



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MECHANICKÉ A STRUKTURNÍ CHARAKTERISTIKY HOŘČÍKOVÉ SLITINY VYZTUŽENÉ KERAMICKÝMI VLÁKNY

MECHANICAL AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF MAGNESIUM ALLOYS
REINFORCED WITH CERAMIC FIBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ HALMAZŇA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF ZAPLETAL, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Halmazňa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911R011)**

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

Mechanické a strukturní charakteristiky hořčíkové slitiny vyztužené keramickými vlákny

v anglickém jazyce:

Mechanical and structural characteristics of magnesium alloys reinforced with ceramic fibers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pod pojmem kompozitní materiály rozumíme heterogenní materiály složené ze dvou nebo více fází, které se vzájemně výrazně liší svými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Zkoumaný materiál v této práci tvoří kovová matrice slitiny hořčíku QE 22 Hybrid a vyztužná vlákna tvrdé a termodynamicky stabilní částice karbidu křemíku SiC a vlákna oxidu hliníku Al₂O₃. Výroba kompozitu byla provedena metodou infiltrace částic ve tvaru preformy roztavenou matricí za vysokého tlaku.

Cíle bakalářské práce:

1. Stanovení základních strukturních parametrů matrice, vyztužných částic a kompozitu.
2. Pomocí tahových experimentů určení základních mechanických charakteristik hořčíkové matrice a výsledného kompozitu.
3. Určení míry synergie výsledného kompozitu s nalezením vhodného matematického modelu popisujícího napěťově-deformační chování kompozitu na základě parametrů složek, uspořádání a objemového složení.

Seznam odborné literatury:

- [1] DRÁPAL, J., KUCHAR, L., TOMÁŠEK, K., TROJANOVÁ, Z. Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík-příměs. Ostrava: VŠB Ostrava, 2004.
- [2] ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, USA, 1999.
- [3] VRBKA, J.: Mechanika kompozitů, VUT v Brně, Brno, 2008.
- [4] MICHNA, Š. A KOLEKTIV: Encyklopedie hliníku, Adin, Prešov 2005.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Zapletal, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 23.1.2014

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje studiu mechanických vlastností slitiny QE22 vyztužené částicemi SiC a vlákny Saffil. Tento kompozit byl vyroben metodou infiltrace částic ve tvaru preformy roztavenou matricí za vysokého tlaku. Zkušební vzorky připravené z kompozitu a samotné matrice byly podrobeny zkouškám tahem a tlakem. Z výsledků zkoušek vyplývá výrazná asymetrie chování v tahu a v tlaku jak matrice, tak i kompozitu. Přidání vyztuže do základního materiálu vede k výraznému zvýšení modulu pružnosti, meze pevnosti a meze kluzu, za současného snížení plastických vlastností. Na závěr bylo chování kompozitu srovnáno s teoretickými kompozitními modely.

Klíčová slova

hořčíková slitina QE22, kompozitní materiál, vlákna Saffil, částice SiC, mechanické charakteristiky

ABSTRACT

This bachelor thesis deals the study of the mechanical properties of the alloy QE22 reinforced with SiC particles and Saffil fibers. This composite was produced by infiltration particles shape of the preform with molten matrix under high pressure. Test specimens prepared from the composite and the matrix were subjected to a tension strength test and compression test. The test results show pronounced asymmetry behavior in tension and compression of the matrix and composite. Adding the reinforcement into base material leads to significant increase of elastic modul, breaking strength and yield strength while reducing plastic properties. At the end of work was the behavior of the composite compared with the theoretical composite models.

Key words

magnesium alloy QE22, composite material, Saffil fibres, SiC particles, mechanical characteristics

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HALMAZŇA, Jiří. *Mechanické a strukturní charakteristiky hořčíkové slitiny vyztužené keramickými vlákny*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. 49 s. Vedoucí práce Ing. Josef Zapletal Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma " Mechanické a strukturní charakteristiky hořčíkové slitiny vyztužené keramickými vlákny." vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v příloženém seznamu.

Datum

Jiří Halmazňa

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu, panu Ing. Josefu Zapletalovi Ph.D za odborné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při vypracování bakalářské práce a děkuji také pracovníkům Ústavu materiálových věd a inženýrství, za jejich odbornou pomoc.

OBSAH

ÚVOD	3
1 HOŘČÍK A JEHO SLITINY	4
1.1 Obecné informace o hořčíku	4
1.2 Přísadové prvky a jejich vliv na vlastnosti	4
1.3 Značení hořčíkových slitin	6
1.4 Hořčíkové slitiny	6
1.4.1 Slitiny pro odlitky	7
1.4.2 Slitiny ke tváření	8
1.5 Slitina QE22	9
2 KOMPOZITY S KOVOVOU MATRICÍ A JEJICH VÝZTUHY	11
2.1 Kompozitní materiály	11
2.2 Rozdělení kompozitů	11
2.3 Výztuhy	12
2.3.1 Rozdělení	12
2.3.2 Technologie výroby vláken	13
2.3.3 Mechanické vlastnosti vláken	16
2.4 Metody výroby kompozitů s kovovou maticí	17
2.5 Mechanické vlastnosti kompozitů	18
3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S HOŘČÍKOVOU MATRICÍ	28
3.1 Mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitů s hořčíkovou maticí	29
4 CÍLE PRÁCE	33
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
5.1 Experimentální materiál	34
5.2 Experimentální metody	34
5.2.1 Světelná mikroskopie	34
5.2.2 Statická zkouška tahem	34
5.2.3 Statická zkouška tlakem	35
6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK A DISKUZE	36
6.1 Metalografická analýza	36
6.2 Zkouška tahem	38
6.3 Zkouška tlakem	39
6.4 Ověření matematických modelů reálného kompozitu	42
7 ZÁVĚR	45
8 POUŽITÁ LITERATURA	46

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	49
--	----

ÚVOD

Charakteristickým rysem této doby je rozsáhlejší používání kompozitních materiálů, které v oblasti inženýrského konstruování skýtají značné výhody [1]. Rychlé vyčerpávání energetických zdrojů a alarmující nárůst množství skleníkových plynů jsou jedny z hlavních důvodů, proč se vývoj materiálů žene za co nejnižší hmotností. Právě výměna těžkých ocelových součástí za několikanásobně lehčí komponenty ze slitin lehkých kovů, je cestou ke snížení spotřeby paliva v automobilovém a leteckém průmyslu. Hořčík, jakožto nejlehčí konstrukční kov má vynikající potenciál k minimalizaci spotřeby energií v široké škále inženýrských aplikací.

Mechanické vlastnosti čistého hořčíku jsou poměrně špatné, v konstrukcích se proto hořčík leguje řadou dalších prvků, z důvodu precipitačního či substitučního zpevnění a zlepšení vlastností, důležitých pro danou aplikaci [2]. Pro další výrazné zlepšení mechanických charakteristik se hořčíkové slitiny vyztužují jinou zpevňující fází ve formě vláken či částic. Stejně jako legování hořčíku různými prvky ovlivňuje různé vlastnosti slitiny, u kompozitu jsou jeho výsledné vlastnosti dány typem, tvarem, velikostí, orientací a množstvím výztuže. Vhodnou kombinací těchto faktorů lze dosáhnout požadovaných výsledných vlastností.

1 HOŘČÍK A JEHO SLITINY

1.1 Obecné informace o hořčíku

Hořčík je jedním z nejlehčích známých konstrukčních materiálů. Tento kov je bohatě zastoupen v zemské kůře a za jeho nevyčerpatelný zdroj jsou považovány oceány a slaná jezera. Díky své reaktivitě je v přírodě k nalezení v oxidických či chloridových surovinách a získání čistého hořčíku vyžaduje sofistikované a drahé technologie, proto je třeba při výběru hořčíku jako konstrukčního materiálu, počítat s vysokými finančními náklady. Největší část vyrobeného hořčíku se používá pro legování hliníkových slitin a výrobu slitin hořčíku. Další uplatnění najde čistý hořčík v metalurgii při odsiřování oceli, výrobě tvárné litiny nebo při výrobě titanu (Krollův proces). Kvůli špatným mechanickým vlastnostem hořčíku se začaly vyvíjet různé slitiny, které při lepších pevnostních vlastnostech zachovaly přednosti čistého hořčíku. Kromě automobilového a leteckého průmyslu se můžeme s těmito materiály setkat u různých sportovních potřeb, ručních náradí, mobilních telefonů, notebooků či fotoaparátů.

Největším problémem při odlévání hořčíkových slitin, je jejich nestabilita při vysokých teplotách, při tváření je zase třeba počítat s nízkou tažností, která je dána hexagonální strukturou s nejtěsnějším uspořádáním. Tato struktura je vlastní právě hořčíku a mnoha jeho slitinám. Další výzkumy v oblasti hořčíkových slitin se zabývají právě vývojem slitin s vysokou pevností, tažností a také stabilitou i za vyšších teplot. Přehled základních mechanických vlastností hořčíku je uveden v tab. 1. 1. [2]

Tab. 1.1: Mechanické vlastnosti hořčíku při teplotě 20 °C [2]

Zpracování materiálu	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu v tahu [MPa]	Mez kluzu v tlaku [MPa]	Tažnost (%)	Tvrдость	
					HRE	HB(*)
Odlitek	90	21	21	2-6	16	30
Extruze	165-205	69-105	34-55	5-8	26	35
Válcovaný plech	180-220	115-140	105-115	2-10	48-54	15-17
Žíhaný plech	160-195	90-105	69-83	3-15	37-39	40-41

1.2 Přísadové prvky a jejich vliv na vlastnosti

Fyzikální vlastnosti hořčíku jsou ovlivněny množstvím každého z legujících prvků, které jsou do něj přidány. V mnoha případech je účinek těchto prvků víceméně úměrný jeho množství, a to až do meze rozpustnosti při teplotě, za jaké se měří dané fyzikální vlastnosti. Při přípravách hořčíkových slitin je třeba dobře znát její následné využití, tedy cíleně zlepšovat ty vlastnosti, kterých bude třeba a také brát v úvahu, že zlepšení jedné vlastnosti může zhoršit jiné. Výběr legujících prvků pro hořčík je omezen rozpustností daného prvku v hořčíku. Rozpustnost jednoho prvku v druhém je dána Humee-Rotheryho pravidly. Rozdíl atomových poloměrů hořčíku a legujícího prvky nesmí být větší než 15%. [2, 3]

Hliník – jde o nejrozšířenější prvek pro legování hořčíkových slitin. Zvyšuje pevnost a tvrdost slitin, zvětšuje interval tuhnutí a zlepšuje slévatelnost. Hořčíkové slitiny s obsahem hliníku přes 6 hm% jsou vhodné k tepelnému zpracování a dosahují také optimálního poměru mezi pevností a tažností. Slitiny s obsahem hliník přes 10 hm% se objevují velmi zřídka. [3]

Beryllium – je velmi málo rozpustné v hořčíku, ale již malé množství (asi 0,001 hm%) snižuje pravděpodobnost oxidace na povrchu roztaveného kovu při svařování a odlévání. Této výhody se využívá při výrobě odlitků i tvářených výrobků, při odlévání do pískových forem však může přispívat k hrubnutí zrna. [3]

Vápník – přidává se v malých množstvích při odlévání. Do slévárenských slitin se přidává těsně před litím a brání oxidaci při odlévání a při následných tepelných zpracováních odlitku, což zlepšuje také válcovatelnost plechů. Množství přidaného vápníku by nemělo překročit 0,3 hm%, jinak by u svařování plechů hrozilo praskání. [3]

Měď – zvyšuje pevnostní vlastnosti za vyšších teplot, ale při koncentraci vyšší než 0,05 hm% snižuje korozní odolnost slitiny. [3]

Železo – je považováno za jednu z neškodlivějších příměsí v hořčíkových slitinách. Velmi snižuje odolnost proti korozi již při malých množstvích. Obvyklé slitiny mají obsah železa mezi 0,01 – 0,03 hm%, ovšem pro dosažení maximální odolnosti je třeba toto množství udržet pod 0,005 hm%. [3]

Lithium – má relativně vysokou rozpustnost v hořčíku (5,5 hm% tj. 17 at%) a vzhledem ke své velmi nízké hustotě je jeho použití jedinečnou možností jak ještě více snížit hustotu čistého hořčíku. Při koncentraci 11 hm% lithia vzniká β -fáze s BCC mřížkou, která zlepšuje tvářitelnost slitiny. Lithium tedy zvyšuje plasticitu, ale pevnost naopak snižuje. Slitiny typu Mg-Li jsou vhodné k vytvrzování, proces stárnutí začíná už při teplotě 60°C. Slitiny tohoto typu ovšem zatím nenašli široké uplatnění. [3]

Mangan – nepatrně zvyšuje pevnost v tahu, jeho hlavní funkcí je však zvýšení korozní odolnosti ve slané vodě a odstranění železa ze slitin Mg-Al a Mg-Al-Zn, kde s železem vytvoří neškodné sloučeniny, z nichž některé zanikají při tavicím procesu. Množství manganu v hořčíkových slitinách je limitováno nízkou rozpustností manganu v hořčíku, zřídka kdy se objeví slitina s obsahem manganu nad 1,5 hm%, ve slitinách kde je přítomen i hliník, klesá rozpustnost manganu až na 0,3 hm%. Binární slitiny jsou používány pro výkovky a extrudované tyče. [2, 3]

Nikl - je škodlivá příměs, která snižuje odolnost proti korozi. Je tedy nežádoucí stejně jako železo a pro maximální odolnost slitiny je třeba jeho koncentraci udržet pod 0,005 hm%. [3]

RE – prvky vzácných zemin jsou do hořčíkových slitin přidávány za účelem zlepšení pevnostních vlastností za vysokých teplot (creep). Dále také zlepšují svařitelnost a slévateľnost. Do slitin jsou přidávány vzácné kovy jako cer, neodym, lanthan či praseodym. [3]

Křemík – zlepšuje zabíhavost, ale na druhou stranu snižuje odolnost proti korozi, pokud je ve slitině železo. [3]

Stříbro – zlepšuje mechanické vlastnosti vytvrzených slitin a vlastnosti za zvýšených teplot u slitin s thoriem či RE. [2, 3]

Thorium – zvyšuje odolnost proti creepu až do teploty 370°C a u slitin se zinkem zlepšuje svařitelnost. Dále se používá v kombinaci se zirkoniem nebo manganem. Slitiny s thoriem našli uplatnění v oblasti raketových střel a kosmickém průmyslu, ale z hlediska dopadu na životní prostředí jsou považovány za zastaralé. [2, 3]

Cín – při malé koncentraci u hořčíkových slitin s obsahem hliníku pomáhá předcházet tvorbě trhlin při kování. [2, 3]

Zinek – je po hliníku nejpoužívanější příměsí do hořčíkových slitin. Většinou se používá v kombinaci s hliníkem pro zvýšení pevnosti za pokojové teploty. Zinek je také používán společně se zirkoniem nebo RE pro výrobu vytvrditelných slitin. Zinek také pomáhá potlačovat škodlivé korozní účinky niklu a železa. [2, 3]

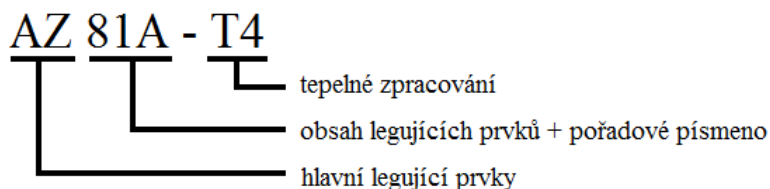
Zirkonium – přidává se do slitin s obsahem zinku, thoria či RE a v těchto slitinách zjemňuje zrna. Zirkonium však nelze použít ve slitinách s hliníkem a manganem, kde tvoří stabilní sloučeniny. [2, 3]

Yttrium – má celkem vysokou rozpustnost v hořčíku (12,4 hm%), přidává se s dalšími vzácnými kovy a zvyšuje creepovou odolnost až do 300°C. [2, 3]

Stroncium – je novější používanou příměsí. Slitina získává výbornou kombinaci slévateľnosti a odolnosti proti creepu. [2]

1.3 Značení hořčíkových slitin

Žádný mezinárodní systém pro označování slitin hořčíku neexistuje, ale nejčastěji se setkáváme se značením podle ASTM (American Society for Testing and Materials). Systém používá kombinaci písmen a čísel. První dvě písmena označují dva legující prvky, které mají ve slitině největší zastoupení. Následují dvě čísla udávající množství těchto dvou prvků ve slitině a písmeno, které rozlišuje slitiny se stejným obsahem majoritních legujících prvků. Za pomlčkou se uvádí stav materiálu nebo jeho tepelné zpracování. [6,10]



1.4 Hořčíkové slitiny

Charakteristickou vlastností systémů slitin, ve kterých je rozpustnost v tuhém stavu silně ovlivněna velikostí atomů je, že rozpustnost klesá se snižující se teplotou. Jedná se o nutnou podmínku pro precipitační vytvrzování. Většina hořčíkových slitin touto vlastností disponuje, ale reakce nejsou tak výrazné jako u některých hliníkových slitin. Maximální množství legujících prvků v hořčíkových slitinách je omezeno rozpustností prvku v hořčíku v kapalném stavu (tab. 1.2). Pět základních skupin slitinových systémů, nejvíce používaných pro komerční účely, je založeno na hlavních legujících prvcích, jsou to: mangan, hliník, zinek, zirkonium a RE. [3]

Tab. 1.2: Limity rozpustností prvků pro binární hořčíkové slitiny [3]

prvek	rozpustnost		systém	prvek	rozpustnost		systém
	atom. %	hmot. %			atom. %	hmot. %	
Lithium	17	5,5	Eutektický	Skandium	-15	-24,5	Peritektický
Hliník	11,6	15,7	Eutektický	Olovo	7,8	41,9	Eutektický
Stříbro	3,8	15	Eutektický	Thulium	6,3	31,8	Eutektický
Yttrium	3,4	12,4	Eutektický	Terbium	4,6	24	Eutektický
Zinek	2,4	6,2	Eutektický	Cín	3,4	14,5	Eutektický
Neodym	-0,1	-0,6	Eutektický	Gallium	3,1	8,4	Eutektický
Zirkonium	1	3,8	Peritektický	Ytterbium	1,2	8	Eutektický
Mangan	1	2,2	Peritektický	Bismut	1,1	8,9	Eutektický
Thorium	0,5	4,8	Eutektický	Vápník	0,8	1,4	Eutektický
Cer	0,1	0,5	Eutektický	Samarium	-1	-6,4	Eutektický
Kadmium	100	100	Úplná rozp.	Zlato	0,1	0,8	Eutektický
Indium	19,4	53,2	Peritektický	Titan	0,1	0,2	Peritektický
Thalium	15,4	60,5	Eutektický				

Hořčíkové slitiny můžeme rozdělovat podle složení na slitiny s hliníkem a bez přídavku hliníku. Většina slitin, které nejsou legovány hliníkem, obsahují příměs zirkonia pro zjemnění zrna (výjimku tvoří slitiny Mg-Mn), můžeme tedy použít i alternativní rozdělení na slitiny se zirkoniem a bez zirkonia. Slitiny můžeme také rozdělit podle typu výrobku, na slitiny pro odlitky a ke tváření.

