

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rešerše použití kovových skel

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš TANČOUZ**
Osobní číslo: **E11B0532P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Rešerše použití kovových skel**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte rešerši o materiálu "kovová skla".

1. V databázových souborech přehledu publikací vyhledejte články, které přinášejí informace o pojmu "kovová skla".
2. Na základě získaných informací popište fyzikální a chemické vlastnosti materiálu "kovové sklo".
3. Vypracujte utříděný přehled užití "kovových skel" obecně a přehled jejich užití v elektrotechnice.
4. Uveďte vlastní návrhy možností rozšíření užití těchto materiálů.
5. Vypracujte utříděný seznam publikací, získaný podle bodu 1.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Řezáček, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


Doc. Ing. Jiří Hammetbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na komplexní vysvětlení problematiky kovových skel. Tento poměrně nový materiál má velký potenciál do budoucna díky svým vlastnostem kombinující některé preference kovů a skla. V následujícím textu je popsán vznik, výroba a použití kovových skel v elektrotechnice i mimo ni.

Klíčová slova

Kovová skla, tavenina, materiál, teplota krystalizace, rychlost ochlazování, magneticky měkký materiál, magneticky tvrdý materiál, maximální permeabilita, indukce nasycení, transformátor, amorfní jádro, ztráty naprázdno, hysterezní křivka.

Abstract

Presented bachelor's thesis is focused on overall explanation of metallic glasses. This relatively new material has got a great potential to the future thanks to special properties, because it combines some preference of metal and glass into one material. In following sections there is describe the creation, production and the application of the metallic glasses in the electrical engineering and other way.

Key words

Metallic glasses, melt, material, crystallization temperature, cooling rate, magnetically soft material, magnetically hard material, maximum permeability, saturation induction, transformer, amorphous core, no-load loss, hysteresis curve.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
Podpis

V Plzni dne 26.5.2014

Tomáš Tančouz

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Petru Řezáčkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 DEFINICE A HISTORIE VZNIKU KOVOVÝCH SKEL	11
1.1 VŠEOBECNÉ POZNATKY	11
1.2 HISTORIE	11
1.3 PODMÍNKY VZNIKU A STABILITY KOVOVÝCH SKEL	12
1.4 SLOŽENÍ SLITIN PRO VÝROBU KOVOVÝCH SKEL	15
2 VLASTNOSTI KOVOVÝCH SKEL	16
2.1 MAGNETICKY MĚKKÁ KOVOVÁ SKLA	16
2.2 MAGNETICKY TVRDÁ KOVOVÁ SKLA	17
2.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOVOVÉHO SKLA	17
3 VÝROBA KOVOVÝCH SKEL	19
3.1 ATOMIZACE TAVENIN TLAKOVÝM MÉDIEM	19
3.2 NÁSTŘIK ROZTAVENÉHO KOVU NA SUBSTRÁT	19
3.3 METODA ROVINNÉHO LITÍ	20
4 POUŽITÍ KOVOVÝCH SKEL V ELEKTROTECHNICE	21
4.1 MAGNETICKY MĚKKÁ KOVOVÁ SKLA NA BÁZI FE	21
4.2 MAGNETICKY MĚKKÁ KOVOVÁ SKLA NA BÁZI CO	22
4.3 MAGNETICKY MĚKKÁ KOVOVÁ SKLA NA BÁZI FE _{NI}	22
4.4 MAGNETICKY MĚKKÉ MATERIÁLY FIRMY METGLAS	22
4.4.1 <i>Metglas® Magnetic Alloy 2605 SA1</i>	23
4.4.2 <i>Metglas® 2705M Magnetic Alloy</i>	24
4.4.3 <i>Metglas® 2826MB Magnetic Alloy</i>	25
4.4.4 <i>Metglas® Magnetic Alloy 2605CO</i>	26
4.5 VÝROBCI AMORFNÍCH TRANSFORMÁTORŮ A MAGNETICKÝCH OBVODŮ	27
4.5.1 <i>Power-Energo s.r.o.</i>	27
4.5.2 <i>BEZ transformátory, a.s.</i>	29
5 POUŽITÍ KOVOVÝCH SKEL MIMO ELEKTROTECHNIKU	30
ZÁVĚR	32
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1

Seznam symbolů a zkratek

T_m	Teplota tavení [K]
T_g	Teplota skelného přechodu [K]
T_l	Teplota taveniny [K]
R_c	Kritická rychlost ochlazování [$K \cdot s^{-1}$]
BMGs.....	Velkorozměrová kovová skla
T_{rg}	Redukovaná teplota
TTT diagram	čas-teplota-transformace
γ	Normalizovaná teplota krystalizace
D_{max}	Tloušťka odlitku [mm]
B_s	Indukce nasycení [T]
μ_{max}	Maximální permeabilita
S_n	Jmenovitý výkon [kVA]
P_o	Ztráty naprázdno [W]
P_k	Ztráty nakrátko [W]
u_k	Napětí nakrátko [%]

Úvod

Kovová skla patří mezi nový materiál. Ač se jejich vznik datuje až do roku 1960, velkým vývojem prošly až během posledních deseti let. Přesto se dá očekávat, že jejich největší rozmach teprve přijde. Největší budoucností a důsledkem vývoje jsou specifické vlastnosti kovového skla, které se dají modifikovat příměsemi, ze kterých je kovové sklo utvořeno. Název kovového skla pochází z jejich původu a struktury jaké nabývají, tedy slitiny kovů, které se velice rychle ochladí a vznikne tak materiál s amorfni strukturou, tedy strukturou skla. Právě ochlazovací rychlosti, které jsou nutné pro vznik kovového skla, jsou zároveň největším problémem celé produkce. Pro různé taveniny se ochlazovací rychlosti liší, ovšem řádově se při výrobě pohybujeme v hodnotách $10^4 - 10^6$ K/s, to je za momentálních podmínek možné dosáhnout jen při velice malých objemech výrobku, kdy tloušťka dosahuje nanejvýš několik milimetrů.

Předkládaná práce je rozdělena do pěti kapitol. V první je popsáno kovové sklo obecně, jeho historie a podmínky vzniku. Dále jsou popsány nejdůležitější vlastnosti, kterými kovové skla disponují a tedy důvod jejich vývoje. Ve třetí kapitole jsou rozepsány tři základní postupy výroby, ve čtvrté a páté pak nejčastější využití kovového skla, jak v elektrotechnice, díky skvělým magnetickým vlastnostem, tak mimo ni, zejména díky mechanickým přednostem.

1 Definice a historie vzniku kovových skel

1.1 Všeobecné poznatky

Kovová skla patří mezi amorfní materiály, to znamená, že se vyznačují staticky neuspořádaným prostorovým rozložením atomů. Uspořádání vykazují jen na krátkou vzdálenost a na dlouhé vzdálenosti jsou úplně bez uspořádání. V důsledku této struktury nevykazují anizotropní vlastnosti, tzn. mají ve všech směrech stejné vlastnosti, např. mechanické, tepelné, atp. Při zahřívání amorfní látka měkne, až se rozpustí. To je důvod, proč nelze stanovit teplotu tání, můžeme je pouze charakterizovat díky oblasti měknutí, což je rozdíl teplot mezi pevnou a kapalnou fází. Amorfní struktura se získá rychlým ochlazením taveniny. Následkem zvyšování rychlosti ochlazování roste rychlost krystalizace a zjemňuje se struktura. Po překročení kritické rychlosti ochlazování, dochází k zbrzdění nukleace zárodků, na kterém se podílí zmenšení tepelných kmitů atomů, zastavení difuzních pochodů a výrazný nárůst viskozity taveniny. Tavenina tedy díky této nadkritické rychlosti chlazení ztuhne a stane se amorfní látkou. [1],[2]

Běžná skla, tedy směs oxidů, vznikají obdobným postupem, již při ochlazování taveniny rychlostí $1 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ se dosahuje dostatečné stability. U skla čistých kovů je potřeba k potlačení krystalizace ochlazování rychlostí $10^{10} - 10^{12} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$. Navíc jsou velice nestabilní, resp. stabilní jen za nízkých teplot, a proto jsou prakticky nepoužitelné. Z těchto důvodů se musí použít složitější slitiny několika kovů, kterým stačí k přeměně na kovové sklo, tedy amorfní látku, menší rychlost ochlazování. Ta se pohybuje v rozsahu $10^4 - 10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$. [1]

1.2 Historie

Začátkem kovových skel byla slitina $\text{Au}_{75}\text{Si}_{25}$, kterou objevili W. Klement Jr. a Pol Duwez. Stalo se tak v roce 1960 na Kalifornském technologickém institutu. Kvůli zabránění krystalizace struktury musela být tato roztavená slitina zakalena rychlostí $10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$. Následkem toho byla první kovová skla vyráběna pouze jako drátky, pásy nebo folie, což znamenalo velké omezení v objemu a velikost. Tloušťka těchto výrobků dosahovala nanejvýš několik stovek mikrometrů. [3]

Dalším důležitým krokem bylo vyvinutí nového postupu výroby. Zasloužili se tak v roce 1979 H. Liebermann a C. Graham, kteří pomocí rychle točícího se podchlazeného kola dokázali vyrábět tenké pásy kovových skel ze slitiny železa, niklu, fosforu a bóru pojmenovaná jako Meglas. Hlavní výhodou tohoto materiálu je snadná magnetizace a používá

se v transformátorech díky svým nízkým hysterezním ztrátám. Výzkum se v této době zabýval hlavně magneticky měkkými materiály, a tak v roce 1980 byly vyrobeny z 55% slitiny palladia, 22,5% olova a 22,5% antimonu skleněné ingoty s průměrem 5mm. Použitím oxidu boru se dalo dosáhnout tloušťky 1 cm. [3]

Na slitině Pd-Cu-Si bylo prokázáno, že vhodnými přísadami může být snížena rychlost ochlazování na hodnotu 10^3 K.s^{-1} , dále u slitiny Pd-Ni-P tento trend pokračoval a rychlost ochlazování opět klesla na 10^2 K.s^{-1} . Progres výzkumu se v tomto odvětví stále stupňoval a na konci 80. let byly připraveny první velkorozměrová kovová skla (anglicky „bulk metallic glasses – BMGs) na bázi hořčíku, lanthanu, titanu nebo zirkonia. Tloušťka produktu se pohybovala od 1 mm do 1 cm při rychlosti ochlazování 10^3 K.s^{-1} . Tloušťek odlitku až několik centimetrů se podařilo díky odlévání slitin na bázi Zr-Ti-Be do tyčí, kde byla rychlost ochlazování pouze 1 K.s^{-1} . Principem výroby je odlévání do kovových forem. [4]

1.3 Podmínky vzniku a stability kovových skel

Pro vznik kovových skel je velmi důležitá rychlost ochlazování. Existují však další nezanedbatelné faktory které pomáhají zabránit vzniku krystalické fáze.

