

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vlastnosti kované slitiny AlMgSi

Properties of forged AlMgSi alloy

AUTOR: Kozáková Veronika

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Horník Jakub, Ph.D.

PRAHA 2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kozáková** Jméno: **Veronika** Osobní číslo: **465359**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vlastností kované slitiny AlMgSi

Název bakalářské práce anglicky:

Properties of forged AlMgSi alloy

Pokyny pro vypracování:

Literární rešerše - slitiny AlMgSi, vlastnosti, použití
Vliv tepelného zpracování na vlastnosti vybrané slitiny
Experimentální část
Vyhodnocení mikrostruktury a vlastností slitiny ve vybraných teplotně-deformačních stavech.
Diskuse výsledků a závěry

Seznam doporučené literatury:

- [1] MICHNA, Štefan. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] SEDLÁČEK, Vladimír. Zotavení a rekrystalizace. Praha: Academia, 1985.
- [3] Joseph R. Davis, J.R. Davis & Associates, Aluminum and aluminum alloys. ASM International. Handbook Committee ASM International, 1993, ISBN 13: 9780871704962

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jakub Horník, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.10.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Jakub Horník, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

29. 10. 2019

Datum převzetí zadání



Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....
Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na slitiny hliníku Al-Mg-Si, jejich mechanické vlastnosti a strukturu. Hlavním cílem je vzájemné srovnání dvou polotovarů vyrobených metodou průtlačného lisování a horizontálního přetlakového lití. Na dodaných vzorcích byla provedena zkouška tahem, zkouška tvrdosti a měření velikosti zrna. V závěru práce je provedena diskuze výsledků. Tato práce vznikla ve spolupráci s firmou Strojmetal Aluminium Forging s.r.o.

Klíčová slova

AlMgSi, slitiny hliníku, EN AW-6082, mechanické vlastnosti, velikost zrna, průtlačné lisování, přetlakové horizontální lití (HCM)

Annotation

The focus of this bachelor thesis is aluminium alloys AlMgSi, their mechanical properties and structure. Main focus of this thesis is mutual comparison of two semiproducts manufactured by extrusion and horizontal casting method. A tensile testing, hardness testing and grain size assessment were done on delivered samples. There is a discussion of the results in the conclusion of the thesis. This thesis was created in cooperation with a company Strojmetal Aluminium Forging s.r.o.

Keywords

AlMgSi, aluminium alloys, EN AW-6082, mechanical properties, grain size, extrusion, horizontal casting method (HCM)

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubovi Horníkovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky v průběhu vypracování práce. Dále bych chtěla poděkovat zaměstnancům Ústavu materiálového inženýrství za přípravu zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku.

Úvod	8
1 Hliník	9
1.1 Historie	9
1.2 Fyzikální vlastnosti	10
1.3 Výroba a těžba výchozích surovin	10
1.3.1 Bauxit	10
1.3.2 Výroba čistého hliníku	11
1.4 Použití v průmyslu	12
1.5 Vliv na zdraví	12
2 Slitiny hliníku	14
2.1 Značení	14
2.2 Dělení	15
2.2.1 Komerčně čistý hliník	15
2.2.2 Tepelně vytvrditelné slitiny	15
2.2.3 Tepelně nevytvrzované slitiny	16
2.2.4 Jiné	16
2.3 Vliv legujících prvků na hliník	17
2.4 Vytvzování hliníkových slitin	18
2.4.1 Tepelnou úpravou	18
2.4.2 Tvářením za studena	19
2.5 Odpeňovací procesy	20
2.5.1 Zotavení	20
2.5.2 Rekrystalizace	21
3 Slitiny Al-Mg-Si	24
3.1 Použití	24
3.2 Tepelné zpracování slitin Al-Mg-Si	24
3.3 Slitina EN AW-6082	25
4 Zkoušení mechanických vlastností	26
4.1 Mechanické vlastnosti	26

4.2	Zkouška tahem	27
4.2.1	Zkušební vzorek	27
4.2.2	Průběh zkoušky	29
4.2.3	Pracovní tahový diagram	30
4.2.4	Vyhodnocení zkoušky	32
4.3	Další zkoušky	36
4.3.1	Zkoušky tvrdosti	36
4.3.2	Zkouška rázem v ohybu	37
5	Praktická část	38
5.1	Výroba vzorků	38
5.2	Tahová zkouška	39
5.2.1	Tahové tyče	39
5.2.2	Průběh tahové zkoušky	40
5.2.3	Výpočty	41
5.2.4	Smluvní tahový diagram	42
5.2.5	Vyhodnocení tahové zkoušky vzorků slitiny EN AW- 6082	42
5.3	Vyhodnocení velikosti zrna	52
5.4	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	57
Závěr		60
List symbolů a zkratk		62
Seznam grafů		63
Seznam obrázků		64
Seznam tabulek		65
Seznam zdrojů		66
Příloha A – Vyhodnocení tahových zkoušek		69
Příloha B – Struktury vzorků po leptání		81

Úvod

V dnešní době se hliník a jeho slitiny těší velmi vysoké oblibě a to zejména pro svůj výhodný poměr fyzikálních a mechanických vlastností. Nachází tak uplatnění v široké škále průmyslových odvětví, mezi které patří průmysl letecký, automobilový, potravinářský či stavební. Právě v automobilovém průmyslu jsou často používány slitiny Al – Mg – Si, o nichž pojednává předložená práce. Tyto slitiny nabízejí relativně vysokou pevnost spojenou s nízkou hmotností a výbornou odolností proti korozi.

Ve své bakalářské práci se budu věnovat mechanickým vlastnostem dvou typů polotovaru slitiny EN AW-6082 a jejich mikrostruktura z hlediska hodnocení velikosti zrna. Konkrétně se jedná o polotovar lisovaný a polotovar vyrobený metodou přetlakového horizontálního lití. Výstupem této práce bude jejich vzájemné porovnání ve všech zmíněných aspektech.

Mezi hlavní cíle bakalářské práce „Vlastnosti kované slitiny Al – Mg – Si“ patří:

- Rešerše na téma hliník, jeho slitiny a jejich vlastnosti a použití
- Tahová zkouška a vyhodnocení pevnostních charakteristik
- Vyhodnocení mikrostruktury z hlediska velikosti zrna
- Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Teoretická část práce bude zaměřena na hliník a jeho slitiny, jejich použití, vlastnosti a technologické postupy vedoucí k jejich změně. Součástí těchto kapitol jsou jmenovitě precipitační vytvrzování, rekystalizace, zotavení a tváření za studena. Teoretická část bude zakončena vybranými zkouškami mechanických vlastností kovů.

V první kapitole praktické části je provedeno vyhodnocení mechanických vlastností zkouškou tahem. Následující kapitola je věnována vyhodnocení velikosti zrna v jádru a na povrchu vzorků obou polotovarů, a to v příčném a podélném řezu. Praktickou část uzavírá zkouška tvrdosti podle Vickerse.

Práce vznikla ve spolupráci s firmou Strojmetal Aluminium Forging s.r.o. Toto téma je dále rozšířeno v diplomových pracích Ing. Toma Procházky a Bc. Radka Bednáře.

1 Hliník

Hliník patří mezi lehké kovy s velmi vysokou tepelnou a elektrickou vodivostí, dobrou odolností proti korozi a vysokou mezí pevnosti při zachování tvárnosti. [1] Byl objeven v roce 1825 dánským fyzikem Hansem Christianem Oerstedem jako prvek s protonovým číslem 13.

1.1 Historie

Úplné počátky využití hliníku spadají až do starověku, kdy ve sloučenině $KAl(SO_4)_2$, zvané taky kamenec, sloužil k ustálení barev při barvení oděvů starověkých Egyptanů 3000 let před naším letopočtem. Peršané zase používali hlínu obsahující křemičitan hlinitý pro její pevnost po vypálení. V kultuře Starověkého Řecka mezi běžně používaná léčiva patřil například síran hlinitý k čištění otevřených ran.

Moderní historie hliníku začíná na počátku 19. století prvními pokusy o jeho výrobu v čisté formě. Ačkoliv se o to pokoušelo už mnoho vědců před ním, prvním úspěšným se stal až roku 1825 Hans Christian Ørsted – fyzik a profesor University v Kodani. Jeho výroba spočívající v reakci $AlCl_3$ s amalgamem rtuti za rapidně zvýšené teploty byla ale příliš náročná a drahá, tudíž pro svoji neefektivitu se příliš neujala. Až o 28 let později německý chemik Wöhler vylepšil tuto metodu a získal tak zrnka čistého hliníku o velikosti špendlíkových hlaviček.

Posledním významným milníkem bylo roku 1886 oznámení postupu výroby čistého hliníku elektrolýzou z oxidu hlinitého (původem z bauxitu), tento postup je finančně nenáročný a používá se hojně dodnes. Za tento přínos v oblasti metalurgie vděčíme dvěma chemikům – Paul Hérault a Charles Martin Hall totiž vypracovali tento postup zcela nezávisle na sobě a publikovali jej téměř ve stejnou dobu.

Zatímco v 19. století měl hliník vyšší hodnotu než zlato a sloužil především jako materiál pro výrobu šperků či příborů pro nejvyšší vrstvy, dnes patří mezi nejhojněji používané kovy, především pro jeho výhodný poměr váhy ku pevnosti.

[2] [3]

1.2 Fyzikální vlastnosti

Svoje dobré plastické vlastnosti za tepla i studena má hliník díky kubické plošně centrované mřížce K12 s parametrem mřížky $a = 0,404958$ nm. Další fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 1)

Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti čistého Al, převzato a upraveno z: [4]

Vlastnosti	Hodnoty
Hustota	2,6989 g/cm ³ (20 °C)
	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivost	247 W/m (25 °C)
Elektrická vodivost	62 % IACS (Al 99,8) 65-66 % IACS (Al 99,999+)
Atomová hmotnost	26,98154
Objemová změna při krystalizaci	6,5 %

1.3 Výroba a těžba výchozích surovin

Hliník patří mezi nejrozšířenější prvky v zemské kůře, ačkoliv se nenachází v ryzí formě, ale pouze ve velmi početných sloučeninách – až 250 různých minerálů, např. korund, diaspor, boehmit, spinel, ... Nejvýznamnější sloučeninou pro získávání hliníku je bauxit. [1] [4]

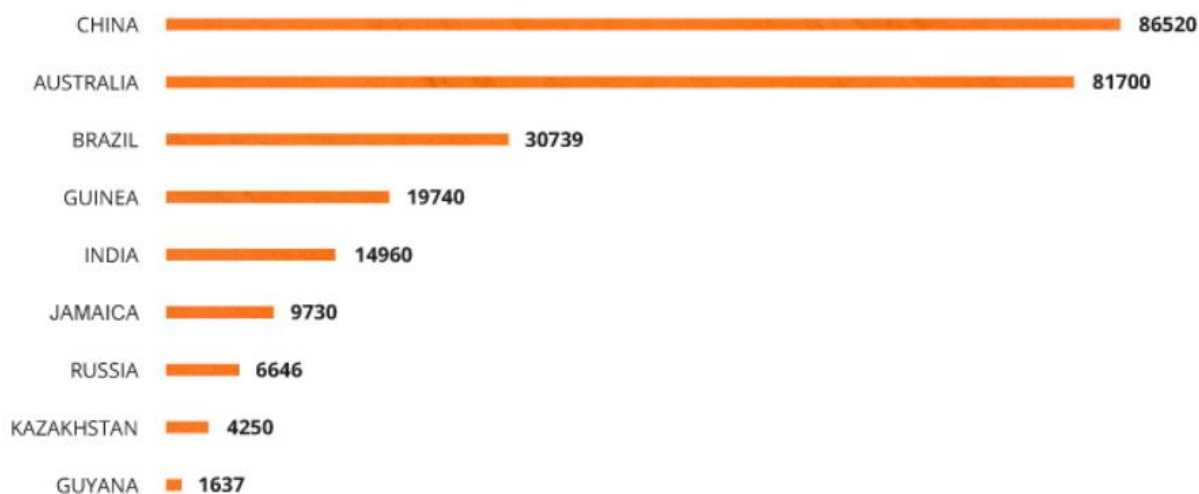
1.3.1 Bauxit

Bauxitem se rozumí nejčastěji cihlově červená hornina, složená většinou z hydratovaných oxidů hliníku, jako jsou gibbsit, boehmit a diaspor, obsahuje také minoritní složky a minerální nečistoty. [4]

Bauxity dělíme podle původu na lateritické, karstové, či usazeninové.

- **Lateritické** vznikají zvětráváním a zastupují až 86 % celkového množství bauxitu. Nejčastěji se vyskytují v rovníkových oblastech.
- **Karstové** nalézáme dále od rovníku v krasových oblastech Evropy, Číny a pacifické oblasti. Jejich podíl dosahuje 13 % celkového množství.
- **Usazeninové** tvoří pouhé jedno procento a jejich naleziště se nachází v evropské oblasti. [4]

Podíl na těžbě největších producentů je uveden na Obrázku 1.



Obrázek 1: Největší světoví producenti bauxitu pro rok 2014 [5]

1.3.2 Výroba čistého hliníku

1.3.2.1 Získání čistého oxidu hlinitého

První fází získávání čistého hliníku je výroba oxidu hlinitého Al_2O_3 z vytěžené horniny. Nejčastější způsob je zásaditý – tzv. Bayerova metoda:

Hydrát oxidu hlinitého obsažený v bauxitu se při vysokých teplotách velmi snadno rozpouští v koncentrovaném roztoku hydroxidu sodného. Po následném snížení teploty a zvýšení koncentrace dojde ke krystalizaci čistého hydrátu oxidu hlinitého. Zbytek sloučenin z bauxitu známý jako rudý kal je vyfiltrován a odveden z autoklávu ven. Následnou kalcinací je odstraněna voda z hydrolátu a získán čistý oxid hlinitý Al_2O_3 .

1.3.2.2 Výroba surového hliníku

Vyčištěný oxid hlinitý dále putuje do elektrolytické pece spolu s roztaveným kryolitem o teplotě $960\text{ }^\circ\text{C}$. Dno pece pracuje jako katoda, anodu zastávají uhlíkové tyče spuštěné do taveniny. Při rozkladu se surový hliník usazuje na katodě – dně pece, odkud je odveden ven, zatímco kyslík se vylučuje na anodách, jenž opaluje a způsobuje tím velký úbytek uhlíkových tyčí. [1] [5] [6]

Tímto způsobem získáváme hliník o čistotě nejméně 99,5 %, což stačí pro všechny účely kromě elektrotechnických, pro něž se musí hliník ještě elektrolyticky rafinovat. [1] [5] [6]

1.4 Použití v průmyslu

Doprava

Díky svému výhodnému poměru pevnosti ku váze je hliník používán ve všech oblastech dopravy, nejčastěji pak v leteckém průmyslu, kde tvoří až dvě třetiny užitých materiálů. [4] Díky své nízké váze pak nachází hodně uplatnění při konstrukcích rychlovlaků, kde lehčí souprava vlaku znamená menší spotřebu paliva. [7]

Stavební průmysl

Stavební průmysl je druhý nejvýznamnější spotřebitel hliníku. Nejvíce se slitiny hliníku uplatňují při výrobě průmyslových fasádních prvků – trubek a profilů a oken, skříní, dveří a střešních krytin. [4]

Potravinářský průmysl

Největším pozitivem hliníku v potravinářském průmyslu je možnost vyválnování velmi tenké folie s dobrou bariérovou vlastností a nízkou hmotností, známou jako alobal. Využívá se jak pro balení a uchovávání potravin, tak pro jejich přenos. [4]

Další využití

Dalšími odvětvími s vysokým uplatněním hliníku jsou:

- strojírenství, kde se využívá pro výrobu jednotlivých součástek i celých strojů, či zařízení. [4]
- elektrotechnický průmysl, kde, přestože hliník vede o 37 % méně než měď, se využívá na dlouhá elektrická vedení díky své nízké hmotnosti.
- spotřební elektronika, nejčastěji v moderních přenosných zařízeních, kde hliník zajišťuje sofistikovaný vzhled, a přesto vysokou odolnost. [7]

1.5 Vliv na zdraví

Referenční hodnota pro běžný výskyt hliníku v těle se měří z moči a obecně by neměla překročit hodnotu 15 μg na 1 liter. Zvýšené hladiny tohoto prvku v těle se odečítají z kreatinu (směs aminokyselin obsažené nejčastěji ve svalech jedince, odkud se potom vyplaví vylučovací soustavou ven z těla) obsaženém v moči. Nejvyšší nezávadná hodnota rovnající se 50 μg na 1 g kreatinu v moči bývá zpravidla překročena převážně

u pracovníků pravidelně vystavených přímému kontaktu s hliníkem. Často bývá překročena hranice až 100 μg na 1 gram kreatinu v moči. Tyto osoby vykazují v neuropsychologických testech zhoršenou paměť, soustředění a schopnost se učit. Zvýšený obsah hliníku byl naměřen také v mozkové tkáni osob trpících Alzheimerovou chorobou, ač není známo, zda je choroba příčinou zvýšených hodnot, či obráceně. [8]

V každodenním životě se hliníku vystavujeme sami například ve formě antiperspirantů nebo jednorázového hliníkového nádobí. U obou těchto výrobků se stále zkoumá dopad na lidské zdraví a vstřebávání hliníku do těla. Konkrétními příklady jsou studie spojitosti rakoviny prsu s pravidelným používáním antiperspirantů či výzkum chemické stability jednorázového hliníkového grilovacího nádobí při vystavení solím a kyselinám. [8] [9]

2 Slitiny hliníku

2.1 Značení

V technické praxi podléhá značení slitin normám, jmenovitě normy ČSN a ČSN EN, podle nichž lze slitiny hliníku značit dvěma způsoby:

Číselné označování: V případě ČSN označujeme slitiny šestimístnou číslicí, např. ČSN 42 4203, tuto slitinu dále označujeme podle normy ČSN EN jako EN AW-2024. Po písmenech EN následuje písmeno *A*, které znázorňuje hliník a písmeno *W* stojí za tvářeným výrobkem. Dalšími variantami by pak mohly být:

- Legované i nelegované ingoty na přetavení – *B*
- Odlitky – *C*
- Předslitiny – *M*

[4] [10] [11]

Chemické označování: Dle normy ČSN EN lze číselné označení doplnit chemickým složením odděleným hranatými závorkami. Značení výše zmíněné slitiny by pak vypadalo následovně: EN AW-2024 [Al Cu4Mg1]. Čísla u jednotlivých prvků značí hmotnostní procenta podílu jejich obsahu v dané slitině. Nejvyšší počet prvků uvedených v chemickém značení je roven čtyřem a na prvním místě je vždy uvedeno Al – hliník, po mezeře následují legující prvky. [4] [10] [11]

Spolu s výše popsaným značením lze v názvu slitiny uvést její stav podle předchozího zpracování:

- Slitiny tvářené bez specifikace mechanických vlastností – *F*
- Slitiny ve stavu žíhaném s nízkou mezí pevnosti – *O*
- Ve stavu deformačně zpevněném u výrobků tvářených za studena nebo po tvářením za tepla, po písmenu *H* ale ještě následují dvě číslice, definující způsob zpracování a stupeň deformačního zpevnění.
- V nestabilním stavu po rozpouštěcím žíhání u slitin, stárnoucích při normální teplotě – *W*
- Ve stavu tepelně – mechanicky zpracovaném, nejčastěji precipitačním vytvrzením – *T*

[4] [10] [11]

2.2 Dělení

V této práci budu dále slitiny dělit na řady dle chemického složení a možnosti tepelné úpravy.

2.2.1 Komerčně čistý hliník

Řada 1xxx neboli také komerčně čistý hliník, je řada s obsahem uhlíku 99 % nebo výše. Vyznačuje se vysokou odolností proti korozi a výbornou tepelnou a elektrickou vodivostí. Jako příklad zde můžeme uvést slitinu 1350, používanou pro elektrické rozvody. [12] [13]

2.2.2 Tepelně vytvrditelné slitiny

Postupem složeným z rozpouštěcího žíhání, rychlého ochlazení a stárnutí je možné dosáhnout méně rovnovážného stavu struktury a tím i požadované vyšší pevnosti slitin. Aby vytvrzení bylo možné, musí mít legující prvky dostatečnou rozpustnost v tuhém hliníku. [14]

Řada 2xxx

Hlavním legujícím prvkem v této řadě slitin je měď. Slitiny se vyznačují dobrým poměrem houževnatosti a pevnosti a jejich tepelnou úpravou můžeme dosáhnout velmi vysoké pevnosti v celém objemu výrobku. Jejich nevýhodou je špatná odolnost proti atmosférické korozi. Nejrozšířenější slitinou této řady je EN AW-2024, používaná v leteckém průmyslu. [12] [13]

Řada 6xxx

Dva hlavní legující prvky – křemík a hořčík vytvářejí ve slitinách této řady silicid hořečnatý. Slitiny disponují dobrou tvářitelností a svařitelností, vysokou odolností proti korozi a průměrnou pevností. Nejpoužívanější slitinou řady je slitina EN AW-6061, využívaná na rámech lodí a nákladních vozidel. [12] [13] [4]

Řada 7xxx

Ve slitinách této řady nacházíme jako primární legující prvek zinek, dále v menším množství hořčík. Dalšími prvky, které se přidávají, jsou měď a chrom. Výsledkem jsou velmi pevné slitiny. Mezi nejznámější z nich patří EN AW-7075, rozšířená v leteckém průmyslu. [12] [13] [4]

2.2.3 Tepelně nevytvrzované slitiny

Zpevnění u těchto slitin dosáhneme pouze tvářením za studena. To zvyšuje počet dislokací a vakancí v kovu. Tento efekt podporuje například hořčík jako legující prvek. [13]

Řada 3xxx

Tyto slitiny jsou legovány primárně manganem, ačkoliv jen v omezeném množství, a často také malým množstvím hořčíku. Hojně využívanou slitinou je EN AW-3003, která je oblíbená pro svou dobrou tváritelnost a pevnost, setkáváme se s ní v tepelných výměnících a kuchyňském nádobí. Další známou slitinou je EN AW-3004, využívaná pro výrobu plechovek. [12] [13] [4]

Řada 4xxx

Přidáním křemíku vzniká slitina s nízkou teplotou tavení, bez nežádoucí křehkosti. Výsledkem jsou slitiny vhodné k použití na svářecí a pájecí dráty. Například pro svařování slitin řady 6xxx, používaných pro automobilový průmysl, se osvědčila slitina EN AW-4043. [12] [13] [4]

Řada 5xxx

Hořčík používaný v těchto slitinách patří mezi nejvýznamnější legující prvky hliníkových slitin. Slitiny disponují průměrnou až vysokou pevností, dobrou svařitelností a odolností proti korozi v mořském prostředí. Díky této kombinaci vlastností nacházejí uplatnění v konstrukcích budov, nádrží, tlakových nádobách a mořských aplikacích. Příklady použití jsou EN AW-5052 v elektronice, či EN AW-5083 ve víccích plechovek. [12] [13] [4]

2.2.4 Jiné

Jako poslední uvedu řadu 8xxx, do níž patří slitiny s jinými příměsemi nebo kombinacemi příměsí, než je uvedeno výše v jiných řadách. Za zmínku stojí například slitiny s lithiem, hojně používané pro letecký průmysl díky své vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. Běžně tyto slitiny obsahují 2-3 % lithia a malé množství mědi a hořčíku. [12] [15]

2.3 Vliv legujících prvků na hliník

- **Křemík** se přidává hlavně do slévárenských slitin hliníku, snižuje totiž teplotu tavení a smršťování odlitku, zlepšuje tekutost a zvyšuje pevnost finálního výrobku. Jeho celkové množství ve slitině může sahát až k 13,5 %.
- **Měď** ve slitinách hliníku zvyšuje jejich mez pevnosti v tahu, únavovou pevnost a tvrdost. Na druhou stranu ale snižuje svařitelnost, kujnost a odolnost proti korozi. Přidává se do slitin v množství až 6,8 % celkové hmotnosti. Slitiny hliníku s mědí patří mezi precipitačně vytvrditelné.
- **Mangan** svým přidáním do slitin hliníku způsobuje zvýšení pevnosti a tvrdosti, na rozdíl od mědi ale nesnižuje kujnost a korozivzdornost, právě naopak. Ve slitinách může být zastoupen až z 1,5 %.
- **Zinek:** Přidání zinku do slitin hliníku v kombinaci nejčastěji s hořčíkem a mědí umožňuje jejich tepelné zpracování a tím dosažení vyšší pevnosti. Bohužel se jeho přidáním slitiny stávají náchylnějšími ke koroznímu praskání a snížení houževnatosti. Obsah zinku ve slitinách dosahuje až 7,3 %.
- **Hořčík** umožňuje vyrábět velmi pevné slitiny i bez následného použití tepelného zpracování. Jelikož se vytvrzují tvářením za studena, nejsou příliš vhodné pro operace jako je protahování nebo protlačování, nejčastěji se s nimi setkáváme v podobě plechů a desek. Přidáním hořčíku tedy zvyšujeme pevnost a tvrdost. Udávaný obsah ve slitinách se pohybuje do 5,5 %.
- **Chrom** se kromě zvýšení odolnosti proti korozi přidává také pro svou schopnost regulovat intenzitu růstu zrna a zabránit rekrystalizaci při tepelném zpracování ve slitinách s hořčíkem a křemíkem, či hořčíkem a zinkem. Maximální přidané množství se pohybuje okolo 0,3 %.
- **Lithium** je velmi lehký prvek a jeho přidáním výrazně klesá hmotnost výsledných výrobků. Kromě snížení hustoty také zvyšuje schopnost slitin vytvrzení a Youngův modul elasticity. Přidává se v malých množstvích do 2,6 %. Slitiny, ve kterých je obsažen, činí precipitačně vytvrditelné.
- **Nikl** se používá jako legující prvek u slitin Al – Cu a Al-Si, u nichž zvyšuje tvrdost a pevnost při zvýšených teplotách. Jeho zajímavou vlastností je schopnost snížení koeficientu teplotní vodivosti. Ve slitinách zastává až 2 % hmotnosti.
- **Titan** přidáváme do slitin pouze ve stopovém množství do cca 0,35 % pro jeho schopnost zjemňovat zrno. [16] [17] [18]

2.4 Vytvrzování hliníkových slitin

2.4.1 Tepelnou úpravou

Jedním ze způsobů, jak u hliníkových slitin dosáhnout příznivějších mechanických vlastností, je tzv. **precipitační vytvrzování**. Tímto názvem souhrnně označujeme sled tepelných úprav, které jsou blíže popsány níže. Pod pojmem precipitace si můžeme představit rozpad přesyceného tuhého roztoku při ohřevu na teplotu nižší než teplota solidu a její princip byl objeven roku 1938 dvěma fyziky Guinierem a Prestonem. [20]

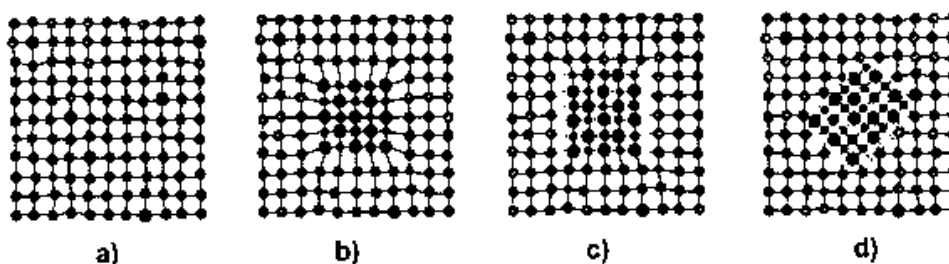
- Rozpouštěcí žíhání – tímto prvním krokem se roztok ohřátí na teplotu u většiny hliníkových slitin odpovídající 10–15 °C pod teplotou solidu za účelem rozpuštění obsažených legujících prvků v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$. Vzniká homogenní struktura stabilní pouze za této zvýšené teploty připravená pro další zpracování. Je vyžadována vysoká přesnost regulace teplot pecí (až ± 3 K), aby byla dosažena dostatečně vysoká teplota, zároveň ale nedošlo k natavení hranic zrn. [19] [20]
- Rychlé ochlazení – rychlým ochlazením vzniká metastabilní přesycený tuhý roztok. Ochlazovat je možno ve vodě, některé výrobky i na vzduchu. Příliš pomalé ochlazení by mohlo vést k vytvoření tzv. segregátu na hranicích zrn a tím snížení houževnatosti a jiných mechanických vlastností slitiny, proto je důležité zajistit proudění chladicí kapaliny mícháním nebo pohybem výrobků v chladicí nádrži. Výsledná struktura vzniklého přesyceného tuhého roztoku je relativně měkká a tvárná. [19] [20] [21]
- Stárnutí – jedná se o nejvýznamnější část celého procesu, při které dochází ke zvýšení tvrdosti. Dochází při něm k rozpadu přesyceného roztoku a podle teploty, za které probíhá, jej rozlišujeme na stárnutí přirozené a umělé. Zatímco přirozené stárnutí probíhá za pokojové teploty, při stárnutí umělém je nutno zvýšit teplotu na 90–200 °C, čímž je urychlen proces difúze, a tudíž i precipitace. [21]

Samotný proces precipitace lze rozdělit do několika fází. Ve fázi první dochází ke shlukování legujícího prvku do mikroskopických oblastí, kde vlivem zvýšené koncentrace těchto přísad vzniká zárodek nové fáze. Tyto koherentní precipitáty postupně rostou a dosahují podlouhlých diskovitých tvarů, označované názvem Guinier – Prestonovy zóny. [20] [21]

V navazující fázi precipitáty postupně ztrácí koherenci – návaznost na základní krystalovou mřížku tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. Tímto vznikají semikoherentní oblasti, stále ještě částečně navazující na základní mřížku. V této fázi jsou slitiny obvykle nejpevnější.