1.4.1 Slitiny pro odlitky

Hořčíkové slitiny mají nízkou viskozitu, což zajišťuje dobré plnění formy. Nízká teplota tání a minimální reaktivita s železem umožňuje použití levných ocelových kelímků a forem. [10]

Mg-Al a Mg-Al-Zn

Slitiny tohoto typu nevykazují vysoké hodnoty pevnosti či tažnosti, ale mají nízkou hustotu a snadno se odlévají, takže se jedná o slitiny k lití nejpoužívanější. V těchto slitinách dochází ke vzniku velmi křehké fáze $Mg_{17}Al_{12}$. Slitiny dosahují pevnosti v tahu až 240 MPa a tažnost 1-8%. Zinek v těchto slitinách zvyšuje pevnost, na druhou stranu zvyšuje i pravděpodobnost výskytu mikropórů. Nejpoužívanějšími slitinami jsou AZ91, AZ61 či AZ31 které jsou známy pod obchodním názvem elektron. [2, 11]

Mg-Zn-Zr a Mg-Zn-Zr-RE

Slitiny jako ZK51 nebo ZK61 byly vyvinuty pro účely lití do pískových forem. Zinek zvyšující pevnost je doplněn o přídavek zirkonia pro zjemnění zrna. Tyto slitiny nejsou používány, jelikož kvůli vysokému obsahu zinku jsou náchylné k mikroporozitě a nejdou svařovat. Přidávky RE do těchto slitin zlepšují slévatelnost, potlačují tvorbu trhlin za tepla, zvyšují pevnost a také odolnost proti creepu. [11]

Mg-Al-RE

Jedná se o slitiny odolné proti creepu, z důvodu potlačení tvorby $Mg_{17}Al_{12}$, kterou nahrazuje intermetalikum Al-RE. Z ekonomických důvodů jsou legující RE přidávány ve formě „michmetalů“, což jsou směsi RE. Slitiny tohoto typu jsou vhodné pouze pro tlakové lití, jelikož se při pomalém tuhnutí tvoří hrubé částice Al_2RE . [2]

Mg-Al-Si

Při legování křemíkem dochází k tvorbě precipitátů Mg_2Si , které mají nízkou hustotu, vysokou pevnost a také vysokou teplotu tání ($1085^\circ C$). Křemík se neváže na Al, ve slitině tudíž můžeme najít dva typy intermetalik a to $Mg_{17}Al_{12}$ a Mg_2Si . Tyto fáze jsou schopny blokovat dislokace a blokovat hranice zrn, čímž zvyšují odolnost proti creepu. [2]

Mg-Al-Ca

Vznikly jako levnější náhrada za slitiny s RE pro použití za vyšších teplot. Při vhodném poměru Al/Ca se ve slitině objevují částice Mg_2Ca a Al_2Ca , které vedou ke zvyšování pevnosti. [2]

1.4.2 Slitiny ke tváření

Jelikož mají hořčikové slitiny hexagonální mřížku, je nutné, aby se tvářecí procesy (kování, protlačování, válcování,...) prováděly za vyšších teplot ($300-500^\circ C$). Tvářené hořčikové slitiny se nepoužívají zdaleka tak často, jako slitiny na odlévání, z důvodu jednoduššího zpracování se ke tváření používají spíše slitiny hliníku. Hořčikové slitiny používané ke tváření představují okolo jednoho procenta celkové spotřeby hořčíku. [10,12]

Slitiny pro plechy

Nejčastěji a používanou slitinou je AZ31 (3% Al, 1% Zn, 0.3% Mn), která je určena pro aplikace při nízkých teplotách a je možné ji svařovat. Plechy z AZ31 se používají například při testování automobilových prototypů, kde přináší hmotnostní úsporu okolo 50% oproti dílům z oceli. Lepší mechanické vlastnosti má slitina ZK31, ta má ovšem omezenou svařitelnost. Další slitiny používané k válcování jsou ZM21, ZE41 a ZE10. Tyto slitiny mají dobrou svařitelnost ale velmi nízkou pevnost. Obecně pro výrobu plechů z hořčikových slitin platí, že válcování probíhá na několik etap, kde je díky nízké tepelné kapacitě hořčíku nutný meziotřev. Slitiny typu Mg-Li jsou zajímavé nejen kvůli nízké měrné hmotnosti, lithium má v hořčíku vysokou rozpustnost v tuhém stavu a tvorba fáze s BCC mřížkou dává možnost tváření za studena. Problémem u Mg-Li slitin byla přítomnost sodíku, který byl příčinou vyšší křehkosti a proces stárnutí, který začíná již při teplotách $50-70^\circ C$. Problém se sodíkem se vyřešil s dostupností vysoce čistého lithia a stabilita slitiny se zlepšila přidáním dalších legur, např. LA141 (14% Li – 1% Al), svařitelná slitina používaná v leteckém průmyslu. Tváření těchto plechů za studena je značně omezené, minimální poloměr ohybu se pohybuje mezi 5-10 násobkem tloušťky plechu, proto se i jednodušší operace doporučují provádět za tepla, při teplotách $230-350^\circ C$. [12]

Slitiny pro extruzi

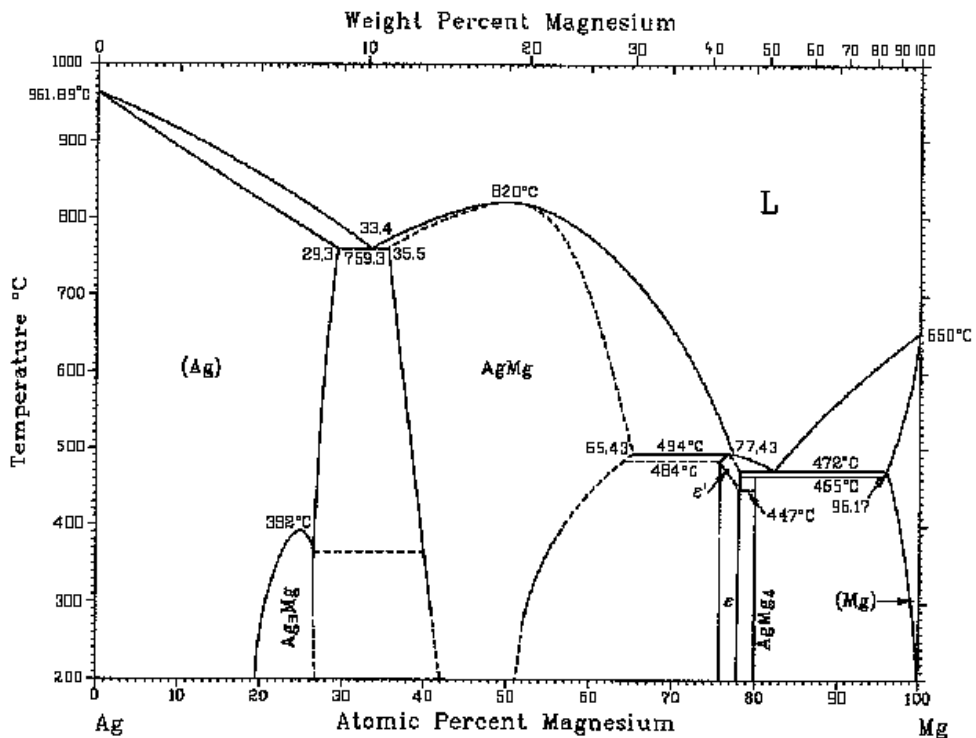
Nejpoužívanější slitiny pro výrobu extrudovaných výrobků jsou systémy Mg–Al–Zn s obsahem hliníku 1-8%, slitina AZ61 je často volena jako univerzální slitiny pro extruzi. Dále jsou používány slitiny s vyšším obsahem zinku, ZK61 disponuje vyšší mezí kluzu než většina jiných slitin pro tváření. Slitiny s nižším obsahem zinku ZK21 a ZM21 jsou uplatňovány tam, kde je požadována vyšší rychlost extruze. Slitina typu Mg-Zn-Cu (6.5% Zn, 1.25% Cu, 0.75% Mn) dosahuje po žihání a vystárnutí měrné pevnosti nejpevnějších hliníkových tvářených slitin. Extruze hořčikových slitin se provádí při teplotách 300-450°C a rychlost protlačování je 5-10x nižší než u hliníkových slitin. [12]

Kované slitiny

Pro výkovky je vhodná slitina ZK60, nebo AZ80 s dobrými pevnostními vlastnostmi, při použití za nízkých teplot, pro aplikace při vyšších teplotách pak HM21. Pro dosažení maximálních vlastností jsou výkovky dále tepelně zpracovávány. Slitiny vykazující rychlý růst zrna při kovací teplotě jsou obvykle kovány na několik etap se snižující se teplotou. Výkovky jsou vyráběny jako součásti složitějších tvarů, u kterých jsou požadovány lepší pevnostní vlastnosti, než kterých by bylo možno dosáhnout u odlitků. Dalšími slitinami používanými pro kování jsou např. AZ31 či AZ61. [12]

1.5 Slitina QE22

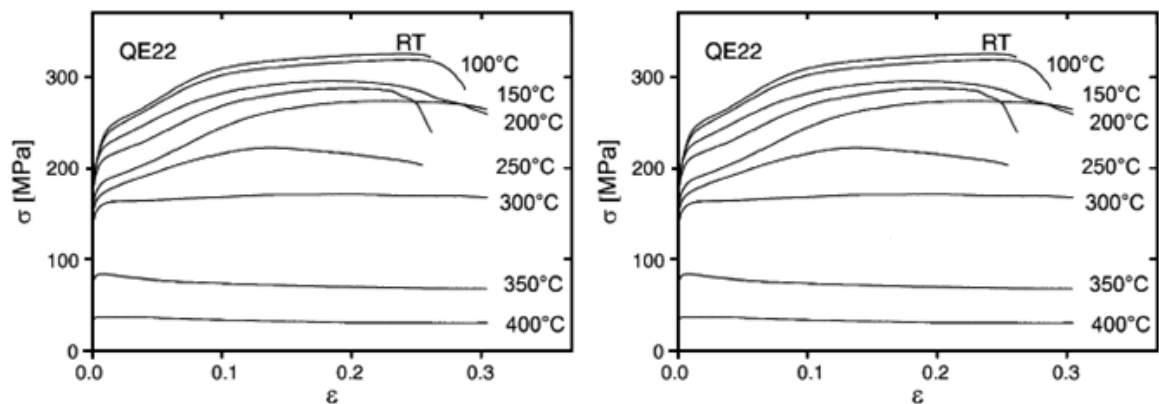
Na potenciální význam stříbra, jakožto přísadového prvku do hořčikových slitin, se přišlo, když se přidávkem stříbra do slitiny Mg-RE-Zr výrazně zvýšila pevnost této slitiny. Dále byl nahrazen cer jiným prvkem vzácných zemin a to neodymem, což vedlo k dalšímu zvýšení pevnosti. Některé tyto slitiny byly vyrobeny také pro použití za zvýšených teplot. Nejrozšířenější slitinou na bázi Mg-Ag je slitina QE22A, která je využita v letectví u kol podvozku, hlavy rotoru u helikoptér či převodových skříní. Další zlepšení pevnostních vlastností za vyšších teplot bylo možno dosáhnout přidáním thoria. Například slitina QH21A vykazovala nejvyšší pevnosti v tahu a odolnost proti creepu do teploty 250°C, až do objevení slitin s yttriem, které jsou navíc odolnější proti korozi. Avšak QH21 a další slitiny typu Mg-Th jsou již zastaralé a nepoužívají se kvůli radioaktivitě thoria [6].



Obr. 1.1: Binární diagram systému hořčík - stříbro

Práce [15] pojednává o chování hořčíkových slitin zatěžovaných tlakem při zvýšených teplotách. Zkoumaná hořčíková slitina QE22 obsahuje 2% stříbra a 2% neodymu. Vzorky pro měření byly vyrobeny metodou squeeze casting a tlakové zkoušky byly prováděny při teplotách 20-400°C.

Z naměřených dat na obr. 1.2 vlevo lze odvodit, že při zvyšujících se teplotách slitině QE22 klesá schopnost zpevňování a při teplotě okolo 300°C tuto schopnost zcela ztrácí, na obr. 1.2 vpravo je zase zřejmý výrazný pokles meze kluzu při teplotách nad 300°C.



Obr. 1.2: Deformační křivky pro slitinu QE22 pro různé teploty + Teplotní závislost meze kluzu a meze pevnosti pro slitinu QE22 [15]

2 KOMPOZITY S KOVOVOU MATRICÍ A JEJICH VÝZTUHY

2.1 Kompozitní materiály

Kompozitními materiály jsou myšleny heterogenní materiály složené ze dvou a více fází, které se od sebe odlišují mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi a ve výsledném kompozitu uplatňují své přednosti, zatímco jejich negativní vlastnosti jsou potlačeny. Na rozdíl od slitin, ve kterých fáze vznikají fázovými přeměnami například při tuhnutí, se kompozity vyrábějí mechanickým mísením jednotlivých složek. Ve většině kompozitů je jedna fáze spojitá, ta se nazývá matrice. Nespojité fáze jsou výztuže, mají obvykle lepší mechanické vlastnosti a jejich úkolem je zlepšit vlastnosti kompozitu oproti samotné matici. Kromě vlastností matrice a výztuže jsou výsledné mechanické vlastnosti kompozitu dány několika důležitými parametry, například soudržností matrice a výztuže, množstvím a délkou vláken výztuže a jeho uspořádáním. To že výsledné vlastnosti nejsou dány jen poměrným součtem vlastností jednotlivých složek, je velmi podstatný jev, který nazýváme synergismus. Synergismus je u kompozitů hodně důležitý, díky němu jsme schopni získávat materiály zcela nových vlastností. Kompozitní materiály se jako takové, nevyrábějí k volnému použití, ale pokud má jejich účinnost přenést výhody, tak je třeba je navrhnout s ohledem na využití konečného výrobku [6, 7, 9].

2.2 Rozdělení kompozitů

Kompozity můžeme rozdělovat podle:

1. Typu matrice

- a) s polymerovou maticí (PMC) – to mohou být termosety nebo termoplasty. Termosety se lépe zpracovávají, lépe smáčejí a prosycují vlákna a energetické nároky na výrobu jsou nižší, než u termoplastů, jelikož jejich zpracování probíhá za výrazně nižších teplot. Termoplasty zase vynikají svou houževnatostí a také tím, že při jejich zpracování probíhá pouze roztavení a tuhnutí matrice, ale žádný chemický proces.
- b) s kovovou maticí (MMC) – jde hlavně o slitiny Al, Mg, Cu, Ti nebo superslitiny na bázi Ni. Oproti kompozitům s polymerní maticí má kovová matrice řadu výhod, mezi které patří např. tepelná a elektrická vodivost, možnost spojování a povlakování. Výhodou většiny kovových matic je také jejich houževnatost a tažnost. Na druhou stranu je výroba kompozitů s kovovou maticí energeticky náročná, což je znát na jejich vyšší ceně.
- c) s keramickou maticí (CMC) – kompozity s keramickou maticí jsou odolné proti vysokým teplotám, používají se například u raketoplánů ve formě keramických destiček vyztužených vlákny z jiného keramického materiálu

2. Tvaru výztuže

- a) Částicové - žádný rozměr částice se výrazně neliší od ostatních rozměrů.
- b) Vlákňové - výztuž má v jednom směru výrazně větší rozměr.
- c) Skeletové - výztuž je souvislá [1]

2.3 Výztuhy

Jde o materiály v podobě vláken či částic, které jsou do matrice přidávány za účelem vyztužení, čímž se myslí zvýšení pevnosti a tuhosti. Abychom mluvili o vyztužení, musí být tedy splněny podmínky vyztužujícího účinku:

- vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice:

$$\sigma_{fP} > \sigma_{mP}$$

- vyztužující materiál musí mít větší tuhost než matrice:

$$E_f > E_m$$

- matrice se nesmí porušit dříve než vlákno:

$$\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{fP}$$

σ_{fP}, σ_{mP} - pevnost vlákna, matrice

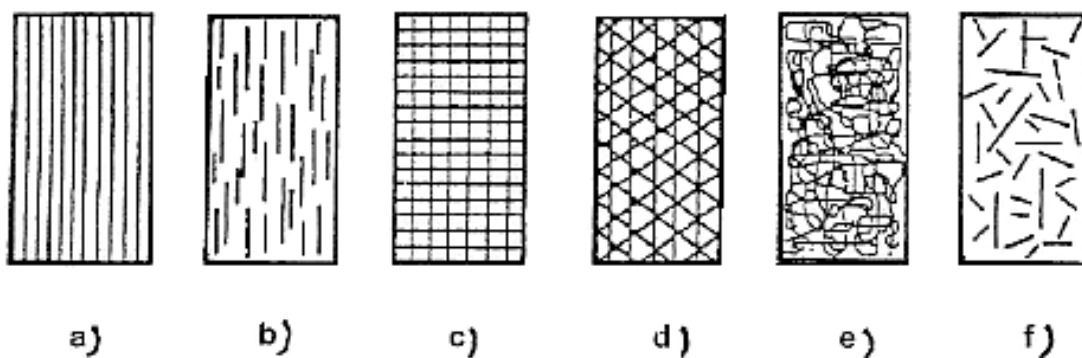
E_f, E_m - modul pružnosti vlákna, matrice

$\varepsilon_{mP}, \varepsilon_{fP}$ - tažnost matrice, vlákna

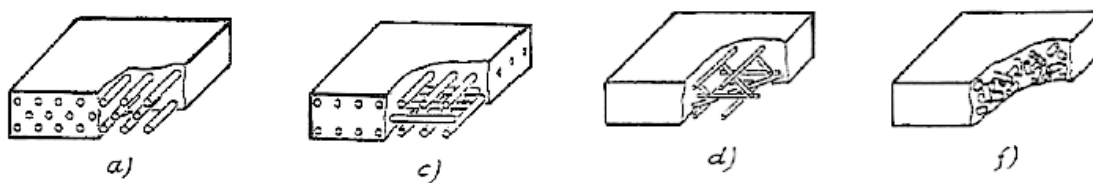
2.3.1 Rozdělení

Kompozitní materiály můžeme z hlediska geometrického tvaru výztuže dělit na:

- **Vláknové** - vlákna tvoří nosnou kostru kompozitních materiálů. Vláknové kompozity lze dále rozdělit ještě podle délky vláken na kompozity s krátkými vlákny a na kompozity s dlouhými vlákny. Velikost vláken u kompozitu s dlouhými vlákny se dá srovnat s celkovou velikostí výrobku. Hlavní typy vláknových kompozitů, lišící se uspořádáním vláken jsou zobrazeny na obr. 2.1 a 2.2 [1].



