



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

BINÁRNÍ SLITINY S EUTEKTOIDNÍ MIKROSTRUKTUROU

BINARY EUTECTOID ALLOYS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Simona Skopalová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Studentka: **Simona Skopalová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Binární slitiny s eutektoidní mikrostrukturou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Některé kovy, například titan nebo železo vytváří s jinými kovy fázové diagramy s eutektoidní reakcí, kde se vysokoteplotní tuhý roztok rozpadá na eutektoidní směs tuhého roztoku a většinou příslušného intermetalika. Tato mikrostruktura je obdobou dobře známě perlitické mikrostruktury u oceli. Cílem práce je na základně rešerše fázových diagramů vybrat vhodné systémy, zhodnotit jejich možnou uplatnitelnost v konstrukční praxi a následně některé slitiny vyrobit a analyzovat.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše kovových systémů s eutektoidní reakcí.

Rozbor využití těchto reakcí v konkrétních technických aplikacích.

Návrh vhodné slitiny s téměř nebo zcela eutektoidní strukturou a výroba takového materiálu.

Standardní mikrostrukturní analýza, zhodnocení možných aplikací slitiny.

Seznam doporučené literatury:

DONACHIE, Matthew J. Titanium. A Technical Guide, ASM International, Materials Park, OH,2000.

FRANTI, G. W.; WILLIAMS, J. C.; AARONSON, H. I. A survey of eutectoid decomposition in ten Ti-X systems. Metallurgical Transactions A, 1978, 9.11: 1641-1649.

ROMERO, Carlos, et al. Ultrafine microstructures in eutectoid element bearing low-cost Ti-Fe alloys enabled by slow bainite formation. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 769: 226-232.

DONTHULA, Harish, et al. Morphological evolution of transformation products and eutectoid transformation (s) in a hyper-eutectoid Ti-12 at% Cu alloy. Acta Materialia, 2019, 168: 63-75.

PORTER, David A.; EASTERLING, Kenneth E. Phase transformations in metals and alloys (revised reprint). CRC press, 2009.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vyhledáním vhodných binárních systémů tvořených technicky významnými kovy, ve kterých dochází k eutektoidnímu rozpadu. Tento rozpad vznikající struktury si práce klade za cíl popsat a zdokumentovat. V úvodní teoretické části je popsán obecný aparát pro popis fázového složení binárních systémů, na který navazuje popis vybraných technicky významných kovů, mezi které se řadí železo, titan a mangan. Následuje experimentální část zabývající se výrobou slitin, přípravou metalografických vzorků a popisem vzniklé mikrostruktury.

Klíčová slova

Eutektoidní rozpad, Fe-Ti, Fe-Mn, SPS, SEM, binární systém

Abstract

The bachelor thesis deals with the search for suitable binary systems consisting of technically important metals in which eutectoid decay occurs. The work aims to describe and document this disintegration of the emerging structure. The introductory theoretical part describes a general apparatus for describing the phase composition of binary systems which is followed by a description of selected technically important metals which include iron, titanium and manganese. The experimental part dealing with the production of alloys, preparation of metallographic samples and description of the resulting microstructure follows.

Keywords

Eutectoid decay, Fe-Ti, Fe-Mn, SPS, SEM, binary system

Bibliografická citace

SKOPALOVÁ, Simona. *Binární slitiny s eutektoidní mikrostrukturou*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142324>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Vít Jan.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Binární slitiny s eutektoidní mikrostrukturou** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury a na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně dne 20. 5. 2022

.....
Skopalová Simona

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Vítu Janovi, PhD. za odborné rady a cenné připomínky. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Ondřeji Adamovi za pomoc při experimentální části bakalářské práce a svým blízkým za podporu během studia.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Binární systémy, jejich popis, fáze a reakce v nich	12
2.1. Fáze v binárních systémech.....	12
2.1.1. Tuhý roztok	12
2.1.2. Intermediární fáze	13
2.2. Fázové diagramy.....	13
2.3. Reakce v binárních systémech.....	15
2.3.1. Reakce, kterých se účastní tavenina	15
2.3.2. Reakce v tuhé fázi	16
2.3.3. Rozpadové reakce	18
2.3.4. Eutektoidní rozpad	19
3. Kovy použité v experimentální části.....	20
3.1. Titan.....	20
3.1.1. Vlastnosti a použití titanu a jeho slitin	20
3.1.2. Fázové dělení slitin titanu	20
3.2. Železo	21
3.2.1. Vlastnosti a použití železa.....	21
3.3. Mangan	22
3.3.1. Vlastnosti a použití manganu	22
3.4. Binární fázové diagramy obsahující Mn, Ti nebo Fe s eutektoidní reakcí.....	23
3.4.1. Binární systém železo – titan	23
3.4.2. Binární systém mangan – titan	24
3.4.3. Binární systém železo - mangan.....	25
4. Experimentální část.....	26
4.1. Metody pozorování.....	26
4.1.1. Metalografie	26
4.2. Mechanické mletí	26
4.3. Spark Plasma Sintering.....	28
4.4. Návrh složení vzorků a použítá metodika přípravy materiálů.....	29
4.4.1. Prášková metalurgie - parametry mletí vzorku Fe-Mn	29
4.4.2. Prášková metalurgie - parametry mletí vzorku Fe-Ti	30
4.5. Výsledky experimentů	31
4.5.1. Vzorek Fe-Ti	31

4.5.2. Vzorek Fe-Mn	34
5. Shrnutí, diskuze.....	37
6. Závěr	39
7. Zdroje.....	40
8. Seznam použitých zkratek	42

1. Úvod

Reakce v tuhém stavu zásadně ovlivňují mikrostrukturu, která je následně “zdrojem“ mechanických vlastností materiálu. Významným příkladem je eutektoidní rozpad, při kterém vzniká velmi jemná směs dvou fází, které mohou mít velmi rozdílné vlastnosti. Kompozit vzniklý rozpadovou reakcí může využívat silnější stránky obou.

Práce se zabývá vyhledáním vhodných binárních systémů tvořených technicky významnými kovy, ve kterých dochází k eutektoidnímu rozpadu. Tento rozpad vznikající struktury si práce klade za cíl popsat a zdokumentovat. V úvodní teoretické části je popsán obecný aparát pro popis fázového složení binárních systémů a možné reakce mezi jednotlivými fázemi. Na popis vybraných technicky významných kovů, mezi které se řadí titan, železo a mangan navazuje několik vybraných binárních fázových diagramů.

Experimentální část bakalářské práce je zaměřena na výrobu slitin Fe-Mn a Fe-Ti metodou práškové metalurgie a slinování. Ze slinovaných vzorků a namletých prášků jsou vytvořeny metalografické vzorky, které jsou po procesu broušení a leštění pozorovány ve skenovacím elektronovém mikroskopu. Na závěr jsou prezentovány výsledky experimentu vzniklé mikrostruktury a vzájemné porovnání obou vytvořených slitin.

2. Binární systémy, jejich popis, fáze a reakce v nich

2.1. Fáze v binárních systémech

2.1.1. Tuhý roztok

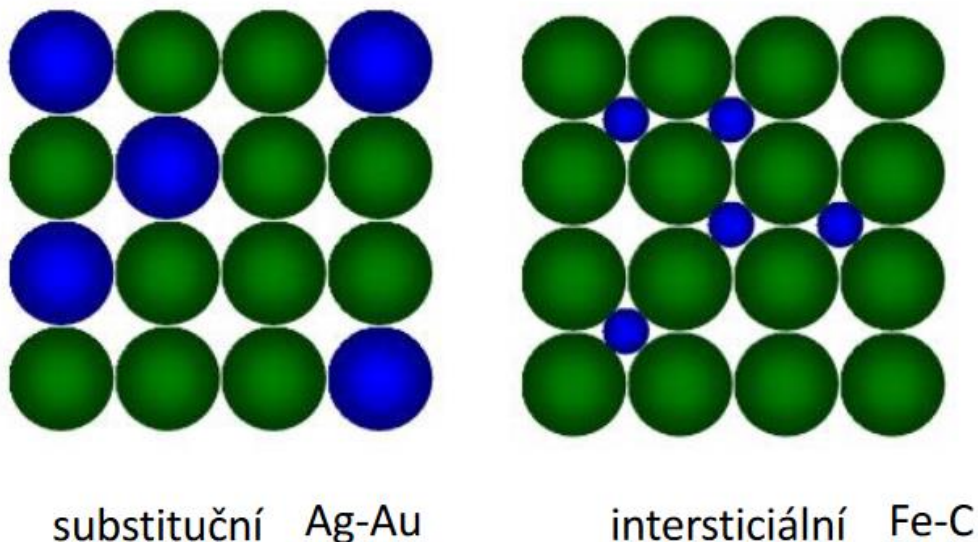
Roztok je homogenní tuhá fáze tvořená nejméně dvěma komponentami. Jedna z komponent je základní kov, do kterého je v různých koncentracích dosazován kov přídatný. Podle způsobu uložení atomů příměsi v krystalické mřížce základního kovu se dělí tuhé roztoky na substituční a intersticiální. [1]

Substituční tuhý roztok

U substitučních tuhých roztoků atomy přísady zaujmou místa atomů základního kovu (obr. 1). Podmínky substituční rozpustnosti jsou určeny pomocí Hume-Rotheryho faktorů mezi které se řadí následující podmínky: podobná velikost atomů přísady a základního kovu, podobný typ krystalické mřížky a elektrochemických vlastností, a také by rozpuštěný atom měl mít větší valenci než základní kov. [1, 2, 3]

Intersticiální tuhý roztok

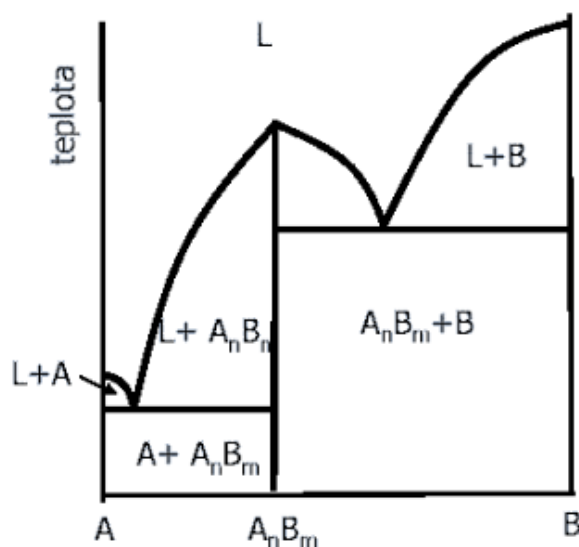
Atomy přísady se vkládají do intersticiálních poloh, jedná se o dutiny v krystalické mřížce základního kovu (obr. 1). Možnost vzniku intersticiálního tuhého roztoku závisí na poměru velikosti atomu přísady a základního kovu, který musí být roven nebo menší než 0,59. Tento poměr je označován jako velikostní faktor. Mezi přísady patří například vodík, uhlík, dusík nebo kyslík. Důležitou roli hraje také typ krystalické mřížky základního kovu, který musí mít vhodně uspořádané prostory, z tohoto důvodu je vhodná mřížka BCC a FCC. [1, 2, 3]



Obrázek 1: Umístění atomů příměsi v matici [4]

2.1.2. Intermediární fáze

V binárních i vícesložkových soustavách, ve kterých nenastane stav úplné rozpustnosti nebo úplné nerozpustnosti, dochází ke vzniku intermediálních fází. Tyto fáze tvoří přechod od jedné čisté složky nebo jednoho primárního tuhého roztoku k druhému primárnímu tuhému roztoku a druhé čisté složce ve směru osy koncentrací. Vznik nové fáze A_nB_m rozděljuje diagram na dva dílčí binární diagramy (obr. 2). Teplota tání intermediální fáze je dána průsečíkem dvou čar likvidu. [1, 3, 5]



Obrázek 2: Binární diagram s intermediální fází [4]

Pro záznam přítomnosti fází se používají fázové diagramy, ze kterých v závislosti na konkrétním chemickém složení a teplotě je možné určit nejen přítomnost fází, ale i další informace jako jejich složení. [3]

2.2. Fázové diagramy

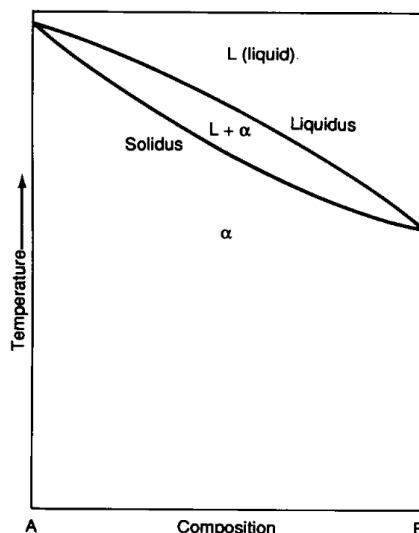
Fázové diagramy jsou grafickým znázorněním fázových změn v daném materiálu při různém složení a teplotách. Vnější tlak má také vliv na fázovou strukturu, avšak většina fázových diagramů je konstruována při konstantním tlaku jedné atmosféry. [3]

Fázové diagramy jsou často klasifikovány a pojmenovány podle počtu vyskytujících se komponent v daném systému:

- Unární – skládají se z jedné složky, například čisté železo, čistý hliník
- Binární – skládají se ze dvou složek, například slitina Al-Si
- Ternární – skládají se ze tří složek, například slitina Fe-Mn-Cr (obr. 4)
- Polykomponentní – skládají se z více než tří složek, například slitina Au-Bi-Sb-Ge-Pb [1, 3]

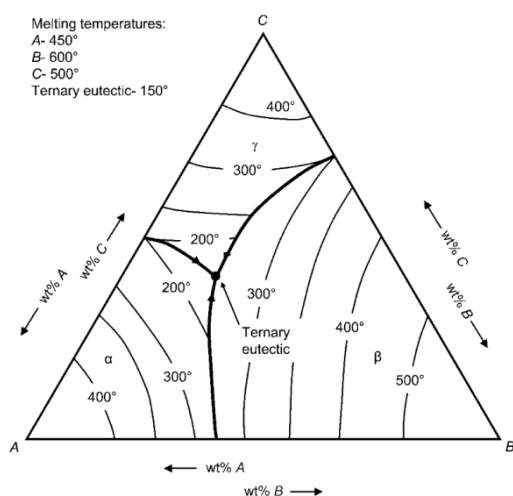
Některé systémy se skládají z komponent, které mají stejnou krystalovou strukturu a některé součásti z těchto systémů jsou zcela mísitelné v pevné fázi, čímž se tvoří kontinuální pevný roztok. Pokud k tomu dojde v binárním systému, tak vzniká fázový diagram skládající se ze dvou jednofázových polí oddělených polem dvoufázovým (obr. 3).