Poslední fáze se nazývá přestárnutí, tj. úplná ztráta koherence precipitátu, což je většinou nežádoucí jev, při kterém výrazně klesají pevnost a tvrdost. Tomuto stavu lze předejít dodržением vhodných teplot a časů vytvrzování. [19]

Jednotlivé struktury v po sobě následujících fázích vytvrzení jsou znázorněny na Obrázku 2.



Obrázek 2: Vyloučení precipitační fáze: a) tuhý roztok; b) koherentní precipitát; c) semikoherentní precipitát; d) nekoherentní precipitát [19]

2.4.2 Tvářením za studena

Tvářením za studena rozumíme plastickou deformaci materiálu při teplotě nižší, než $0,35-0,45 T_T$ [K.] Při plastické deformaci za studena dochází v materiálu kromě deformace zrn do typické vláknité struktury i k pohybu dislokací, nejčastěji ke kluzu, při vyšších rychlostech deformace pak také ke dvojčatění. Při svém pohybu dislokace naráží na překážky, u nichž se ukotvují do momentu, než dojde k navýšení vnitřního napětí natolik, aby mohla být překážka překonána. Pokud se dislokace nezastaví, dorazí až k hranici zrna, zastavit ji však mohou intersticiální a substituční atomy cizích prvků, karbidy či precipitáty. Rostoucí počet dislokací a jejich měnící se konfigurace vede ke zvýšení pevnosti materiálu, zároveň se však snižuje jeho tažnost. Část deformační práce se v materiálu přemění na uloženou energii (nejčastěji uložené ve zvýšené hustotě dislokací), čímž se materiál stává termodynamicky nestabilní. [22] [24]

Výhodami tvářením za studena kromě zpevnění materiálu jsou vysoká kvalita povrchu a přesnost rozměrů. Na druhou stranu je třeba použít velké deformační síly. [24]

Vyjádření velikosti deformace

V praxi mezi sebou stupně deformace odlišujeme použitím tzv. poměrné deformace – podílu změny tvářeného objemu ku objemu počátečnímu. Při válcování plechů či pásů lze však deformaci vyjádřit pouze na základě změny tloušťky či délky a druhý rozměr tím zanedbat. Můžeme se tak setkat se zápisem poměrné deformace v procentech, jenž je spočítána z úbytku tloušťky. [24]

2.5 Odpevňovací procesy

Po tváření za studena se materiál nachází v nestabilním stavu. Odpevňovacími procesy rozumíme dosažení rovnovážného stavu pomocí zvýšení teploty a tím snížení koncentrace bodových a čarových poruch či rekrystalizace zrn. [23]

2.5.1 Zotavení

Zotavením se rozumí tepelná úprava slitin za účelem snížení koncentrace bodových poruch v krystalové mřížce či hustoty dislokací a změny jejich uspořádání. Tímto procesem dochází k uvolnění uložené energie, zmírnění vnitřního napětí v materiálu a jeho částečnému odpevňování, jež například u hliníku může dosáhnout hodnoty až 40 %. [22] [23]

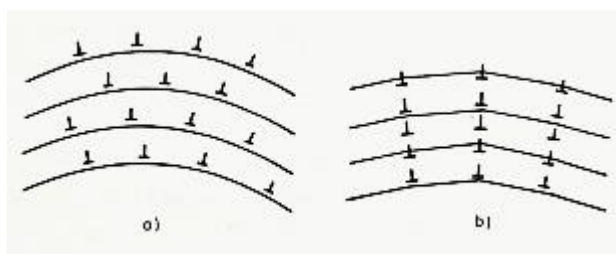
Prvním stádiem zotavení je postupné odstraňování bodových poruch v mřížce, jehož lze dosáhnout několika způsoby:

- Setkáním vakance a intersticiálu a jejich anihilací, způsobenou zvýšenou teplotou
- Pohybem poruch k norům (místům, kde zanikají bodové poruchy), jimiž mohou být hranice zrn, volné povrchy nebo dislokace
- Dočasným zachycením v pastech, například ve shlucích vad či atomech příměsi, takové zachycení funguje tak, že celková entalpie soustavy vakance + atom příměsi je nižší než součet entalpií obou uvedených zvlášť, protože je snížena o vazebnou energii. [22] [23]

Rychlost zotavování bodových poruch je exponenciálně závislá na teplotě zotavení, která je pro slitiny volena 0,25-0,30 teploty tání v kelvinech. [22] [23]

K dalšímu stádiu zotavení zvaném polygonizace dochází zejména u kovových materiálů s vysokou energií vrstevné chyby, mezi něž patří i hliník a jeho slitiny. V první fázi tohoto jevu dochází ke změnám mechanických vlastností materiálu v důsledku snížení koncentrace hranových dislokací v deformovaných buňkách a změně jejich uspořádání

do stěn kolmých na skluzovou rovinu. Uspořádáním hranových dislokací pod sebe vznikají tzv. subzrna (někdy nazývaná také žíhací buňky), v rámci nichž jsou atomy kovů uspořádány do téměř dokonalé mřížky (Obrázek 3). Zároveň je snížena uložená energie v podobě energie pružné deformace mřížky. V druhé fázi dochází k spojování subzrn a pohybům subhranic mezi nimi. [22] [23]

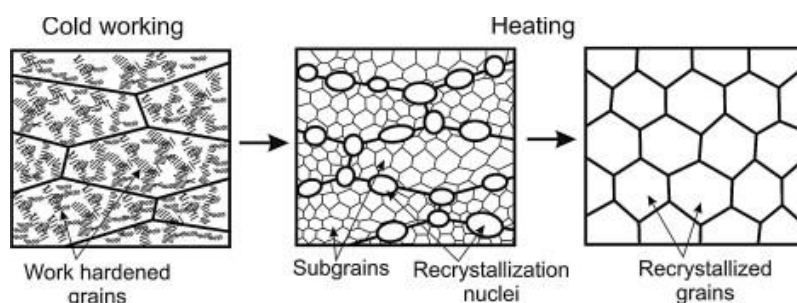


Obrázek 3: Schématická představa polygonizace. a) náhodné uspořádání hranových dislokací b) vznik buněk uspořádáním hranových dislokací do řad nad sebou

K procesu polygonizace je zapotřebí vyšší teploty než k odstraňování bodových poruch, stále ale musí zůstat pod rozmezím teplot rekrytalizace. [22] [23]

2.5.2 Rekrystalizace

Rekrystalizací nazýváme děj, „při němž se ve většině případů dávají pohybu velkoúhlové hranice zrn, které migrují z míst s nižší dislokační hustotou do míst, kde je hustota dislokací vyšší.“ [22] Při jejich pohybu jsou dislokace hranicemi absorbovány (tzv. zametání dislokací). V průběhu tohoto procesu se postupně snižuje koncentrace dislokací na hodnotu, kterou materiál vykazoval před deformací za studena. Podobných hodnot jako před plastickou deformací dosahují i mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, tažnost, houževnatost, ...). Celý děj, jehož schéma je znázorněno na Obrázku 4, probíhá za teplot $0,35- 0,45 T_T$ [K] a může být dále rozčleněn na rekrystalizaci primární a sekundární. [22] [23] [24]



Obrázek 4: Schématické znázornění statické diskontinuální rekrystalizace při žíhání materiálu zpevněného tvářením za studena, převzato z: [25]

Primární rekrytalizace

Primární rekrytalizací se rozumí proces, při kterém dochází k tvorbě zárodků nových nedeformovaných zrn na úkor těch původních. Tato nukleace je spojena s koalescencí (splýváním) subzrn, pohybem velkoúhlových hranic nebo jejich natáčením. Děj primární rekrytalizace se pak řídí podle tří základních modelů:

- Model růstu subzrn migrací jejich hranic – zárodky nových zrn vznikají v místech menších zotavených subzrn. Maloúhlové hranice se pohybem spojují mezi sebou a vytváří hranici velkoúhlovou.
- Model koalescence subzrn popisuje rozpad subhranic spolu s natáčením subzrn a vyrovnáním úhlů mezi jejich mřížkami. Závěrem po obvodu spojených subzrn vzniká velkoúhlová hranice.
- Model deformačně podmíněné migrace hranic zrn znázorňuje vychýlení části původní hranice do tvaru kulového vrchlíku, ten pak při migraci oblastí s vyšší hustotou dislokací tyto poruchy mřížky smete s sebou a dává prostor vzniku zárodků nových zrn.

Proces primární rekrytalizace je ukončen fází růstu zrn, která mohou dosáhnout velikosti až několik desítek μm . [22] [23] [24]

Sekundární rekrytalizace

Druhé stádium rekrytalizace spočívá ve hrubnutí některých zrn na úkor jiných, což je ve většině případů nežádoucí jev, jemuž se snažíme vyhnout. Může však nalézt využití například při záměrné tvorbě hrubozrnné struktury. Výsledná nehomogenní struktura obsahující směs velkých a malých zrn není vhodná pro další tváření (například tažení drátů) z důvodu nízké pevnosti. [22] [23] [24]

Faktory ovlivňující výslednou strukturu po rekrytalizaci

- Doba a teplota: v technické praxi vládne snaha o rekrytalizaci materiálu za co nejvyšší teploty a co nejkratší doby.
- Rychlost ohřevu: čím rychleji ohřejeme daný materiál, tím více bude výsledná struktura jemnozrnná.
- Stupeň deformace: při velmi malých deformacích může po rekrytalizaci zůstat velmi hrubá struktura. Hraniční hodnotu deformace, po níž při rekrytalizaci extrémně hrubne zrno, označujeme jako kritickou deformaci. Vyšší stupeň

deformace pak snižuje energii potřebnou k rekrystalizaci, čímž umožňuje vzniknout většímu počtu zárodků. Výsledkem jsou pak zrna jemnější než po menších deformacích.

- Druh materiálu a jeho čistota: ve slitinách precipitačně vytvrzených, kovech s vysokou energií vrstevné vady, které prodělaly polygonizaci nebo slitinách obecně obsahujících stopové prvky atomů příměsi můžeme pozorovat zvýšenou potřebnou energii pro vznik rekrystalizačních zárodků. Důvodem je brždění pohybu dislokací a hranic mezi zrny právě částicemi odlišnými od základní mřížky kovu (například u slitin Al – Mg – Si se jedná o nekoherentní precipitát Mg_2Si). Proces rekrystalizace je tím potlačen. [22] [23] [24]

3 Slitiny Al-Mg-Si

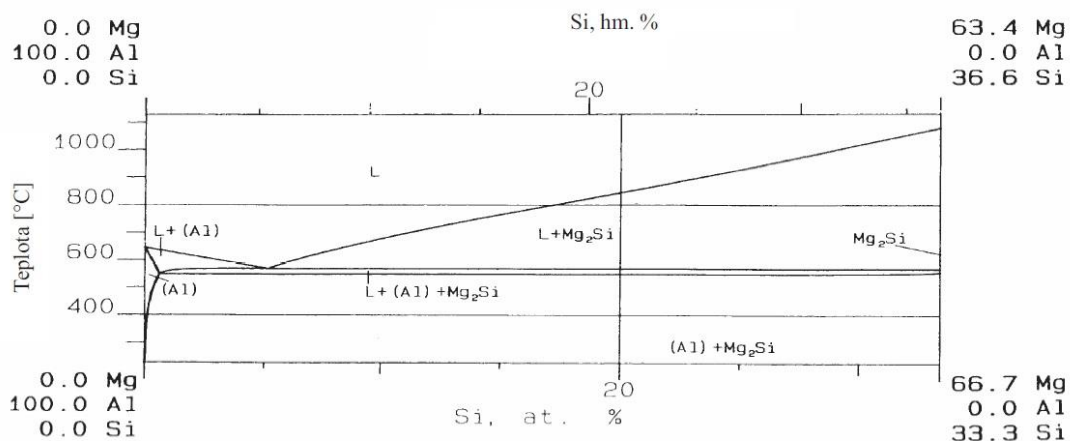
Tyto slitiny patřící do řady 6xxx obsahují kromě hliníku hořčík a křemík ve formě krystalů intermetalické fáze Mg_2Si a atomárního křemíku. Pokud se ve složení vyskytuje mangan, může být přítomna i fáze Al_6Mn . Jsou využívány zejména pro svou výbornou schopnost ke tváření, dobrou svařitelnost, vynikající odolnost proti korozi, a to i v mořském prostředí a v neposlední řadě pro svou mechanickou obrobiteľnost při středních pevnostních vlastnostech. [4]

3.1 Použití

Slitiny Al – Mg – Si nachází pro svou vysokou pevnost uplatnění v oblastech dopravy ve formě komponentů v dopravních prostředcích, můžeme je však také nalézt v součástech mostních konstrukcí a jako podpůrné prvky v architektuře. Pro svou nízkou hustotu, a tudíž nízkou váhu jsou používány i například v rámech jízdních kol či jiném sportovním náčiní. [4]

3.2 Tepelné zpracování slitin Al-Mg-Si

Slitiny této řady patří vzhledem k vytváření intermetalické fáze silicidu hořečnatého Mg_2Si mezi tepelně vytvrditelné. Tato schopnost je zajištěna klesající rozpustností dané fáze v závislosti na teplotě (viz. diagram na Obrázku 5). Díky obsahu zmíněné intermetalické fáze jsou některé tyto slitiny vytvrditelné i na vzduchu (tj. schopny zpevnění při ochlazování na vzduchu po ohřátí na vytvrzovací teplotu), čehož se využívá při precipitačním vytvrzování tenkých součástí, výrobky větších rozměrů se pak ochlazují ve vodě. Je však třeba vzít v potaz, že Mg_2Si vytváří destičkový nekoherentní precipitát, který zvyšuje teplotní hranici případné rekrystalizace natolik, že při teplotě k ní potřebné mohou hrubnout částice precipitátu. [4] [23] [26]



Obrázek 5: Kvazibinární řez systémem Al – Mg – Si od Al k Mg₂Si [4]

3.3 Slitina EN AW-6082

Slitina EN AW- 6082 (chemické složení uvedeno v Tabulce 2) patří do tepelně upravitelných hliníkových slitin. Pro svou pevnost a nízkou váhu nachází uplatnění v lehkých konstrukcích zejména v oblastech strojírenství a automobilového průmyslu, či stavebního průmyslu. [20]

Pro dosažení potřebné pevnosti a jiných vlastností je nutné vytvoření určitého množství intermetalické fáze silicidu hořečnatého neboli Mg₂Si, čímž slitiny této řady získají dobrou tvářitelnost, svařitelnost a odolnost vůči korozi. Všechny fyzikální, mechanické či chemické vlastnosti lze měnit škálou technologických procesů či tepelným zpracováním. [4] [26]

Tabulka 2: Chemické složení slitiny EN AW- 6082

Chemický prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
Podíl v procentech	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,2	0,1

4 Zkoušení mechanických vlastností

Abychom byli schopni mechanické vlastnosti materiálů reprodukovat a porovnat, musí být postup a podmínky všech zkoušek jednotné, proto podléhají technickým normám. [27] V následujících kapitolách si postupně představíme vybrané mechanické vlastnosti a metody jejich zkoušení.

4.1 Mechanické vlastnosti

Pod pojmem mechanická vlastnost se rozumí kvantitativní hodnocení chování materiálu pod vlivem vnějších sil. Dle Nauky o materiálu [27] je můžeme rozdělit na základní, mezi něž patří pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost, a odvozené, jako jsou tvrdost, odolnost proti únavě či odolnost proti tečení. Základní mechanické vlastnosti si blíže definujeme níže:

- **Pevnost:** tímto pojmem se rozumí „odpor materiálu proti deformaci a porušení vnějšími silami. Podle způsobu namáhání se rozlišuje pevnost v tahu, tlaku, ohybu, krutu, stříhu, ale uvádí se i pevnost v tečení, při únavě.“ Dále se můžeme setkat s pojmy konvenční a skutečná pevnost. Konvenční je stanovena jako podíl maximální zátěžné síly vůči původnímu průřezu zkušebního vzorku a nachází uplatnění zejména při výpočtech a zkouškách materiálů. Skutečná pevnost vyjadřuje skutečné napětí při lomu vzorku a je reálným obrazem odolnosti materiálu vůči porušení. [27]
- **Pružnost** je „schopnost materiálu vykazovat před porušením pružnou deformaci.“ Při zkoušení materiálů se nejčastěji vyhodnocují modul pružnosti, mez pružnosti a energie elastické napjatosti. [27]
- **Plasticita** je chápána jako „schopnost materiálu zachovat trvalé deformace vyvolané účinkem vnějších sil.“ Důležitým ukazatelem je velikost poměrné trvalé deformace před vlastním porušením. [27]
- **Houževnatost** neboli „schopnost materiálu odolávat bez porušení velkým napětím a je tedy závislá na pevnosti a plasticitě.“ Při zkouškách měříme práci spotřebovanou na deformaci a porušení zkušebního vzorku. [27]

4.2 Zkouška tahem

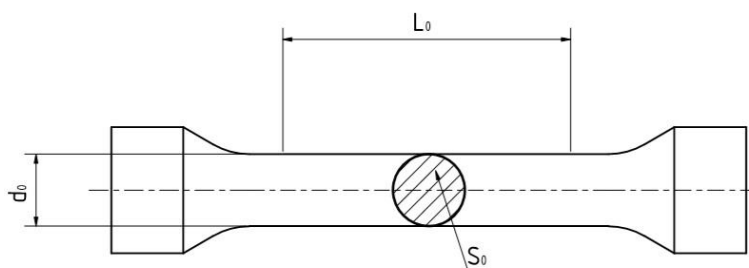
S tahovou zkouškou se setkáváme při zkoušení materiálů nejčastěji. Jedná se o zkoušku destruktivní, statickou, kdy během zkoušky dochází k pomalému navyšování zatěžovací síly. Zkušební tyč se postupně deformuje až do okamžiku lomu. Pomocí tahové zkoušky zjišťujeme celou řadu pevnostních a plastických vlastností. [27] [21]

4.2.1 Zkušební vzorek

Zkušební vzorek může nabývat více velikostí a tvarů, tyto parametry ale vychází z rozměrů výchozího výrobku a podléhají normám. Části, za které se zkušební tyče upínají do stroje, se nazývají hlavy a jsou obvykle většího průřezu než zbytek vzorku, aby byl zajištěn lom v oblasti měřené délky L_0 . Po dohodě toto rozšíření na zkušební tyči nemusí být. [21] [28]

Pro tahovou zkoušku nejčastěji používáme kruhové obráběné tyče (Obrázek 6), vzorky nekruhového průřezu se pak vyrábí frézováním. Pokud je výchozím polotovarem plech, nejekonomičtější volbou je vystříhování střížným nástrojem nebo stříhem kotoučovými nůžkami, pokud není nutné rozšíření v upínacích částech. Obě stříhací metody ale do určité míry zpevňují hrany vzorků, které pak vykazují vyšší hodnoty meze kluzu, což je třeba brát v úvahu, potažmo lze vzorky dodatečně obrousit. [21] [28]

Žádné obrábění není třeba v případech vzorků litých z neželezných kovů či litin a u výrobků stálého průřezu, jako jsou tyče, dráty a profily. [28]



Obrázek 6: Vzorek zkušební tyče pro zkoušku tahem, vlastní zpracování

Poměrové tyče

Počáteční měřená délka u poměrových zkušebních tyčí je závislá na průřezu a její hodnotu získáme pomocí následujícího vztahu:

$$L_0 = k\sqrt{S_0}$$

- L_0 ... měřená počáteční délka zkušební tyče, zaokrouhlená na násobky 5 mm [mm]
- k ... součinitel proporcionality: pro dlouhé zkušební tyče $k= 11,3$
pro krátké tyče $k= 5,65$
- S_0 ... počáteční plocha příčného průřezu [mm²]

Odvození součinitele proporcionality k

Počáteční délka krátkých zkušebních tyčí byla historicky stanovena jako pětinasobek průměru tyče. Pro dlouhé tyče platí desetinásobek hodnoty průměru.

$$L_0 = 5 \cdot d_0 = 5 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot S_0}{\pi}} = 5 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{S_0} = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$$

$$L_0 = 10 \cdot d_0 = 10 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot S_0}{\pi}} = 10 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{S_0} = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$$

Primárně používáme $k= 5,65$, pokud je vypočtená délka L_0 menší než 20 mm, je nutno využít $k= 11,3$, potažmo nepoměrnou zkušební tyč a stanovit koeficient proporcionality.[21] [28]

Nepoměrné zkušební tyče

Používané počáteční délky tyčí:

- 50 mm
- 80 mm
- 100 mm
- 200 mm

Pásy, plechy a ploché výrobky do tloušťky 3 mm

Tabulka 3: Délky a šířky tyčí z pásů, plechů a plochých výrobků [28]

Šířka tyče	Počáteční měřená
12,5 mm	50 mm
20 mm	80 mm

Používané šířky nepoměrných tyčí:

- 12,5 mm
- 20 mm
- 25 mm
- 40 mm

Dráty, tyče a profily o průměru max. 4 mm

Tabulka 4: Délky a šířky vzorků z tyčí, drátů a profilů [28]

Šířka tyče	Počáteční měřená
40 mm	200 mm
25 mm	200 mm
20 mm	80 mm

[28]

4.2.2 Průběh zkoušky

Zkušební těleso je nutné nejdříve upnout do stroje, jenž na těleso působí jednoosým tahovým zatížením. Pod vlivem této zátěže se těleso deformuje až do okamžiku lomu. Rychlost natahování vzorku je předepsaná a celá zkouška dle normy ČSN EN ISO 6892-1 probíhá při teplotě v místnosti v rozsahu 10 °C až 35 °C.

Během zkoušky je měřena deformace, a to buď kontaktně za pomoci průtahoměru (neboli extenzometru) nebo se můžeme v moderních strojích setkat i s laserem při nekontaktním měření.

V průběhu zatěžování dochází ve zkušební tyči k deformacím, první nastává elastická (pružná), po vyčerpání elasticity materiálu se vzorek začíná deformovat plasticky, odtud už jsou změny nevratné. Z hodnot zatížení a deformace získáváme v průběhu měření pracovní tahový diagram.

