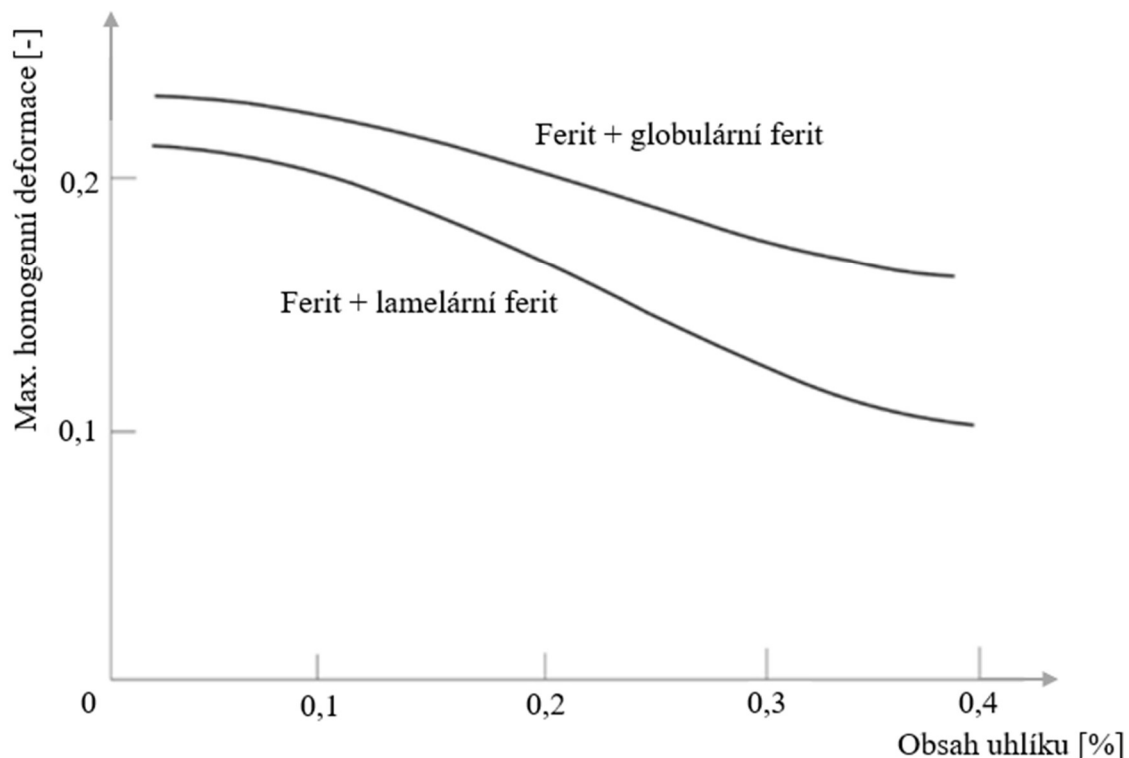
Typ slitiny	Dodávané polotovary	Popis	Použití
Čistý Titan	Tyče, ingoty, plechy, protlačené výlisky, tenké plechy, pásy, dráty, pruty, roury, trubky	Pro protikorozní ochranu v chem. a námoř. průmyslu	
Ti-8Al-1Mo-1V	Tyče, ingoty, plechy, protl. výlisky, tenké plechy, dráty, výkovky	Nízká hustota, výborná svařitelnost, vysoká pevnost	Lopatky plynových turbín
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Tenké plechy, pásy, tyče, ingoty, dráty, výkovky	Vysoká pevnost, tažnost	Do 540 °C; plynové turbíny
Ti-6Al-4V	Tyče, ingoty, pruty, dráty, plechy, pásy, průlisky	Nejrozšířenější slitina Ti; Aplikace do 315 °C	Protézy, implantáty aj.
Ti-6Al-6V-2Sn	Tyče, ingoty, průlisky, plechy, tenké plechy, dráty	Vysoká pevnost do 315 °C	Konstrukce draku letadla
Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo	Tenké plechy, plechy, tyče, ingoty, dráty, roury, průlisky, odlitky	Odolnost proti únavě	Spojovací prvky, zařízení pro geoter. vrty
Ti-10V-2Fe-3Al	Tenké plechy, plechy, tyče, ingoty, dráty, výkovky	Vysoká pevnost a tažnost; Jen do 315 °C	Pro požadavky na homogenní tahové vlast.
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	Tenké plechy, pásy, plechy	Vysoká pevnost, dobrá svařitelnost	Spony, konzoly,
Ti-15Mo-3Al -2,7Nb-0,2Si	Ingoty	Výborná odolnost proti oxidaci do 650°C	Trysky, části kabin letadel

3 TVÁŘITELNOST KOVŮ

Tvářitelnost je charakterizována jako schopnost deformovaného materiálu k trvalé deformaci bez porušení soudržnosti. Na tvářitelnost mají vliv jednak vnější podmínky tváření, ale také např. metalurgické vlastnosti materiálu. [9; 20; 21]

3.1 Materiáloví činitelé

Mezi materiálové činitele lze zařadit chemické složení daného tvářeného materiálu. Tvářitelnost je citelně ovlivněna základními, ale také legujícími prvky. Dále také různými nečistotami, vměstkami či obsahem různých plynů. Nejvyšší hodnotu tvářitelnosti mají nečistější struktury kovů. Opakem jsou materiály s vyšším obsahem legujících prvků, které zvyšují pevnost krystalografické mřížky a díky tomu jsou tyto materiály tvářeny primárně za tepla. Pro tvářitelnost za tepla například ocelí je rozhodující vliv jednotlivých prvků na strukturní stav oceli, rozpustnost v základní strukturní složce, vznik nerozpuštěných příměsí, uzdravování struktury, růst zrn, fázová přeměna či afinita prvků. Dále je možné tvářitelnost u ocelí zlepšit citelným snížením obsahu uhlíku. Čím více uhlíku obsahuje daná struktura, tím narůstá podíl perlitu v perliticko-feritické struktuře. Díky tomu se tvářitelnost v této struktuře snižuje. Velmi důležitou roli při tváření hraje také struktura perlitu. Vhodnějším je bezesporu perlit globulární oproti perlitu lamelárnímu. Před objemovým tvářením se většinou u feriticko-perlitických ocelí aplikuje žihání na měkko, při kterém tedy dochází ke změně typu zrna a zlepšení tvářitelnosti. Obecně lze říct, že všechny aspekty zvyšující přetvárný odbor naopak tvářitelnost snižují. Závislost tvářitelnosti na obsahu uhlíku při struktuře ferit plus lamelární perlit a struktuře ferit plus globulární perlit lze vidět na obrázku 9. [9; 20; 21]



Obr. 9 Závislost tvářitelnosti na obsahu uhlíku [20].

Kromě již zmíněného uhlíku mají na tvářitelnost oceli vliv i další prvky. Například molybden zvyšuje přetvárné odpory což má za následek snížení tvářitelnosti v celé škále teplot. Wolfram zase v materiálu zvyšuje pevnost či snižuje tepelnou vodivost. Pro změnu materiál s vyšším obsahem síry je při vyšších teplotách velmi těžce tvářitelný atd. [3; 20; 21]

U titanu a jeho slitin se kyslík a dusík rozpouští v obou krystalových modifikacích vcelku dobře. U obou prvků stačí i velmi malé poměrové zastoupení k tomu, aby se citelně zvýšila pevnost a tvrdost materiálu. Naopak tyto prvky snižují houževnatost a tažnost. V materiálu také zapříčínují tzv. zkřehnutí. Uhlík, který je hůře rozpustným prvkem v obou fázích titanu při vyšších obsazích než 0,25 % vytváří karbid titanu. Uhlík taktéž zhoršuje svařitelnost materiálu, a proto se ve slitinách titanu udržuje na maximální hodnotě 0,1 %. Jednou z nejčastějších nečistot je železo. Pokud se v titanových strukturách vyskytuje v menších poměrech než 0,1 %, není jeho vliv na vlastnosti slitiny nikterak zásadní. Pokud však ve struktuře zaujímá větší podíl, má na titan a jeho slitiny vliv primárně z hlediska zvýšení pevnosti a tvrdosti. Naopak velmi citelný vliv na strukturu a vlastnosti má vodík. Ten způsobuje ve struktuře titanu a slitin stárnutí materiálu, jehož následkem je pokles vrubové houževnatosti. Nepříznivý vliv má také na zkřehnutí titanu. Zbavit se vodíku ve struktuře lze pomocí žíhání ve vakuu. Z výše zmíněných důvodů se nedoporučuje překročení zastoupení vodíku ve struktuře vyšší než 0,01 %. Mezi další prvek, který ovlivňuje například houževnatost, patří křemík. [3; 20; 27]

Všechny legující prvky tedy ovlivňují vlastnosti a krystalickou mřížku daného materiálu. Neméně důležitou roli hraje také mikro či makrostruktura kovu, orientace a velikost zrn nebo struktura daných složek. Tvářitelnost bude vždy vyšší u monofázových struktur nežli u struktur vícesložkových. Je to dáno primárně tím, že vícesložkové struktury mají rozdílné mechanické vlastnosti jednotlivých složek a také je u těchto systémů omezena rekrytalizační schopnost materiálu. [9; 20; 21]

S tvářitelností jsou spjaté také tepelně aktivované děje, mezi něž patří například zotavení či rekrytalizace. Tyto děje mají značný vliv na deformační schopnost materiálu. Jsou závislé na difúzních pochodech, kdy dochází ke zpevňování, růstu zrn, uzdravovacím procesům aj. Poslední zmiňované se spustí při dosažení teplot tzv. zotavení a rekrytalizace. [9; 20; 21]

Zotavení je tedy charakterizováno přemísťováním, částečnou anihilací dislokací a vznikem sub zrn ve stávajících protažených zrnech. U kovů a slitin s vysokou energií vrstvených chyb je převládajícím mechanismem odpevňovacích procesů tzv. dynamické zotavení. Tento proces při tváření za zvýšené teploty podporují například vyšší teplota, vyšší deformační napětí, vyšší obsah chyb v krystalografické mřížce či vysoká energie vrstvených chyb. [3; 20; 21]

Dalším uzdravovacím procesem je rekrytalizace. Důsledkem je vznik nových zrn, a hlavně úplné odstranění zpevňování. Existují dva typy rekrytalizací. Při statické rekrytalizaci dochází k růstu zrn až do vzájemného styku. Naopak při dynamické rekrytalizaci rostou zrna pouze do určité velikosti, která odpovídá podmínkám velikosti deformace. Dynamická rekrytalizace je dále také hlavním mechanismem odpevňování při tváření kovů s nízkou energií vrstvených chyb. Pro zdárný průběh dynamické rekrytalizace je zapotřebí nízké energie vrstvených chyb, velikost deformace větší než daná kritická hodnota a také vysoká teplota. [3; 20; 21]

3.2 Termomechanické podmínky deformace

Mezi tyto podmínky patří mimo další dvě teplota deformace, která má všeobecně kladný vliv pro navýšení tvářitelnosti, a to až do určité mezní teploty. Pokles za touto mezní teplotou je důsledkem citlivosti daného materiálu k přehřátí, spálení či strukturální nestabilitě. Při růstu teploty dochází k větší rozpustnosti různých příměsí v materiálu, a to primárně na hranicích zrn. Tím se také zrychluje pohyb dislokací. Dochází také k růstu zrn, může dojít k narušení strukturální stability. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, tvářitelnost za zvýšené teploty je ovlivněna dynamickým zotavováním a rekrytalizací. [3; 20; 21]

U titanu a jeho slitin je tvářitelnost při nízkých teplotách mizivá. K citelnějšímu přetvoření dochází výhradně za kovacích teplot. Interval těchto teplot je u titanu a jeho slitin okolo 150 °C. Jestliže dochází k deformaci za tepla, slitiny titanu představují mnohofázový systém s malou

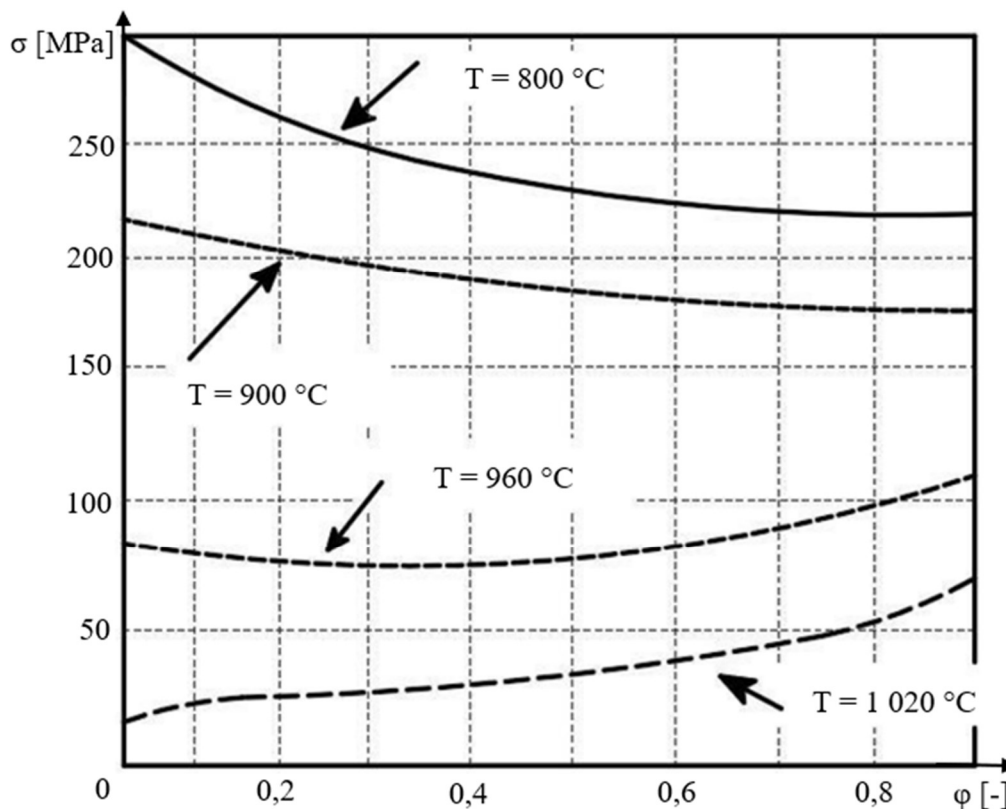
rychlostí rekrytalizace. Chceme-li tedy dosáhnout vyššího stupně deformace, je nezbytné tvářet za vyšších teplot. Při ohřevu je také nutné brát v potaz teplotu polymorfni přeměny z fáze alfa na fázi beta. Tuto teplotu není vhodné překročit z důvodů nárůstu zrna a následných nevyhovujících mechanických vlastností materiálu. Kovací teplota u titanu a jeho slitin bývá dle zastoupení jednotlivých prvků povětšinou od 700 °C do 1000 °C. Pokud je zapotřebí zajistit vhodné mechanické vlastnosti tvářeného materiálu za vyšší teploty, je nutné zařadit do procesu tzv. minimální dobu prodlevy ohřevu na vysoké teplotě. Při ohřevu je tedy vhodné zastavit proces při teplotě cca 650 °C až 700 °C a po prodlevě poté ohřívát na teplotu vyšší. Vliv teploty na přirozený deformační odpor, například u titanové slitiny Ti-6,5Al-3,5Mo-0,2Si, lze vidět na obrázku 10. [3; 20; 21]

Další podmínkou je velikost deformace. Velikost deformace má citelný vliv primárně při deformaci materiálu pod jeho rekrytalizační teplotou. Stupeň deformačního zpevnění narůstá se zvětšující se velikostí deformace. Zpevňování však nelze zcela odstranit nikdy, a to i přes využití dynamického zotavení či rekrytalizace. Ke zlepšení tvářitelnosti mohou pomoci dále například prodlevy mezi jednotlivými deformacemi, kdy nastává čas na tzv. post dynamické odpevňovací procesy. Pozor se však musí dávat také na vznik větších zárodků vad, ale také na stanovení správné doby zmiňované doby prodlevy. [3; 20; 21]

Závislost deformačního odporu na velikost deformace lze vyjádřit i pomocí vztahu [20]:

$$\sigma_{D1} = \sigma_{D0} \cdot \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \right)^n, \quad (3.1)$$

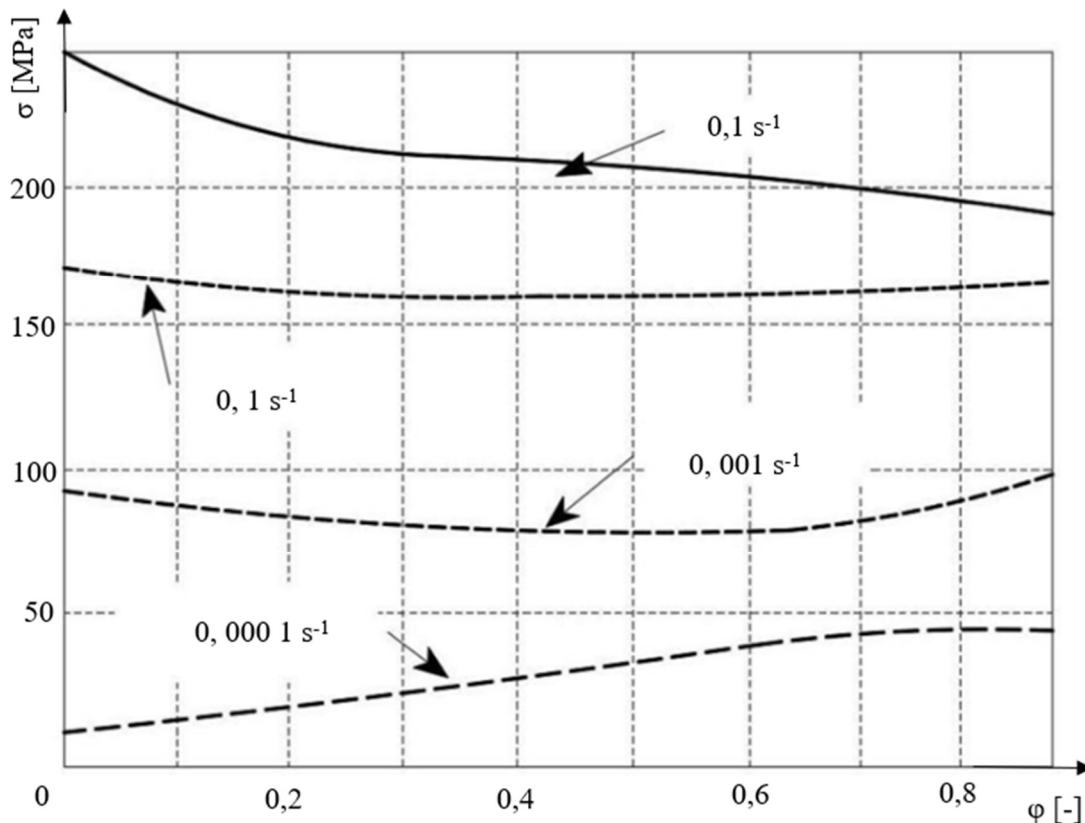
- kde: σ_{D1} - deformační odpor [MPa],
 σ_{D0} - počáteční deformační odpor [MPa],
 ε_1 - velikost deformace [-],
 ε_0 - počáteční velikost deformace [-],
 n - Koeficient deformačního zpevnění [-].



Obr. 10 Vliv teploty na přirozený deformační odpor vybrané titanové slitiny [20].

Třetí podmínkou je rychlost deformace, jejíž růst zpravidla tvářitelnost snižuje a hodnoty deformačních odporů zvyšuje. Relativně menší vliv má změna rychlosti deformace na tvářitelnost při tváření za studena. Tedy až na specifické situace, když se tváří za extrémně velkých rychlostí deformace. U tváření za tepla však tento parametr hraje výraznější roli. Pro určení charakteru vlivu rychlosti deformace na tvářitelnosti se využívá rozhodujících parametrů rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$ a rychlosti v_r , jenž určuje průběh odpevňovacích procesů. Jestliže je při porovnání větší první zmíněná rychlost dochází ke zpevňování. Taktéž roste deformační odpor s rychlostí deformace, oproti tomu ale klesá tvářitelnost. V opačném případě, kdy je rychlost deformace menší než rychlost v_r , dochází k procesu tzv. dynamického odpevňování. Díky tomu klesá hustota dislokací, nedochází ke zpevňování materiálu, zlepšuje se tvářitelnost materiálu či dochází k poklesu deformačního odporu. Správná volba parametrů je velmi důležitá primárně u těžce obrobitelných materiálů mezi, než patří i titan a jeho slitiny. [3; 20; 21]

U titanu a titanových slitin lze snížením rychlosti deformace dosáhnout výrazně lepší plastičnosti. Díky tomu je možné dosáhnout nejen rovnoměrné deformace, ale také kvalitní a homogenní struktury tvářeného materiálu. Pro názornost lze vidět na obrázku 11, závislost vlivu rychlosti deformace na přirozený deformační odpor u vybrané titanové slitiny Ti-6,5Al-3,5Mo-0,2Si. [3; 20; 21]



Obr. 11 Vliv rychlosti deformace na přirozený deformační odpor vybrané titanové slitiny [20].