Hranice mezi kapalnou oblastí a dvoufázovou oblastí se nazývá likvidus a mezi dvoufázovou a pevnou oblastí solidus. Obecně je likvidus místem bodů ve fázovém diagramu představující teploty, při kterých slitiny různého složení začínají mrznout při ochlazení nebo končí tání při ohřívání a solidus je místo bodů představující teploty, při kterých slitiny končí zmrazením při ochlazení nebo se začínají tavit při zahřívání. [3, 9]

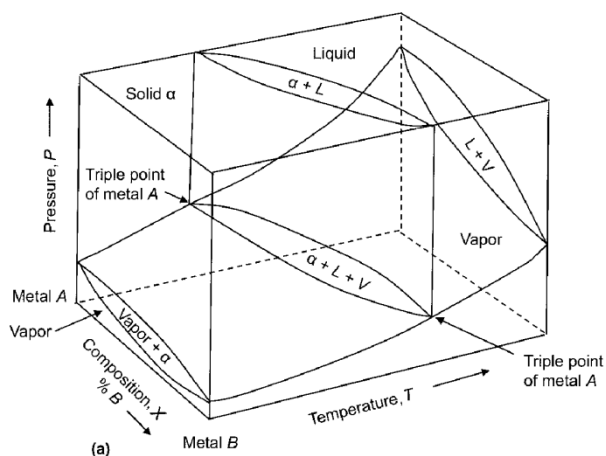


Obrázek 3: Schéma binárního fázového diagramu ukazující mísitelnost obou komponent [3]

Binární izomorfní systém je takový systém, ve kterém jsou oba kovy navzájem zcela mísitelné v kapalném i pevném stavu. Může zobrazovat závislost jen na teplotě a složení, anebo i závislost na tlaku, jak je možné vidět na následujícím obrázku (obr. 5). [3, 9]



Obrázek 4: Hypotetický ternární diagram složený [3]



Obrázek 5: Binární diagram pro kovy A a B zobrazující závislost složení, teploty a tlaku [3]

2.3. Reakce v binárních systémech

2.3.1. Reakce, kterých se účastní tavenina

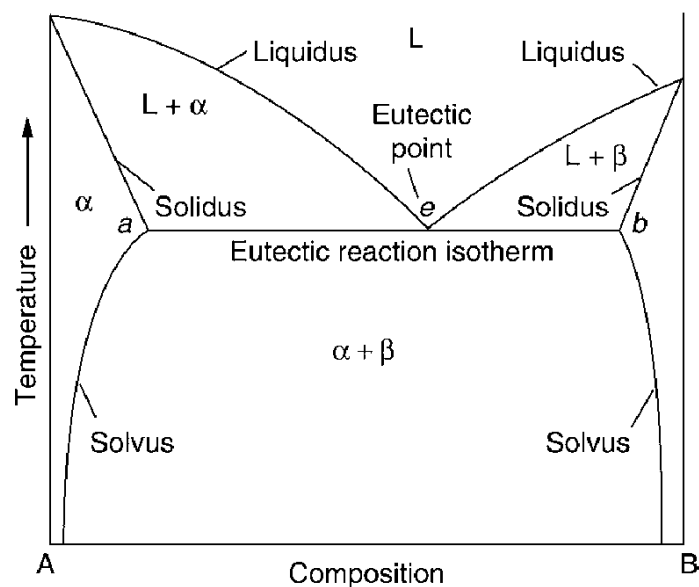
Krystalizace čisté látky nebo slitiny v oblasti rozpustnosti

Krystalizace čistých kovů probíhá při konstantní teplotě a nenastává v celém objemu najednou. Začíná vznikem krystalizačních zárodků, které rostou na úkor taveniny tak dlouho, dokud nevyplní celý objem. Pokud se krystalizační zárodky vytvoří z taveniny přímo vlivem klesání teplot a energie, jedná se o homogenní nukleaci, pokud však krystalizační zárodky vznikají na cizích zárodcích (oxidy, sulfidy, stěny formy) jedná se o heterogenní nukleaci. Heterogenní nukleace je méně energeticky náročná. [1, 3, 7]

Eutektická reakce

Třífázová reakce, která probíhá v bodě e (obr. 6), kde kapalná fáze zamrzne na směs dvou pevných fází, se nazývá eutektická reakce (z řeckého slova „snadno se taví“). V popsaném eutektickém systému mají dvě složky stejnou krystalovou strukturu, což společně s dalšími faktory umožňuje úplnou mísitelnost mezi nimi. Eutektické systémy však mohou být také tvořeny dvěma složkami s různou krystalickou strukturou, pokud k tomu dojde, křivky likvidu a solidu (a jejich rozšíření do dvoufázového pole) pro každou z terminálních fází se podobají těm pro situaci úplné mísitelnosti mezi komponentami systému.

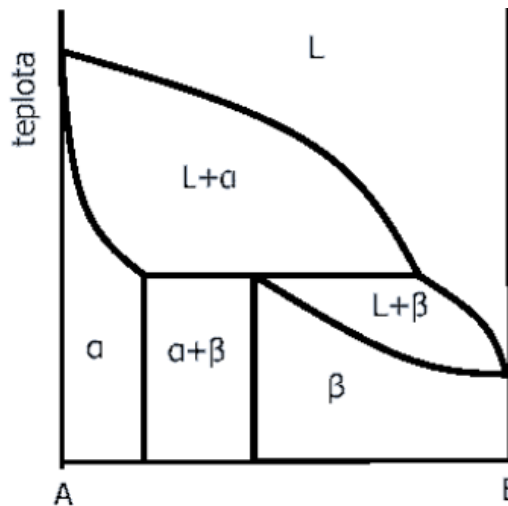
Eutektické systémy se tvoří, když legující přísady způsobí snížení linií likvidu z obou bodů tání čistých prvků. Eutektický bod e má nejnižší bod tání ze systému A-B. Při eutektické reakci kapalina zmrzne a vytvoří dva tuhé roztoky. Maximální rozpustnost prvku B v pevném stavu je definována bodem a v levé části diagramu. Maximální rozpustnost prvku A v pevném stavu je definována bodem b na pravé straně diagramu (obr. 6). Když se slitina B ochladí přes eutektickou teplotu, zbývající kapalina zmrzne a vytvoří eutektickou směs tuhých roztoků α a β . [1, 3, 7, 9]



Obrázek 6: Fázový diagram obsahující eutektickou reakci [3]

Peritektická reakce

Podobně jako u eutektické přeměny jsou při peritektické reakci v rovnováze dvě tuhé fáze a jedna kapalná (obr. 7). Vymizí jedna z tuhých fází za vzniku nové tuhé fáze. Peritektická reakce se často vyskytuje při tuhnutí kovů, keramiky a organických materiálů. Mezi typické příklady systémů s peritektickým tuhnutím patří Fe-C, Fe-Ni, Al-Ti, mosaz a bronz. [1, 3]



Obrázek 7: Diagram s omezenou rozpustností složek v tuhém stavu s peritektickou reakcí [1]

2.3.2. Reakce v tuhé fázi

Možné změny původního tuhého roztoku

A) Rozpad

Při rozpadu se původní tuhý roztok rozpadá na dvě chemicky rozdílné fáze, které se mohou lišit krystalickou mřížkou. Tento rozpad má vždy difuzní charakter. [6, 7]

Druhy rozpadu:

- rozpad přesyceného tuhého roztoku při změně rozpustnosti
- eutektoidní rozpad
- rozpad spojený s tvorbou proeutektoidních fází

B) Přeměna

Při přeměně je původní homogenní tuhý roztok nahrazen novým homogenním tuhým roztokem, který má stejné chemické složení, ale různou krystalickou mřížku. Přeměna může mít difuzní i bezdifuzní charakter. [6, 7]

Druhy přeměn:

- difuzní přeměny jednoho tuhého roztoku v jiný tuhý roztok
- difuzní přeměny neuspořádaného tuhého roztoku v uspořádaný tuhý roztok
- bezdifuzní přeměna martenzitické přeměny

Difuzní reakce

Difuzní reakce je výměna atomů mezi původní a novou fází. Nová fáze vzniká postupným růstem a pomalým posunem mezifázového rozhraní. Jedná se o nekoordinovaný a vzájemně nezávislý pohyb jednotlivých atomů napříč fázovým rozhraním zárodku a původní fáze. Rychlost reakce závisí na teplotě a na aktivační energii.

Při přeměně nastává celková změna objemu, z důvodu změny krystalických mříží. U vícesložkových soustav má nová fáze odlišné chemické složení než fáze původní. Tato přeměna probíhá až do 100 % vzniku nové fáze. Příkladem difuzních přeměn můžou být polymorfní reakce v čistém železe nebo titanu, kdy dochází při ohřevu ke změně nízkoteplotní mřížky alfa (BCC u železa, HCP u titanu) na vysokoteplotní modifikaci (FCC u železa a následně ještě na BCC, BCC u titanu)

K přeměnám a rozpadům s úplnou difuzí patří austenitizace, tavení, krystalizace, proeutektoidní reakce, stárnutí feritu, perlitická reakce, popouštění a precipitační vytvrzování. [1, 7, 17]

Bezdifuzní reakce

Bezdifuzní reakce je hromadné přeskupení atomů do nových poloh. Jedná se o koordinovaný pohyb velkého množství atomů při relativně malé změně polohy dvou sousedních atomů. Růst probíhá tak, že mezi novou a původní fází existují určité krystalografické vztahy. Fázová přeměna probíhá velkou rychlostí, která je podstatně větší než rychlost difuze. Dochází ke změně typu krystalické mřížky, avšak chemické složení se v objemu materiálu nemění.

Rychlost přeměny nezávisí na teplotě. Přeměna se projeví změnou tvaru, to znamená vznikem reliéfu na povrchu nové fáze. Dochází k celkové změně objemu. U vícesložkových soustav má nová fáze stejné chemické složení jako fáze původní. Přeměna neprobíhá do 100 % vzniku nové fáze.

Mezi plně bezdifuzní přeměny patří martenzitická reakce. [1, 7, 17]

Martenzitická reakce

Martenzit je nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe, který je tvořen tetragonální prostorově středěnou mřížkou. Tetragonalita martenzitu je způsobena přesyceným uhlíkem, jehož atomy jsou uloženy v jedné ze tří oktaedrických intersticiálních poloh mřížky železa. Martenzit vzniká na hranicích zrn. Rychlost jeho vzniku dosahuje až rychlosti zvuku v kovech. Čím více uhlíku je obsaženo v martenzitu, tím větší má martenzit tvrdost.

Martenzitická reakce je bezdifuzní přeměna austenitu, která je charakterizovaná nízkou teplotou přeměny mezi teplotami martenzit start a martenzit finiš. K potlačení difuze je potřeba austenit výrazně přechladit, nejlépe nadkritickou rychlostí ochlazování. Konečná i výchozí fáze má stejné chemické složení. [1, 6, 9]

Bainitická reakce

Bainitická reakce je heterogenní přeměna s přenosem hmoty pouze na krátkou vzdálenost. Jde tedy o reakci řízenou omezenou difuzí intersticiálního uhlíku bez možnosti substituční difuze velkých atomů. Stejně jako eutektoidní reakce se vyznačuje tepelně aktivovaným růstem probíhajícím při izotermickém i anizotermickém rozpadu vysokoteplotní fáze.

