VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MATERIÁLY PRO VÝROBU PRUŽIN

MATERIALS FOR SPRING FABRICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE DANIEL SERCEL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Daniel Sercel

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Materiály pro výrobu pružin

v anglickém jazyce:

Materials for Spring Fabrication

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu o materiálech pro výrobu pružin, charakteristika jednotlivých materiálů a popis jejich výhod a nevýhod. Zhodnocení vhodností použití různých materiálů na konkrétní průmyslové aplikace.

Cíle bakalářské práce:

1) Charakteristika materiálů pro výrobu pružin
2) Popis jednotlivých skupin pružinových materiálů
3) Použitelnost jednotlivých materiálů pro různé aplikace

Seznam odborné literatury:

1) PASTUCHOVOVÁ Ž. P., RACHŠTADT A. G. Pružinové slitiny mědi. vyd. 1. Praha, SNTL, 1986, 276 s.
2) ASM Handbook, Volume 01 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International.
Online version available at:
http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=3105&VerticalID=0
3) FREMUNT P., PODRÁBSKÝ T. Konstrukční oceli. 1. vyd. Brno, CERM, 1998, 267 s. ISBN 80-85867-95-8.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Němec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 13.11.2011

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá přehledem materiálů pro výrobu pružin, jejich charakteristikou a použitím pro jednotlivé průmyslové aplikace. Dále pak shrnuje možnosti tepelného a mechanického zpracování jednotlivých materiálů a dopad tohoto zpracování na strukturu a vlastnosti. Informace zpracované do této rešerše byly čerpány z dostupných literárních zdrojů.

Klíčové slova

pružiny, materiály, pružinové oceli, berylliové bronzy

Abstract - english:

This work deals with an overview of materials for the manufacture of springs, their characteristics and use for various industrial applications. Then summarizes the thermal and mechanical processing of different materials and the impact of treatment on structure and properties. I gathered information from available publications and worked in this research.

Key words - english:

springs, materials, spring steels,berrylium copper

Bibliografická citace mé práce:

SERCEL, D. *Materiály pro výrobu pružin.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury, uvedené v seznamu.

V Brně dne ……

podpis

Poděkování

Děkuji panu Ing. Karlu Němcovi Ph.D. za rady a pomoc, bez které by tato práce nevznikla.

Obsah

Úvod....9
1. Historie a základní rozdělení pružin....10
1.1 Základní charakteristika pružinových materiálů....10
2. Výpočty namáhání v pružinách....11
3. Pružinové oceli....13
3.1 Nelegované ušlechtilé oceli....13
3.2 Legované pružinové oceli....13
4. Tepelné zpracování pružinových ocelí....14
4.1 Patentování....14
4.2 Zušlechťování....14
5. Pružinové slitiny mědi....18
5.1 Pružinové slitiny mědi bez obsahu beryllia....18
6. Vliv tepelného zpracování na vlastnosti bronzů....20
6.1 Rozpouštěcí žíhání....20
6.2 Stárnutí....21
6.3 Počáteční stadia stárnutí....22
6.4 Stárnutí za vysokých teplot....23
6.5 Stupňovité stárnutí....24
7. Materiály do extrémního prostředí....27
7.1 Niklové superslitiny....27
7.2 Kobaltové superslitiny....27
7.3 Slitiny titanu....28
7.4 Materiály s tvarovou pamětí....28
Závěr....29
Seznam literatury....30

Úvod

Tato práce se zabývá přehledem materiálů pro výrobu pružin, jejich charakteristikou a použitím pro jednotlivé průmyslové aplikace. Vzhledem ke značnému rozšíření pružin v běžném životě je jejich výroba důležitou součástí průmyslu. V této práci jsou shrnuty základní poznatky o vlastnostech pružin a hlavně materiálů ze kterých jsou vyráběny. Cílem této práce je přinést stručný náhled na velmi komplexní problematiku pružinových materiálů a také jejich tepelného a mechanického zpracování pro dosažení lepších vlastností oproti nezpracovanému stavu.