Vztah pro určení vlivu rychlosti deformace na hodnotu deformačního odporu [20]:

$$\sigma_{D1} = \sigma_{D0} \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_0} \right)^m, \quad (3.2)$$

- kde: σ_{D1} - deformační odpor [MPa],
 σ_{D0} - počáteční deformační odpor [MPa],
 $\dot{\epsilon}_1$ - rychlost deformace [s^{-1}],
 $\dot{\epsilon}_0$ - počáteční rychlost deformace [s^{-1}],
 m - koeficient rychlostní citlivosti deformace [-].

3.3 Stav napjatosti

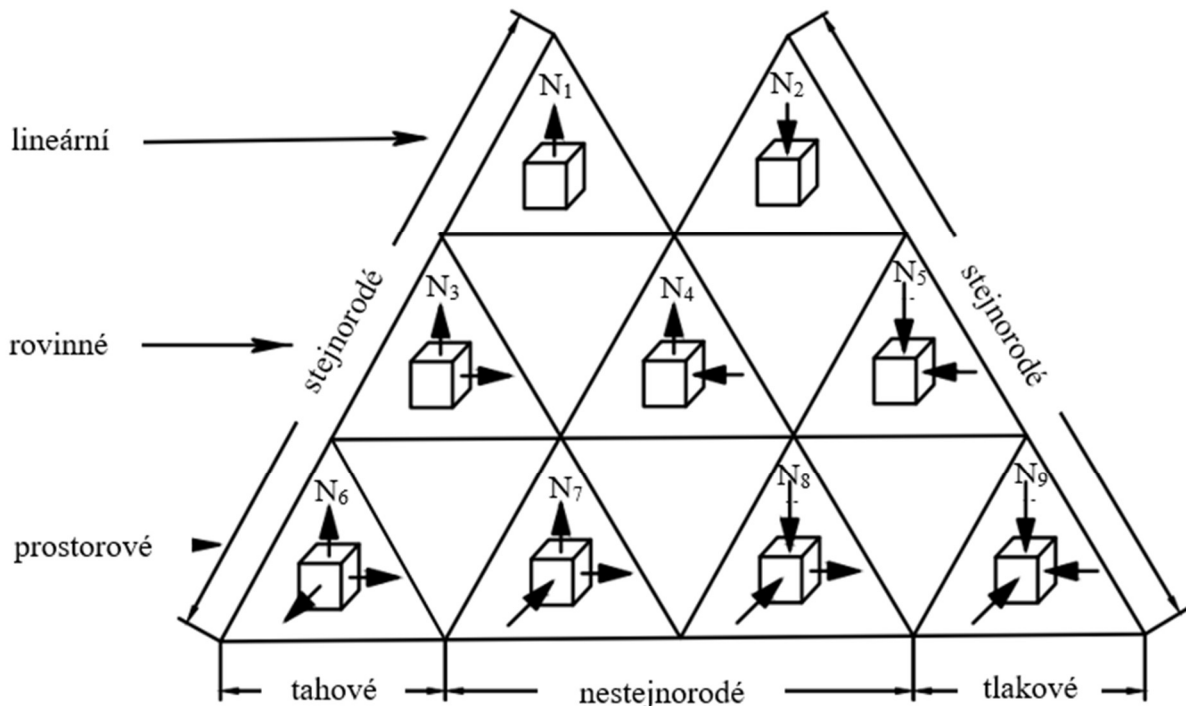
Znázorňuje přítomnost, smysl a velikost hlavních normálových napětí vyskytujících se v tvářeném tělese. Pro názornost je těleso nahrazeno krychlí, kde z jednotlivých stěn vychází tzv. vektory hlavních normálových napětí. Šipky neboli směry zároveň vyjadřují smysl napětí. Obecně existuje 9 možných schémat hlavních napětí, jež jsou znázorněny na obrázku 12. V praxi se však některé schémata prakticky nevyskytují. Jedná se například o jednoosou napjatost. [20; 21; 22]

Obecně lze říct, že s počtem tlakových napětí tvářitelnost materiálu vzrůstá. Opakem je tomu při navýšení počtu tahových napětí. Tvářitelnost materiálu bude tedy nejvyšší, pokud budou všechny složky napětí tlakové. Všechny reálné tvářecí operace však leží mezi zmíněnými extrémy. [20; 21; 22]

Vliv stavu napjatosti na tvářitelnosti lze vyjádřit pomocí koeficientu β_x dle vztahu [20]:

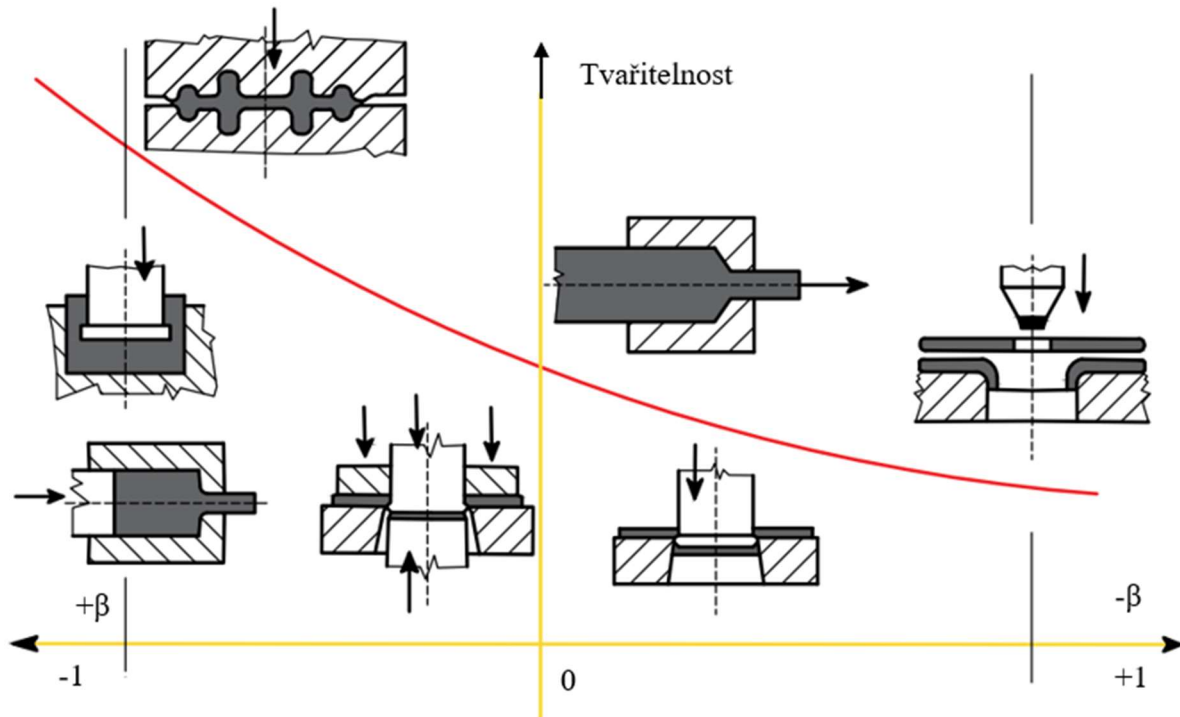
$$\beta_x = \frac{3 \cdot \sigma_S}{\sigma_p}, \quad (3.3)$$

kde: σ_S - skutečné napětí [MPa],
 σ_p - přirozený deformační odpor [MPa].



Obr.12 Schémata hlavních napětí a deformace [22].

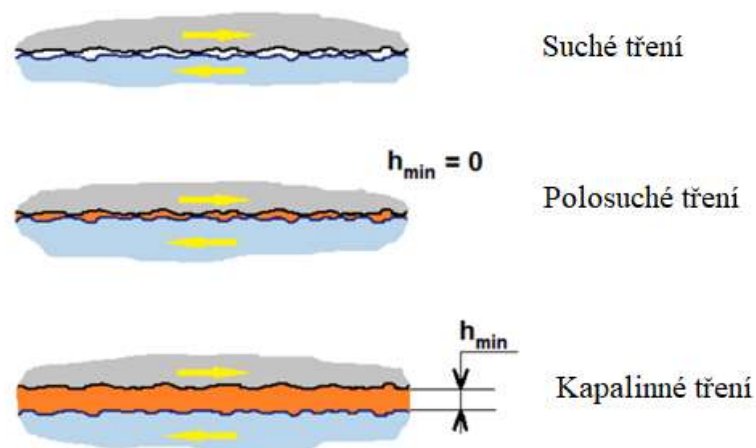
Tento koeficient nabývá hodnoty pro tahovou zkoušku $\beta_x = 1$, pro zkoušku tlakovou $\beta_x = -1$, pro zkoušku krutem poté hodnoty $\beta_x = 0$. Tvářitelnost je nejvyšší pro tlakovou zkoušku a postupně klesá až k hodnotě beta pro zkoušku tahovou, viz obrázek 13. Při působení všestranného tlaku dochází k zvýšení tvářitelnosti v důsledku tzv. zalečování mikropórů. Při většině tvářecích procesů vznikají i složky tahových napětí. Všestranné tlakové napjatosti, lze dosáhnout pouze za pomoci hydrostatického tlaku. [20; 21; 22]



Obr. 13: Závislost tvařitelnosti na stavu napjatosti [20].

3.4 Technologické podmínky

Mezi další faktory, které ovlivňují tvařitelnost materiálu patří také technologické podmínky zpracování. Mezi ně se řadí například vnější tření na stykové ploše, geometrie tvářecího procesu, nerovnoměrnost deformace, tepelně časový a deformační průběh zpracování, nebo skutečnost, zda se jedná o spojitý či přerušovaný způsob deformace. Největší vliv z výše zmíněných má první zmíněné tření. Při tváření mohou vznikat tři typy tření (obr. 14). První je charakterizováno vznikem přímého kontaktu mezi nástrojem a deformovaným materiálem. Jedná se o tzv. suché tření. Druhou variantou je tření s uplatněním viskózně plastického účinku maziva. Toto mazivo vytvoří celistvou vrstvu na pracovních plochách nástrojů. Třetí variantou je tření s uplatněním hydromechanického účinku maziva. Při využití například této poslední varianty bývá odpor nepatrný, vznikající pouze v důsledku samotného vnitřního odporu použité viskózní kapaliny. [20; 21; 22]



Obr. 14 Schéma suchého, polosuchého a kapalinného tření [23].

Nejčastěji se u tvářecích pochodů vyskytuje tření tzv. polosuché. Jeden z důvodů je například ten, že plochy, které budou mít mezi sebou kontakt nejsou dokonale hladké, a navíc velké deformační tlaky mohou způsobit rozrušení souvislé vrstvy maziva. Velikost součinitele tření, který například u suchého tření nabývá hodnot v rozmezí od 0,4 až po 0,55, závisí na stupni drsnosti dotykových ploch, tvářeném kovu, možné oxidaci kovu při tváření za tepla, chemickému složení, kvalitě povrchu daného kovu, podmínkách deformace, měrném tlaku na stykových plochách, teplotě při procesu, typu použitého maziva aj. [20; 21; 22]

Při stejných podmínkách tváření je u titanu a jeho slitin oproti oceli velmi výrazný vliv tření. Při objemovém tváření dochází k pohybu velkého objemu materiálu a díky tomu vzniká nebezpečí svaření titanové slitiny s nástrojem. Pro snížení součinitele tření, a tedy i nebezpečí následného navařování materiálu na nástroj je proto důležité, zajistit vhodný režim deformace. Taktéž vhodně zvolit či zkonstruovat nástroj a v neposlední řadě také zvolit správné mazivo. Mnoho typů mazadel totiž pro tváření titanových slitin není vhodných. Mezi vhodná mazadla patří například ta na bázi skla. Tato maziva citelně snižují součinitel tření, jsou tepelným izolantem, ale současně také chrání povrch materiálu před stykem s okolní atmosférou. [20; 21]

3.5 Hodnocení tvářitelnosti

Tvářitelnost lze hodnotit na základě zkoušek, anebo velikosti přirozeného přetvárného odporu. Zkoušky lze rozdělit na mechanické, mezi které patří zkouška tahem, tlakem či krutem, nebo na zkoušky napodobující jednotlivé technologie tváření, tedy tzv. technologické. Po vyhodnocení těchto zkoušek tvářitelnosti se výsledky aplikují jednak pro technologické účely, ale také pro získání informací z odvětví metalurgicko-fyzikálních dějů. Mezi technologické účely patří například stanovení dovoleného stupně deformace, optimální teploty tváření, určení termomechanických či technologických podmínek pro tváření nebo stanovení přetvárných odporů. Mezi metalurgicko-fyzikální děje patří zase například mechanismus a kinetika zpevňování, uzdravovacích procesů, vliv deformace na tepelně aktivované děje, mezi které patří například precipitace či fázové přeměny. [20; 21; 22]

Pro výše zmíněné zkoušky lze využít univerzálních zkušebních strojů, nebo tzv. plastometrů. Ty slouží k výzkumu plastické deformace materiálu při daných podmínkách, tedy například teplotě, stavu napjatosti, rozměrech atd. Plastometry lze rozdělit do několika typů. Na vačkové, torzní, úderové či stroje na zkoušení tvářitelnosti plechů. [20; 21; 22]

Vačkové plastometry nachází využití při určení deformačních odporů za podmínky konstantní deformační rychlosti, kterou zajišťuje vačka. Na principu zkoušky krutem fungují torzní plastometry. Finální tvářitelnost je zde zjištěna dle počtu krutů, které vydrží zkušební tyč, než nastane její porušení. Deformační odpory a tvářitelnost při podmínkách dynamického tváření se získávají pomocí úderových plastometrů. Poslední zmíněný typ plastometru je využíván například pro hodnocení hlubokotažnosti. [20; 21; 22]

Zkouška tahem je dána normou, a tedy všechny parametry nejen zkoušeného materiálu musí být striktně dodrženy. Jedná se o jednoduchou zkoušku, jejíž průběh není ovlivněn vnějším třením. Po zahájení zkoušky je vzorek ve tvaru tyče, nebo pásu plechu natahován až do vzniku krčku a následného přetržení. Celý průběh zkoušky se poté vyhodnocuje, určuje se například velikost a rozložení napětí v krčku, jeho geometrický tvar. Získávají se také další ukazatele tvářitelnosti, jako například tažnost, kontrakce, mez kluzu, jenž je limitní hodnotou pro vznik plastických deformací či mez pevnosti. [20; 21; 22; 24] Tažnost lze vypočítat podle vzorce 3.4., a kontrakci zase dle vzorce 3.5. [24]:

$$A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100, \quad (3.4)$$

kde: L_1 - délka vzorku po přetržení [mm],
 L_0 - počáteční délka vzorku [mm].

$$Z = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100, \quad (3.5)$$

kde: S_1 - konečná plocha průřezu vzorku po zkoušce [mm],
 S_0 - počáteční plocha průřezu vzorku [mm].

Důležitým ukazatelem tváritelnosti je i exponent deformačního zpevnění n , pomocí něhož se vyjadřuje schopnost materiálu ke zpevnění při deformaci. Exponent vychází z aproximačních rovnic pro matematické vyjádření křivky z diagramů závislosti napětí na deformaci. Tento diagram vzniká z hodnot naměřených během tahové zkoušky. Jedná se o závislost síly na prodloužení. [20; 21; 22]

V literatuře lze najít celou řadu aproximačních rovnic, které vyjadřují matematicky křivku diagramu [20]. Pro praktické využití se však nejvíce hodí tzv. Ludwigův exponenciální vztah [20]:

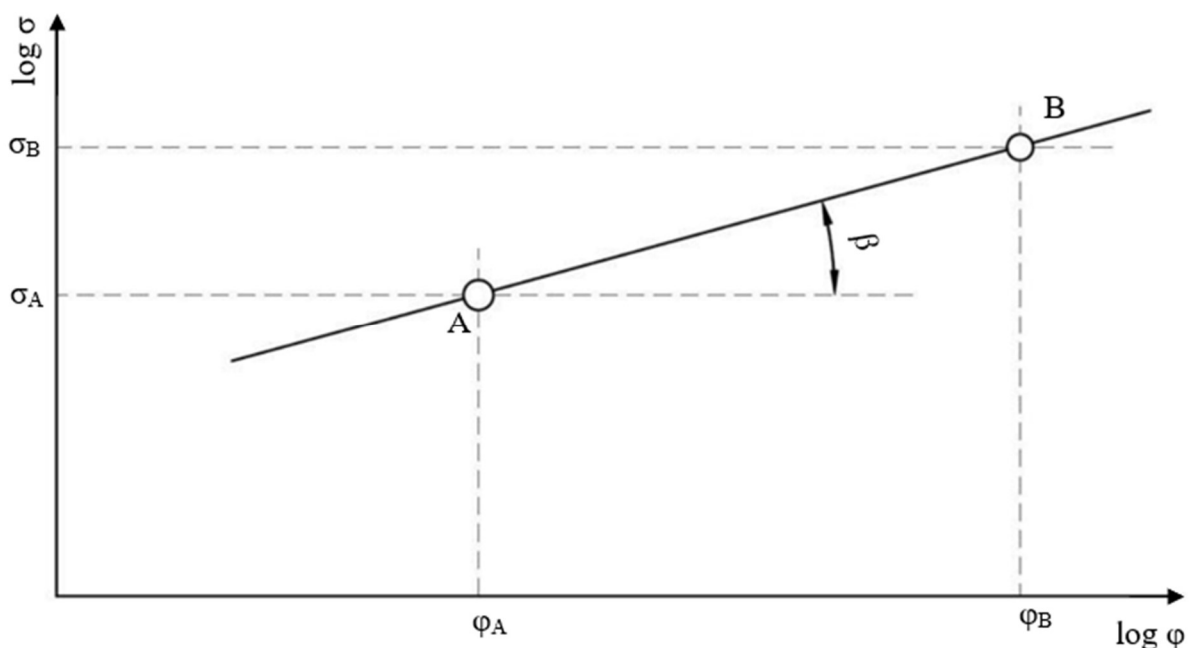
$$\sigma = c \cdot \varphi^n, \quad (3.6)$$

kde: c - materiálová konstanta [-],
 φ - deformace [MPa].

Exponent deformačního zpevnění ukazuje rychlost deformačního zpevnění. Čím větší bude hodnota tohoto experimentu, tím větší bude odolnost daného materiálu proti lokálnímu zúžení. Díky tomu bude také rovnoměrněji rozložena plastická deformace při nehomogenní rovinné napjatosti. [20; 21; 22]

Využití exponentu je například pro výpočty v procesu hlubokého tažení. Velikost exponentu lze stanovit pomocí tzv. dvoubodové nebo vícebodové metody. Dvoubodová metoda, jejíž princip je vyobrazen na obrázku 15, vychází ze základní aproximační rovnice, která je následně logaritmována. [20; 21; 22] Rovnice má pak tvar [20]:

$$\log \sigma = \log c + n \cdot \log \varphi. \quad (3.7)$$



Obr. 15 Princip dvoubodové metody určení deformačního exponentu zpevnění [20].