- Kritická rychlost ochlazování R_c
- Redukovaná teplota T_{rg}
- Interval přechlazení ΔT_x
- Parametr γ

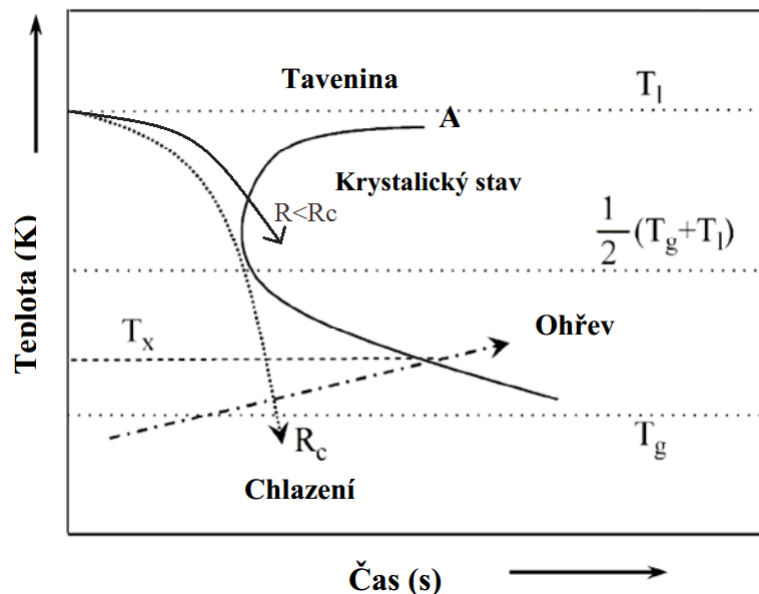
U krystalických fází dochází k přechodu mezi taveninou a pevným stavem při teplotě tavení T_m , která charakterizuje termodynamickou rovnováhu mezi oběma skupenstvími. U kovových skel, jakožto amorfní látky se definuje takzvaná teplota taveniny T_1 . Pod teplotou taveniny T_1 se dále nachází teplota T_g , při které je pohyb atomů omezen na vzdálenost menší než je jejich samotný rozměr. Pokud se tedy tavenina zahřeje nad teplotu T_1 a následně ochladí kritickou rychlostí R_c (nebo vyšší) pod hranici teploty T_g , vznikne stav, kdy se konzervuje atomární struktura výchozí taveniny, v našem případě kovové sklo. Kritická rychlost R_c pro vznik kovového skla z taveniny se definuje jako ochlazení o teplotní interval ΔT_x za určitou dobu Δt :

$$R_c = \frac{\Delta T_x}{\Delta t} \quad (1.3.1)$$

Grafické znázornění vzniku kovového skla je možno vidět v TTT diagramu (čas – teplota – transformace) na obrázku 1.1. Čisté kovy se do amorfního stavu převést nedají ani při rychlostech $R_c \cdot 10^{10} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$. Kritickou rychlostí ochlazování musí být dosažena teplota T_g , někdy nazývaná jako teplota skelného přechodu, pod kterou se již zamezí přerozdělování atomů a zachová se amorfní stav, jinými slovy se zamezí vzniku krystalické struktury. Křivka A, ve tvaru písmene C, v diagramu znázorňuje oblast ohraničující vznik amorfní fáze. Křivka ochlazování (R_c) tedy musí ležet před křivkou A. Pokud by byla rychlost ochlazování menší než je potřeba ($R < R_c$), křivka ochlazování by se protínala s křivkou A, došlo by ke krystalizaci a kovové sklo by nemohlo vzniknout. Celý průběh ochlazení se odehrává mezi teplotami T_l a T_g , tedy :

$$\Delta T_x = T_l - T_g \quad (1.3.2)$$

Protože jsou amorfní kovové slitiny metastabilní, dochází ve struktuře při izochronním ohřívání konstantní rychlostí při teplotě T_x ke krystalizaci. Ohřívání je znázorněno v TTT diagramu na obr. 1.1 čerchovanou čarou.

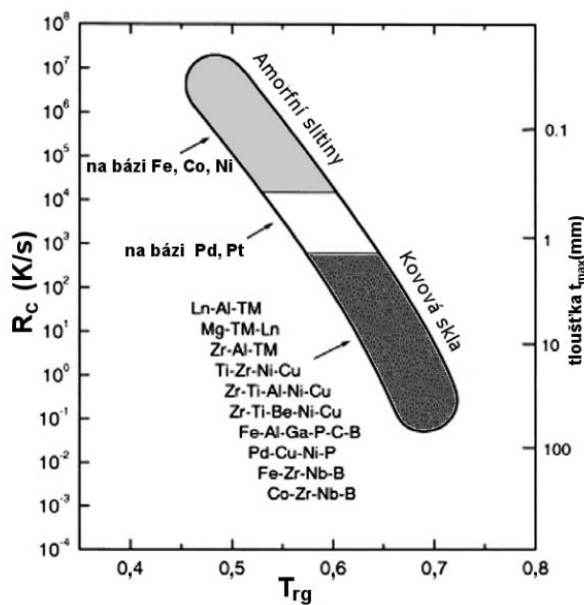


Obr. 1.1.: TTT diagram vzniku kovového skla [4]

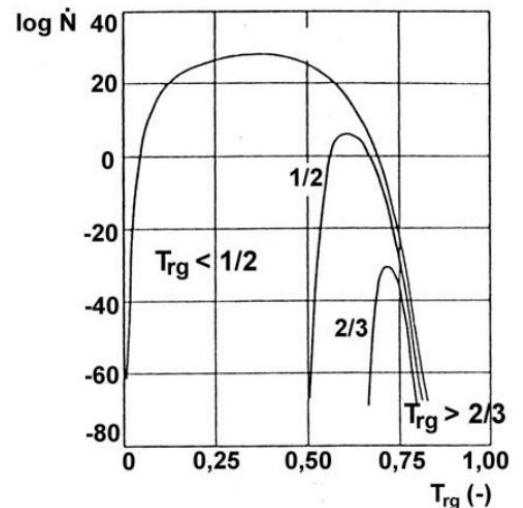
Dalším důležitým faktorem je poměr teplot T_g a T_l , což je tzn. redukovaná teplota:

$$T_{rg} = \frac{T_g}{T_l} \quad (1.3.3)$$

Předpoklad rychlého přechodu během chlazení z taveniny do skelné fáze je co nejmenší teplotní interval ΔT_x , tzn. aby byly teploty T_g a T_l co nejbližše sebe a redukovaná teplota T_{rg} měla co nejvyšší hodnotu. Tento poměr se dnes pohybuje okolo hodnoty 0,6, to je oproti dřívějším hodnotám 0,25-0,5 značný pokrok. Pro srovnání, silikáty a polymery mají tuto hodnotu v průměru 0,6-0,7. Vliv T_g na rychlost nukleace \dot{N} , tedy tvorbu krystalových zárodků můžeme sledovat v obr. 1.3.3. Při $T_g < 1/2$ je maximum rychlosti nukleace takové, že by kovové sklo nemohlo vzniknout resp. by byla rychlost ochlazování nejspíše nedosažitelná. Naopak tvorba krystalových zárodků bude pro $T_g > 2/3$ velice malá což je velice příznivé pro výrobu kovového skla.



