

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Amorfní kovy a jejich aplikace v elektrotechnice**

**vedoucí práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**

**2012**

**autor: Zdeněk Urban**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zdeněk URBAN**  
Osobní číslo: **E11B0473P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Amorfni kovy a jejich aplikace v elektrotechnice**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište princip výroby amorfních kovů.
2. Uveďte vhodný tvar produktu pro použití v elektrotechnice, výrobce, problematiku výroby.
3. Charakterizujte magnetické vlastnosti vytipovaných materiálů.
4. Sestavte přehled současného světového stavu, konkrétní aplikace, vlastnosti.
5. Shrňte dosažené výsledky.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Bartoš, V., Skala, B.: Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU, Plzeň 2002
2. Internet
3. Trinkewitz, Z.: Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1984

Vedoucí bakalářské práce:

**Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Tato bakalářská práce je zaměřena na řešení výroby amorfních kovů, které jsou stále častěji používány pro své elektromagnetické vlastnosti při konstrukci distribučních a dalších typů transformátorů. Dále jsou uvedeny výrobci zabývající se touto problematikou a jiná další odvětví, kde se můžeme s amorfními kovy setkat.

## **Klíčová slova**

Amorfni kovy, metoda rovinného lití, distribuční transformátory, magneticky měkké materiály.

## **Amorphous Metal and its Utilization in Electrical Engineering**

### **Annotation**

This Bachelor's is focused on the solution the production of amorphous metals, that is more and more often used for their electromagnetic properties by the construction and another distribution transformers . Next, manufacturers of dealing with this issue are mentioned and another other sectors, where we can meet with amorphous metals.

### **Key words**

Amorphous metals, planer flow casting, distribution transformers, magnetically soft materials.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 7.6.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mě jak morálně, tak finančně během celého studia podporovali, a všem vyučujícím, kteří se na mém vzdělání na ZČU podíleli.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 PRINCIP VÝROBY AMORFNÍCH KOVŮ</b> .....	<b>11</b>
1.1 HISTORIE VZNIKU AMORFNÍCH KOVŮ .....	11
1.2 VÝZNAMNÉ PRŮMYSLOVÉ TECHNOLOGIE RYCHLÉHO CHLAZENÍ .....	11
1.2.1 Atomizace tavenin tlakovým médiem .....	12
1.2.2 Metoda rovinného lití ( <i>melt spinning</i> ).....	12
1.2.3 Nástřík natavené kovu na substrát .....	14
1.2.4 Nativování tenkých kovových vrstev.....	14
<b>2 AMORFNÍ KOVY V ELEKTROTECHNICE</b> .....	<b>14</b>
2.1 APLIKACE AMORFNÍCH KOVOVÝCH SLITIN V ELEKTROTECHNICE .....	14
2.1.1 Slitiny na bázi Fe .....	15
2.1.2 Slitiny na bázi FeNi.....	15
2.1.3 Slitiny na bázi Co.....	15
2.2 TVARY JADER TRANSFORMÁTORŮ .....	16
2.2.1 Toroidní jádra.....	16
2.2.2 Dělená C jádra.....	16
2.2.3 Jádra UNICORE.....	16
2.3 VÝROBCI DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ A MAGNETICKÝCH OBVODŮ .....	17
2.4 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ .....	17
2.4.1 Porovnání technických parametrů třífázových distribučních transformátorů s měděným vinutím o výkonu 250kVA/22kV .....	18
2.4.2 Porovnání technických parametrů třífázových distribučních transformátorů s měděným vinutím o výkonu 1000kVA/10kV .....	19
2.5 PROBLEMATIKA AMORFNÍCH KOVŮ .....	20
<b>3 AMORFNÍ MAGNETICKY MĚKKÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>20</b>
3.1 MATERIÁLY FIRMY METGLAS.....	20
3.1.1 Magnetická slitina 2705M .....	21
3.1.2 Magnetická slitina 2605 S3A .....	21
3.1.3 Magnetická slitina 2826MB.....	22
3.1.4 Magnetická slitina 2714A .....	22
3.1.5 Magnetická slitina 2605 SA1 .....	23
Tab. z [8] Obr. z [8] .....	23
3.1.6 Magnetická slitina 2605CO .....	23
<b>4 JINÁ VYUŽITÍ AMORFNÍCH KOVŮ</b> .....	<b>24</b>
4.1 VE ZDRAVOTNICTVÍ.....	24
4.2 VE SPORTU.....	24
4.3 PRO VOJENSKÉ ÚČELY .....	25
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>26</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>27</b>



## Úvod

Kovy jako materiály jsou všude kolem nás, známe je již dlouhá tisíciletí a jejich aplikaci jsme v mnoha disciplínách dotáhli na neuvěřitelnou úroveň. Přesto však řada vlastností kovů, zvláště mechanických, může být překonána jinými materiály. Mezi jedny takové patří amorfni kovy. Kovová skla našla své uplatnění jako konstrukční materiál, tak i jako materiál využívaný v elektrotechnice pro své elektromagnetické vlastnosti. Amorfni kovy stále na svůj aplikační boom čekají, jelikož i při dnešních technologiích nejsme schopni vyrobit kusy tlustší než desítky milimetrů. Limitujícím je pro nás schopnost rychlost ochlazení.

Práce je rozdělena do čtyř částí. První se zabývá nejrozšířenějšími metodami, jak můžeme dosáhnout výroby kovových skel. Druhá část je zaměřená na využití amorfni kovů v elektrotechnice. Přiblížíme si, jaké nejčastější slitiny se v tomto odvětví používají, výrobce kteří se v této oblasti pohybují a porovnáme transformátory, kde jeden má magnetický obvod tvořen z amorfni kovů a druhý z klasických transformátorových plechů. Třetí část se bude zabývat vytipovanými magnetickými materiály. Čtvrtá, poslední část, ukáže další využití kovových skel i mimo oblast elektrotechniky.

## Seznam symbolů a zkratk

RC .....	Rychlá solidifikace
T <sub>s</sub> .....	teplota skelného přechodu [°C]
T <sub>L</sub> .....	Teplota liquidu [°C]
T <sub>x</sub> .....	Teplota krystalizace [°C]
B <sub>s</sub> .....	magnetická indukce nasycení [T]

# 1 Princip výroby amorfních kovů

## 1.1 Historie vzniku amorfních kovů

První kovové sklo bylo zaznamenáno v California Institute of Technology v roce 1960. Jednalo se o slitinu  $Au_{75}Si_{25}$  a na jejím objevu se podíleli W.Klement Jr. a Pol Duwez. Aby se zabránilo krystalizaci, museli být slitiny kovů chlazeny velmi rychle  $10^6$  K/s. Důležitým důsledkem toho bylo, že kovová skla se mohly vyrábět pouze v omezeném množství forem a to buď jako pásky, folie nebo dráty. Tyto formy měli potřebně malou jednu ze stran, aby bylo dosaženo potřebné rychlosti ochlazování. V důsledku toho, byly kovové vzorky s několika výjimkami omezeny na tloušťku menší než sto mikrometrů. [1]

V roce 1979 H. Liebermann a C. Graham vyvinuli novou metodu výroby tenké pásky z amorfního kovu při využití podchlazeného rychle se točícího kola. Touto metodou byla vyrobena slitina železa, niklu, fosforu a bóru známá jako Metglas. Komerčně se používá pro nízké ztráty energie distribučních transformátorů. Metglas 2605 se skládá z 80% železa a 20% bóru, curieova teplota je  $373^{\circ}C$  a magnetická saturace dosahuje 1,56T.