Zlogaritmovaná rovnice pak představuje rovnici přímky o směrnici n . [20] Exponent deformačního zpevnění lze určit [20]:

$$n = \operatorname{tg} \beta, \quad (3.8)$$

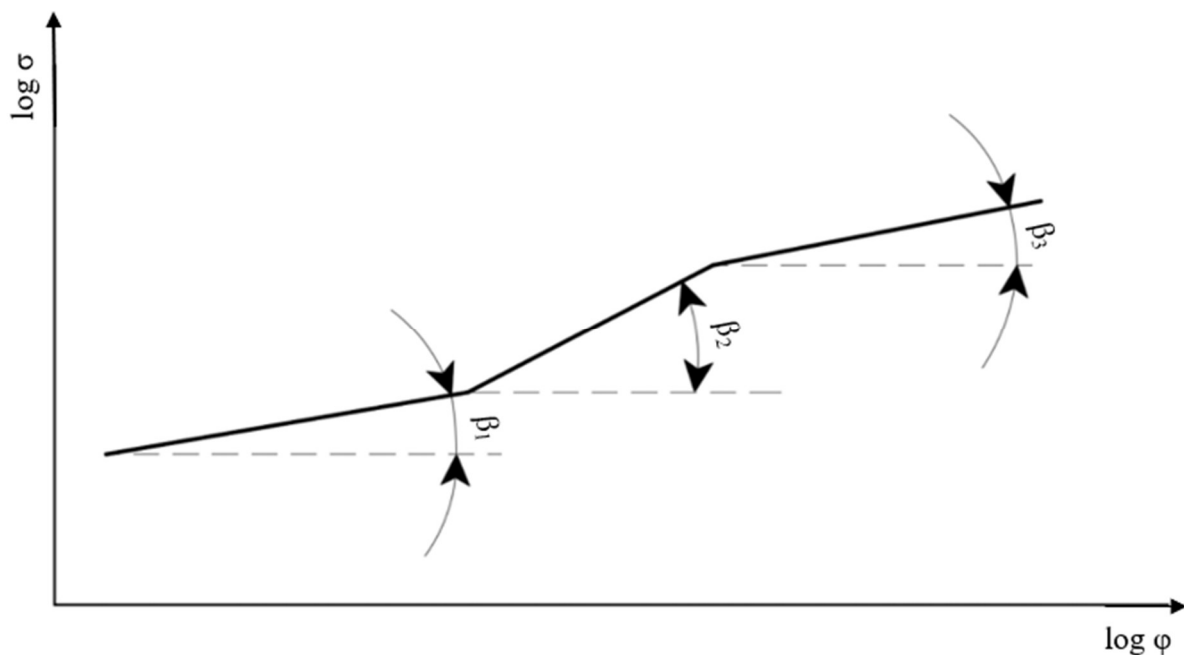
kde: β - úhel sevřený mezi přímkou a osou x diagramu (obr. 15) [°].

Při zjišťování exponentu je důležité brát v potaz směr, ve kterém je zjišťován, a to vzhledem ke směru válcování. Z tohoto důvodu je nutné určovat koeficient ve směrech, které svírají úhel 0° , 45° či 90° . Koeficient deformačního zpevnění lze zjistit také analyticky. [20; 21; 22] V tomto případě se využívá vztahu [20]:

$$n = \frac{\log \sigma_B - \log \sigma_A}{\log \varphi_B - \log \varphi_A}, \quad (3.9)$$

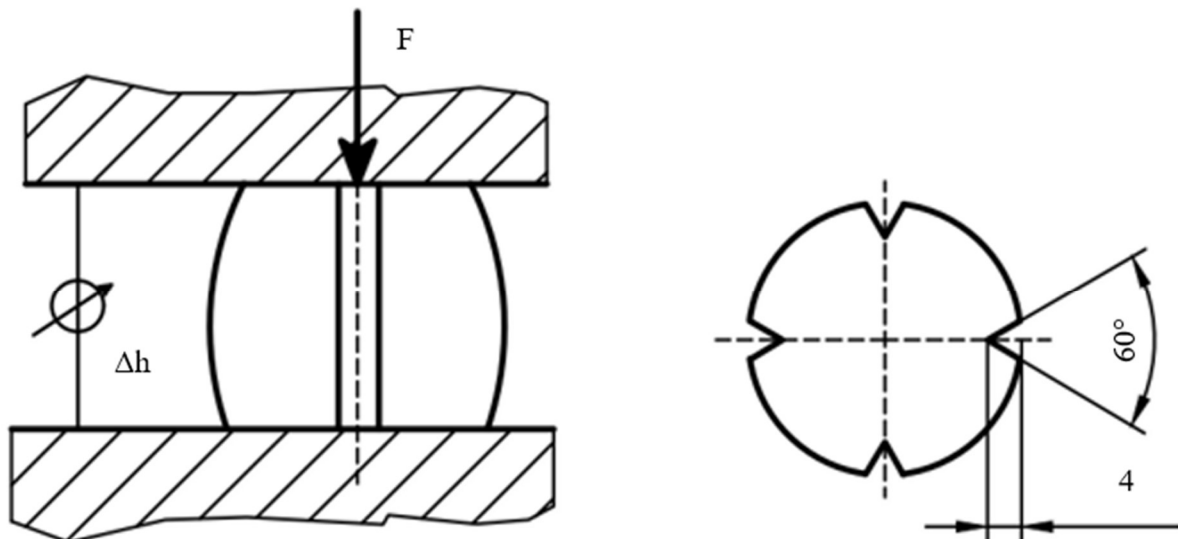
kde: σ - napětí v daném bodě [MPa],
 φ - deformace v daném bodě [MPa].

Jestliže se exponent deformačního zpevnění zjišťuje dle metody vícebodové, někdy také nazývané full curve, bere se v potaz, že exponent není konstantou. Zobrazení se provádí poté v celém intervalu deformace. Vícebodová metoda (obr. 16) bývá využívána pro zjištění exponentu při zkoušce tahem ve více bodech. [20; 21; 22; 24]



Obr. 16 Vícebodová metoda určení deformačního exponentu zpevnění [20].

Tlaková zkouška je stejně jako tahová dána normou. Zkouška spočívá v tom, že zkušební vzorek ve tvaru válečku je pěchován. Ve vzorku vzniká trojosá napjatost. Při pěchování vzniká tření mezi vzorkem a pěchovací čelistí, což má za následek nerovnoměrnou deformaci. Ta je závislá na výšce, respektive průměru vzorku. Již zmíněné tření je během zkoušky nežádoucí, proto je snaha ho eliminovat pomocí použití vhodných maziv, které jsou nanášena na stykové plochy. Výsledkem zkoušky, a tedy ukazatelem tvárnosti je poměr spěchované výšky vzorku v okamžiku vzniku trhliny s výškou vzorku před samotnou zkouškou. U velmi dobře tvárných materiálů se však těchto prasklinek dosahuje velmi těžší, proto se na vzorku vytváří před samotnou zkouškou tzv. vruby (obr. 17). [20; 21; 22; 24]



Obr. 17 Pěchovací zkouška se vzorkem s vruby [20].

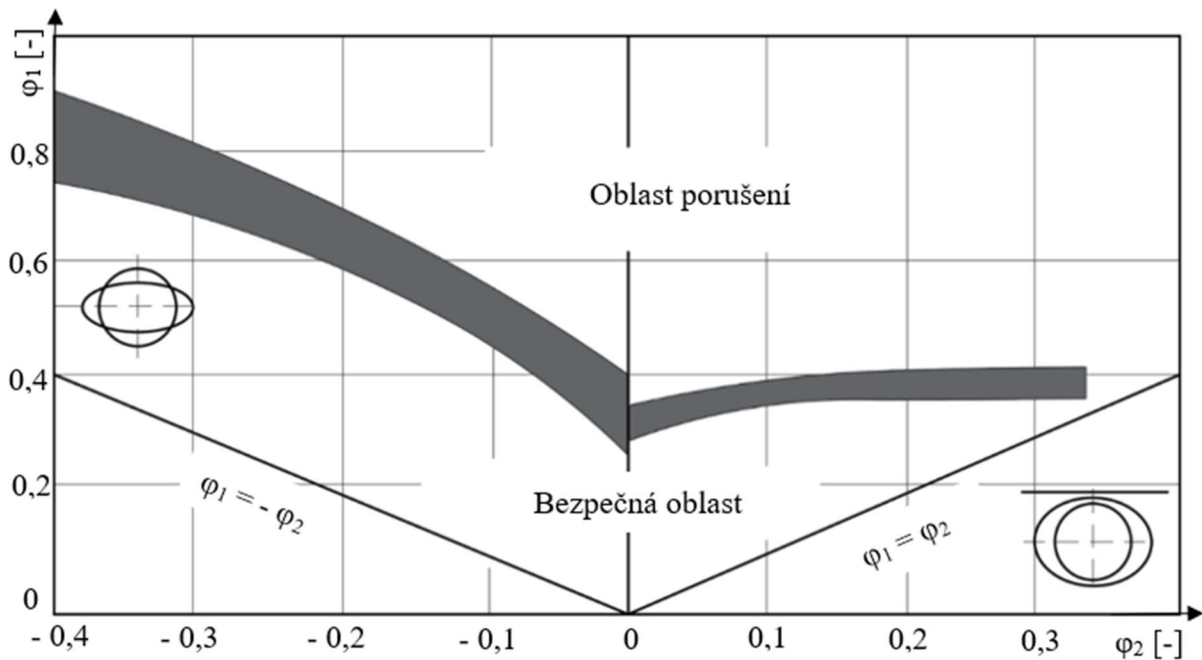
Poslední mechanickou zkouškou je zkouška krutem. Jedná se o nejuniverzálnější zkoušku tvárnosti. Využívá se primárně za tepla. Mezi zkušební parametry patří kroutící moment a počet otáček, než se tyč poruší. Jeden konec zkušební tyče je během procesu upnut do pevné čelisti. Druhý konec zkušební tyče je upnut do čelisti otočné. Výsledky zkoušky se průběžně zakreslují do diagramů. [20; 21; 22]

Napodobující neboli technologické zkoušky určují ty ukazatele tvárnosti, které jsou využity k vzájemnému porovnání tvárnosti s danou tvářecí technologií. Existuje spousta zkoušek, ať již normovaných či nikoli. Lze je rozdělit dle využití pro plošné či objemové tváření. Mezi zkoušky využívané v technologiích plošného tváření patří například zkouška hloubením, rozšiřováním otvoru, kalíškovací, ohybem či střídavým ohybem. Mezi zkoušky tvárnosti využívané v technologiích objemového tváření patří zase například zkouška válcováním, rozkováním, rozháněním či rozštěpením. Všechny tyto zkoušky se provádí vždy do momentu, kdy v materiálu dojde k vzniku trhlin či lomu. [20; 21; 22]

3.5.1 Limitní diagramy

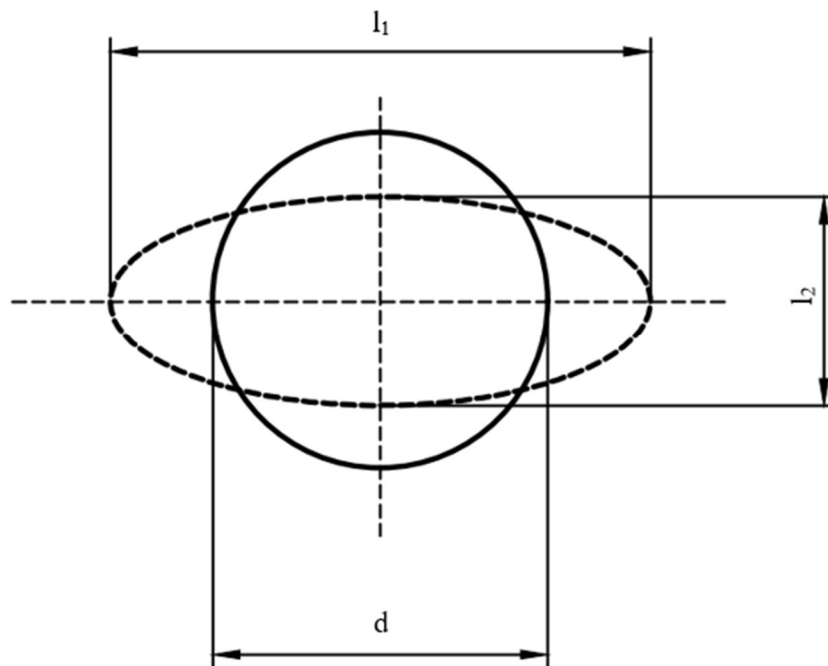
Pro samotnou praxi jsou používány tři základní typy limitních diagramů. Jsou to Keeler-Goodwinův diagram (obr. 18), Diagram mezní plastičnosti a Diagram mezního stupně přetvoření. Využití těchto diagramů k určení tvárnosti vychází z toho, že mezní stupeň deformace je závislý nejen na fyzikálních vlastnostech, ale také na stavu napjatosti. Limitní diagramy nachází využití k hodnocení technologické tvárnosti plechů, dále také k předpovězení výskytu defektů nebo také korekci technologických tvářecích postupů. Limitní diagramy lze získat buďto matematicky nebo experimentálně. Druhá možnost funguje na základě volby vybraných zkoušek, mezi které patří například tahová zkouška s tyčemi proměnných tvarů, tažení polotovaru pomocí různých tvarů tažníků atd. [20; 21; 22]

Pro vyhodnocení deformačních procesů v materiálu se využívá simulací, případně deformačních sítí nanášených na tvářený plech. Pokud se využívá druhé metody, je průběh následující. Měrná síť s tvary pravidelných obrazců je aplikována na povrch polotovaru. Jakmile dochází k deformaci plechu během samotného tváření, dochází také k deformaci nanesené sítě. Po ukončení tváření se pak porovnává síť deformovaná, se sítí nanesenou před tvářením a z rozdílu se určí velikost deformace. [20; 21; 22]



Obr. 18 Keeler – Goodwinův diagram [20].

Sítě mohou být různých typů. Ať už ve tvaru čtverců nebo nejčastěji kružnic, které mohou být různých průměrů či různě seskládány. Hojně je využívána síť s kružnicí o průměru 2 až 20 mm. Tyto kružnice se během tváření mění v elipsy (obr. 19). Osy těchto elips pak následně určují velikost i směr maximální či minimální deformace. [20; 21; 22]



Obr. 19 Změna tvaru kružnicového oka [20].

Použití těchto sítí tedy slouží k proměření deformace v libovolném místě tvářeného plechu. Díky tomu lze stanovit například kritickou hodnotu přetvoření, kterou lze následně využít ke stanovení či sestavení limitního diagramu. Dále také lze zjistit napěťový stav ve kterémkoli místě plechu, stanovit ukazatele tvářitelnosti či také zjistit místo potenciálního vzniku trhliny. [20; 21; 22]

3.6 Stanovení velikosti přirozeného přetvárného odporu

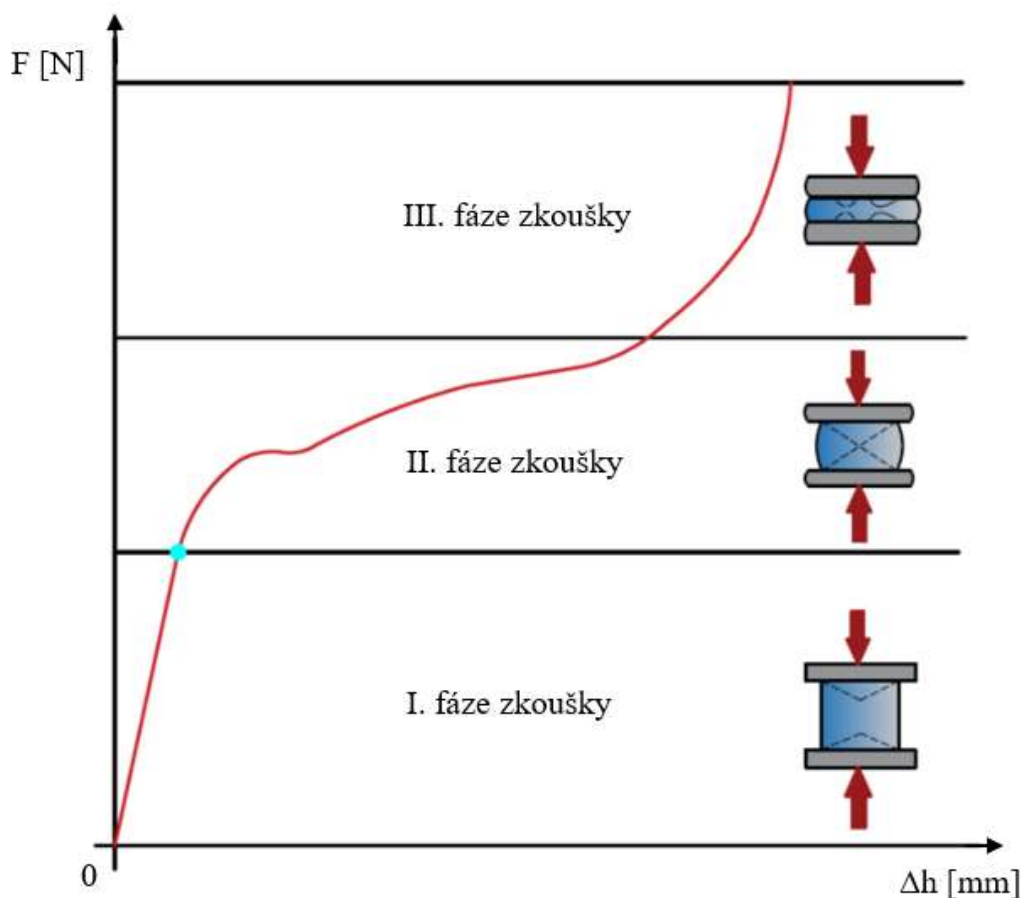
Pro stanovení přirozeného přetvárného odporu se využívá pēchovací zkouška. Jedná se o jednu ze základních operací objemového tváření. Napětí, která vznikají během zkoušky v pēchovaném tělese, jsou totožná s napětími, které vznikají při technologickém zpracování jako například válcování, lisování či kování. [25; 26; 27]

Průběh pēchování lze rozdělit do třech fází. Během první fáze dochází k prudkému nárůstu síly. Nedochází však při tom k deformaci vzorku. Materiál se v této fázi chová pružně. Jakmile dojde k překročení zatížení, které je vyobrazeno modrou tečkou v obrázku 20, křivka se postupně zlomí a dochází k poklesu nárůstu tlakové síly. Tato fáze je označena jako druhá a dochází v ní k tzv. soudečkovitosti výchozího válcového polotovaru. V poslední, třetí fázi, dochází k většímu nárůstu tlakové síly. Zkušební vzorek je stlačován již o menší vzdálenost oproti druhé fázi. U houževnatých materiálů dochází k takovému nárůstu síly, že musí být následně zkouška ukončena. U materiálů křehkých, dojde v určitém momentu k lomu. Všechny tři fáze jsou vyobrazeny na pracovním diagramu na obrázku 20. [25; 26; 27]

Velikost plastické deformace tělesa lze určit pomocí logaritmických deformací. Součet těchto deformací ve všech třech směrech je roven nule. [25; 26; 27] Velikost logaritmické deformace lze pro pēchování vypočítat dle vzorce [26]:

$$\varphi = \ln \frac{h_1}{h_0}, \quad (3.10)$$

kde: h_1 - výška vzorku po pēchování [mm],
 h_0 - výška vzorku před pēchováním [mm].



Obr. 20 Fáze pēchovací zkoušky [25].

Polotovár se během pēchování musí deformovat rovnoměrně, tak aby docházelo ke vzniku symetrické soudečkovitosti. Při pēchování válcových vzorků je doporučeno dodržovat poměr mezi výškou a průměrem výchozího polotovaru v rozmezí od 1,5 až do 2,5. V případě, že by nebylo toto doporučení dodrženo, může dojít ke ztrátě vzpěrné stability. V materiálu tak může dojít ke vzniku tzv. přeložek. [25; 26; 27]

Průběh pēchování je z velké části ovlivněn také třením, které má konec konců vliv na určení samotných přetvárných odporů a deformací. Toto tření lze eliminovat použitím vhodných materiálů, maziva či vhodné úpravy tvárečích ploch. Pēchovací zkoušku lze tedy také rozdělit dle toho, zda se tření zanedbává či nikoli. V prvním případě vzniká ideální schéma napětí, v případě druhém pro změnu vzniká díky tření trojosá napjatost a prostorový stav deformace. Deformační odpory či průběhy napětí lze řešit dle přístupu podle Siebela nebo Unksova. Deformační přetvárný odpor je ovlivněn již zmiňovaným třením, ale také geometrií nástroje, teplotními podmínkami během zkoušky, napjatosti či její případné nerovnosti a také rychlostí deformace. [25; 26; 27]

3.6.1 Řešení dle Siebela

Při pēchování rotačně symetrického tělesa mezi dvěma rovnoběžnými rovinami je těleso přetvářeno v celém svém objemu. Proto musí být podmínka plasticity maximálních smykových napětí τ_{\max} splněna i na jeho stykových plochách. Taktéž lze konstatovat, že napětí σ_r a σ_t jsou si rovna. [25; 26; 27] Z podmínky rovnováhy sil lze tedy po vzetí předešlé úvahy a zanedbání malého počtu součinitelů diferenciálů po několika úpravách získat diferenciální rovnici rovnováhy ve tvaru [27]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2 \cdot \tau_f}{h} = 0, \quad (3.11)$$

kde: σ_r - napětí v radiálním směru [MPa],
 τ_f - třecí smykové napětí [MPa],
 r - poloměr [mm],
 h - vztažná výška vzorku [mm].