Obr. 1.2: Závislost kritické rychlosti ochlazování R_c redukované teploty T_{rg} a tloušťky t_{max} (mm) pro různé slitiny tvořící kovová skla. [4]



Obr. 1.3: Závislost rychlosti nukleace \dot{N} na redukované teplotě T_{rg} [4]

Posledním výše zmiňovaným faktorem je parametr γ , který vyjadřuje normalizovanou teplotu krystalizace T_x :

$$\gamma = \frac{T_x}{T_g + T_l} \quad (1.3.4)$$

Kovová skla jsou teplotně velice nestabilní, jejich teplota vzniku je pod teplotou T_g . Při ohřevu a tedy přibližování se k teplotě T_x nastane bod, kdy se kovová skla začnou měnit z amorfni fáze na krystalickou. Tato změna přináší zásadní změny fyzikálních i mechanických vlastností kovových skel, o kterých si povíme dále. [4]

Tab. 1.4.: Seznam kovových skel s jejich charakteristickými teplotami a rychlostmi [4]

Slitiny	D_{\max} [mm]	T_g [K]	T_x [K]	T_l [K]	ΔT_x [K]	T_{rg}	γ	R_c [K/s]
Pd ₄₀ Cu ₃₀ Ni ₁₀ P ₂₀		586	660	856			0,458	0,1
Pd _{42,5} Cu ₃₀ Ni _{7,5} P ₂₀		574	660	834			0,469	0,067
Pd _{42,5} Cu _{27,5} Ni ₁₀ P ₂₀		584	665	871			0,457	0,083
Pd ₄₀ Cu _{32,5} Ni _{7,5} P ₂₀		568	654	932			0,436	0,133
Pd ₄₀ Cu ₂₅ Ni ₁₅ P ₂₀		596	668	90			0,44	0,15
Pd ₄₅ Cu ₂₅ Ni ₁₀ P ₂₀		595	675	884			0,465	0,1
Pd ₄₅ Cu ₃₀ Ni ₅ P ₂₀		577	659	861			0,458	0,083
Pd _{37,5} Cu ₃₀ Ni _{12,5} P ₂₀		572	647	929			0,423	0,133
Cu ₅₀ Zr ₄₃ A ₁₇	4	721	792	1176	71	0,613	0,418	
Cu ₄₇ Zr ₄₃ A ₁₇ Ag ₃	5	716	795	1156	79	0,619	0,425	
Cu ₄₇ Zr ₄₃ A ₁₇ Be ₃	6	715	798	1139	83	0,628	0,43	
Cu ₄₃ Zr ₄₃ A ₁₇ Ag ₇	8	710	797	1125	87	0,631	0,434	
Cu ₄₃ Zr ₄₃ A ₁₇ Be ₇	12	710	813	1126	103	0,631	0,443	
Mg ₆₅ Cu ₂₅ Gd ₁₀	8	408	478	755	70	0,54	0,411	0,33

Pozn.: D_{\max} - tloušťka odlitku; T_g - teplota skelného přechodu T_x - teplota krystalizace; T_l - teplota taveniny; ΔT_x - interval přechlazení; T_{rg} - redukováná teplota; γ - normalizovaná teplota krystalizace; R_c - kritická rychlost ochlazování

1.4 Složení slitin pro výrobu kovových skel

Základem k přípravě kovových skel jsou přechodové kovy, tedy kovy 4. až 7. periody a 3. až 12. skupiny periodické tabulky prvků. Nejpoužívanějšími jsou hlavně železo, nikl, kobalt, palladium, platina, měď a zirkonium. Dále jsou důležité prvky jako bor, uhlík, chrom nebo fosfor, které napomáhají proti vzniku krystalické struktury. Tyto prvky mají ještě další specifické účinky. Bor zvyšuje stabilitu kovových skel stejně tak jako křemík, který navíc zlepšuje vlastnosti z pohledu magneticky měkkého materiálu. Fosfor zmenší úroveň magnetického sycení a zvýší křehkost výrobku. Konkrétní složení je dáno požadavkem na vlastnosti a použití.

Kovová skla se dělí do dvou skupin:

a) KOV – METALOID

Do této skupiny se řadí slitiny přechodových nebo i ušlechtilých kovů s 20% metaloidů.

Obvykle jsou kovová skla složena z tří až pěti složek v poměru 80% obsahu kovových

prvků a 20% metaloid. Pokud slitina obsahuje jeden nebo více prvků s vlastnostmi blízkým vlastnostem kovům (tzn. metaloidů = B, Si, Ge, Sb), je obvykle příprava amorfního stavu nejjednodušší. Příkladem mohou být $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ nebo $\text{Pd}_{40}\text{Cu}_{25}\text{Ni}_{15}\text{P}_{20}$.

b) KOV – KOV

Které se dále dělí na slitiny:

- přechodových kovů 1. a 8. skupiny s přechodovými kovy z 3. až 7. skupiny periodické tabulky prvků.
- alkalických kovů nebo zemin
- kovů vzácným zemin

Příkladem jsou slitiny na bázi Cu-Ni ; Nb-Ni ; Zr-Ni ; Al-Cu ; Mg-Zn ; Zr-Ni-Cu-Al. [4]

2 Vlastnosti kovových skel

Kovová skla vznikají kvůli jejich specifickým vlastnostem, jsou velmi houževnatá a to i ze slitin, které by v krystalickém stavu byly velice křehké, kovová skla mají výborný poměr meze kluzu a modulu pružnost. Současně mají tyto materiály odolnost proti opotřebení a korozi. Kupříkladu kovová skla na bázi chromu mají dokonce větší korozivzdornost než korozivzdorné oceli. Zatím nejdůležitější vlastností, alespoň pro elektrotechnické uplatnění, jsou magnetické vlastnosti, kde kombinací přísad lze vyrobit jak magnetická měkká tak i magneticky tvrdá kovová skla.

2.1 Magneticky měkká kovová skla

Proti standardním transformátorovým plechům z křemíkové oceli dochází při použití kovového skla na bázi železa, železa-niklu nebo kobaltu až k šestinásobným zmenšením ztrát. Nejlevnější provedení je použít kovového skla na bázi železa, nejdražší na bázi kobaltu. Jednoduchá magnetizace kovových skel souvisí s vysokou pohyblivostí stěn magnetických domén. Tato mobilita je důsledkem absence hranice mezi zrny, což je typickou vlastností amorfních materiálů. Natočení magnetické domény je tedy možné již za malých energetických nároků. Další předností je elektrický odpor, který je zhruba 3x větší než u krystalických materiálů podobného složení. Díky tomu se v materiálu objevují zanedbatelné nebo velmi malé vířivé proudy. U kovů se elektrický odpor s rostoucí teplotou zvyšuje, u kovových skel záleží na jejich modifikaci. Tato vlastnost byla zjištěna u laboratorně vyrobených pásků $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$ a $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{12}\text{S}_8$ o rozměrech 40 μm x 2 mm, kde při zvyšující

se teplotě elektrický odpor u slitiny s přísadou křemíku klesal, naopak u slitiny s přísadou bóru rostl. [1],[5]

2.2 Magneticky tvrdá kovová skla

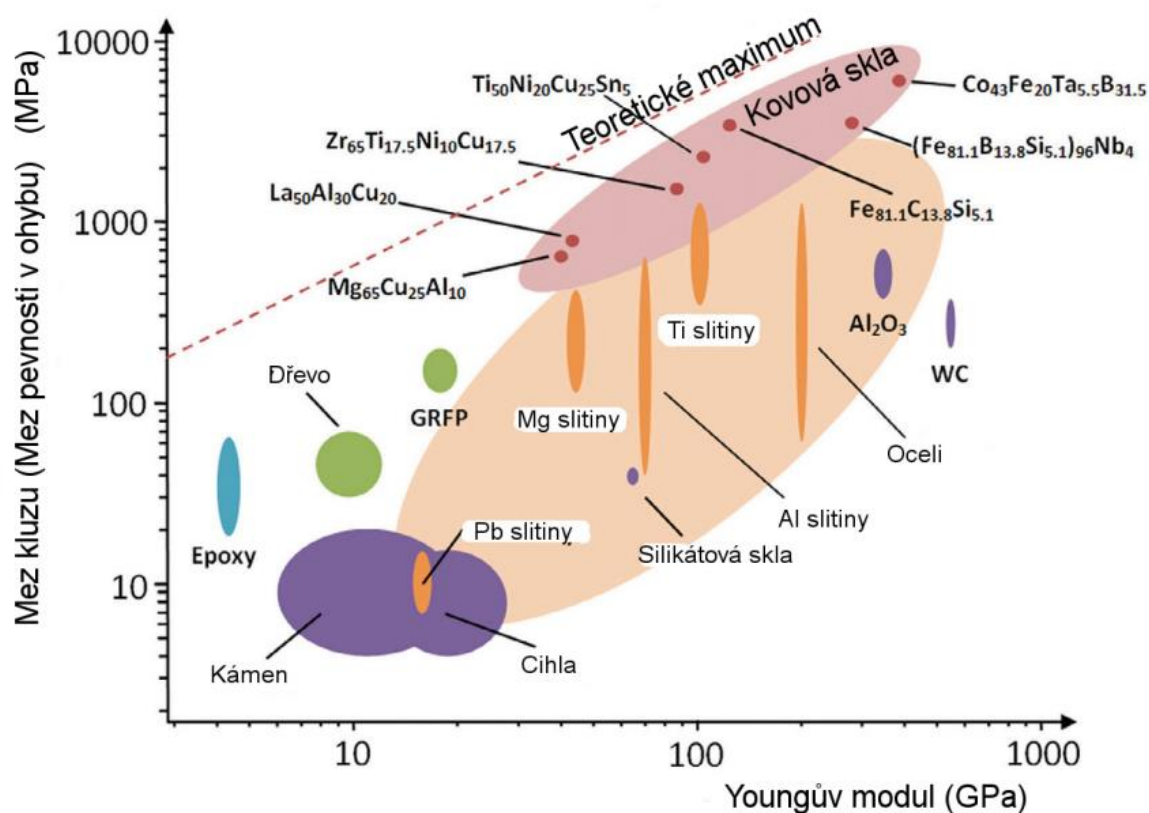
Permanentní magnety prošly od svých počátků v 50. letech značným vývojem. Původní klasické magnety legované Co nebo Ni, byly nahrazeny v AlNiCo, později se využívalo slitin Sm-Co. Nevýhodou ovšem byly velice drahé suroviny a to učinilo tyto magnety cenově nevýhodné. Naopak perspektivní jsou neodymové magnety ze směsi neodymu, železa a boru. Tento materiál je aktuálně nesilnějším magnetem s nejvyšší vnitřní energií Tyto magnety jsou schopné udržet tisícinásobek své váhy. Důležité je říci, že výroba není tak cenově náročná jako výroba magnetu ze vzácných zemin jakými jsou kobalt a samarium. Nevýhodou je ovšem velice nízká Curieova teplota, která se dá mírně navýšit legováním Co a Al na hodnotu 450 °C. Poté je značné omezení korozní stabilita, konkrétně jsou velice agresivními činiteli ionty kyslíku a chlóru. Materiál $Nd_2Fe_{14}B$ patří mezi magneticky nejlepší a je hojně využíván např. v elektrických motorech. Nejčastěji se vyrábí odléváním metodou rovinného lití (viz kap. 3. Výroba kovových skel) do pásků, které jsou následně odskelněny na nanokrystalické permanentní magnety. [1],[5]

2.3 Mechanické vlastnosti kovového skla

Velice atraktivní kombinací dvou mechanických vlastností je vysoká pevnost a vysoká mez elastické deformace. Na obr. 2.1 můžeme vidět závislost meze pevnosti na modulu pružnosti v tahu (Youngův modul, definovaný jako poměr napětí a jím vyvolaná deformace). V tomto srovnání různých materiálů (amorfní i krystalické) je na první pohled zřejmé že kovová skla dosahují lepších hodnot než standartní kovy.