Obr.2.1: Typy vláknových výztuží [1]

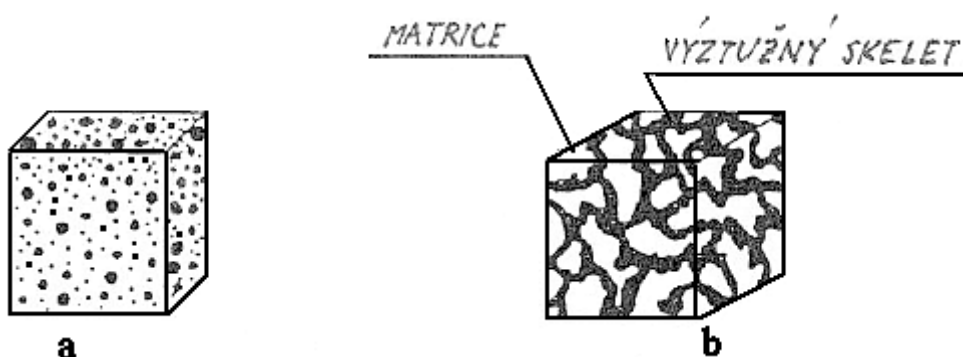


Obr.2.2: Prostorové uspořádání vláken v kompozitu [1]

Pro hlavní typy vláknových výztuží používáme tyto názvy:

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| a) jednosměrná dlouhá vlákna | b) jednosměrná krátká vlákna |
| c) dvousměrné vyztužení | d) vícesměrné vyztužení |
| e) náhodná orientace vláken | f) náhodná orientace krátkých vláken |

- **Částicové** - částice jsou rozloženy v matrici (viz obr. 2.3 a) a omezují růst plastických deformací, zvyšují mez kluzu a mez pevnosti a ovlivňují i další materiálové charakteristiky – tvrdost, tepelná vodivost atd. [1].
- **Skeletové** - jde o kompozitní materiál, který je tvořen pórovitou matricí prostoupenou souvislým nosným skeletem (viz obr. 2.3 b) [1].



Obr. 2.3: a) rozmístění výztuže u částicového kompozitu, b) model skeletového kompozitu[1]

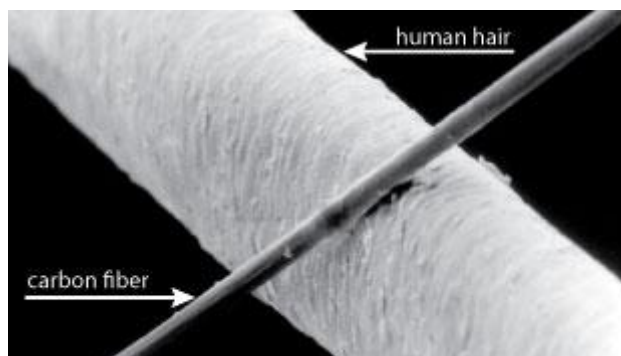
2.3.2 Technologie výroby vláken

Skelné vlákno

Směs jednotlivých surovin (křemičití písek, kaolin, vápenec,...) je roztavena v peci při teplotě kolem 1400°C a poté přelita do platinových píček s tryskovým dnem. Tavenina se dostává ven skrz trysky a je ochlazována, vzniklé vlákno se následně protahuje a je opatřeno ochrannou vrstvou, která vlákno chrání před oxidací a také zvyšuje adhezi a smáčivost organickými matricemi. Skelná vlákna používají různých typů sklovin, podle toho jaké jsou na ně kladeny požadavky. Sklovina typu E (elektrická) je nejpoužívanější druh skloviny pro výrobu vláken. Jde o bezalkalickou sklovinu, která vyniká vysokou prostupností pro záření a jde o výborný elektrický izolant. Sklovina typu S (strength) se používá na vlákna se zvýšenou pevností. Dále se také můžeme setkat s tzv. C-sklovinou, vyznačující se vysokou odolností proti kyselinám a dalším chemicky agresivním látkám. Výhodou skelných vláken je jejich chování za zvýšených teplot, kdy i při dlouhodobém namáhání za teplot 250 °C nijak nesnižují své mechanické vlastnosti a navíc jsou nehořlavé [1, 5].

Uhlíkové vlákno

Výchozí organické suroviny ve tvaru vláken jsou nejprve karbonizovány a poté grafitizovány. Jako výchozí surovina pro výrobu uhlíkových vláken se používá celulóza, ale vlákna z ní vyrobená nemají moc dobrou strukturu, tak se používají spíše jako izolační materiál pro vysoké teploty. Dále se jako výchozí surovina používá smola. Vlákna ze smoly mají vysoký modul pružnosti a výborné tepelné elektrické vlastnosti. Nejběžnější surovinou pro výrobu uhlíkových vláken jsou polyakrylonitrilové vlákna (PAN). Ta jsou nejprve zahřata a protahována, což pomáhá vyrovnat molekuly uvnitř vlákna a tak zlepšit vlastnosti vlákna po karbonizaci. Pokračuje se stabilizací na relativně nízké teplotě (220-230°C), při které dojde k přerovnání atomové struktury vlákna. Jakmile jsou vlákna stabilizována, tak jsou zahřívána na teplotu 1000-1500°C, tento proces se nazývá karbonizace a probíhá v inertní atmosféře. Dalším krokem je grafitizace za teploty 2500-3000°C v inertní atmosféře, která zabraňuje tomu, aby vlákna při tak vysoké teplotě shořela. Nakonec se povrch vláken upravuje apretací, což slouží jako ochrana před dalším zpracováním. Uhlíková vlákna obsahují přes 90% uhlíku, jejich průměr je 5-10 μm (viz obr. 2.4) a mají vysoce anizotropní vlastnosti. Ve směru osy vláken dosahuje tepelná roztažnost záporných hodnot, zatímco ve směru kolmém na osu jsou hodnoty kladné. I modul pružnosti ve směru osy vláken dosahuje zcela odlišných hodnot oproti kolmému směru $E_{\parallel f}/E_{\perp f} = 28$. Kromě dobrých pevnostních vlastností mají uhlíková vlákna také dobrou tepelnou a elektrickou vodivost a mimořádně vysokou korozní odolnost [1, 5, 8].



Obr. 2.4: Srovnání tloušťky lidského vlasu a uhlíkového vlákna [14]

Bórové vlákno

Bórová vlákna jsou vyráběna metodou CVD. Postup spočívá v tom, že ohřivaným reaktorem prochází tenké wolframové vlákno, které slouží jako substrát. Do reaktoru je také přiváděna směs chloridu boritého a vodíku. Chlorid boritý je redukován vodíkem a vzniká plynný bór a kyselina chlorovodíková. Bór potom kondenzuje na wolframovém drátu a vzniká vlákno o průměru 0,1-0,2 mm. Výhodou bórového vlákna je, že má dobrou přilnavost k matici, naopak nevýhodou je jeho vysoká hustota a fakt, že se bórové vlákno nedá ohýbat [1, 7].

Aramidové vlákno

Označení aramid je spojení slov aromatický a polyamid. Aramidové vlákno je známo především díky firmě Dupont pod názvem Kevlar. Přesné chemické složení je obchodním tajemstvím. Vlákno je organického původu, vyniká svou nízkou hustotou, dobrou odolností proti chemikáliím a vysokou pevností. Výroba vlákna probíhá tak, že se polymer rozpustí v koncentrované kyselině sírové a poté je tryskami vytlačován do studené

vody, tam tuhne a propírá se. Před impregnací ještě probíhá sušení na cívkách, jelikož je vlákno hyroskopické. Aramidová vlákna se používají nejen jako výztuže do kompozitů, ale také se z nich vyrábí osobní pancíře či ochranné oděvy před vysokými teplotami. Mez pevnosti v tlaku je u aramidových vláken podstatně nižší než pevnost v tahu, proto jsou aramidové kompozity používány do konstrukcí namáhaných na tah [1, 5].

Vlákno z SiC

Technologie výroby vláken z karbidu křemíku záleží na tom, zda se jedná o vlákna krátká, nebo kontinuální. Výroba kontinuálních vláken probíhá metodou CVD, jako v případě bórových vláken. Jako zdroj uhlíku a křemíku jsou používány alkylsilany, které jsou při teplotě 1300°C redukovány vodíkem. Vzniklý karbid křemíku se usazuje na uhlíkovém substrátu a vznikají vlákna, která se značí SiC/C o průměru 0,1 - 0,2 mm. Výbornými vlastnostmi se vyznačují krátká vlákna z SiC, která nazýváme whiskery. Jedná se o vlákna s tloušťkou okolo mikronu a délkou až několika milimetrů. Jejich struktura je výjimečná velmi nízkou koncentrací poruch, což se pak odráží na jejich pevnostních vlastnostech, které jsou špičkové. Výrobních postupů pro výrobu whiskerů je celá řada, jako jeden z nejlevnějších se uplatnil postup, využívající rýžové slupky. Tyto slupky jsou žihány při teplotě až 1600°C v inertní atmosféře, dochází k rozkladu organických látek a SiO₂ přítomný ve slupkách se mění na vláknitý karbid křemíku [4].

Vlákna z Al₂O₃

Jednou z metod pro výrobu vláken z oxidu hlinitého je extruze vodného roztoku chlorohydrátu hlinitého. (Al₂(OH)₅Cl) s reologickými přísadami pro zajištění kontinuálního vytlačování vlákna. Roztok je vytlačován do suchého vzduchu, což vede k odstraňování vody a tím rychlému nárůstu viskozity. Vlákno se poté podrobí postupnému nárůstu teploty pro odstranění chlóru a dalších organických látek a zůstává pouze oxid hlinitý. Výsledná vlákna někdy obsahují zbytky oxidu křemičitého, mají velkou poréznost a modul pružnosti do 100 GPa.

Jiným procesem je výroba vláken z vysoce čistého polykrystalického Al₂O₃. Nejprve je připravena vodná suspenze směsi oxidu hlinitého a speciálních zvláknovacích přísad, z které je následně odstraňována voda, dokud se nezíská vhodná směs pro suché předení na vlákno. Spředená vlákna jsou poté vypalována ve dvou etapách. První je vypalování pro řízení smrštění vlákna a následuje vypalování plamenem pro získání požadované hustoty α-Al₂O₃. Vlákna jsou pak potažena vrstvou oxidu křemičitého, který zaceluje povrchové vady, zvyšuje pevnost vlákna a smáčivost vlákna s matricí [13].

Nejznámějšími vlákny tohoto typu jsou vlákna Saffil. Jde o vlákna o síle 3-5 μm, která nachází uplatnění v mnoha aplikacích v leteckém, automobilovém či petrochemickém průmyslu. Vlákna Saffil dokážou odolávat i agresivnímu prostředí, proto je lze najít například ve filtrech horkých plynů nebo žiravin. Díky svým izolačním schopnostem se Saffil používá pro výrobu kompozitních textilií, ze kterých vyrábí ochranné oděvy. Tato vlákna obsahují malé množství (3-4%) SiO₂ pro lepší kontrolu růstu zrna. Flexibilita procesů při výrobě umožňuje vyrábět vlákna s různými vlastnostmi, lišícími se podle potřeb aplikací, avšak přesná technologie výroby je obchodním tajemstvím [14].

Kovové vlákno

Kovová vlákna lze vyrábět tažením za studena i za tepla, extruzí z taveniny nebo tzv. Taylorovým procesem, kdy jsou dráty pokryty sklem a protahovány za tepla. Nejpoužívanějšími kovovými vlákny jsou vlákna z wolframu či molybdenu, jejich nevýhodou je nízká měrná pevnost díky vysoké hustotě. Použití nacházejí hlavně v aplikacích součástí zatížených creepem (lopatky turbín leteckých motorů, plynových turbín atd.). Wolframová vlákna o tloušťce cca 0,01mm se používají jako jádro pro výrobu bórových vláken [13].

2.3.3 Mechanické vlastnosti vláken

Důvody proč použít vlákno jako konstrukční materiál vychází ze čtyř paradoxů materiálu.

1. Paradox pevného materiálu

„Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší, než pevnost vypočítaná teoreticky.“(Zwicky)

2. Paradox vláknité struktury

„Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší.“(Griffith)

3. Paradox délky zatížení

Čím kratší je zatěžovaná část vlákna, tím vyšší pevnosti naměříme. Nárůst pevnosti se zmenšováním průměru vlákna a jeho délkou, je dán tím, že výskyt poruch a jejich vliv na pevnost se snižuje s průměrem vlákna a zatěžovanou částí vlákna.

4. Paradox kompozitního materiálu

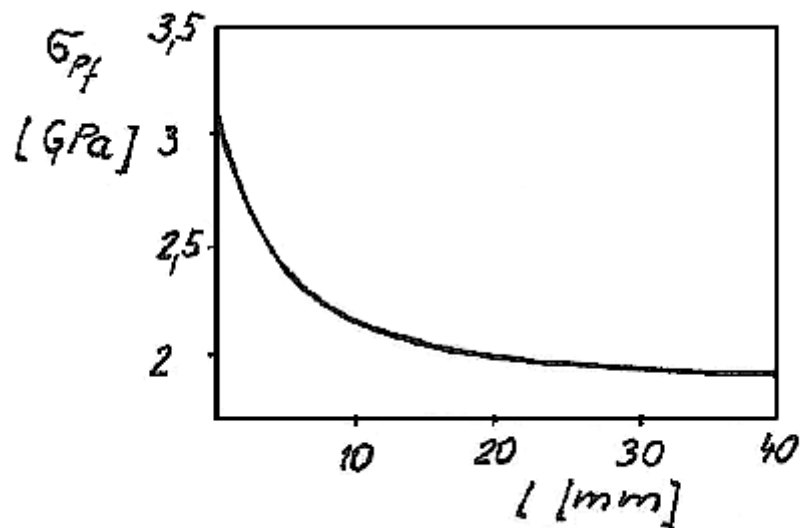
Kompozitní materiál vydrží napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu totiž může převzít vyšší podíl teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně. Tento paradox platí při zatěžování kompozitu tahem [5].

Pevnostní charakteristiky materiálu jsou dány množstvím nadkritických poruch, kde vzniká a odkud se šíří trhlinka vedoucí až k lomu. Četnost těchto poruch závisí na objemu materiálu, tedy na jeho rozměrech. U vláken je tento jev popisován Griffithovým vztahem ve tvaru

$$\sigma_{pf} = A + \frac{B}{d} \quad (1)$$

ve kterém jsou A a B materiálové konstanty a d je průměr vlákna

Pro průměr vlákna $d \rightarrow 0$, by znamenalo, že pevnost vlákna poroste nad všechny meze. Griffithův vztah má tedy omezenou platnost v krajní poloze, kterou je tzv. teoretická pevnost $\sigma_{teor} \cong E/10$ a tu překročit nemůžeme. U tenkých vláken se projevuje neblahý vliv jejich délky na jejich mez pevnosti, z důvodu vyšší koncentrace poruch u delšího vlákna. Na obrázku 2.5 můžeme vidět experimentálně zjištěnou závislost meze pevnosti na délce skleněného vlákna typu E o průměru 5-20 μm .



Obr. 2.5: Závislost meze pevnosti vlákna σ_{Pf} na jeho délce l [1]

2.4 Metody výroby kompozitů s kovovou maticí

Hlavním úkolem matrice je zajištění celistvosti tělesa, tzn. dokonalé propojení s nosnou částí a vytvoření požadovaného vnějšího tvaru. Hlavní funkce matrice můžeme uvést v několika bodech:

- spojuje vyztužující vlákna a částice v jeden soudržný celek
- zprostředkovává zatížení vláken v místech vnějšího zatížení, v místech přerušení vláken a mezi vlákny
- vytváří funkční tvar, povrch tělesa a estetický vzhled
- ochraňuje vlákna před vlivy okolí

Hlavními mechanickými požadavky na matici je dobrá adheze k výztuži a také dobrá tažnost.[1, 5]

- Prášková metalurgie

Prášek se z kovu nebo slitiny vyrábí mechanickým mletím nebo jinou, fyzikálně-chemickou cestou (elektrolýzou, rozprašováním atd.). Nejčastějším způsobem výroby prášku je rozprašování. Tavenina je rozstříkována tlakovým dusíkem, tuhnutím kapiček taveniny pak vzniká jemný prášek. Částice, které mají matici vyztužovat, musí být s práškem důkladně promíchány. Poslední fází této technologie je kompaktizace vzniklé směsi, která se provádí slinováním, lisováním nebo extruzí. U kompozitů s vláknovou výztuží vyráběných práškovou metodou a následným protlačováním dochází k nežádoucímu lámání vláken.[4, 2]

- Promíchání

U kompozitů vyráběných odléváním je důležité, aby byly částice výztuhy důkladně vmíchány do taveniny matrice. Taveninu je pak třeba dobře promíchávat, jelikož těžší částice mají tendenci klesat ke dnu. Při samotném odlévání se postupuje jako při lití obyčejné slitiny, ale je třeba počítat s horší tekutostí a tím pádem i zabíhavostí suspenze [4].

- Rozprašování

V indukční peci je roztavena slitina matrice a vytéká mezi trysky tlakového plynu, ten taveninu rozstříkuje na malé kapičky. Do proudu taveniny je injektorem přidávána zpevňující fáze. Proud kapek slitiny a částic dopadá na vhodný substrát, kde rychle tuhne a vzniká kompozitní ingot s jemnou mikrostrukturou [4].