Počátkem roku 1980 skleněné ingoty s průměrem 5mm, byly vyrobeny z 55% slitiny palladia, 22,5% olova a 22,5% antimonu. [1]

Po roce 1990 byly vyvinuty nové slitiny, které nepotřebují ochlazení o tak vysoké teplotě. Jedná se o takzvané „bulk“ amorfni slitiny. Jednoduchým litím do kovových forem lze dosáhnout tloušťky až několika centimetrů. Tyto slitiny obsahují mnoho různých prvků, často čtyři nebo více a jsou tvořeny na bázi zirkonu a palladia. Slitiny na bázi železa, titanu, mědi a hořčíku jsou také velmi známé. K zamezení krystalizace využívají fenomén zvaný „confusion“ efekt. Při dostatečně rychlém ochlazení se velké množství prvků nedokáže zkoordinovat do rovnovážného krystalického stavu. [1]

V roce 2004 se podařilo dvou skupinám vyrobit amorfni ocel, která není při pokojové teplotě magnetická a je výrazně silnější než konvenční oceli. [1]

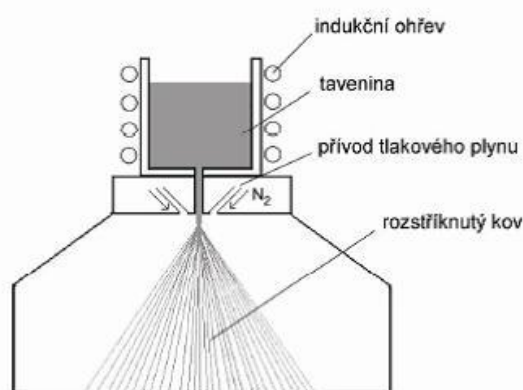
## 1.2 Významné průmyslové technologie rychlého chlazení

V praxi lze dosáhnout vysokých ochlazovacích rychlostí pomocí řady metod, z nichž však jen některé našly širší průmyslové uplatnění. Všechny metody mají jeden společný problém: vysokých ochlazovacích rychlostí dosahujeme jen v relativně omezených objemech tavenin. Znamená to, že součástí technologie zpracování rychle ztuhlých slitin bývá velmi často proces jejich kompaktizace do žádaného tvaru, např. lisování nebo extruze. [2]

V současnosti v průmyslové praxi vévodí zejména čtyři technologie rychlého chlazení kovových tavenin: 1. Atomizace tavenin tlakovým médiem, 2. Rovinné lití, 3. Nástřík roztaveného kovu na substrát a 4. Natavování tenkých povrchových vrstev. [2]

### 1.2.1 Atomizace tavenin tlakovým médiem

Atomizace tavenin je metoda využívaná pro výrobu kovových prášků a je tedy úzce spjata s technologií práškové metalurgie. Roztavená tavenina pomocí indukčního ohřevu proudí otvorem mezi trysky tlakového plynu a následně je rozstříknuta na drobné kapky. Jako nejčastější tlakové médium se používá vzduch, voda a inertní plyny např. dusík, helium a argon. Inertní plyny se používají, aby se na povrchu kapek nevytvářela nežádoucí oxidační vrstva.



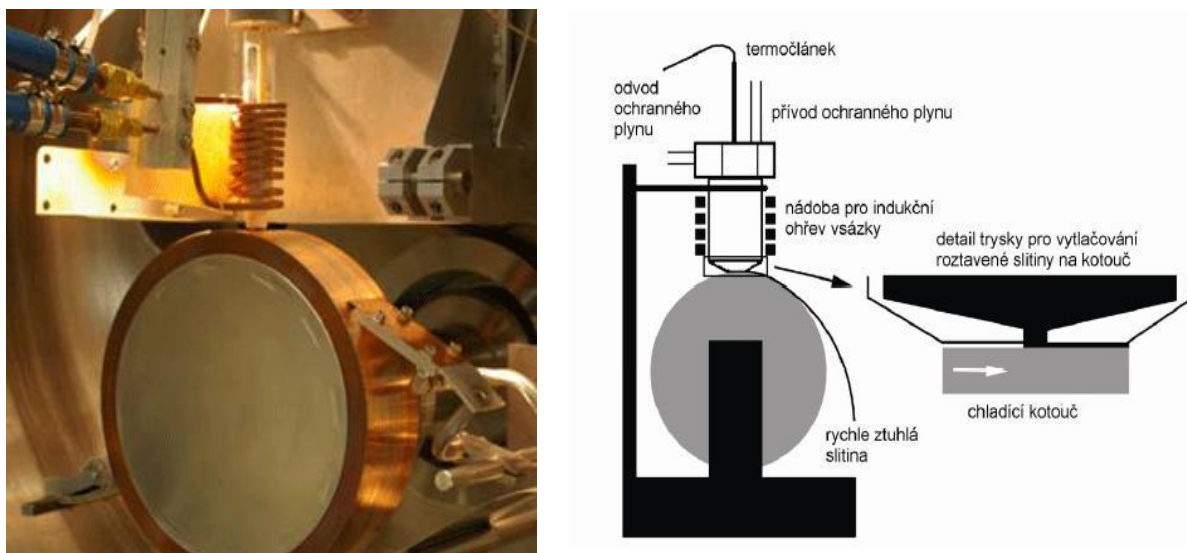
*Obr. 1.2.1 Schématické znázornění procesu atomizace taveniny tlakovým plynem [2]*

Rychlost ochlazení se pohybuje v rozmezí od  $10^3$ - $10^5$  K.s<sup>-1</sup>. Vzniklý prášek bývá charakterizován určitým rozmezím velikostí částic. Velikost částic závisí na povrchovém napětí výchozí taveniny, tlaku plynu a viskozitě. Metoda se využívá na výrobu širokého spektra prášků ocelí, slitin mědi, lehkých slitin, niklu atd. Pro získání požadovaného tvaru součásti jsou prášky kompaktizovány. Pro tyto účely byla vyvinuta řada metod, jako je slinování, extruze, lisování, izostatické lisování za tepla a další. Oproti konvenčním metalurgickým postupům, jako je např. kokilové lití s následným kováním, se výrobky získané technologií práškové metalurgie vyznačují rovnoměrnější a jemnější strukturou. To má za následek znatelné zvýšení pevnosti, houževnatosti, odolnosti proti oděru, únavové životnosti a dalších vlastností. [2,3]

### 1.2.2 Metoda rovinného lití (melt spinning)

Metoda rovinného lití je široce používána, jelikož je snadno proveditelná a ochlazovací rychlosti jsou vyšší než u ostatních technik. Rychlost ochlazení se pohybuje v řádu  $10^4$ - $10^6$  K.s<sup>-1</sup>. Při tomto procesu je roztavená tavenina vytlačena plynem na povrch pohybujícího se substrátu nejčastěji rotujícího kotouče. Výsledkem je rychle ztuhlá, nekonečná tenká páska kovu. Podle tvaru a vzdálenosti trysky lze proces „melt spinning“ rozdělit na dvě uspořádání. [2,3]