Další důležitou vlastností je tvářitelnost. Zahřejeme-li kovové sklo, proběhne transformace: „amorfní kov -> přechod přes skelnou teplotu -> přechlazená kapalina -> krystalizace -> tavení“. Ve chvíli kdy materiál dosáhne stavu přechlazené kapaliny, můžou být u kovových skel provedeny velké deformace bez destruktivních následků. Jedná se o podobnou činnost jako lití a tváření u krystalických kovů, jenže amorfní kovová skla mají teplotu vhodnou pro tváření mnohem nižší. Například u slitin na bázi zirkonia je to okolo hodnoty 400°C, což znamená daleko menší energetickou náročnost na provedení této úpravy. Povrch navíc zůstává zrcadlově lesklý a nedochází k pórovosti, to znamená, že není nutné

další opracování - leštění. Kovová skla se tedy zpracovávají velice snadno, zůstávají v amorfním stavu během zpracování i po ochlazení zpět do běžných pracovních teplot (pokojová teplota). [1],[4]



Obr. 2.1: Srovnání mechanických parametrů: Kovová skla kombinují vysokou pevnost a vysoký modul pružnosti (Youngův modul). [4]

Tab. 2.1: Srovnání základních mechanických parametrů slitin na bázi Al, Fe, Zr a Ti v amorfním a krystalickém stavu [4]

Materiál	Pevnost [MPa]	Youngův modul [GPa]	Hustota [g/cm ³]	Lomová houževnatost [MPa.m ^{1/2}]	Cena [USD]
Tradiční slitiny					
Al slitiny	200-300	60-80	3.4	20-120	2.5
Ti slitiny	300-1000	100-120	4.5	20-120	15-30
Fe slitiny	300-2000	150-200	7.8	20-120	0,6-10
BMGs – velkorozměrové amorfní slitiny					
Al slitiny	800-1500	60-80	3.4	20-60	2.5
Zr slitiny	1600-2000	80-105	6.1	20-60	25-40
Fe slitiny	2000-3500	140-160	7.8	20-60	1-10

3 Výroba kovových skel

Jak jsme si již dříve řekli, základním faktorem výroby kovového skla je velice rychlé ochlazení taveniny. Rychlost ochlazování lze dosáhnout řadou způsobů, bohužel všechny naráží na technologickou náročnost a tedy omezenost rychlosti rychlostí ochlazování. Kvůli tomu se kovová skla dají vyrobit pouze v omezených rozměrech. Tím pádem bývá součástí postupu výroby kovových skel lisování nebo vytlačování, aby se dosáhlo požadovaného tvaru výrobku. V současnosti se používají 3 základní technologie ochlazování.

3.1 Atomizace tavenin tlakovým médiem

Tato metoda výroby kovových skel je blízce spojena s práškovou metalurgií. Na obr. 3.1 můžeme vidět schématické znázornění této technologie. Připravená tavenina, která je roztavena pomocí indukčního ohřevu, proudí úzkým otvorem okolo trysek tlakového plynu. Do trysek se vhání vzduch, voda a inertní plyny jako jsou dusík, helium či argon. Inertní plyny navíc zajišťují ochranu proti vytvoření oxidační vrstvy, která je samozřejmě nežádoucí. Tavenina je tedy tryskou tlakového plynu rozstříknuta na drobné kapky, které rychle ztuhnou. Rychlost ochlazování je poměrně vysoká a to 10^3 až 10^5 K.s⁻¹. Velikost částic, které tímto rozprašováním vzniknou, je vyjadřována povrchovým napětím výchozí taveniny, viskozitě a taktéž tlaku plynu který je do trysek přiváděn. Kvůli vyhotovení konkrétního tvaru výrobku jsou prášky kompaktizovány, tzn. lisování, slinování, lisování za tepla, vytlačování. Výhodou této metody oproti konvenčním postupům je jemnější a rovnoměrnější struktura výrobku, což ve výsledku znamená vyšší pevnost, únavovou životnost, odolnosti proti otěru nebo třeba houževnatost. Mimo jiné se touto metodou vyrábí materiály nekonvenčních složení, které se běžnými metalurgickými postupy nedají vyrobit. Jsou to vysoko-tavitelné kovy a slitiny, slitiny s řízenou porozitou, kompozity kov-uhlík nebo vysoce-legované nástrojové oceli [6],[7]

3.2 Nástřik roztaveného kovu na substrát

Metoda nástřiku roztaveného kovu tlakovým médiem na povrch substrátu se vyvinula z metody atomizace taveniny. Tímto způsobem se vyrábí materiály s vysokou odolností proti otěru. Tavenina se pomocí tlakového media rozstříkává na substrát, vzniká tak tuhý polotovar. Polotovar je dále zpracováván například extruzí a kováním do výsledné podoby výrobku.

3.3 Metoda rovinného lití

Tato metoda výroby kovových skel je nejpoužívanější, jednak díky nejjednoduššímu provedení, poté kvůli největším dosaženým rychlostem ochlazování, které se pohybují řádově v hodnotách 10^5 - 10^6 K.s⁻¹. Pomocí indukčního ohřevu se v trubici roztaví tavenina, která je následně vytlačena pomocí tlakového plynu skrz vhodně vytvarovaný otvor na povrch rotujícího válce. Substrát tak velmi rychle zchladne, resp. ztuhne a vzniká nekonečně dlouhá páska s šířkou okolo 1 cm a výškou několik desetin milimetru. Podle tvaru a vzdálenosti mezi tryskou a rotujícím kotoučem lze metodu rovinného lití rozdělit na dvě uspořádání:

- **Chill block melt spinning** (zkratka “CBMS”)

Při této variantě je tryska od rotujícího kotouče vzdálená několik milimetrů a má kruhový otvor.

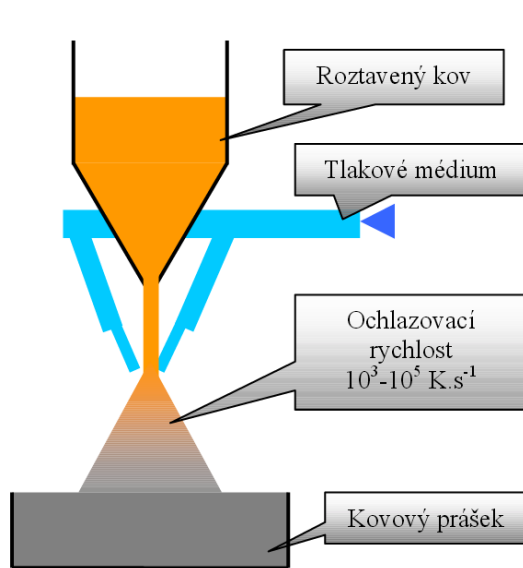
- **Planer flow casting** (zkratka “PFC”)

Tato variant je častější a je schematicky znázorněna na obr. 3.2. Vzdálenost trysky od rotujícího kotouče je od 0,3 mm do 1 mm. Tryska je obdélníkového tvaru. Výsledný amorfní pás má tloušťku 0,03 mm a šířku stejnou jako je šířka kotouče, což představuje maximálně 60 cm. Pro zajímavost mají jedno takové zařízení na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze, které je zároveň jediným svého druhu u nás. Jejich zařízení má kotouč o průměru 330 mm, tloušťce 30 mm, který dosahuje rychlostí otáčení 30 m.s⁻¹. Trysku o délce strany 10 mm a šířce 1 mm a vsázku ohřívají pomocí elektromagnetické indukce, kde generátor má výkon 4 kW. Tryska je navíc posuvná jak ve vertikálním tak horizontálním směru, takže ji lze přiblížit na vzdálenost ke kotouči menší než 100 μm. Jako výtlačný plyn zde používají argon. [6],[7]

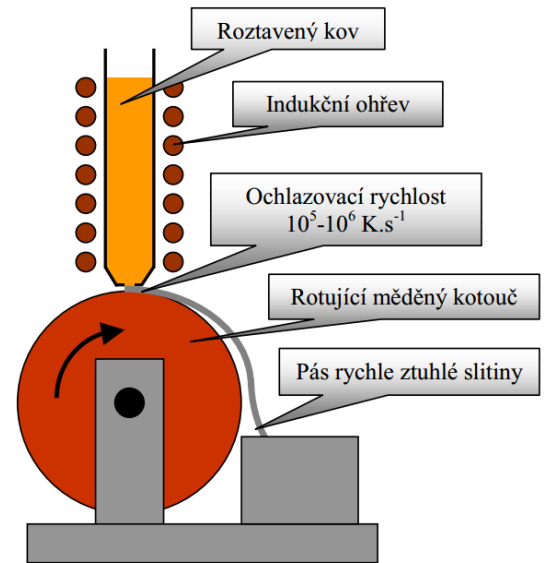
Na kotouč jsou kladeny vysoké nároky z hlediska bezpečnosti i tepelné vodivosti. Tepelná vodivost materiál, z kterého je kotouč vyroben, je velice důležitá k dosažení rychlostí ochlazování napsaných výše. Zároveň je důležitá pevnost materiálu, protože kotouč může dosahovat velkých rychlostí otáčení nad 30 m.s⁻¹. Jako vhodný materiál se zdá být měď, jenže ta má velice nízkou pevnost a odolnost proti oděru, je tedy bez dalších přísad nepoužitelná a kotouč se dělá z nízkolegovaných slitin mědi, např. slitina chrom-zirkoniový bronz CuCr₁Zr_{0,1}, kterou použili na VŠCHT.