Reakce je zahájena růstem Windmanstattenových desek, v podeutektoidních ocelích se jedná o desky feritu (obr. 8). Podle reakční teploty se rozlišuje horní a dolní bainit. Horní bainit vzniká při vyšších teplotách a vylučuje se na hranicích feritických částic. Dolní bainit vzniká při nižších teplotách a větší část karbidů je vyloučena uvnitř desek feritu.

Bainitické slitiny se vyznačují vysokou pevností a dobrou tvárností. Tvrdost bainitické struktury je však nižší než struktury martenzitické. To je způsobeno tím, že nižší teplota transformace austenitu způsobuje vyšší tvrdost vzniklé struktury. [1, 6, 9]



Obrázek 8: Struktura horního a dolního bainitu [6]

2.3.3. Rozpadové reakce

Precipitační reakce (proeutektoidní reakce)

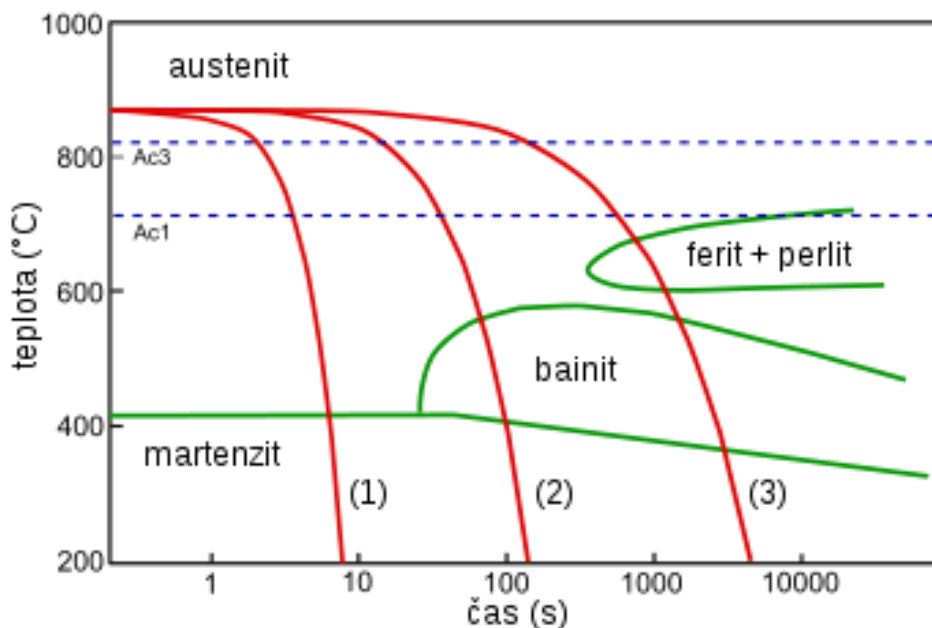
Mechanismus rozpadu tuhého roztoku se nazývá precipitace. Podle způsobu tvorby rozpadové struktury se rozděluje na kontinuální a diskontinuální precipitaci. Kontinuální precipitace probíhá v celém objemu slitiny současně a rychlost tvorby závisí na koncentraci legujícího prvku. Při diskontinuální precipitaci nastává v určitých oblastech slitiny rozpad na rovnovážné fáze α a β . Tento mechanismus precipitace je poměrně málo obvyklý a dochází k němu ve značně přesycených tuhých roztocích s nízkou energií fázového rozhraní (Pb-Sn, Mg-Al). Proces diskontinuální precipitace je podobný eutektoidnímu rozpadu. [1, 6]

2.3.4. Eutektoidní rozpad

Při eutektoidním rozpadu dochází k rozpadu jedné tuhé fáze na směs dvou jiných tuhých fází. Obě nové fáze rostou současně a vznikají difuzně. Eutektoidní transformace je heterogenní přeměna, při které dochází k přenosu hmoty na dlouhé vzdálenosti. Tato transformace se vyznačuje tepelně aktivovaným růstem, který probíhá při izotermickém i anizotermickém rozpadu vysokoteplotní fáze. Typickým příkladem je rozpad austenitu v železných slitinách. Výsledkem transformace je perlit, což je fyzikální směs tuhého roztoku (feritu) s intermediální fází (cementitu). [1, 3, 9]

Typickým příkladem eutektoidního rozpadu je perlitická reakce v ocelích. Perlit je lamelární směs feritu a cementitu, která vznikla přechlazením austenitu. Mechanismem vzniku je heterogenní nukleace zárodků na hranicích zrn, kdy střídavě vzniká zárodek feritu a cementitu. Mezilamelární vzdálenost se zmenšuje s klesající teplotou přeměny, což způsobuje růst pevnostních vlastností (pevnost, tvrdost a mez kluzu) a pokles deformační charakteristiky (tažnost).

Přiložený ARA diagram (obr. 9) dobře ilustruje vliv podmínek ochlazování na průběh rozpadových reakcí, kdy je patrné, že při pomalých ochlazovacích rychlostech dochází k eutektoidnímu rozpadu s plnou difúzí. Postupným zrychlováním ochlazování dochází k omezení difuze a rozpad probíhá na bainitickou mikrostrukturu až nakonec při velmi rychlém ochlazení není difuze vůbec možná a dochází k přeměně na martenzit. [1, 6, 9]



Obrázek 9: Diagram anizotermického rozpadu austenitu [19]

3. Kovy použité v experimentální části

3.1. Titan

3.1.1. Vlastnosti a použití titanu a jeho slitin

Titan je polymorfní kov s vysokou teplotou tání 1668 °C. Do teploty 882 °C má mřížku HCP a do teploty 1668 °C mřížku BCC. Pro svou vysokou korozní odolnost a biokompatibilitu se využívá v lékařství. Titan i jeho slitiny mají vysokou měrnou pevnost a poměrně nízkou měrnou hmotnost, z tohoto důvodu se používají v leteckém průmyslu a na výrobu sportovních potřeb. Jsou odolné vůči korozi i v mořské vodě a v některých případech i kyselinám, proto se využívají i v chemickém průmyslu. Mezi nevýhody patří vysoká reaktivita s plyny nad teplotu 700 °C, obtížná obrobitelnost, špatné třecí vlastnosti a v některých případech i nízký modul pružnosti 115 GPa. [6, 8, 12]

3.1.2. Fázové dělení slitin titanu

Polymorfie titanu umožňuje vhodným legováním vytvářet slitiny, ve kterých se uplatní pouze nízkoteplotní HCP, pouze vysokoteplotní BCC, případně směs fází obou mřížek (obr. 10).

Slitiny alfa

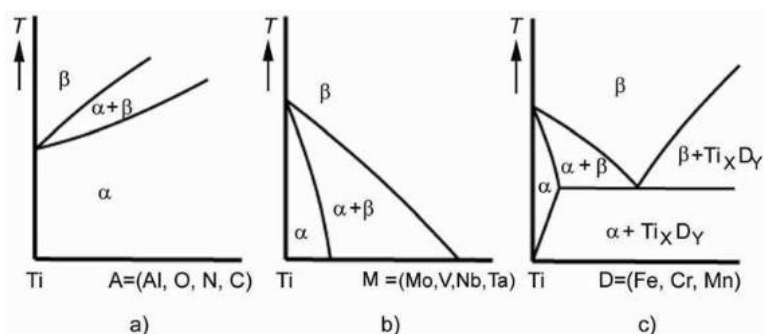
Alfa slitiny vynikají nízkou měrnou hmotností, vysokou pevností až 1000 MPa, tepelnou stabilitou do teploty 300 °C a jsou odolné vůči křehkému porušení. Používají se hlavně v letectví a kosmonautice. Mezi přísady stabilizující fázi alfa patří hliník, cín, dusík, kyslík a uhlík. Mají mřížku HCP.

Slitiny beta

Beta slitiny vynikají vysokou odolností vůči korozi a dobrou tvářitelností za normálních teplot. Po vytvrzení lze dosáhnout pevnosti až 1600 MPa. Mezi nevýhody patří vyšší měrná hmotnost než u ostatních titanových slitin a vysoká cena, která je způsobena přísadami těžkých a obtížně zpracovatelných kovů. Mezi přísady stabilizující fázi alfa se řadí molybden, vanad, chrom a niob. Mají mřížku BCC.

Slitiny alfa a beta (heterogenní)

Heterogenní slitiny se vyznačují širokou škálou vlastností podle přísad a tepelného zpracování. Používají se například na výrobu kompresorů, lopatek turbín, podvozků a sportovního vybavení. Vzájemný poměr fází je dán charakterem rovnovážného diagramu, podmínkami ochlazování a obsahem přísady. [6, 8]



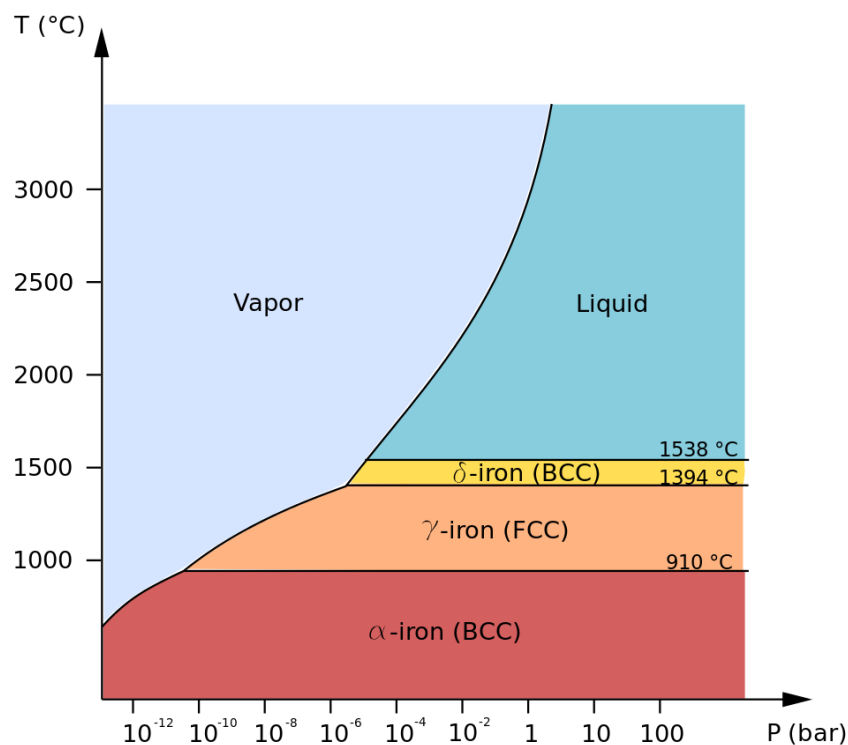
Obrázek 10: Vliv přísadových prvků stabilizující a) slitiny alfa, b) slitiny beta, c) slitiny alfa a beta [6]

3.2. Železo

3.2.1. Vlastnosti a použití železa

Železo je šedobílý, lesklý, středně tvrdý, feromagnetický kov vyskytující se v závislosti na teplotě ve čtyřech modifikacích (obr. 11):

- modifikace α – do teploty až 911 °C, mřížka BCC, při teplotě vyšší než 760 °C ztrácí železo své magnetické vlastnosti
- modifikace β – označuje nemagnetickou modifikaci α , do teploty 911 °C, mřížka BCC
- modifikace γ – teploty 911 °C až 1391 °C, mřížka FCC
- modifikace δ – teplota vyšší než 1391 °C až to teploty tavení 1539 °C, mřížka BCC [6, 11]



Obrázek 11: Modifikace železa [21]

Železo se vyrábí z železných rud ve vysoké peci a jeho slitiny představují nejvíce používaný konstrukční materiál ve strojírenství. Ocelové slitiny jsou používány ve stavebnictví, v automobilovém průmyslu i letecké technice. Vyšší měrná hmotnost slitin železa je kompenzována výrobou ocelí o vysokých pevnostních vlastnostech a vysoké čistotě. Železo i jeho slitiny jsou snadno recyklovatelné a jejich výroba je energeticky málo náročná. [6, 20]

3.3. Mangan

3.3.1. Vlastnosti a použití manganu

Mangan je stříbrně bílý, lesklý, křehký a značně tvrdý kov s velmi nízkou tepelnou vodivostí ($7,81 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a teplotou tání $1244 \text{ }^\circ\text{C}$. Je znám ve třech stabilních modifikacích α , β a γ . Modifikace manganu α a β vzniká při metalurgické výrobě a je tvrdá a křehká. Modifikace γ vzniká při elektrolytické výrobě a je velice měkká, kujná a tažná. Všechny modifikace mají krychlovou mřížku.