- **Chill block melt spinning** (CBMS) – v tomto případě má tryska kruhový profil a její vzdálenost od substrátu je několik milimetrů
- **Planer flow casting** (PFC) = rovinné lití – při této metodě má tryska obdélníkový otvor a vzdálenost trysky od rotujícího kotouče je menší než 1mm. [3]



Obr. 1.2.2 Schématické znázornění metody rovinného lití (planar flow casting) [2]

Vysoké nároky jsou kladeny zejména na materiál chladicího kotouče. Je nutné, aby se vyznačoval vysokou tepelnou vodivostí, která zásadně ovlivňuje rychlost ochlazování kovu. Dále je nutné, aby materiál byl dostatečně pevný, jelikož obvodová rychlost v okamžiku chlazení dosahuje rychlosti více než  $28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jako ideální materiál se jeví z pohledu vodivosti čistá měď, která však nevyhovuje z důvodu odolnosti proti oděru a pevnosti. Z toho důvodu se používají nízkolegované slitiny mědi. [2]

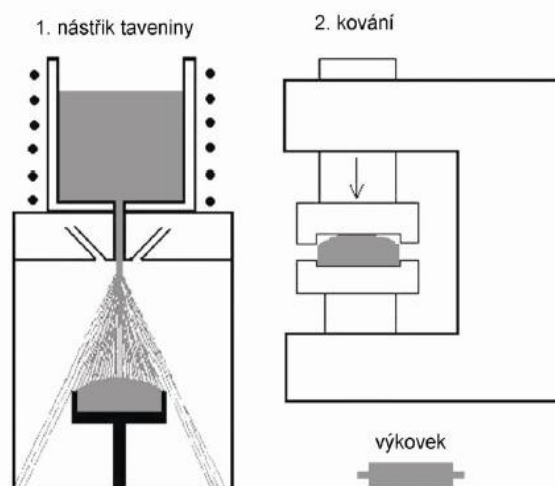
Technologie rovinného lití v této době dominuje na trhu s amorfními slitinami magneticky měkkých materiálů. Je využívána na výrobu magnetických jader transformátorů, snímacích hlav, měničů atd. Slitiny jsou na bázi železa, kobaltu nebo niklu a jsou legované obsahy např. boru, křemíku, fosforu. [2]



Obr. 1.2.2. Pásek rychle ztuhlé slitiny AlNi20 [2]

### 1.2.3 Nástřik natavené kovu na substrát

Na vhodný substrát je nastříkán roztavený kov a tím získáme tuhý polotovar, který je dále zpracováván kováním nebo extruzí. Díky rychlému zchlazení tenké nastříkané vrstvy je struktura materiálu jemná a rovnoměrná. To nám umožňuje zpracovávat slitiny s vysokými obsahy legujících prvků. Do proudu tavení je také možno přidávat krátká vlákna. Pokud je tak učiněno, vzniká kompozitní materiál, jenž může být vystaven náročnějším podmínkám. Této formy metody se využívá např. v automobilovém průmyslu, který ji využívá pro části spalovacích motorů (písty, vložky válců atd.). Používají se přitom slitiny hliníku, vyztužené krátkými vlákny křemíku s uhlíkem pro navýšení odolnosti proti opotřebení. [2]



Obr. 1.2.3. Schématické znázornění technologie nástřiku taveniny na substrát s následným kováním [2]

### 1.2.4 Natavování tenkých kovových vrstev

Technologii natavování tenkých kovových vrstev využíváme k modifikaci povrchu již vyrobené součásti. K natavování využíváme laser nebo elektronový paprsek. Modifikací povrchu docílíme změny vlastností materiálu. Snahou je zvýšení tvrdosti, ořezuvzdornosti, korozní odolnosti atd. [2]

## 2 Amorfní kovy v elektrotechnice

### 2.1 Aplikace amorfních kovových slitin v elektrotechnice

Amorfní kovové slitiny jsou nejvýznamněji využívány v elektrotechnice, díky jejich mimořádným magnetickým vlastnostem. Při použití amorfních materiálů na bázi Fe-Si-B na jádra transformátorů, dochází oproti klasickým ferritickým transformátorovým plechům až k osminásobným úsporám energie. [5]

Nabízený sortiment, magneticky měkkých materiálů, nejčastěji vychází z tří hlavních typů slitin. Slitin z Fe, Fe-Ni a Co. Tomuto pořadí odpovídá i výše prodejní ceny. [5]

Amorfni kovy se kromě využití pro transformátory dále využívají v oblasti točivých strojů, magnetických zesilovačů, záznamových a čtecích hlav pro magnetický záznam, čidla teploty, tlaku, stínění kabelů atd. [5]

### 2.1.1 Slitiny na bázi Fe

Obsahují levné suroviny, jako je např. Fe, Si, B a C a vyznačují se velkou teplotní stabilitou (největší ze všech amorfni kovů) a vysokou hodnotou indukce nasycení  $B_s$  při nízkých ztrátách. [6]

Díky těmto parametrům a nízké ceně, jsou tyto materiály určeny k výrobě magnetických obvodů pro distribuční a výkonové transformátory, které požadují vysokou permeabilitu při nízkých ztrátách a nízkých cenách. Pokud přidáme „Co“ do těchto materiálů dosáhneme extrémně vysokých hodnot indukce nasycení  $B_s$  až 1,8T při  $\mu_{\max} = 400\,000$ . Dále se používají pro konstrukci elektrických strojů, kde požadujeme snížení hmotnosti při vysokých magnetických hodnotách (pro tlumivky, proudové a výkonové transformátory apod.). [6]

Slitiny na bázi Fe vykazují také velmi nízké magnetizační ztráty i při kmitočtech kolem nebo nad 1Mhz. Mají větší permeabilitu  $\mu$  a magnetickou indukci  $B_s$  než u feritů. [6]

### 2.1.2 Slitiny na bázi FeNi

Z této slitiny vyrobené magnetické obvody mají střední hodnotu indukce nasycení  $B_s$  v rozmezí 0,8 až 1T a velmi vysokou permeabilitu až  $8 \cdot 10^5$ . Počáteční permeabilita  $\mu$  se pohybuje v rozmezí od 5000 do 20000. Slitiny se používají ke konstrukci elektrických strojů, kde je vyžadována vysoká permeabilita. [6]

### 2.1.3 Slitiny na bázi Co

Magnetické obvody z této slitiny mají velmi vysokou počáteční i maximální permeabilitu. Oproti materiálům na bázi Fe mají nižší hodnotu indukce nasycení  $B_s$  v rozmezí od 0,5 do 0,8T. Dále se vyznačují vysokou teplotní stabilitou, odolností proti korozi a necitlivostí na mechanické namáhání. Díky těmto všem vlastnostem mají široké uplatnění. Zejména jsou vhodné v omezovačích přepětí, tlumivky, odrušovací technika pro stínění apod. [6]