1. Historie a základní rozdělení pružin

Pružina je objekt sloužící primárně k akumulaci mechanické energie. Dále pak může sloužit k tlumení rázů a chvění. Historicky prvním použitím akumulace energie byl vynález luku. Poté, v době Bronzové, vynalezl Ctesibius z Alexandrie metodu výroby bronzu s charakteristikou podobnou pružině. První spirálové pružiny se objevily v 15. století ve dveřních zámcích a o století později byli představeny první velké hodiny poháněné pružinou. Roku 1676 objevil Robert Hook závislost síly, kterou pružina působí, na velikosti jejího stlačení a závislost popisující pružné chování materiálu je po něm pojmenována jako Hookův zákon.

Pružiny je možné rozdělit podle několika kriterií:

- podle materiálu ze kterého jsou vyrobeny na pružiny kovové a pryžové
- podle typu namáhání – ohybem, krutem nebo kombinované
- podle charakteristiky na lineární, progresivní a degresivní
- podle technického provedení – šroubovité válcové, kuželové a zkrutné; listové, spirálové, pružnice, zkrutné tyče atd.

1.1 Základní charakteristika pružinových materiálů

Základní požadavky na vlastnosti pružinových materiálů jsou [1]:

- statické mechanické vlastnosti, zejména modul pružnosti, mez kluzu, pevnost v tahu a tvrdost
- dynamické vlastnosti, zejména únavovou pevnost a houževnatost
- odolnost vůči creepu, tedy proti časově závislé trvalé plastické deformaci nebo proti relaxaci napětí
- odolnost proti korozi
- pro aplikace v elektrotechnice může být požadována elektrická vodivost nebo magnetické vlastnosti

V současné době jsou nejrozšířenejšími materiály na výrobu pružin pružinové oceli a v menší míře pružinové slitiny mědi.

2. Výpočty namáhání v pružinách

Ke zjednodušení problematiky výpočtů pružin budou uvažovány pouze dva případy namáhání šroubovité válcové lineární pružiny. V prvním případě se zaměřením na namáháním tahem/tlakem.

Energie napjatosti v pružině je definována vztahem [2]:

$W=\frac{M_k^2.l}{2.\mathrm{G.J}_p}$ kde $M_k=F.r.cos\alpha$ $J_p=\frac{\pi.d^4}{32}$ $l=\frac{2.\pi.r.n}{\cos\alpha}$ takže po dosazení dostáváme vzorec

$$W=\frac{32.F^2 r^3.n.cos\alpha}{G.d^4} \quad (2.1)$$

kde W - energie napjatosti

F - zatěžující síla působící v ose pružiny tahem/tlakem

r - poloměr pružiny

n - počet závitů pružiny

α - úhel stoupání pružiny

G - modul pružnosti ve smyku

d - průměr drátu pružiny

posuv čela pružiny neboli stlačení či roztažení je poté získáno parciální derivací energie napjatosti podle zatěžující síly, viz. následující vztah

$$u=\frac{\partial W}{\partial F}=\frac{64.F.r^3.\cos\alpha.n}{G.d^4} \quad (2.2)$$

kde u - posuv čela pružiny

Ze vztahu 2.2 vyplývá, že pro velmi malé stoupání pružin, kde α se blíží nule, lze vypustit člen cos α, a po vytknutí síly F dostáváme charakteristiku pružiny, její poddajnost, případně tuhost, která je její převrácenou hodnotou. Zapsáno do vzorce to vypadá následovně