Technologie rovinného lití se v této době využívá hlavně v oblasti s amorfními slitinami magneticky měkkých materiálů, používaných např. jako jádra transformátorů,

magneticky regulovaných měničů nebo snímacích hlav. Slitiny jsou na bázi železa, niklu či kobaltu a jsou legované prvky křemíku, boru a fosforu. [7]



Obr. 3.1: Schématické znázornění atomizace tavenin tlakovým médiem [6]



Obr. 3.2: Schématické znázornění metody rovinného lití [6]

4 Použití kovových skel v elektrotechnice

Jak bylo již výše uvedeno, kovová skla mají skvělé magnetické vlastnosti. Ty pramení z amorfni struktury kovového skla. Díky vysoké pohyblivosti stěn magnetických domén dochází k magnetizaci kovových skel velice snadno. Tato vlastnost znamená malé energetické nároky na přemagnetizování resp. malé hysterezní ztráty. Spolu s vyšším elektrickým odporem materiálu, který potlačuje vířivé proudy, jsou amorfni kovy ideální pro užití v elektrotechnice hlavně jako jádra transformátorů, magneticky regulovaných usměrňovačů, atp. Výrobky z kovových skel mají vysokou permeabilitu, nízkou koercivitu a nízkou magnetickou anizotropii. Jako nevýhodu je třeba zmínit velké teplotní omezení. Použitelné jsou do poloviny Curieho teploty, při vyšší teplotě by došlo k rekrystalizaci a všechny tyto výhody, oproti klasickým feritům, by se nenávratně ztratily.

Hlavním segmentem jsou magneticky měkká kovová skla, používaná hlavně pro magnetické obvody v transformátorech. Tyto materiály jsou vyráběny na bázi železa, železa-niklu a nebo kobaltu. [8]

4.1 Magneticky měkká kovová skla na bázi Fe

Základem jsou levné suroviny Fe, Si, B a C. Ze všech kovových skel mají právě tyto při nízkých magnetizačních ztrátách 0.16 W/kg (u anizotropních plechů se tyto ztráty

pohybují v rozmezí 0.5-0.75 W/kg) největší tepelnou stabilitu a hodnotu indukce nasycení $B_s = 1.56$ T. Zároveň patří k levnějším a tak jsou využívány k výrobě magnetických obvodů pro výkonové a distribuční transformátory, kde je požadována vysoká permeabilita při co nejnižších nákladech. Přidáním kobaltu se ještě zvýší už tak poměrně velká hodnota indukce nasycení B_s a to až na 1,8T při $\mu_{\max} = 400\,000$, bez Co je maximální permeabilita až 600 000. Další použití je při konstrukci elektrických strojů, kde se vyžaduje redukce hmotnosti při zachování vysokých magnetických hodnot (výkonové impulsní transformátory, proudové transformátory, tlumivky, magnetické zesilovače).

Slitiny na bázi Fe mají i při frekvenci 1 MHz stále velmi nízké magnetizační ztráty. K tomu si zachovávají indukci nasycení B_s i permeabilitu μ o dost větší než mají ferity používané na stejné aplikace. [8],[9],[25]

4.2 Magneticky měkká kovová skla na bázi Co

Z této slitiny vyrobené magnetické obvody se používají, v měřicí a odrušovací technice pro stínění, tlumivky, omezovače přepětí, výstupní transformátory pro výkonové tranzistorové napájecí zdroje. Dále pak ve vysokofrekvenční technice a pro stavbu výkonové elektroniky. Oproti magneticky měkkým kovovým sklům na bázi železa, mají magnetické obvody vyrobené z této slitiny menší indukci nasycení $B_s = 0,5T - 0,8$ T, ale naopak vyšší tepelnou stabilitu, odolnost proti mechanickému namáhání a lepší korozivzdornost. Jsou to nejdražší magneticky měkká kovová skla. Náhradou za ferity jsou hlavně ve vysokofrekvenčních transformátorech, impulzních transformátorech a ve velmi citlivých proudových transformátorech. [8],[9],[25]

4.3 Magneticky měkká kovová skla na bázi FeNi

Magnetické obvody z kovových skel vyrobené z této slitiny disponují vysokou permeabilitou dosahující hodnot 800 000, počáteční permeabilitou μ 5000-20000, střední hodnotou indukce B_s 0,8 T – 1 T. Uplatnění mají opět při konstrukci elektrických strojů kde je právě velká permeabilita velice důležitá. [8],[9],[25]

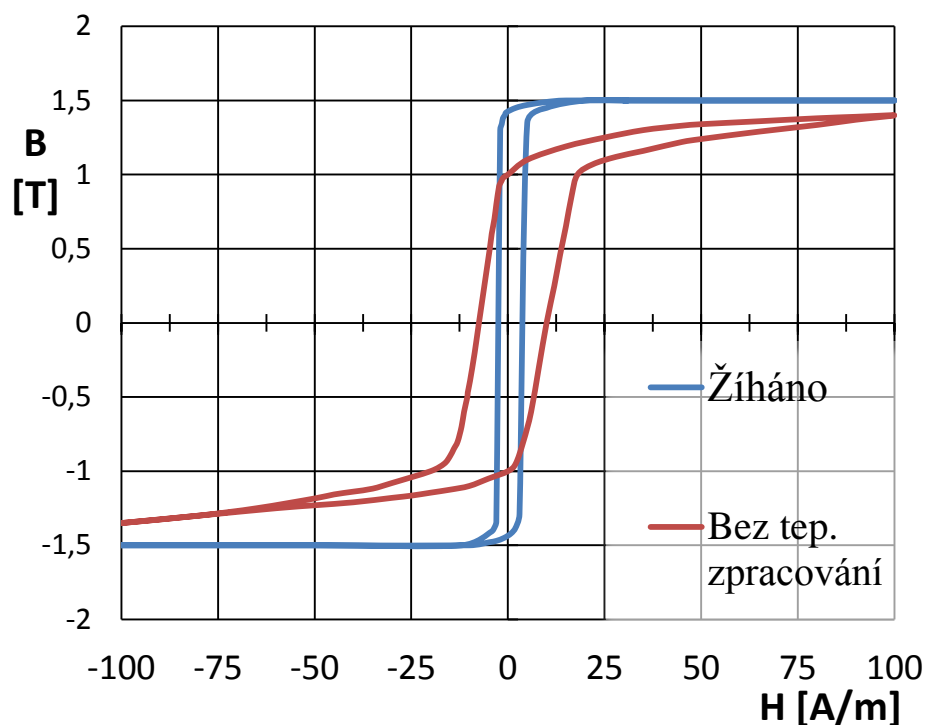
4.4 Magneticky měkké materiály firmy Metglas

Metglas je firma zabývající se výrobou kovových skel za účelem použití v elektrotechnice. Založena byla v roce 1973 v Severní Karolíně, USA a je světovým lídrem ve výrobě těchto materiálů pro aplikaci v distribučních transformátorech, solárních měničích,

tlumivek. Na jejich internetových stránkách je utříděný seznam výrobků. Specifické vlastnosti, hysterezní křivky a parametry těchto magneticky měkkých kovových skel jsou popsány níže.

4.4.1 Metglas[®] Magnetic Alloy 2605 SA1

- Na bázi železa, složení : Fe 85-90% , Si 5-10% , B 1-5%
- Aplikace: distribuční a proudové transformátory, vysokofrekvenční tlumivky, motory
- Výhody: až o 50% menší ztráty v jádře (na 60Hz dokonce o 60%), vysoká permeabilita [10]



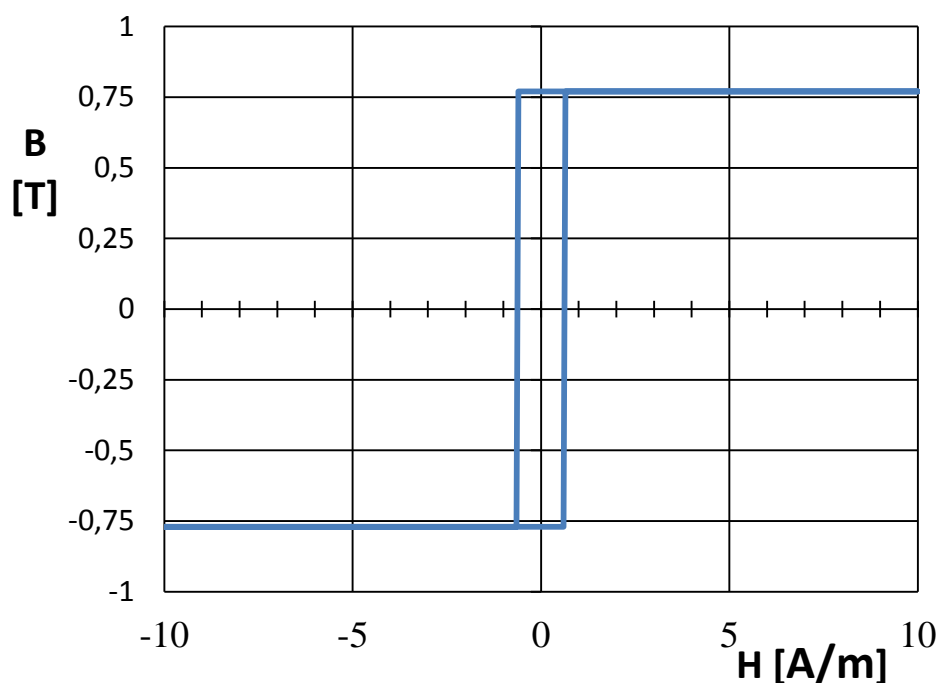
Obr. 4.4.1: Hysterezní křivka materiálu 2605-SA1 [10]