Více než 85 % celkové produkce manganu se využívá jako legující přísada ocelí, u kterých výrazně ovlivňuje pevnost v tahu a tvrdost, v menší míře ovlivňuje také pružnost a kujnost. Vysoce pevná a houževnatá je Hadfieldova ocel s obsahem manganu okolo 12 %. Mangan v železných slitinách snižuje difuzi uhlíku, zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti, způsobuje hrubnutí zrna a zvyšuje odolnost proti opotřebení. [9, 10]

Tabulka 1: Porovnání vybraných vlastností titanu, železa a manganu [10, 11, 12]

	Mřížka	Relativní atomová hmotnost [-]	Teplota tání [$^\circ\text{C}$]	Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	Teplená vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]	Tvrdost podle Vickerse [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Titan	BCC, HCP	47,88	1668	4,50	21,9	970	116
Železo	BCC, FCC	55,85	1535	7,86	80	608	211
Mangan	CBCC, SC, FCC, BCC	54,94	1244	7,43	7,8	500	198

V tabulce 1 jsou porovnány vlastnosti jednotlivých prvků. Všechny prvky mají více krystalických mřížek a podobné relativní atomové hmotnosti. Titan má nejvyšší teplotu tání a tvrdost dle Vickerse, ale zároveň má nejmenší hustotu i modul pružnosti ve smyku. Železo vyniká vysokou tepelnou vodivostí, která je téměř čtyřikrát větší než u titanu a desetkrát větší než u manganu.

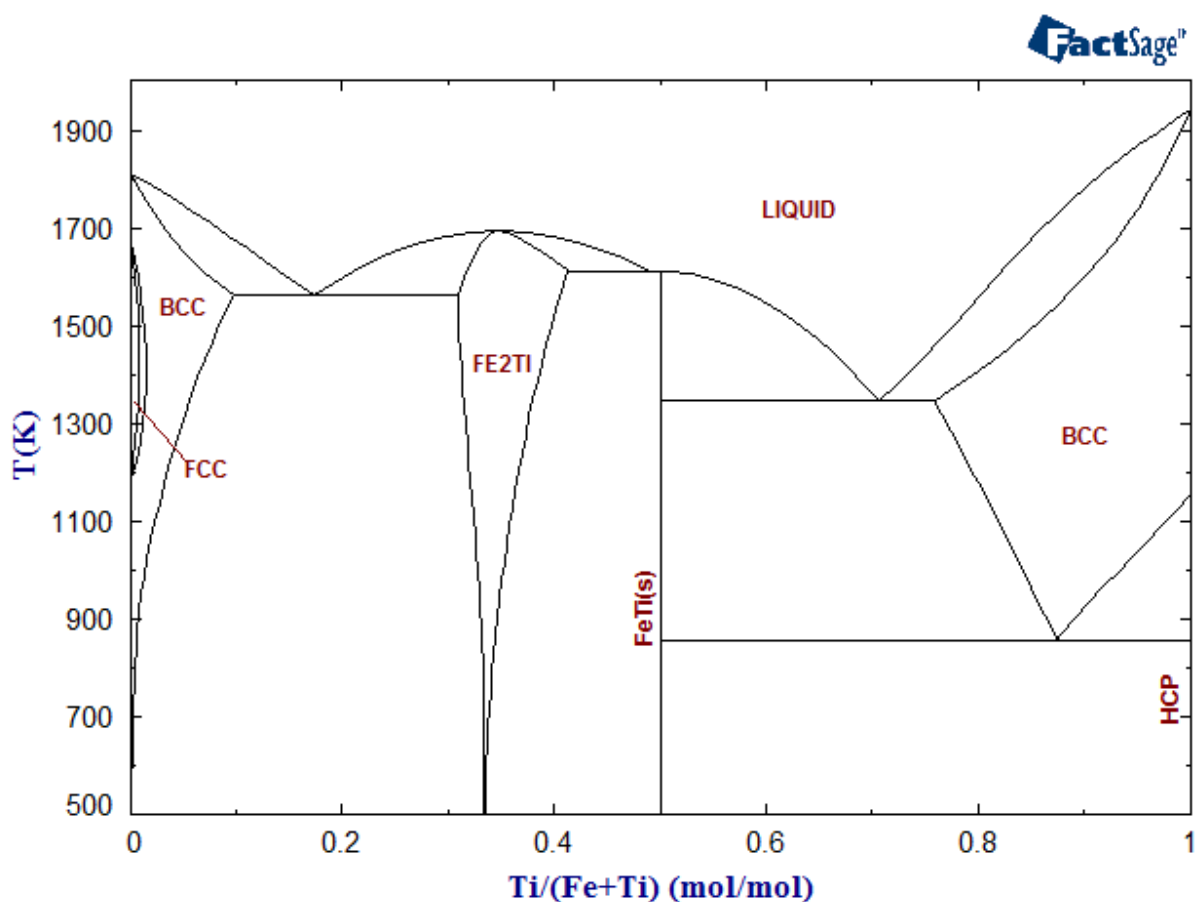
3.4. Binární fázové diagramy obsahující Mn, Ti nebo Fe s eutektoidní reakcí

V této kapitole jsou fázové diagramy, na základě kterých byly navrženy experimentální materiály analyzované dále v této práci. V celé práci jsou pro chemické složení všech materiálů vždy používána pouze atomární procenta (at.%).

3.4.1. Binární systém železo – titan

V binárním digramu Fe-Ti (obr. 12) dochází v levé části k eutektické reakci taveniny na tuhý roztok železa (mřížka BCC) a Lavesovu fázi. Lavesova fáze je kovová intermetalická fáze, jejíž složení lze vyjádřit obecným vzorcem AB_2 a k jejímu vzniku dochází, pokud se hodnoty poměru atomu poloměrů složek pohybují v rozmezí 1,09-1,34. Jejich přítomnost obvykle zhoršuje mechanické vlastnosti technických materiálů. Tato fáze se zde nachází při 26-38 at.% titanu. Napravo od Lavesovy fáze lze pozorovat intermediální fázi Fe-Ti. [1, 3]

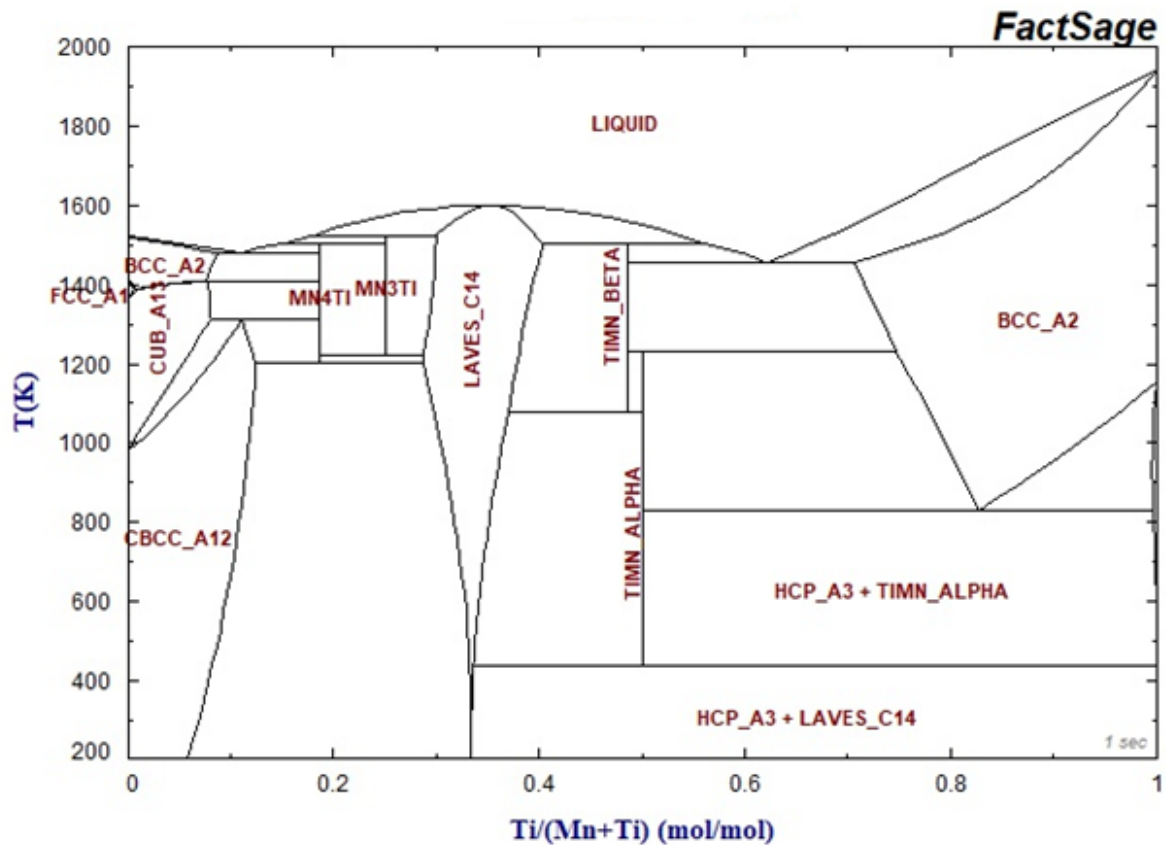
Při 50-78 at.% titanu dochází k eutektické reakci taveniny na směs tuhého roztoku titanu (mřížka BCC) a intermediální tuhé fáze Fe-Ti. V rozmezí 50-100 at.% titanu nastává eutektoidní rozpad tuhého roztoku titanu (BCC) na tuhý roztok titanu (mřížka HCP) a intermediální tuhé fáze Fe-Ti. Eutektoidní bod má teplotu okolo 860 K a složení 87 at.% titanu a 13 at.% manganu.



Obrázek 12: Binární fázový diagram železo a titan [13]

3.4.2. Binární systém mangan – titan

V diagramu Mn-Ti (obr. 13) se vyskytuje sedm segmentů křivky likvidu a čtyři intermediální fáze Mn_4Ti , Mn_3Ti , $TiMn\beta$ a $TiMn\alpha$. V rozmezí 29-40 at.% titanu se nachází Lavesova fáze. V levé části lze pozorovat tři tuhé roztoky manganu s mřížkami kubickou, BCC a CBCC. V pravé části lze pozorovat tuhý roztok titanu (BCC), který se při teplotě okolo 820 K eutektoidně rozpadá na intermediální fázi $TiMn\alpha$ a tuhý roztok titanu (HCP). Eutektoidní bod má složení 84 at.% titanu a 13 at.% manganu.

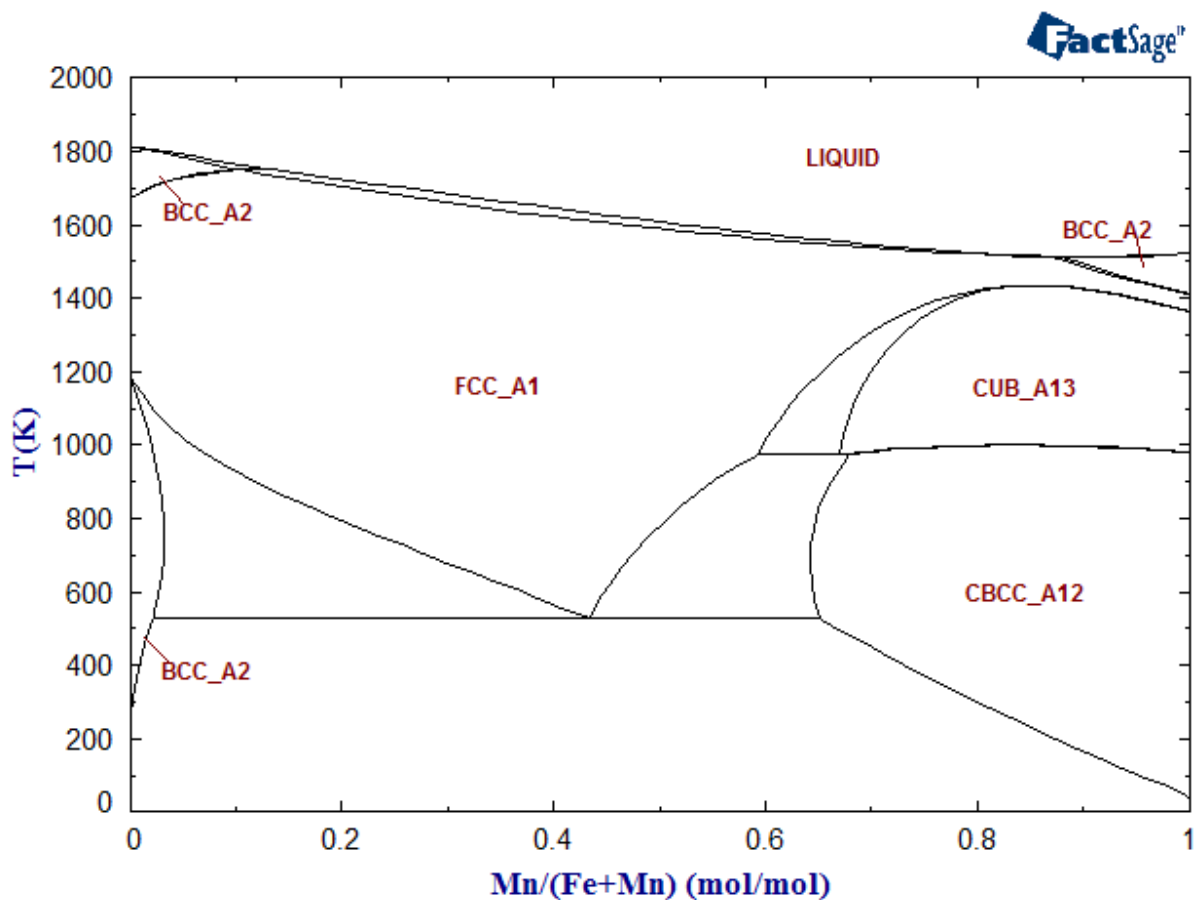


Obrázek 13: Binární fázový diagram titan a mangan [14]

3.4.3. Binární systém železo - mangan

V diagramu Fe-Mn (obr. 14) dochází v levé horní části k peritektické reakci taveniny na tuhý roztok manganu (FCC). V horní části je možné pozorovat jednu křivku likvidu a tři segmenty křivky solidu. V pravé části se nad teplotou 980 K nachází tuhý roztok manganu s kubickou mřížkou a pod touto teplotou tuhý roztok manganu s mřížkou CBCC, což je speciální typ mřížky manganu. Nevyskytuje se zde žádná intermediální ani Lavesova fáze.