## 2.2 Tvary jader transformátorů

Jádra transformátorů jsou velmi důležitou součástí pro výrobu transformátorů a na jejich jakosti závisí výsledné parametry magnetického obvodu. Proto jsou amorfnní kovy nejčastěji využívány při stavbě nových jader transformátorů. Při stavbě se používá amorfnní páska, která může být různých šířek a tloušťek. Šířka pásy se pohybuje v rozmezí od 10 do 500 mm a tloušťka v mezích od 0,2 do 0,3 mm. S amorfnními jádry se můžeme setkat v mnoha podobách např.: [5, 6]

### 2.2.1 Toroidní jádra

Toroidní jádra jsou navinutá do předem specifikovaného kruhového nebo jiného tvaru. Můžou být různých poloměrů a výšek. Mohou mít sraženou vnitřní a vnější hranu. Mezi jejich přednosti patří uzavřený magnetický tok, nízké magnetické ztráty, nízká váha, kompaktní rozměry a nízká hlučnost. Hodí se pro měřicí transformátory, induktoři, měniče atd. [10]



Obr. 2.2.1 Toroidní jádra [10]

### 2.2.2 Dělená C jádra

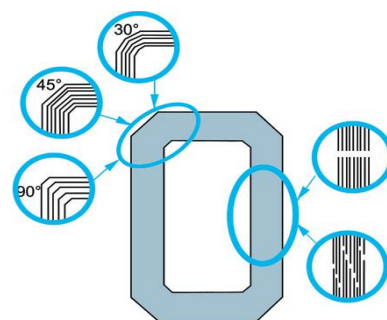
Mají tvar lépe přizpůsobený průběhu magnetického indukčního toku. Lépe využívají struktury zrna než ve srovnání s jádry, které se skládají z plechů různých tvarů. Dělená jádra mohou mít tvar kulatý, oválný, nebo pravoúhlý. Mezi výhody patří snadné sestavování, nízká hlučnost, nízké měrné ztráty a úspory použité mědi. [10]



Obr. 2.2.2 Dělená C jádra [10]

### 2.2.3 Jádra UNICORE

Jádra UNICORE spojují všechny výhody C jader. Vyznačují se nízkými měrnými ztrátami, zjednodušenou konstrukcí, úspory mědi při stavbě transformátoru atd. Při konstrukci se dají použít staré typy kostřiček, tudíž nejsou nutné změny v konstrukci magnetického obvodu. [10]



Obr. 2.2.3 Jádra UNICORE [10]



## 2.3 Výrobci distribučních transformátorů a magnetických obvodů

Pro své unikátní elektromagnetické vlastnosti a perspektivní vyhlídky do budoucna se výzkumem zabývá několik nadnárodních společností na světě. Mezi nejznámější výrobce transformátorů s magnetickým obvodem s amorfních slitin patří: [4]

- **SIEMENS**

Siemens dodává provedení na míru, splňující veškeré požadavky na výkon, napětí, ztráty, způsob provozu, hlučnost, připojovací techniku, způsob chlazení, transport a instalaci. Vzhledem k požadavkům podle místa použití mohou být v provedení jako plné nebo úsporné transformátory, ve třífázové nebo jednofázové verzi, pro výkony od 2 MVA do více než 1000 MVA a napětí do 1500 kV. [4]

- **HITACHI**

Firma Hitachi nabízí širokou škálu energetických zařízení. Kombinace moderní technologie a dlouholeté zkušenosti výroby transformátorů je zárukou nejvyšší úrovně kvality a výkonu v celém světě. Uplatněním amorfni materiál k transformátoru jádra pomocí moderních technologií, je možné dosáhnout vysoké účinnosti a úspor energie, které budou i nadále růst v průběhu let. Amorfni jádro je vyrobeno z recyklovatelného materiálu, což dále snižuje dlouhodobý dopad na naše životní prostředí. [4]

- **BEZ TRANSFORMÁTORY a.s.**

BEZ, jsou schopni navrhnout a vyrobit atypický transformátor ve vyhotovení dle požadavků zákazníka. Např. transformátory pro usměřovače, pecové transformátory, transformátory s chlazením atd. Tyto transformátory mají průměrnou životnost 25 - 30 let. [4]

- **THERMA FM, s.r.o.:**

český výrobce magnetických obvodů pro konstrukci magnetických obvodů menších výkonů. [4]

## 2.4 Porovnání parametrů

Z dále uvedených tabulek je patrné, že transformátory z amorfni plechů mají ztráty naprázdno třetinové. U větších výkonů je rozdíl úspory ještě znatelnější. Oproti tomu jsou tyto transformátory těžší. V ostatních parametrech nejsou příliš velké rozdíly. [4]

### 2.4.1 Porovnání technických parametrů třífázových distribučních transformátorů s měděným vinutím o výkonu 250kVA/22kV



Obr. 2.4.1 Distribuční transformátor 250kVA/22kV [8]

#### Jádro z amorfniho plechu

Jmenovitý výkon	kVA	250
Typ	TOHn	330/22.1
Jmenovité vyšší napětí	V	22 000
Jmenovité nižší napětí	V	420/242
Frekvence	Hz	50
Skupina spojení		Dyn1
Ztráty naprázdno $P_0$	W	120
Ztráty nakrátko $P_k$	W	2 500
Napětí nakrátko $U_k$ 75°C	%	4
Izolační třída		A
Materiál vinutí VN/NN		Cu

#### Jádro z elektrotechnického plechu (Si)

Jmenovitý výkon	kVA	250
Typ	TOHn	339/22
Jmenovité vyšší napětí	V	22 000
Jmenovité nižší napětí	V	420/242
Frekvence	Hz	50
Skupina spojení		Dyn1
Ztráty naprázdno $P_0$	W	300
Ztráty nakrátko $P_k$	W	2 750
Napětí nakrátko $U_k$ 75°C	%	4
Izolační třída		A
Materiál vinutí VN/NN		Cu

#### Rozměry

Délka	mm	1 345
Šířka	mm	885
Výška	mm	1 290
Hmotnost	kg	1 450

#### Rozměry

Délka	mm	1 130
Šířka	mm	750
Výška	mm	1 530
Hmotnost	kg	1 370

#### Tolerance

Ztráty naprázdno $P_0$	
Ztráty nakrátko $P_k$	
Celkové ztráty	
Napětí nakrátko	

#### Tolerance

Ztráty naprázdno $P_0$	$P_0 \pm 0\%$
Ztráty nakrátko $P_k$	$P_k \pm 0\%$
Celkové ztráty	$(P_0 + P_k) \pm 0\%$
Napětí nakrátko	$U_k \pm 10\%$

Tab. 2.4.1 Srovnání parametrů transformátorů z elektrotechnického a amorfniho plechu o výkonu 250kVA [8]

## 2.4.2 Porovnání technických parametrů třífázových distribučních transformátorů s měděným vinutím o výkonu 1000kVA/10kV



Obr. 2.4.2 Distribuční transformátor 1000kVA/10kV [8]