[21]

Rychlost zkoušky tahem je normovaná a její určení je založeno na dvou metodách:

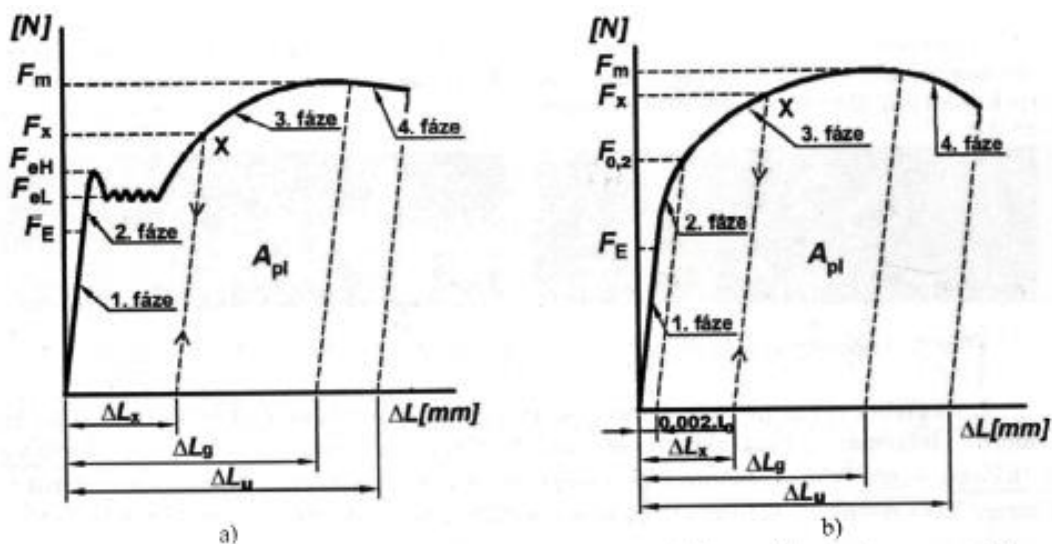
- Deformační rychlost $\dot{\epsilon}_L$ [s^{-1}] je definována jako „přírůstek relativního prodloužení ϵ za jednotku času.“ [28]
- Napěťová rychlost \dot{R} [$MPa \cdot s^{-1}$] je definována jako „přírůstek napětí za jednotku času.“ [28]

4.2.3 Pracovní tahový diagram

Jedním z nejdůležitějších výstupů tahové zkoušky je tahový diagram. Jedná se o grafické znázornění změny počáteční měřené délky vzorku v závislosti na postupně rostoucí působící síle. Diagram vykresluje na základě dat naměřených trhacím strojem a je velmi přesný díky až několikatisícovému množství hodnot síly a změny délky na jednu tahovou zkoušku. Tyto hodnoty přístroj získává z čidla průtahoměru či velikosti posuvu upínacích čelistí a síly vynaložené na tento posuv. Zatímco průtahoměr udává okamžité hodnoty síly a prodloužení, v případě měřeného posuvu čelistí je nutné hodnoty přepočítat. [21] [28]

Při zkoušení materiálů můžeme získat tahové diagramy dvou typů (Obrázek 7):

- Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu:
- Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu:



Obrázek 7: Schéma pracovního diagramu $F - \Delta L$: a) s výraznou mezí kluzu b) s nevýraznou mezí kluzu

Průběh v obou ilustrativních diagramech výše lze rozdělit do čtyř fází dle typů probíhajících deformací:

1. Fáze – oblast pružné deformace

V první fázi jsou deformace zkušební tyče pouze elastické, pokud by byla v tuto chvíli zkouška přerušena a vzorek vyjmut ze stroje, nebylo by naměřeno žádné trvalé prodloužení – vzorek se nedeformuje plasticky. Tuto část zkoušky reprezentuje v diagramu charakteristický přímkový průběh. Fáze končí mezi úměrnosti (elasticity), po jejímž překročení nastávají nevratné deformace vzorku. Jelikož je přechod mezi elastickou a plastickou fází plynulý, mez úměrnosti se laboratorně nezjišťuje. [28]

2. Fáze – oblast mezi mezi úměrnosti do meze kluzu

Právě podle druhé fáze diagramy rozdělujeme na ty s výraznou a nevýraznou mezí kluzu. V diagramech s mezí kluzu výraznou dochází k plynulému nelineárnímu růstu prodloužení v závislosti na zatížení a následná tzv. Lüdersova deformace pokračuje, přestože síla již neroste. Na svislé ose diagramu lze vyznačit sílu na výrazné mezi kluzu – F_e , jelikož jsou ale na mezi kluzu velké rozdíly, můžeme pro větší přesnost vynést hodnoty dvě, tj. sílu na dolní mezi kluzu F_{eL} a sílu na horní mezi kluzu F_{eH} . Na povrchu zkušební tyče lze po vyleštění sledovat tzv. Lüdersovy čáry.

V diagramu s nevýraznou mezí kluzu pozorujeme nelineární vztah zátěže a rostoucí deformace, na který plynule navazuje křivka rovnoměrné deformace. Druhá fáze končí, když prodloužení dosáhne jisté smluvní hodnoty, běžně 0,2 % L_0 . Pokud z této hodnoty vyneseme na vodorovné ose diagramu vedeme rovnoběžku s přímkou z 1. fáze, získáme průsečík s křivkou tahové zkoušky a tím i hodnotu smluvní síly na mezi kluzu 0,2- $F_{p0,2}$. [28]

3. Fáze – oblast homogenních trvalých deformací

Vztah napětí a deformace ve 3. fázi se pro všechny kovy s kubickou mřížkou řídí dle vztahu:

$$\sigma = k \cdot \varphi^n = \frac{F}{S}$$

- σ ... okamžité napětí [MPa]
- k ... materiálová konstanta [-]
- φ ... skutečné prodloužení [-]

- n ... exponent zpevnění [-]
- F ... okamžitá síla [N]
- S ... okamžitý průřez [mm^2]

V této fázi je zkušební vzorek trvale deformován rovnoměrně po celé své délce až do momentu, kdy se začne tvořit tzv. krček a zkušební tyč se v jednom místě zaškrcuje. Díky rozšířeným koncům vzorku toto zaškrcení probíhá vždy kontrolovaně v měřené oblasti L_0 .

V průběhu celé této fáze lze zkoušku kdykoliv zastavit. Po odlehčení zatěžovací síly se vynuluje elastická deformace vzorku a může být změřena prodloužená délka tyče. Po odečtení počáteční měřené délky L_0 je získána hodnota trvalého prodloužení. Při opětovném zatížení vzorku se křivka diagramu vykreslí stejnou cestou a dál pokračuje, jako by zkouška nebyla přerušena. Konec třetí fáze se vyznačuje tzv. prodloužením při maximálním zatížení, pro jehož přesné určení můžeme využít také pracovní diagram. Vynesením rovnoběžky s přímkovou částí diagramu získáme na vodorovné ose hodnotu maximálního prodloužení. [28]

4. Fáze – oblast nerovnoměrných trvalých deformací

Tato část tahové zkoušky je charakteristická tvorbou krčku, jenž je doprovázen poklesem zatěžovací síly. Deformace zkušební tyče v této fázi probíhá nerovnoměrně – pouze v oblasti krčku. Ačkoliv zatěžovací síla v této fázi klesá, skutečné napětí v důsledku kontrakce průřezu tyče prudce stoupá. Po skončení tahové zkoušky je možné přiložit obě poloviny vzorku k sobě a změřit maximální trvalé prodloužení ΔL_u .

Krček nabývá různých tvarů podle výchozího průřezu tyče, zatímco u kruhových tyčí setrvává po lomu tyče kruhový, u plochých vzorků je výsledný tvar průřezu složitý. [28]

4.2.4 Vyhodnocení zkoušky

Pro porovnání mechanických vlastností je nutné přepočítat hodnoty síly a skutečného prodloužení z pracovního diagramu na hodnoty napětí a poměrného prodloužení, z nichž pak můžeme sestavit smluvní tahový diagram. [28]

Smluvní tahový diagram

Hodnoty poměrného prodloužení lze získat z podílu absolutního prodloužení ΔL [mm] a počáteční délky L_0 [mm]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [1]$$

Co se týče napětí, je možné použít dvě odlišné hodnoty:

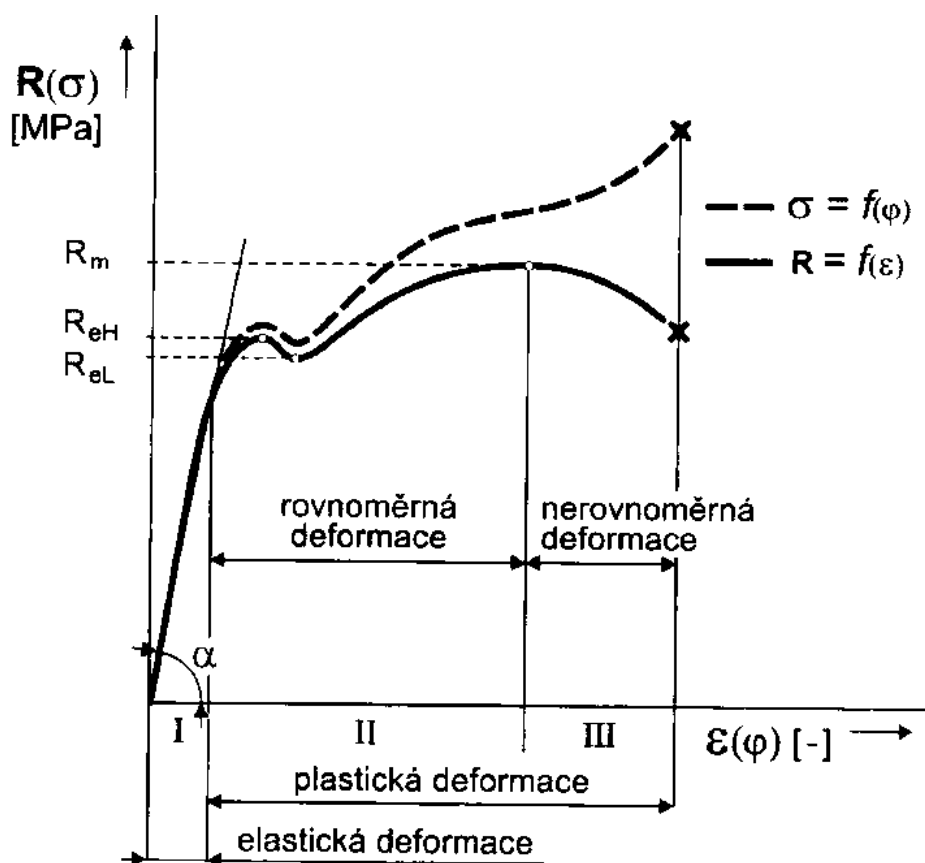
- Skutečné napětí: Při výpočtu bereme v potaz změnu tloušťky zkušební tyče a do následujícího vzorce dosazujeme hodnotu okamžitého průřezu S [mm²].

$$\sigma = \frac{F}{S} [MPa]$$

- Smluvní napětí: Pro zjednodušení výpočtů do smluvního diagramu dosazujeme hodnoty napětí získané ze vzorce, do kterého dosadíme hodnoty počátečního průřezu S_0 [mm²].

$$R = \frac{F}{S_0} [MPa]$$

V technické praxi se setkáváme výhradně s použitím smluvního napětí R . Zjišťování okamžitých hodnot průřezu by totiž bylo značně obtížné. Na Obrázku 8 můžeme vidět porovnání skutečného a smluvního tahového diagramu. Jelikož reálné napětí počítá se zúžením tyče, jeho hodnoty jsou přirozeně vyšší než u napětí smluvního. Největší rozdíl pak vzniká v oblasti nerovnoměrné deformace, kdy dochází k tvorbě krčku. [28]



Obrázek 8: Porovnání smluvního a skutečného tahového diagramu pro ocel s výraznou mezí kluzu.[21]

Modul pružnosti v tahu

V první části smluvního diagramu, která je znázorněna přímkou, platí Hookův zákon – vztah mezi skutečným napětím a relativním prodloužením:

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]}$$

Písmeno E v rovnici představuje modul pružnosti v tahu [MPa], který je definován jako: „materiálový parametr, který charakterizuje odpor materiálu proti pružné deformaci“ a je známý také jako Youngův modul. Ze smluvního tahového diagramu lze tuto konstantu získat jako $E = \tan \alpha$ (viz. Obrázek 8). Nejčastěji ale hodnotu modulu pružnosti v tahu získáváme odečtením z materiálových listů, tabulek či norem. [28]

Mez kluzu

Mezí kluzu značenou jako R_e se rozumí napětí, při kterém se vzorek začne poprvé výrazně plasticky deformovat. Dochází zde k prodloužení zkušební tyče, aniž by se zvyšovala

hodnota zátěžné síly. Protože napětí na mezi kluzu vztahujeme k počátečnímu průřezu S_0 , neroste ani jeho hodnota. [21]

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa]$$

Pro materiály s výraznou mezí kluzu rozlišujeme dolní (R_{eL}) a horní (R_{eH}) mez. V jejich případě dosazujeme do vzorce výše sílu na dolní (F_{eL}) a horní (F_{eH}) mezi kluzu.

U materiálů s nevýraznou mezí kluzu určujeme smluvní mez kluzu. Tou označujeme napětí, při kterém je dosaženo prodloužení o domluvené hodnotě 0,2 % L_0 . Tuto mez označujeme $R_{p0,2}$ a vypočítáme ji dle následujícího vzorce:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa]$$

[21] [28]

Mez pevnosti v tahu

Mez pevnosti v tahu je „napětí odpovídající největšímu zatížení před přetržením zkušební tyče.“ [21] Lze vypočítat jako poměr největší síly F_m naměřené při tahové zkoušce a počátečního průřezu S_0 .

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa]$$

[28]

Tažnost

Tažnost představuje celkové trvalé prodloužení zkušební tyče vyjádřené v procentech počáteční délky L_0 a v literatuře ji můžeme najít jako celkovou (klasicky značenou A) nebo plastickou (označenou s indexem g). Hodnoty zaokrouhlujeme na poloviny celých čísel, pokud není dáno jinak. Pro případ tzv. krátkých tyčí tažnost označujeme pouze A , pokud při tahové zkoušce používáme tzv. tyče dlouhé, tažnost značíme $A_{11,3}$. Označení tažnosti pro nepoměrové tyče se v indexu přidává hodnota původní měřené délky vzorku, např. $A_{80 \text{ mm}}$. V případě zkoušení plochých tyčí s nejmenším rozměrem menším než 0,5 mm je nutno počítat s ovlivněním tažnosti tloušťkou materiálu. Hodnoty tažnosti budou snižené a značíme ji A' . [21] [28]

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

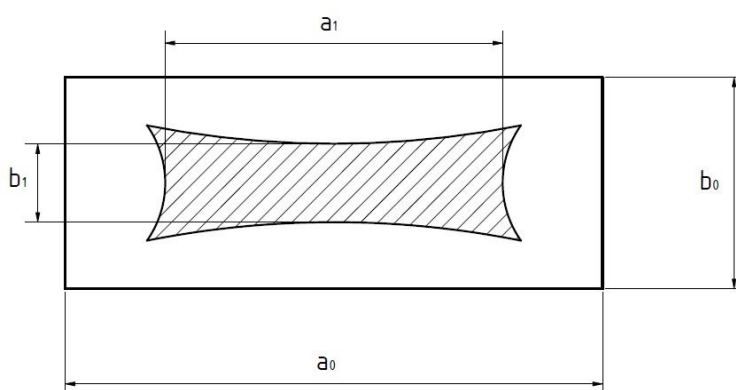
Pokud při zkoušce tahem nebyl použit průtahoměr, je změřená konečná délka tyče po přiložení obou polovin k sobě. Pro měření absolutního prodloužení je vhodné před zkouškou zkušební tyč rozdělit na stejně velké segmenty, aby bylo možno zjistit rozložení deformace po délce tyče. [28]

Kontrakce

Kontrakce Z určuje maximální zúžení vztažené k počátečnímu průřezu S_0 . Vyjadřujeme ji v procentech zaokrouhlených na nejbližší celá čísla, v praxi se setkáváme s měřením kontrakce převážně u kruhových tyčí, u nichž zůstává průřez v místě lomu také přibližně kruhový.

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

U nekruhových tyčí zmíněný vzorec neplatí a určení kontrakce je obtížnější, protože konečný tvar se liší od původního. Rozdíly v zúženém průřezu proto zanedbáváme a považujeme jej za pravoúhelníkový. Na obrázku níže bychom počítali s obdélníkem o obsahu $a_1 \cdot b_1$. [28]



Obrázek 9: Kontrakce obdélníkového průřezu, převzato a upraveno z: [28]

4.3 Další zkoušky

Jako příklad dalších zkoušek mechanických vlastností je uvedena zkouška tvrdosti a zkouška rázem v ohybu.

4.3.1 Zkoušky tvrdosti

Jedná se na rozdíl od tahové zkoušky o zkoušení téměř nedestruktivní, tudíž obvykle není nutné vyrábět zkušební vzorky a lze je provést na finálním výrobku. V praxi se můžeme setkat s dělením podle rychlosti zatěžující síly – dynamické a statické, principu

(odrazové, vrypové, ...), či podle velikosti zatížení. V následující kapitole jsou zkoušky tvrdosti rozepsány podle typu vnikajícího tělesa (indentoru), u všech třech se jedná o zkoušení statické vnikací. Jejich základní princip zůstává stejný – zkušební těleso je vtlačováno do testovaného výrobku a po odlehčení zatěžovací síly je změřen jeho vtisk – plastická deformace zanechaná indentorem v materiálu nebo trvalá hloubka vtisku. [21]

- Zkouška tvrdosti dle Brinella – zde je zkušebním tělesem tvrdokovová kulička normovaného průměru (nejčastěji 10 mm). Doba zatížení je stanovena 10–15 vteřin. Tvrdost zkoušeného materiálu získáme po měření průměru vrchlíkovitého vtisku a její hodnoty zapisujeme se značkou *HBW*.
- Zkouška podle Vickerse – v tomto případě se jedná o indentor tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholových úhlem 136° vyrobený z diamantu. Po odlehčení zatěžovací síly měříme obě úhlopříčky čtvercového vtisku a tvrdost označujeme *HV*.
- Zkouška tvrdosti dle Rockwella – zde jako indentor používáme buď diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° nebo tvrdokovovou kuličku o normovaných rozměrech. Na rozdíl od předchozích dvou metod měříme hloubku vtisku a označení je složitější – zatímco první dvě písmena zůstávají vždy stejná – *HR*, třetí písmeno značí použitý indentor spolu s velikostí zatěžovací síly, nejčastěji se můžeme setkat s použitím označení *HRC*. [28]

4.3.2 Zkouška rázem v ohybu

Jedná se o destruktivní zkoušku jinak známou pod názvem zkouška metodou Charpy, při které zjišťujeme odolnost materiálu proti křehkému lomu. Standardním zkušebním vzorkem je tyč čtvercového průřezu (10x10x55 mm) s vrubem normovaného tvaru do písmene V o hloubce 2 mm a zaoblením špičky 0,25 mm a úhlem rozevření 45° . Druhou možností je vrub ve tvaru písmene U, jenž má hloubku 5 mm a šířku 2 mm. [21] [28]

Zkouška spočívá v přeražení zkušební tyče kyvadlovým kladivem a zjištění spotřebované (absorbované) energie *K*. K prvnímu kontaktu kladiva se vzorkem dochází v místě proti vrubu. Po zkoušce je vyhodnocen podíl křehkého a houževnatého lomu v místě přeražení. Při použití vzorku s velmi houževnatého materiálu se tyč nemusí rozlomit na dva díly, ale může zůstat pouze nalomená. [21] [28]

5 Praktická část

Experimentální program má za cíl porovnat strukturu a vybrané mechanické vlastnosti polotovarů vyrobených metodou průtlačného lisování a horizontálního přetlakového lití z materiálu EN AW 6082. Vzorky odebrané z obou polotovarů následně prošly pěstováním a tepelným zpracováním. Jednotlivé stavy byly navrženy tak, aby se blížily podmínkám kování, při nichž vzniká skutečný výrobek. Program pěstování a tepelného zpracování byl zajištěn v provozu Strojmetal Aluminium Forging s.r.o. Příprava, mechanické zkoušky a metalografická analýza vzorků byly provedeny na Ústavu materiálového inženýrství FS ČVUT v Praze.

5.1 Výroba vzorků

Jako výchozí polotovar pro výrobu vzorků byla použita kruhová tyč vyrobená metodou průtlačného lisování a horizontálního přetlakového lití z materiálu EN AW 6082 o následujících rozměrech:

- $L = 100 \text{ mm}$
- $D = 50 \text{ mm}$

Polotovary daných rozměrů následně prošly pěstováním a tepelným zpracováním, aby byly dosaženy jednotlivé stavy, kterými postupně prochází i finální výrobek.

Pěstování

Po ohřátí v peci na kovací teplotu $550 \text{ }^\circ\text{C}$ byly tyče vloženy mezi plochá kovádla a pěstovány přes průměr (osa válečku rovnoběžná s osou kovádla) podle požadovaného stupně deformace do následujících parametrů (Tabulka 5):

Tabulka 5: Stupně deformací a dosažené rozměry po pēchování

Stupeň deformace	Původní rozměr průměr D [mm]	Výška polotovaru po prvním pēchování [mm]	Výška polotovaru po druhém pēchování [mm]
70 % deformace	50	15	-
20 % + 40 % deformace	50	40	20
40 % + 20 % deformace	50	30	20

V případě dvoustupňové deformace byly tyče po prvním tváření ochlazeny na vzduchu, poté byl zopakován proces ohřevu a pēchování a tím dosaženy konečné rozměry výrobků. Po ochlazení na vzduchu polovina vzorků prošla tepelným zpracováním, dále pod zkratkou TZ.

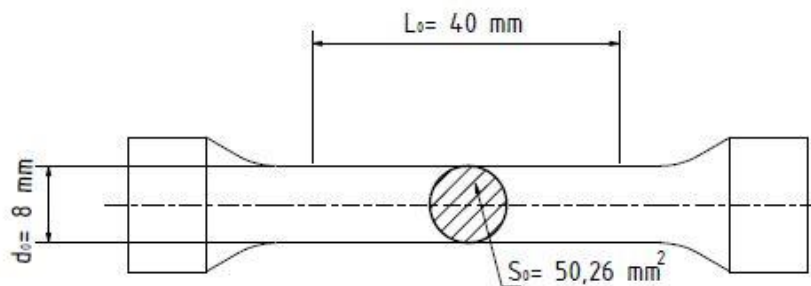
Tepelné zpracování

První fází tepelného zpracování bylo rozpouštěcí žíhání při teplotě 530 °C po dobu 60 minut. Po 24hodinové prodlevě bylo provedeno umělé stárnutí trvající 420 minut při 170 °C.

5.2 Tahová zkouška

5.2.1 Tahové tyče

Z uvedených zpracovaných (i nezpracovaných) polotovarů byly obráběním pro každou výrobní fázi vyrobeny dvě zkušební tyče pro tahovou zkoušku o rozměrech vyobrazených na schématu (Obrázek 10):

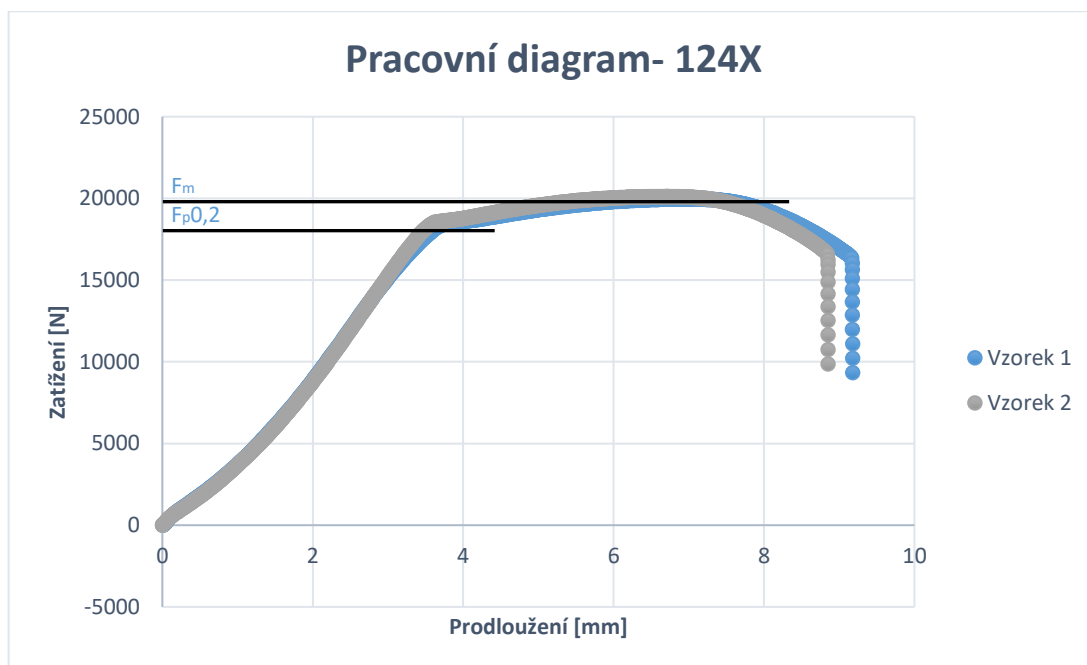


Obrázek 10: Tahová tyč s přibližnými rozměry

Hodnoty počátečního průměru d_0 a průřezu S_0 jsou na schématu uvedeny přibližně, u každého vzorku byla pro další výpočty naměřena reálná hodnota s přesností na dvě desetinná místa. Počáteční délka L_0 se mezi jednotlivými vzorky neliší.

5.2.2 Průběh tahové zkoušky

Před samotným zkoušením byla u každého vzorku zapsána hodnota počátečního průměru zkušební tyče d_0 , v průběhu tahové zkoušky byl pak pro každý vzorek zaznamenán pracovní tahový diagram (Graf 1), jako ukázka nám poslouží vzorky s označením 124X, tj. vzorky z 20 % + 40% deformované a následně tepelně vytvrzené:



Graf 1: Pracovní diagram vzorků 124X (20 %+ 40 %+ TZ)

Po vyjmutí ze stroje byla po přiložení obou polovin každého vzorku k sobě změřena konečná délka tahových tyčí L_1 a konečný průměr v místě krčku d_1 .

5.2.3 Výpočty

Ve všech následujících výpočtech slouží jako příklad první ze dvou vzorků označených 124X (20 % + 40 % + TZ), jehož naměřené parametry můžeme nalézt v Tabulce 6.

Tabulka 6: Naměřené parametry vzorku 124X-1

d_0 [mm]	d_1 [mm]	L_0 [mm]	L_u [mm]	S_0 [mm ²]	S_u [mm ²]
8,00	6,35	40	45,6	50,26	31,67

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} = \frac{18\,747}{50,26} = 373 \text{ MPa}$$

Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{19\,953}{50,26} = 397 \text{ MPa}$$

Tažnost A [%]

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{45,6 - 40}{40} \cdot 100 = 14 \%$$

Kontrakce Z [%]

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 = \frac{50,26 - 31,67}{50,26} \cdot 100 = 36,99 \%$$

Výsledky

Obdobný postup výpočtů byl proveden i pro druhý vzorek 124X, souhrnné výsledky obou zkušebních těles jsou uvedeny v Tabulce 7. Jak je možné vidět, oba vzorky vykazují velmi podobné pevnostní charakteristiky. Dá se tudíž předpokládat správný postup přípravy vzorku i jeho zkoušení.