Eutektoidní rozpad nastává při teplotě okolo 525 K v rozmezí 3-65 at.% manganu, kdy se tuhý roztok manganu rozpadá na tuhý roztok železa (BCC) a tuhý roztok manganu (CBCC). Eutektoidní bod má složení 45 at.% manganu a 55 at.% železa.



Obrázek 14: Binární fázový diagram železo a mangan [15]

4. Experimentální část

4.1. Metody pozorování

4.1.1. Metalografie

Metalografie se zabývá vnitřní stavbou kovů a slitin, strukturou jejich složek a jejich vlivem na vlastnosti kovů. [1]

Světelná mikroskopie

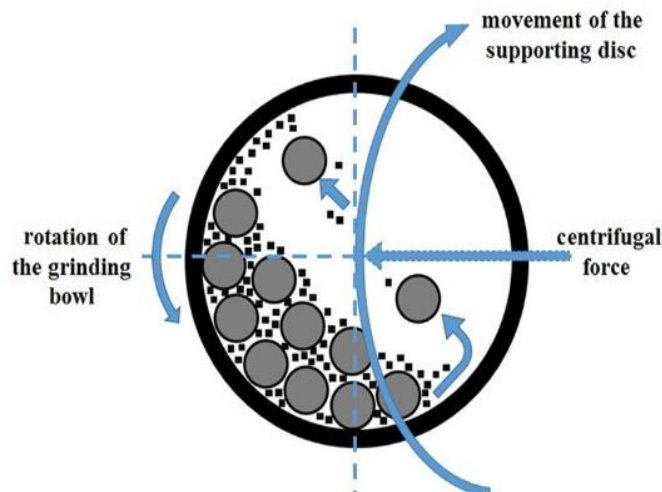
Optická světelná mikroskopie je jednoduchá zobrazovací metoda, která slouží k zobrazení a zvětšení širokého spektra barevných i nebarevných materiálů. Optický mikroskop umožňuje rozeznat struktury, které jsou pouhým okem neviditelné. Skládá se z mechanické, osvětlovací a optické části. [1, 18]

Skenovací elektronová mikroskopie

Skenovací elektronový mikroskop (SEM) je podobně jako klasický mikroskop optický přístroj, který na rozdíl od běžných světelných mikroskopů využívá jako zdroj záření elektrony namísto fotonů a elektromagnetických čoček namísto čoček skleněných. Vzorek pozorovaný v elektronovém mikroskopu musí být vodivý. Z tohoto důvodu je potřeba při pozorování nevodivých materiálů vzorek předem opatřit vrstvou kovového prášku (tzv. naprášit). Pro analýzu povrchu se využívá interakce elektronového svazku se vzorkem, čímž se získá celá řada informací, ať už o mikrostruktuře, krystalografickém uspořádání či chemickém složení materiálu. Pro jejich získání musí být mikroskop opatřen detektory. [1, 18, 20]

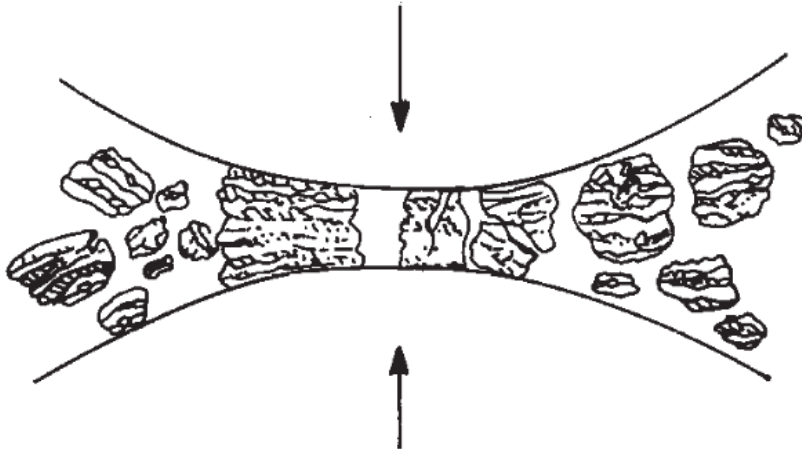
4.2. Mechanické mletí

Mechanické mletí je proces, při kterém dochází k promíchání prášku mlecími kuličkami, a také k jeho drcení za současného působení mechanických a odstředivých sil. Miska v mlýnku koná planetární pohyb za současné rotace kolem své osy. Toto způsobí, že mlecí kuličky se pohybují po stěnách misky a materiál se mele na jedné straně jejich třecím účinkem a na straně druhé nárazovým účinkem při dopadu kuliček na protější stěnu misky (obr. 15). [18, 20, 24]



Obrázek 15: Schéma mlecího procesu [24]

Obrázek 16 znázorňuje účinek jediné vysokoenergetické srážky mezi dvěma kuličkami a práškem zachyceným mezi nimi. Tažné prášky elementárních kovů jsou zploštěny a tam, kde se překrývají, dochází k svaření povrchu dohromady a vytvoření vrstvy kompaktního prášku. Současně vzniká lom mechanicky zpevněných elementárních nebo kompozitních prášků. Tyto procesy studeného svařování a lomu probíhají opakovaně v průběhu celého mletí, přičemž dochází k postupnému hnětení kompozitu tak, aby se jejich struktura neustále homogenizovala. [24]



Obrázek 16: Prášek sražený dvěma kuličkami [24]

Na obrázku 17 je možné vidět mlecí misku s mlecími kuličkami a prášky, která byla použita v experimentální části.

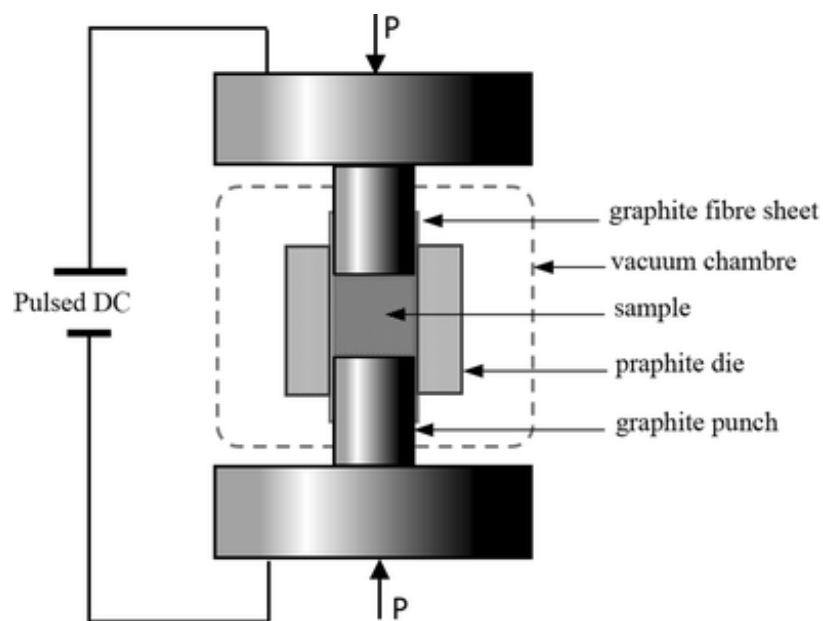


Obrázek 17: Mlecí miska s prášky a mlecími kuličkami

4.3. Spark Plasma Sintering

Spark Plasma Sintering je druh tepelného zpracování, při kterém dochází k ohřevu prášku průchodem stejnosměrného elektrického pulzu za současného působení vnějšího tlaku. Tento ohřev se provádí ve vakuu za účelem dosažení vysokých slinovacích teplot a odpaření kovových i nekovových nečistot. Vnější tlak způsobuje podstatnému snížení porozity. Mechanismem tohoto procesu je difuze.

Slinovaný materiál je ve formě prášku umístěn do grafitové lisovnice (obr. 18), která je následně umístěna do komory SPS přístroje. Na počátku procesu je odstraněn plyn a je vytvořeno vakuum. Poté je tlak zvýšen, následuje odporový ohřev a celý proces je zakončen ochlazením. Mezi výhody tohoto procesu patří homogenní zahřívání celého objemu a vysoká rychlost ohřevu. [6, 24]



Obrázek 18: Schéma Spark Plasma Sintering [16]

4.4. Návrh složení vzorků a použitá metodika přípravy materiálů

4.4.1. Prášková metalurgie - parametry mletí vzorku Fe-Mn

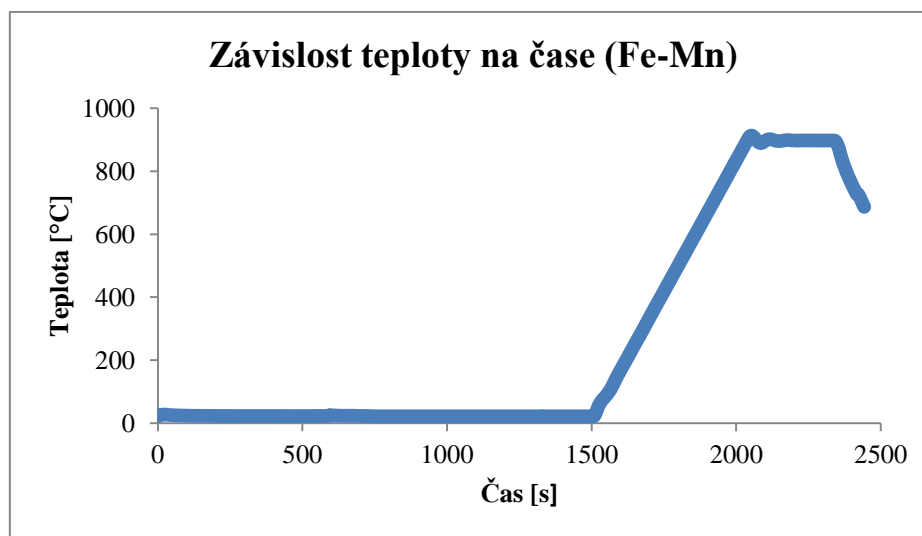
Bylo odváženo 13,86 g prášku manganu a 21,14 g prášku železa. Po navážení správného poměru byly oba dva prášky nasypány do mlecí misky a bylo přidáno okolo 350 g mlecích kuliček. Poté byly prášky společně s kuličkami zality etanolem a uzavřeny do mlecí misky, ze které byl následně odsán vzduch a přidán argon. Argon byl přidán za účelem vytvoření inertní atmosféry, aby nedošlo k oxidaci prášků. Nakonec se mlecí miska umístila do mlýnku, ve kterém byly prášky mlety po dobu 20 hodin. Mlecí proces se skládal z 30 minut mletí a 30 minut pauzy. Rychlost mletí byla 240 otáček za minutu. Nakonec byly prášky sušeny v peci po dobu 60 minut při teplotě 60 °C. Přehled parametrů přípravy vzorku Fe-Mn je v tabulce 2.

Tabulka 2: Parametry mletí vzorku Fe-Mn

Prvek	Atomární procenta	Hmotnost [g]	Hmotnost SPS [g]	Celková hmotnost [g]
Mn	60	13,86	16,95	35
Fe	40	21,14		

Slinování prášku Fe-Mn

Na počátku slinování měl prášek teplotu 20 °C a během jedné minuty se ohřál na teplotu 100 °C. Poté byl ohříván rychlostí 100 °C/min po dobu 8 minut a následovala výdrž při teplotě 900 °C po dobu 5 minut (obr. 19). Celková doba slinování byla 14 minut. Tlak na počátku byl 19 MPa, poté byl navyšován po dobu jedné minuty na výsledný tlak 50 MPa.