Jestliže se rovnice, jenž splňuje podmínku plasticity τ_{\max} , výše zderivuje dle souřadnice poloměru r lze obdržet alternativní rovnici ve tvaru [27]:

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2 \cdot \tau_f}{h} = 0, \quad (3.12)$$

kde: σ_z - napětí ve směru osy Z [MPa].

Pro doplnění je níže uveden také vztah pro podmínku plasticity maximálních stykových napětí τ_{\max} [27]:

$$\sigma_p = \sigma_r - \sigma_z. \quad (3.13)$$

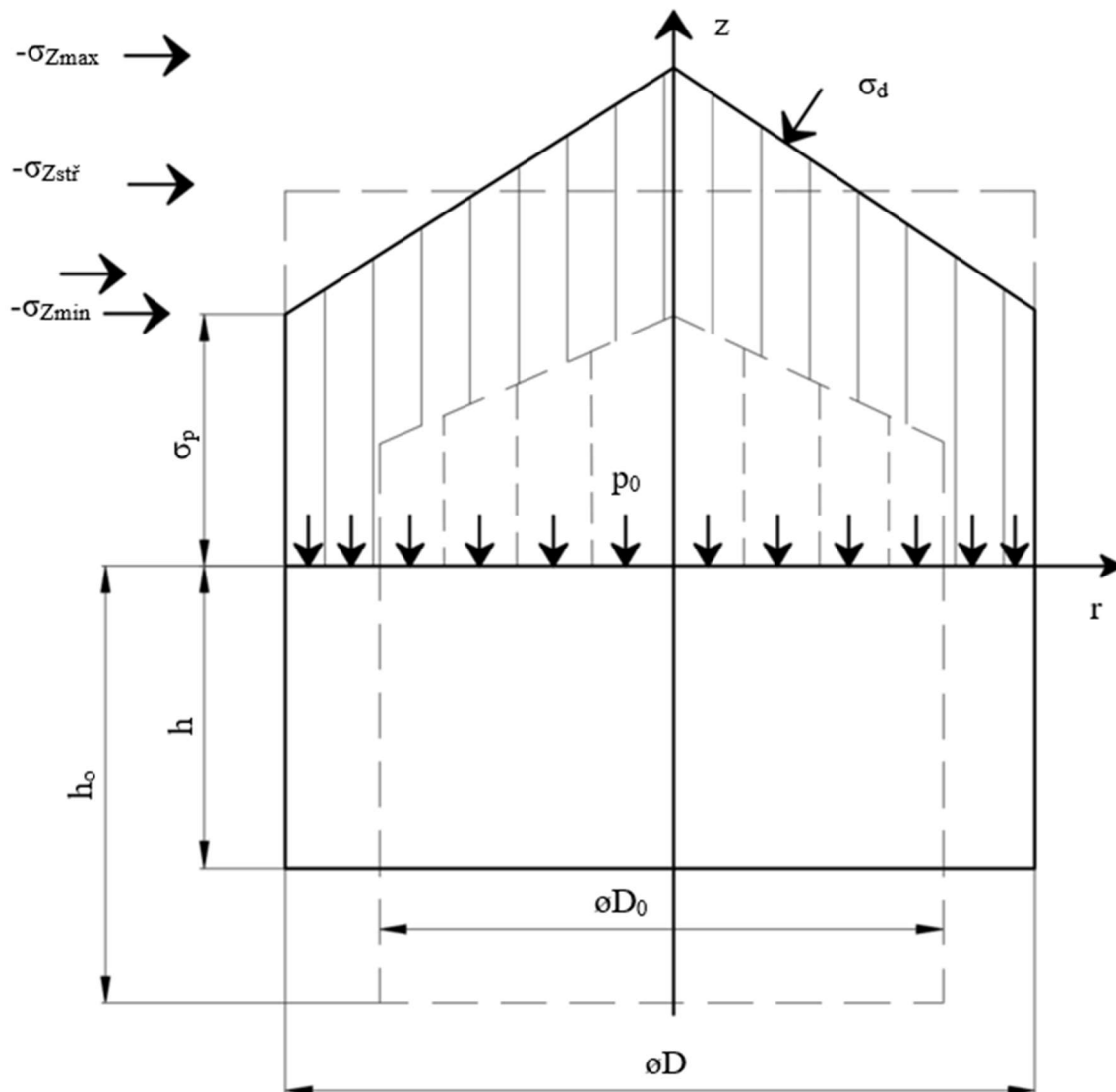
Řešení podle Siebela (obr. 21) je definováno z integrace rovnice (3.12). Avšak je nutné splnit dva předpoklady. Prvním z nich je skutečnost, že smykové kontaktní napětí je určeno dle Coulombova zákona tření. Druhou podmínkou je neměnnost normálového napětí σ_z po celé výšce pēchovaného tělesa. [25; 26; 27]

Naopak mezi proměnné veličiny patří tvárečí tlak nebo přetvárné odpory. Na obrázku 21 lze vidět rozložení napětí dle Siebela vzhledem ke zpēchované výšce polotovaru. Deformační odpor při pēchování dle modelu Siebel se získá z podmínky plasticity. Konečný vztah je v literaturách uváděn v mnoha verzích pro různé hodnoty tření nebo také vzhledem k poměru mezi výškou a průměrem polotovaru. Například pro hodnotu poměru výšky k průměru v rozmezí od 0,7 po

l se střední hodnoty součinitele tření volí pro pěchování za studena od do nebo rovno 0,15. Při využití tváření za tepla se volí součinitel tření z rozmezí od 0,35 po 0,5. [25; 26; 27] Finální obecný Siebelův vztah pro výpočet deformačního odporu je [27]:

$$\sigma_d = -\sigma_{Zs} = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot d}{h}\right), \quad (3.14)$$

kde: σ_{Zs} - střední osové napětí [MPa],
 σ_p - přirozený přetvárný odpor [MPa],
 f - součinitel tření [-].

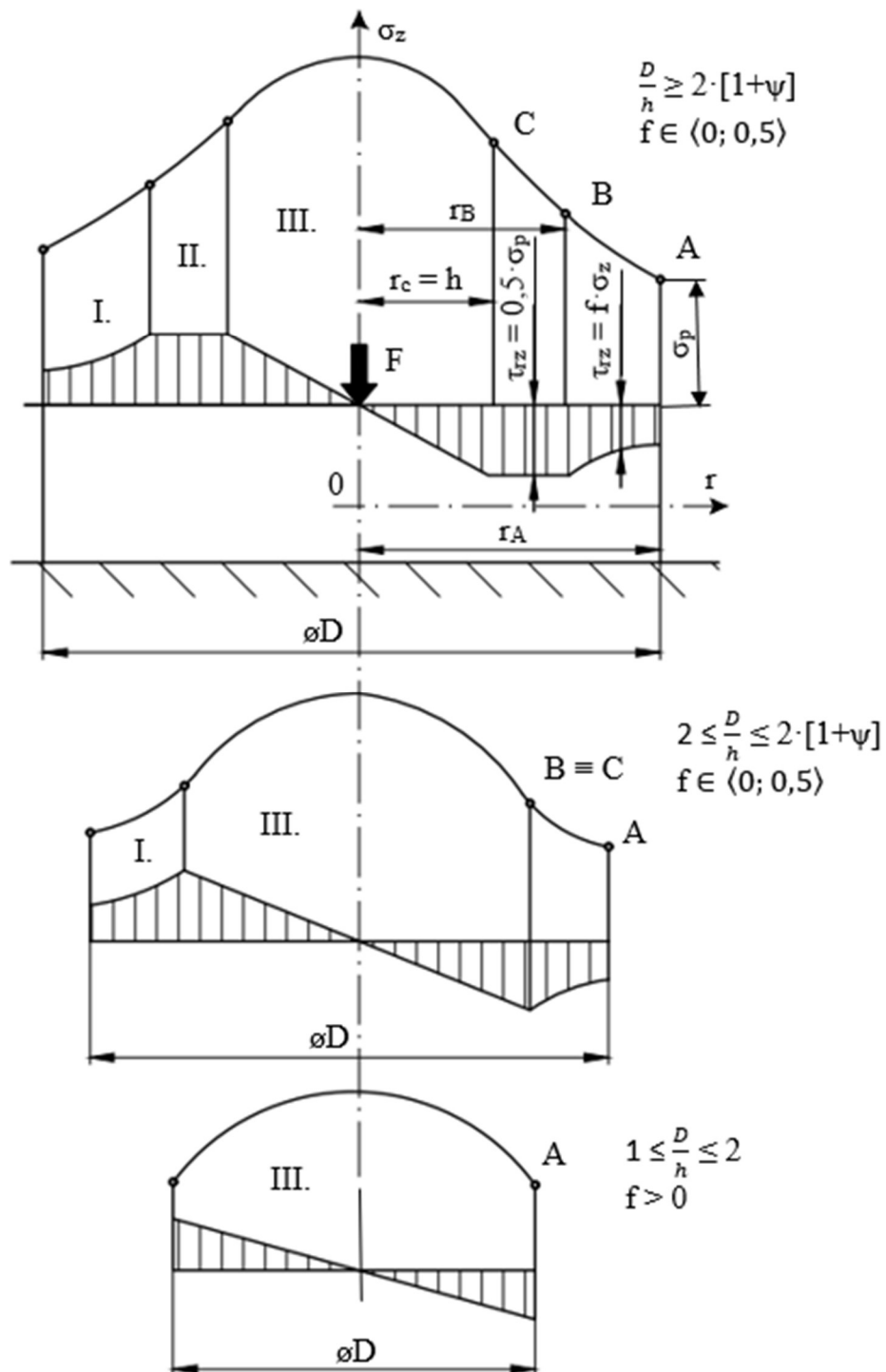


Obr. 21 Rozložení osového napětí podle Siebela [27].

3.6.2 Řešení dle Unksova

Smykové napětí mezi pěchovníkem a výkovkem nejsou podle Unksova konstantní. Oblast smykového napětí lze rozdělit na tři pásma, první pásmo kluzu, druhé pásmo zbrzdění a třetí pásmo stagnace. Všechny tři pásma jsou znázorněna na obrázku 22. Existence těchto pásem je vázána na mnoho faktorů. Závisí například na poměru délky či průměru tělesa k výšce, dále třeba také na vnějším tření. [25; 26; 27] Tvar diferenciální rovnice při využití obecné platnosti Coulombova zákona pro kontaktní tření je [27]:

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_z}{h} = 0. \quad (3.15)$$



Obr. 22 Tři pásma osového napětí dle Unksova [27].

První pásmo kluzu, ve kterém dochází k postupnému nárůstu napětí, má interval v rozmezí $r \in (r_B; \frac{D}{2})$. [27] Konečná verze výpočtové rovnice pro první fázi vznikne ve tvaru exponenciální rovnice po úpravě a integraci předešlé rovnice [27]:

$$\sigma_{zI} = -\sigma_p \cdot e^{\frac{2 \cdot f}{h} \cdot (\frac{d}{2} - r)}. \quad (3.16)$$

Ve druhém pásmu dosahuje smykové napětí nejvyšších hodnot. Zbrzdění se vyskytuje v intervalu $r \in \langle r_C; r_B \rangle$. Diferenciální rovnice se řeší pomocí separace proměnných vztahené k rozmezí poloměru. Poté následuje další série úprav rovnice (3.12) s využitím Coulombova zákona. [26; 27] Vznikne tedy výsledná rovnice pro pásmo zbrzdění [27]:

$$\sigma_{zII} = -\sigma_p \cdot \frac{1}{2 \cdot f} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \cdot (r_B - r) \right]. \quad (3.17)$$

Třetí pásmo stagnace, mnohdy nazýváno jako pásmo ulpívání či přilnutí se nachází v intervalu $r \in \langle 0; r_C \rangle$. Během této fáze začíná na pěchovadle ulpívat materiál, dále také v rovině symetrie se začne postupně měnit výsledné znaménko. Dle výsledků zkoušek podle Unksova lze konstatovat, že poloměr inflexního bodu C se rovná okamžité výšce tělesa. Dále pak také postupně klesá ze záporné hodnoty smykové napětí až k nule. [26; 27] Výsledný výpočtový vztah pro třetí pásmo bude ve tvaru paraboly [27]:

$$\sigma_{zIII} = \sigma_c - f \cdot \sigma_p \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{h} \right)^2 \right], \quad (3.18)$$

kde: σ_c - hodnota napětí v bodě C [MPa].

4 EXPERIMENT

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na petchování válcových polotovarů o počátečním průměru 16 mm a počáteční výšce 20 mm. Všechny válečky jsou vyrobeny z titanové slitiny VT 3-1. Jedná se o titanovou slitinu s mechanickými vlastnostmi uvedenými v tabulce 1 a chemickým složením v tabulce 2. Využití nachází nejen v leteckém průmyslu, ale také lodním, chemickém, petrochemickém, potravinářském či lékařství aj. Cílem experimentu je prověřit tvárné vlastnosti výše zmíněné titanové slitiny. [6; 28; 29]

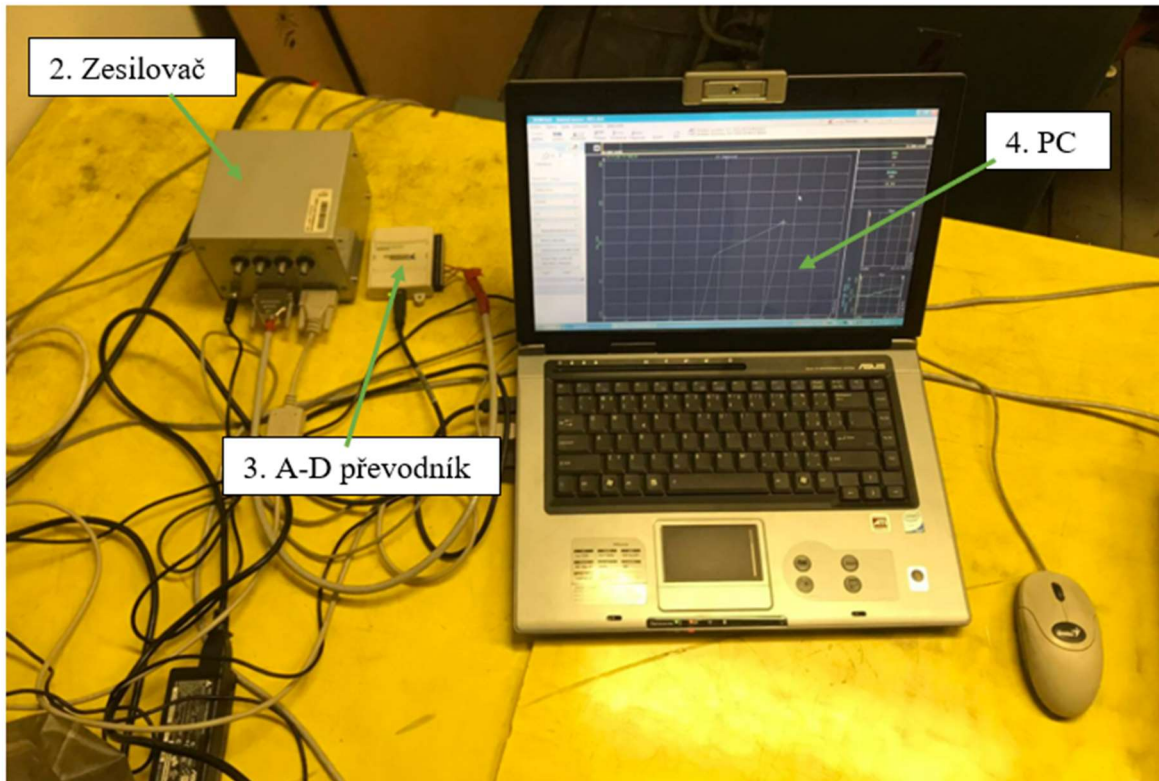
4.1 Příprava experimentu

K realizaci experimentu bylo připraveno pomocí soustružení 30 kusů válečků z titanové slitiny VT 3-1 o rozměrech uvedených v kapitole 4. Pro zjištění tvárných vlastností byla pro tento experiment zvolena petchovací zkouška. Vzorky byly rozděleny do skupinek po třech kusech, jelikož experiment byl naplánován pro petchování při zkouškách o pokojové teplotě 25 °C, dále pak o teplotě 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C a 800 °C. Při každé teplotě se pechovaly celkem 3 vzorky. Poslední tři kusy z 30 byly připraveny, jako náhradní pro případ neúspěšné zkoušky.

Experiment byl realizován v dílnách Ústavu strojírenské technologie, odboru technologie tváření kovů a plastů v budově C1. Zkouška byla provedena na lisu CZR 600 se zaznamenáním dat v PC pomocí software Dewesoft. Schéma experimentálního pracoviště lze vidět na obrázku 23 a obrázku 24.



Obr. 23 Schéma měřícího zařízení první část.



Obr. 24 Schéma měřícího zařízení druhá část.