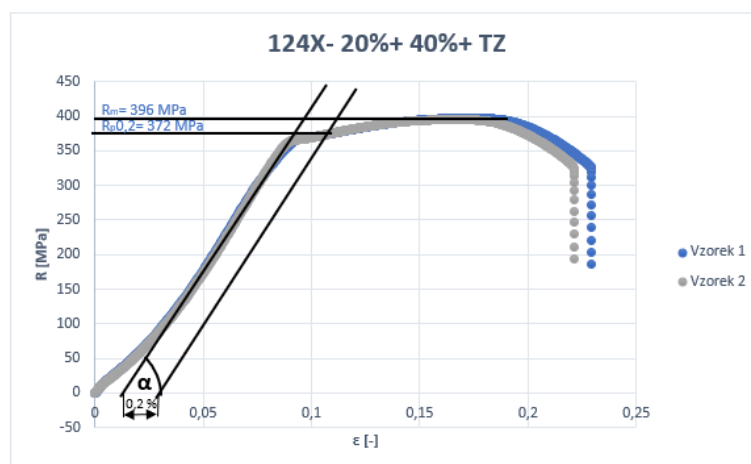
Tabulka 7: Výsledky tahové zkoušky vzorků 124X

124X	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	397	373	14	37
Vzorek 2	395	371	12	38

Výsledky všech jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulkách pod smluvními diagramy v příloze A. Hodnoty meze pevnosti a smluvní meze kluzu jsou zaokrouhleny na celá čísla.

5.2.4 Smluvní tahový diagram

Dalším z výsledků zkoušky tahem je smluvní tahový diagram (Graf 2), který byl sestaven pro každou dvojici vzorků vyrobených lisováním či horizontálním přetlakovým litím. Všechny jednotlivé smluvní diagramy je možné nalézt v příloze A spolu s tabulkami obsahujícími hodnoty pevnostních charakteristik. Meze vynesené v přiložených diagramech jsou získány zprůměrováním hodnot mezí obou vzorků, tento postup byl použit pro větší přehlednost. Pro ukázkou v této kapitole opět poslouží vzorky 124X-1 a 124X-2.



Graf 2: Smluvní diagram vzorků 124X (20 %+ 40 % deformace a následné tepelné vytvrzení) s vynesenými mezemi

5.2.5 Vyhodnocení tahové zkoušky vzorků slitiny EN AW- 6082

V následujících kapitolách se budu věnovat srovnání jednotlivých zkušebních těles z hlediska pevnostních charakteristik (smluvní mez pevnosti v kluzu, mez pevnosti v tahu, tažnost a kontrakce). Vyhodnocení bude provedeno zvláště pro polotovary vyrobené horizontálním přetlakovým litím a lisováním. V závěru každé kapitoly uvedu vzájemné srovnání obou těchto skupin.

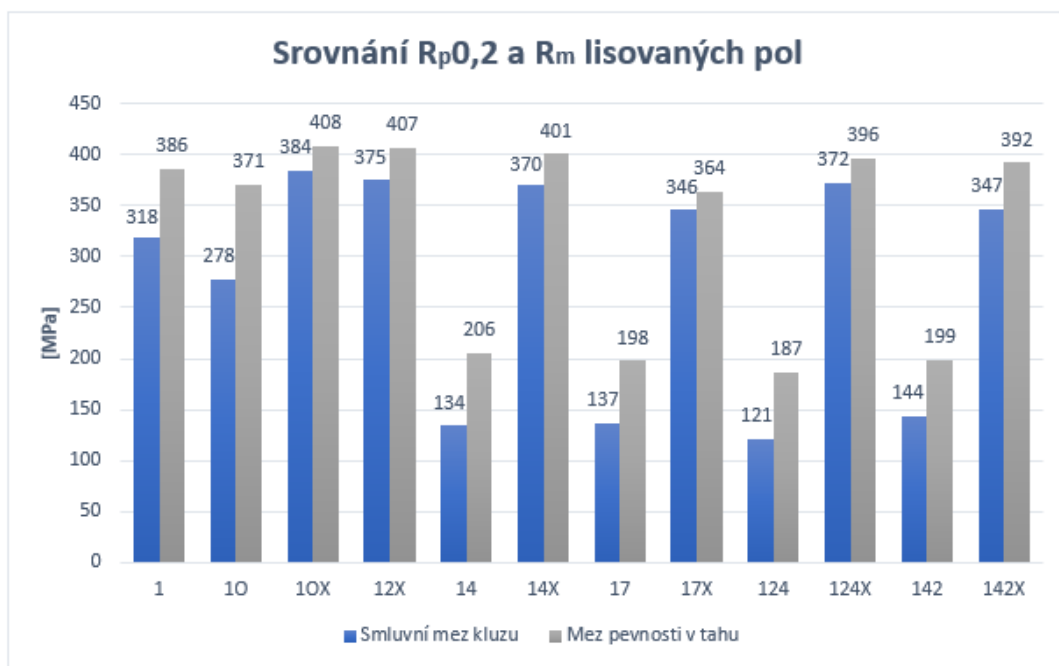
Smluvní mez pevnosti v kluzu $R_{p0,2}$ a mez pevnosti v tahu R_m

V první části srovnání jsou uvedeny všechny hodnoty smluvních mezí kluzu a mezí pevnosti jednotlivých polotovarů vyrobených metodou lisování (Tabulka 8). Vzorky jsou řazeny podle po sobě jdoucích stádií výroby.

Tabulka 8: Srovnání smluvních mezí kluzu a mezí pevnosti v tahu vzorků z lisovaných polotovarů

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
1-1 (výchozí stav)	318	381	17-1 (70% def.)	144	200
1-2 (výchozí stav)	318	392	17-2 (70% def.)	131	197
1O-1 (ohřev na kovací teplotu)	281	374	17X-1 (70% def.+ TZ)	326	344
1O-2 (ohřev na kovací teplotu)	274	367	17X-2 (70% def.+ TZ)	365	384
1OX-1 (ohřev na kov. Tep. + TZ)	379	406	124-1 (20% def.+ 40% def.)	123	193
1OX-2 (ohřev na kov. Tep. + TZ)	389	410	124-2 (20% def.+ 40% def.)	120	181
12X-1 (20% def.)	366	408	124X-1 (20% def.+ 40% def.+ TZ)	371	397
12X-2 (20% def.)	384	405	124X-2 (20% def.+ 40% def.+ TZ)	373	395
14-1 (40% def.)	147	207	142-1 (40% def.+ 20% def.)	145	200
14-2 (40% def.)	121	204	142-2 (40% def.+ 20% def.)	142	197
14X-1 (40% def.+ TZ)	365	390	142X-1 (40% def.+ 20% def.+ TZ)	358	389
14X-2 (40% def.+ TZ)	375	411	142X-2 (40% def.+ 20% def.+ TZ)	340	394

Data z Tabulky 8 jsou pro lepší srovnání zpracovány do Grafu 3. Vynesené hodnoty jsou získány zprůměrováním dat obou vzorků jednotlivých stádií výroby. Modré sloupce znázorňují hodnoty smluvních mezí kluzu, šedé pak hodnoty mezí pevnosti.



Graf 3: Srovnání $R_{p0,2}$ a R_m lisovaných polotovarů

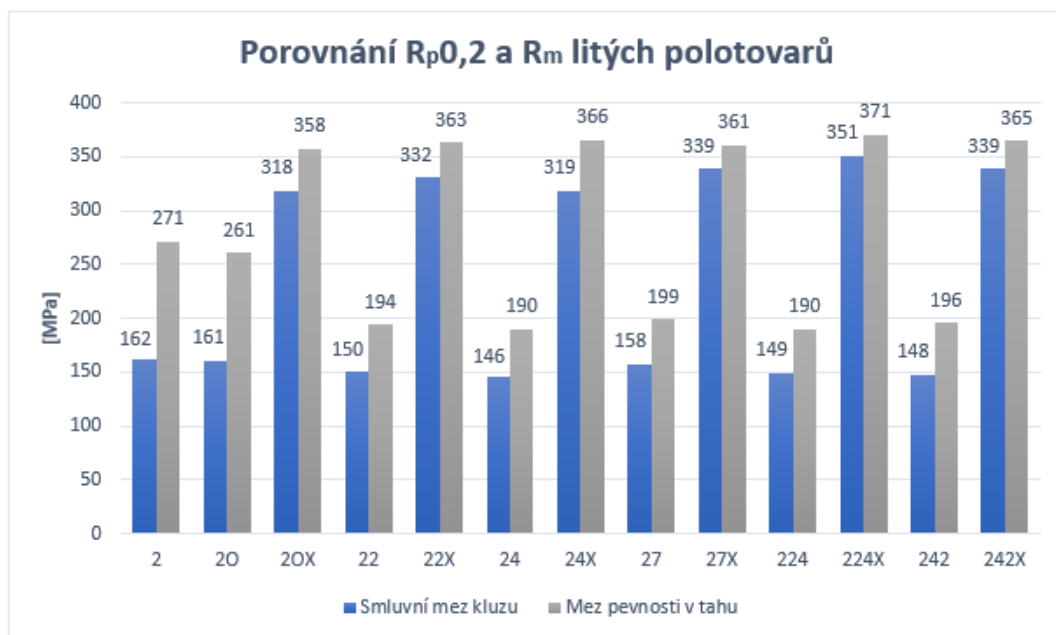
Jak je možné vidět z grafu, hodnoty obou mezí po ohřevu na kovací teplotu oproti výchozímu stavu mírně klesají, následující tepelné zpracování obě meze opět zvyšuje, vzorek 10X zároveň dosahuje nejvyšší hodnot obou mezí ze všech porovnávaných lisovaných polotovarů. Z grafu je také patrné, že deformace pěchováním způsobuje výrazný pokles pevnosti, který není příliš závislý na stupni deformace, nejnižší hodnoty dosahují vzorky 124, ačkoliv se od ostatních pěchovaných vzorků příliš neliší. Naopak tepelné zpracování po jakémkoliv stupni deformace v porovnání s pouze pěchovaným stavem obě meze výrazně zvyšuje. Přestože se hodnoty meze pevnosti těchto vzorků oproti výchozímu stavu příliš nezměnily, meze kluzu nabývají vyšších hodnot, přičemž některé z nich se blíží mezím pevnosti.

V následující dílčí části srovnání jsou uvedeny hodnoty smluvní meze kluzu a meze pevnosti pro polotovary vyrobené horizontálním přetlakovým litím Tabulka 9.

Tabulka 9: Srovnání smluvních mezí kluzu a mezi pevnosti v tahu vzorků z litých polotovarů

Vzorek	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	Vzorek	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]
2-1 (výchozí stav)	167	273	27-1 (70% def.)	158	199
2-2 (výchozí stav)	158	267	27-2 (70% def.)	159	199
2O-1 (ohřev na kovací teplotu)	162	262	27X-1 (70% def.+ TZ)	341	362
2O-2 (ohřev na kovací teplotu)	160	260	27X-2 (70% def.+ TZ)	338	359
2OX-1 (ohřev na kov. Tep. + TZ)	318	357	224-1 (20% def. + 40% def.)	143	190
2OX-2 (ohřev na kov. Tep. + TZ)	318	358	224-2 (20% def. + 40% def.)	154	190
22-1 (20% def.)	149	193	224X-1 (20% def. + 40% def.+ TZ)	350	369
22-2 (20% def.)	151	194	224X-2 (20% def. + 40% def.TZ)	353	373
22X-1 (20% def.+ TZ)	333	363	242-1 (40% def. + 20% def.)	149	195
22X-2 (20% def.+ TZ)	331	362	242-2 (40% def. + 20% def.)	147	196
24-1 (40% def.)	144	188	242X-1 (40% def. + 20% def.+ TZ)	340	365
24-2 (40% def.)	148	192	242X-2 (40% def. + 20% def.+ TZ)	338	364
24X-1 (40% def.+ TZ)	303	364			
24X-2 (40% def.+ TZ)	336	368			

Na Grafu 4 jsou opět vynesena data uvedená v předchozí tabulce, v tomto případě se jedná o varianty vyrobené horizontálním přetlakovým litím.



Graf 4: Srovnání $R_{p0,2}$ a R_m litých polotovarů

V případě polotovarů vyrobených horizontálním přetlakovým litím je situace podobná jako u lisovaných. Nejvyšších mezí pevnosti dosahují vzorky po tepelném zpracování bez ohledu na předchozí stupeň deformace. Stejně jako u vzorků lisovaných dochází po tepelném zpracování k malým rozdílům mezi oběma mezemi. Všechny pouze deformované varianty vykazují nízké hodnoty smluvní meze kluzu i meze pevnosti. Ačkoliv nejmenší pevnost můžeme vidět u vzorků označených číslem 224, po tepelném zpracování tato varianta 224X dosáhla nejvyšších hodnot ze všech srovnávaných litých polotovarů.

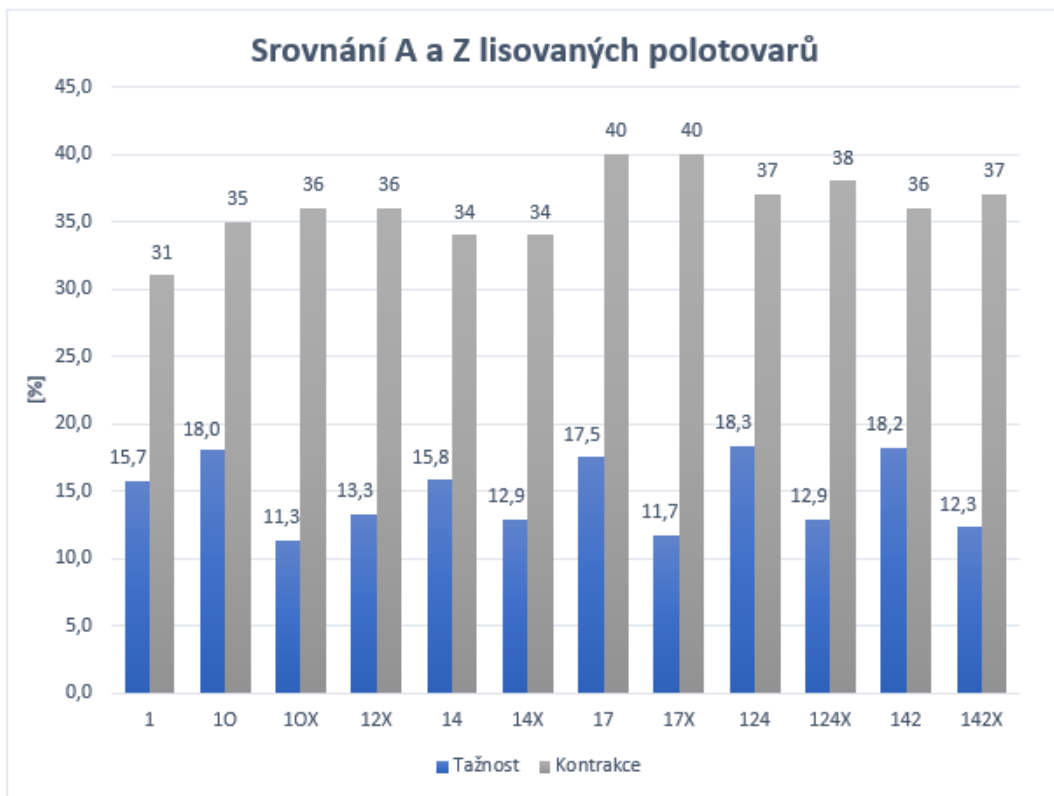
Tažnost A a kontrakce Z

V této části budu varianty mezi sebou porovnávat z hlediska dosažených hodnot tažnosti a kontrakce. Stejně jako v předchozí podkapitole zabývající se mezemi pevnosti a kluzu, bude srovnání provedeno zvlášť podle způsobu výroby polotovaru, nejprve pro lisované (Tabulka 10), poté pro lité pod vysokým tlakem (Tabulka 11).

Tabulka 10: Srovnání tažnosti a kontrakce vzorků z lisovaných polotovarů

Vzorek	A [%]	Z [%]	Vzorek	A [%]	Z [%]
1-1 (výchozí stav)	15,7	31	17-1 (70% def.)	16	36
1-2 (výchozí stav)	15,7	31	17-2 (70% def.)	19	44
1O-1 (ohřev na kovací teplotu)	18,8	35	17X-1 (70% def.+ TZ)	12,3	38
1O-2 (ohřev na kovací teplotu)	17,3	34	17X-2 (70% def.+ TZ)	11	41
1OX-1 (ohřev na kov. Tep. + TZ)	10	39	124-1 (20% def.+ 40% def.)	19	39
1OX-2 (ohřev na kov. Tep. + TZ)	12,5	33	124-2 (20% def.+ 40% def.)	17,5	34
12X-1 (20% def.)	13	39	124X-1 (20% def.+ 40% def.+ TZ)	14	37
12X-2 (20% def.)	13,5	33	124X-2 (20% def.+ 40% def.+ TZ)	11,8	38
14-1 (40% def.)	14,8	34	142-1 (40% def.+ 20% def.)	16	40
14-2 (40% def.)	16,8	34	142-2 (40% def.+ 20% def.)	20,3	32
14X-1 (40% def.+ TZ)	13,3	33	142X-1 (40% def.+ 20% def.+ TZ)	12	35
14X-2 (40% def.+ TZ)	12,5	34	142X-2 (40% def.+ 20% def.+ TZ)	12,5	39

Hodnoty tažnosti a kontrakce lisovaných polotovarů z Tabulky 10 jsou k vidění dále v grafické podobě (Graf 5). Modrý trend znázorňuje tažnost, šedý pak kontrakci.



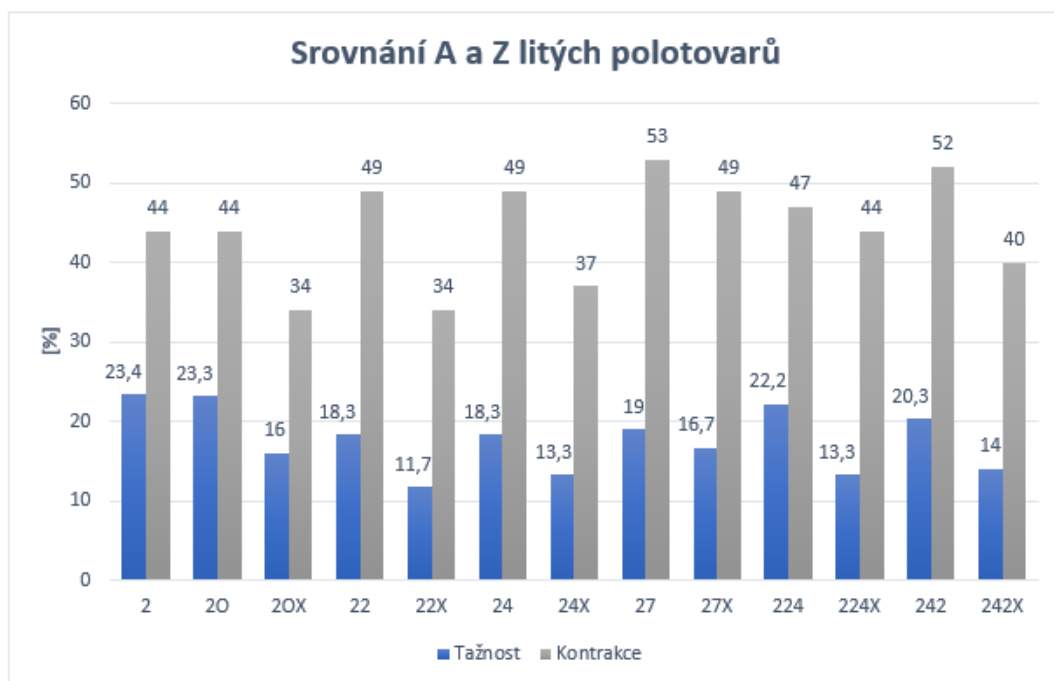
Graf 5: Srovnání A a Z lisovaných polotovarů

Z Grafu 5 je patrné, že ačkoliv tepelné zpracování snižuje hodnotu tažnosti, nemá prakticky žádný vliv na kontrakci. Velký rozdíl můžeme pozorovat mezi variantami 17 a 17X, kde tažnost klesla o 5,8 %, zatímco kontrakce zůstala neměnná. Dalším jevem, který můžeme zaznamenat, je účinek pěchování na velikost kontrakce, jež vlivem deformace mírně narůstá, nejnižší hodnotu vykazuje výchozí stav označený číslem 1, nejvyšší pak varianta po 70 % deformace.

Poslední dílčí srovnání je věnováno tažnostem a kontrakcím variant vyrobených horizontálním přetlakovým litím. Data jsou uvedena v Tabulce 11 a následně také formou grafu (Graf 6).

Tabulka 11: Srovnání tažnosti a kontrakce vzorků z litých polotovarů

Vzorek	A [%]	Z [%]	Vzorek	A [%]	Z [%]
2-1 (výchozí stav)	23,3	44	27-1 (70% def.)	20,5	50
2-2 (výchozí stav)	23,5	43	27-2 (70% def.)	17,5	56
2O-1 (ohřev na kovací teplotu)	23,5	43	27X-1 (70% def.+ TZ)	17,3	54
2O-2 (ohřev na kovací teplotu)	22,8	44	27X-2 (70% def.+ TZ)	15	44
2OX-1 (ohřev na kov. Tep. + TZ)	15,5	31	224-1 (20% def. + 40% def.)	21,5	46
2OX-2 (ohřev na kov. Tep. + TZ)	16,5	36	224-2 (20% def. + 40% def.)	22,8	47
22-1 (20% def.)	17,8	49	224X-1 (20% def. + 40% def.+ TZ)	13	43
22-2 (20% def.)	18,8	49	224X-2 (20% def. + 40% def.TZ)	13,5	45
22X-1 (20% def.+ TZ)	10,5	31	242-1 (40% def. + 20% def.)	19	53
22X-2 (20% def.+ TZ)	12,8	36	242-2 (40% def. + 20% def.)	21,5	50
24-1 (40% def.)	18,8	50	242X-1 (40% def. + 20% def.+ TZ)	13	44
24-2 (40% def.)	17,8	48	242X-2 (40% def. + 20% def.+ TZ)	15	36
24X-1 (40% def.+ TZ)	13,3	34			
24X-2 (40% def.+ TZ)	13,3	41			



Graf 6: Srovnání A a Z litých polotovarů

Z Grafu 6 je patrné, že vlivem deformace dochází ke zvýšení hodnot kontrakce a naopak lehkému zhoršení tažnosti. Po následném tepelném zpracování nastává prudký pokles obou pozorovaných pevnostních charakteristik, přičemž většinou platí, že čím vyšší je stupeň deformace před tepelným zpracováním, tím menší nastává pokles obou hodnot. Výjimku tvoří varianta 242, kde i přes velkou deformaci pozorujeme výrazný pokles. Tažnost je snižována jakoukoliv z provedených operací a nejvyšší hodnoty nabývá ve výchozím stavu.

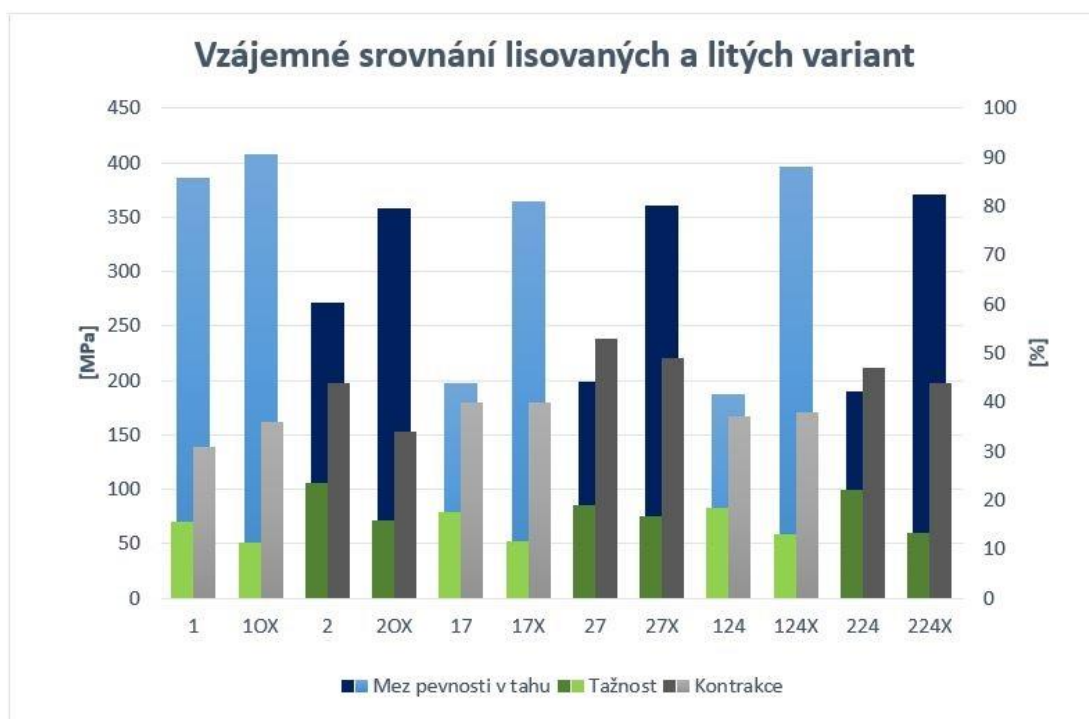
Srovnání variant vyrobených oběma metodami

Pokud mezi sebou srovnáme obě varianty, na první pohled je zřejmé, že polotovary vyrobené metodou horizontálního přetlakového lití dosahují obecně nižších hodnot mezi pevnosti i kluzu. Již u výchozího stavu pozorujeme rozdíl cca 100 MPa oproti lisovaným variantám, po deformaci vykazují obě výrobní metody podobně prudký pokles, čímž se hodnoty mezi obou zkoušených skupin téměř srovnají. Vlivem následného tepelného zpracování pevnostní charakteristiky v obou případech výrazně rostou, lisované polotovary ale dosahují v průměru o 30-40 MPa vyšších hodnot. V obou případech se také po tepelném zpracování vzájemně přibližují meze kluzu a pevnosti.

Při srovnání tažnosti a kontrakce můžeme pozorovat výrazné rozdíly mezi oběma výrobními metodami. Lité polotovary dosahují obecně vyšších hodnot těchto

charakteristik, velké rozdíly jsou vidět již u výchozího stavu, kde tažnost i kontrakce vykazují o polovinu vyšší hodnoty. Lze ale říci, že vlivem tepelného zpracování se přibližují tažnosti obou srovnávaných skupin vzorků, ve výjimečných případech (12X, 22X) tepelně vytvrzené lisované polotovary dosahují mírně vyšší tažnosti. Dále také tepelné zpracování ovlivňuje kontrakci litých variant, kde její hodnota touto úpravou prudce klesá, zatímco na kontrakci lisovaných polotovarů nemá tepelné zpracování téměř žádný vliv.