### Jádro z amorfního plechu

Jmenovitý výkon	kVA	1 000
Typ	aTSE	790/10.1
Jmenovité vyšší napětí	V	10 000
Jmenovité nižší napětí	V	400/231
Frekvence	Hz	50
Skupina spojení		Dyn5
Ztráty naprázdno Po	W	650
Ztráty nakrátko Pk	W	8 800
Napětí nakrátko Uk 75°C	%	6
Izolační třída		F
Materiál vinutí VN/NN		Cu

### Rozměry

Délka	mm	1 470
Šířka	mm	970
Výška	mm	1 485
Hmotnost	kg	3 510

### Tolerance

Ztráty naprázdno Po	Po + 15%
Ztráty nakrátko Pk	Pk + 15%
Celkové ztráty	(Po + Pk) + 10%
Napětí nakrátko	Uk ± 10%

### Jádro z elektrotechnického plechu (Si)

Jmenovitý výkon	kVA	1 000
Typ	TE	795/10
Jmenovité vyšší napětí	V	10 000
Jmenovité nižší napětí	V	400/231
Frekvence	Hz	50
Skupina spojení		Dyn1
Ztráty naprázdno Po	W	2 000
Ztráty nakrátko Pk	W	8 750
Napětí nakrátko Uk 75°C	%	6
Izolační třída	kvA	F
Materiál vinutí VN/NN		Cu

### Rozměry

Délka	mm	1 610
Šířka	mm	970
Výška	mm	1 475
Hmotnost	kg	2 650

### Tolerance

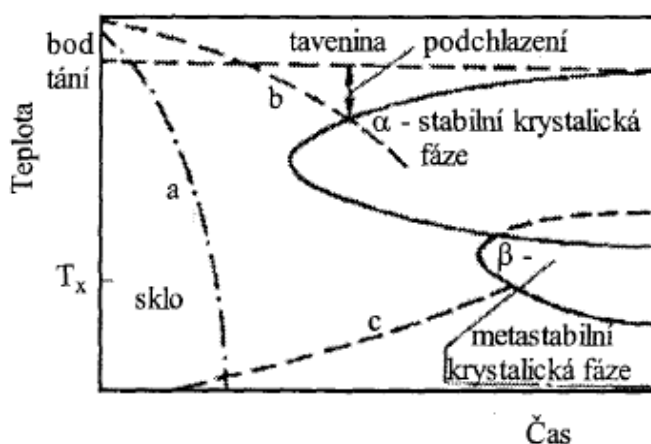
Ztráty naprázdno Po	Po + 15%
Ztráty nakrátko Pk	Pk + 15%
Celkové ztráty	(Po + Pk) + 10%
Napětí nakrátko	Uk ± 10%

Tab. 2.4.2 Srovnání parametrů transformátorů z elektrotechnického a amorfního plechu o výkonu 1000kVA [8]

## 2.5 Problematika amorfních kovů

Aby vznikla nestabilní nanokrystalická kovová fáze, musí se křivka chladnutí, která dosáhne kritických rychlostí solidifikace, vyhnout oblastem ohraničující existenci stabilní krystalické fáze (obr. 2.5). Čisté kovy do amorfního stavu vůbec převádět nejde, ani při rychlostech  $RC = 10^{10} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ochlazovací rychlostí musí být dosaženo teploty skelného přechodu  $T_s$ . Pod touto teplotou není už přerozdělování atomů možné a amorfní stav zůstává zachován. [5]

Všechny amorfni kovové slitiny jsou metastabilní. Při ohřevu amorfního stavu dochází při teplotě krystalizace  $T_x$  k přeměně na metastabilní krystalickou fázi. Toto odsklennění provází zhoršení vlastností kovových skel. Teplota krystalizace není stabilní, ale záleží na rychlosti ohřevu. [5]



Obr. 2.5 transformační diagram [5]

- a) Stabilní krystalická fáze  $R < R_c$
- b) Amorfni stav  $R > R_c$
- c) Matastabilní krystalická fáze po ohřevu

## 3 Amorfni magneticky měkké materiály

### 3.1 Materiály firmy Metglas

Metglas je americká firma a byla založena v osmdesátých letech dvacátého století. Zabývá se výrobou amorfni kovů pro elektrotechniku. Díky této dlouhodobé zkušenosti s kovovými skly si zde uvedeme některé její amorfni magneticky měkké materiály. [8]

### 3.1.1 Magnetická slitina 2705M

**Složení:**

Bor 1-5%  
Kobalt 75-85%  
Železo 1-5%  
Molybden 1-5%  
Nikl 1-5%  
Křemík 3-5%

**Aplikace:**

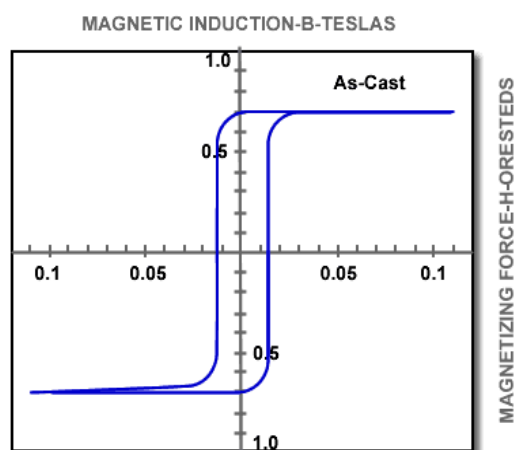
elektromagnetické stínění  
magnetické sensory  
vysokofrekvenční jádra

**Výhody:**

vysoká pevnost v tahu  
téměř nulová magnetostrikce

indukce nasycení (Bs)	0,77	T
max. permeabilita ( $\mu$ ):		
žíhaná	600 000	
bez tepelného zpracování	290 000	
elektrický odpor	136	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$
magnetostrikční nasycení	< 0,5	ppm
curie teplota	365	$^{\circ}\text{C}$
teplota krystalizace	520	$^{\circ}\text{C}$
hustota	7,8	$\text{g}/\text{cm}^3$
modul pružnosti	100 - 110	GPa
pevnost v tahu	0,9 - 2	GPa
Průběžné provozní teplota	90	$^{\circ}\text{C}$

Tab. z [8]



Obr. z [8]

### 3.1.2 Magnetická slitina 2605 S3A

**Složení:**

Bor 1-5%  
Chrom 1-5%  
Železo 85-95%  
Křemík 1-5%

**Aplikace:**

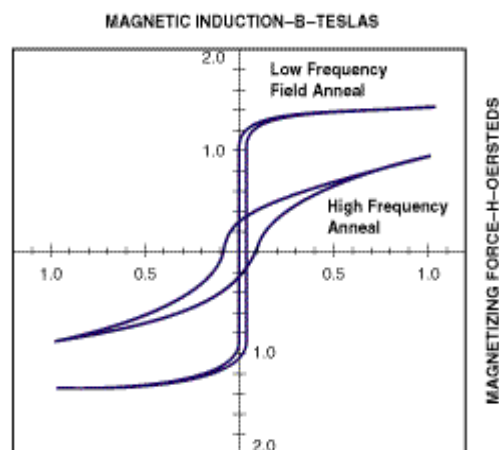
transformátory proudu  
vysokofrekvenční jádra