Experimentální pracoviště je složeno z hydraulického lisu CZR 600 (1), ze kterého je pomocí jednotlivých senzorů přenášeno napětí do tzv. zesilovače (2). Ten přiváděný analogový signál zesiluje a převádí ho dále do tzv. AD převodníku (3). Tento převodník převede analogický signál na signál digitální, které je veden přes USB porty do PC (4). V notebooku je nainstalován software Dewesoft, konkrétně verze 6.5.1., ve které se přicházející data finálně zpracují a zobrazí na požadované výstupy. [29]

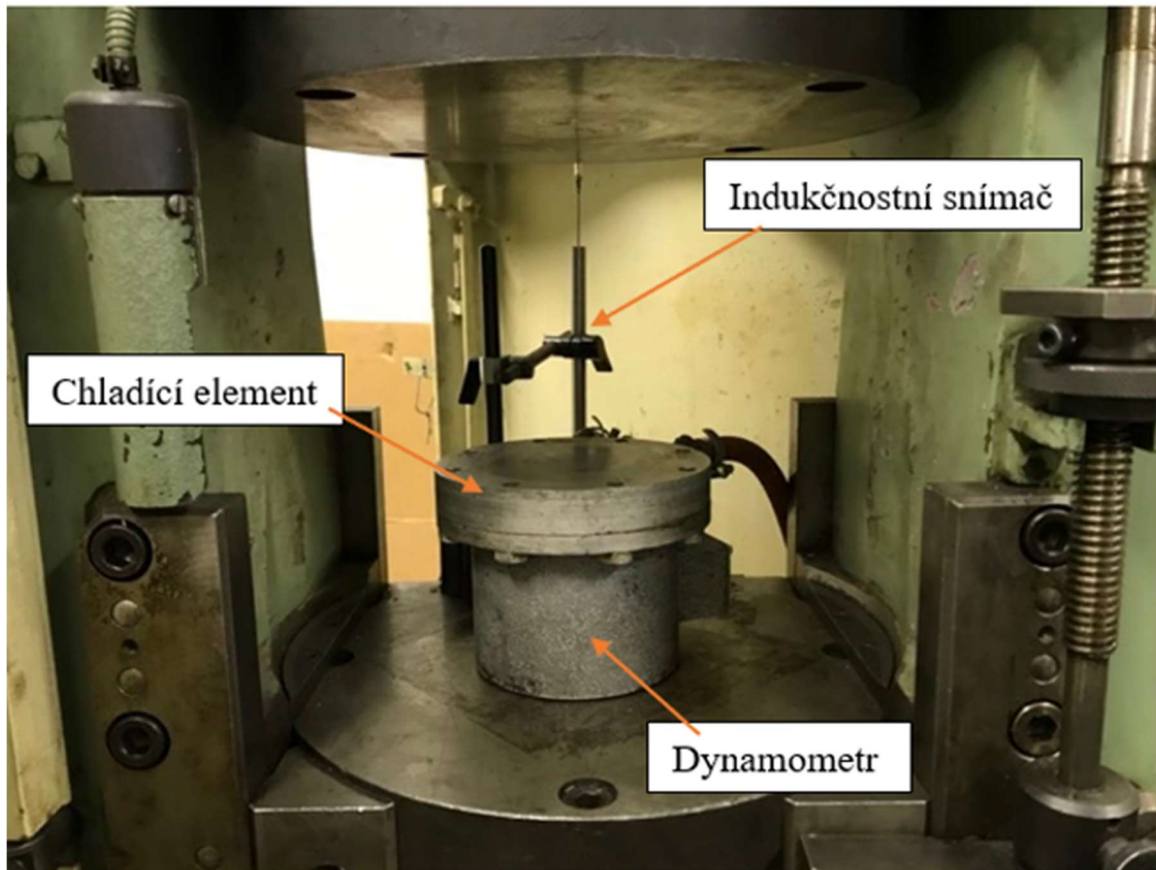
4.1.1 Lis CZR 600

Jedná se o hydraulický lis o jmenovité síle 6000 kN, mnohdy přezdívány jako „vajíčko“ od firmy TOS Rakovník. Obecně lze říct, že je to rozměrově malý, jednoduchý a spolehlivý stroj. Váží téměř 2 tuny. Při experimentu bylo využito dalších komponentů ke snímání potřebných veličin. Všechny komponenty společně s lisem jsou vidět na obrázku 25. [29; 30; 31]

Prvním z použitých snímačů je dynamometr 500, neboli snímač tlakové síly. Jedná se o tenzometrický snímač, který využívá odporové tenzometry a řadí se do kvazistatických snímačů. Mezi další typy snímačů patří například kapacitní, indukční, piezoelektrické či mechanické. [29; 30; 31]

Pro zaznamenávání dráhy byl využit indukčnostní snímač W50. Patří mezi pasivní snímače, pro které je nutné zapojení do obvodu se střídavým napětím. Mezi další pasivní snímače se řadí ionizační, magnetické, kapacitní a odporové. [29; 30; 31]

Při pēchování od teploty 200 °C a výše, bylo využito také chlazení vodou. Chladicí element byl instalován na dynamometr. Posledním částí, která byla během pēchování použita, byl samotný nástroj, který lze vidět na obrázku 26. Pēchované těleso, tedy váleček, je vložen do nástroje a ten posléze vsunut nad chladicí těleso. Jakmile začne lis tlačit na nástroj, začne se těleso pēchovat a stejná síla začne působit na dynamometr, který posílá signál dále ke zpracování do PC. [29; 30; 31]

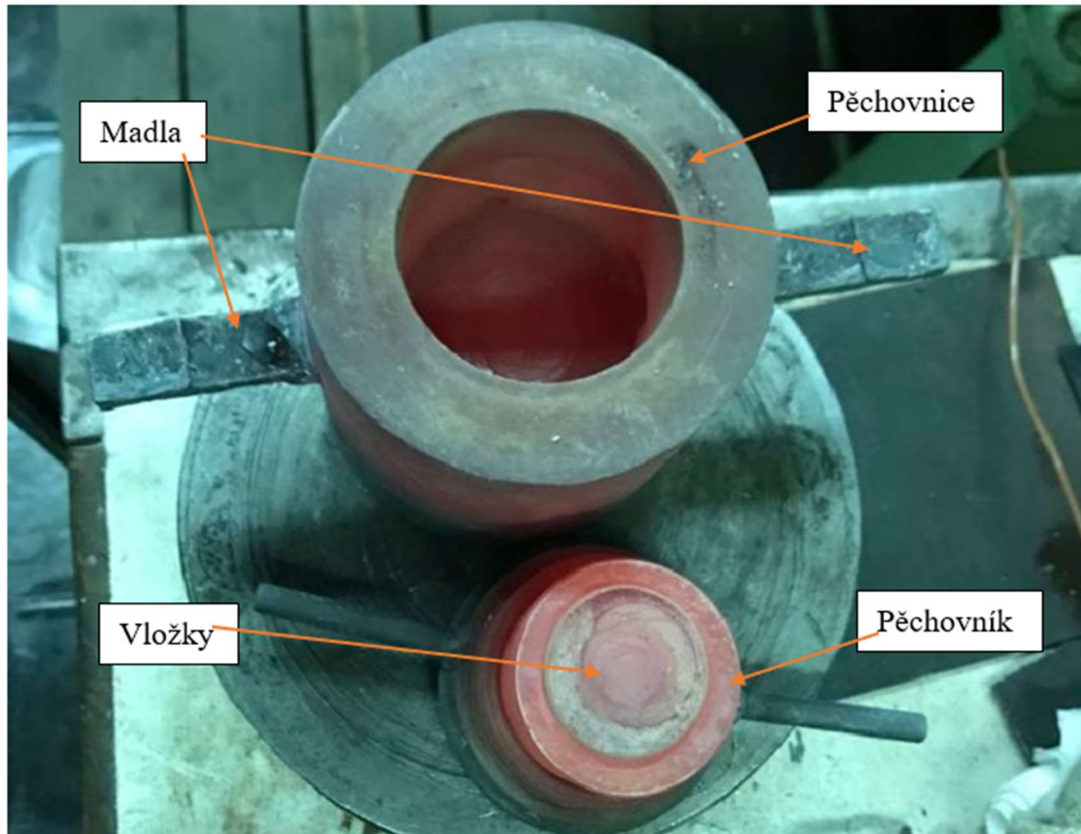


Obr. 25 Umístění snímačů.



Obr. 26 Pěchovací nástroj.

Pěchovací nástroj neboli kontejner byl vyroben z materiálu Nimonic. Skládá se z několika částí, popsanych v obrázku 27. Dno spodní části nástroje slouží jako pěchovnice. Na tuto část je položen, a vystředěn pomocí středících elementů, pěchovaný materiál před samotnou zkouškou. Vrchní část nástroje se nazývá pěchovník. Obě tyto strany mají ještě tzv. vložky, které se mohou po několika použitích vždy přebrousit, aby byla pěchovací plocha co nejrovnější. Na bocích spodní části nástroje jsou umístěny dvě madla, která jsou využívána k manipulaci s nástrojem. Za tyto madla se pomocí háku podebere ohřátý nástroj a je přemístěn z pece do lisu.



Obr. 27 Popis částí pěchovacího nástroje

Pro kontrolu ohřevu vzorku na požadovanou teplotu byl využit termočlánek, konkrétně typ K. Termočlánek byl zaveden ke vzorku do otvoru na boční straně pěchovacího nástroje. [31]

4.1.2 Zesilovač, AD převodník, Dewesoft

Z jednotlivých snímačů uvedených v kapitole 4.1.1 proudí signál o velikosti milivoltů do zesilovače. Jelikož se jedná o velmi nízkou sílu signálu je zapotřebí tento signál zesílit. Při experimentu bylo využito zesilovače od firmy Dewetron, konkrétně typ DEWE 30-4. Z přední části do modulu zesilovače je připojen indukčnostní snímač, termočlánek a dynamometr. Z druhé strany zesilovače je připojen výstup analogového zesíleného signálu, který bude propojen s měřicí kartou. [29; 30; 31; 32]

Pro vyhodnocení zkoušky je zapotřebí získaný analogový signál převést pomocí AD převodníku na signál digitální. Pro experiment byl využit převodník NI USB 6009. Jelikož se jedná o vysokorychlostní USB rozhraní, není zapotřebí užít externí zdroj napájení, postačí pouze propojení s počítačem. [29; 30; 32]

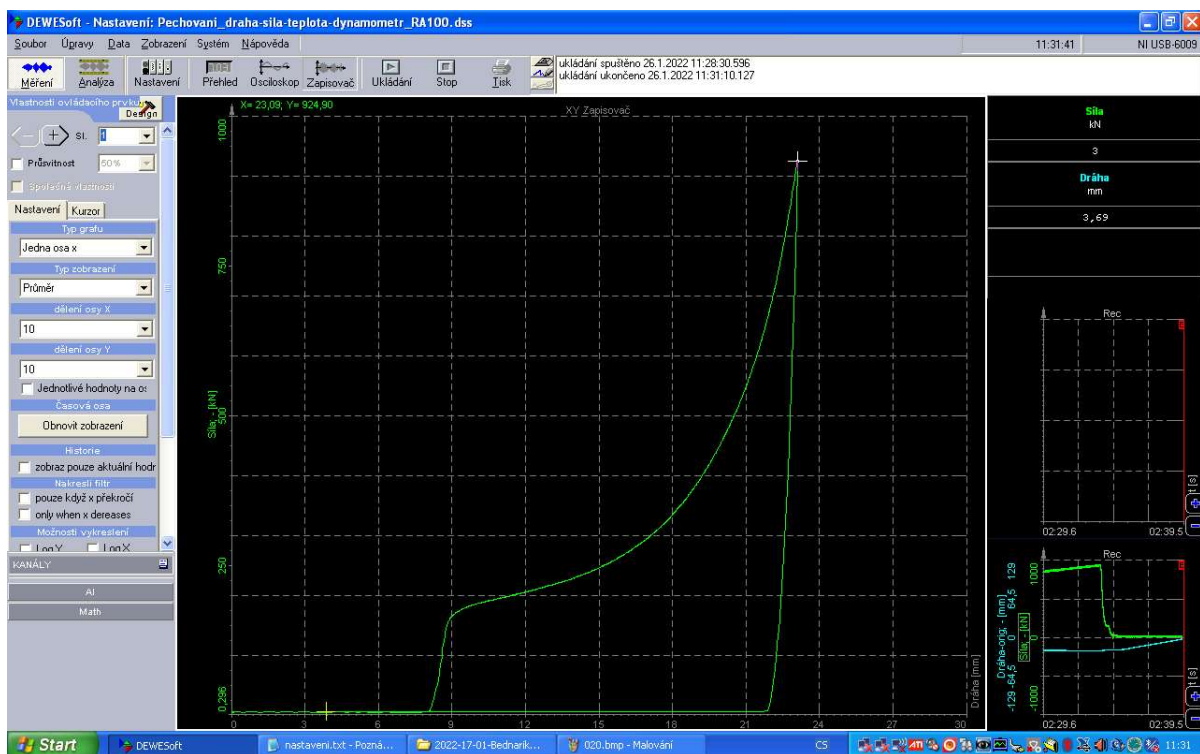
Data odeslána z převodníku míří do měřicího a testovacího softwaru na PC Dewesoft 6.5.1. Tento software je od společnosti Dewetrom. Program umožňuje sběr dat z více zdrojů se

zanesením do jednoho záznamu. Data zaznamenaná v programu lze tisknout, případně exportovat do jiných programů. [29; 30; 32]

Jakmile se v programu nastaví všechny potřebné parametry, uživatelské rozhraní sloužící pro zobrazení naměřených hodnot, je možné zahájit experiment. Při samotném měření byl použit pro sílu a dráhu digitální XY zapisovač, jenž byl doplněn digitálními ukazateli těchto hodnot. [29; 30; 32]

Jelikož probíhalo třicet měření je také nutné správně nastavit cestu ukládání do adresáře, kde se všechny data uloží. Ve zvoleném adresáři se pak budou dle zvoleného typu exportovat všechny hodnoty, se kterými se při vyhodnocování experimentu bude dále pracovat. [29; 32]

Na obrázku 28 je záznam z průběhu experimentu zaznamenaný v programu Dewesoft pro vzorek č. 21. Tento vzorek byl petchován při teplotě 600 °C. Jak již bylo nastíněno výše, průběh tohoto měření byl postupně ukládán do složky v PC a výsledkem byl soubor vytvořený v programu excel, ze kterého se v další části diplomové práce vyhodnotí jednotlivé údaje k tvrdomosti slitiny při dané teplotě. [29; 30; 32]



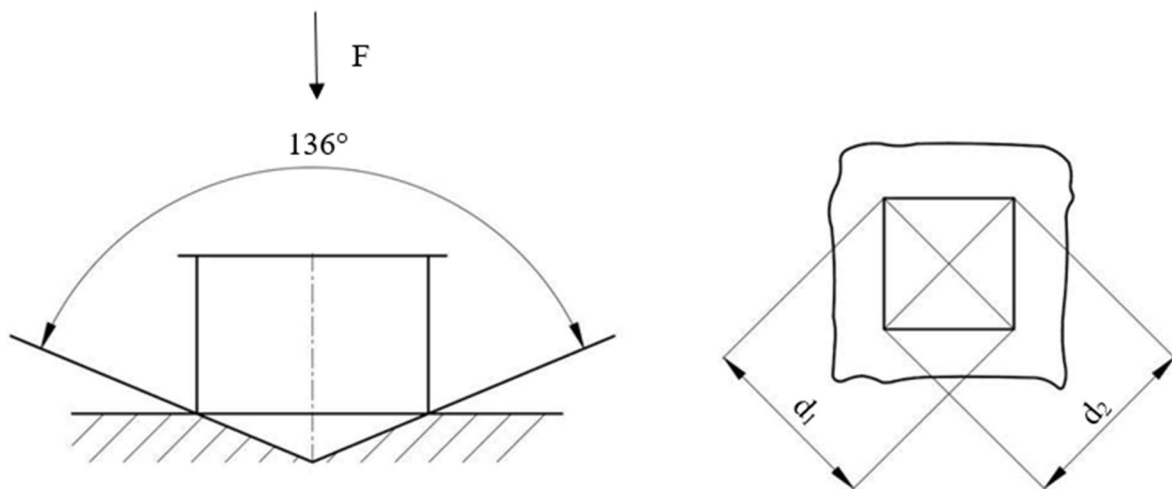
Obr. 28 Záznam z programu Dewesoft pro vzorek č. 21.

4.1.3 Tvrdoměr

Součástí vyhodnocení experimentu je také porovnání počáteční tvrdosti čelní strany vzorků s tvrdostí čelní plochy vzorků po petchování. Jelikož se jedná o titanovou slitinu, byla pro určení tvrdosti vybrána metoda dle Vickerse. Měření bylo provedeno konkrétně na měřidle Zwick 3212. [30; 33]

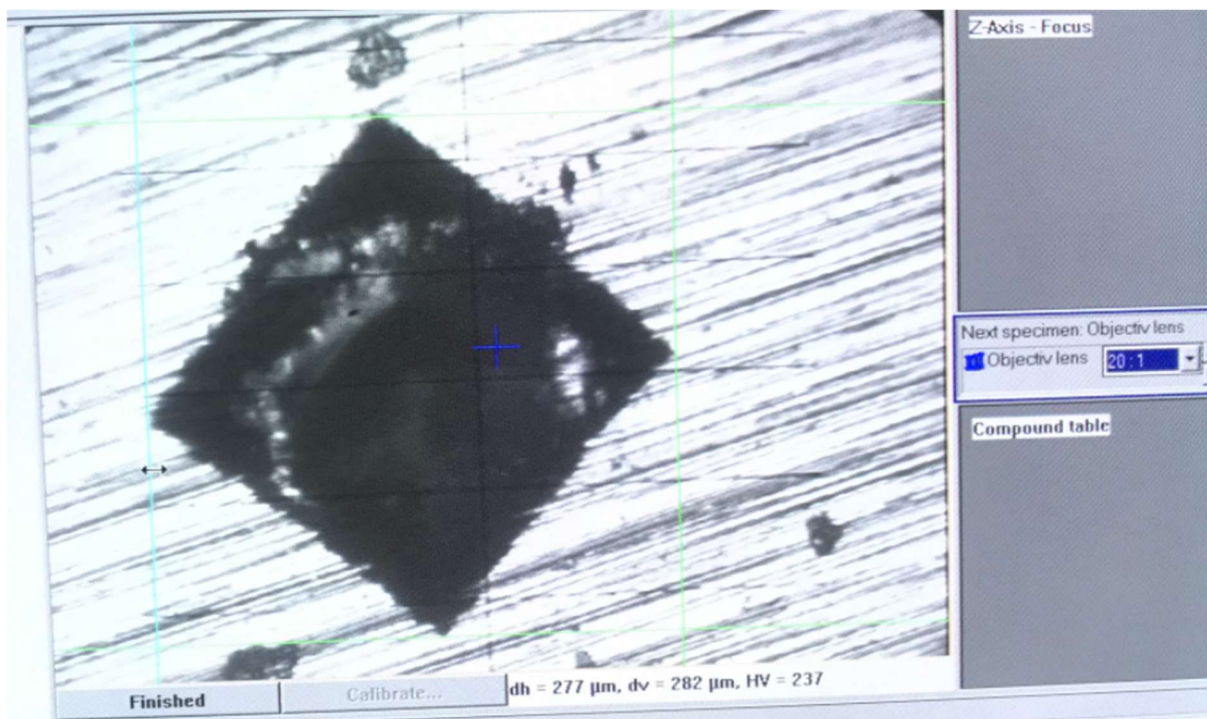
Měření tvrdosti je pro kontrolu kvality a vlastnosti materiálu využíváno hojně nejen kvůli snadné proveditelnosti, ale také z důvodů rychlého provedení a vyhodnocení zkoušky. Metoda Vickers má jako vnikající těleso do materiálu diamantový jehlan o vrcholu 136 stupňů (obr. 29). Tento jehlan je vtlačován do povrchu zkušebního vzorku definovanou silou po určitý čas. Jakmile dojde k odlehčení vnikajícího tělesa, na zkušebním vzorku je zanechán otisk. Měření jsou obě úhlopříčky čtvercového otisku. Čím větší se otiskne úhlopříčka d_1 a d_2 , tím je materiál

všeobecně měkkí. U výše zmíněného měřidla Zwick je po odměření úhlopříček vše vyhodnocováno automaticky v programu na PC. Výsledná tvrdost je tedy ukázána přímo na obrazovce monitoru, viz obr. 30. [30; 33]



Obr. 29 Tvar vtisku a vnikajícího tělesa pro metodu Vickers [33].

Pro správné provedení měření a vyhodnocení tvrdosti byly vzorky před měřením vyleštěny a odmaštěny. Taktéž byly dle norem dodrženy vzdálenosti vtisků od kraje či mezi jednotlivými vtisky. Hodnota zkušebního zatížení byla použita 10 kg. Měření probíhalo po dobu vtisku 15 s, vždy s dvěma vtisky na krajích vzorku a jedním uprostřed. [30; 33]



Obr. 30 Obtisk diamantového jehlanu znázorněn na obrazovce monitoru.

Výhodou tvrdoměru Zwick, fotografie kterého je na obrázku 31, je zatěžování hrotu pomocí závaží. Tento typ zatížení zajistí spolehlivější zatížení než využití zatěžování pomocí pružin, které mohou i díky únavě zatěžovat zkušební těleso nerovnoměrně či nepřesně. [30; 33]



Obr. 31 Tvrdoměr Zwick 3212.

4.1.4 Další pomocná zařízení

K provedení experimentu bylo zapotřebí, kromě výše zmíněných zařízení, ještě pece na nahřátí vzorků, leštičky na přípravu vzorků před měřením tvrdosti a řezačky. Vzorky byly vždy před vsunutím do pece (obr. 32) vloženy do nástroje (obr. 26). K nahřátí vzorků bylo využito pece ve fakultních dílnách od firmy ZEZ Praha, která byla vyrobena roku 1984, disponující celkovým příkonem 18,3 kW a jmenovitou teplotou 960 °C. Každý vzorek byl na danou teplotu ohříván individuálně i více než hodinu. Kontrola teploty vzorku byla následně provedena pomocí termočlánku.



Obr. 32 Pec ZEZ Praha.

Jelikož při pečování došlo na čelních plochách vzorku k vytvoření nerovností, bylo zapotřebí k vyhodnocení tvrdosti čelní plochy vyleštit. Využito tedy bylo leštícího stroje SAPHIR 330 v dílnách, viz obrázek 33. Každý vzorek byl individuálně vyleštěn na jedné čelní straně pomocí brusného kotouče upevněného na otočné stolici a při průběžném přítoku kapaliny, tak aby následné měření tvrdosti bylo co nejpřesnější.



Obr. 33 Leštící stroj SAPHIR 330.