Výše uvedené jevy jsou u vybraných variant orientačně demonstrovány v Grafu 8, kde je možné přímo pozorovat rozdíly mezi oběma metodami výroby polotovarů. Lisované varianty jsou od litých odlišeny světlejší paletou barev.



Graf 7: Vzájemné srovnání lisovaných a litých variant

5.3 Vyhodnocení velikosti zrna

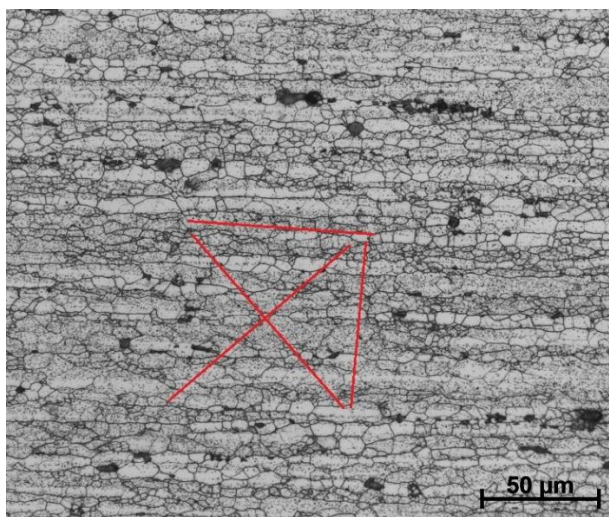
Nadcházející kapitola je věnována vyhodnocení velikosti zrn vzorků s jednostupňovou deformací, a to před i po tepelném zpracování. Jako způsob vyhodnocení byla zvolena průsečikovou metodu.

Průsečiková metoda

Vyhodnocení spočívá v použití testovacích kružnic či přímek o známé délce L a následném odečtu počtu zachycených úseků zrn N na mikrofotografii se známým zvětšením. Pro tuto práci byly použity přímkové čáry s orientací vyznačenou na Obrázku 11. Dosazením zjištěných hodnot do následujícího vzorce je získána průměrná délka lineárního úseku zrna. [21]

$$l = \frac{L_T}{N}$$

- l ... průměrná délka lineárního úseku zrna
- L_T ... průměrná délka testovací čáry
- N ... průměrný počet protnutých úseků zrn



Obrázek 11: Ukázka rozmístění testovacích čar pro průsečikovou metodu

Tento postup byl zopakován pro všechny vzorky. Výjimku tvořily vzorky povrchu po tepelném zpracování lisovaného polotovaru, kde zrna přesahují svojí velikostí velikost mikrofotografie. U těchto případů byla změřena pouze průměrná šířka zrna d , jejich délka pak může dosahovat i několik mm. Výsledky vyhodnocení velikosti zrna získané oběma

postupy měření jsou pro větší přehlednost uvedeny v tabulkách (Tabulka 12 a Tabulka 13).

Tabulka 12: Výsledky měření velikosti zrna průsečikovou metodou pro lisovaný polotovar

Lisovaný polotovar	l [μm] v příčném řezu	l [μm] v podélném řezu
Jádro, 20 % deformace	5,9	5,9
Jádro, 20 % deformace+ TZ	6,6	5,4
Povrch, 20 % deformace	5,5	-
Jádro, 40 % deformace	6,1	6,1
Jádro, 40 % deformace+ TZ	5,6	7,3
Povrch, 20 % deformace+ TZ	-	5,9
Povrch, 40 % deformace+ TZ	-	6,2

Proškrtnutá pole značí nevhodnost dané metody pro měření konkrétního vzorku v daném řezu. U některých vzorků nastala situace, kdy byl příčný řez měřen průsečikovou metodou a v podélném řezu byla měřena průměrná šířka zrna d (či obráceně). Tyto varianty lze nalézt v obou tabulkách.

Tabulka 13: Výsledky měření šířky zrna d [μm] lisovaných polotovarů

Lisovaný polotovar	d [μm] v příčném řezu	d [μm] v podélném řezu
Povrch, 20 % deformace	-	32,5
Povrch, 40 % deformace	31,8	12,9
Povrch, 20 % deformace+ TZ	97	-
Povrch, 40 % deformace+ TZ	424	-

Obecně lze říci, že vzorky z lisovaného polotovaru před tepelným zpracováním vykazují velmi jemnozrnnou strukturu s tenkou hrubozrnnou vrstvou na povrchu. Po tepelném zpracování došlo k výraznému hrubnutí zrna na povrchu u většiny testovaných vzorků. Výjimku tvoří podélné řezy povrchu vzorků s 20 % a 40 % deformace, kdy pravděpodobně došlo k chybě při přípravě vzorků (například špatné uříznutí vzorku).

Tabulka 14: Výsledky měření velikosti zrna průsečikovou metodou pro litý polotovar

Litý polotovar	l [μm] v příčném řezu	l [μm] v podélném řezu
Jádro, 20 % deformace	51,8	36,8
Jádro, 20 % deformace+ TZ	40,7	32,9
Povrch, 20 % deformace	-	32
Jádro, 40 % deformace	38,1	32,8
Jádro, 40 % deformace+ TZ	45,28	-
Povrch, 40 % deformace	30,8	-
Povrch, 20 % deformace+ TZ	-	31,8
Povrch, 40 % deformace+ TZ	49,42	-

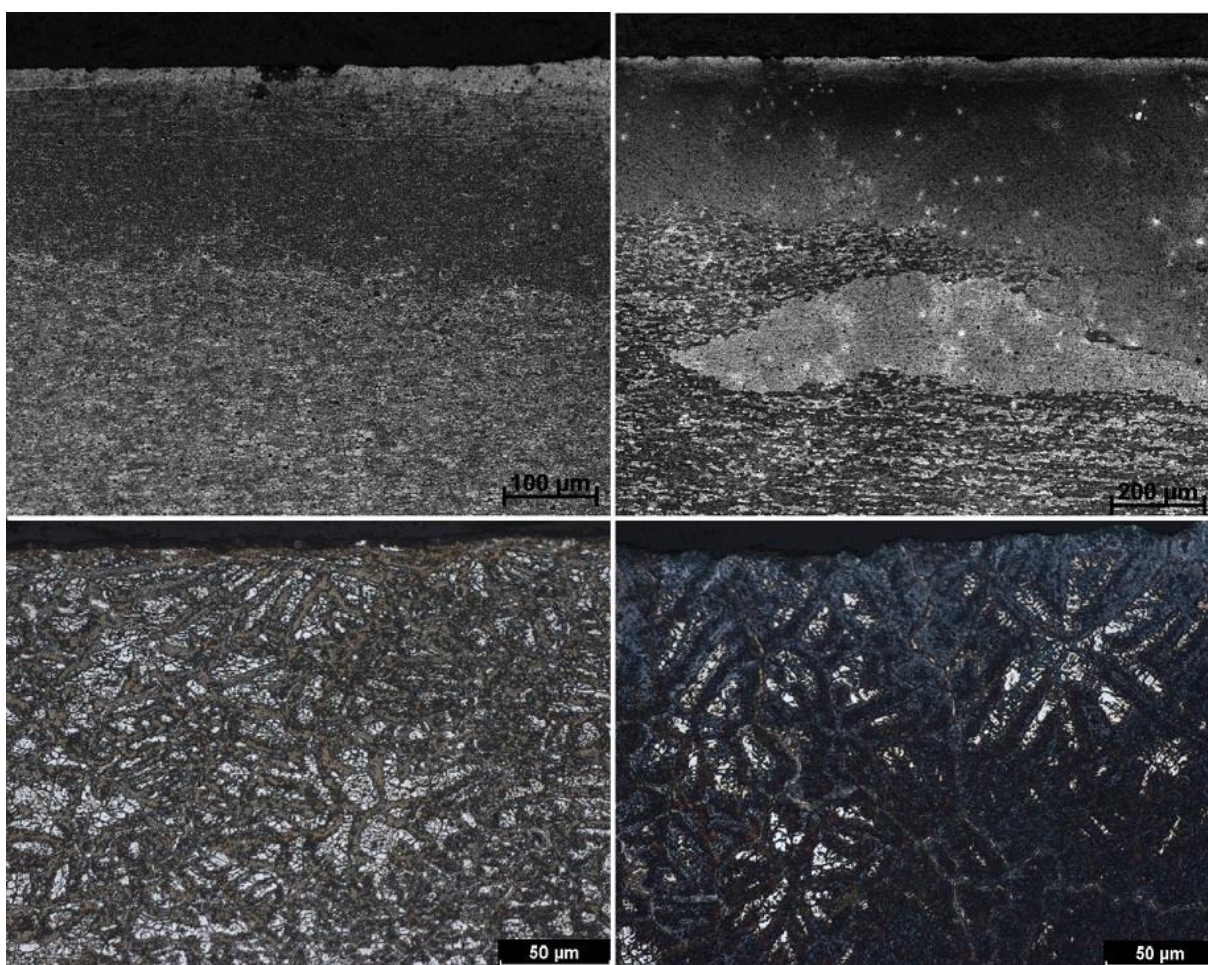
Výsledky uvedené v Tabulce 14 potvrzují předpoklad, že zrna litého polotovaru po tepelném zpracování nehrubne a zůstává přibližně stejně velké. Téměř žádný vliv na velikost zrna nemá ani stupeň deformace, případné odchylky mohly být způsobeny například nepřesnostmi při měření či chybami při přípravě vzorků. U litých polotovarů také nepozorujeme žádné podstatně rozdíly mezi velikostmi zrn v jádru a na povrchu.

Srovnání lisovaných a HCM polotovarů

Na rozdíl od lisovaných polotovarů nedochází u litých variant ke hrubnutí zrna na povrchu po tepelném zpracování. Vzorky litých polotovarů jsou si obecně velmi podobné, nezávisle na stupni deformace či umístění řezu. Oproti tomu lisované polotovary vykazují změny velikosti zrna na povrchu po tepelném zpracování a to v závislosti na předchozím stupni deformace. Čím byl stupeň deformace vyšší, tím větší zrna pak vznikala na povrchu vzorku. Všechny tyto závěry jsou podloženy malým počtem vzorků, a proto nemusí být zcela vypovídající. Pro přesnější interpretaci výsledků by bylo vhodné provést měření na větším množství vzorků i vzhledem ke skutečnosti, že leptání této slitiny a následné měření je často obtížné.

Srovnání mikrostruktury a vlivu tepelného zpracování na oba polotovary

Lisovaný polotovar 40% deformace, povrch, příčný řez	Lisovaný polotovar 40% deformace + TZ, povrch, příčný řez
Litý polotovar 20% deformace, povrch, příčný řez	Litý polotovar 20% deformace + TZ, povrch, příčný řez



Obrázek 12: Srovnání mikrostruktury a vlivu tepelného zpracování na oba polotovary

Jak je možné vidět na Obrázku 12, na povrchu vzorku s 40 % deformace lisovaného polotovaru můžeme nalézt tenčí hrubozrnnou vrstvu, jejíž tloušťka se pohybuje v řádu desítek mikrometrů. Po tepelném zpracování se ale na povrchu polotovaru vytváří velmi silná hrubozrnná vrstva s tloušťkou několik set mikrometrů. Litý polotovar naopak ve stavu po deformaci vykazuje zrna větší než pouze pěstovaný lisovaný polotovar

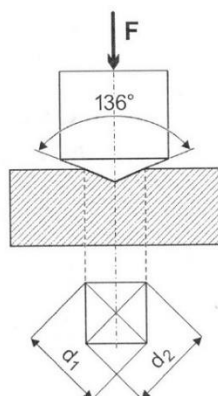
(velikost v řádu desítek mikrometrů), není ale náchylný k dalšímu hrubnutí při tepelném zpracování. Na fotografii výše je vidět, že jsou zrna litého polotovaru dále rozdělena do subzrn, ačkoliv se tyto vzorky příliš nepodařilo naleptat. Velikost zrn v jádru se v případě obou variant tepelným zpracováním příliš nemění.

5.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

V poslední kapitole praktické části mojí bakalářské práce se budu věnovat tvrdostem jednotlivých variant jednostupňového zatížení obou polotovarů. Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 6507-1. Do povrchu vzorků byl vtlačován diamantový čtyřhranný jehlan pod zkušebními zatíženími F , jak je znázorněno na Obrázku 13. Po odlehčení zatěžovací síly byly získány délky obou úhlopříček vtisku d_1 a d_2 , jejich aritmetický průměr byl spolu se silou F dosazen do následujícího vzorce. [21]

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

[21]



Obrázek 13: Smluvní označení parametrů a zatěžování při zkoušce tvrdosti dle Vickerse [21]

Pro každý vzorek byl stejný postup proveden dvakrát v jádru, dvakrát na povrchu v oblasti s vysokým podílem rekrystalizovaných zrn a dvakrát v oblasti s rekrystalizovaným podílem nízkým. Výsledné hodnoty jsou získány zprůměrováním obou hodnot v každé oblasti. Jako příklad použiji vzorek lisovaného polotovaru po 20% petchování a následném tepelném zpracování řezaný z tvářeného polotovaru v podélném směru (Tabulka 15).

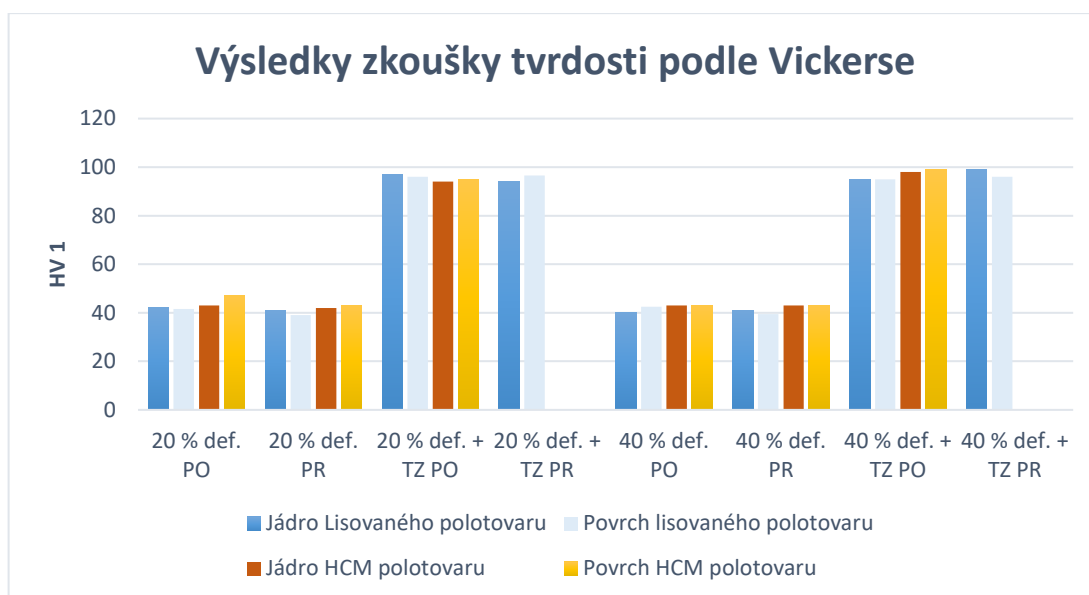
Tabulka 15: Naměřené hodnoty pro lisovaný polotovár s 20 % deformace a tepelném zpracování, příčný řez

12XPO	d ₁ [μm]	d ₂ [μm]	d [μm]	HV 1 [-]	HV 1 [-]
Jádro	143,0	136,0	139,5	95,0	94
	138,0	145,0	141,5	93,0	
Oblast s vysokým podílem rekrystalizovaných zrn	138,0	139,0	138,5	97,0	97
	135,0	141,0	138,0	97,0	
Oblast s nízkým podílem rekrystalizovaných zrn	140,0	138,0	139,0	96,0	96
	138,0	142,0	140,0	95,0	

Výsledné hodnoty každé varianty jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 16, kde je možno vidět rozdíly mezi lisovaným a litým polotovarem. Hodnoty pro povrch jsou u některých vzorků výsledkem aritmetického zprůměrování hodnot pro oblasti s vysokým podílem rekrystalizovaných zrn a oblasti s nízkým.

Tabulka 16: Souhrnné výsledky zkoušky tvrdosti podle Vickerse lisovaných a litých polotovárů.

Lisovaný polotovár	HV 1 [-]		HCM polotovár	HV 1 [-]	
	jádro	povrch		jádro	povrch
20 % def. Podélný řez	42	41,5	20 % def. Podélný řez	43	47
20 % def. Příčný řez	41	39	20 % def. Příčný řez	42	43
20 % def. + TZ Podélný řez	97	96	20 % def. + TZ Podélný řez	94	95
20 % def. + TZ Příčný řez	94	96,5	20 % def. + TZ Příčný řez	-	-
40 % def. Podélný řez	40	42,5	40 % def. Podélný řez	43	43
40 % def. Příčný řez	41	39,5	40 % def. Příčný řez	43	43
40 % def. + TZ Podélný řez	95	95	40 % def. + TZ Podélný řez	98	99
40 % def. + TZ Příčný řez	99	96	40 % def. + TZ Příčný řez	-	-



Graf 8: Souhrnné výsledky zkoušky tvrdosti podle Vickerse lisovaných a litých polotovaru.

Jak je patrné z Grafu 9 i předcházející Tabulky 16, oba typy polotovaru vykazují téměř shodné výsledky. U všech variant se dá říci, že se téměř neliší tvrdost změřená na povrchu a v jádru. V případě některých variant pocházejících z lisovaného polotovaru, u nichž byl povrch zkoušen zvlášť pro oblasti s vysokým a nízkým podílem rekrystalizovaných zrn, se ani hodnoty získané měřením obou těchto oblastí od sebe nijak výrazně neliší. Minimální rozdíly prokázalo také měření v příčném a podélném směru.

Na všech vzorcích můžeme pozorovat prudký vzrůst hodnot tvrdosti (na více než dvojnásobné hodnoty) po tepelném zpracování, bez závislosti na předchozím stupni deformace.

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo porovnání změn mechanických a strukturních vlastností dvou odlišných polotovarů slitiny hliníku EN AW- 6082. Jedná se o polotovar lisovaný a HCM, přičemž oba byly zastoupeny řadou variant zpracování s různými stupni deformace a část z nich byla následně tepelně zpracována. V teoretické části byla provedena rešerše zaměřující se na hliník, jeho slitiny a způsoby jejich vytvrzování či naopak odpevnění. Rešerši zakončuje kapitola pojednávající o zkoušení mechanických vlastností.

Následující praktická část je zaměřena na tahovou zkoušku, vyhodnocení velikosti zrn a zkoušku tvrdosti podle Vickerse. Měření tvrdosti a vyhodnocení velikosti zrna byly provedeny na vzorcích s jednostupňovou deformací. Zkouška tahem byla provedena a vyhodnocena na všech variantách obou polotovarů, tj. na vzorcích s jednostupňovou i vícestupňovou deformací.

Vyhodnocení tahové zkoušky ukázalo obecně vyšší hodnoty smluvní meze kluzu a meze pevnosti u lisovaných polotovarů, polotovary lité naopak vykazují vyšší hodnoty tažnosti a kontrakce. Největší rozdíly můžeme pozorovat u výchozích stavů obou variant, následným deformačním případně tepelným zpracováním se rozdíly zmenšují, v některých případech téměř mizí.

Při vyhodnocení mikrostruktury se ukázal velmi velký rozdíl mezi srovnávanými polotovary. U lisovaných variant je zrno výrazně jemnější a lze sledovat směr působící deformace. Tyto polotovary mají povrchovou hrubozrnnou vrstvu, která se během precipitačního vytvrzování zvětšuje a dochází v ní k výraznému hrubnutí zrna v závislosti na předchozím stupni deformace. Na polotovar HCM nemá tepelné zpracování ani stupeň deformace z hlediska velikosti zrna téměř žádný vliv.

Zkouška tvrdosti podle Vickerse provedená v povrchové oblasti a v jádře vykazovala téměř shodné výsledky pro oba polotovary ve všech zkoušených variantách. Nejvyšších hodnot dosáhly všechny vzorky po precipitačním vytvrzování. Oproti tomu přibližně poloviční hodnoty vykazují vzorky tepelně nezpracované.

Z výsledků je zřejmé, že po aplikované deformaci se polotovar HCM blíží svými vlastnostmi polotovaru lisovanému a to bez rizika tvorby nežádoucí hrubozrnné vrstvy. Navíc je struktura polotovaru HCM rovnoměrná i když hrubozrnnější, což se příznivě

projeví v potlačení anizotropie. Pro získání dostatečných mechanických vlastností je v případě obou polotovarů nutné provést po deformaci precipitační vytvrzování.

Další informace k tomuto tématu lze nalézt v diplomových pracích Ing. Toma Procházky (práce obsahuje mimo jiné i výsledky víceúrovňových deformací variant) a Bc. Radka Bednáře.

List symbolů a zkratek

T_T	teplota tání
m	metr
mm	milimetr
μm	mikrometr
nm	nanometr
mm^2	milimetr čtvereční
cm^3	centimetr krychlový
g	gram
μg	mikrogram
l	litr
K	Kelvin
W	Watt
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
MPa	megapascal
%	procento

Seznam grafů

GRAF 1: PRACOVNÍ DIAGRAM VZORKŮ 124X (20 %+ 40 %+ TZ)	40
GRAF 2: SMLUVNÍ DIAGRAM VZORKŮ 124X (20 %+ 40 % DEFORMACE A NÁSLEDNÉ TEPELNÉ VYTVRZENÍ) S VYNESENÝMI MEZEMI	42
GRAF 3: SROVNÁNÍ R _{p0,2} A R _m LISOVANÝCH POLOTOVARŮ	44
GRAF 4: SROVNÁNÍ R _{p0,2} A R _m LITÝCH POLOTOVARŮ	46
GRAF 5: SROVNÁNÍ A A Z LISOVANÝCH POLOTOVARŮ	48
GRAF 6: SROVNÁNÍ A A Z LITÝCH POLOTOVARŮ	50
GRAF 8: VZÁJEMNÉ SROVNÁNÍ LISOVANÝCH A LITÝCH VARIANT	51
GRAF 9: SOUHRNNÉ VÝSLEDKY ZKOUŠKY TVRDOSTI PODLE VICKERSE LISOVANÝCH A LITÝCH POLOTOVARŮ	59

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: NEJVĚTŠÍ SVĚTOVÍ PRODUCENTI BAUXITU PRO ROK 2014 [5].....	11
OBRÁZEK 2: VYLOUČENÍ PRECIPITAČNÍ FÁZE: A) TUHÝ ROZTOK; B) KOHERENTNÍ PRECIPITÁT; C) SEMIKOHERENTNÍ PRECIPITÁT; D) NEKOHERENTNÍ PRECIPITÁT [19]	19
OBRÁZEK 3: SCHÉMATICKÁ PŘEDSTAVA POLYGONIZACE. A) NÁHODNÉ USPOŘÁDÁNÍ HRANOVÝCH DISLOKACÍ B) VZNIK BUNĚK USPOŘÁDÁNÍM HRANOVÝCH DISLOKACÍ DO ŘAD NAD SEBOU.....	21
OBRÁZEK 4: SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ STATICKÉ DISKONTINUÁLNÍ REKRYSALIZACE PŘI ŽÍHÁNÍ MATERIÁLU ZPEVNĚNÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA, PŘEVZATO Z: [25]	21
OBRÁZEK 5: KVAZIBINÁRNÍ ŘEZ SYSTÉMEM AL – MG – SI OD AL K Mg_2Si [4]	25
OBRÁZEK 6: VZOREK ZKUŠEBNÍ TYČE PRO ZKOUŠKU TAHEM, VLASTNÍ ZPRACOVÁNÍ.....	27
OBRÁZEK 7: SCHÉMA PRACOVNÍHO DIAGRAMU $F - \Delta L$: A) S VÝRAZNOU MEZÍ KLUZU B) S NEVÝRAZNOU MEZÍ KLUZU	30
OBRÁZEK 8: POROVNÁNÍ SMLUVNÍHO A SKUTEČNÉHO TAHOVÉHO DIAGRAMU PRO OCEL S VÝRAZNOU MEZÍ KLUZU.[21]	34
OBRÁZEK 9: KONTRAKCE OBDÉLNÍKOVÉHO PRŮŘEZU, PŘEVZATO A UPRAVENO Z: [28].....	36
OBRÁZEK 10: TAHOVÁ TYČ S PŘIBLIŽNÝMI ROZMĚRY	40
OBRÁZEK 11: UKÁZKA ROZMÍSTĚNÍ TESTOVACÍCH ČAR PRO PRŮSEČÍKOVOU METODU	52
OBRÁZEK 12: SROVNÁNÍ MIKROSTRUKTURY A VLIVU TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA OBA POLOTOVARY.....	55
OBRÁZEK 13: SMLUVNÍ OZNAČENÍ PARAMETRŮ A ZATĚŽOVÁNÍ PŘI ZKOUŠCE TVRDOMI DLE VICKERSE [21].....	57