**Výhody:**

nízké ztráty při vysokých f.  
vysoká provozní teplota

indukce nasycení (Bs)	1,41	T
max. permeabilita ( $\mu$ ):		
žíhaná	35 000	
bez tepelného zpracování	> 20 000	
elektrický odpor	138	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$
magnetostrikční nasycení	20	ppm
curie teplota	358	$^{\circ}\text{C}$
teplota krystalizace	535	$^{\circ}\text{C}$
hustota	7,29	$\text{g}/\text{cm}^3$
modul pružnosti	100 - 110	GPa
pevnost v tahu	0,9 - 2	GPa
Průběžné provozní teplota	150	$^{\circ}\text{C}$

Tab. z [8]



Obr. z [8]

### 3.1.3 Magnetická slitina 2826MB

**Složení:**

Bor 1-5%  
 Železo 40-50%  
 Molybden 5-10%  
 Nikl 40-50%

**Aplikace:**

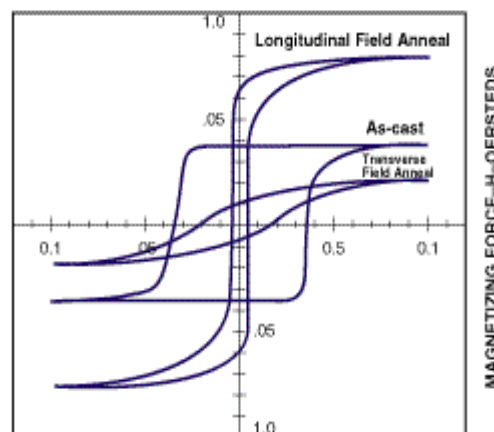
terénní sensory  
 vysokofrekvenční jádra  
 stínění

**Výhody:**

střední indukce nasycení  
 vyšší odolnost proti korozi  
 nižší magnetostrikce

indukce nasycení (Bs)	0,88	T
max. permeabilita ( $\mu$ ):		
žíhaná	800 000	
bez tepelného zpracování	> 50 000	
elektrický odpor	138	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$
magnetostrikční nasycení	12	ppm
curie teplota	353	$^{\circ}\text{C}$
teplota krystalizace	410	$^{\circ}\text{C}$
hustota	7,9	$\text{g/cm}^3$
modul pružnosti	100 - 110	GPa
pevnost v tahu	0,9 - 2	GPa
Průběžné provozní teplota	125	$^{\circ}\text{C}$

Tab. z [8]



Obr. z [8]

### 3.1.4 Magnetická slitina 2714A

**Složení:**

Bor 1-5%  
 Kobalt 75-90%  
 Železo 7-13%  
 Nikl 1-5%  
 Křemík 7-13%

**Aplikace:**

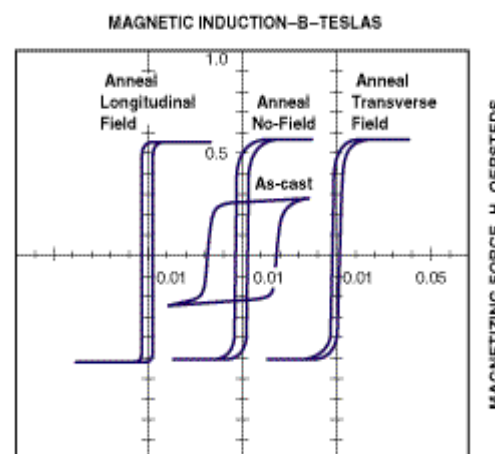
vysokofrekvenční transformátory  
 stínění  
 sensory  
 citlivé proudové transformátory

**Výhody:**

odolnost proti korozi  
 téměř nulová magnetostrikce  
 vysoká permeabilita  
 nízké ztráty v jádře

indukce nasycení (Bs)	0,57	T
max. permeabilita ( $\mu$ ):		
žíhaná	$1 \cdot 10^6$	
bez tepelného zpracování	> 80 000	
elektrický odpor	142	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$
magnetostrikční nasycení	< 0,5	ppm
curie teplota	225	$^{\circ}\text{C}$
teplota krystalizace	550	$^{\circ}\text{C}$
hustota	7,59	$\text{g/cm}^3$
modul pružnosti	100 - 110	GPa
pevnost v tahu	0,9 - 2	GPa
Průběžné provozní teplota	90	$^{\circ}\text{C}$

Tab. z [8]



Obr. z [8]

### 3.1.5 Magnetická slitina 2605 SA1

**Složení:**

Bor 1-5%  
Železo 85-90%  
Křemík 5-10%

**Aplikace:**

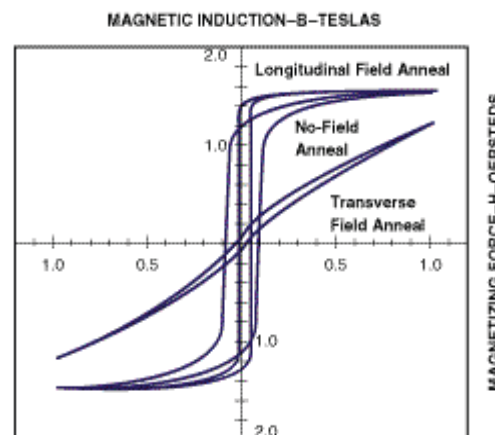
motory  
distribuční transformátory  
vysokofrekvenční tlumivky

**Výhody:**

vysoká permeabilita  
nízké ztráty v jádře

indukce nasycení (Bs)	1,56	T
max. permeabilita ( $\mu$ ):		
žíhaná	600 000	
bez tepelného zpracování	45 000	
elektrický odpor	130	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$
magnetostrikční nasycení	27	ppm
curie teplota	399	$^{\circ}\text{C}$
teplota krystalizace	508	$^{\circ}\text{C}$
hustota	7,18	$\text{g}/\text{cm}^3$
modul pružnosti	100 - 110	GPa
pevnost v tahu	0,9 - 2	GPa
Průběžné provozní teplota	150	$^{\circ}\text{C}$

Tab. z [8]



Obr. z [8]

### 3.1.6 Magnetická slitina 2605CO

**Složení:**

Bor 1-5%  
Kobalt 15-25%  
Železo 65-85%  
Křemík 0,1-1%

**Aplikace:**

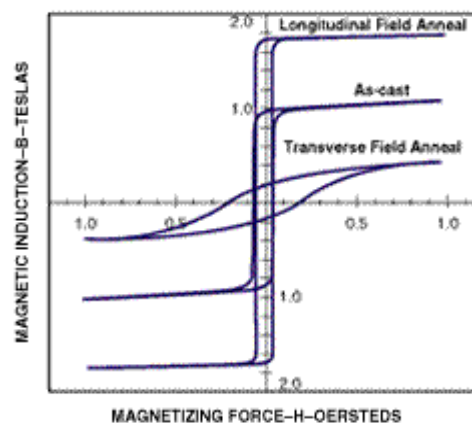
magnetické spínače  
pulzní výkonová zařízení