V neposlední řadě byly pro zkoušku tvrdosti vzorky rozřezány na řezačce Struers, tak aby bylo možné změřit tvrdost v průřezu vzorku. Během řezání bylo využito chladicí kapaliny. Řezačku je možné vidět na obrázku 34.



Obr. 34 Řezačka Struers

4.2 Průběh experimentu

U všech připravených a do skupin rozdělených vzorků, viz kapitola 4.1, byla před samotnou zkouškou změřena tvrdost a geometrie. Pro stanovení rozměrů, konkrétně výšky a průměru, bylo použito digitální posuvné měřidlo značky Festa. Měření tvrdosti se realizovalo na tvrdoměru Zwick 3212, dle metodiky uvedené v kapitole 4.1.3. Před vlastním měřením tvrdosti byly vzorky leštěny na čelní ploše. Naměřené vstupní hodnoty rozměrů a tvrdosti jsou shrnuty v tabulce 6.

Tab. 6 Vstupní rozměry polotovaru a vstupní hodnoty tvrdosti

Vzorek	Výška H_0 [mm]	Průměr D_0 [mm]	HV 10 - kraj	HV 10 - střed	HV 10 - kraj
č. 1	20,02	16,00	215	217	216
č. 2	20,03	16,00	214	216	215
č. 3	20,00	16,00	216	215	215
č. 4	19,98	16,01	216	216	217
č. 5	19,97	16,00	216	215	215
č. 6	20,01	16,01	217	216	215
č. 7	19,99	16,00	215	216	216
č. 8	19,96	15,59	216	214	214
č. 9	20,00	16,00	214	213	216
č. 10	20,01	16,00	216	214	214
č. 11	20,00	16,00	215	215	214
č. 12	19,98	15,99	214	216	215
č. 13	20,01	16,00	216	214	213
č. 14	19,99	15,99	215	214	215
č. 15	19,98	16,01	216	215	216
č. 16	19,98	16,00	214	213	213
č. 17	20,01	16,00	215	214	215
č. 18	20,02	15,99	216	215	214
č. 19	20,00	16,00	215	215	216
č. 20	20,01	16,01	214	216	215
č. 21	20,02	16,00	215	215	215

č. 22	19,99	16,01	216	214	216
č. 23	19,98	15,99	216	214	214
č. 24	20,00	15,99	215	215	215
č. 25	20,01	16,00	214	215	214
č. 26	20,03	16,00	214	214	215
č. 27	20,01	15,99	216	216	216
č. 28	19,97	16,00	215	214	215
č. 29	19,99	16,01	215	215	214
č. 30	19,98	16,00	216	215	214

Následovalo stanovení vlivu teploty na tvárné vlastnosti titanové slitiny VT 3-1. Jak je uvedeno v kapitole 4.1, tvárné vlastnosti byly posuzovány na základě petchovací zkoušky. Přičemž se hodnotila dosažitelná velikost deformace a závislost přirozeného deformačního odporu na velikosti deformace.

Každý vzorek vložený do nástroje byl v elektrické peci ohřát na stanovenou teplotu. V tabulce 7 jsou uvedeny údaje o průběhu petchování jednotlivých vzorků. V tabulce 7 ve sloupci poznámka je uvedeno z jakého důvodu bylo petchování ukončeno. Buď bylo petchování ukončeno kvůli prasknutí vzorku (vzorek 1; 11; 13; 14 a 27), nebo z důvodů velkého zatížení, které by mohlo stroj poškodit, případně bylo ukončeno předčasně z obav, aby nedošlo k prasknutí vzorku. Jelikož se pechovalo za devíti různých teplot a vždy po skupině třech vzorků pro jednu teplotu, byly tři náhradní vzorky. Tyto náhradní vzorky však byly využity kvůli neúspěšnému petchování vzorku 20 a 24 a také jako doplnění pro petchování při teplotě 500 °C, kde došlo k prasknutí dvou vzorků. U dvou zmíněných vzorků z různých důvodů proběhlo petchování neúspěšně, a proto byly následně nahrazeny dvěma náhradními petchování, které splňovaly potřebné podmínky a byly ohřáty na požadovanou teplotu. Každá teplota tedy měla tři úspěšné zkoušky.

Tab. 7 Výstupní hodnoty vzorků

Č. vzorku	Teplota [°C]	Výchozí výška [mm]	Konečná výška [mm]	Max. síla [kN]	Poznámka
č. 1	25	20,02	14,07	387,2	Prasknutí
č. 2	25	20,03	15,75	361,7	Ukončeno
č. 3	25	20,00	15,76	361,9	Ukončeno
č. 4	100	19,98	15,03	354,5	Ukončeno
č. 5	100	19,97	14,97	348,6	Ukončeno
č. 6	100	20,01	14,97	349,8	Ukončeno

č. 7	200	19,99	14,80	334,6	Ukončeno
č. 8	200	19,96	14,85	334,6	Ukončeno
č. 9	200	20,00	14,70	333,0	Ukončeno
č. 10	300	20,01	14,80	300,1	Ukončeno
č. 11	300	20,00	13,82	305,6	Prasknutí
č. 12	300	19,98	15,00	309,2	Ukončeno
č. 13	400	20,01	14,71	283,4	Prasknutí
č. 14	400	19,99	14,52	278,1	Prasknutí
č. 15	400	19,98	15,60	271,8	Ukončeno
č. 16	500	19,98	14,88	273,0	Ukončeno
č. 17	500	20,01	14,80	260,8	Ukončeno
č. 18	500	20,02	13,82	293,3	Ukončeno
č. 19	600	20,00	14,02	211,7	Ukončeno
č. 20	600	20,01	13,70	196,5	Ukončeno
č. 21	600	20,02	6,62	921,3	Ukončeno
č. 22	600	19,99	6,20	929,0	Ukončeno
č. 23	700	19,98	5,12	895,6	Ukončeno
č. 24	700	20,00	5,06	921,9	Ukončeno
č. 25	700	20,01	4,65	870,5	Ukončeno
č. 26	700	20,03	5,11	888,8	Ukončeno
č. 27	500	20,01	7,31	857,7	Prasknuto
č. 28	800	19,97	4,35	627,3	Ukončeno
č. 29	800	19,99	4,15	630,5	Ukončeno
č. 30	800	19,98	4,41	450,0	Ukončeno

Na napěchovaných vzorcích byla opět po vyleštění čelní plochy měřena tvrdost dle Vickerse. Stejně jako před pěchováním se tvrdost měřila ve třech bodech. V tabulce 8 je uvedeno porovnání tvrdosti vzorků před a po pěchování na čele vzorku. V tabulce 9 je posléze uvedena tvrdost změřená na rozřezaných vzorcích. I zde byla tvrdost pro každou teplotu měřena vždy třemi vpichy napříč řezem na jednom vzorku.

Tab. 8 Tvrdost dle Vickerse před a po pēchování na čele vzorku

Č. vzorku	Před HV 10 kraj	Před HV 10 střed	Před HV 10 kraj	Po HV 10 kraj	Po HV 10 střed	Po HV 10 kraj
č. 1	215	217	216	237	220	228
č. 2	214	216	215	237	205	226
č. 3	216	215	215	230	227	223
č. 4	216	216	217	237	237	240
č. 5	216	215	215	251	223	215
č. 6	217	216	215	229	244	241
č. 7	215	216	216	221	233	235
č. 8	216	214	214	242	251	236
č. 9	214	213	216	236	243	236
č. 10	216	214	214	284	246	220
č. 11	215	215	214	268	248	259
č. 12	214	216	215	239	239	250
č. 13	216	214	213	259	266	265
č. 14	215	214	215	236	266	263
č. 15	216	215	216	260	254	254
č. 16	214	213	213	276	266	271
č. 17	215	214	215	262	257	242
č. 18	216	215	214	261	250	261
č. 19	215	215	216	257	268	253
č. 20	214	216	215	263	273	253
č. 21	215	215	215	291	255	277
č. 22	216	214	216	289	242	294
č. 23	216	214	214	267	263	276

č. 24	215	215	215	277	255	280
č. 25	214	215	214	278	248	261
č. 26	214	214	215	277	246	275
č. 27	216	216	216	264	242	281
č. 28	215	214	215	261	254	262
č. 29	215	215	214	264	245	250
č. 30	216	215	214	253	244	262

Tab. 9 Tvrdost dle Vickerse po pēchování v řezu vzorku

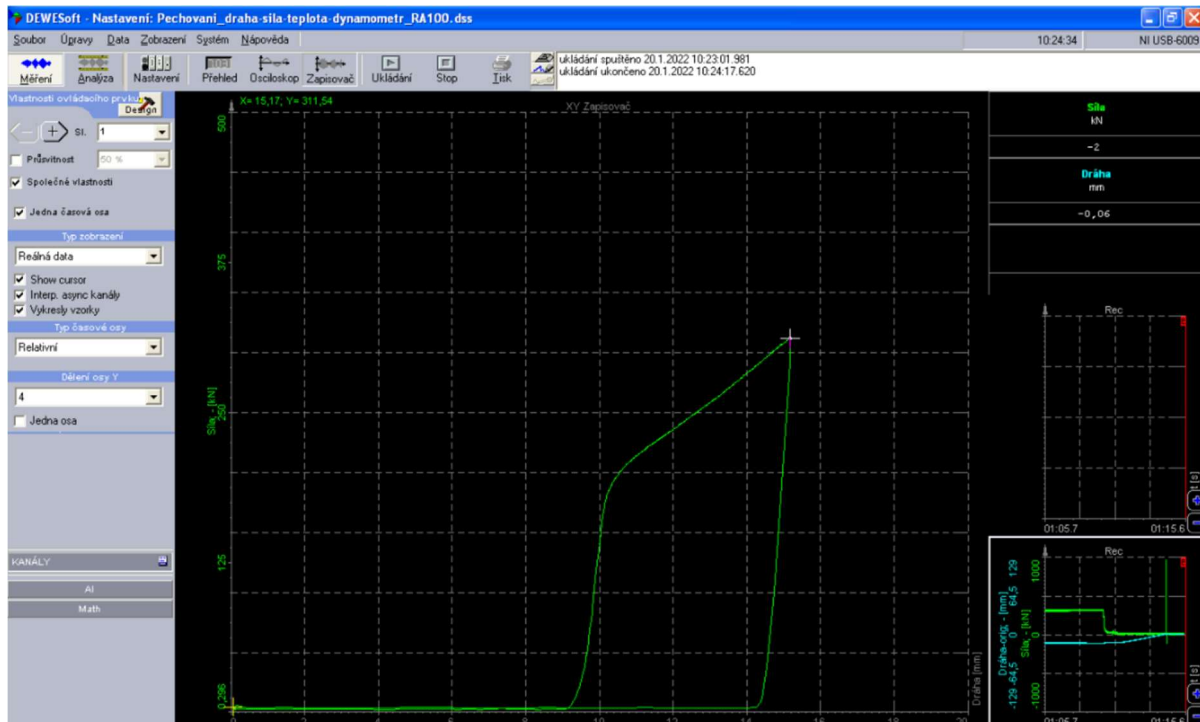
Teplota [°C]	HV 10 - kraj	HV 10 - střed	HV 10 - kraj
25	245	250	245
100	247	256	246
200	250	259	251
300	256	269	258
400	263	277	265
500	270	285	271
600	279	292	280
700	276	289	278
800	268	283	266

4.2.1 Popis průběhu experimentu na vzorku č. 12 a č. 13

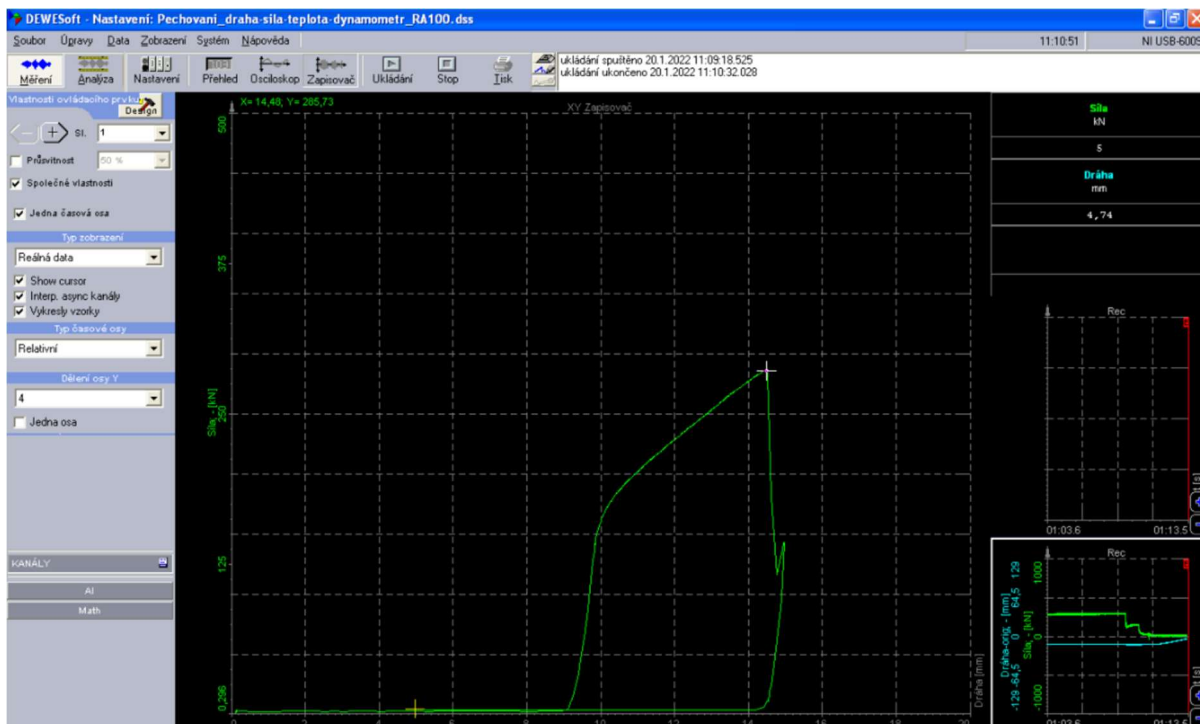
Pro ukádku byly vybrány vzorky č. 12 a č. 13, na kterých bude ukázán postupně celý průběh experimentální části od přípravy až po vyhodnocení vybraných vzorků. Vzorek č. 12 byl ohříván a pēchován při teplotě 300 °C a vzorek č. 13 při teplotě 400 °C.

Po přípravě, změření, označení a zaznamenání vstupních informací jednotlivého vzorku, byl polotovar vložen do tvářecího nástroje a ten posléze do rozehráté pece. Zde se nahřívá dle požadované teploty i více než hodinu. Mezitím se v notebooku v programu Dewesoft přichystala prázdná složka pro ukládání dat, nastaveny byly vstupní požadavky a další náležitosti. Po nahřátí vzorku byl nástroj vyjmut z pece a vložen do lisu. Po zavření krytu se začal polotovar postupně pēchovat při pohybu spodního beranu lisu nahoru. Postupné pēchování vzorku bylo zobrazováno v notebooku, kde bylo k vidění vykreslení křivky. Ze třech pēchovaných vzorků pro jednu teplotu se první ze série vždy pēchoval co nejvíce stroj či vzorek dovolil. U některých vzorků se při pēchování dosahovalo takového zatížení, že se operace musela ukončit z důvodů bezpečnosti stroje. Dále zase například u vzorku č. 13 došlo při dosažení maximálního zatížení k prasknutí vzorku a tím k ukončení procesu pēchování.

Grafické záznamy vzorků č. 12 a č. 13 v programu Dewesoft lze vidět na obrázku 35, respektive obrázku 36. Oba zpěchované vzorky lze poté vidět na obrátku 37.



Obr. 35 Záznam z programu Dewesoft pro vzorek č.12.



Obr. 36 Záznam z programu Dewesoft pro vzorek č.13.

Vzorek byl vytažen z nástroje a nechán vychladnout na vzduchu. Do nástroje se vložil vzorek s dalším pořadovým číslem a proces se opakoval. V programu Dewesoft se proběhlé přechování uložilo do souboru .xls a založila se nová složka pro další vzorek. Po vychladnutí vzorku byly změřeny jednotlivé parametry. Naměřené výstupní hodnoty pro vzorky č. 12 a č. 13 lze vidět v tabulce 6,7, 8 a 9.



Obr. 37 Vzorek č. 12 a vzorek č. 13 po pēchování.

Jedním z posledních bodů, které bylo ve fázi realizace experimentu potřeba splnit je zpracování excelové přílohy vygenerované z programu Dewesoft. Program do excelu vygeneroval závislost síly na dráze po dobu pēchování daného vzorku. Objem nezpracovaných vygenerovaných dat pro jedno měření obsahoval mnohdy i přes 700 hodnot. Pro ukázkou je na obrázku 38 náhled na začátek excelu vygenerovaného v programu Dewesoft pro vzorek č. 12.

Konkrétně měření vzorku č. 12 mělo 757 hodnot. Avšak první hodnoty měření nic nevypovídají, jelikož lis běží na prázdno, než spodní beran přirazí nástroj na vrchní stůl. V obrázku 35 se jedná o oblast než se křivka tzv. odlepí od vodorovné hodnoty rezonující okolo nuly. V excelu jsou v posledním úseku uvedeny také hodnoty, které jsou zaznamenány po odtížení či prasknutí vzorku a do samotného hodnocení se taktéž nezanaší. V obrázku 35 a 36 se jedná o úsek, kdy je dosaženo nejvyššího bodu a poté začne čára prudce klesat a vracet se. U obrázku 36 lze navíc vidět na konci prudké klesání s malým výkyvem a až poté se křivka začne vracet. Tento výkyv právě ukazuje na prasknutí vzorku a do vyhodnocení již také není zahrnut. Po odstranění těchto dvou částí lze brát závislost síly na dráze jako plnohodnotnou. Ukázka zpracování této závislosti pro vzorek č. 12 a č. 13 je na obrázku 39.

Z hodnot síly a dráhy byla dále určena závislost napětí na přetvoření, a tedy i křivka zpevnění. Pro určení napětí bylo nejprve nutné vypočítat střední průřez vzorku. Vztah pro výpočet středního průřezu $d_{stř}$ je [34]:

$$d_{stř} = \frac{\pi \cdot d_0^2 \cdot h_0}{4 \cdot (h_0 - s)}, \quad (3.19)$$

kde: d_0 - počáteční průměr vzorku [mm],
 h_0 - počáteční výška vzorku [mm],
 s - dráha [mm].

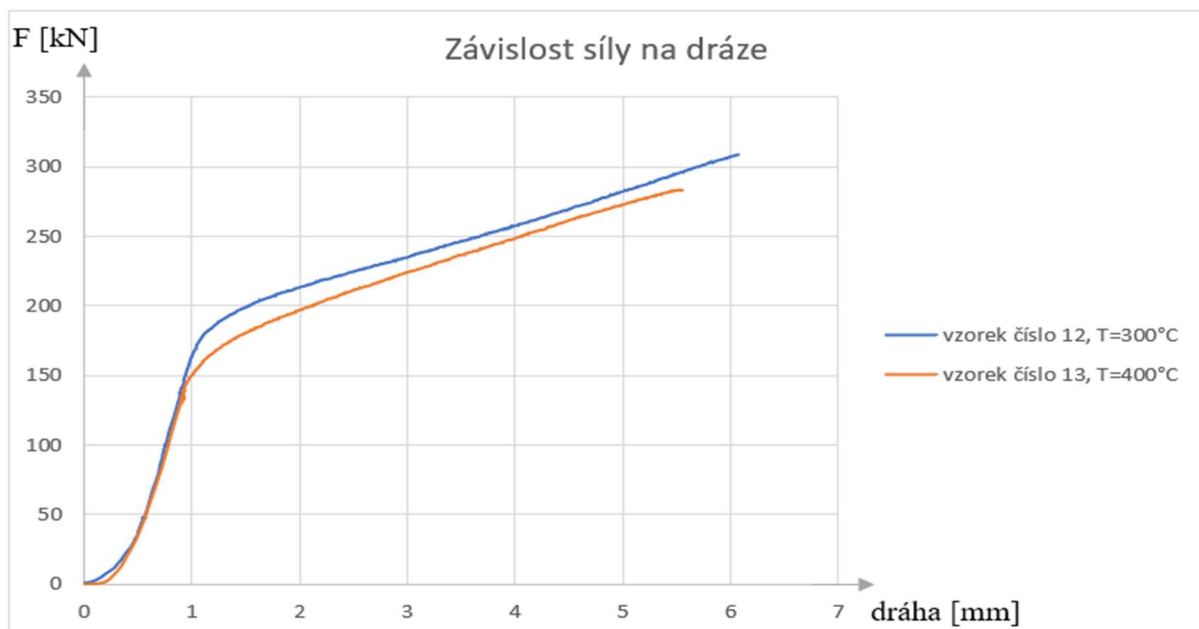
Z hodnoty středního průřezu bylo následně vypočítáno napětí [34]:

$$\sigma_n = \frac{1000 \cdot F}{d_{stř}^2}, \quad (3.20)$$

kde: F - Pēchovací síla [kN].