- Infiltrace

U této metody je prvním krokem výroba tzv. preformy. Jedná se o porézní těleso, které je tvořeno vzájemně se zaklesnutými vlákny výztuhy. Preforma je poté infiltrována taveninou, k čemuž se obvykle používá vysokého tlaku. Výroba reformy se provádí několika různými postupy, jednou z možností je vmíchání vláken do vody s následným lisováním a vysoušením. Často je do vody přidáván vazebný prostředek, který zlepšuje soudržnost preformy a při infiltraci taveniny se vypálí.[4]

- Vysokoteplotní reakce v roztavené matrici

Vyztužující částice vznikají pomocí chemických reakcí mezi roztavenou matricí a vhodnou příměsí do matrice přidanou. Jako příklad můžeme uvést reakce vzduchu v hliníkové slitině, kde se pak tvoří vyztužující částice v podobě oxidů, nebo přidání vhodné směsi solí v podobě hexafluorotitaničitanu draselného a tetrafluoroboritanu draselného, což má za následek tvorbu tvrdého boridu titanu.[4]

2.5 Mechanické vlastnosti kompozitů

Materiálové charakteristiky kompozitu závisí na materiálových charakteristikách vstupních komponentů, podílu těchto složek, uspořádání částic a vláken v matrici a na kvalitě rozhraní matrice-výztuž, kde hrozí riziko koroze, kterou mohou způsobovat chemikálie pronikající tímto rozhraním kapilárním způsobem. [1, 5]

Směšovací pravidlo pro hustotu kompozitu

Pro následující výpočty se zavádí objemové podíly vláken v_f a matrice v_m a dále také hmotnostní podíly vláken m_f a matrice m_m podle těchto vztahů:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad (2)$$

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} \quad m_m = \frac{M_m}{M_c} \quad (3)$$

Využijeme podmínku pro zachování objemu:

$$V_c = V_f + V_m = \sum_i V_i / \cdot \frac{1}{V_c}$$

$$1 = \frac{V_f}{V_c} + \frac{V_m}{V_c} = v_f + v_m = \sum_i v_i \quad (4)$$

a podmínku pro zachování hmoty:

$$M_c = M_f + M_m = m_f + m_m = \sum_i m_i$$

$$1 = \frac{M_f}{M_c} + \frac{M_m}{M_c} = m_f + m_m = \sum_i m_i \quad (5)$$

Mezi objemovými a hmotnostními podíly funguje jednoznačný vztah a to prostřednictvím hustot ρ .

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} = \frac{\rho_f \cdot V_f}{\rho_c \cdot V_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} \cdot v_f \quad (6)$$

$$m_m = \frac{M_m}{M_c} = \frac{\rho_m \cdot V_m}{\rho_c \cdot V_c} = \frac{\rho_m}{\rho_c} \cdot v_m \quad (7)$$

Vztah pro hustotu kompozitu ρ_c je odvozen z rovnice pro celkovou hmotnost kompozitu:

$$M_c = M_f + M_m$$

$$\rho_c \cdot V_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m / \cdot \frac{1}{V_c}$$

$$\rho_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m = \sum_i \rho_i \cdot v_i \quad (8)$$

Rovnice (7) se nazývá směšovací pravidlo pro stanovení hustoty kompozitu ρ_c . Jde o rozšířený vztah pro i složek, odvozený ze vztahu pro dvousložkový kompozit. Vztah je platný pro ideální kompozitní materiál bez dutin. Objemový podíl dutin v kompozitu v_d lze spočítat pomocí vztahu:

$$v_d = \frac{\rho_{c,teor} - \rho_{c,ex}}{\rho_{c,teor}} \quad (9)$$

Kde $\rho_{c,teor}$ je hustota kompozitu spočítaná pomocí směšovacího pravidla (7) a $\rho_{c,ex}$ je hustota zjištěná experimentálně.

Dlouhá vlákna

Modul pružnosti v tahu

Pro určení modulu pružnosti v tahu ve směru vláken pro kompozity s vlákny orientovanými jedním směrem vycházíme z podmínky silové ekvivalence:

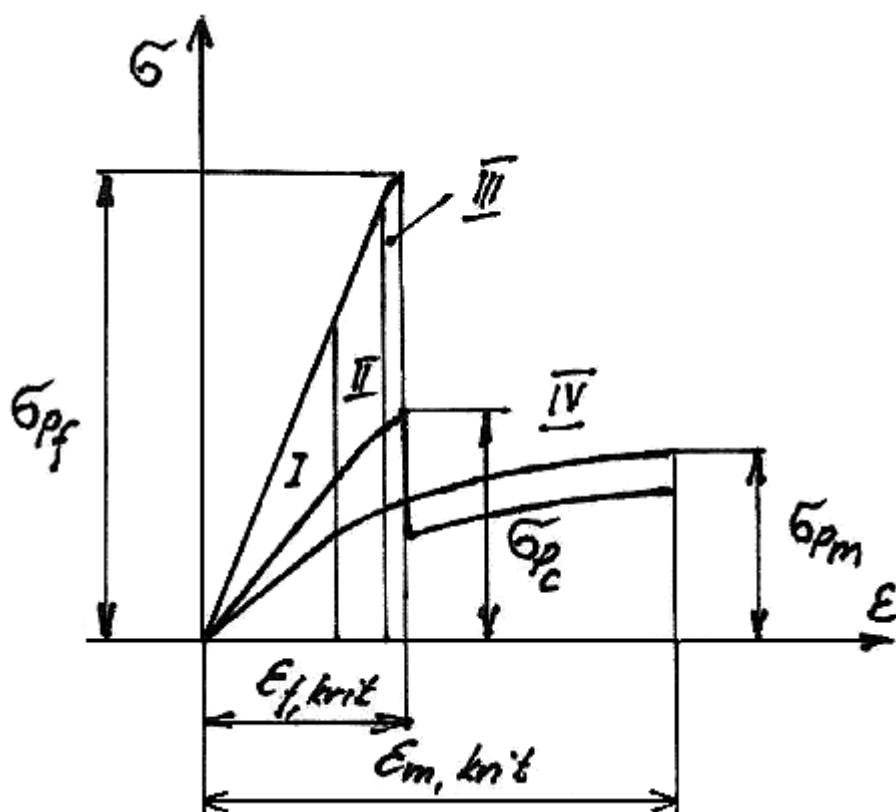
$$F_c = F_f + F_m \quad (10)$$

$$\sigma_c \cdot S_c = \sigma_f \cdot S_f + \sigma_m \cdot S_m / \cdot l$$

$$\sigma_c \cdot V_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m / \frac{1}{V_c}$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m = \sum_i \sigma_i \cdot v_i \quad (11)$$

Směšovací pravidlo pro napětí v kompozitu platí v pružném i plastickém stavu materiálu, lze díky němu sestavit tahový diagram kompozitu, pokud známe tahové diagramy jednotlivých složek. Ze vztahu také vyplývá, že pokud se obě složky při zatěžování chovají lineárně, tahový diagram kompozitu bude také lineární (viz. obr.2.6).



Obr. 2.6: Tahový diagram kompozitního materiálu (1)

Tahový diagram kompozitu lze rozdělit na 4 části:

- I. – v této oblasti se matrice i vlákno chovají lineárně pružně
- II. – vlákno se chová lineárně pružně, matrice pružně plasticky
- III. – vlákno i matrice se chovají pružně plasticky (u vláknů jde o velice malý úsek)
- IV. – dochází k prasknutí vlákna a matrice se chová elasticko plasticky

V úseku I se obě složky chovají lineárně, tudíž i celý kompozit má v této oblasti lineární chování a je možné zde definovat a určit modul pružnosti kompozitu. Napětí-ověřovací charakteristiky matrice, vláken a kompozitu jsou popsány Hookovým zákonem:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (12)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (13)$$

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c \quad (14)$$

Z dosazení (12), (13) a (14) do rovnice (5) plyne vztah:

$$E_c \cdot \varepsilon_c = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot \nu_f + E_m \cdot \varepsilon_m \cdot \nu_m \quad (15)$$

U použitého jednoduchého výpočtového modelu, za předpokladu dokonalé adheze mezi matricí a vlákny a stejného podélného přetvoření $\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$, lze vztah (15) zjednodušit do tvaru:

$$E_c = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m = \sum_i E_i \cdot v_i \quad (16)$$

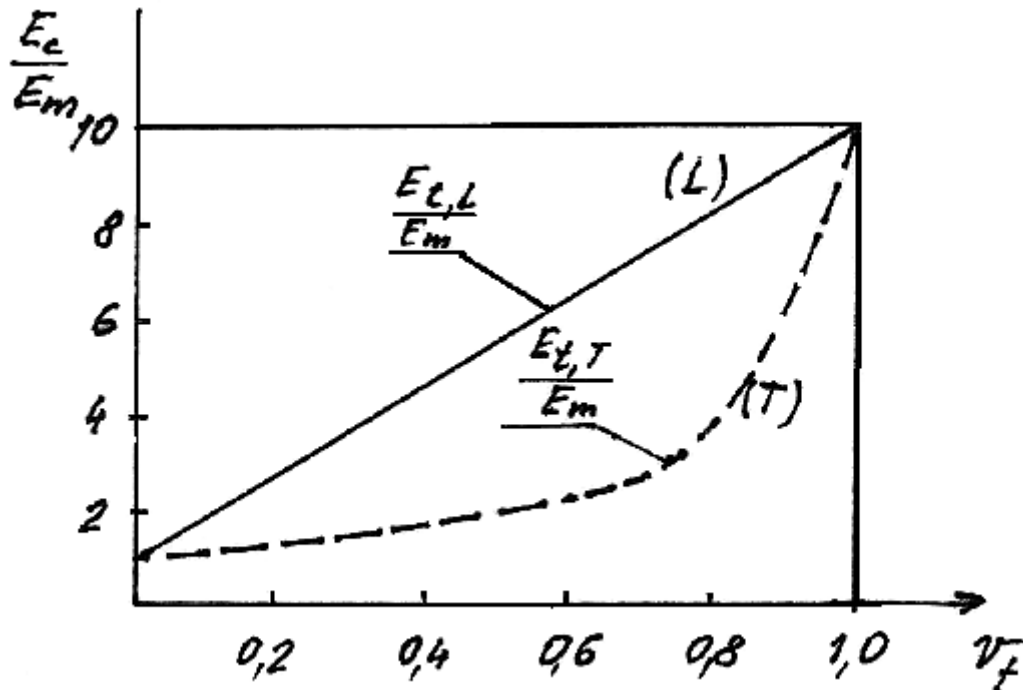
Pro reálné systémy je do vztahu zaveden adhezni koeficient $A = \langle 0; 1 \rangle$ u běžných kompozitů se udává $A \cong 0,8$.

$$E_c = A \cdot E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m \quad (17)$$

Pro dvousložkový kompozit lze vyjádřit modul E_c pomocí objemového podílu vláken v_f dosazením $v_m = 1 - v_f$ do vztahu (16):

$$E_c = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m = E_f \cdot v_f + E_m \cdot (1 - v_f) \quad (18)$$

Z rovnice (17) je zřejmé, že modul pružnosti E_c je lineární funkcí objemového podílu vláken v_f . Tento vztah je vyjádřen na obr. 2.7 křivkou L.



Obr. 2.7: Závislost modulu pružnosti na objemovém podílu vláken

Dalším důležitým parametrem kompozitních materiálů je jejich pevnost σ_{pc} . U kompozitů s kovovými matricemi se při lomu zpravidla jako první poruší vlákna, napětí ve vláknech v okamžik lomu je tedy rovno pevnosti vláken σ_{pf} , napětí v matrici je ale nižší než její pevnost σ_{pm} . Napětí v matrici v okamžiku lomu kompozitu lze označit $\sigma_{m,efkrit}$ a lze ho popsat jako napětí matrice odpovídající kritické deformaci vláken. Po dosažení kritického přetvoření $\varepsilon = \varepsilon_{f,krit}$ dojde k přetržení vlákna a napětí ve vlákně je nulové $\sigma_f = 0$.

Pro napětí v kompozitu σ_c pak platí:

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot v_m \quad (19)$$

Rovnice (19) popisuje v tahovém diagramu oblast IV po přetržení vlákna.

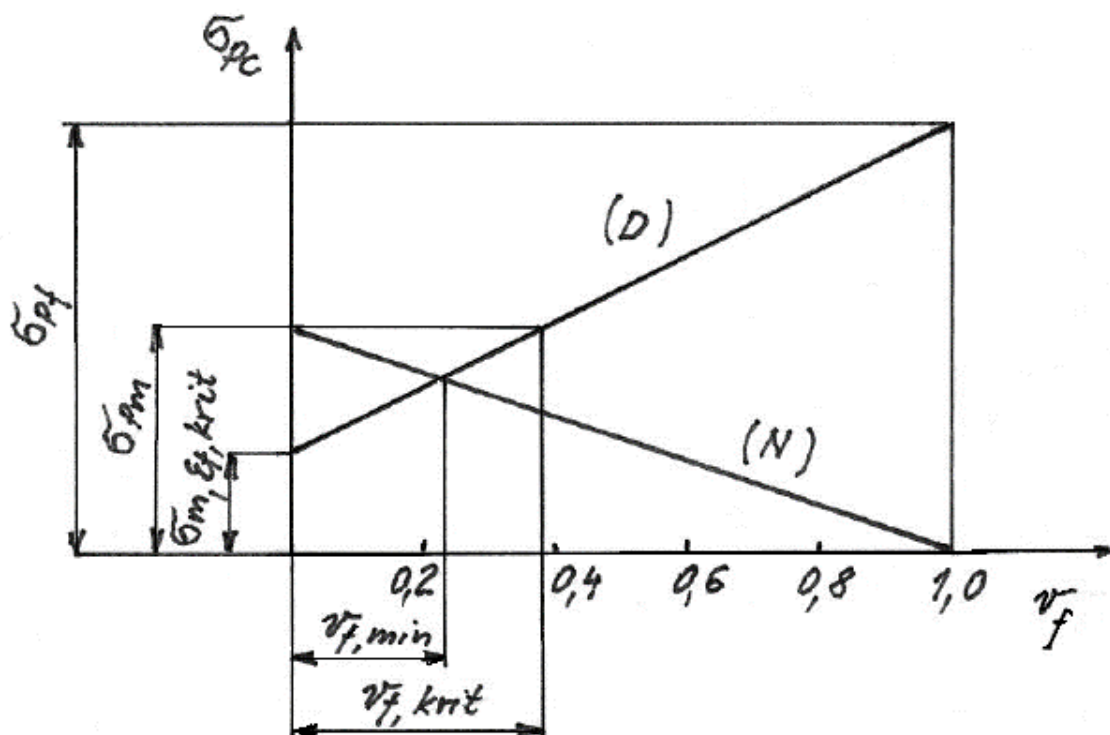
Výsledná pevnost v tahu u dobře navrženého kompozitu je dána stavem, kdy praskají vlákna, tedy pro kritické přetvoření vláken $\varepsilon = \varepsilon_{f,krit}$. Vztah (19) lze pro výpočet pevnosti ve směru vláken σ_{pc} přepsat do tvaru:

$$\sigma_{pc} = \sigma_{pt,L} = \sigma_{pf} \cdot v_f + \sigma_{m,\varepsilon_{f,krit}} \cdot v_m \quad (20)$$

U nevhodně navrženého kompozitního materiálu, který nemá potřebný objemový podíl vláken, dochází k situaci, kdy dojde k přetržení vláken, aniž by napětí v kompozitu dosáhlo pevnosti matrice. Přetržená vlákna tedy žádné napětí nepřenaší a pro podélnou pevnost kompozitu platí vztah:

$$\sigma_{pc} = \sigma_{pt,L} = \sigma_{pm} \cdot v_m \quad (21)$$

Rovnice pro výpočet podélné pevnosti dobře i špatně navrženého kompozitu jsou graficky znázorněny na obr. 2.8.



Obr. 2.8: Závislost podélné pevnosti na objemovém podílu vláken pro dobře (D) a nevhodně (N) navržený kompozit

V grafu na obr. 2.8 se objevují dva důležité pojmy a to minimální objemový podíl vláken $v_{f,min}$ a kritický objemový podíl vláken $v_{f,krit}$.

Minimální objemový podíl vláken je stav, kdy je pevnost dobře navrženého kompozitu shodná s pevností nevhodně navrženého kompozitu. Ve výše uvedeném grafu se jedná o průsečík přímk D a N

Kritický objemový podíl vláken je stav, kdy je pevnost dobře navrženého kompozitu stejná jako pevnost matrice. Aby použití kompozitního materiálu mělo smysl, je třeba, aby jeho pevnost byla vyšší než pevnost matrice $\sigma_c > \sigma_m$. Podle grafu na obr. 2.8 je tato podmínka splněna tehdy, když je objemový podíl vláken vyšší než kritický objemový podíl $v_f > v_{f,krit}$.

Vztahy pro výpočet podélného modulu pružnosti $E_{t,L}$ a podélné pevnosti $\sigma_{pt,L}$ byly odvozeny pro ideální kompozitní materiál. Faktorů, které negativně ovlivňují tyto mechanické vlastnosti je celá řada:

- 1) Směrová dezorientace vláken v podélném směru
- 2) Vlákná jsou různých délek a rozdílných průměrů
- 3) Rozdílná kvalita mezifázového rozhraní v kompozitu z důvodu nedokonalé impregnace vláken.
- 4) Přítomnost zbytkových napětí, která jsou důsledkem rozdílných teplotních roztažností matrice a vláken. Tato napětí mohou vznikat jak při samotné výrobě kompozitu, tak i za provozu.

pro modul pružnosti v tahu v příčném směru E_{c2} platí:

$$\frac{1}{E_{c2}} = \frac{v_m}{E_m} + \frac{v_f}{E_f} \quad (22)$$

A modul pružnosti ve smyku G_{c12} se stanoví ze vztahu:

$$\frac{1}{G_{K12}} = \frac{V_M}{G_M} + \frac{V_V}{G_V} \quad (23)$$

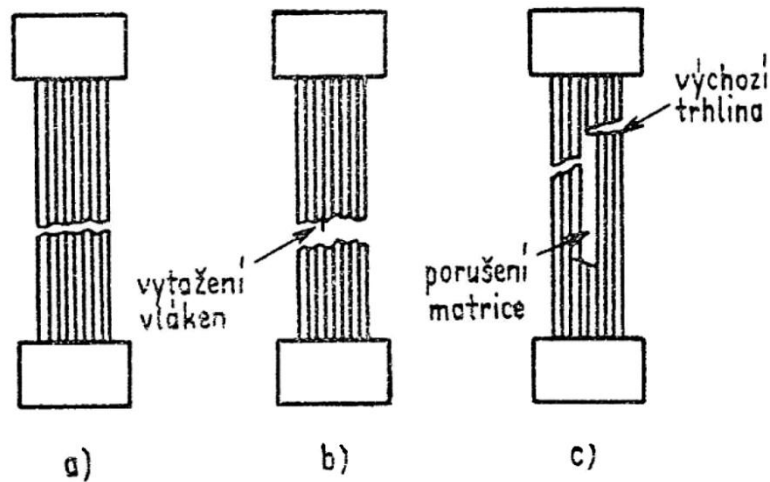
Mechanismy porušování dlouhvláknových kompozitů

U vláknových jednosměrných kompozitů dochází k vnitřnímu porušení celistvosti dříve, než se objeví okem viditelné defekty. Uvnitř kompozitu může docházet k přetržení vláken, vzniku mikrotrhlin v matrici, nebo oddělování vláken od matrice.