Tab. 4.4.1: Tabulka parametrů magnetické slitiny 2605-SA1 [10]

Elektromagnetické vlastnosti		Mechanické vlastnosti	
Indukce nasycení B_s	1.56 T	Teplota krystalizace	508 °C
Maximální permeabilita μ_{\max}		Provozní teplota	150 °C
a) bez tepelného zpracování	45 000	Hustota	7.18 g/cm ³
b) žíhaná	600 000	Tloušťka	92 nm
Elektrický odpor	130 $\mu\Omega\cdot\text{m}$	Modul pružnosti	100 GPa
Magnetostrikční nasycení	27 ppm	Pevnost v tahu	0,9 - 2 GPa
Curieova teplota	399 °C		

4.4.2 Metglas® 2705M Magnetic Alloy

- Na bázi kobaltu, složení: Co 75-85% ; B, Fe, Mb, Ni 1-5%, Si 5%
- Aplikace: Jádra pro vysokofrekvenční účely, magnetické senzory a spínače, elektromechanické stínění
- Výhody: téměř nulová magnetostrikce, vysoká permeabilita a strmá hysterezní křivka bez tepelného zpracování, stále dobrá indukce nasycení [10]



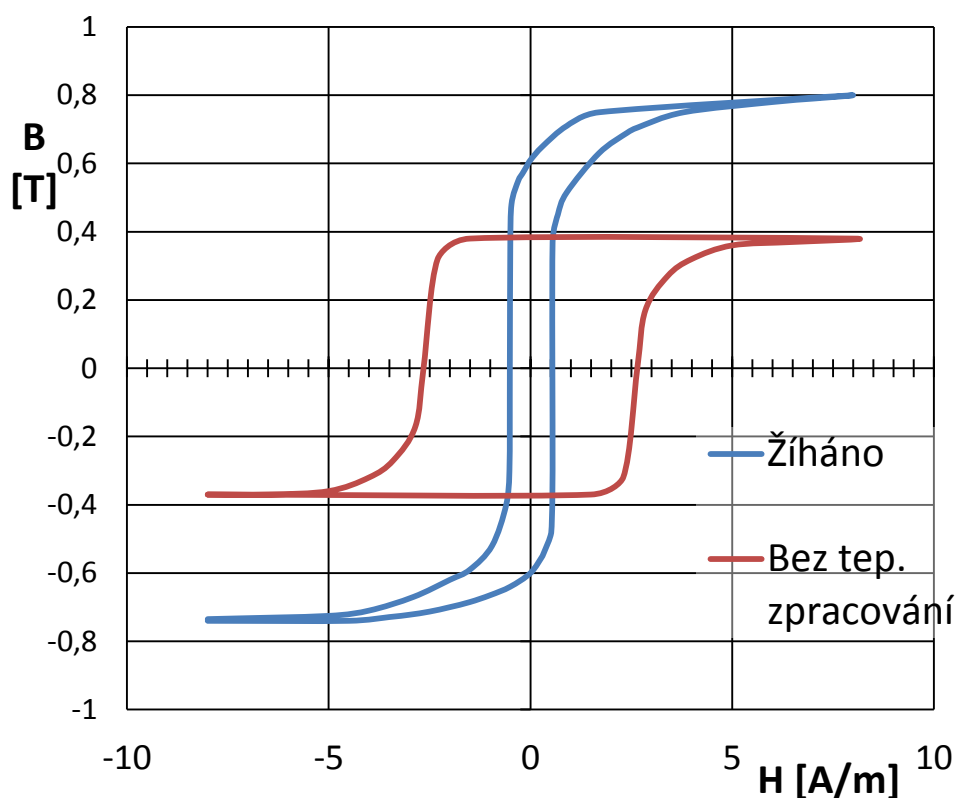
Obr. 4.4.2: Hysterezní křivka materiálu 2705M [11]

Tab. 4.4.2: Tabulka parametrů magnetické slitiny 2705M [10]

Elektromagnetické vlastnosti		Mechanické vlastnosti	
Indukce nasycení B_s	0.77 T	Teplota krystalizace	520 °C
Maximální permeabilita μ_{\max}		Provozní teplota	90 °C
a) bez tepelného zpracování	290 000	Hustota	7.8 g/cm ³
b) žíhaná	-	Tloušťka	22 μ m
Elektrický odpor	136 $\mu\Omega$.m	Modul pružnosti	100 GPa
Magnetostrikční nasycení	<0.5 ppm	Pevnost v tahu	1 - 2 GPa
Curieova teplota	365 °C		

4.4.3 Metglas[®] 2826MB Magnetic Alloy

- Na bázi niklu, složení: Fe 40-50%, Ni 40-50%, Mb 5-10%, B 1-5%
- Aplikace: magneto-mechanické senzory, jádra pro vysokofrekvenční techniku, elektromagnetické stínění, terénní senzory
- Výhody: malá magnetostrikce, průměrná indukce nasycení, vysoká korozní odolnost, může být žíháno pro vyšší permeabilitu [10]



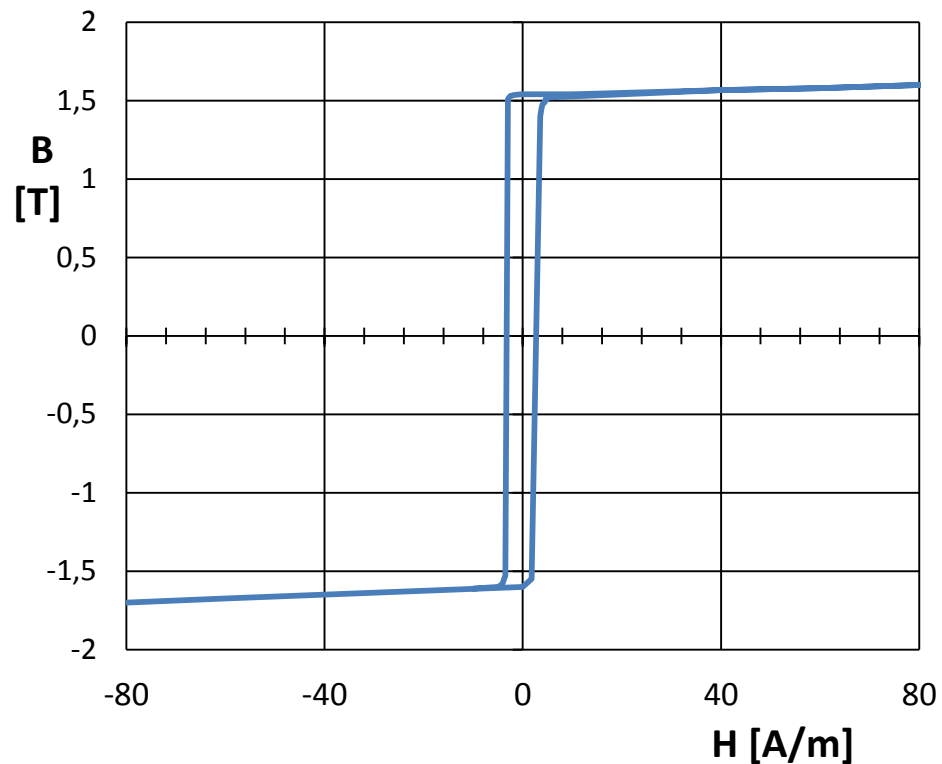
Obr. 4.4.3: Hysterezní křivka materiálu 2826MB [12]

Tab. 4.4.3: Tabulka parametrů magnetické slitiny 2826MB [10]

Elektromagnetické vlastnosti		Mechanické vlastnosti	
Indukce nasycení B_s	0.88 T	Teplota krystalizace	410 °C
Maximální permeabilita μ_{\max}		Provozní teplota	125 °C
a) bez tepelného zpracování	>50 000	Hustota	7.9 g/cm ³
b) žíhaná	800 000	Tloušťka	29 μm
Elektrický odpor	138 μΩ.m	Modul pružnosti	100 GPa
Magnetostrikční nasycení	12 ppm	Pevnost v tahu	1 - 2 GPa
Curieova teplota	353 °C		

4.4.4 Metglas® Magnetic Alloy 2605CO

- Na bázi železa, složení: Fe 65-85%, Co 15-25%, B 1-5%, Si 0.1-1%
- Aplikace: magnetické spínače a pulzní výkonová zařízení
- Výhody: nízká koercivita a vysoká indukce nasycení [10]



Obr. 4.4.4: Hysterezní křivka materiálu 2605CO [11]

Tab. 4.4.4: Tabulka parametrů magnetické slitiny 2605CO [10]

Elektromagnetické vlastnosti		Mechanické vlastnosti	
Indukce nasycení B_s	1.8 T	Teplota krystalizace	neuveдена
Maximální permeabilita μ_{\max}		Provozní teplota	125 °C
a) bez tepelného zpracování	120 000	Hustota	7.56 g/cm ³
b) žíhaná	400 000	Tloušťka	29 μm
Elektrický odpor	123 μΩ.m	Modul pružnosti	100 GPa
Magnetostrikční nasycení	35 ppm	Pevnost v tahu	1 – 1.7 GPa
Curieova teplota	415 °C		

4.5 Výrobci amorfních transformátorů a magnetických obvodů

Kovové skla mají dobré vyhlídky do budoucna a jejich potenciál si uvědomují i světové společnosti jako je Siemens Energy, HITACHI nebo ABB. Tyto korporace se zabývají jak vývojem, tak výrobou distribučních transformátorů s jádrem z amorfního kovu.