1	Data info			
2	File name: D:\Skola\Vyuka\DP-BP-oponentura\2021-2022\Bednarik-Lidmila\2022-17-01-Bednarik-titan BT31\012.dsd			
3	Start time: 20.01.2022 10:23:01.981			
4	Number of channels: 2			
5	Sample rate: 5000			
6	Reduced rate: 0,1			
7	Global header information: from DEWESoft			
8	Komentář: Vt 3-1	t = 300°C	h = 20 mm	d = 16 mm
9				
10	Events			
11	Event Type	Event	Time	Comment
12		1 ukládání spuštěno		0
13		2 ukládání ukončeno	75,6388	
14				
15				
16	Data1			
17	Time [s]	Síla; AVE [kN]	Dráha; AVE [mm]	
18	0	2,5042191	0,1261026	
19	0,1	2,4911826	0,1166205	
20	0,2	2,7234719	0,11929815	
21	0,3	2,5504401	0,11573838	
22	0,4	2,5942905	0,11315528	
23	0,5	2,2754855	0,11980216	
24	0,6	2,2849667	0,11299776	
25	0,7	2,5030341	0,11123362	
26	0,8	2,327632	0,11822702	
27	0,9	2,1842291	0,11753403	
28	1	2,407037	0,11485634	
29	1,1	2,3857043	0,11942417	
30	1,2	2,5670321	0,11523443	

Obr. 38 Ukázka vygenerovaných hodnot z programu Dewesoft v excelu pro vzorek č. 12.



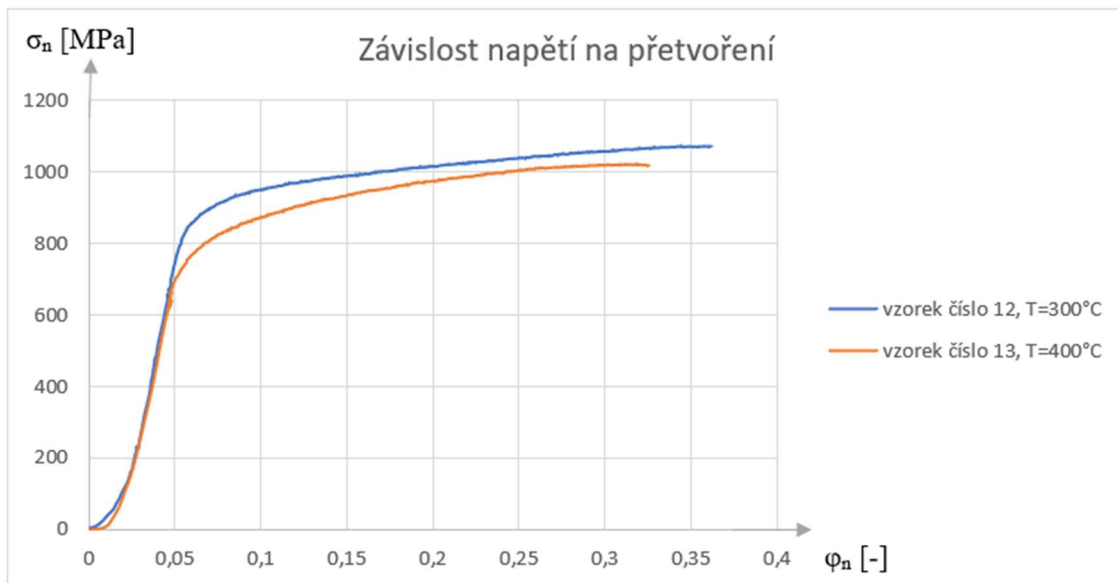
Obr. 39 Závislost síly na dráze pro vzorek č. 12 a č. 13.

Pro zjištění přetvoření v daném bodě lze využít rovnice [34]:

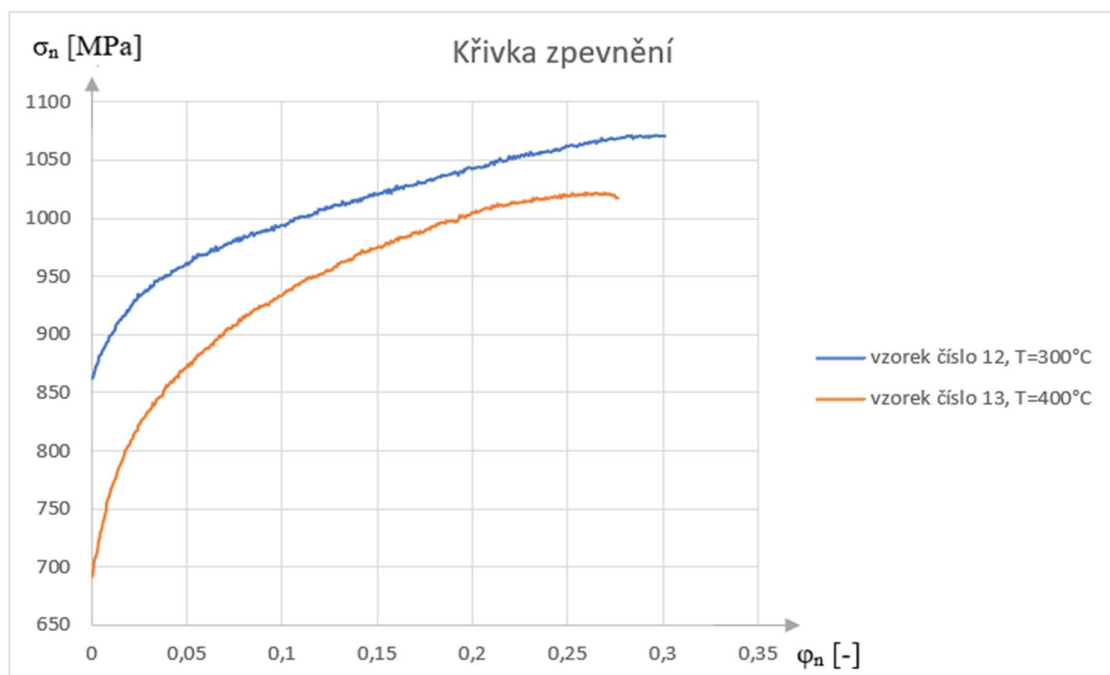
$$\varphi_n = \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right), \quad (3.21)$$

kde: h_1 - Výška vzorku po pěchování [mm].

Po vypočtení výše zmĚných parametrů byl sestaven graf závislosti napětí na pětvoření, viz obrázek 40. Pro určení křivky zpevnĚní bylo následně využito ještě tzv. spojnice trendů, díky které se dá určit, kde začíná oblast plastického pětvoření. Křivku zpevnĚní pro oba vzorky je možné vidĚt na obrázku 41. Po uskutečnĚní všech kroků výše je experiment pěpraven k vyhodnocení.



Obr. 40 Porovnání závislosti napětí na pětvoření pro vzorek č. 12 a č. 13.



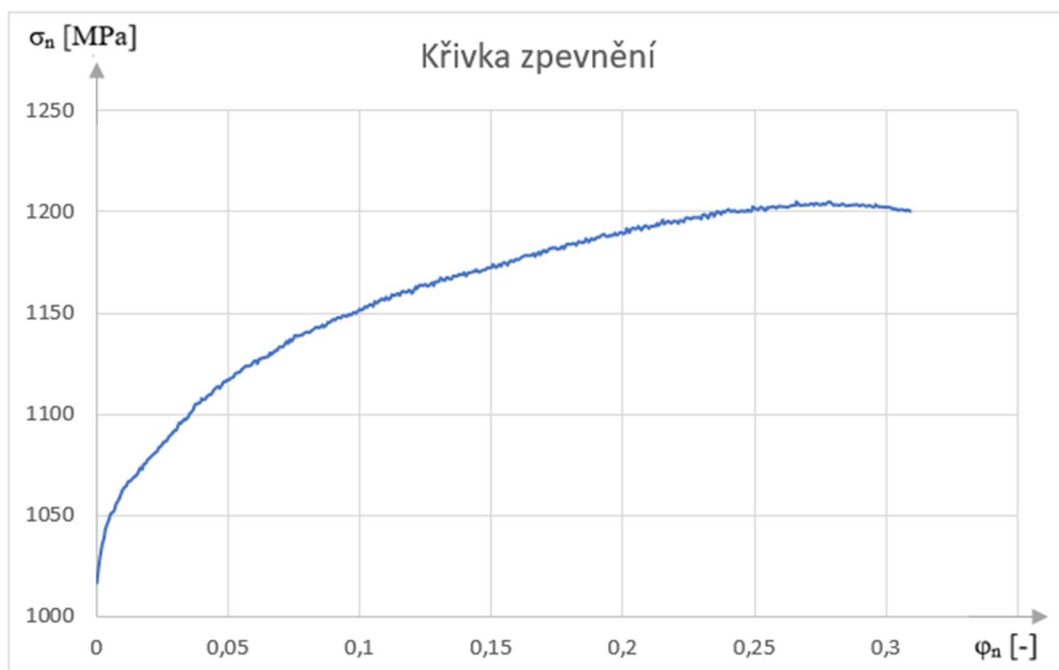
Obr. 41 Porovnání křivek zpevnĚní pro vzorek č. 12 a č. 13.

4.2.2 Křivky zpevnění

V poslední fázi příprav pro vyhodnocení experimentu bylo již zmíněné sestavení všech křivek zpevnění pro dané teploty. Jelikož u každé teploty byly napěchovány tři vzorky, ze kterých by vznikly tři křivky zpevnění, byly hodnoty vždy stejných kroků u vzorků jedné teploty zprůměrovány. Vzniklo tak celkem devět křivek zpevnění pro teploty 25 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C a 800 °C, které lze vidět na obrázku 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 a 50. Čísla obrázků jsou přiřazena vzestupně dle teploty.



Obr. 42 Křivka zpevnění pro teplotu 25 °C.



Obr. 43 Křivka zpevnění pro teplotu 100 °C.



Obr. 44 Křivka zpevnění pro teplotu 200 °C.



Obr. 45 Křivka zpevnění pro teplotu 300 °C.



Obr. 46 Křivka zpevnění pro teplotu 400 °C.



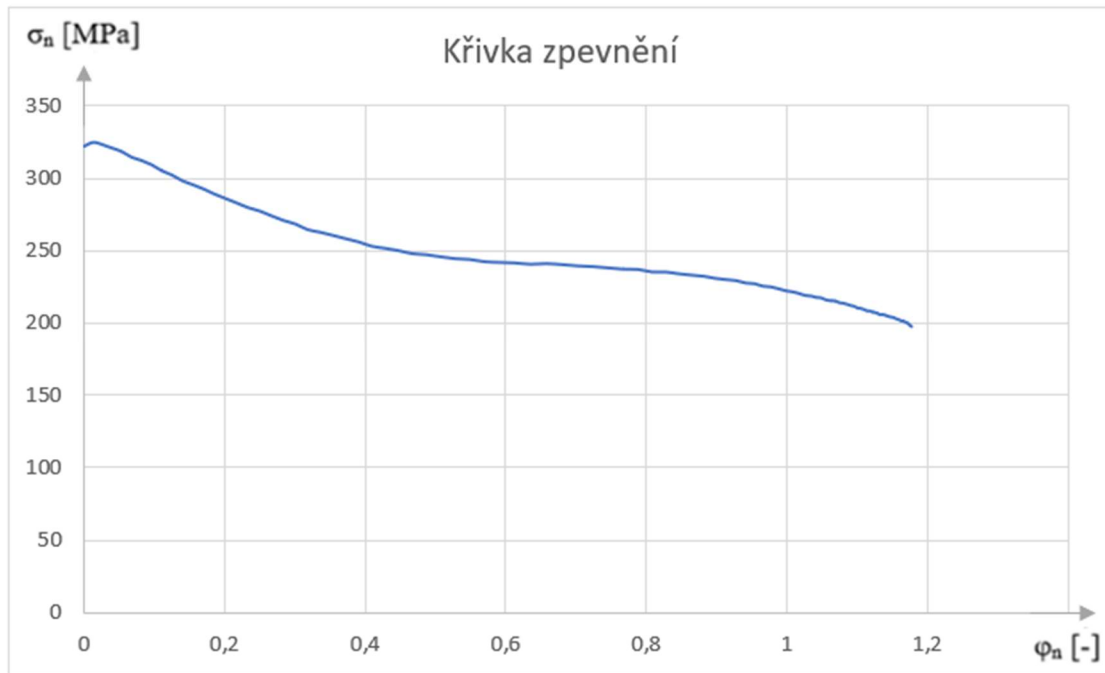
Obr. 47 Křivka zpevnění pro teplotu 500 °C.



Obr. 48 Křivka zpevnění pro teplotu 600 °C.



Obr. 49 Křivka zpevnění pro teplotu 700 °C.



Obr. 50 Křivka zpevnění pro teplotu 800 °C.

4.3 Vyhodnocení experimentu

Z provedených experimentů lze vyvodit následující poznatky. Při všech sledovaných teplotách se projevil vliv teplot na hodnotu meze kluzu. Její hodnota, při zvyšující se teplotě klesala. Porovnání meze kluzu pro jednotlivé teploty je uvedena v tabulce 10.

Tab. 10 Porovnání meze kluzu pro jednotlivé teploty

Teplota [°C]	25	100	200	300	400	500	600	700	800
Mez kluzu [MPa]	1100,8	1016,8	933,9	822,4	677,3	713,2	647,4	499,7	321,7

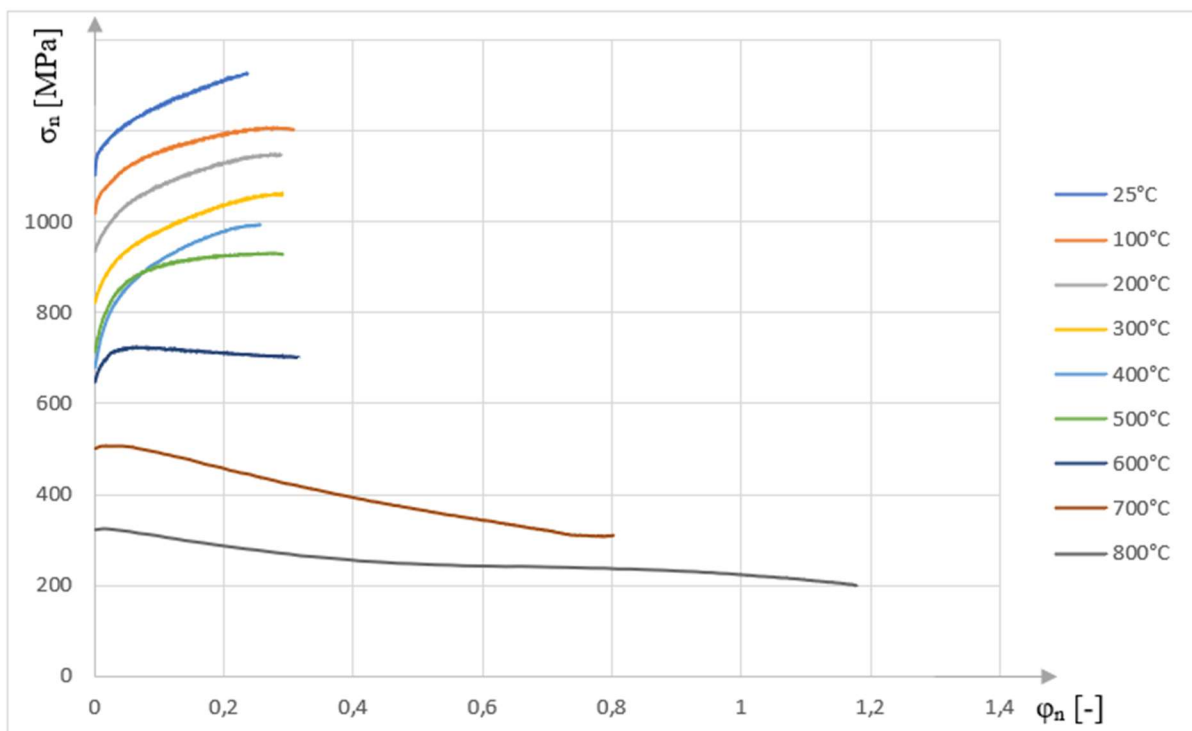
Plastičnost slitiny VT 3-1 je za studena a nízkých teplot velice nízká. Ještě při teplotě 400 °C praskly vzorky při spěchování o cca 5 mm. Oproti tomu plastičnost slitiny za teploty 600 °C a vyšší, je velmi dobrá. O tom svědčí skutečnost, že vzorky při teplotě 600 °C bylo možné napěchovat na výšku 6,2 mm. Při teplotě 800 °C dokonce až na výšku 4,15 mm. U těchto teplot bylo vždy pěchování ukončeno na základě obav z přetížení stroje. Všechny spěchované vzorky jsou vidět na obrázku 51.

Z průběhu křivek zpevnění, viz obrázek 52, je patrné, že vliv teploty na tvářitelnost se projevil až při pěchování za teploty 600 °C. Na základě zkušeností s praskáním vzorků při nízkých teplotách byla zkouška však přerušena dříve, než bylo využito celého přetvoření. Uvedený předpoklad tak nelze dokumentovat. Zdánlivě nelogický pokles hodnoty přirozeného přetvárného odporu při zvyšování deformace, patrný primárně u vzorku při teplotě 700 °C a 800 °C, byl zapříčiněn zvyšováním teploty vzorku během samotného pěchování. Jedná se o tzv. deformační teplo, které ve vzorku zvyšuje teplotu krátkodobě. Je závislé na velikosti teploty pěchování, ale také na velikosti a rychlosti deformace. Za určitých podmínek, hlavně tedy při vyšších teplotách pěchování, může toto teplo ovlivnit přehřátí této alfa plus beta slitiny a může tedy díky tomu dojít i k přeměně původní globulární struktury na strukturu

lamelární s hrubými zrny. Předpokládá se, že teplo taktéž nebude narůstat ve všech částech vzorku stejně a může tedy dojít k nehomogenitě struktury v daném vzorku.



Obr. 51 Pěchované vzorky ze slitiny VT 3-1.



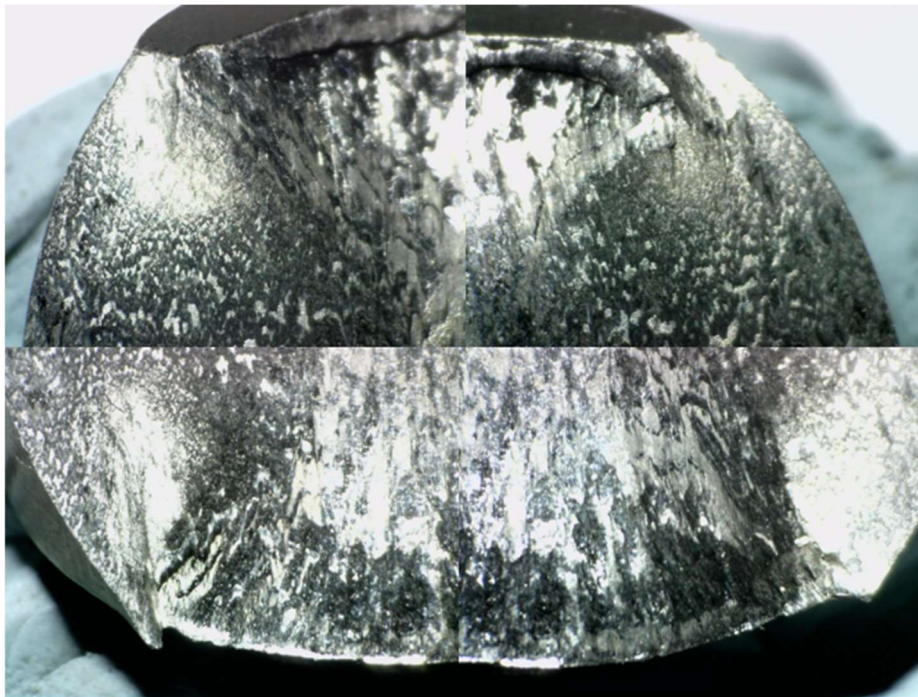
Obr. 52 Křivky zpevnění

U vzorků (1; 11; 13; 14 a 27) primárně pěchovaných za nižších teplot bylo pěchování ukončeno z důvodů prasknutí vzorku. Jedná se o tvárný lom, který ve vzorku vznikl díky výrazné

plastické deformaci, vždy pod úhlem cca 45°. Tvárný lom u vzorku č. 11 lze vidět na obrázku 53. Přiloženy jsou zde i makrofotografie (obr. 54) různých částí vzorku, kde lze vidět morfologii různých částí povrchu lomu s jamkovitým charakterem.