Při tahovém zatížení ve směru vláken se objevují tři základní mechanismy porušení, závisející na mechanických vlastnostech jednotlivých složek a technologii výroby kompozitu:

- a) křehké porušení
- b) křehké porušení s vytažením vláken
- c) křehké porušení s oddělením komponent, nebo porušením matrice

Tyto mechanismy jsou znázorněny na obr. 2.9

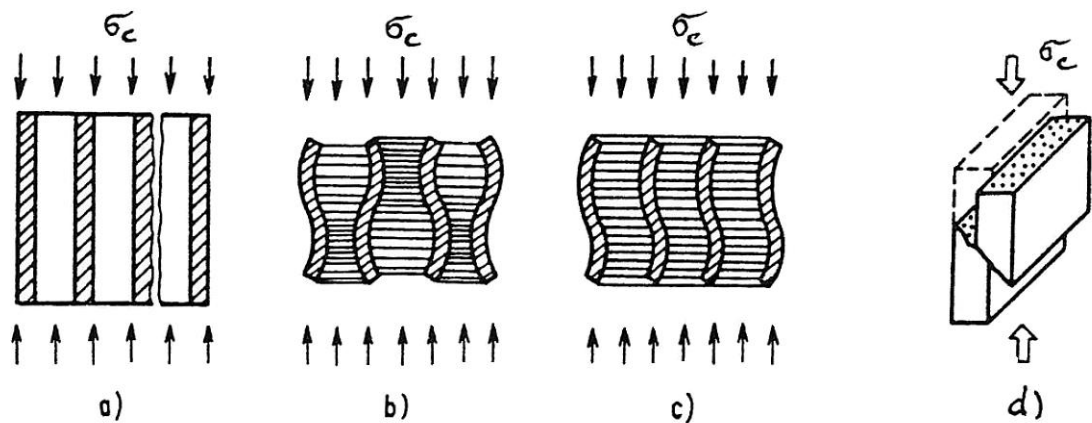


Obr. 2.9: Mechanismy porušování dlouhvláknového kompozitu tahovém namáhání [1]

Při tlakovém namáhání se vyskytují 4 základní mechanismy porušování:

- příčné tahové porušování
- mikroprohnutí s extenzní deformací
- mikroprohnutí se smykovou deformací
- smykové porušování

Případ *b)* nastává při malém objemovém podílu vláken v_f , kde není téměř žádná vazba mezi příčným přetvořením sousedních vláken. K porušení mechanismem *c)* dochází při vysokém objemovém podílu vláken v_f . Na obr. 2.10 je zřejmá soufázová deformace vláken, což značí, že existuje vazba mezi deformací sousedních vláken.[1]



Obr. 2.10: Způsoby porušení dlouhvláknových kompozitů při tlakovém namáhání [1]

Kompozity s krátkými vlákny

Mechanické vlastnosti dlouhovláknových jednosměrných kompozitů v podélném směru se značně liší od vlastností ve směru příčném. V případě, že je potřeba zlepšit mechanické vlastnosti ve všech směrech, je vhodné použít kompozity krátkovláknové s náhodným uspořádáním vláken. Jejich použití je vhodné zejména v případech, kdy nevíme, jak přesně bude vyrobené těleso namáháno.

Pro kompozity s krátkými vlákny, které jsou uspořádány náhodně, bereme v úvahu, že prostředí je makroskopicky isotropní, má tedy modul pružnosti stejný ve všech směrech a pro jeho určení používáme vztah:

$$E = \frac{3}{8}E_L + \frac{5}{8}E_T \quad (24)$$

Modul pružnosti E_L ve směru vláken u kompozitu s krátkými, jednosměrně uspořádanými vlákny o délce L a průměru d , můžeme vypočítat ze vztahu:

$$E_L = E_m \cdot \frac{1 + \frac{2L}{d} \cdot \eta_L \cdot v_f}{1 - \eta_L \cdot v_f} \quad (25)$$

modul pružnosti v příčném směru E_T nebude záviset na parametrech l a d :

$$E_T = E_m \cdot \frac{1 + 2 \cdot \eta_T \cdot v_f}{1 - \eta_T \cdot v_f} \quad (26)$$

parametry η_L a η_T získáme z následujících vztahů:

$$\eta_L = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \frac{2L}{d}} \quad (27)$$

$$\eta_T = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2} \quad (28)$$

Pevnost krátkovláknového kompozitu s usměrněnými vlákny lze spočítat pomocí směšovacího pravidla, jen je třeba brát v úvahu, že konce vláken napětí nepřenášejí. Průměrné napětí ve vlákně v okamžiku lomu je rovna polovině pevnosti vlákna.

$$R_{mC} = \frac{R_{mf} \cdot v_f}{2} + R_{mm} \cdot v_m \quad (29)$$

Částicové kompozity

Pro odhad modulu pružnosti částicového kompozitu lze využít aritmetický průměr

$$E = (E_L + E_T)/2 \quad (30)$$

kde se pro výpočet E_L a E_T využije vztahů:

$$E_L = E_c \cdot v_c + E_m \cdot v_m \quad (31)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{v_m}{E_m} + \frac{v_c}{E_c} \quad (32)$$

Pro přesnější určení slouží selfkonzistentní modely, např. Kernerův model:

$$E = E_m \frac{1 + ABv_c}{1 - Bv_c} \quad (33)$$

pro A a B platí:

$$A = \frac{7 - 5v_c}{8 - 10v_c} \quad (34)$$

$$B = \frac{E_c - E_m}{E_c + AE_m} \quad (35)$$

Pro odhad meze pevnosti slouží vztah:

$$R_m = R_{mc} \cdot v_c + R_{mm} \cdot v_m \quad (36)$$

3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S HOŘČÍKOVOU MATRICÍ

První kompozity s hořčíkovou matricí byly vyráběny s dlouhými vlákny. Velká anizotropie těchto materiálů a degradace vlastností spojená s vytahováním vláken z matrice, vedla další experimenty k použití nových materiálů s krátkými vlákny či whiskery. Další pokusy vedly k nahrazení drahých keramických vláken levnými částicemi z SiC, tyto materiály však nedosahovaly parametrů s kompozitních materiálů s krátkými vlákny, proto se začaly zkoušet tzv. hybridní kompozity, které obsahovaly jak částice, tak i krátká vlákna. Výhodou těchto materiálů oproti těm s dlouhými vlákny je mnoho, nejenže jejich pevnostní charakteristiky jsou vysoké, ale mohou být vyráběny běžnými metalurgickými postupy např. válcování, protlačování atd. V tab. 3.1 je uveden přehled složek, používaných pro vyztužování hořčíkových kompozitů.

Nízká hmotnost, dobrá specifická pevnost a schopnost velkého tlumení vibrační dělá z kompozitů na bázi hořčíkových slitin ideální materiál pro použití v leteckém a automobilovém průmyslu. [2]

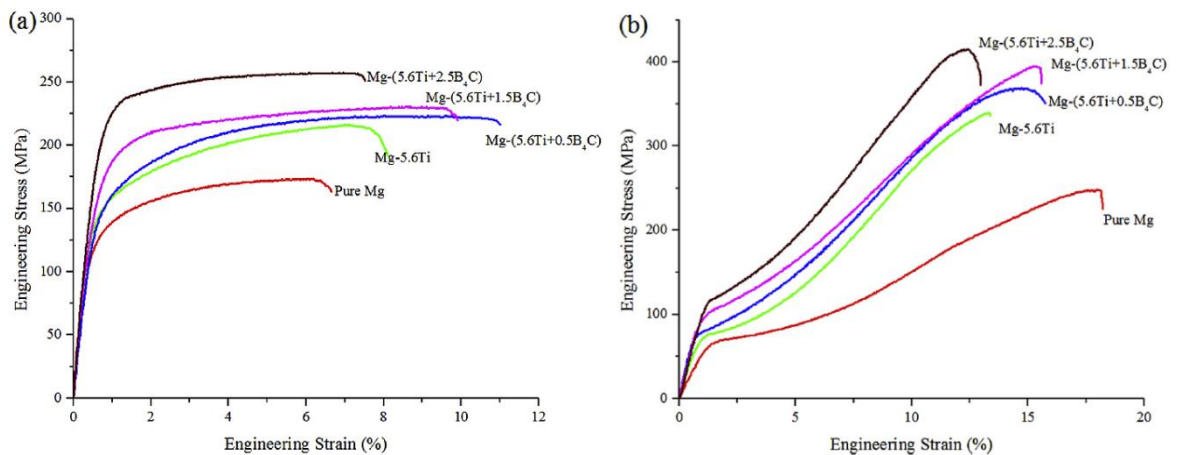
Tab. 3.1: Typy zpevňujících částic pro hořčíkové slitiny a jejich vlastnosti [5]

Vlákna	Hustota [.10 ³ kg/m ³]	Pevnost R _m [MPa]	E modul [MPa]	Průměr resp. Velikost [μm]	Výrobce
Vlákna C					
Sigrafil C	1,8	3200	210	7	Sigri Great Lakes Carbon
P-55	2	1900	380	cca 10	Union Carbide
P-75	2	2100	520	cca 10	
P-100	2,15	2200	724	cca 10	
Al ₂ O ₃					
částice vlákna Saffil	3,3	2000	300	3 délka 87	Unifrax
SiC					
částice SiC	3,2	3000	480	15-340	výrobci brusiv
Nicalon SiC vlákna	2,55	2750	200	15	Nippon Carbon
Al ₂ O ₃ · SiO ₂					
Altex: 15%SiO ₂ +85%Al ₂ O ₃	3,3	1800	210	10	Sumimoto
Další částice					
B ₄ C	2,5	6500	480	40-340	
BN	2,25	800			
AlN	3,26				
TiB ₂	4,51				

3.1 Mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitů s hořčíkovou maticí

Pevnost v tahu a tlaku

Byly zkoumány pevnosti v tahu a v tlaku u hořčíku a kompozitů s hořčíkovou maticí. Hořčíková matrice byla v prvním případě vyztužena mikročásticemi Ti, které tvořily 5,6 hm. % materiálu, dále byl kompozit vyztužen nanočásticemi B₄C v množství 0,5, 1,5 a 2,5 hm. %.



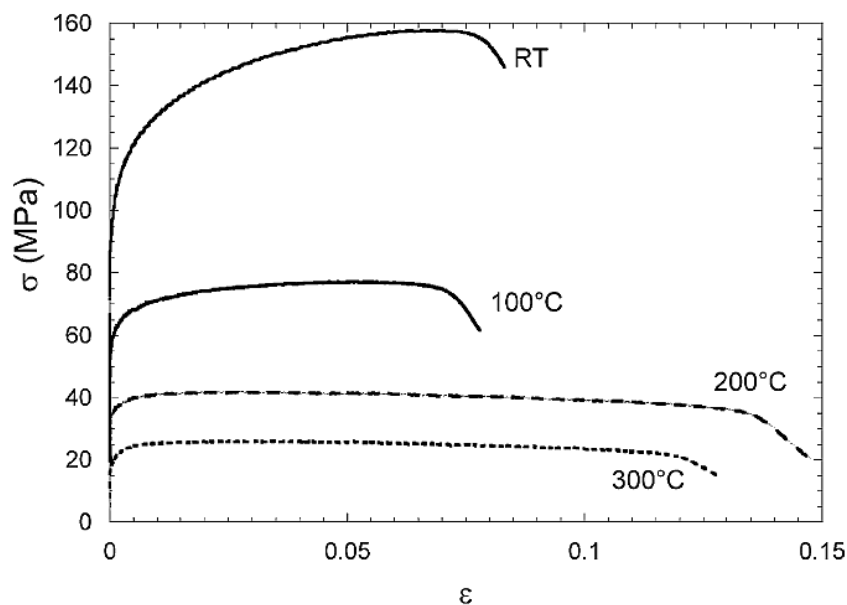
Obr.3.1: a) tahový diagram, b) diagram tlakové zkoušky [19]

Z diagramů (viz. obr. 3.1) je zřejmé, že hybridní kompozity z nanočásticemi B₄C a mikročásticemi Ti vykazují nejlepší kombinaci vlastností, oproti čistému hořčíku mají výrazně vyšší pevnostní vlastnosti při zachované / zvýšené tažnosti. Rostoucím množstvím B₄C mělo za následek zjemnění zrna, což vedlo také k vyšším hodnotám mikrotvrdomi. [19]

Pevnost v tahu za zvýšených teplot

Kompozit s hořčíkovou maticí vyztužený částicemi Ti byl vyroben práškovou metodou a následnou extruzí. Tento materiál byl podroben tahovým zkouškám při různých teplotách (20, 100, 200 a 300 °C).

Kompozit vykazoval relativně vysoké hodnoty přesnosti a tažnosti ve srovnání s některými hořčíkovými kompozity vyztuženými keramickou složkou. Při teplotách nad 100°C však přestává zpevňovat a jeho pevnost výrazně klesá (viz obr. 3.2) [21]



Obr. 3.2: Tahový diagram kompozitu při různých teplotách [21]

Pevnost v tahu a lomová houževnatost

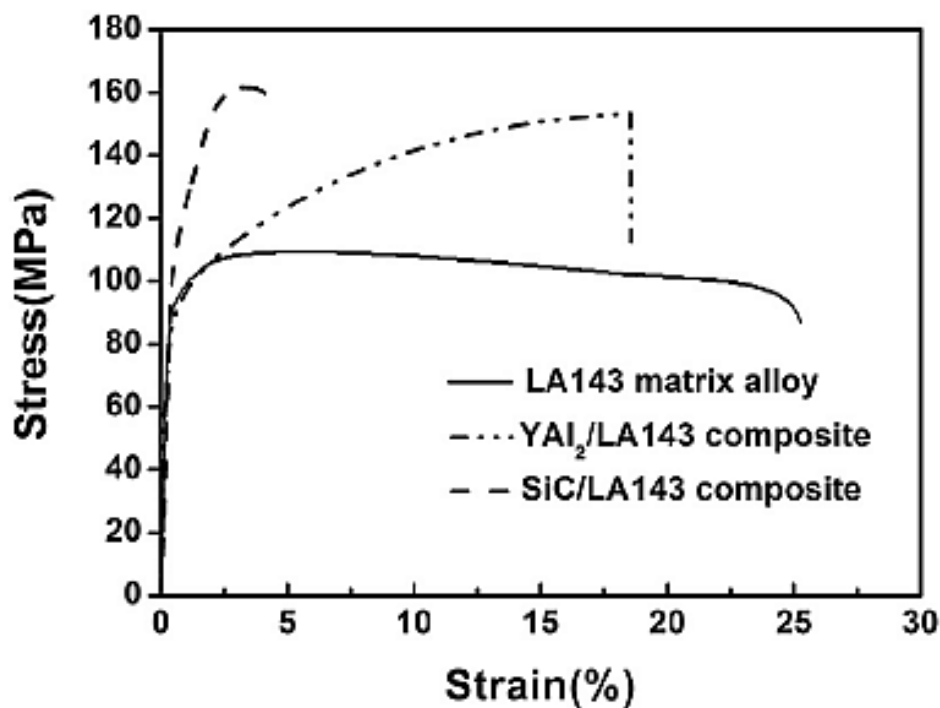
Byly prováděny zkoušky lomové houževnatosti a pevnosti v tahu na hořčíkové slitině LA143 (Mg-14Li-3Al) a na kompozitech s matricí LA143 kde byla v prvním případě výztuž v podobě 10 obj. % SiC, druhý kompozit byl vyztužen 10 obj.% částic YAl₂.

Z tabulky 3.2 je zřejmé, že vyztužující částice SiC i YAl₂ značně snižují lomovou houževnatost slitiny. Stejně je tomu také u tažnosti, kterou ale částice SiC snižují výrazně více než částice YAl₂. Naopak pevnostní vlastnosti jsou nejvyšší u kompozitu s SiC (viz obr. 3.3), ale tyto změny už nejsou tak výrazné.

Tab. 3.2: Vybrané mechanické vlastnosti zkoumané slitiny a kompozitů [20]

Materials	σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	ϵ (%)	K_{IC} (MPa m ^{1/2})
Mg-14Li-3Al (LA143)	122	94	26	32.7
10 vol%YAl ₂ p/LA143	153	97	18.6	15.6
10 vol%SiC _p /LA143	161	102	4	12.8

Vyšší lomová houževnatost a výrazně lepší tažnost kompozitu s částicemi YAl₂ je daná lepší smáčivostí a fyzikální kompatibilitou těchto částic se samotnou matricí, než je tomu u částic SiC.[20]



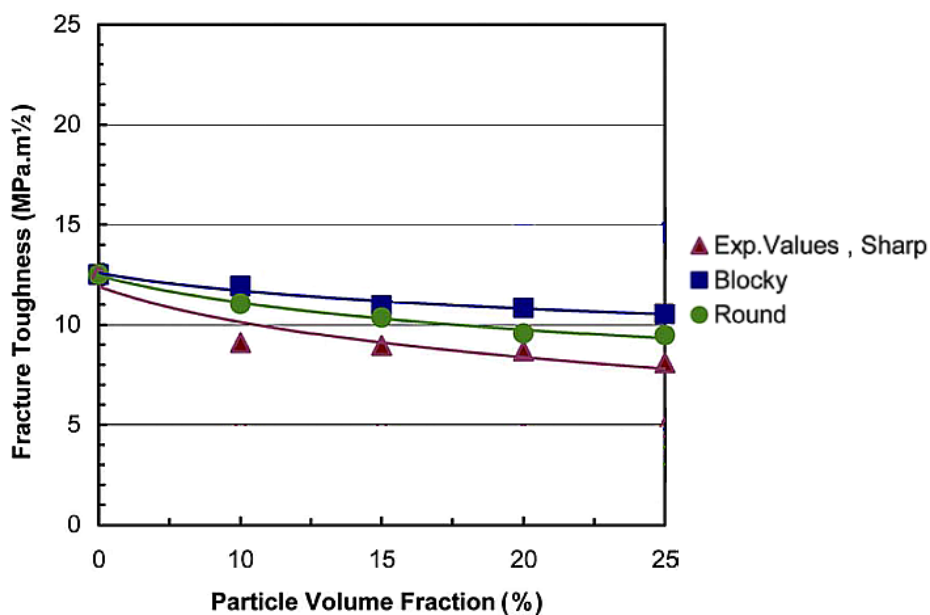
Obr. 3.3: Tahový diagram slitiny LA143 a kompozitů z této slitiny [20]

Lomová houževnatost

Slitina QE22 (2,5 hm% Ag, 2 hm% RE) byla vyztužena částicemi SiC různých tvarů (ostré, hranaté, kulaté). Slitina i kompozity byly připraveny práškovou metodou a následnou extruzí. Slitina byla vyztužena částicemi SiC o průměrné velikosti 9 μm , objemový podíl částic byl 10, 15, 20 a 25 %.