**Výhody:**

vysoká indukce nasycení  
nízká koeritivita

indukce nasycení (Bs)	1,8	T
max. permeabilita ( $\mu$ ):		
žíhaná	400 000	
bez tepelného zpracování	120 000	
elektrický odpor	123	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$
magnetostrikční nasycení	35	ppm
curie teplota	415	$^{\circ}\text{C}$
teplota krystalizace		$^{\circ}\text{C}$
hustota	7,56	$\text{g}/\text{cm}^3$
modul pružnosti	100 - 110	GPa
pevnost v tahu	1 - 1,7	GPa
Průběžné provozní teplota	125	$^{\circ}\text{C}$

Tab. z [8]



Obr. z [8]

## 4 Jiná využití amorfních kovů

Kovová skla se nevyužívají pouze v elektrotechnice. Pro své výborné mechanické vlastnosti našli, uplatní v mnoho oborech. Zejména jako konstrukční materiál. K tomu jsou předurčeny slitiny z titanu a hliníku, které jsou často dotovány prvky vzácných zemin a vyznačují se:

- Vysoká mez v kluzu
- Vysoká tvrdost
- Vynikající mez pružnosti
- Vysoká odolnost proti korozi
- Vysoká odolnost proti opotřebení

Dále se využívají amorfni slitiny v medicíně, ve sportu a pro vojenské účely. [10,11]

### 4.1 Ve zdravotnictví

V tomto odvětví se můžeme setkat se slitinami založené na základu z Titanu a Zirkonu. Tyto slitiny jsou velice odolné proti korozi, pružné a nemagnetické. V porovnání s Titanem a nerezovými oceli mají 2-3 krát vyšší pevnost. Amorfni slitiny předvedly také, velice dobré sterilizační schopnosti. [10,11]

Používají se pro široké spektrum nástrojů od skalpelů, přes inzulínové jehly až po implantáty. Ukázalo se, že některé slitiny podléhají biodegradaci. Dobré bio-kompatibilní materiály se rozpouští rychlostí cca 1 milimetr za měsíc (obsahují, Zn, Mg, Ca). [10,11]

### 4.2 Ve sportu

Člověk se neustále snaží posouvat své hranice a dosáhnout toho co se ještě nikomu nepodařilo. Dopomáhají mu k tomu nejmodernější technologie. Není proto divu, že i zde se prosazují amorfni kovy. Zejména pro svou pružnost a tím způsobený přenos energie. Proto se se nejčastěji používají jako: [10,11]

- Golfové hole
- Baseballové pálky
- Tenisové rakety
- Kola
- Lyže a snowboardy



### 4.3 Pro vojenské účely

Armáda měla vždy zájem o nejmodernější materiály. Amorfni kovy jsou proto ideálním materiálem. V armádním průmyslu se používají kovová skla zejména jako konstrukční a kompozitní materiál např: [11]

Kompozitní brnění	lehká pouzdra na arsenál	EMP a EMI stínění
Raketové komponenty	letecké spojovací prvky	Kosmické lodě
Tenkostěnné pouzdra	komponenty pro elektroniku	

Alloy	$\rho$ (g cc <sup>-1</sup> )	$Y$ (GPa)	$G$ (GPa)	$B$ (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (GPa)	$T_g$ (K)	$W/\Omega$ (GJ m <sup>-3</sup> )
1. Zr <sub>41.2</sub> Ti <sub>13.8</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>12.5</sub> Be <sub>22.5</sub>	5.9	95	34.1	114.1	0.352	1.86	618	0.06168
2. Zr <sub>48</sub> Nb <sub>8</sub> Ni <sub>12</sub> Cu <sub>14</sub> Be <sub>18</sub>	6.7	93.9	34.3	118	0.367	1.95	620	0.06739
3. Zr <sub>55</sub> Ti <sub>5</sub> Cu <sub>20</sub> Ni <sub>10</sub> Al <sub>10</sub>	6.62	85	31	118	0.375	1.63	625	0.0521
4. Zr <sub>57.5</sub> Nb <sub>5</sub> Cu <sub>15.4</sub> Ni <sub>12</sub> Al <sub>10</sub>	6.5	84.7	30.8	117.6	0.379	1.58	663	0.04927
5. Zr <sub>55</sub> Al <sub>10</sub> Co <sub>19</sub> Cu <sub>7</sub>	6.2	101.7	37.6	114.9	0.352	2.2	733	0.07825
6. Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	9.28	92	34.5	151.8	0.399	1.72	593	0.05213
7. Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	9.28	92	33	146	0.394	1.72	593	0.0545
8. Pd <sub>40</sub> Cu <sub>30</sub> Ni <sub>10</sub> P <sub>20</sub>	9.3	92	35.8	144.7	0.394	1.75	595	0.052
9. Pd <sub>60</sub> Cu <sub>20</sub> P <sub>20</sub>	9.78	91	32.3	167	0.409	1.7	604	0.05439
10. Pd <sub>40</sub> Cu <sub>40</sub> P <sub>20</sub>	9.3	93	33.2	158	0.402	1.75	548	0.05608
11. Ni <sub>45</sub> Ti <sub>20</sub> Zr <sub>25</sub> Al <sub>10</sub>	6.4	109.3	40.2	129.6	0.359	2.37	791	0.08494
12. Ni <sub>40</sub> Ti <sub>17</sub> Zr <sub>28</sub> Al <sub>10</sub> Cu <sub>5</sub>	6.48	127.6	47.3	140.7	0.349	2.59	862	0.08622
13. Ni <sub>60</sub> Nb <sub>35</sub> Sn <sub>5</sub>	8.64	183.7	66.32	267	0.385	3.85	885	0.13587
14. Ni <sub>60</sub> Sn <sub>6</sub> (Nb <sub>0.8</sub> Ta <sub>0.2</sub> ) <sub>34</sub>	9.24	161.3	59.41	189	0.357	3.5	875	0.12535
15. Ni <sub>60</sub> Sn <sub>6</sub> (Nb <sub>0.8</sub> Ta <sub>0.2</sub> ) <sub>34</sub>	9.8	163.7	60.1	197.6	0.361	3.58	882	0.12964
16. Cu <sub>64</sub> Zr <sub>36</sub>	8.07	92	34	104.3	0.352	2	787	0.07152
17. Cu <sub>46</sub> Zr <sub>54</sub>	7.62	83.5	30	128.5	0.391	1.4	696	0.03972
18. Cu <sub>46</sub> Zr <sub>42</sub> Al <sub>7</sub> Y <sub>5</sub>	7.23	84.6	31	104.1	0.364	1.6	713	0.0502
19. Pd <sub>77.5</sub> Cu <sub>6</sub> Si <sub>16.5</sub>	10.4	89.7	31.8	166	0.409	1.5	550	0.04301
20. Pt <sub>60</sub> Ni <sub>15</sub> P <sub>25</sub>	15.7	96.1	33.8	202	0.42	1.4	488	0.03525
21. Pt <sub>57.5</sub> Cu <sub>14.7</sub> Ni <sub>5</sub> P <sub>22.8</sub>	15.2	95.7	33.4	243.2	0.434	1.45	490	0.03827
22. Pd <sub>64</sub> Ni <sub>16</sub> P <sub>20</sub>	10.1	91.9	32.7	166	0.405	1.55	452	0.04466
23. MgGd <sub>10</sub> Cu <sub>25</sub>	4.04	49.1	18.6	46.3	0.32	0.98	428	0.03139
24. La <sub>55</sub> Al <sub>25</sub> Cu <sub>10</sub> Ni <sub>5</sub> Co <sub>5</sub>	6	41.9	15.6	44.2	0.342	0.85	430	0.02816
25. Ce <sub>70</sub> Al <sub>10</sub> Ni <sub>10</sub> Cu <sub>10</sub>	6.67	30.3	11.5	27	0.313	0.65	359	0.02233
26. Cu <sub>50</sub> Hf <sub>43</sub> Al <sub>7</sub>	11	113	42	132.8	0.358	2.2	774	0.07006
27. Cu <sub>57.5</sub> Hf <sub>27.5</sub> Ti <sub>15</sub>	9.91	103	37.3	117.5	0.356	1.94	729	0.06134
28. Fe <sub>61</sub> Mn <sub>10</sub> Cr <sub>4</sub> Mo <sub>6</sub> Er <sub>1</sub> C <sub>15</sub> B <sub>6</sub>	6.89	193	75	146	0.28	4.16	870	0.14027
29. Fe <sub>53</sub> Cr <sub>15</sub> Mo <sub>14</sub> Er <sub>1</sub> C <sub>15</sub> B <sub>6</sub>	6.92	195	75	180	0.32	4.2	860	0.14298
30. Au <sub>40.5</sub> Ag <sub>5.5</sub> Pd <sub>2.3</sub> Cu <sub>26.9</sub> Si <sub>16.3</sub>	11.6	74.4	26.5	132.3	0.406	1.2	405	0.03303
31. Au <sub>55</sub> Cu <sub>25</sub> Si <sub>20</sub>	12.2	69.8	24.6	139.8	0.417	1	348	0.02471