Obr. 53 Tvárný lom u vzorku č. 11



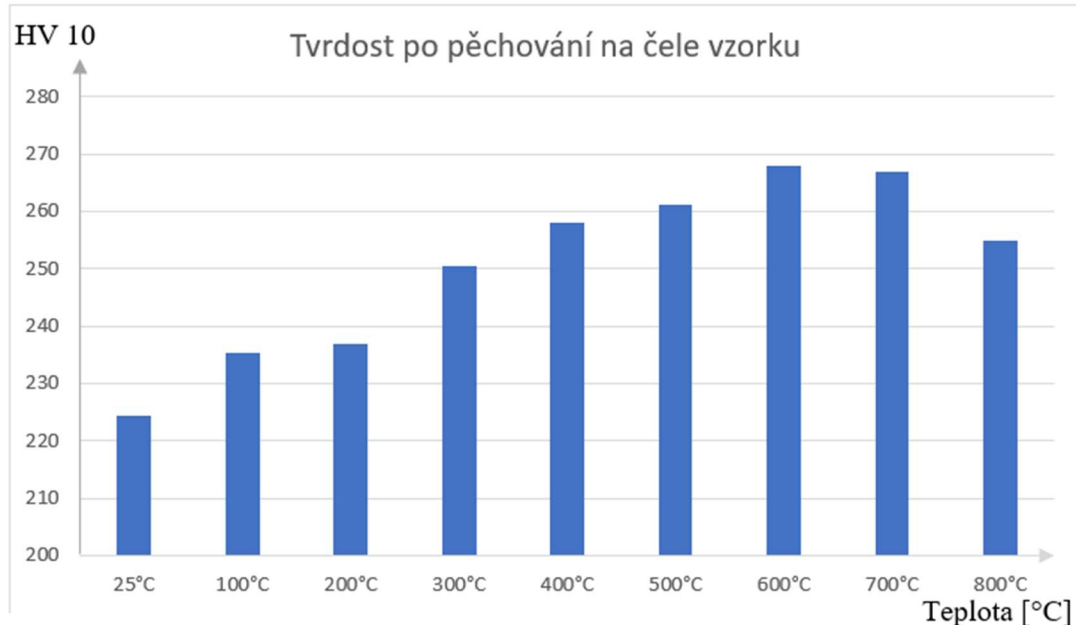
Obr. 54 Makrofotografie částí tvárného lomu

Doplňujícím výstupem experimentální části je porovnání tvrdosti před pēchováním a po pēchování s ohledem na pēchovací teplotu. Tvrdost dle Vickerse se na čelních plochách před pēchováním pohybovala v rozmezí od 213 HV do 217 HV s tím, že nebyl zaznamenán rozdíl mezi tvrdostí na krajích a tvrdostí ve středu čelní plochy vzorku.

Po pēchování byla tvrdost měřena dvakrát. Poprvé na čele vzorku a poté v řezu vzorku. Konkrétní hodnoty tvrdosti lze vidět pro čelo v tabulce 8, respektive pro hodnoty v řezu vzorku v tabulce 9. Hodnoty jsou taktéž vyneseny do grafů na obrázku 55 a 56.

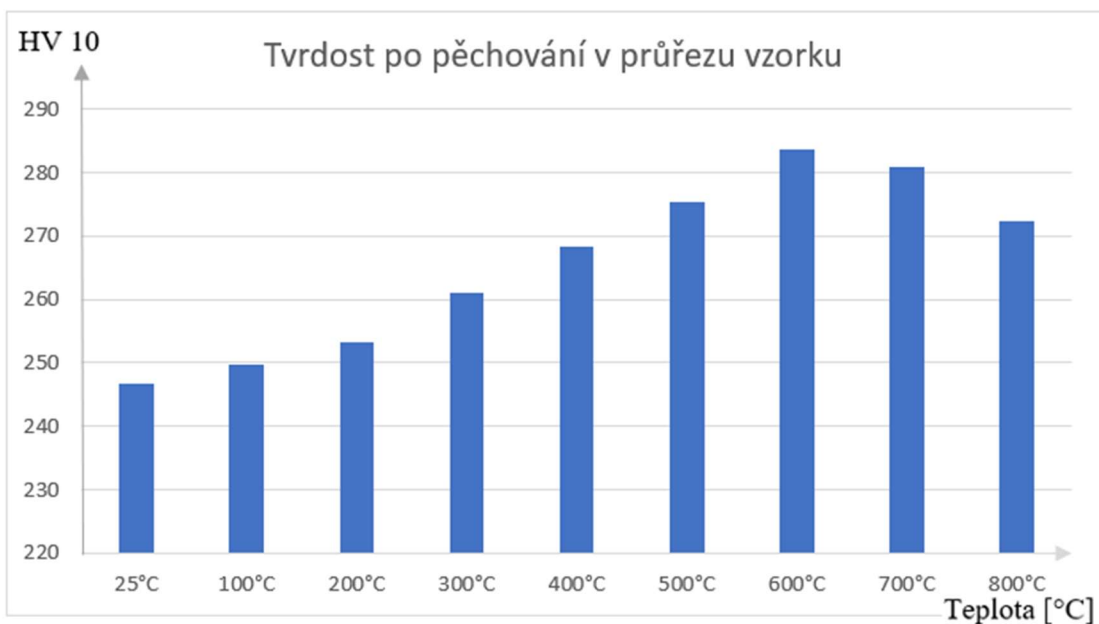
Dle výsledků měření tvrdosti na čele vzorku je zjevné, že vzorek pēchovaný při pokojové teplotě, kde došlo ke zpevnění materiálu při pēchování, má tvrdost vyšší o cca 20 HV než vzorek nepēchovaný. S růstem pēchovací teploty, a tedy primárně větším rozdílem ve spēchování vzorku roste i naměřená tvrdost dle Vickerse. Nejvyšší naměřená tvrdost byla zaznamenána u vzorků s teplotou 600 °C, kde však dochází k citelnému rozdílu ve spēchování

výšky. U teploty 500 °C byly vzorky spěchovány o výšku 6 mm, oproti tomu vzorky za teploty 600 °C až o necelých 14 mm. Což nejspíše vede k netypickému nárůstu pevnosti ve vzorku. U dalších teplot, tedy 700 °C a 800 °C, již nastal menší pokles ve výsledné změřené tvrdosti na čele. Tento pokles je zapříčiněn proběhlou dynamickou rekrystalizací při samotném pēchování za těchto teplot.



Obr. 55 Průměrná tvrdost na čele po pēchování pro jednotlivé teploty

Jelikož je v tělese při pēchování způsobena nehomogenní deformace ve vnitřních oblastech vzorku, byla tvrdost změřena i napříč průřezem vzorku. Stejně jako na povrchu tvrdost netypicky postupně rostla do teploty 600 °C, kde následně nastal pokles z důvodů již zmíněné dynamické rekrystalizace. Hodnota tvrdosti byla vždy ze třech vpichů nejvyšší uprostřed vzorku, což potvrdilo tézi, že se zde nachází pásmo nejintenzivnější deformace v kolmém a osovém směru vzorku. Průměrná tvrdost naměřená v řezu vzorku je vyšší než tvrdost naměřená na čele vzorku, kde lze tento úsek dle literatury charakterizovat malou deformací, která je ovlivněna třecími silami, jež způsobují všestranný tlak.



Obr. 56 Průměrná tvrdost v průřezu po pēchování pro jednotlivé teploty

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo prověřit tvárné vlastnosti titanové slitiny VT 3-1. Jedná se o slitinu Ti-6Al-1,5Cu-2,5Mo-0,3Si-0,5Fe s alfa plus beta fází, která je využívána například v letectví, kosmonautice či chemickém průmyslu. Pro posouzení plastičnosti slitiny byla zvolena pēchovací zkouška při teplotách 25 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C a 800 °C. Na 30 vzorcích, o průměru 16 mm a výšce 20 mm, bylo provedeno vstupní měření geometrie a tvrdosti. Následná zkouška probíhala vždy pro tři vzorky k jedné teplotě.

Mez kluzu stanovená na základě pēchovací zkoušky při teplotě 25 °C byla naměřena 1 100,8 MPa, což je hodnota vyšší než hodnota meze kluzu uváděná v literatuře. Při zvyšování teploty pēchování se její hodnota postupně snižovala. Minimum bylo naměřeno pro vzorek pēchovaný při teplotě 800 °C. Mez pevnosti zde má hodnotu 321,7 MPa. Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že titanová slitina VT 3-1 je vhodná výhradně pro tváření za vyšších teplot. Jako mezní dolní kovací teplotu lze doporučit 700 °C. Nárůst plastičnosti se projevil již při teplotě 600 °C, ale vhodnost doporučit tuto teplotu, jako dolní kovací, by bylo zapotřebí prověřit dalším experimentem uskutečněným s větším počtem vzorků. Na křivkách zpevnění realizovaných při teplotách 700 °C a 800 °C je patrný pokles přirozeného přetvárného odporu. Tento pokles i přes rostoucí deformaci v materiálu zapříčinilo tzv. deformační teplo. Tento jev krátkodobě zvyšuje teplotu vzorku nad teplotu vyhřátou v peci a zlepšuje tak plasticitu materiálu. Oproti tomu materiál za pokojové nebo nízké teploty vykazuje špatnou tvařitelnost zapříčiněnou zpevněním materiálu. Lze spēchovat pouze o malé hodnoty, a navíc má tendenci praskat.

Na závěr experimentální části bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse. Tvrdost byla změřena před pēchováním a po pēchování na čele vzorku. Dále také v průřezu vzorku po pēchování. Provedeny byly vždy tři vpichy – kraj, střed, kraj. Před provedením zkoušky byla stanovena tvrdost slitiny na hodnotu 215 HV. Po pēchování tvrdost na čele při pokojové teplotě vrostla díky deformačnímu zpevnění materiálu na hodnotu 226 HV. Posléze došlo k dalšímu nárůstu tvrdosti až do teploty 600 °C, kde následně nastal pokles tvrdosti díky dynamické rekrytalizaci. Stejně se chovala tvrdost materiálu v průřezu, s tím že nárůst tvrdosti zde byl větší. Tvrdost u pokojové teploty v průřezu pēchovaného vzorku byla stanovena na hodnotu 247 HV. U tvrdosti v průřezu vzorku byla vždy rozdílná tvrdost na krajích a uprostřed průřezu. Tento trend potvrdil tézi, že se ve středu nachází pásmo nejintenzivnější deformace v kolmém a osovém směru vzorku, což se zde projeví nárůstem tvrdosti. Závěrem je nutné podotknout, že netypický vývoj tvrdosti hlavně pro teploty od 100 °C do 600 °C byl zřejmě zapříčiněn hned několika aspekty, mezi které patří nerovnoměrné spēchování u vzorků s různou teplotou, dále také ukončení pēchování při různých podmínkách, tedy prasknutí, přetížení stroje či ukončení pēchování vzorku na základě obav z prasknutí vzorku. Měření tvrdosti by dále bylo přesnější, pokud by bylo provedeno na více vzorcích s větší statistickou váhou.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979. Řada hutnické literatury.
2. Titan. *Wolfsten* [online]. Wrocław: Wolfsten [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://wolften.pl/cs/titan-prvek/>
3. SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. 1963. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.
4. Titanium metal cube 99,7 %. Luciteria Scionce [online]. Olympia: Luciteria Scionce [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://luciteria.com/metal-cubes/titanium-cube>
5. SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy: hutnické výrobky a jejich použití: učební pomůcka pro průmyslové školy a vysoké školy technického směru*. 1957. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Řada hutnické literatury.
6. BT 3-1 kruh pruty. *Evek* [online]. Evek, © 2007-2022 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://eveks.cz/vt3-1-provoloka-krug-prutok.html>
7. Plošné tváření titanu a jeho slitin. *Technický týdeník* [online]. Praha: Business media, 1. 6. 2006 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/plosne-tvareni-titanu-a-jeho-slitin_16621.html
8. Výskyt prvků v zemské kůře. *Prvky* [online]. © 2009-2017 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/zemska-kura.html>
9. LEYENS, Christoph a, Manfred PETERS (eds). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 513 s. ISBN 3-527-30534-3.
10. NĚMEC, Milan a Jaroslav PROVAZNÍK. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04116-1.
11. MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Speciální kovové materiály*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-800-1042-120.
12. KLAPKOVÁ, Alena. *Mechanické vlastnosti titanových slitin*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.
13. Titanium Metals – High purity titanium. *Toho titanium* [online]. Toho titanium, © 2016-2021 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.toho-titanium.co.jp/en/products/hpti.html>
14. OMK. Prestižní ocenění za výzkum titanových slitin. In: *Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova* [online] Praha: Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, 3. listopadu 2015 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://www.mff.cuni.cz/cs/verejnost/aktuality/prestizni-oceneni-za-vyzkum-titanovych-slitin>
15. Nejpevnější slitina titanu světa pomůže medicíně a implantátům lidského těla. In: *City.cz* [online]. Ostrava: City.cz © 2015-2022, 7. 5. 2017 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://jihlava.city.cz/zpravodajstvi/nejpevnejsi-slitina-titanu-na-svete-pomuze-medicine-a-implantatum-lidskeho-tela/10160>
16. Periodická soustava prvků dle IUPAC. Osobní webové stránky Ladislava Nádherného na VŠCHT Praha [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2017 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~nadhernl/psp.html>

17. LI, James C. M. *Microstructure and properties of materials* [online]. Singapore: World Scientific, 2000 [cit. 2022-02-28]. ISBN 98-102-4180-1. Dostupné z: Ebsco
18. HUTCHISSON, James M. The Titan. *Studies in American Naturalism* [online]. Lincoln: The University of Nebraska Press, 2017, 12 (2), 251-253 [cit. 2022-02-28]. ISSN 1931-2555. Dostupné z: Ebsco
19. LOSERTOVOÁ, Monika. *Progresivní materiály: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2575-5.
20. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-807-2315-796
21. ŽÍDEK, Milan, Vladimír DĚDEK a Boris SOMMER. *Tváření oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
22. LENFELD, Petr. *Technologie II. Tváření kovů* [online] Liberec: Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie [cit.2022-04-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#015
23. Tření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99en%C3%AD>
24. LIČKOVÁ, Dagmar. *Vlastnosti a zkoušení materiálu: Cvičení 3. Zkouška tahem* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~lic098/files/3.cviceni_VZM.pdf
25. ČERNOBILA, Lubor. Zkouška pevnosti v tlaku. In: *SlidePlayer* [online]. SlidePlayer, © 2022, 10. 9. 2012 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/1958341/>
26. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
27. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9
28. ŠPRINGL, Sebastian. Slitiny titanu. In: *Slideplayer* [online]. SlidePlayer, © 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3632869/>
29. *Dewetron* [online]. Praha: Dewetron, © 2013 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <http://www.dewetron.cz/>
30. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-704-3417-1.
31. Sensoren. *Burster* [online]. Gernsbach: Burster, © 2022 [cit. 2022-04-25] Dostupné z: <https://www.burster.com/de/sensoren>
32. Support. Dewesoft [online]. Dewesoft, © 2020-2022 [cit. 2022-04-25] Dostupné z: <https://dewesoft.com/>
33. ČVANDA, Petr. Měření tvrdosti v kostce metoda Vickers. In: *Metalco* [online]. Roztoky u Prahy: Metalco testing, © 2022, 21. 4. 2021 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/odborne-clanky/mereni-tvrlosti-v-kostce-metoda-vickers/>
34. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody HE1, HE1-K, (HE2): Sylabus* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, říjen 2003 (doplněno 2019) [cit. Doplněte si datum]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/he1_experimentalni_metody_cviceni_2019_forejt_piska_humar_janicek.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
c	Materiálová konstanta	[-]
d	Průměr polotovaru	[mm]
d _{STŘ}	Střední průřez vzorku	[mm]
d ₁	Délka úhlopříčky při měření podle Vickerse	[mm]
d ₂	Délka úhlopříčky při měření podle Vickerse	[mm]
D ₀	Počáteční průměr vzorku	[mm]
D ₁	Konečný průměr vzorku	[mm]
f	Součinitel tření	[-]
F	Pěchovací síla	[kN]
h	Vztažná výška vzorku	[mm]
h _{min}	Minimální výška vrstvy maziva	[mm]
h ₀	Výška vzorku před pěchováním	[mm]
h ₁	Výška vzorku po pěchování	[mm]
l ₁	Velikost hlavní poloosy oka	[mm]
l ₂	Velikost vedlejší poloosy oka	[mm]
L ₀	Počáteční délka vzorku	[mm]
L ₁	Délka vzorku po přetržení	[mm]
m	Koeficient rychlostní citlivosti deformace	[-]
n	Koeficient deformačního zpevnění	[-]
r	Poloměr	[mm]
s	Dráha	[mm]
S ₀	Počáteční plocha průřezu vzorku	[mm]
S ₁	Konečná plocha průřezu vzorku po zkoušce	[mm]
T	Teplota	[°C]
v _r	Rychlost odpevňovacích procesů	[s ⁻¹]
Z	Kontrakce	[%]
β	Úhel sevřený mezi přímkou a osou x diagramu	[°]
β _x	Koeficient vlivu napjatosti na tvářitelnosti	[-]
Δh	Rozdíl výšek před a po pěchování vzorku	[mm]
ε ₀	Počáteční velikost deformace	[-]
ε ₁	Velikost deformace	[-]
ė	Rychlost deformace	[s ⁻¹]
ė ₀	Počáteční rychlost deformace	[s ⁻¹]
ė ₁	Konečná rychlost deformace	[s ⁻¹]
σ	Napětí v obecném bodě	[MPa]
σ _A	Napětí v bodě A	[MPa]
σ _B	Napětí v bodě B	[MPa]
σ _c	Hodnota napětí v bodě C	[MPa]
σ _d	Deformační odpor	[MPa]
σ _{D0}	Počáteční deformační odpor	[MPa]
σ _{D1}	Deformační odpor	[MPa]
σ _p	Přirozený deformační odpor	[MPa]
σ _r	Napětí v radiálním směru	[MPa]
σ _s	Skutečné napětí	[MPa]
σ _z	Napětí ve směru osy Z	[MPa]

σ_{zmax}	Maximální napětí ve směru osy Z	[MPa]
σ_{zmin}	Minimální napětí ve směru osy Z	[MPa]
σ_{zs}	Střední osově napětí	[MPa]
τ_f	Třecí smykové napětí	[MPa]
τ_{max}	Maximální smykové napětí	[MPa]
φ	Deformace v obecném bodě	[MPa]
φ_A	Deformace v bodě A	[MPa]
φ_B	Deformace v bodě B	[MPa]

Zkratky

Označení	Legenda
Al	Hliník
BCC	Kubická prostorově středěná mřížka
Cr	Chrom
Fe	Železo
FeTiO ₃	Titaničitan železnatý
H	Vodík
HB	Tvrdost podle Brinella
HCl	Kyselina chlorovodíková
HCP	Šesterečná těsně uspořádaná mřížka
HV	Tvrdost podle Vickerse
Mo	Molybden
N	Dusík
Nb	Niob
O	Kyslík
Si	Křemík
Sn	Cín
Ti	Titan
TiO ₂	Oxid titaničitý
V	Vanad
Zr	Zirkon