Výsledky měření vzorků jsou znázorněny v grafu na obr. 3. 4. a je z něj vidět, že částice SiC s rostoucím množstvím hodnoty lomové houževnatosti kompozitu snižují, ať už mají jakýkoliv tvar.

Hodnoty lomové houževnatosti s množstvím částic klesají z několika důvodů, jedním z nich je křehkost samotných částic SiC a to, že s jejich rostoucím množstvím klesá vzdálenost mezi jednotlivými částicemi, což má za následek omezení plastických deformací. Nízké hodnoty lomové houževnatosti jsou také dány samotnou technologií výroby, kdy vznikají v kompozitu zbytková napětí, zapříčiněna rychlým vytlačováním. Jak je z grafu zřejmé, nepravidelný tvar ostrých částic zvyšuje křehkost více než ostatní tvary, což vypovídá o tom, že koncentrace napětí hraje důležitou roli v iniciaci trhliny. [17]

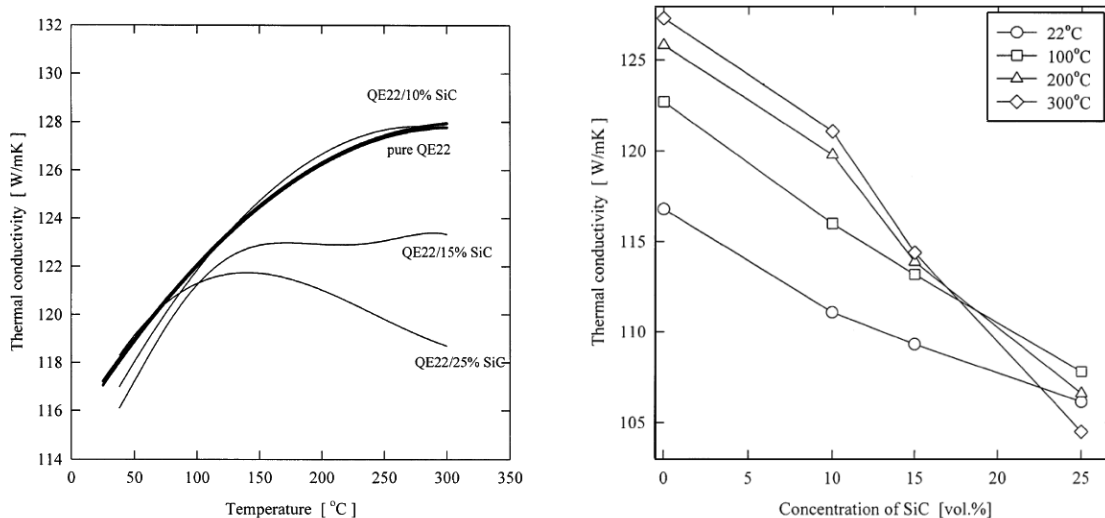


Obr. 3.4: Závislost lomové houževnatosti na množství a tvaru vyztužujících částic SiC [17]

Tepelná vodivost

Byla zkoumána tepelná vodivost slitiny QE22 a kompozitů s matricí této slitiny vyztužené 10, 15 a 25 obj. % částic SiC. Tepelná vodivost byla měřena za pokojové teploty a dále za zvýšených teplot 100, 200, 300 °C.

Graf na obr. 3.5 a) znázorňuje závislost tepelné vodivosti na obsahu částic SiC pro 4 různé teploty. Z grafu je zřejmé že tepelná vodivost slitiny QE22 a kompozitu QE22 + 10 obj. % SiC je závislá na teplotě a s rostoucí teplotou stoupá. S množstvím částic SiC v kompozitu se rozdíly vodivosti při rozdílných teplotách snižují a u kompozitu s 25 obj. % SiC je dokonce patrný pokles tepelné vodivosti při zvyšující se teplotě, tuto skutečnost lépe zachycuje obr. 3.5 b). Tyto rozdíly v chování kompozitu byly pravděpodobně způsobeny špatným tepelným přechodem přes rozhraní matrice-výztuž [18].



Obr. 3.5: a) Závislost tepelné vodivosti na objemovém množství vyztužných částic SiC pro slitinu QE22 pro různé teploty, b) Závislost tepelné vodivosti na teplotě pro hořčikovou slitinu QE22 a kompozity na bázi slitiny QE22 [18]

4 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je zjistit a porovnat mechanické vlastnosti hořčíkové slitiny QE22 a téže slitiny vyztužené vlákny Saffil a částicemi SiC. Na vzorcích budou provedeny statické zkoušky tahem a statické zkoušky tlakem, z výsledků zkoušek pak bude určena míra synergie výsledného kompozitu.

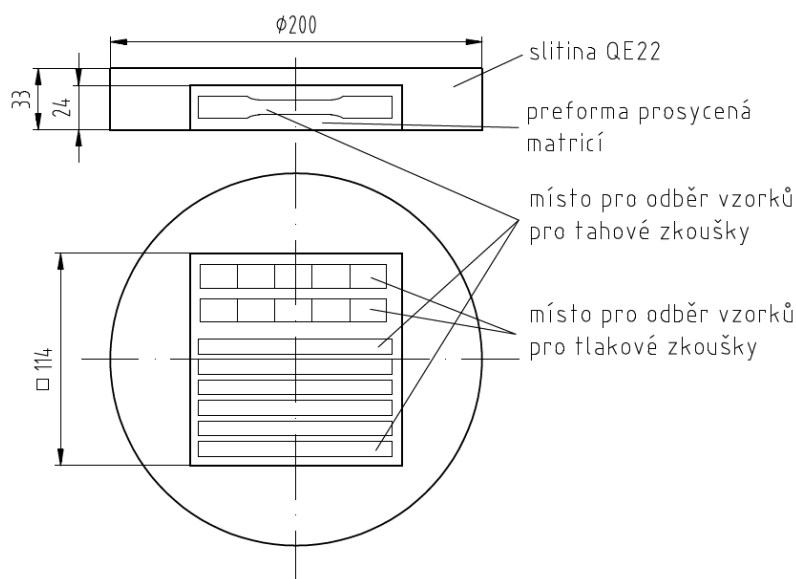
Jednotlivé cíle práce:

1. Stanovení základních strukturních parametrů matrice, vyztužných částic a kompozitu.
2. Pomocí tahových experimentů určení základních mechanických charakteristik hořčíkové matrice a výsledného kompozitu.
3. Určení míry synergie výsledného kompozitu s nalezením vhodného matematického modelu popisujícího napětově-deformační chování kompozitu na základě parametrů složek, uspořádání a objemového složení.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Experimentální materiál

Výroba experimentálního materiálu byla provedena metodou infiltrace částic ve tvaru preformy roztavenou matricí za vysokého tlaku. Matricí tohoto kompozitu tvoří slitina QE22, vyztužená byla 5 obj. % vláken Saffil a 15 obj. % částic SiC. Umístění preformy ve formě a místa odběru vzorků jsou zřejmé z obr. 5.1. Lití materiálu metodou squeeze casting probíhalo pod tlakem 80/150 MPa.



Obr. 5.1: Schéma experimentálního materiálu a místa odběru vzorků

5.2 Experimentální metody

5.2.1 Světelná mikroskopie

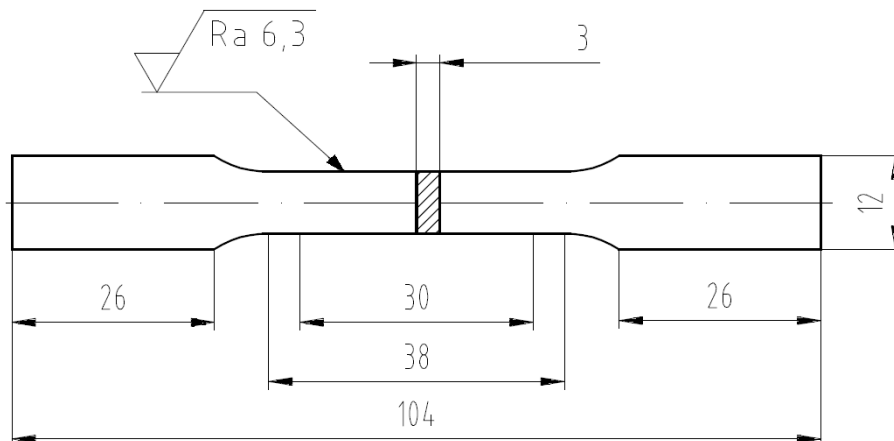
Vzorky pro světelnou mikroskopii byly připraveny standardním postupem, tj. broušeny na bruskách PEDEMIN na brusných papírech zrnitosti 400, 1200, 4000 po dobu 3 minuty a byly chlazeny vodou. Poté se provádělo leštění diamantovými pastami, 3 μm po dobu 5 min, 1 μm po dobu 1 min a $\frac{1}{4}$ μm po dobu 2 min. Nakonec byly vzorky naleptány 2% Nitalem. Fotodokumentace byla provedena na světelném mikroskopu Olympus GX71 vybaveným digitální kamerou Olympus DP11.

5.2.2 Statická zkouška tahem

Výstupem tahové zkoušky je tahový diagram (závislost smluvního napětí na poměrné deformaci). Zkouška tahem slouží pro určení základních mechanických charakteristik, jako: modul pružnosti E , mez pevnosti R_m , mez kluzu R_e , tažnost A nebo kontrakce Z .

Pro zkoušku tahem byly připraveny ploché zkušební tyče - 2 vzorky slitiny QE22 (matrice) a 2 vzorky kompozitu (viz. obr. 5.2). Vzorky č. 1 a č. 2 byly připraveny ze slitiny, vzorky č. 3 a č. 4 z kompozitu. Zkoušky probíhaly na počítačem řízeném zkušebním zařízení ZWICK Z020, síla byla měřena pomocí siloměrné hlavy s nominální kapacitou 20 kN. Deformace na měřené délce vzorku $L_0 = 30$ mm byla snímána pomocí citlivého axiálního extenzometru Multisens. Zkoušky byly řízeny a vyhodnoceny

softwarem TestXpert II v souladu s normami ČSN EN ISO 6892-1 a DIN 50 125. Zkoušky probíhaly při pokojové teplotě za podmínek konstantního nárůstu celkové deformace $\dot{\epsilon} = 0,00025$ /s.



Obr. 5.2: Výkres zkušební tělesa pro zkoušku tahem

5.2.3 Statická zkouška tlakem

Jde o jednoosé zatěžování zkušební tělesa, kde má síla oproti zkoušce tahem opačný smysl. Pro tuto zkoušku je možné používat více tvarů vzorku, podle toho, jaké mechanické charakteristiky je třeba ze zkoušky stanovit, či jak bude materiál zatěžován v provozu.

V rámci této práce bylo jako vzorek použito válcové těleso o průměru $d = 8\text{mm}$ a výšce $L_0 = 12\text{mm}$ (viz obr. 5.3), tedy s poměrem $L/d = 1,5$. Zkoušky byly prováděny na servohydraulickém testovacím stroji Instron 8801, síla byla měřena pomocí siloměrné hlavy s kapacitou 100 kN. Deformace byly snímány citlivým Clip-on extenzometrem na měřené délce $L_0 = 12\text{mm}$. Zkoušky byly řízeny a vyhodnoceny pomocí softwaru Bluehill II a podmínky zatěžování byly totožné se zkouškou tahem a v souladu s normou ASTM E9-89.

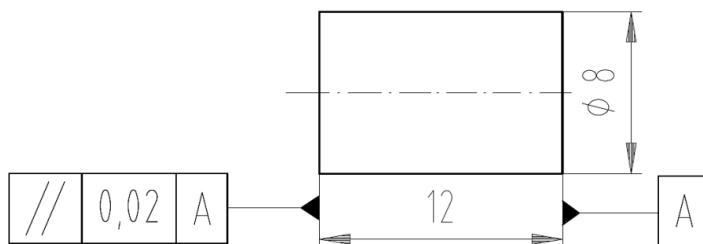
Zkouška tlakem slouží pro určení těchto mechanických vlastností:

Mez kluzu: $\sigma_y = \frac{F_{p\,0,2}}{S_0}$ [MPa]

Deformace: $\epsilon_B = \frac{L_0 - L_u}{L_0} \cdot 100$ [%]

Mez pevnosti: $\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S_0}$ [MPa]

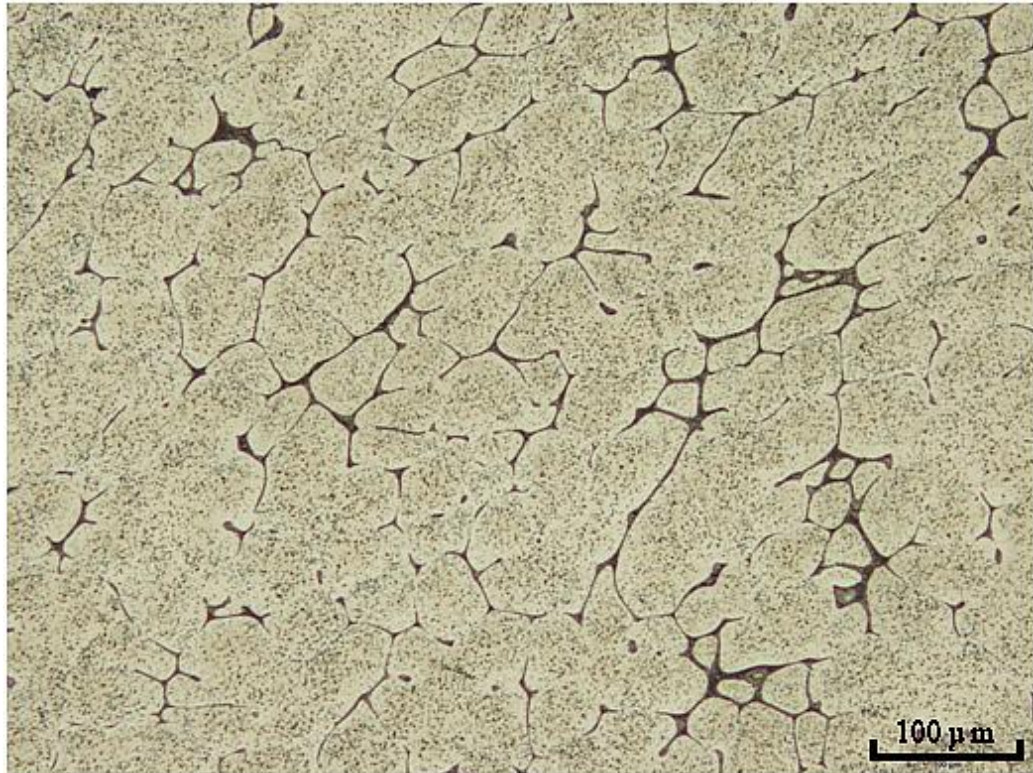
Příčné rozšíření: $\psi = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100$ [%]



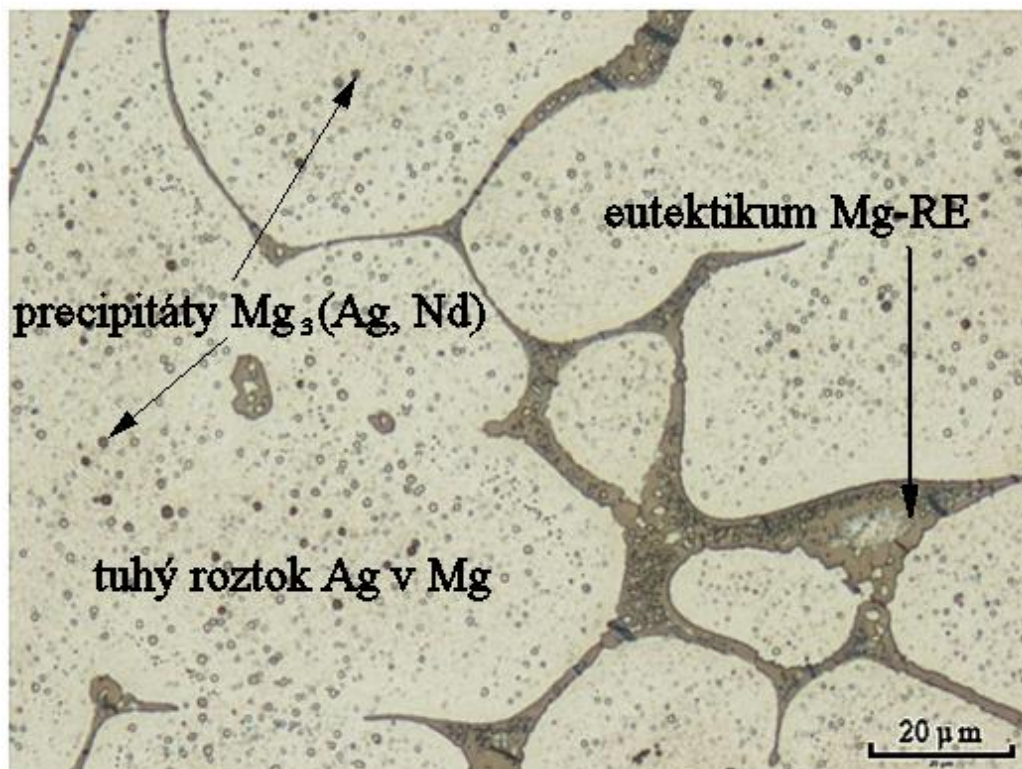
Obr. 5.3: Výkres zkušební tělesa pro statickou zkoušku tlakem.