Tab. 4.3 Seznam kovových skel, různého složení spolu s uvedenými parametry,  $\rho$  - hustota (g.cm<sup>-3</sup>)  $Y$  - Youngův modul,  $G$  - modul pružnosti ve smyku,  $B$  - objemový modul,  $\nu$  - Poissonův koeficient,  $\sigma_y$  - mez pružnosti (elasticity),  $T_g$  - teplota skelné transformace a  $W/\Omega$  - potenciální energie spojená s plastickou deformací. Složení je uvedeno v atomárních procentech. [10]

## Závěr

Předložená práce se snaží přiblížit problematiku amorfních kovů. Od prvních pokusů s těmito materiály, kolem roku 1960 vývoj výrazně pokročil. Zatímco v 60. letech byly v amorfním stavu připravovány exotické slitiny, dnes již jsou vyráběna mnohatunová množství pro náročné aplikace.

V úvodu jsme se seznámili s několika výrobními postupy, kterými můžeme dosáhnout potřebných ochlazovacích rychlostí. K nejvyšším ochlazovacím teplotám, potřebným pro rychlou solidifikaci, dosáhneme metodou rovinného lití (planer flow casting). Tato metoda je nejvíce rozšířená a používá se na výrobu různě širokých amorfních pásků, které se následně využívají při konstrukci transformátorů, na zlepšení elektromagnetických vlastností. Zatímco kovová skla pro aplikace v elektrotechnice mají základ z Fe, Fe-Ni a Co, slitiny které se užívají jako konstrukční materiál, jsou nejčastěji na bázi Titanu, Hliníku a jsou dotovány vzácnými zeminami.

Přes všechny své výhodné vlastnosti jakými jsou: vysoká mez v kluzu, odolnost proti korozi, vysoká odolnost proti opotřebení, vynikají mez pružnosti, pevnost, některé dokonce podléhají biodegradaci, mají dvě velké nevýhody. První nevýhodou je, že při výrobě musíme dosahovat extrémně vysokých ochlazovacích teplot řádově  $10^6 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . To má za následek, že dokážeme současnými technologiemi dosáhnout u některých slitin, tloušťky několika málo centimetrů, častěji se ale pohybujeme v oblasti milimetrů. Druhou velkou nevýhodou je, že všechny amorfni kovy jsou metastabilní. Při překročení teploty krystalizace dochází ke změně z amorfního stavu na metastabilní krystalickou fázi. Toto odskelnění je doprovázeno zhoršením tolik opěvovaných vlastností kovových skel.

Neustále se rozšiřuje spektrum amorfních slitin. Tento vývoj jednoznačně naznačuje, že výzkum rychle ztuhlých slitin je perspektivním a rychle se rozvíjejícím metalurgickým oborem.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Amorphous metal: History. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 15.11.2005, 6.5.2012 [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Amorphous\\_metal](http://en.wikipedia.org/wiki/Amorphous_metal)
- [2] VOJTĚCH, Dalibor, Barbora BÁRTOVÁ, Jan VERNER a Jan ŠERÁK. *Rychlé chlazení kovů: význam, technologie a využití*. Praha, 2004. ISSN 0009-2770. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2004\\_04\\_04.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2004_04_04.pdf)
- [3] BÁRTOVÁ, Barbora, Jan VERNER, Dalibor VOJTĚCH, GEMPERLE, STUDNÍČKA a Marián ČERŇANSKÝ. *Studium fázového složení rychle ztuhlých hliníkových slitin*. Ostrava: TANGER, 2003. ISBN 80-85988-82-8. Dostupné z: [http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal\\_03/papers/171.pdf](http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_03/papers/171.pdf)
- [4] KONEČNÝ, Pavel. *VLIV PLECHŮ Z AMORFNÍ OCELI NA PROSTUPNOST RUŠENÍ TRANSFORMÁTORŮ*. Brno, 2010. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27791](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27791). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Josef Pavlík
- [5] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 8001041670, 9788001041673. Dostupné z: [http://www.strojar.com/upload/skripta/PM\\_perspektivni\\_materialy\\_skripta\\_2008.pdf](http://www.strojar.com/upload/skripta/PM_perspektivni_materialy_skripta_2008.pdf)
- [6] THERMA FM: Nanokrystalické materiály. *Thermafm: nanokrystalicke-materialy* [online]. © 2009, 19.01.2010 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.thermafz.cz/nanokrystalicke-materialy>
- [7] BEZ transformátory: výrobný program. *Bez: transformátory* [online]. BEZ Group International, © 2009 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.bez.sk/transformatory/index.php?goto=ho73CTpq&sekce=ho73CTpq&lng=CZ>
- [8] Metglas: Magnetic materials. *Metglas: dokument* [online]. Metglas, © 2003-2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: [http://www.metglas.com/products/page5\\_1\\_2.htm](http://www.metglas.com/products/page5_1_2.htm)
- [9] ArcelorMittal: Jádra transformátorů. *Technotron: AMT prubeh vyroby* [online]. 2, 5.7.2011 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: [http://www.technotron.cz/AMT\\_prubeh\\_vyroby\\_cz.aspx](http://www.technotron.cz/AMT_prubeh_vyroby_cz.aspx)
- [10] Materiálová věda: Kovová skla. *Materialovaveda.blogspot* [online]. 2011 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://materialovaveda.blogspot.cz/2011/06/kovova-skla.html>
- [11] Liquidmetal technologies: Applications. *Liquidmetal: applications* [online]. Liquidmetal Technologies, © 2012 [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://www.liquidmetal.com/applicatio>