Seznam tabulek

TABULKA 1: FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ČISTÉHO AL, PŘEVZATO A UPRAVENO Z: [4]	10
TABULKA 2: CHEMICKÉ SLOŽENÍ SLITINY EN AW- 6082	25
TABULKA 3: DÉLKY A ŠÍŘKY TYČÍ Z PÁSŮ, PLECHŮ A PLOCHÝCH VÝROBKŮ [28]	29
TABULKA 4: DÉLKY A ŠÍŘKY VZORKŮ Z TYČÍ, DRÁTŮ A PROFILŮ [28]	29
TABULKA 5: STUPNÉ DEFORMACÍ A DOSAŽENÉ ROZMĚRY PO PĚCHOVÁNÍ.....	39
TABULKA 6: NAMĚŘENÉ PARAMETRY VZORKU 124X-1	41
TABULKA 7: VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY VZORKŮ 124X	41
TABULKA 8: SROVNÁNÍ SMLUVNÍCH MEZÍ KLUZU A MEZÍ PEVNOSTI V TAHU VZORKŮ Z LISOVANÝCH POLOTOVARŮ	43
TABULKA 9: SROVNÁNÍ SMLUVNÍCH MEZÍ KLUZU A MEZÍ PEVNOSTI V TAHU VZORKŮ Z LITÝCH POLOTOVARŮ.....	45
TABULKA 10: SROVNÁNÍ TAŽNOSTI A KONTRAKCE VZORKŮ Z LISOVANÝCH POLOTOVARŮ	47
TABULKA 11: SROVNÁNÍ TAŽNOSTI A KONTRAKCE VZORKŮ Z LITÝCH POLOTOVARŮ	49
TABULKA 12: VÝSLEDKY MĚŘENÍ VELIKOSTI ZRNA PRŮSEČÍKOVOU METODOU PRO LISOVANÝ POLOTOVAR.....	53
TABULKA 13: VÝSLEDKY MĚŘENÍ ŠÍŘKY ZRNA D [μm] LISOVANÝCH POLOTOVARŮ.....	53
TABULKA 14: VÝSLEDKY MĚŘENÍ VELIKOSTI ZRNA PRŮSEČÍKOVOU METODOU PRO LITÝ POLOTOVAR	54
TABULKA 15: NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO LISOVANÝ POLOTOVAR S 20 % DEFORMACE A TEPelnÉM ZPRACOVÁNÍ, PŘÍČNÝ ŘEZ.....	58
TABULKA 16: SOUHRNNÉ VÝSLEDKY ZKOUŠKY TVRDOSTI PODLE VICKERSE LISOVANÝCH A LITÝCH POLOTOVARŮ.	58

Seznam zdrojů

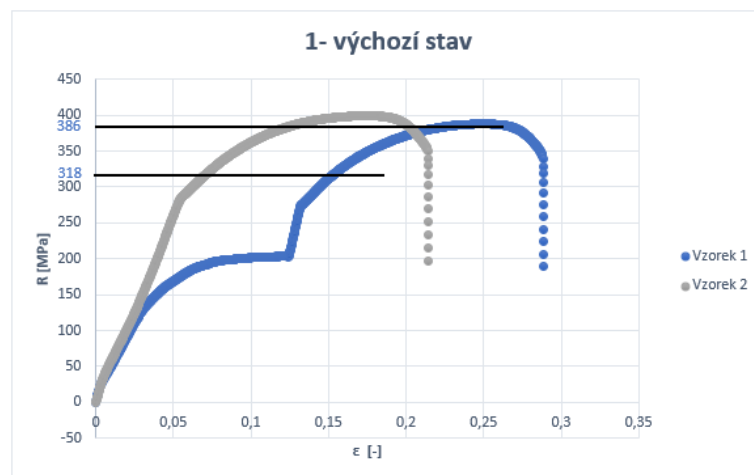
- [1] JAN, Moravec. Zpracování hliníku – od minerálu až po kabel. In: *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2019-09-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/zpracovani-hliniku-od-mineralu-az-po-kabel>
- [2] GELLER, Tom. Aluminum: Common Metal, Uncommon Past. In: *Science History Institut* [online]. 2007 [cit. 2019-09-27]. Dostupné z: https://www.sciencehistory.org/distillations/aluminum-common-metal-uncommon-past?fbclid=IwAR0yT8a1Z4kuePq3xPZg2iU-v4VtLx_UOvkR594wAFvMr65-6ENeMZtIKJQ
- [3] NOVÁK, Jan A. Kdo doopravdy objevil hliník? In: *Novákoviny* [online]. 2013 [cit. 2019-09-27]. Dostupné z: http://www.novakoviny.eu/archiv/historie/984-hlinik-objev-historie?fbclid=IwAR34YD5_LfXdNcZ4h30AaGxDV58jJm0JOf239iVuwcqf dpU0oTKOHuFVOMM
- [4] MICHNA, Štefan a kol. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [5] ALL ABOUT ALUMINIUM. In: *Aluminiumleader.com* [online]. UC RUSAL, 2017 [cit. 2019-09-07]. Dostupné z: <https://www.aluminiumleader.com/>
- [6] The aluminium production process. In: *EUROPEAN ALUMINIUM* [online]. Brussel: EUROPEAN ALUMINIUM, 2016 [cit. 2019-09-07]. Dostupné z: <https://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/production-process/>
- [7] Most common uses of aluminum. In: *METAL Supermarkets* [online]. 2016 [cit. 2019-09-07]. Dostupné z: <https://www.metalsupermarkets.com/common-uses-aluminum/>
- [8] KLOTZ, Katrin a kol. The Health Effects of Aluminum Exposure. In: *National Center for Biotechnology Information* [online]. 2017 [cit. 2019-09]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5651828/>
- [9] Besser nicht aus Alu. In: *Test.de* [online]. STIFTUNG WARENTEST, 2018 [cit. 2019-09]. Dostupné z: <https://www.test.de/Aluminium-Grillschalen-Salz-und-Zitrone-tabu-4840716-0/>
- [10] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 3: Speciální kovové materiály*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2015. ISBN: 978-80-01-05685-1

- [11] ČSN EN 573-1 *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 1: Číselné označování*. 2005. © Český normalizační institut
- [12] HELMENSTINE, Anne Marie. Aluminium or Aluminium Alloys. In: *ThoughtCo*. [online]. New York: ThoughtCo, 2019 [cit. 2019-09-16]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/aluminum-or-aluminium-alloys-603707>
- [13] The Aluminium Association. *The Aluminium Association* [online]. Arlington: The Aluminium Association, 2019 [cit. 2019-09-16]. Dostupné z: <https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>
- [14] DINWIDDIE, Keith. Heat Treating Aluminium. In: *AZO MATERIALS* [online]. 2016 [cit. 2019-09-22]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12703>
- [15] DJUKANOVIC, Goran. Aluminium – Lithium Alloys Fight Back. In: *Aluminium INSIDER* [online]. 2017 [cit. 2019-09-22]. Dostupné z: https://aluminiuminsider.com/aluminium-lithium-alloys-fight-back/?fbclid=IwAR3lus2m7Vvk-PU3V_QmVtCxlu0ASPjEsIICpcBDu4XTO_UKli2QMCSHa0Rg
- [16] KOPELIOVICH, Dmitri. Effect of alloying elements on properties of aluminum alloys. In: *SubsTech* [online]. 2012 [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=effects_of_alloying_elements_on_properties_of_aluminum_alloys
- [17] How and why alloying elements are added to aluminum. In: *AlcoTec* [online]. ALCOTECH, 2015 [cit. 2019-09-23]. Dostupné z: <http://www.alcotec.com/us/en/education/knowledge/qa/How-and-why-alloying-elements-are-added-to-aluminum.cfm>
- [18] ČSN EN 573-3 *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 3: Chemické složení*. © Český normalizační institut, 2004.
- [19] ROUČKA, Jaromír. *METALURGIE NEŽELEZNÝCH SLITIN*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [20] Tepelné zpracování. In: *ALUNET* [online]. ALUNET.cz, 2019 [cit. 2019-11-04]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/tepelne-zpracovani>
- [21] SOBOTOVÁ, Jana a kol. *Nauka o materiálu I. a II. Cvičení. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.*

- [22] JANOVEC, Jiří a kol. *FYZIKÁLNÍ METALURGIE*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02935-2
- [23] SEDLÁČEK, Vladimír. *Zotavení a rekrystalizace*. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1985
- [24] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 1: Struktury kovových materiálů*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2013. ISBN 978-80-01-05248-8
- [25] SAKAI, Taku a kol. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. *Progress in Materials Science* [online]. 2014, březen 2014, (60), 130-207 [cit. 2019-11-17]. ISSN 0079-6425. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642513000698>
- [26] EN AW-6082 T6 (AlMgSi1 F28/F31/F32). In: *ALUNET* [online]. ALUNET.cz, 2019 [cit. 2019-11-04]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-6082>
- [27] MACEK, Karel a kol. *Nauka o materiálu*. Vydání druhé. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-02543-8.
- [28] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: Vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.

Příloha A – Vyhodnocení tahových zkoušek

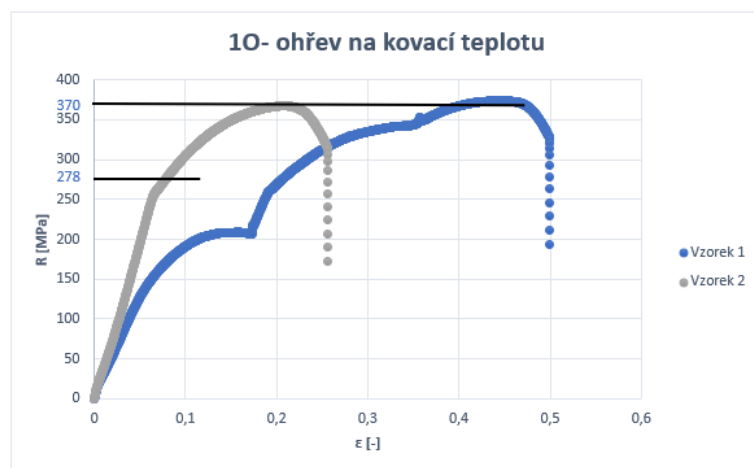
A.1 Výsledky lisovaných polotovarů



Graf A 1: Smluvní tahový diagram vzorků 1

Tabulka A 1: Výsledky tahové zkoušky vzorků 1

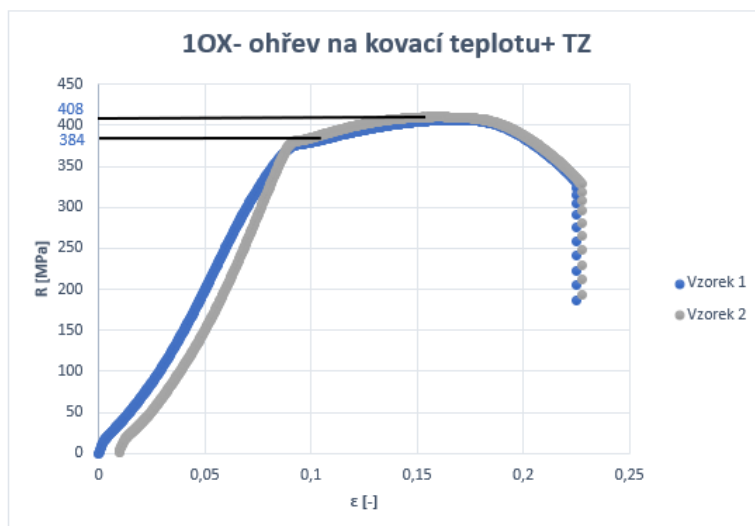
1	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	381	318	15,7	31
Vzorek 2	392	318	15,7	31



Graf A 2: Smluvní tahový diagram vzorků 10

Tabulka A 2: Výsledky tahové zkoušky vzorků 10

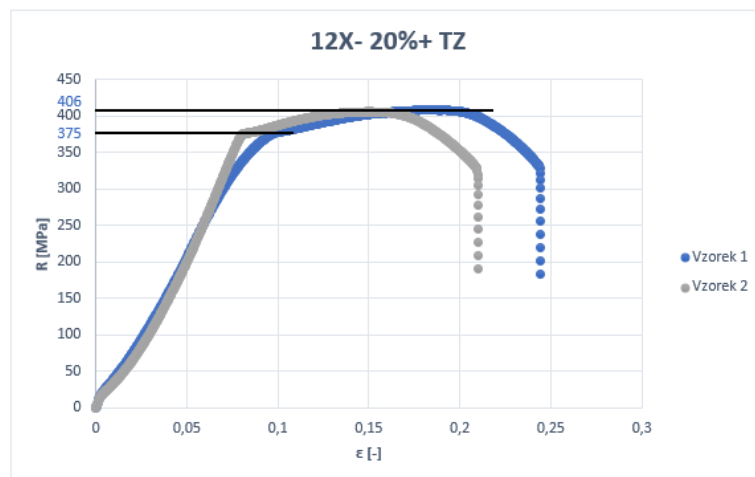
10	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	374	281	18,8	35
Vzorek 2	367	274	17,3	34



Graf A 3: Smluvní tahový diagram vzorků 10X

Tabulka A 3: Výsledky tahové zkoušky vzorků 10X

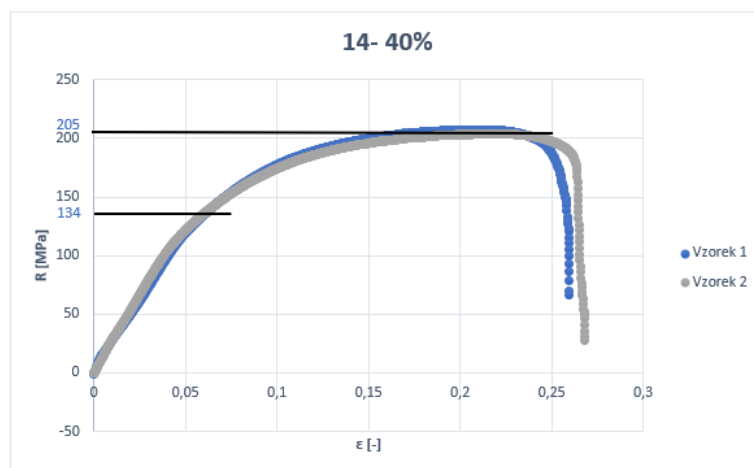
10X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	406	379	10,0	39
Vzorek 2	410	389	12,5	33



Graf A 4: Smluvní tahový diagram vzorků 12X

Tabulka A 4: Výsledky tahové zkoušky vzorků 12X

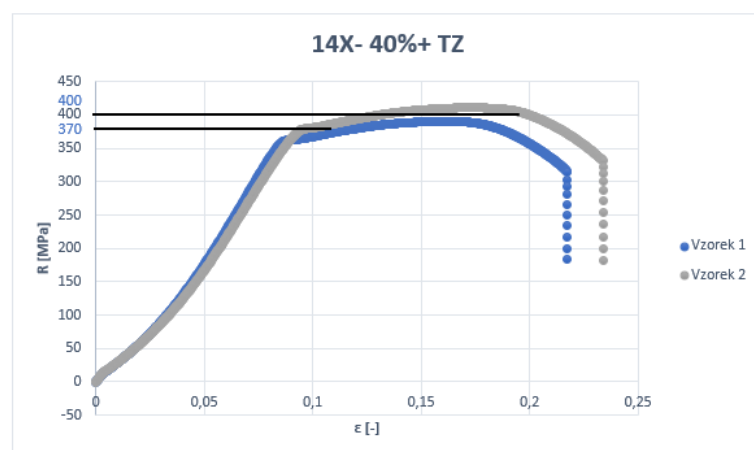
12X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	408	366	13	39
Vzorek 2	405	384	13,5	33



Graf A 5: Smluvní tahový diagram vzorků 14

Tabulka A 5: Výsledky tahové zkoušky vzorků 14

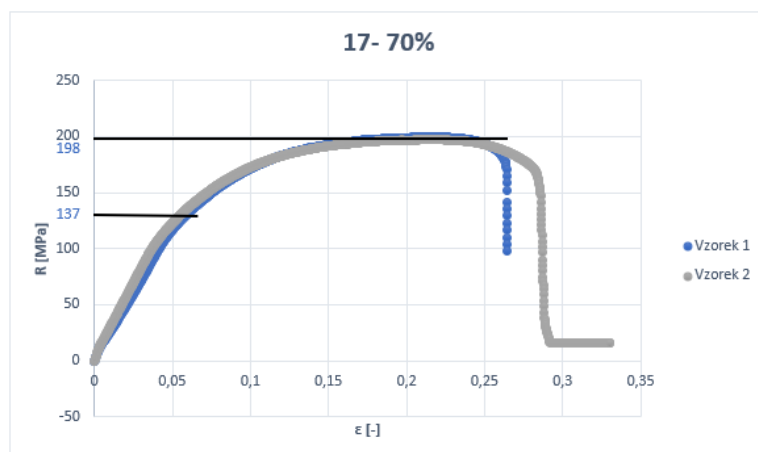
14-40 %	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	207	147	14,75	33,984
Vzorek 2	204	121	16,75	33,984



Graf A 6: Smluvní tahový diagram vzorků 14X

Tabulka A 6: Výsledky tahové zkoušky vzorků 14X

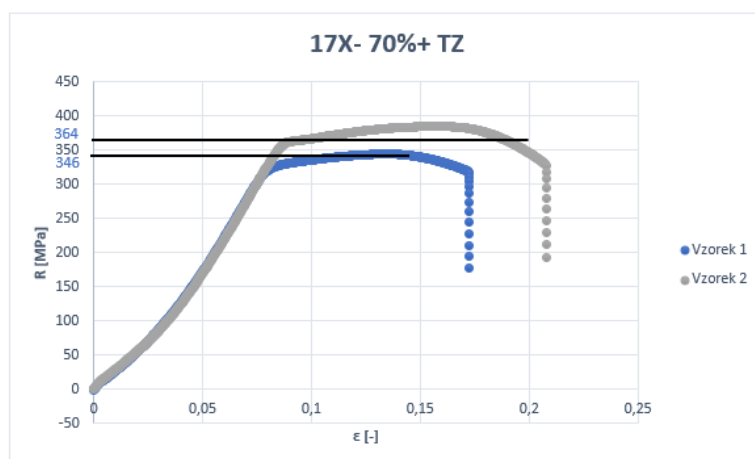
14X	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	390	365	13,25	32,675
Vzorek 2	411	375	12,5	33,984



Graf A 7: Smluvní tahový diagram vzorků 17

Tabulka A 7: Výsledky tahové zkoušky vzorků 17

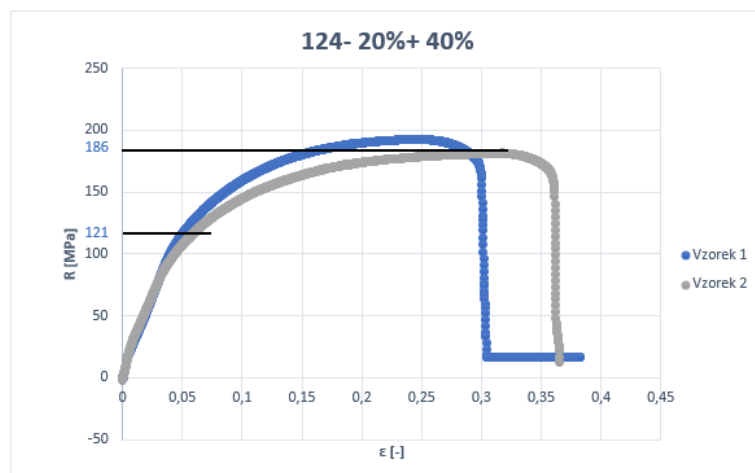
17	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	200	144	16	36
Vzorek 2	197	131	19	43,75



Graf A 8: Smluvní tahový diagram vzorků 17X

Tabulka A 8: Výsledky tahové zkoušky vzorků 17X

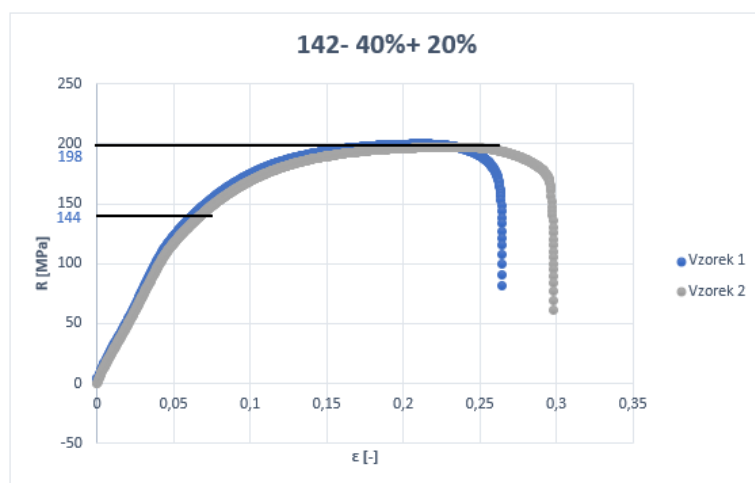
17X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	344	326	12,25	37,570
Vzorek 2	384	365	11	41,411



Graf A 9: Smluvní tahový diagram vzorků 124

Tabulka A 9: Výsledky tahové zkoušky vzorků 124

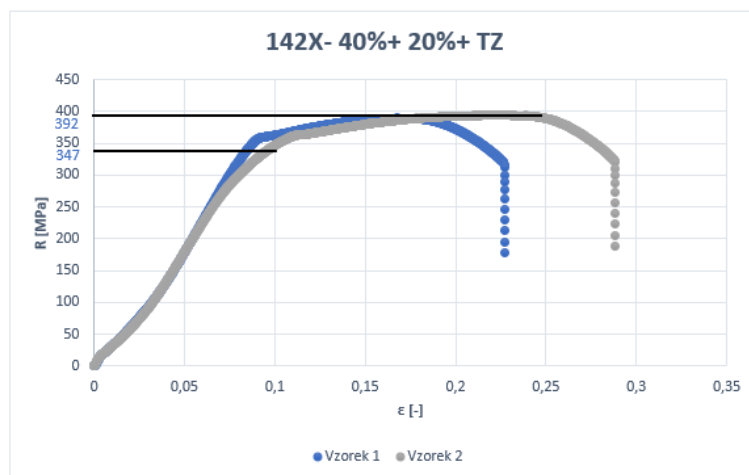
124	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	193	123	19	38,752
Vzorek 2	181	120	17,5	33,607



Graf A 10: Smluvní tahový diagram vzorků 142

Tabulka A 10: Výsledky tahové zkoušky vzorků 142

142	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	200	145	16	39,937
Vzorek 2	197	142	20,25	31,937

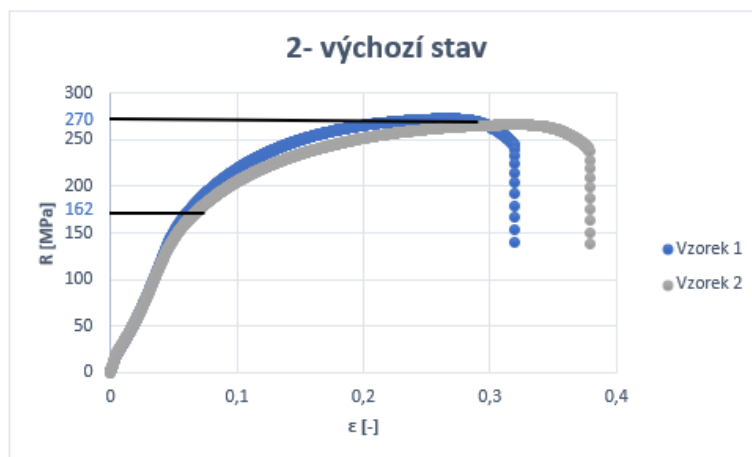


Graf A 11: Smluvní tahový diagram vzorků 142X

Tabulka A 11: Výsledky tahové zkoušky vzorků 142X

142X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	389	358	12	34,609
Vzorek 2	394	340	12,5	38,752

A.2 Výsledky litých polotovarů



Graf A 12: Smluvní tahový diagram vzorků 2

Tabulka A 12: Výsledky tahové zkoušky vzorků 2

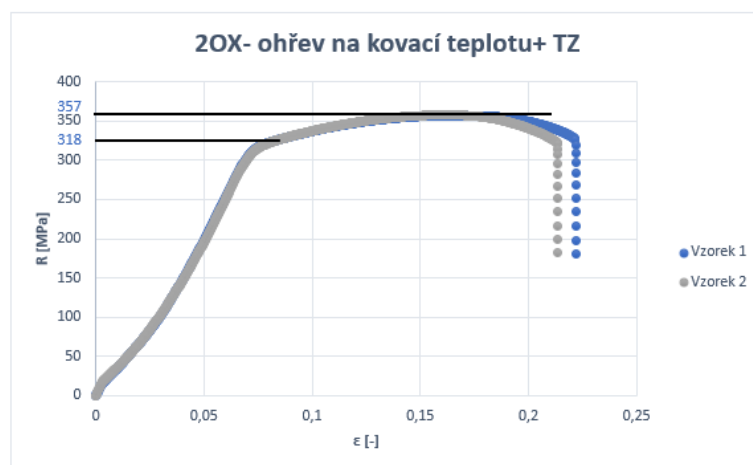
2	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	273	167	23,3	44
Vzorek 2	267	158	23,5	43



Graf A 13: Smluvní tahový diagram vzorků 2O

Tabulka A 13: Výsledky tahové zkoušky vzorků 2O

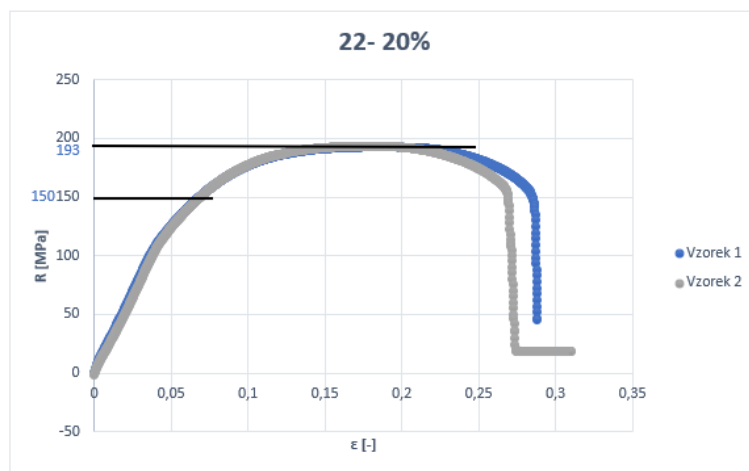
2O	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	262	162	23,5	43
Vzorek 2	260	160	22,8	44



Graf A 14: Smluvní tahový diagram vzorků 2OX

Tabulka A 14: Výsledky tahové zkoušky vzorků 2OX

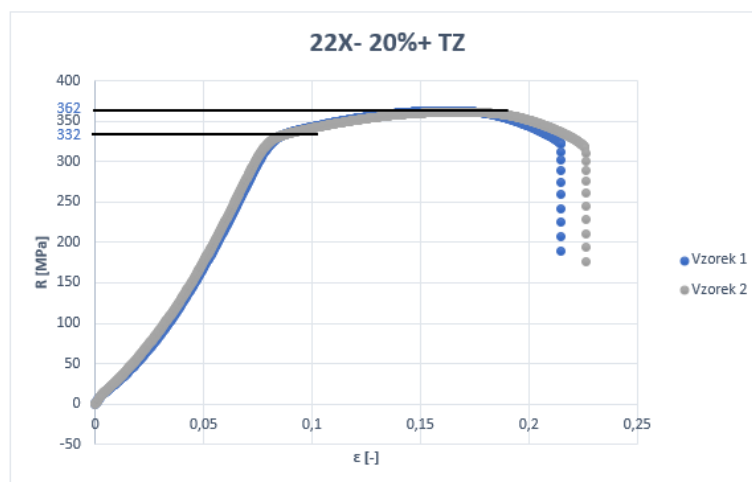
2OX	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	357	318	15,5	31
Vzorek 2	358	318	16,5	36