- Siemens Energy - produkuje transformátory na míru pro napětí 6 kV – 33 kV s výkonem 50 kVA – 2500 kVA pro distribuční aplikace nebo 2500 kVA – 6300 kVA pro speciální industriální použití, jednofázové i třífázové provedení. [14]
- HITACHI - Společnost se u transformátorů řady Super Amorphous X chlubí hlavně sníženými emisemi CO₂ a výrobou amorfního jádra z recyklovaného materiálu, což opět přispívá životnímu prostředí. Dále vyzdvihuje životnost těchto transformátorů 30 let. Vyrábí taktéž jednofázové i třífázové varianty olejových transformátorů na výkony od 50 kVA do 3000 kVA. [15]

Tab. 4.5: Srovnání parametrů materiálů pro jádra transformátorů firmy Hitachi [16]

Materiál	B _s [T]	Elektrický odpor [μΩ.cm]	Ztráty [W/kg]	Tloušťka [mm]
Křemičitá ocel	2.3	50	0.44	0.23
Amorfni kov	1.56	130	0.07	0.025

Ovšem firmy zabývající se výrobou transformátorů s jádrem z kovových skel jsou i v tuzemsku. Uvedeme si nyní jejich produkty a porovnání s parametry klasických transformátorů.

4.5.1 Power-Energo s.r.o.

Tato tuzemská společnost úzce spolupracuje s firmou ABB a je distributorem jejich olejových transformátorů s amorfním magnetickým jádrem. V následujících tabulkách je srovnání běžného olejového transformátoru s transformátorem, který má jádro z amorfního kovu. Na první pohled je vidět rozdíl ve ztrátách nakrátko, kde se diference zvětšuje spolu s výkonem transformátoru, což je hlavním důvodem rozmachu tohoto druhu magnetických obvodů. Ostatní parametry jsou velice podobné krom váhy, jenž je mnohem nižší u klasických transformátorů. Další nevýhodou transformátorů s amorfním jádrem je bezpochyby cena, která bude kvůli výrobním nákladům na samotný amorfni kov a následné zpracování jistě vyšší, než u standardních transformátorů. Bohužel jsem nenašel žádné konkrétnější hodnoty. Čím se naopak výrobci chlubí je energetická (a ekologická, emisemi

CO₂ se zabývají hlavně v HITACHI) stránka věci, kde úspory energie pohybují okolo 20-30% za rok provozu transformátoru. [13]

TAB. 4.6: Srovnání parametrů olejových transformátorů firmy ABB, napěťová hladina $U_m=25\text{ kV}$, převod 22/0.4kV [17],[18]

Typ transformátoru	S_n [kVA]	Typ ztrát	P_o [W]	P_k [W]	u_k [%]	délka [mm]	šířka [mm]	výška [mm]	r [mm]	m_{celk} [kg]	m_{olej} [kg]
Nízko ztrátový	250	A ₀ C _k	300	3250							
TNOSCT	250	C ₀ C _k	425	3250	4	1120	830	1465	520	1200	280
AMORPHOUS	250	nezařaditelné	130	2100	4	1490	890	1315	520	1770	330
Nízko ztrátový	400	A ₀ C _k	430	4600							
TNOSCT	400	C ₀ B _k	610	3850	4	1130	850	1495	670	1210	285
AMORPHOUS	400	nezařaditelné	195	3200	4	1540	920	1385	670	2250	375
Nízko ztrátový	630	A ₀ C _k	560	6750	6	1350	970	1555	670	1900	430
TNOSCT	630	C ₀ B _k	800	5600	6	1350	970	1555	670	1900	430
AMORPHOUS	630	nezařaditelné	270	4700	6	1861	998	1357	670	2484	461
Nízko ztrátový	800	A ₀ C _k	650	8400							
TNOSCT	800	C ₀ B _k	930	7000	6	1400	990	1700	820	2290	515
AMORPHOUS	800	nezařaditelné	325	6000	6	1960	1080	1415	670	2950	525
Nízko ztrátový	1000	A ₀ C _k	770	10500							
TNOSCT	1000	C ₀ B _k	1100	9000	6	1680	990	1720	820	2660	575
AMORPHOUS	1000	nezařaditelné	350	6550	6	1930	1070	1620	820	4250	705

Pozn.: S_n – jmenovitý výkon, P_o – ztráty naprázdno při teplotě 75°C, u_k – napětí nakrátko při teplotě 75°C, r – rozteč koleček, m_{celk} , m_{olej} - hmotnost celková a hmotnost oleje.

Typ ztrát je dán normou ČSN EN 50464-1, kde pro každý jmenovitý výkon jsou stanoveny tři třídy ztrát nakrátko (A₀, B₀, C₀) a dvě třídy ztrát naprázdno (A_k, B_k), kdy třídy A vyjadřují nejmenší ztráty.

Názorný příklad výpočtu finanční úspory při použití transformátoru s amorfním jádrem. Jednotka o výkonu 500 kW je v provozu 8760 hodin v roce. Spotřeba elektrické energie transformátoru za 1 rok provozu se dá vypočítat vzorcem:

$$E = T_p * (P_o + \left(\frac{P}{S}\right)^2 * P_k) \quad (4.5.1)$$

Kde T_p je doba provozu, P_o ztráty naprázdno, P je výkon transformátorem napájené jednotky, S je výkon transformátoru a P_k ztráty nakrátko. Pro porovnání úspor vypočítáme spotřebu energie pro nízko ztrátový transformátor a pro transformátor s jádrem z amorfního

kovu. Oba mají výkon $S_n=800$ kVA. Rozdílné jsou však jejich ztráty nakrátko a naprázdno. Hodnoty jsou vzaty z tabulky 4.6.

- Výpočet pro nízko ztrátový olejový transformátor ABB:

$$E = T_P * (P_o + \left(\frac{P}{S}\right)^2 * P_k) = 8760 * \left(650 + \left(\frac{650}{800}\right)^2 * 8400\right) = 54.3 \text{ MWh}$$

- Výpočet pro olejový transformátor společnosti ABB s amorfním jádrem:

$$E = T_P * (P_o + \left(\frac{P}{S}\right)^2 * P_k) = 8760 * \left(325 + \left(\frac{650}{800}\right)^2 * 6000\right) = 37.5 \text{ MWh}$$

Při ceně elektřiny 4 Kč za 1 kWh se dostáváme na roční úsporu 67 200 Kč jen za provoz transformátoru s amorfním jádrem. [18]

4.5.2 BEZ transformátory, a.s.

Slovenská firma s velkou tradicí, 110. Výročí oslavila v roce 2012 a působí i u nás díky obchodnímu zastoupení společností KOČÍ - VALÁŠEK s. r.o. Zabývá se výrobou suchých, olejových a amorfních transformátorů. Porovnání parametrů jejich výroby můžete vidět v tabulce 4.7 a 4.8

TAB. 4.7: Srovnání parametrů olejových transformátorů firmy BEZ transformátory, a.s., převod 22/0.4kV [19],[20]

Typ transformátoru	S_n [kVA]	Typ ztrát	P_o [W]	P_k [W]	u_k [%]	délka [mm]	šířka [mm]	výška [mm]	r [mm]	m_{celk} [kg]	m_{olej} [kg]
aTOHn 339/22	250	A_0B_k	300	2750	4	1130	745	1445	520	1165	250
TOHn 330/22.1	250	nezařaditelné	120	2500	4	1345	885	1290		1450	280
TOHn 359/22	400	A_0A_k	380	3000	4	1250	845	1490	670	1855	315
TOHn 350/22.1	400	nezařaditelné	150	4600	6	1485	895	1475		2095	370
TOHn 379/22	630	A_0A_k	490	4400	6	1300	880	1605	670	1990	300
TOHn 370/22.1	630	nezařaditelné	210	6500	6	1610	1040	1580		3000	560

TAB. 4.8: Srovnání parametrů olejových transformátorů firmy BEZ transformátory a.s., převod 10/0.4kV [21],[22]

Typ transformátoru	S_n [kVA]	Typ ztrát	P_o [W]	P_k [W]	u_k [%]	délka [mm]	šířka [mm]	výška [mm]	m_{celk} [kg]
TE 795/10	1000		2000	8750	6	1610	970	1475	2650
aTSE 790/10.1	1000	nezařaditelné	650	8800	6	1470	970	1485	3510

Pozn.: Poznávací znamení u amorfního transformátoru jsou jeho „nezařaditelné“ ztráty

5 Použití kovových skel mimo elektrotechniku

Díky zajímavé kombinaci mechanických vlastností našly kovová skla uplatnění i mimo elektrotechniku. Hlavně slitiny z titanu a hliníku následně dotovány vzácnými zeminami ideální pro konstrukční účely. Jejich důležitými vlastnostmi je vysoká tvrdost, mez v kluzu, mez pružnosti, vysoká odolnost vůči korozi a opotřebení.