6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK A DISKUZE

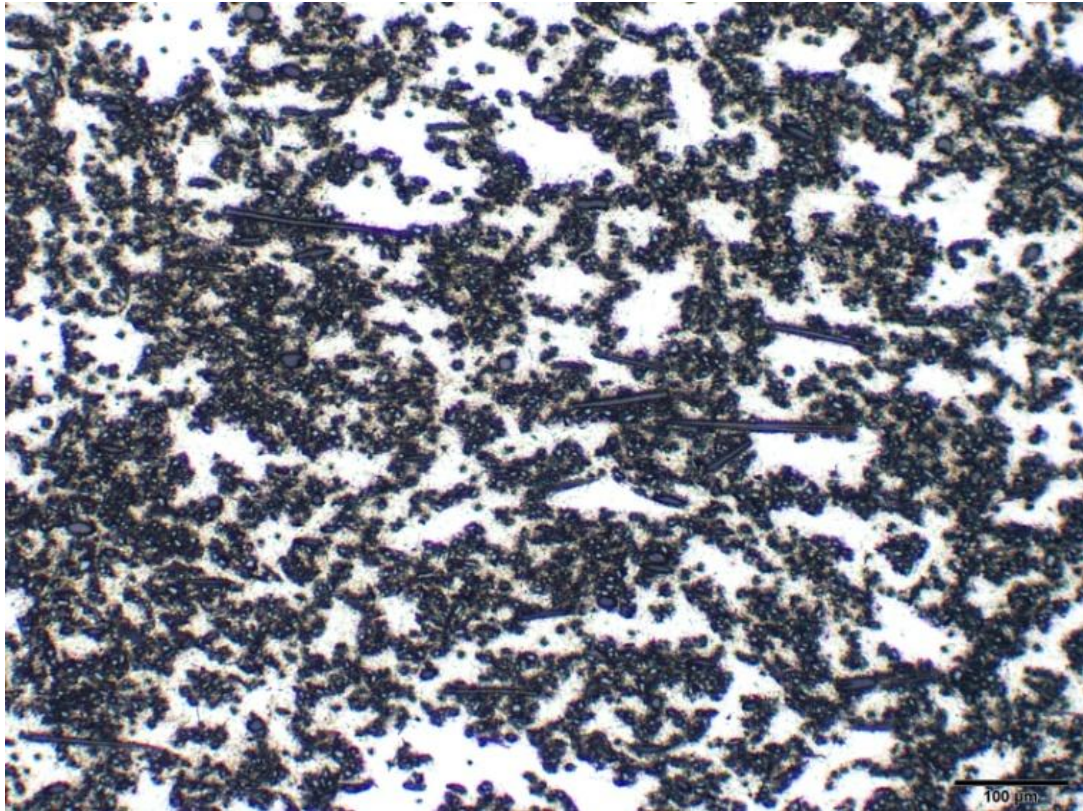
6.1 Metalografická analýza



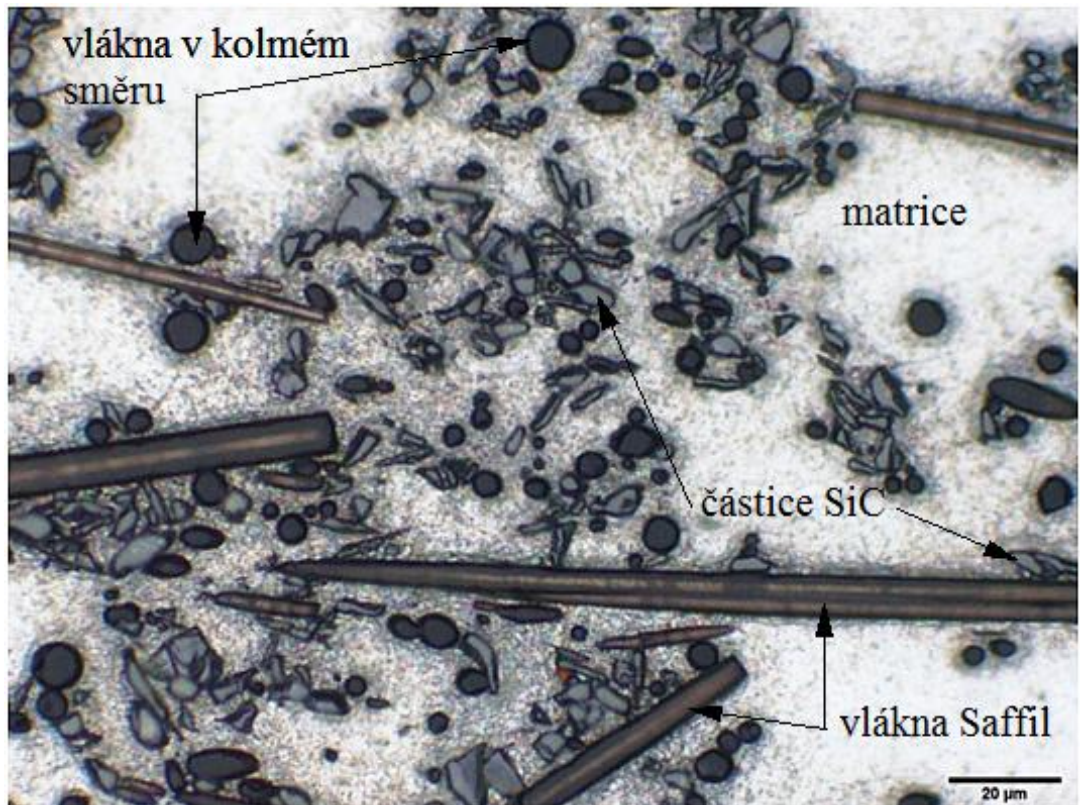
Obr. 6.1: Mikrostruktura slitiny QE22 při zvětšení 100x



Obr. 6.2: Mikrostruktura slitiny s popisem fází, zvětšení 500x



Obr. 6.3: Struktura kompozitu s částicemi SiC a vlákny Saffil při zvětšení 100x



Obr. 6.4: Struktura kompozitu při zvětšení 500x s popisem jednotlivých složek

Ze snímku mikrostruktury QE22 se zvětšením 100x (obr. 6.1), je zřejmé, že střední velikost eutektických buněk je asi 50 μm . Dle prací [3, 21] je mikrostruktura slitiny QE22 tvořena tuhým roztokem stříbra v hořčíku a masivními fázemi Mg_4RE na hranicích zrn tuhého roztoku. Jak je patrné z obr. 6.2, v tuhém roztoku jsou vyloučeny také jemné precipitáty na bázi Ag a RE a malé částice MgO , což bylo zjištěno v práci [21].

Na obrázcích č. 6.3 a č. 6.4 je zobrazena mikrostruktura zkoumaného kompozitu. Rozložení částic na obr. 6.3 je typické pro kompozity vyrobené infiltrací částic ve tvaru preformy roztavenou maticí. Preforma byla vyrobena z vláken Saffil a z částic SiC , které byly relativně rovnoměrně rozmístěny mezi vlákna, jenž tvořily kostru celé preformy a zajišťovaly tak její tvar. Z obrázků je také zřejmé, že vlákna byla až na malé výjimky orientována ve dvou na sebe kolmých směrech a jejich rozměry odpovídají údajům výrobce. Na obr. 6.4 je detail oblasti, ve které je jasně vidět podélný řez několika vláken a jejich orientace, tmavší kruhové útvary jsou zase příčné řezy vláken. V okolí vláken jsou uskupení částic velmi tvrdého karbidu křemíku. Tyto částice nemají jednotný tvar, jsou zde jak částice pravidelné, tak i ostré a jejich rozměry se pohybují mezi 2-10 μm . Na obrázku nejsou vidět žádné póry či řediny, takže infiltrace částic maticí byla úplná, což je dáno metodou přípravy Squeeze casting. Vlákna tvořila 5 obj. % a částice SiC 15 obj. % kompozitu, což bylo určeno pomocí hydrostatického vážení a obrazové analýzy [22].

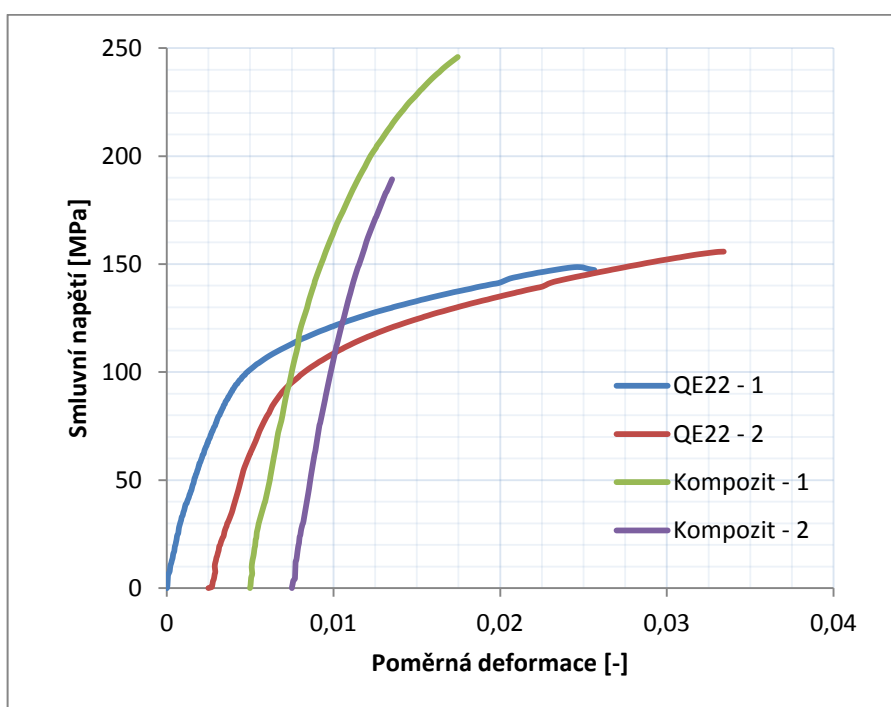
6.2 Zkouška tahem

Tvar tahových diagramů (viz. obr. 6.5) matrice QE22 je typický pro materiály připravené metodou Squeeze casting. Vlivem licí struktury s předpokládanou nízkou hustotou dislokací, vykazují nízkou mez kluzu, výraznější zpevnění v elasticko - plastické oblasti a nízkou plasticitu, což je v souladu s prací [23]. Z výsledků tahových zkoušek v tab. 6. 1. je vidět, že vzorky kompozitu vykazovaly podobný průběh napětí, až do 188 MPa kdy došlo k lomu u vzorku 2. Rozdíl v mezi pevnosti mezi vzorky č. 1 a č. 2 je téměř 60 MPa, což ukazuje na vyšší rozptyl daný metodou přípravy kompozitu. Pro objektivnější závěry, by bylo potřeba provést více měření. Nízký počet vzorků byl dán malým množstvím experimentálního materiálu a také velmi obtížnou přípravou zk. těles z důvodu vysoké abrazivity kompozitu.

Tab. 6.1: Výsledky statické zkoušky tahem

	a_0 [mm]	b_0 [mm]	L_0 [mm]	E modul [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
QE22 - 1	3,02	7,95	30,04	36 078	100,54	148,68	2,14
QE22 - 2	3	8,02	30	36 102	99,52	150,97	2,56
Kompozit - 1	3,05	7,97	30,06	58 122	174,03	245,92	0,74
Kompozit - 2	3,04	7,98	30,08	59 410	185,49	188,12	0,21

V práci [20] byla slitina LA143 vyztužena 10 obj. % částic SiC . Kompozit vykazoval nárůst pevnosti asi o 30% a zároveň pokles tažnosti na 15% hodnoty čisté slitiny. V této práci se vyztužením slitiny dosáhlo nárůstu pevnosti o 65%, a poklesu tažnosti na pětinu, což je dáno vyšším objemovým podílem částic SiC a navíc přidavkem vláken Saffil. Dá se tedy konstatovat, že vyztužením slitiny QE22 částicemi SiC se s množstvím částic pevnost zvyšuje, za současného prudkého poklesu plastických vlastností a že tento účinek mají částice SiC i na jiné hořčíkové slitiny.



Obr. 6.5: Tahové diagramy matrice a kompozitu

6.3 Zkouška tlakem

Šest vzorků bylo podrobena tlakovým zkouškám, z výsledků v tab. 6.2 a z grafu na obr. 6.6 vyplývá strmý nárůst pevnosti kompozitu ve srovnání s matricí. Mez kluzu kompozitu se více než zdvojnásobila a mez pevnosti se zvýšila asi o 120 MPa, na druhou stranu tažnost kompozitu se snížila cca na třetinu. Velikosti modulu pružnosti pak dosahovaly podobného trendu nárůstu. Podle výsledků tlakových zkoušek se modul pružnosti kompozitu oproti samotné matrici zvýšil 1,6 x, u tahových zkoušek byl nárůst E modulu obdobný.

Tab. 6.2: Výsledky statické zkoušky tlakem

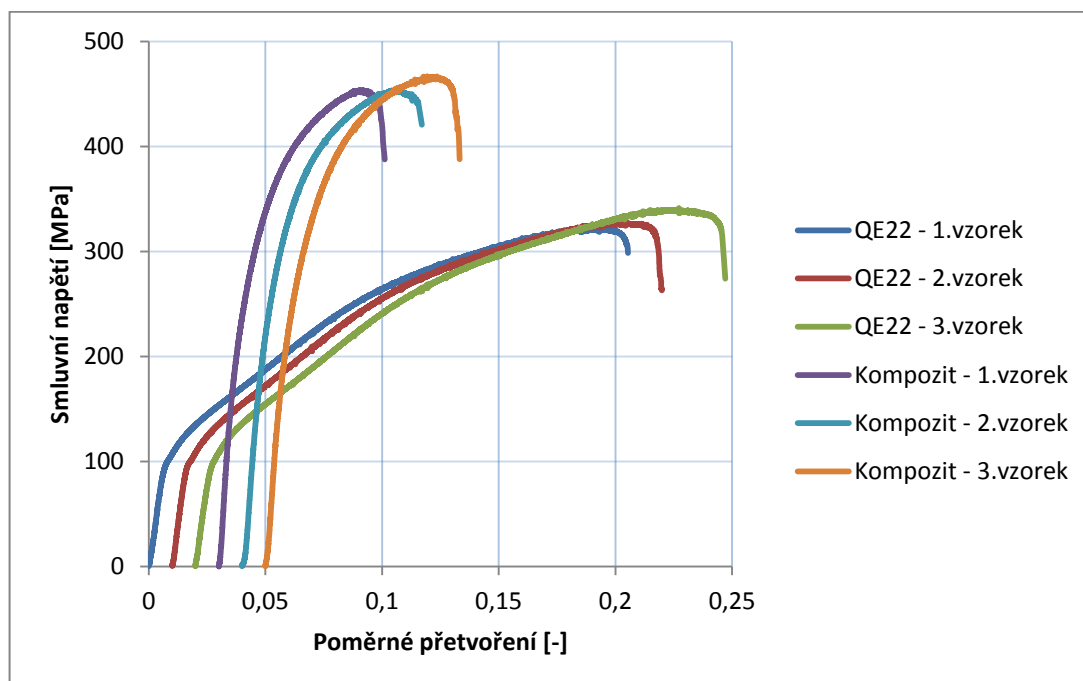
Jmenovka vzorku	S_0 [mm]	S_u [mm]	L_0 [mm]	L_u [mm]	Modul E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_B (%)
QE22-1	50,27	63,48	12	9,57	35,85	103	324	18,6
QE22-2	50,27	65,04	11,98	9,47	37,02	101	328	19,4
QE22-3	50,14	65,90	12,01	9,29	36,5	103	341	20,4
Kompozit-1	50,39	54,11	12,01	11,25	59,38	213	454	5,6
Kompozit-2	50,14	55,15	12	11,29	58,01	236	454	5,7
Kompozit-3	50,14	54,76	12	11,07	58,65	227	466	6,6

S_0 – původní průřez vzorku

S_u – konečný průřez vzorku

L_0 – počáteční délka vzorku

L_u – konečná délka vzorku



Obr. 6.6: Zkouška tlakem - srovnání jednotlivých vzorků

V tabulce 6.3 je statistika počátečních a konečných rozměrů vzorků a jejich mechanických vlastností. V práci [15], kde byly prováděny tlakové zkoušky na slitině QE22 při různých teplotách, se měřená mez pevnosti při pokojové teplotě pohybovala 320-330 MPa a poměrné přetvoření bylo asi 22%, hodnoty naměřené v této práci jsou tedy srovnatelné. Jak je patrné z tlakových křivek matrice, po odklonu z elastické oblasti do oblasti elasticko - plastických deformací, vykazují tyto oblasti křivek mírný konvexní průběh (concave-upward), což je způsobeno tvorbou tzv. tahových dvojčát v rovinách $\{10\bar{1}2\}$ [24].

Podobné chování bylo zaznamenáno také v práci [19], kde byly zkoušky tlakem prováděny na hořčíku a kompozitech s hořčíkovou maticí. Na obr. 3. 1.b) je konvexní průběh křivek ještě zřetelnější, než v této práci.

Výsledné hodnoty meze pevnosti v tlaku u slitiny AZ91, prezentované v práci [22], jsou nepatrně nižší, než mez pevnosti QE22 v této práci. Po vyztužení 23 obj. % vláken Saffil mez pevnosti v tlaku zvýšila o 40%, což je stejně jako v případě slitiny QE22/15% Sic + 5% Saffil zkoumané v této práci.