Obrázek 19: Graf závislosti teploty na čase u slitiny Fe-Mn

4.4.2. Prášková metalurgie - parametry mletí vzorku Fe-Ti

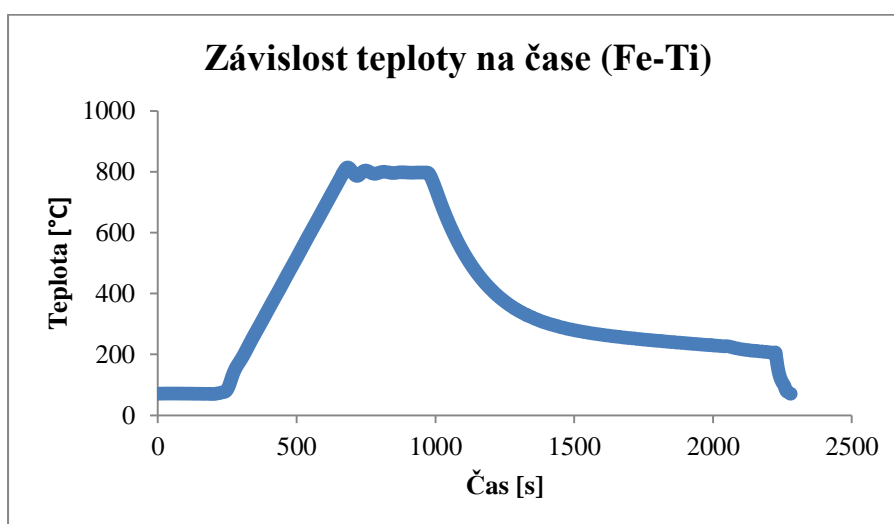
Příprava vzorku železa a titanu probíhala naprosto stejně jako vzorku železa a manganu s jediným rozdílem v množství odváženého prášku, kterého bylo 29,8 g prášku titanu a 5,2 g prášku železa. Přehled parametrů přípravy vzorku Fe-Ti je v tabulce 3.

Tabulka 3: Parametry mletí vzorku Fe-Ti

Prvek	Atomární procenta	Hmotnost [g]	Hmotnost SPS [g]	Celková hmotnost [g]
Ti	87	29,80	10,60	35
Fe	13	5,20		

Slinování prášku Fe-Ti

Na počátku slinování měl prášek teplotu 20 °C a během jedné minuty se ohřál na teplotu 100 °C. Poté byl ohříván rychlostí 100 °C/min po dobu 7 minut a následovala výdrž při teplotě 800 °C po dobu 5 minut (obr. 20). Celková doba slinování byla 13 minut. Tlak na počátku byl 19 MPa, poté byl navyšován po dobu jedné minuty na výsledný tlak 50 MPa.



Obrázek 20: Graf závislosti teploty na čase u slitiny Fe-Ti

Na obrázku 21 jsou vzorky Fe-Ti a Fe-Mn po SPS, které budou následně nařezány a budou z nich vytvořeny vzorky, což bude popsáno v následující kapitole.



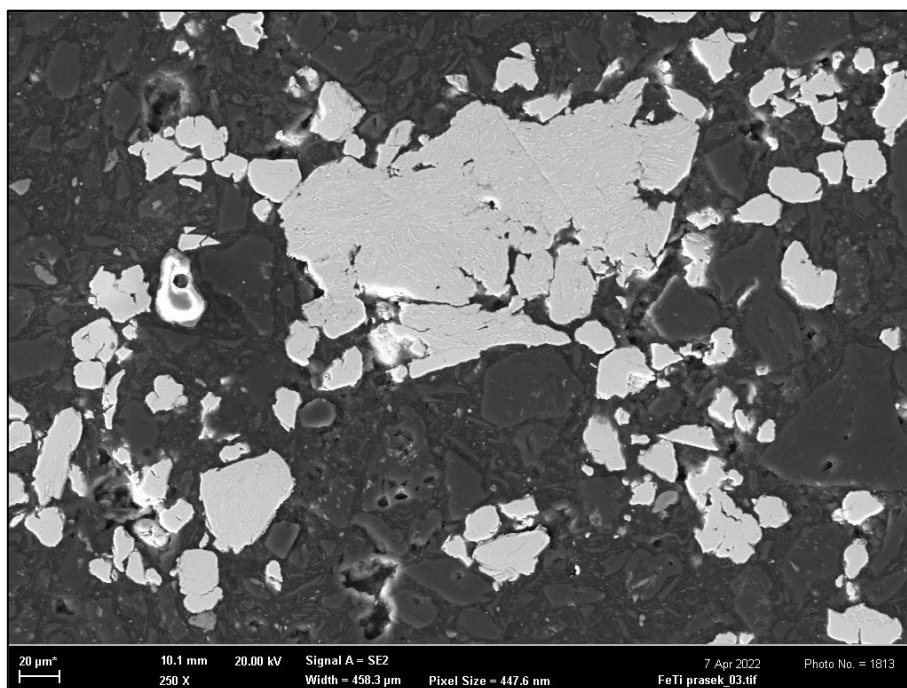
Obrázek 21: Vzorky Fe-Ti a Fe-Mn po SPS

4.5. Výsledky experimentů

Prášky byly zalisovány volně do preparační hmoty, objemové vzorky slitin byly po slinování nařezány a byly vytvořeny vzorky, které byly následně broušeny a leštěny. Leštění probíhalo za použití diamantové lešticí pasty o zrnitosti 3 a 1 mikronu. Poté byly vzorky pozorovány ve světelném a skenovacím elektronovém mikroskopu.

4.5.1. Vzorek Fe-Ti

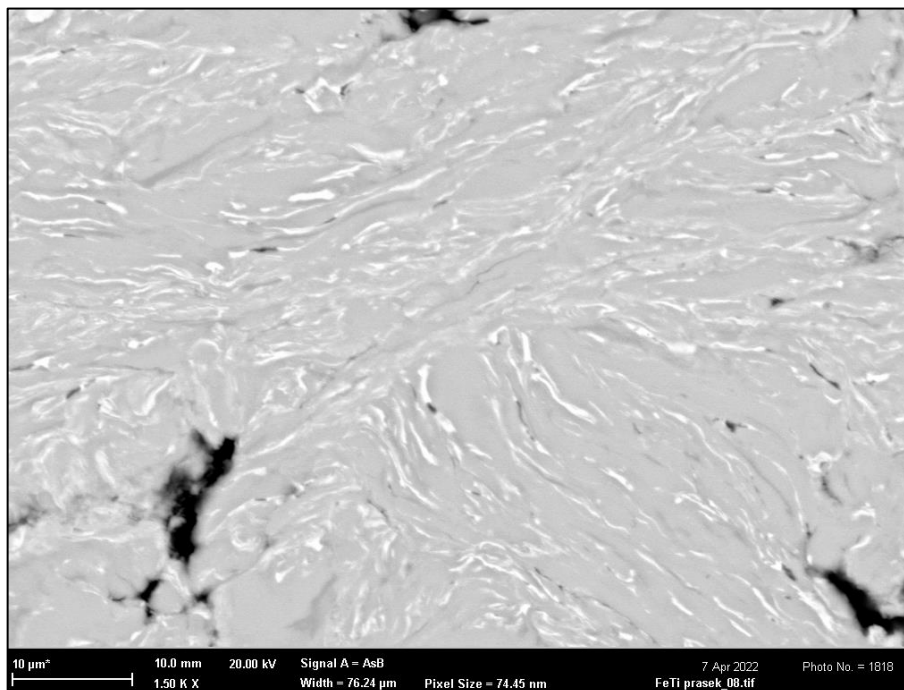
Vzorek byl připraven ze směsi prášků s kalkulovaným poměrem 13 at.% železa. Mletím vznikl prášek o velikosti částic 20-200 mikrometrů, tvar jeho částic je nepravidelný a ostrohranný (obr. 22). Ve struktuře jednotlivých částic je patrné nedokonalé promíchání obou elementárních prášků (obr. 23). Plošná analýza chemického složení prášku na vybrané velké částici ukázala 10 at.% železa (tab. 4). Tato částice tedy neodpovídá požadovanému průměrnému složení, jedná se ale pouze o jednu hodnotu měření. Je pravděpodobné, že ve složení jednotlivých částic je výrazný statistický rozptyl.



Obrázek 22: Fe-Ti prášek

Tabulka 4: EDS plošná analýza chemického složení částic umletého prášku Fe-Ti

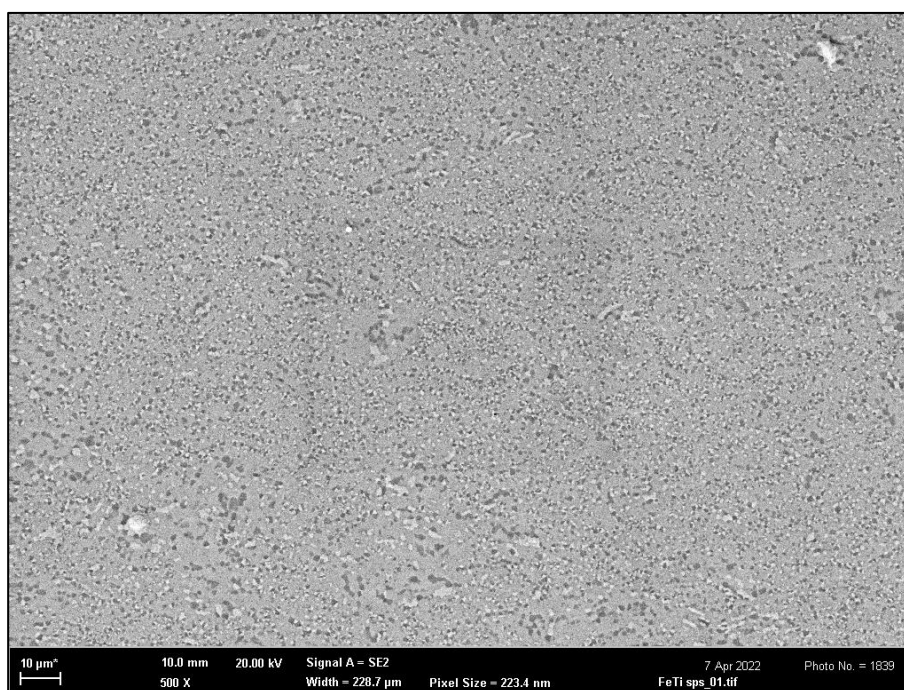
Prvek	Atomární procenta
Ti	89,5
Fe	10,5



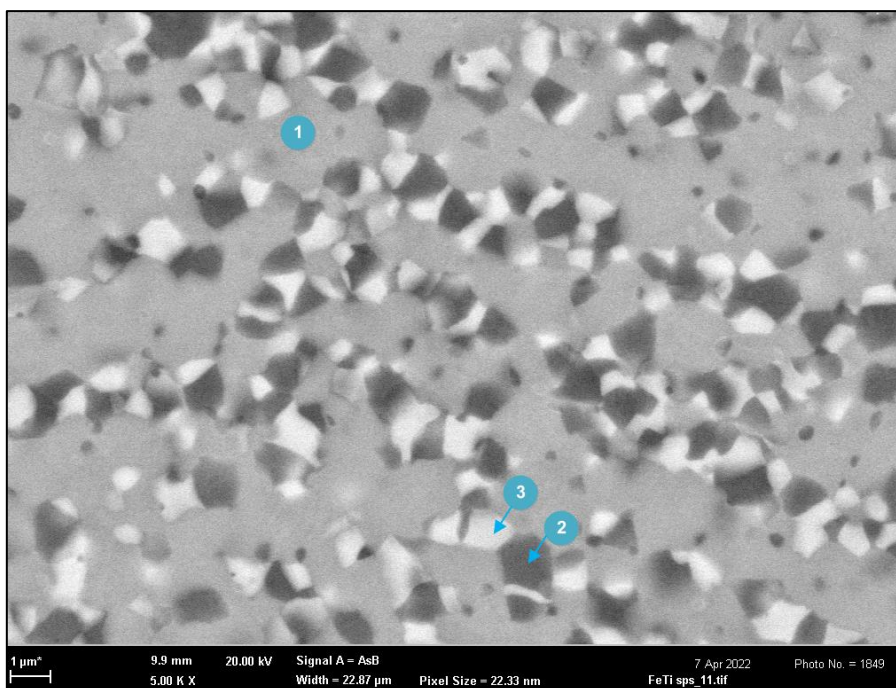
Obrázek 23: Detail mikrostruktury analyzované částice Fe-Ti u prášku

Vzorky připravené SPS technikou na mikrostrukturu nevykazují patrnou porozitu, vznikl kompaktní objemový materiál (obr. 24). Plošná analýza vzniklého materiálu po SPS ukázala 13,1 at.% železa (tab. 5). Chemické složení se tedy podařilo dodržet, vyrobený vzorek odpovídá požadované pozici v rovnovážném diagramu.