- Nástroje z kovového skla

Díky korozní odolnosti mohou být použity jako součást čerpadel, filtrů nebo elektrod pracující v chemicky agresivních kapalinách. Dále nože, ve zdravotnictví jehly, pinzety, skalpel, u kterého je potřeba odolnost vůči korozi kvůli sterilizaci, vysoká pevnost a nemagnetičnost. Právě pevnost je u magnetického skla se základem z titanu nebo zirkonu 2x-3x větší než u nerezové oceli. Navíc mají vyšší pružnost. Některé slitiny navíc podléhají biodegradaci. V tomto ohledu nejlepší materiály se rozpouští rychlostí jednoho milimetru za měsíc. [24]

- Sportovní náčiní

Kovové sklo se použije jako konstrukční materiál u golfových holí, baseballových pálek, tenisových raket, lyží nebo snowboardů. V tomto oboru je důležitý přenos energie (z rakety na míček), a proto se využívá až 25x vyššího modulu deformační energie než u krystalických látek se stejným chemickým složením. Takle zvýšená schopnost akumulovat a vydat energii se projeví nárůstem vzdálenosti a síly, se kterou hráč míč odpálí (golf, baseball, tenis, atp.). [4]

- **Vojenské účely**

V tomto odvětví se kovová skla používají hlavně jako lehká pouzdra nebo jako stínění proti elektromagnetickým pulzům (EMP) a elektromagnetickému rušení (EMI). Munice ze slitin olova se při nárazu deformuje, střela z kovového skla se při nárazu roztrhá na střepiny, což zajistí větší průnik. Střela z kovového skla zpevněna wolframem je pak srovnatelně účinná se střelou z ochuzeného uranu. Dále jsou kovová skla využívána v kosmickém prostoru, kde NASA testuje odchyťování inertních plynů jako je helium a neon. [4],[23],[24]

- **Kovové pěny**

V roztaveném stavu jsou kovové skla řádově 2x-3x viskóznější než běžné slitiny, to usnadňuje jejich použití pro přípravu kovových pěn. Kovová pěna se tvoří probubláváním plynu přes taveninu a následným vstříknutím pěny do formy. Touto technologií byly připraveny amorfní slitiny s 99% pórovitostí. [4]

Závěr

Cílem předkládané bakalářské práce je vysvětlit celou základní problematiku kovových skel každému, alespoň lehce technicky vzdělanému člověku, který si jí přečte. Práce byla zpracovávána formou učebních skript, obsahující všechny důležité fakta o kovových sklech, které by neměla být opomenuta.

Přestože byl první materiál se strukturou kovových skel vyroben již v roce 1960, největší pokroky ve vývoji byly dosaženy během posledních let a na aplikační rozmach kovových skel se ještě čeká. Hlavní oblastí použití kovových skel jsou aktuálně transformátory. V transformátorovém jádře z amorfního kovu jsou díky výborným magnetickým vlastnostem kovového skla mnohem menší ztráty. Konkrétně ztráty nakrátko transformátoru, jsou v případě použití kovového skla místo standardní křemíkové oceli, až třikrát menší. Výhodné vlastnosti nemají kovová skla pouze z hlediska elektrotechniky, ale disponují i výbornými mechanickými vlastnostmi, například odolnost proti korozi, vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká mez pružností v kombinaci s vysokou pevností aj.

Kovová skla mají dvě velké nevýhody, první omezuje výrobu a druhá použití kovového skla. K vytvoření struktury kovového skla z taveniny jsou potřeba vysoké ochlazovací rychlosti. Nejpoužívanější metodou výroby je metoda rovinného lití, při které se dosahuje ochlazovacích rychlostí až $10^6 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$. V dnešní době je možno vyrobít pás s tloušťkou až několik milimetrů, celkově je však výroba omezená na velmi malé objemy, právě kvůli omezeným rychlostem ochlazení. Druhou velkou nevýhodou je, že se při překročení teploty krystalizace začne struktura kovového skla měnit z amorfní na krystalickou. Následkem této změny je samozřejmě ztráta vlastností, které kovové sklo díky amorfní struktuře mělo. To je důvodem, proč kovová skla nesmí v praxi překročit danou hodnotu teploty, znamená to tedy další zásadní omezení v jejich použití.

Na danou práci by se dalo navázat rešerší na téma kovových pěn. Amorfní slitiny s 99% pórovostí jsou blízkým tématem ke kovovým sklům. Společným prvkem jsou zde slitiny s vysokou schopností tvorby skla, které jsou až 3x viskóznější, což usnadňuje tvorbu zmíněných kovových pěn.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Konstrukční materiály* [online], Žilinská Univerzita v Žilině, 3. 4. 2014 dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/10/K-8.pred_.pdf>
- [2] WIKIPEDIE: otevřená encyklopedie. *Amorfní látka* [online]. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Amorfn%C3%AD_1%C3%A1tka>
- [3] WIKIPEDIA: the free encyclopedia. *Amorphous metal* [online]. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Amorphous_metal>
- [4] LOSERTOVÁ, Monika. *Progresivní materiály*. 1. vydání. Ostrava, 2012. 268 s. ISBN 978-80-248-2575-5. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://katedry.fmfi.vsb.cz/637/soubory/vyber-ze-skript-PgM.pdf>>
- [5] JANOVEC Jiří, CEJP Jiří, STEIDL Josef: *Perspektivní materiály*. 3. vydání. Praha : ČVUT, 2008. 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://www.strojar.com/upload/skripta/PM_perspektivni_materialy_skripta_2008.pdf>
- [6] BÁRTOVÁ, Barbora. VOJTĚCH, Dalibor. BARTA, Čestmír. BARTA, Čestmír junior. *Vlastnosti a význam rychle ztuhlých slitin hliníku*. Praha, ČVUT, 2002. 14 s. ISBN 80-01-02545-4. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_02/papers/146.pdf>
- [7] VOJTĚCH, Dalibor . BÁRTOVÁ, Barbora. VERNER, Jan. ŠERÁK, Jan. *Rychlé chlazení kovů – Význam, technologie a využití*. Chemické listy 98. 2004, s. 180-184. ISSN 1213-7103. 3. 4. 2014. dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2004_04_04.pdf>
- [8] THERMA FM: *Vinutá magnetická jádra z amorfních materiálů* [online]. © 2012, 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.thermafim.cz/amorfní-materialy>>
- [9] 3. 4. 2014 dostupné z: <http://fieldbus.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38mpm/MAPslide22_33.pdf>
- [10] METLAS: Magnetic materials. [online]. Metglas, © 2003-2014, 3. 4. 2014 dostupné z: <http://www.metglas.com/products/magnetic_materials/>
- [11] METGAS. *BH loop of Metglas pulse power cores* [online]. Metglas, © 2003-2014, 3. 4. 2014 dostupné z: <http://www.metglas.com/products/pulse_power_cores/dynamic_bh_loops.asp>
- [12] *Magnetostrictive type strain sensing means and methods. US 7913569* [online]. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.google.com/patents/US7913569>>
- [13] POWER-ENERGO. *Olejové distribuční hermetizované transformátory* [online]. Power-Energo s.r.o., © 2011. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.power-energo.cz/p109-transformatory-abb-olejove.html>>

- [14] SIEMENS. *Distribution transformers* [online]. Siemens AG, © 2002-2014. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/transformers/distribution-transformers/oil-immersed-distribution-transformers.htm#content=Details>>
- [15] HITACHI. *Transformers: Super amorphous X* [online]. Hitachi Industrial Equipment Systems Co.,Ltd. © 2002-2014. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.hitachi-ies.co.jp/english/products/trans/amo/index.htm>>
- [16] HITACHI. *Hitachi Amorphous Metal Core* [online]. Hitachi Industrial Equipment Systems Co.,Ltd. © 2002-2014. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://www.hitachi-america.us/ice/transformer/products/amorphous_core/>
- [17] POWER-ENERGO. *Olejové distribuční hermetizované transformátory* [online]. Power-Energo s.r.o., © 2011. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.power-energo.cz/p110-technicke-parametry-olejovych-transformatoru-abb.html>>
- [18] POWER-ENERGO. *Porovnání kumulativních nákladů na provoz transformátorů* [online]. Power-Energo s.r.o 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.power-energo.cz/download/IKyPW5osFW-5770-leaflet-amorfni-tr.pdf>>
- [19] BEZ TRANSFORMATORY. *Trojfázové olejové distribuční transformátory s medeným vinutím, výkon 250 - 630 kVA, 22 kV, s amorfním magnetickým obvodem* [online]. BEZ Group International, © 2009. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.bez.sk/transformatory/upload/File/amorf/AMO.pdf>>
- [20] KOČÍ – VALÁŠEK. *Olejové hermetizované transformátory*. Kočí a Valášek s.r.o. ..© 2014. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://www.transformatory.cz/nove-transformatory/kategorie/2>>
- [21] BEZ TRANSFORMATORY. *Trojfázový výkonový transformátor s liatou izoláciou, s medeným vinutím a magnetickým obvodom z amorfného plechu, 10 kV* [online]. BEZ Group International, © 2009. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://www.bez.sk/transformatory/upload/File/amorf/amotrafo_suche_sj.pdf>
- [22] BEZ TRANSFORMATORY. *Trojfázové transformátory s liatou izoláciou s medeným vinutím od 400 kVA do 2500 kVA 6;10 kV s normálnymi stratami* [online]. BEZ Group International, © 2009. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://www.bez.sk/transformatory/upload/File/suche/400_2500_kVA_s_normalnymi_stratami.pdf>
- [23] KRONDOL. *Kovová skla (Metallic glasses)* [online]. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://krondol.blogspot.cz/2010/05/kovova-skla-metallic-glasses_31.html>
- [24] MATERIÁLOVÁ VĚDA. *Kovová skla* [online]. 3. 4. 2014 dostupné z: <<http://materialovaveda.blogspot.cz/2011/06/kovova-skla.html>>
- [25] KONEČNÝ, Pavel. *Vliv plechů z amorfní oceli na prostupnost rušení transformátory* [online]. Brno, Vysoké učení technické, 2010. 3. 4. 2014 dostupné z: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27791>