Tab. 6.3: Statistika měření pro tlakové zkoušky

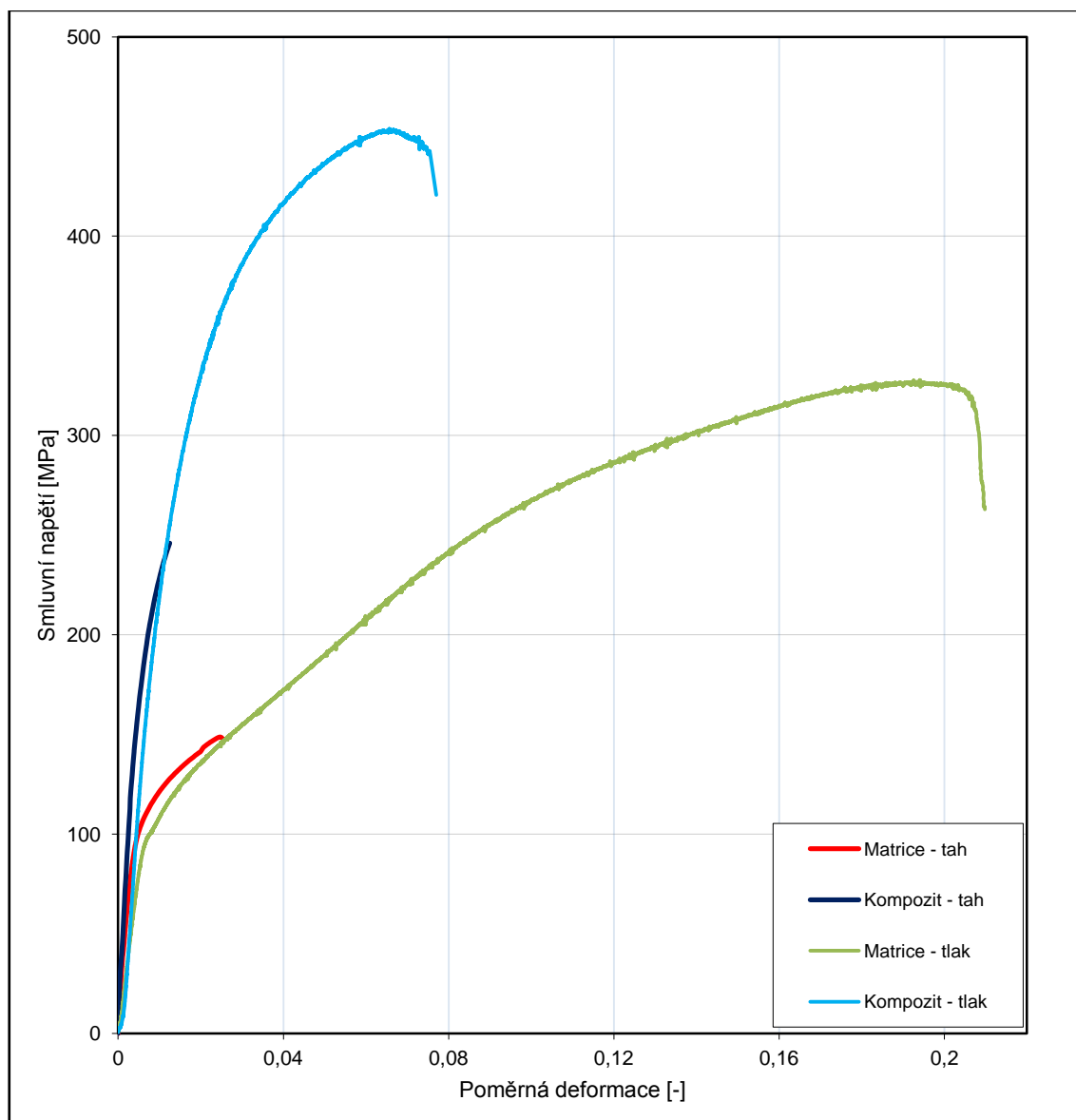
	Průměr (mm)	Výška (mm)	Konečný průměr (mm)	Konečná výška (mm)	Modul E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ_B (%)
Statistika měření matrice QE								
\bar{x}	8	12	9,08	9,44	36,46	102	331	19,5
\tilde{x}	8	12	9,1	9,47	36,5	103	328	19,4
s	0,00436	0,0153	0,0873	0,14279	1,0225	1,1855	9,1316	0,93349
Statistika měření kompozit QE+Saffil+SiC								
\bar{x}	8	12	8,34	11,2	58,68	226	458	5,9
\tilde{x}	7,99	12	8,35	11,25	58,65	227	454	5,7
s	0,01155	0,0058	0,04041	0,11719	1,1591	11,572	7,3402	0,55569

\bar{x} - aritmetický průměr

\tilde{x} - medián

s - standardní odchylka

V grafu na obr. 6.7 jsou porovnány vybrané tahové a tlakové křivky slitiny a kompozitu. Je zde patrný vliv vyztužujících složek na mechanickou odezvu kompozitu, tedy nárůst modulu pružnosti, meze kluzu a meze pevnosti jak v tahu, tak i v tlaku.



Obr. 6.7: Srovnání deformačních křivek kompozitu a matice v tahu a v tlaku

Tab. 6.4 Srovnání mechanických vlastností vybraných vzorků

	TAH				TLAK				
	E [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	E [MPa]	σ _y [MPa]	σ _{max} [MPa]	ε _B [%]	ψ[%]
QE22	36 623	101	149	2,14	36 623	101	328	21	14
Kompozit	58 887	174	246	0,74	58 887	236	454	6	5

Vyšší hodnoty pevnosti v tlaku než u tahu, pro matrici i kompozit byly prezentovány také v práci [19], kde podobné chování vykazovaly kompozity s matricí z čistého hořčíku. Toto chování je zcela typické pro čistý hořčík, jeho slitiny i kompozitní materiály, v odborné literatuře zaveden pojem „tension – compression asymmetry” [24].

6.4 Ověření matematických modelů reálného kompozitu

Úvod do problematiky matematického popisu kompozitu

Existuje více přístupů k popisu vlivu zpevňujících částic na výsledné mechanické vlastnosti kompozitů. Jeden z možných přístupů je založen na principu přenosu napětí z matrice na vlákna, který je možno vyjádřit pomocí modelu „shear lag“. Dalšími významnými příspěvky k zpevnění kompozitu jsou zvýšená hustota dislokací z důvodu rozdílných koeficientů tepelné roztažnosti a rozdílná velikost zrn popřípadě eutektických buněk slitiny a kompozitu založeným na bázi této slitiny [22].

Z důvodu dvojího typu výztužných částic a komplikovaného fyzikálního popisu příspěvků zpevnění byl v této práci zvolen klasický přístup pro výpočet míry zpevnění kompozitu.

Matematický model pro výpočet modulu pružnosti

Zkoumaný kompozit je vyztužen jak krátkými, náhodně orientovanými vlákny, tak i částicemi, je tedy nutné výpočet rozdělit do dvou kroků. Prvním krokem je výpočet podélného a příčného modulu pružnosti pro usměrněný krátkovláknový kompozit. Modul pružnosti matrice E_m se určí z výsledků tahových zkoušek, z tabulky 6.5 se získá modul pružnosti vlákna Saffil E_f a jeho rozměry L a d .

Tab. 6.5: Vlastnosti vyztužujících složek kompozitu [5]

	E[GPa]	R _m [MPa]	průměr (délka)[μm]	ρ [kg/m ³]
částice SiC	480	3000	3	3300
vlákna Saffil	300	2000	3 (87)	3200

Pro podélný modul pružnosti platí:

$$E_L = E_m \cdot \frac{1 + \frac{2L}{d} \cdot \eta_L \cdot v_f}{1 - \eta_L \cdot v_f} \quad kde \quad \eta_L = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \frac{2L}{d}}$$

$$\eta_L = \frac{\frac{300000}{36623} - 1}{\frac{300000}{36623} + \frac{2 \cdot 87}{3}} = 0,101865$$

$$E_L = 36623 \cdot \frac{1 + \frac{2 \cdot 87}{3} \cdot 0,101865 \cdot 0,05}{1 - 0,101865 \cdot 0,05} = 48\,409 \text{ MPa}$$

Pro příčný modul pružnosti platí:

$$E_T = E_m \cdot \frac{1 + 2 \cdot \eta_T \cdot v_f}{1 - \eta_T \cdot v_f} \quad \text{kde} \quad \eta_T = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2}$$

$$\eta_L = \frac{\frac{300000}{36623} - 1}{\frac{300000}{36623} + 2} = 0,70564$$

$$E_T = 36623 \cdot \frac{1 + 2 \cdot 0,70564 \cdot 0,05}{1 - 0,70564 \cdot 0,05} = \mathbf{40\ 641\ MPa}$$

Pro odhad E modulu kompozitu s náhodně orientovanými vlákny, lze použít vztah:

$$E = \frac{3}{8}E_L + \frac{5}{8}E_T$$

$$E = \frac{3}{8} \cdot 48\ 409 + \frac{5}{8} \cdot 40\ 641$$

$$E = \mathbf{43\ 554\ MPa}$$

Vypočítaná hodnota modulu pružnosti E platí pro slitinu QE22 vyztuženou pouze 5 obj. % vláken Saffil. Pro další výpočet lze považovat tento kompozit s vlákny jako matici, která se dále vyztuží částicemi SiC, jejichž parametry jsou v tab. 6.5.

Pro výpočet modulu pružnosti částicového kompozitu lze použít Kernerův model:

$$E = E_m \frac{1 + ABv_c}{1 - Bv_c} \quad \text{kde} \quad A = \frac{7 - 5v_c}{8 - 10v_c} \quad \text{a} \quad B = \frac{E_c - E_m}{E_c + AE_m}$$

$$A = \frac{7 - 5 \cdot 0,15}{8 - 10 \cdot 0,15} = 0,96154$$

$$B = \frac{480000 - 43554}{480000 + 0,96154 \cdot 43554} = 0,8363$$

$$E = 43554 \cdot \frac{1 + 0,96154 \cdot 0,8363 \cdot 0,15}{1 - 0,8363 \cdot 0,15}$$

$$\mathbf{E = 55\ 808\ MPa}$$

Výsledný modul pružnosti kompozitu s vlákny i částicemi je tedy dle výpočtového modelu 55,81 GPa a modul pružnosti zjištěný z tahových zkoušek je 58,89 GPa. Na základě těchto výsledků, i při dvojitým typu vyztužujících částic, panuje dobrá shoda mezi výsledky experimentu a matematickým modelem.

Matematický model pro výpočet meze kluzu kompozitu

Pro výpočet přibližné meze kluzu v tahu kompozitního materiálu, je možno pracovat se zjednodušeným modelem a počítat pouze s vyztužením částicemi karbidu křemíku, jakožto hlavní zpevňující složkou. Kompozit je vyztužen 15 obj. % částic SiC nepravidelného tvaru, jejichž střední délka je $L = 3 \mu\text{m}$ a šířka $t = 3 \mu\text{m}$. Nárůst meze kluzu lze vypočítat:

$$\Delta\sigma_{LT} = \sigma_y \left(\frac{(L + t) \cdot L}{4 \cdot L \cdot t} \right) \cdot v_f + \sigma_y \cdot (1 - v_f)$$
$$\Delta\sigma_{LT} = 100 \left(\frac{(3 + 3) \cdot 3}{4 \cdot 3 \cdot 3} \right) \cdot 0,15 + 100 \cdot (1 - 0,15)$$
$$\Delta\sigma_{LT} = \mathbf{92,5 \text{ MPa}}$$
$$\sigma_{yC} = \sigma_y + \Delta\sigma_{LT} = 100 + 92,5 = \mathbf{192,5 \text{ MPa}}$$

Hodnota meze kluzu v tahu u matrice byla 100 MPa, u kompozitu došlo ke zvýšení meze kluzu na 180 MPa a podle výpočtového modelu je hodnota meze kluzu 193 MPa. Na základě srovnání teoretických a naměřených hodnot, je tento model relativně přesný a pro predikci hodnoty meze kluzu použitelný.

Matematický model pro výpočet pevnosti kompozitu

Výpočty pevnosti kompozitu vyztuženého částicemi i vlákny jsou velmi složité, z tohoto důvodu lze pro hrubý odhad pevnosti počítat pouze s vyztužujícím účinkem částic z SiC, kterých je v kompozitu výrazně více a jejich pevnost je vyšší, než je tomu u vláken Saffil.

$$R_{mc} = \frac{R_{mf} \cdot v_f}{2} + R_{mm} \cdot v_m$$
$$R_{mc} = \frac{3000 \cdot 0,15}{2} + 150 \cdot 0,85 = \mathbf{353 \text{ MPa}}$$

Rozdíl mezi naměřenou pevností a pevností vypočtenou pomocí matematického kompozitního modelu je asi 100 MPa. Nižší naměřené hodnoty jsou dány nerovnoměrným uspořádáním částic, nedokonalou adhezí a neúplným prostoupením matrice mezi všechny částice vyztužující fáze.

7 ZÁVĚR

Na základě hodnocení struktury, mechanických vlastností v tahu a v tlaku matrice a kompozitu tvořeného hořčíkovou slitinou QE22 + zpevňující částice a predikce pomocí výpočtových modelů, můžeme stanovit tyto závěry:

1. Struktura slitiny QE22 je tvořena tuhým roztokem Ag v Mg, masivními fázemi Mg_4RE na hranicích zrn tuhého roztoku a malými precipitáty na bázi Ag a Mg v tuhém roztoku.
2. Struktura výsledného kompozitu je tvořena maticí QE22, vlákny Saffil, které tvoří skelet celého kompozitu a částicemi tvrdého SiC, které jsou umístěny ve skupinách v blízkosti vláken. Infiltrace maticí byla díky metodě přípravy kompozitu rovnoměrná bez patrných defektů.
3. Chování hořčíkové slitiny QE22 při tahovém zatěžování souvisí s množstvím legur, mírou zpevnění tuhého roztoku a metodou přípravy polotovaru a je typická: nízkou mezí kluzu, výraznější zpevnění v elasticko - plastické oblasti a nízkou plasticitou.
4. Modul pružnosti v tahu, smluvní mez kluzu a mez pevnosti vykazují výrazný nárůst u kompozitu oproti matici za současného snížení tažnosti. Bylo dosaženo zvýšení modulu pružnosti o více než 60%.
5. Mechanická odezva slitiny QE22 i kompozitu v tlaku byla daleko vyšší než v tahu, tj. existuje zde výrazná asymetrie. Rozdíl mezi pevnostmi v tahu a tlaku byl u samotné matrice i u kompozitu obdobný, cca. 100%.
6. Nárůst pevnostních vlastností je doprovázen prudkým poklesem plasticity u kompozitů, asi na jednu třetinu hodnoty dosažené u matrice u obou typů zatěžování.
7. Predikce pevnostních vlastností pomocí matematických modelů vykazovala dobrou shodu s experimentálními výsledky. I při dvojitě vyšším podílu výztužných částic vykazuje predikce modulu pružnosti a meze kluzu kompozitu velmi dobrých výsledků. Mez pevnosti v tahu kompozitu nedosahuje predikovaných hodnot z důvodů přednostního podílu částic SiC a jejich nízké schopnosti přenést vyšší míru zatížení.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VRBKA, J.: *Mechanika kompozitů*. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně, 2008, Brno.
- [2] DRÁPALA, J.; KUCHAR, L.; TOMÁŠEK, K.; TROJANOVÁ, Z. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík – příměs*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 172 s. ISBN 80-248-0579-0.
- [3] AVEDESIAN, M., BAKER, H. *ASM Speciality Handbook – Magnesium and magnesium alloys*. Ohio, USA: ASM International, 1999. 314s. ISBN 0-87170-657-1.
- [4] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] BAREŠ, Richard a Jaroslav NĚMEC. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. 328s.
- [7] Kompozity. *delta.fme.vutbr.cz* [online]. [cit.13.5.2014]. Dostupné z WWW: <http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>
- [8] How is carbon fiber made?. *Zoltec* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.zoltek.com/carbonfiber/how-is-it-made/>
- [9] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*, Brno: CERM, 2002. 392s. ISBN 8072042483.
- [10] CAMPBELL, Edited by F.C. *Lightweight materials understanding the basics*. Materials Park, Ohio: ASM International 2012 ISBN 978-162-1983-743.
- [11] CAMPBELL, F.C. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2006. ISBN 978-0-0804-6235-6.
- [12] POLMEAR, I.J. *Light alloys from traditional alloys to nanocrystals*. 4th ed. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 978-008-0496-108.
- [13] GUPTA ..., Ed. by V.B... *Manufactured fibre technology*. 1. ed. London [u.a.]: Chapman, 1997. ISBN 04-125-4030-4.
- [14] Speciality Applications. *Saffil* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.saffil.com/index/fibre_home/applications.aspx

- [15] TROJANOVÁ, Z., LUKÁČ, P., Compressive deformation behaviour of magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, [cit.2014-5-23], s. 416-421. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605000646>
- [16] ABACHI, P., PURAZRANG, K., Comparison of experimental and analytical fracture toughness values of SiC_p/QE22 Mg-alloy composites. *Materials and Design* [online]. 2006, č.6 [cit. 2014-15-5], s. 520-525. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306904003231>
- [17] RUDAJEVOVÁ, A., LUKÁČ, P., Interfacial effect on the thermal conductivity of QE22 alloy on SiC/QE22 composites. *Materials Science and Engineering* [online]. 2002, č. 1-2 [cit. 2014-15-5], s. 118-121. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509301012928>
- [18] SANKARANARAYANAN, S., SABAT, R. K., JAYALAKSHMI, S., SUWAS, S., GUPTA, M., Microstructural evolution and mechanical properties of Mg composites containing nano-B₄C hybridized micro-Ti particulates. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2014, č. 3 [cit. 2014-5-23], s. 1178-1190. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058413008080>
- [19] ZHANG, Q. Q., WU, G. Q., HUANG, Z., TAO, Y., Effect of particle/matrix interfaces on the mechanical properties for SiC_p od YAl_{2p} reinforced Mg-Li composites. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2014, [2014-5-23], s. 1-6. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838813027345>
- [20] PÉREZ, P., GARCÉS, G., ADEVA, P., Mechanical properties of a Mg – 10(vol%) Ti composite. *Composites Science and Technology* [online]. 2004, č. 1 [cit. 2014-5-23], s. 145-151. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635380300215X>
- [21] Microstructure and Creep Behavior of SiC Particulate Reinforced QE 22 Composite. *Magnesium Alloys and their Applications* [online]. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000-09-20 [cit. 2014-05-30], s. 234-239.DOI: Dostupný z WWW: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527607552.ch36/summary>
- [22] GÄRTNEROVÁ, V., TROJANOVÁ, Z., Deformačné slastnosti horčíkovej zliatiny AZ91 spevnenej krátkými saffilovými vláknami. *Materiálové inžénýrstvo*.2002, č. 3, s. 155-160.
- [23] HORYNOVÁ, M., ZAPLETAL, J., DOLEŽAL, P., GEJDOŠ, P., Evaluation of fatigue life of AZ31 magnesium alloy fabricated by squeeze casting. *Materials and Design* [online]. 2013, [cit. 2014-5-23], s. 253-264. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306912006310>

- [24] ZACHARIAH, Z., SANKARA SARMA, V.T., MISHRA, S.K., RAMAKRISHNAN, N., RAMAMURTY, U., Tension – compression asymmetry in an extruded Mg alloy AM30: Temperature and strain rate effect. *Materials Science and Engineering:A* [online]. 2013, [cit. 2014-5-23], s. 8-18. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092150931300169X>

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[%]	Tažnost
At. %	[-]	Atomová procenta
ASTM	[-]	American Society for Testing Materials
CMC	[-]	Ceramic matrix composite
d	[mm]	Průměr vlákna
E	[MPa]	Modul pružnosti
E _c	[MPa]	Modul pružnosti kompozitu
E _f	[MPa]	Modul pružnosti vlákna
E _L	[MPa]	Podélný modul pružnosti
E _m	[MPa]	Modul pružnosti matrice
E _T	[MPa]	Příčný modul pružnosti
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
l	[mm]	Délka vlákna
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
R _{mc}	[MPa]	Mez pevnosti kompozitu
R _{mf}	[MPa]	Mez pevnosti vlákna
R _{mm}	[MPa]	Mez pevnosti matrice
v _f	[-]	Objemový podíl vláken
v _m	[-]	Objemový podíl matrice
v _p	[-]	Objemový podíl částic
ε _c	[-]	Poměrná deformace kompozitu
ε _f	[-]	Poměrná deformace vláken
ε _m	[-]	Poměrná deformace matrice
σ _c	[MPa]	Napětí v kompozitu
σ _f	[MPa]	Napětí ve vláknu
σ _m	[MPa]	Napětí v matrici
ρ	[g/cm ³]	Hustota
Z	[%]	Kontrakce