Na mikrostrukturu pozorované v elektronovém mikroskopu je patrná mikrostruktura tvořená maticí a dvěma druhy částic (obr. 25). Tyto částice tvoří spojené útvary, ve kterých se střídají světlejší a tmavší fáze. Lokální chemickou analýzou bylo zjištěno, že matrice této mikrostruktury má opět složení 13 at.% železa, jednotlivé fáze mají složení 31 at.% železa a 5 at.% železa (tab. 5).



Obrázek 24: Přehledová fotografie mikrostruktury vzorku Fe-Ti po SPS



Obrázek 25: Detail mikrostruktury Fe-Ti po SPS

Na obrázku 25 je detail mikrostruktury Fe-Ti, kde je patrná matrice označena "1", tmavé fáze s vysokým obsahem Ti "2" a fáze s vyšším obsahem železa "3".

Tabulka 5: EDS plošná analýza chemického složení částic Fe-Ti po SPS

Prvek	Plošná matrice [at. %]	Tmavá fáze 2 [at. %]	Světlá fáze 3 [at. %]
Ti	86,9	94,7	69
Fe	13,1	5,3	31

Hodnocení tvrdosti

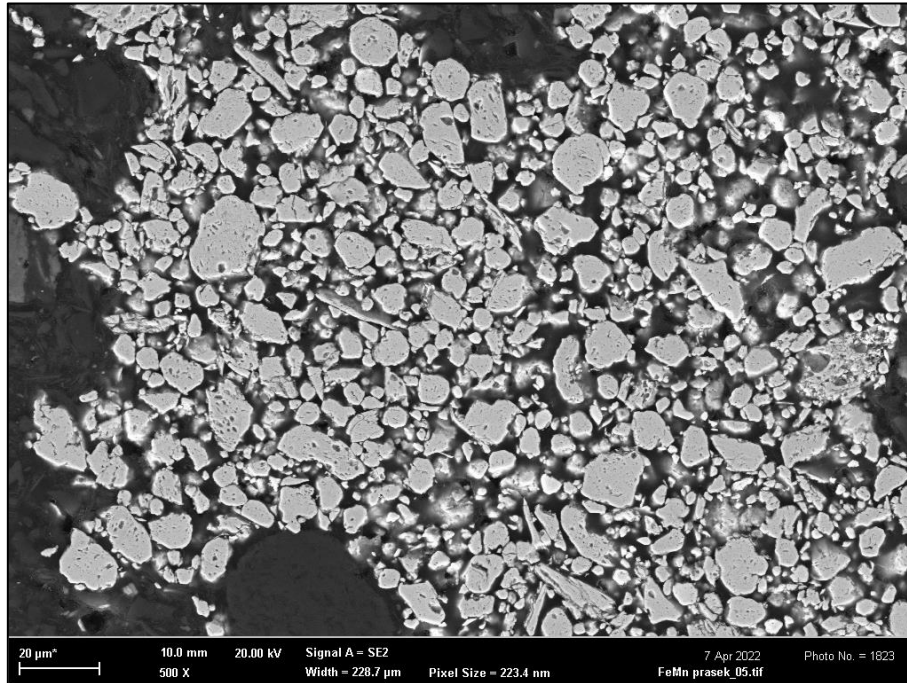
Byla provedena série měření tvrdosti metodou dle Vickerse při zatížení 1 kp (tab. 6). Průměrná hodnota tvrdosti je 574 HV 0.2.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku Fe-Ti

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Naměřená tvrdost [HV 0.2]	565	593	565	547	579	579	579	602	551	579

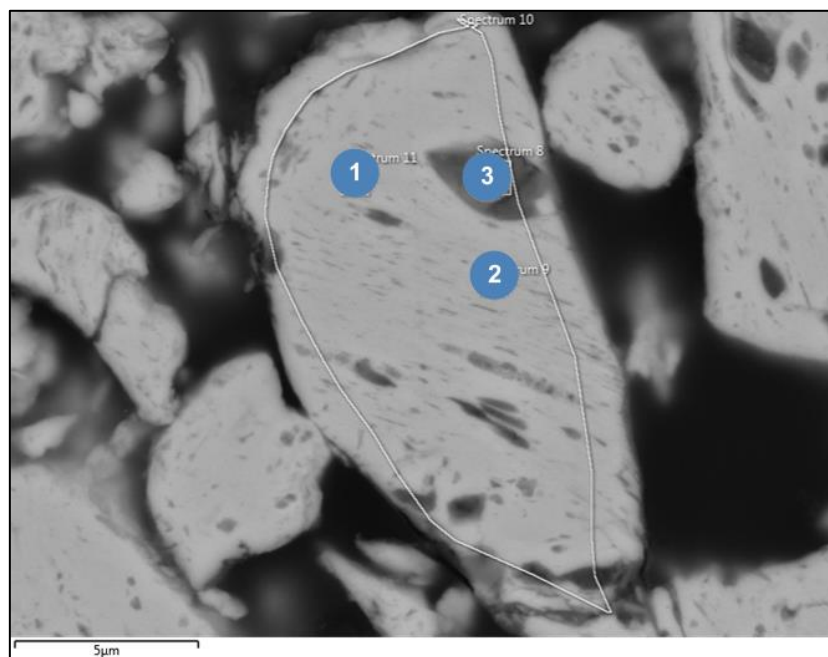
4.5.2. Vzorek Fe-Mn

Vzorek byl připraven ze směsi prášků s kalkulovaným poměrem 40 at.% železa. Mletím vznikl prášek o velikosti částic 5-20 mikrometrů, tvar jeho částic je nepravidelný se zaoblenými hranami (obr. 26).



Obrázek 26: Prášek Fe-Mn

Ve struktuře jednotlivých částic je patrné nedokonalé promíchání obou elementárních prášků (obr. 27). Plošná analýza chemického složení prášku na vybrané velké částici ukázala 41 at.% manganu (tab. 7). Tato částice tedy odpovídá požadovanému průměrnému složení. Avšak jednotlivé fáze mají složení 37 at.%, 27 at.% a 46 at.% manganu (tab. 7).

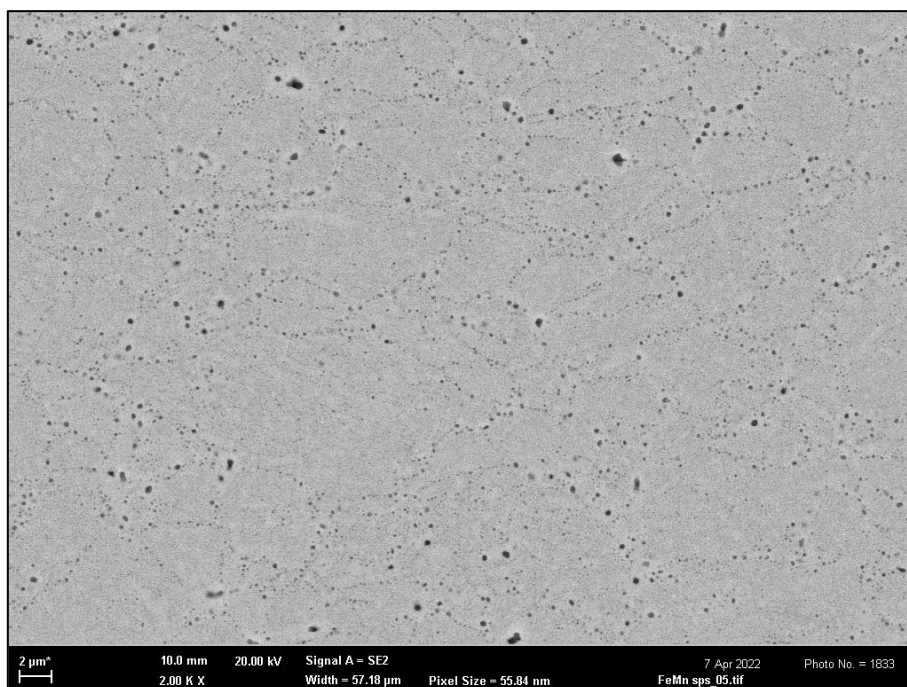


Obrázek 27: Detail mikrostruktury analyzované částice Fe-Mn u prášku

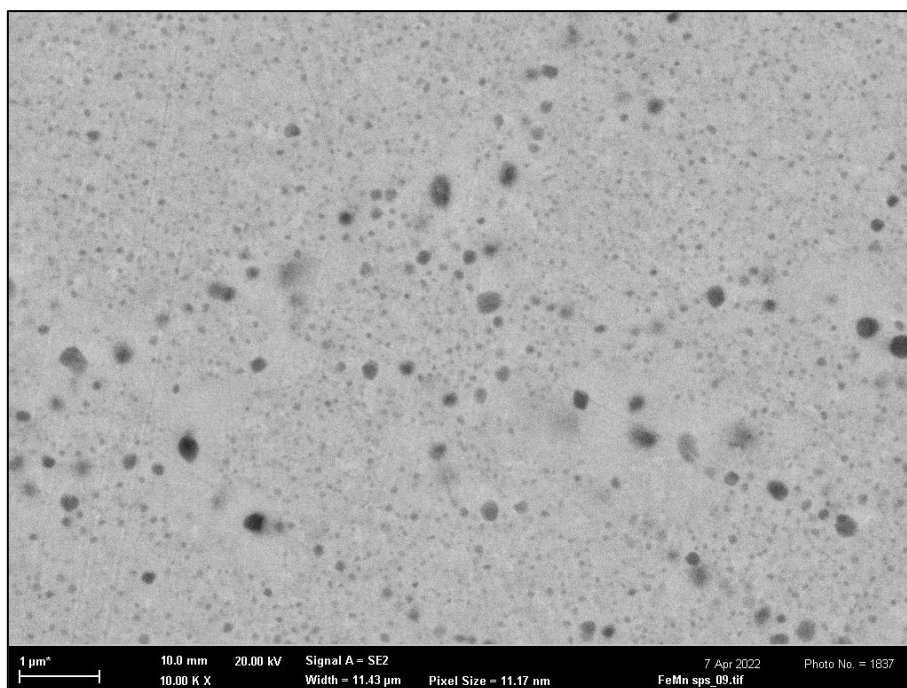
Tabulka 7: EDS plošná analýza chemického složení částic umletého prášku Fe-Mn

Prvek	Plošná matrice [at. %]	Světlá fáze 1 [at. %]	Světlá fáze 2 [at. %]	Tmavá fáze 3 [at. %]
Mn	40,7	36,6	27,1	45,7
Fe	59,3	63,4	72,9	13,5
O	-	-	-	37,4

U vzorku Fe-Mn připraveného SPS technikou jsou na mikrostrukturu patrné hranice původních částic dekorované kulatými drobnými částicemi oxidů (obr. 28). Jak je patrné z plošné analýzy chemického složení po SPS (tab. 8), tak se tmavá fáze skládá ze 40 at.% manganu, 44 at.% železa a 16 at.% kyslíku. Přítomnost kyslíku je pravděpodobně způsobená oxidací železa. Světlá fáze ani matrice nevykazují žádný obsah kyslíku.



Obrázek 28: Přehledová fotografie mikrostruktury vzorku Fe-Mn po SPS



Obrázek 29: Detail mikrostruktury Fe-Mn po SPS

Lokální chemickou analýzou bylo zjištěno, že matrice této mikrostruktury má složení 40 at.% manganu, jednotlivé fáze mají složení 39 at.% a 41 at.% manganu (tab. 8). Chemické složení se tedy podařilo dodržet, vyrobený vzorek odpovídá požadované pozici v rovnovážném diagramu.