Graf A 15: Smluvní tahový diagram vzorků 22

Tabulka A 15: Výsledky tahové zkoušky vzorků 22

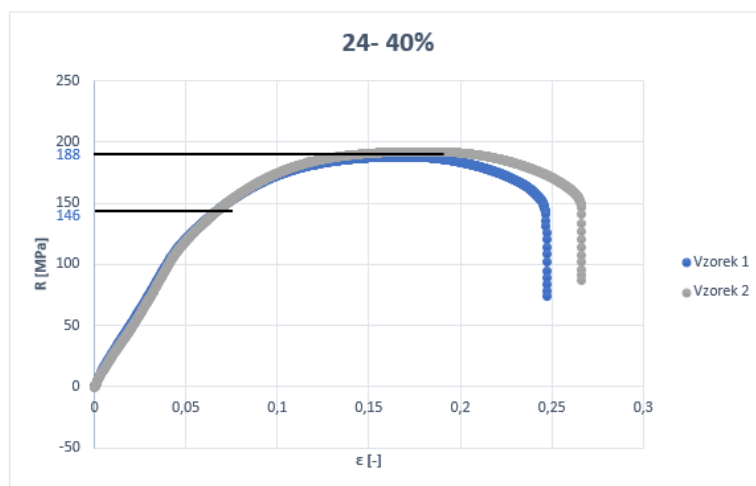
22	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	193	149	17,75	49,234
Vzorek 2	194	151	18,75	49,234



Graf A 16: Smluvní tahový diagram vzorků 22X

Tabulka A 16: Výsledky tahové zkoušky vzorků 22X

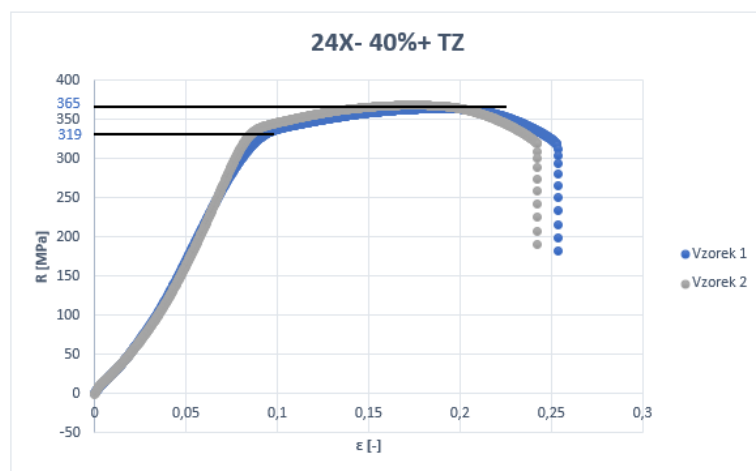
22X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	363	333	10,5	30,727
Vzorek 2	362	331	12,75	36,404



Graf A 17: Smluvní tahový diagram vzorků 24

Tabulka A 17: Výsledky tahové zkoušky vzorků 24

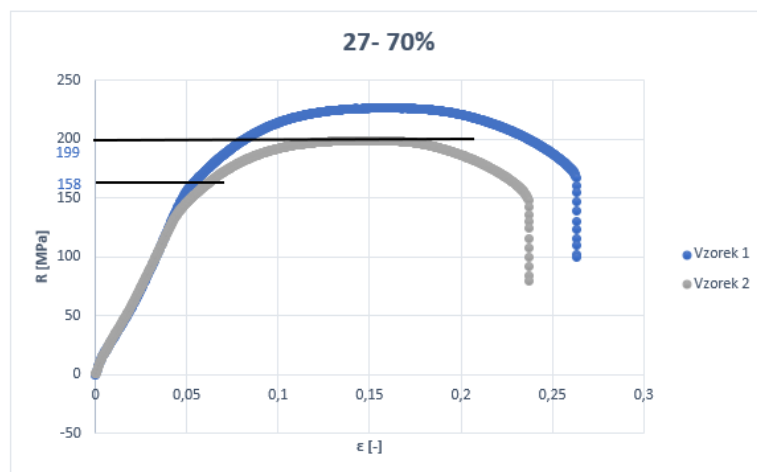
24	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	188	144	18,75	50,381
Vzorek 2	192	148	17,75	48,088



Graf A 18: Smluvní tahový diagram vzorků 24X

Tabulka A 18: Výsledky tahové zkoušky vzorků 24X

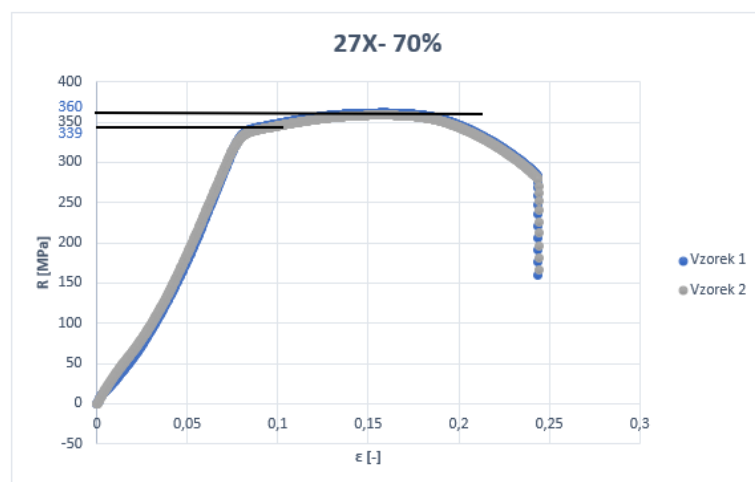
24X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	364	303	13,25	33,607
Vzorek 2	368	336	13,25	41,411



Graf A 19: Smluvní tahový diagram vzorků 27

Tabulka A 19: Výsledky tahové zkoušky vzorků 27

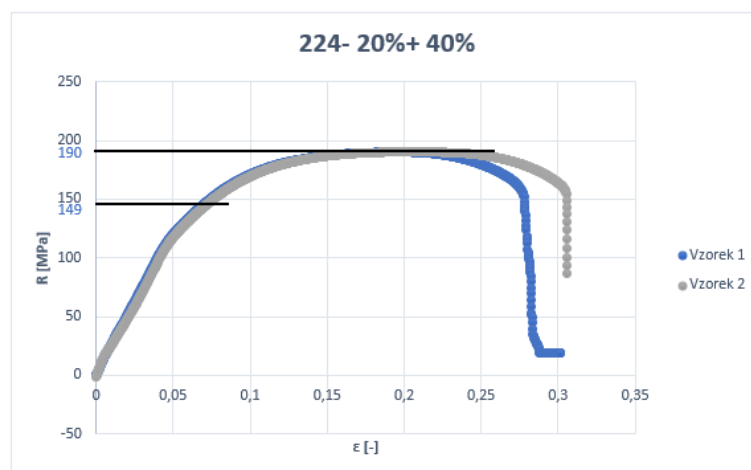
27	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	199	158	20,5	49,787
Vzorek 2	199	159	17,5	56,142



Graf A 20: Smluvní tahový diagram vzorků 27X

Tabulka A 20: Výsledky tahové zkoušky vzorků 27X

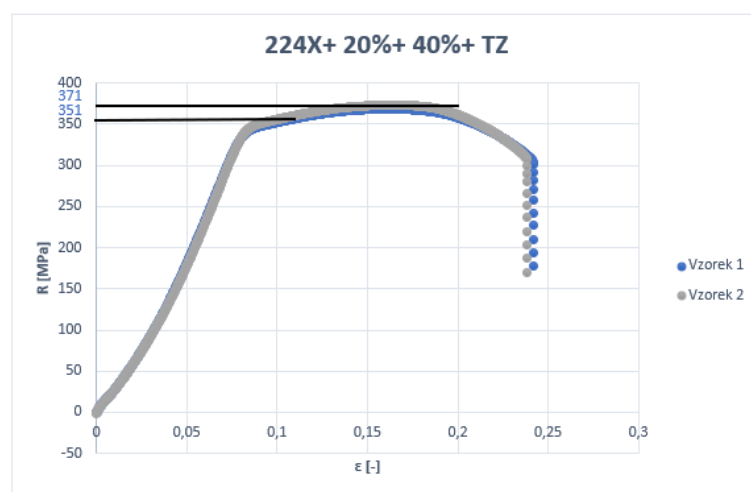
27X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	362	341	17,25	53,862
Vzorek 2	359	338	15	44,223



Graf A 21: Smluvní tahový diagram vzorků 224

Tabulka A 21: Výsledky tahové zkoušky vzorků 224

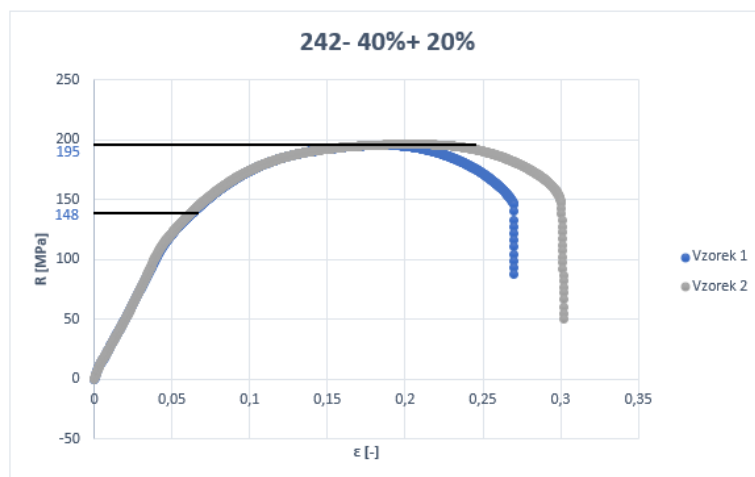
224	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	190	143	21,5	45,609
Vzorek 2	190	154	22,75	47,437



Graf A 22: Smluvní tahový diagram vzorků 224X

Tabulka A 22: Výsledky tahové zkoušky vzorků 224X

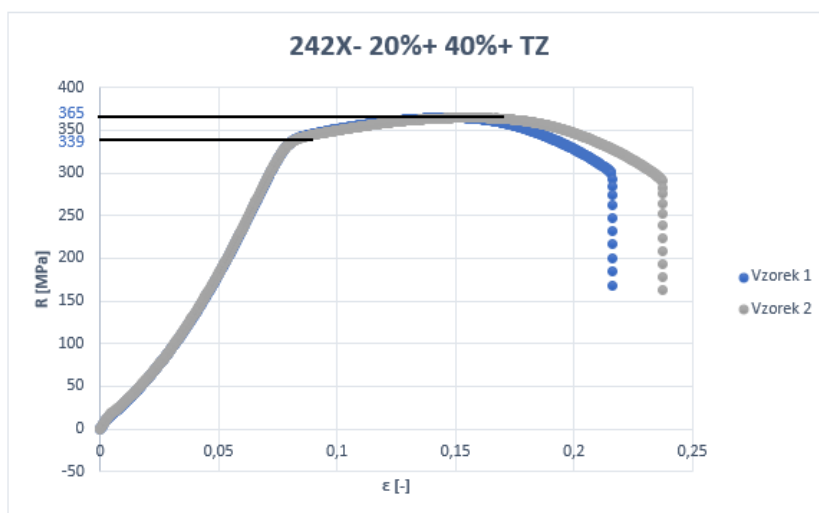
224X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	369	350	13	43,040
Vzorek 2	373	353	13,5	44,683



Graf A 23: Smluvní tahový diagram vzorků 242

Tabulka A 23: Výsledky tahové zkoušky vzorků 242

242	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	195	149	19	53,319
Vzorek 2	196	147	21,5	49,863



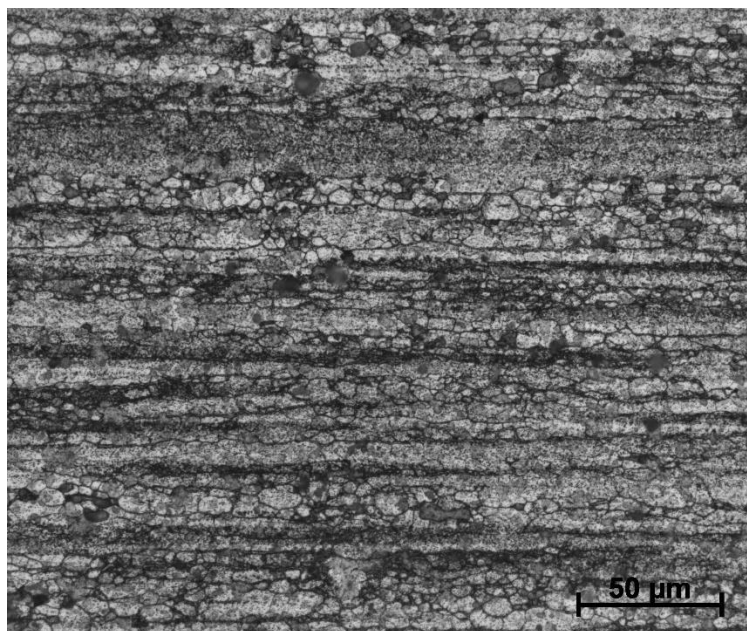
Graf A 24: Smluvní tahový diagram vzorků 242X

Tabulka A 24: Výsledky tahové zkoušky vzorků 242X

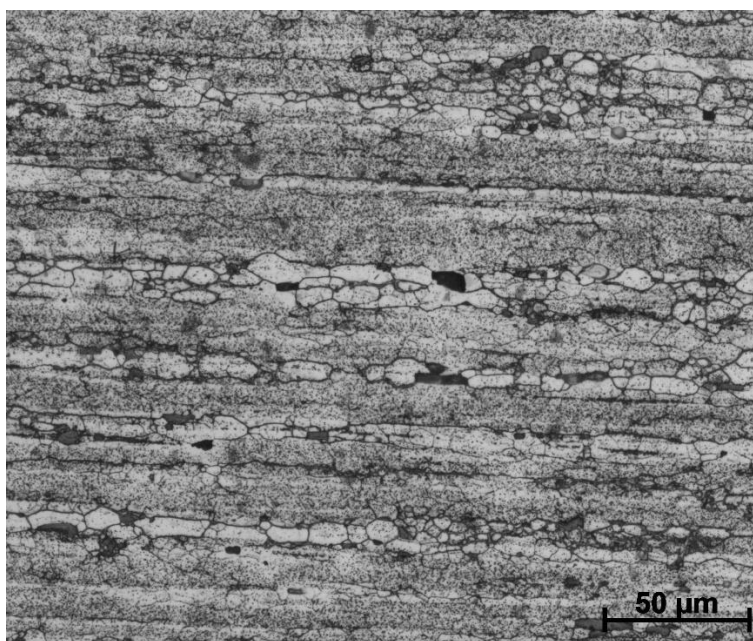
242X	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek 1	365	340	13	44,223
Vzorek 2	364	338	15	36

Příloha B – Struktury vzorků po leptání

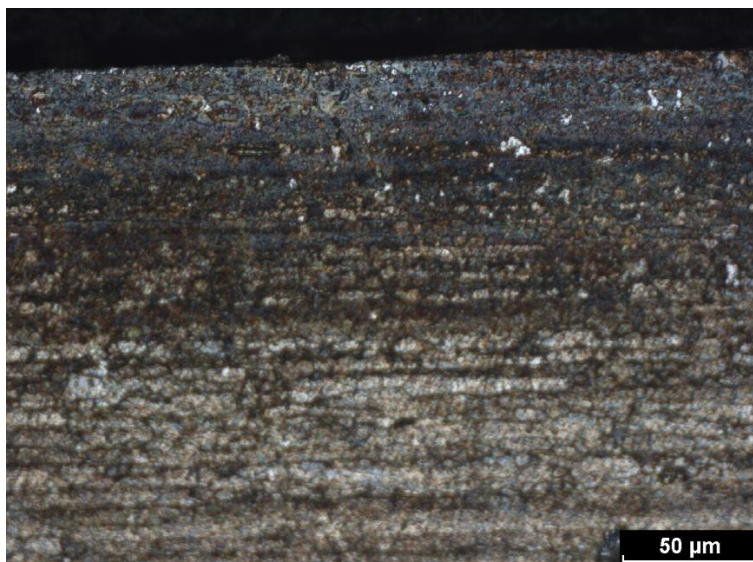
B.1 Lisovaný polotovar po 20 % deformace



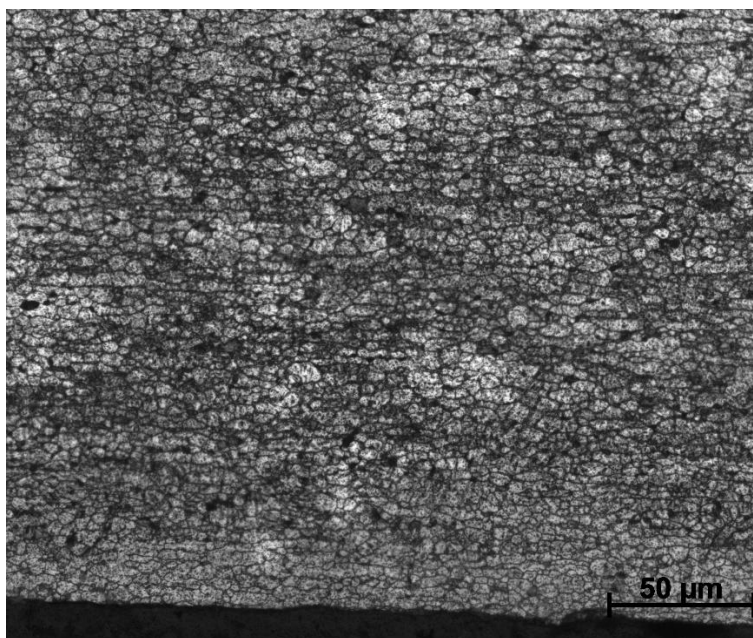
Obrázek B 1: Struktura jádra lisovaného polotovaru po 20 % deformace, podélný řez



Obrázek B 2: Struktura jádra lisovaného polotovaru po 20 % deformace, příčný řez

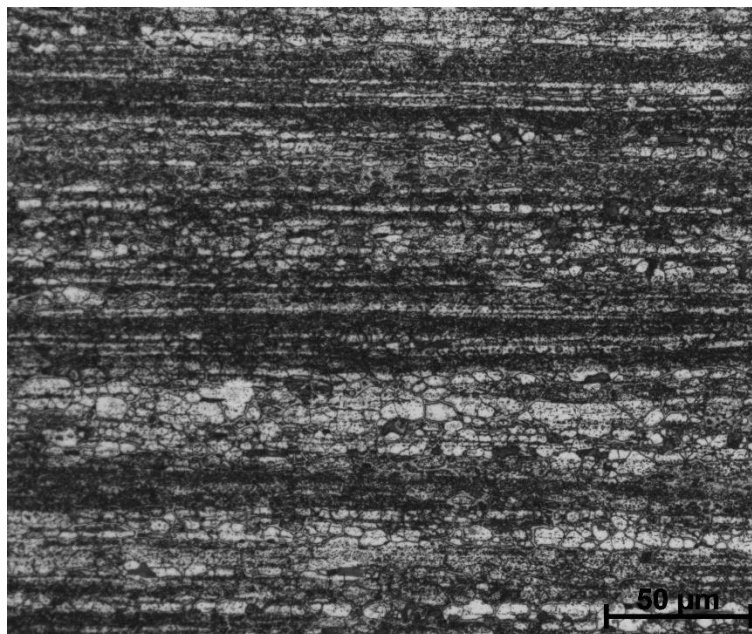


Obrázek B 3: Struktura povrchu lisovaného polotovaru po 20 % deformace, podélný řez

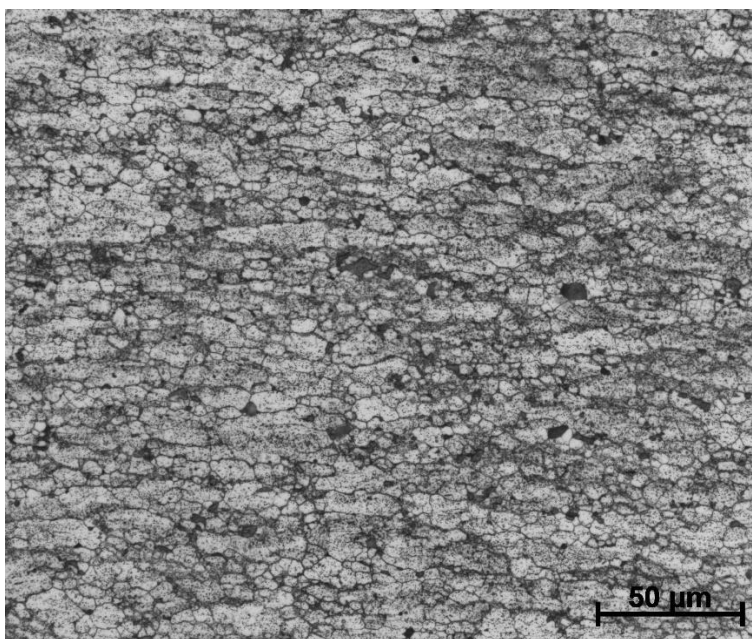


Obrázek B 4: Struktura povrch lisovaného polotovaru po 20 % deformace, příčný řez

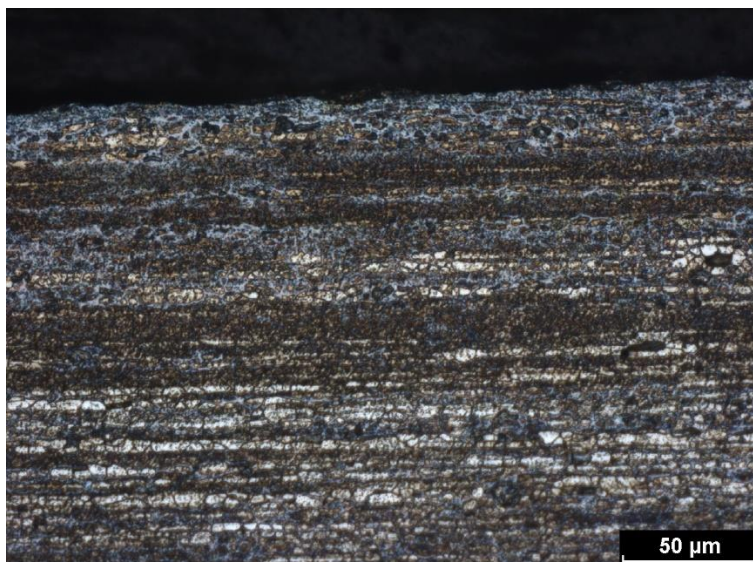
B.2 Lisovaný polotovar po 40 % deformace



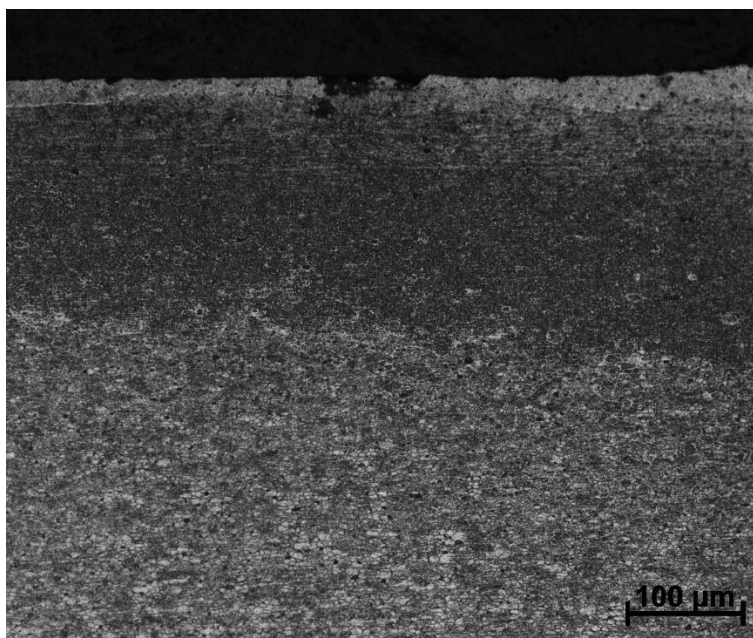
Obrázek B 5: Struktura jádra lisovaného polotovaru po 40 % deformace, podélný řez



Obrázek B 6: Struktura jádra lisovaného polotovaru po 40 % deformace, příčný řez

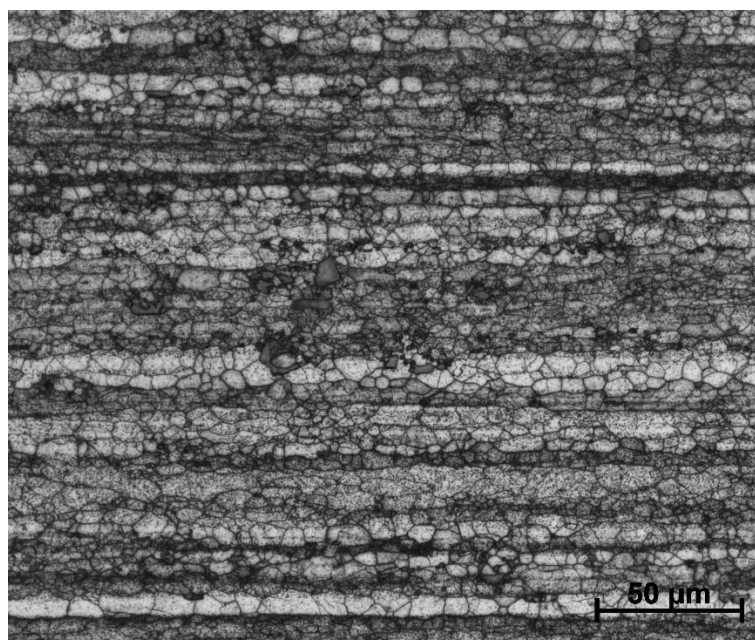


Obrázek B 7: Struktura povrchu lisovaného polotovaru po 40 % deformace, podélný řez