Tabulka 8: EDS plošná analýza chemického složení částic Fe-Mn po SPS

Prvek	Plošná matrice[at. %]	Světlá fáze [at. %]	Tmavá fáze [at. %]
Mn	40,1	39,4	40,5
Fe	59,9	60,6	43,6
O	-	-	15,9

Hodnocení tvrdosti

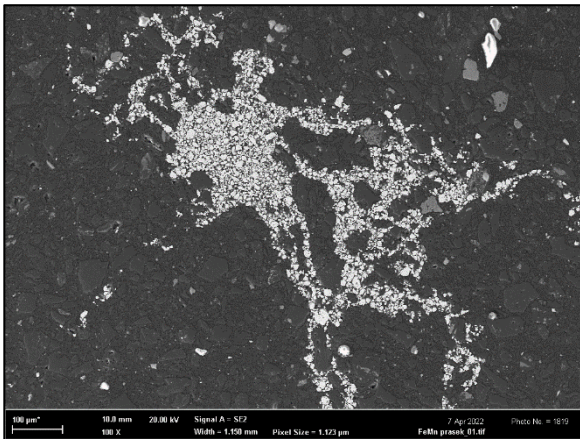
Byla provedena série měření tvrdosti metodou dle Vickerse při zatížení 1 kp (tab. 9). Průměrná hodnota tvrdosti je 476 HV 0.2.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku Fe-Mn

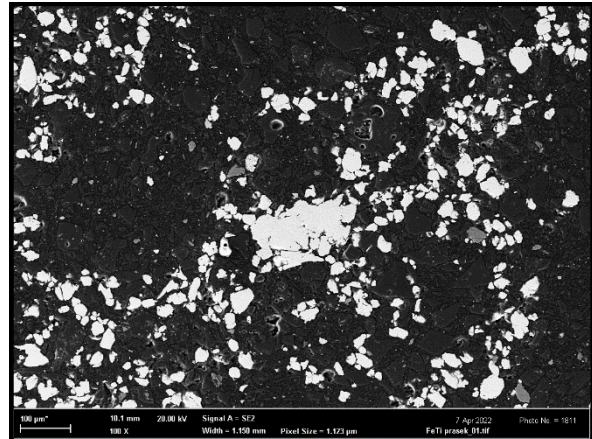
Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Naměřená tvrdost [HV 0.2]	479	476	462	469	479	479	479	490	472	469

5. Shrnutí, diskuze

Připravené prášky se výrazně liší tvarem a velikostí částic. Mletí bylo efektivnější u Fe-Mn, jelikož vznikly rovnoměrné malé částice (obr. 30), u Fe-Ti došlo k nárůstu velikosti částic až na úroveň 200 mikrometrů (obr. 31). Oba prášky nejsou zcela homogenní, ve výsledném objemovém materiálu ale není patrná chemická heterogenita podobného charakteru jako byla pozorována v mikrostruktuře prášku a lze tedy předpokládat, že při SPS došlo k další homogenizaci za zvýšení teploty vlivem difuze. Pomocí SPS se v obou případech podařilo vyrobit správné chemické složení zvolené při výpočtu vsázky prášku do mlecí misky, u Fe-Mn došlo ke kontaminaci kyslíkem.



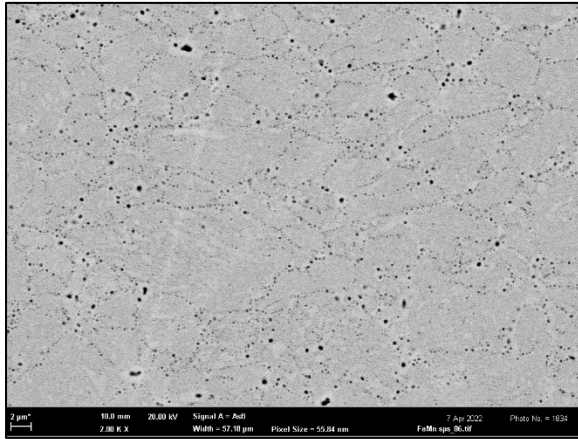
Obrázek 30: Rovnoměrné malé částice vzorku Fe-Mn



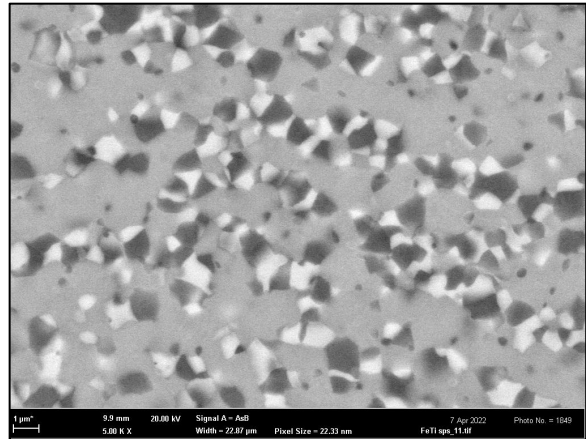
Obrázek 31: Nepravidelný tvar částic vzorku Fe-Ti

Oba objemové vzorky nevykazují známky porozity, u Fe-Ti bulk nejsou patrné původní hranice prášku (obr. 33), u Fe-Mn jsou patrné hranice původních částic dekorované kulatými drobnými částicemi oxidů (obr. 32).

U vzorku Fe-Ti došlo během SPS k částečnému rozpadu, je zachován velký podíl matrice s nominálním složením 13 at.% železa a rozpadem vznikly částice 5 at.% železa a 30 at.% železa. Dle rovnovážného diagramu (obr. 34) by měla vznikat směs čistého titanu a intermetalika Fe₅₀Ti₅₀. Reakce, ke které docházelo a jejímž výsledkem je částečný rozpad probíhala patrně metastabilně a výsledkem jsou fáze, které respektují chemický "směr" kterým by se matrice měla rozpadat, ale nedosáhla konečného rovnovážného chemického složení.

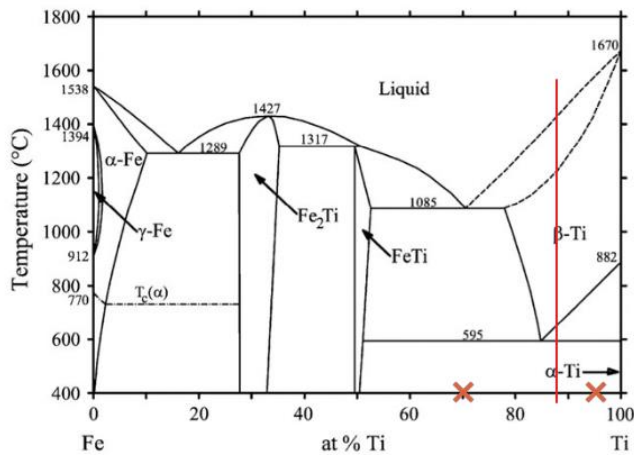


Obrázek 32: Hranice původních částic dekorované kulatými oxidickými částicemi u Fe-Mn

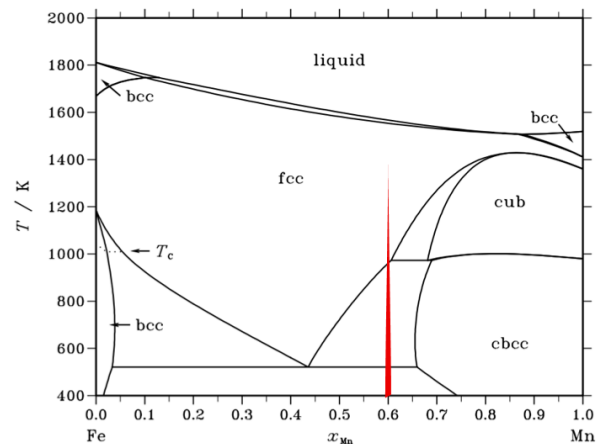


Obrázek 33: Nepatrné původní hranice zrn u prášku Fe-Ti

U vzorku Fe-Mn nedošlo během SPS k rozpadu, jelikož byla značně omezena difuze. Je zachován velký podíl matrice s nominálním složením 40 at.% manganu a 60 at.% železa. Vznikly částice skládající se z 39 at.% manganu a 61 at.% železa (světlá fáze) a 40 at.% manganu 44 at.% železa a 16 at.% kyslíku (tmavá fáze). Podle rovnovážného diagramu (obr. 35) by měla vznikat směs čistého manganu a čistého železa.



Obrázek 35: Konkrétní chemické složení průměru a chemické složení světlé a tmavé fáze u vzorku Fe-Ti po SPS [23]



Obrázek 34: Konkrétní chemické složení průměru a chemické složení světlé a tmavé fáze u vzorku Fe-Mn po SPS [22]

6. Závěr

Byla vytvořena literární rešerše kovových systémů s eutektoidní reakcí, na základě které byly navrženy vhodné slitiny s eutektoidní mikrostrukturou a jejich následná příprava pomocí práškové metalurgie a slinování. Vytvořené vzorky byly pozorovány v elektronovém mikroskopu a byla zhodnocena jejich mikrostruktura. Těmito vybranými slitinami se staly slitiny Fe-Ti a Fe-Mn.

Připravené prášky se výrazně liší tvarem i velikostí částic. Mletí bylo efektivnější u prášku Fe-Mn, jelikož vznikly malé rovnoměrně zaoblené částice. Částice u prášku Fe-Ti byly výrazně větší s nepravidelnými a ostrými hranami. Oba dva prášky nebyly zcela homogenní, avšak při SPS došlo k další homogenizaci.

Pomocí SPS se podařilo vyrobit správné chemické složení obou slitin. U vzorku Fe-Ti došlo k částečnému rozpadu, avšak u vzorku Fe-Mn tento rozpad neproběhl, jelikož byla značně potlačena difuze. U vzorku Fe-Ti nejsou patrné hranice původních zrn. U vzorku Fe-Mn jsou patrné hranice původních částic dekorované drobnými částicemi oxidů. Ani jeden ze vzorků nevykazuje známky porozity.

Byla naměřena průměrná hodnota tvrdosti 574 HV 0.2 u vzorku Fe-Ti a 476 HV 0.2 u vzorku Fe-Mn.

7. Zdroje

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Cerm, 2001.
- [2] ASKELAND, Donald R., et al. *The science and engineering of materials*. 2003.
- [3] CAMPBELL, Flake C. (ed.). *Phase diagrams: understanding the basics*. ASM international, 2012.
- [4] [online]. Copyright © [cit. 05.03.2022]. Dostupné z: <http://mech.fd.cvut.cz/education/bachelor/18mty/download/prezentace-z-prednasek/18MTY-4-tuheat.%20roztoky.pdf>
- [5] SHACKELFORD, James F. *Introduction to materials science for engineers*. Upper Saddle River: Pearson, 2016.
- [6] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN80-720-4248-3.
- [7] TILLEY, Richard JD. *Understanding solids: the science of materials*. John Wiley & Sons, 2004.
- [8] LEYENS, Christoph; PETERS, Manfred (ed.). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [9] CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. John Wiley & Sons, 2020.
- [10] Mangan, chemický prvek Mn, popis a vlastnosti. *Periodická soustava prvků* [online]. Copyright © 2009 [cit. 04.03.2022]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/25.html>
- [11] Železo, chemický prvek Fe, popis a vlastnosti. *Periodická soustava prvků* [online]. Copyright © 2009 [cit. 04.03.2022]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/26.html>
- [12] Titan, chemický prvek Ti, popis a vlastnosti. *Periodická soustava prvků* [online]. Copyright © 2009 [cit. 17.03.2022]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html>
- [13] Fe-Ti Phase Diagram and Database (GeDb for FactSage). [online]. Copyright © 2002 RCCM, Inc. [cit. 12.05.2022]. Dostupné z: <http://www.rccm.co.jp/factsage/gedb/fe-elem/feti/feti.html>
- [14] Collection of Phase Diagrams. *CRCT - Centre for Research in Computational Thermochemistry* [online]. Dostupné z: https://www.crct.polymtl.ca/fact/phase_diagram.php?file=Mn-Ti.jpg&dir=BINARY
- [15] Fe-Mn Phase Diagram and Database (GeDb for FactSage). *301 Moved Permanently* [online]. Copyright © 2002 RCCM, Inc. [cit. 12.05.2022]. Dostupné z: <http://www.rccm.co.jp/factsage/gedb/fe-elem/femn/femn.html>
- [16] FANG, Zhigang Zak (ed.). *Sintering of advanced materials*. Elsevier, 2010.

- [17] STEFANESCU, Doru Michael. *Science and engineering of casting solidification*. Springer, 2015.
- [18] SURYANARAYANA, Challapalli. *Experimental techniques in materials and mechanics*. Crc Press, 2011.
- [19] *Bainit – Wikipedie*. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bainit>
- [20] VANDER VOORT, George F. *Metallography, principles and practice*. ASM international, 1999.
- [21] Alotropické modifikace železa – Wikipedie. [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Alotropickat.%C3at.%A9_modifikace_at.%C5at.%BEeleza#/media/Soubor:Pure_iron_phase_diagram_\(EN\).svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Alotropickat.%C3at.%A9_modifikace_at.%C5at.%BEeleza#/media/Soubor:Pure_iron_phase_diagram_(EN).svg)
- [22] FRANKE, P.; NEUSCHÜTZ, D. Binary systems. part 3: Binary systems from Cs-K to Mg-Zr. *Landolt Börnstein*, 2005, 19.
- [23] Fe-Ti phase diagram. Reproduced with permission from ref. 25 and 26. | Download Scientific Diagram. *ResearchGate / Find and share research* [online]. Copyright © 2008 [cit. 12.05.2022]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Fe-Ti-phase-diagram-Reproduced-with-permission-from-ref-25-and-26_fig3_350162439
- [24] UPADHYAYA, Gopal S. *Powder metallurgy technology*. Cambridge Int Science Publishing, 1997.

8. Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
BCC	Kubická prostorově středěná krystalická mřížka
FCC	Kubická plošně středěná krystalická mřížka
HCP	Šesterečná krystalická mřížka
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
SPS	Spark Plasma Sintering