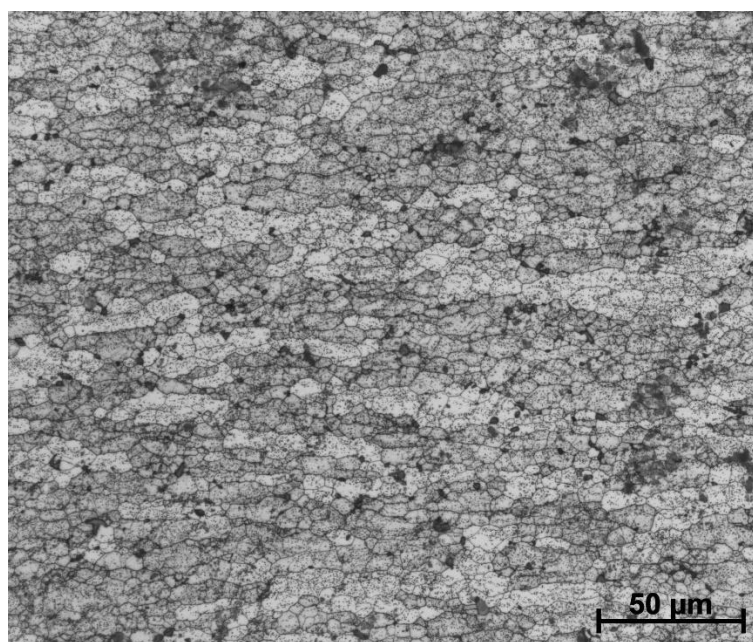


Obrázek B 8: Struktura povrch lisovaného polotovaru po 40 % deformace, příčný řez

B.3 Lisovaný polotovar po 20 % deformace a tepelném zpracování



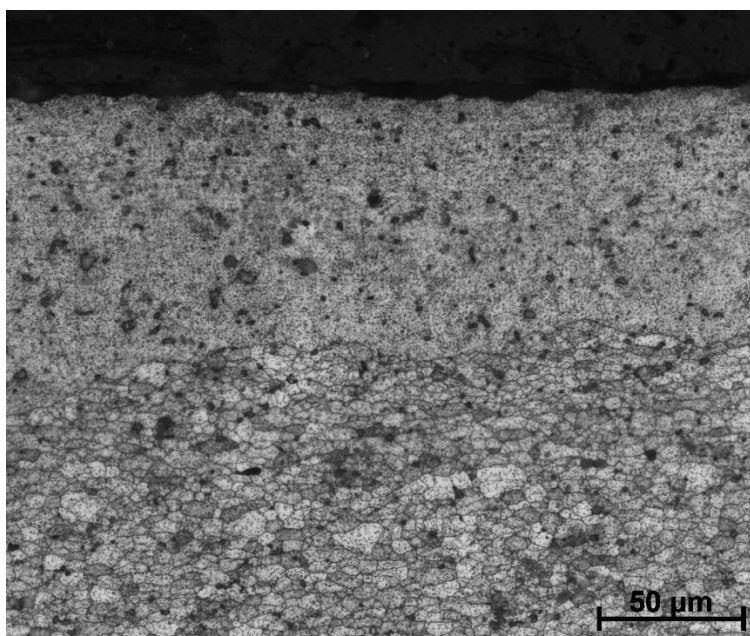
Obrázek B 9: Struktura jádra lisovaného polotovaru po 20 % deformace a TZ, podélný řez



Obrázek B 10: Struktura jádra lisovaného polotovaru po 20 % deformace a TZ, příčný řez

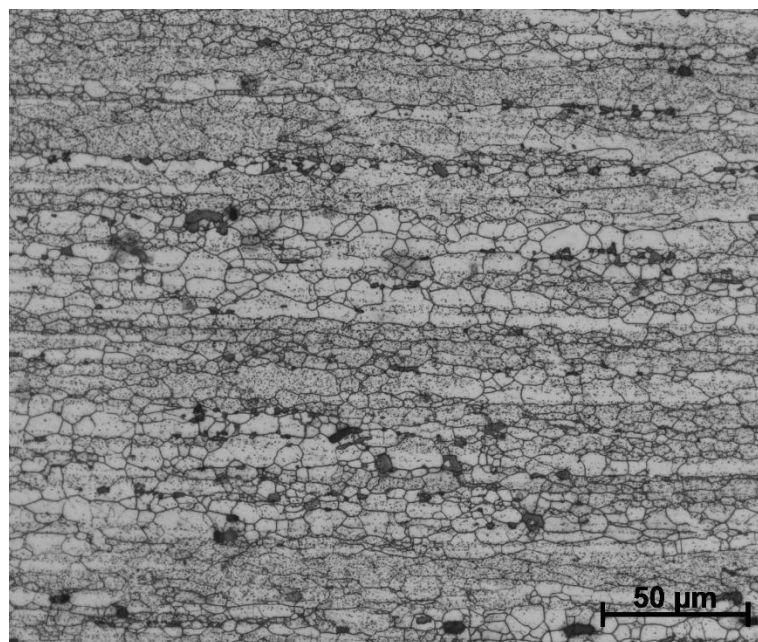


Obrázek B 11: Struktura povrchu lisovaného polotovaru po 20 % deformace a TZ, podélný řez

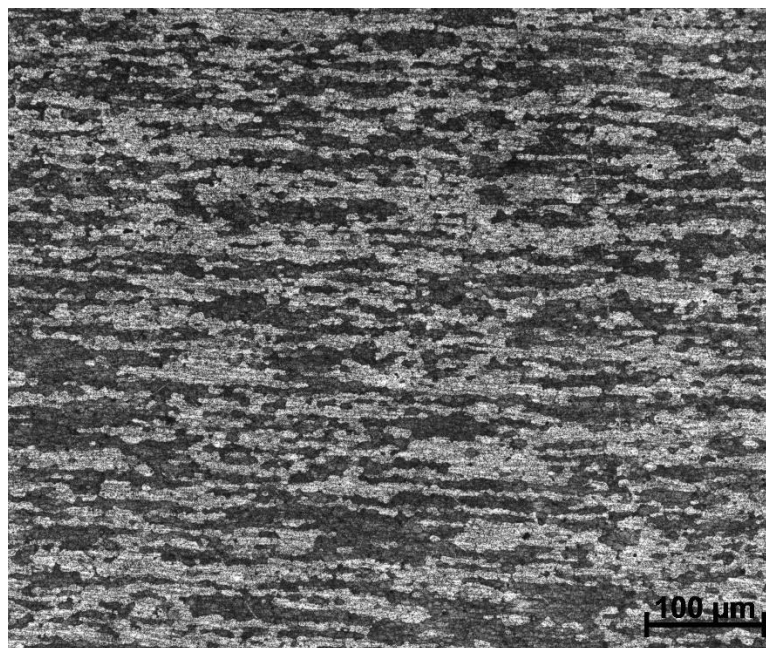


Obrázek B 12: Struktura povrchu lisovaného polotovaru po 20 % deformace a TZ, příčný řez

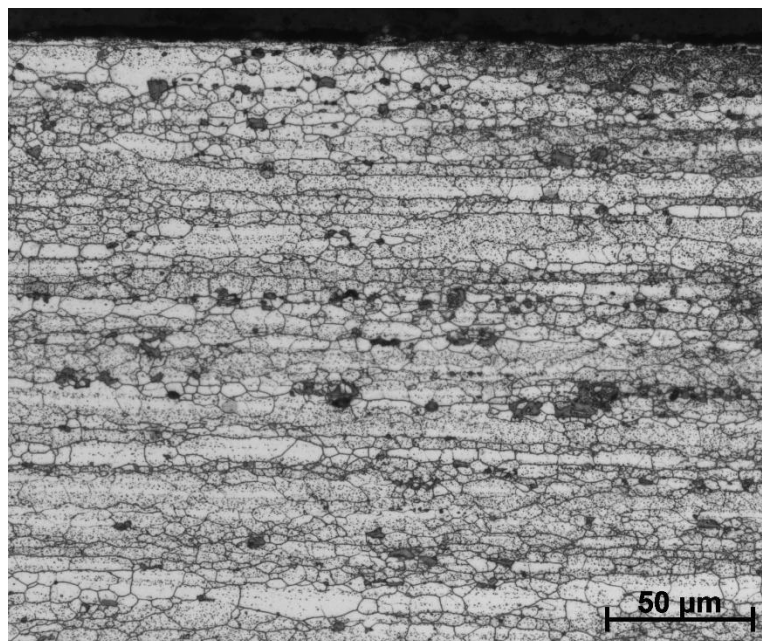
B.4 Struktura lisovaného polotovaru po 40 % deformace a tepelném zpracování



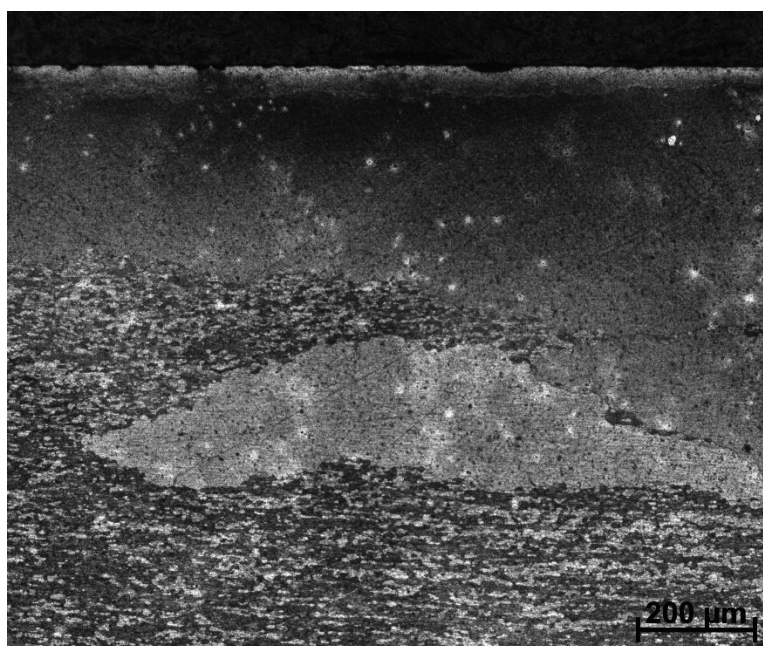
Obrázek B 13: Struktura jádra lisovaného polotovaru po 40 % deformace a TZ, podélný řez



Obrázek B 14: Struktura jádra lisovaného polotovaru po 40 % deformace a TZ, příčný řez

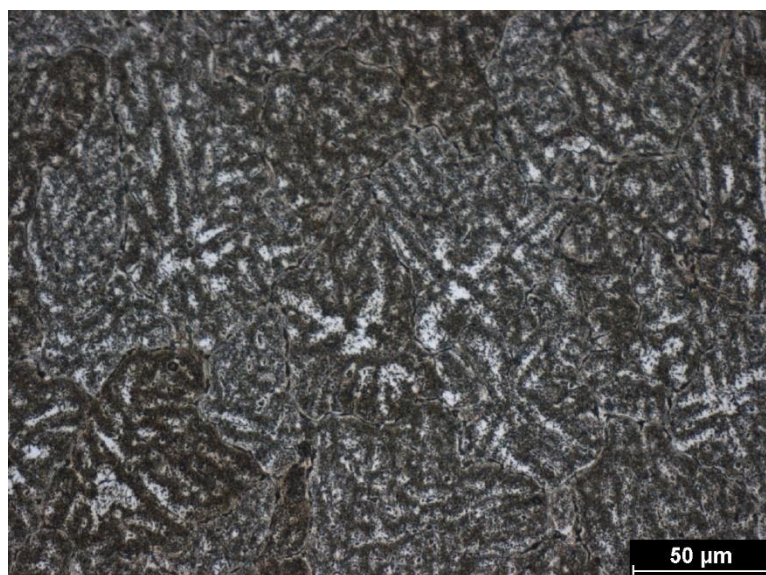


Obrázek B 15: Struktura povrchu lisovaného polotovaru po 40 % deformace a TZ, podélný řez

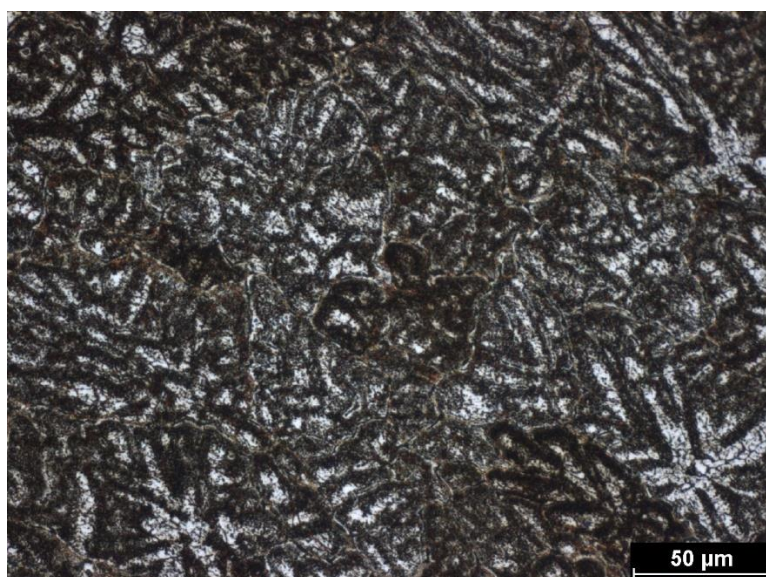


Obrázek B 16: Struktura povrchu lisovaného polotovaru po 40 % deformace a TZ, příčný řez

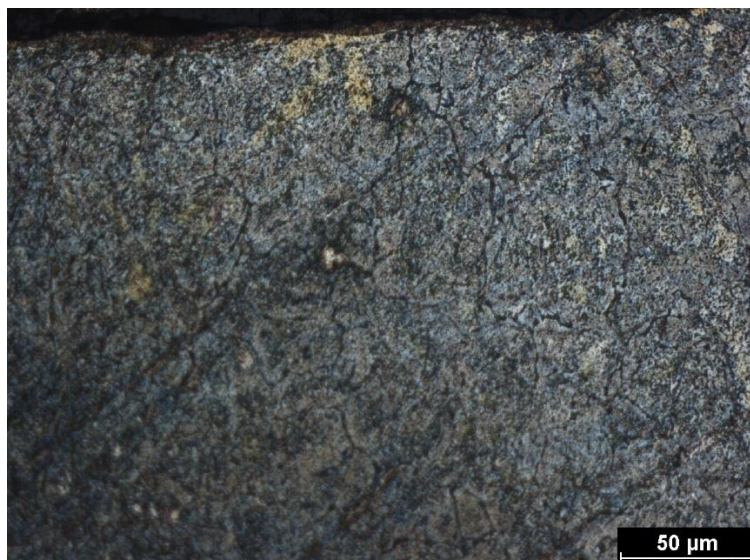
B.5 Struktura litého polotovaru po 20 % deformace



Obrázek B 17: Struktura jádra litého polotovaru po 20 % deformace, podélný řez

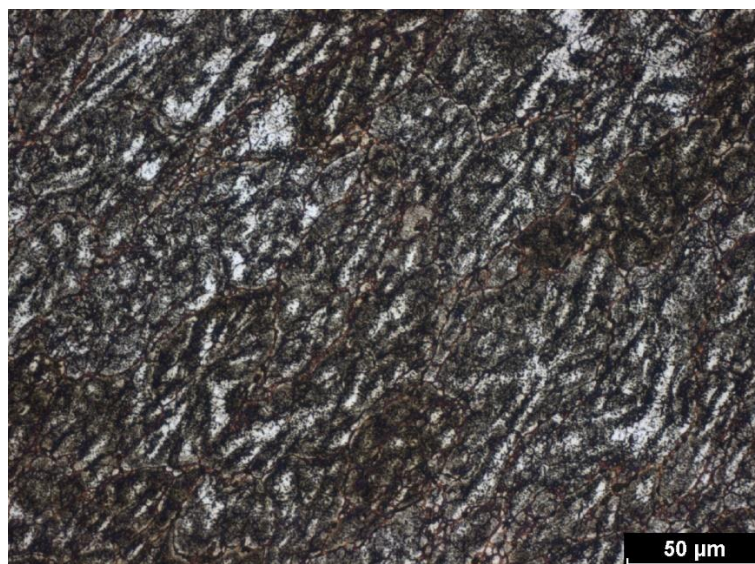


Obrázek B 18: Struktura jádra litého polotovaru po 20 % deformace, příčný řez

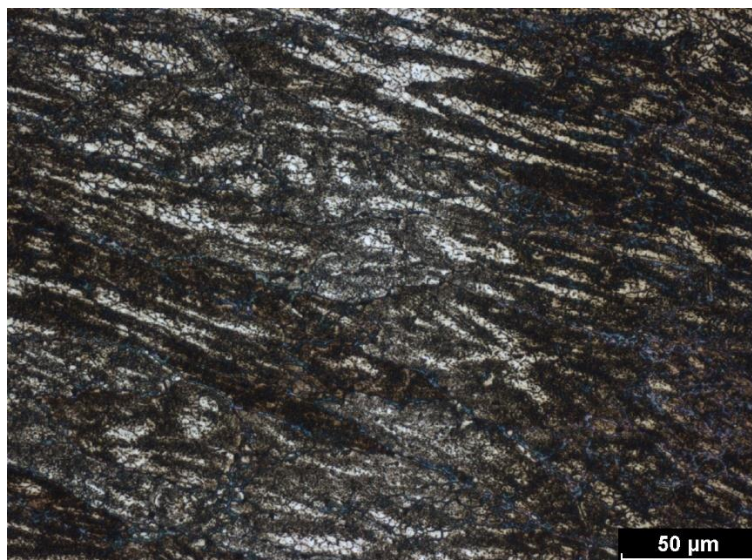


Obrázek B 19: Struktura povrchu litého polotovaru po 20 % deformace, podélný řez

B.6 Struktura litého polotovaru po 40 % deformace



Obrázek B 20: Struktura jádra litého polotovaru po 40 % deformace, podélný řez

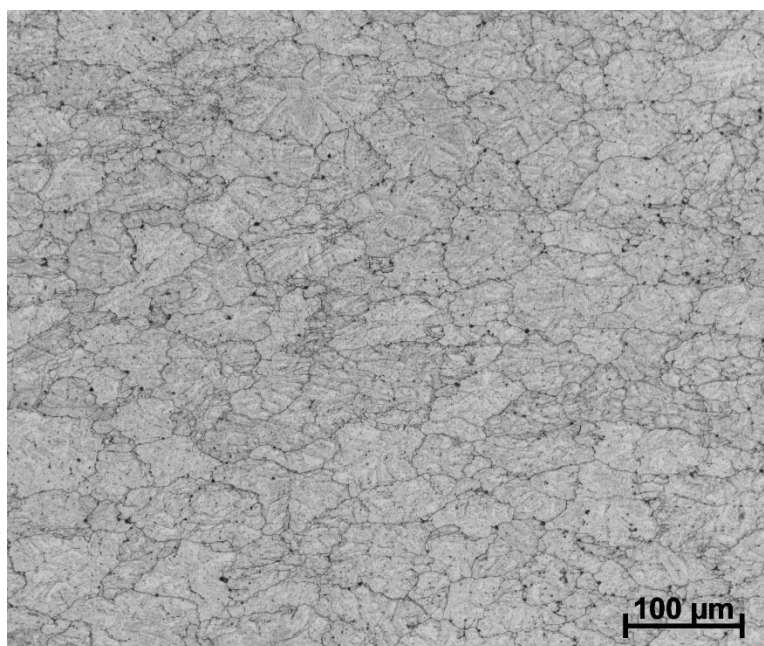


Obrázek B 21: Struktura jádra litého polotovaru po 40 % deformace, příčný řez

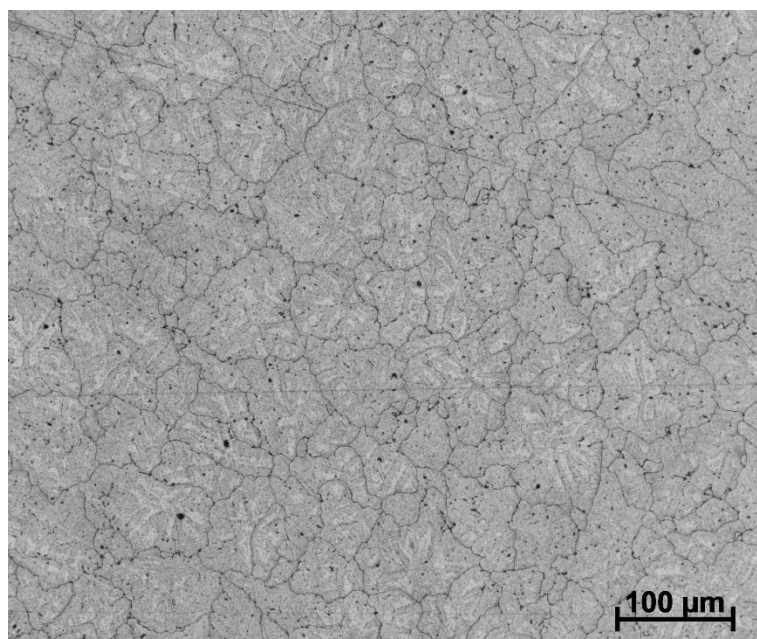


Obrázek B 22: Struktura povrchu litého polotovaru po 40 % deformace, příčný řez

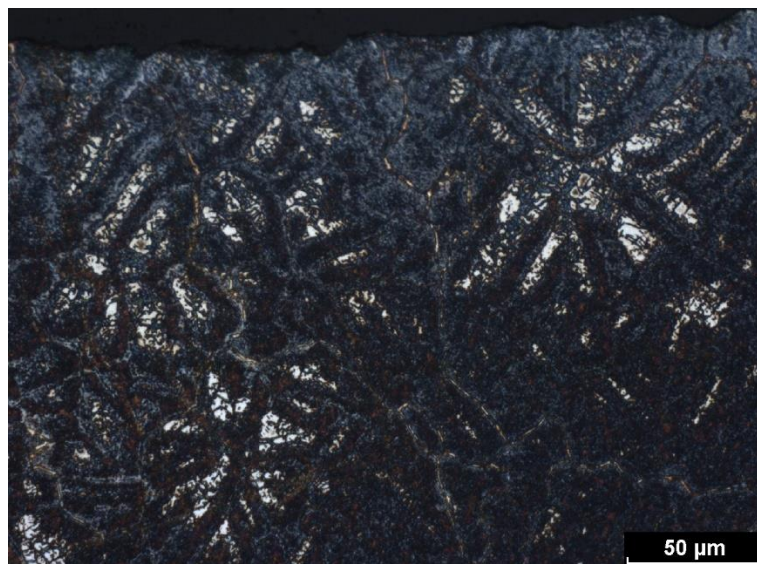
B.7 Struktura litého polotovaru po 20 % deformace a tepelném zpracování



Obrázek 23: Struktura jádra litého polotovaru po 20 % deformace a TZ, podélný řez

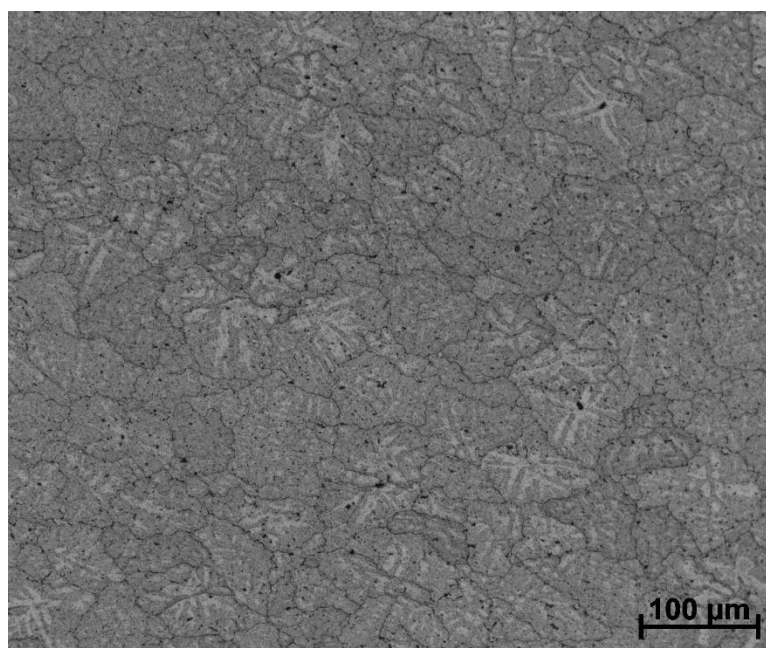


Obrázek B 24: Struktura jádra litého polotovaru po 20 % deformace a TZ, příčný řez

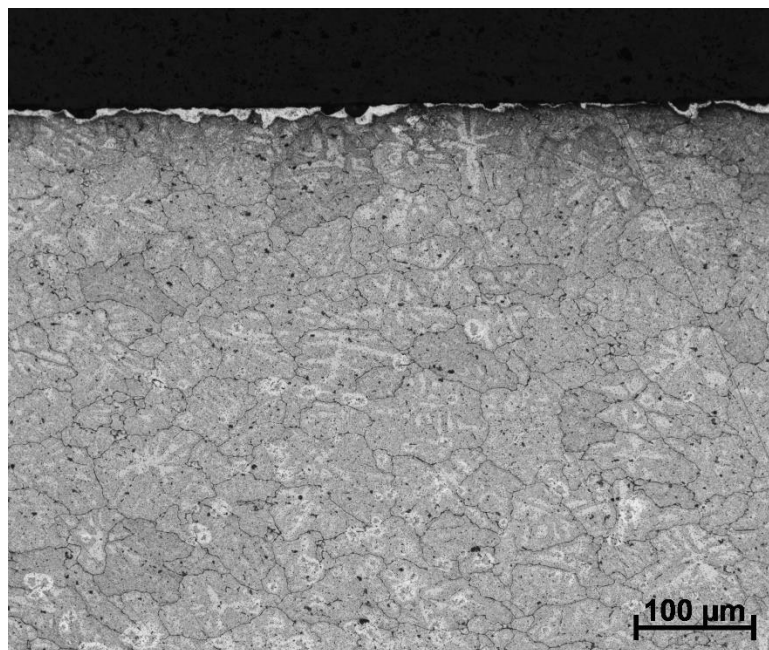


Obrázek B 25: Struktura povrchu litého polotovaru po 20 % deformace a TZ, podélný řez

B.8 Struktura litého polotovaru po 40 % deformace a tepelném zpracování



Obrázek B 26: Struktura jádra litého polotovaru po 40 % deformace a TZ, příčný řez



Obrázek B 27: Struktura povrchu litého polotovaru po 40 % deformace a TZ, příčný řez