$u=c_P.F$ kde $c_P=\frac{64.\mathrm{r}^3.n}{G.d^4}$ (2.3)

kde c_P - poddajnost pružiny

Pro zatížení zkrutným momentem je energie napjatosti stejná jako ve vztahu 2.1, natočení čela pružiny poté definováno parciální derivací podle zatěžujícího momentu, viz. následující vztah

$$\varphi = \frac{\partial W}{\partial M} = \frac{128.M.r.\cos\alpha.n}{E.d^4} \quad (2.4)$$

kde φ - úhel natočení čel

M - zatěžující moment

E - modul pružnosti v tahu

Ze vztahu 2.4 vyplývá, podobně jako ze vztahu 2.2, že pro velmi malé stoupání pružin, kde α se blíží nule, lze vypustit člen cos α, a po vytknutí momentu M dostáváme charakteristiku pružiny, její poddajnost, případně tuhost, která je její převrácenou hodnotou. Zapsáno do vzorce to vypadá následovně

$$\varphi = c_p.M \text{ kde } c_P = \frac{128.\mathrm{r.n}}{E.d^4} \quad (2.5)$$

Ze vztahů 2.3 a 2.5 lze poté odvodit, že poddajnost pružiny závisí přímo úměrně na průměru pružiny a počtu závitů a nepřímo úměrně na materiálové charakteristice (dle namáhání) a průměru drátu. Proto u pružin, od nichž požadujeme velkou sílu při malé deformaci, volíme tlustší drát z materiálů, které mají vysoký modul pružnosti a méně závitů, než u pružin, od kterých požadujeme velkou deformaci při malé síle při stejném průměru pružiny.

3. Pružinové oceli

Vzhledem k namáhání pružin střídavým zatížením se po pružinové oceli požaduje vysoká mez kluzu a vysoká mez únavy. Zároveň je kladen požadavek na houževnatost kvůli dynamickému zatížení pružin a plastické deformaci při výrobě (zpravidla stáčení). Tyto požadavky jsou zajišťovány tepelným zpracováním nebo tvářením za studena. Používají se oceli ušlechtilé nelegované, nízkolegované a vysokolegované.

3.1 Nelegované ušlechtilé oceli

Jsou vhodné pro méně namáhané pružiny a pro použití za normální teploty kvůli malé prokalitelnosti a nízkým hodnotám mechanických vlastností. Používají se oceli třídy 12, u kterých je sníženo množství vměstků vhodnou technologií tavení. Dráty se obvykle patentují a táhnou za studena, pro větší průřezy je možno použít i zušlechťování po stočení. Obsah uhlíku je ovlivněn podle namáhání.

3.2 Legované pružinové oceli

Pro více namáhané pružiny nebo pro pružiny větších průřezů jsou voleny oceli legované – manganové, křemíkové, mangankřemíkové, chromkřemíkové, manganochromové a chromvanadové.

Oceli legované manganem mají zvýšenou prokalitelnost a mez kluzu. Křemík také zvyšuje mez kluzu, a také odolnost proti popouštění, zvyšuje však sklon k oduhličování a proto je vhodný u ocelí zušlechťovaných na vysokou pevnost. Pokud je obsah křemíku vyšší, tak tvoří při tváření za tepla křemičitany a ty zhoršují povrch vývalku. Obsah manganu se pohybuje od 0,9 do 1,2% a obsah křemíku od 1,5 do 1,9%. Dle ČSN jsou používany oceli 13 180 a 13 251. Pro zlepšení vlastností křemíkem a manganem byla vyvinuta komplexně legovaná manganokřemíková ocel 13 270, která je vhodná na listové pružiny.

Přídavek chromu zvyšuje prokalitelnost a odolnost proti popouštění. Kombinuje se s manganem (14160 a 14 262) a nebo křemíkem (14 182 a 14 260). Přidáním vanadu do manganchromové oceli vzniká ocel 15 230, u které lze mez únavy a odolnost proti opotřebení zvýšit nitridací. Pro nejvíce namáhané pružiny byly vyvinuty oceli 65 V a 53CrV. Pro práci za vyšších teplot je možno použít nástrojové oceli 19 720 a 19 721. Pro korozní prostředí jsou vhodné martenzitické oceli s 13% Cr a obsahem uhlíku mezi 0,25 a 0,45% (17 023 a 17 024). Dále je také možné pro tažení za studena použít austenitickou ocel 17 242 s obsahem uhlíku 0,15 až 0,25% a obsahem niklu minimálně 10%.

4. Tepelné zpracování pružinových ocelí

4.1 Patentování

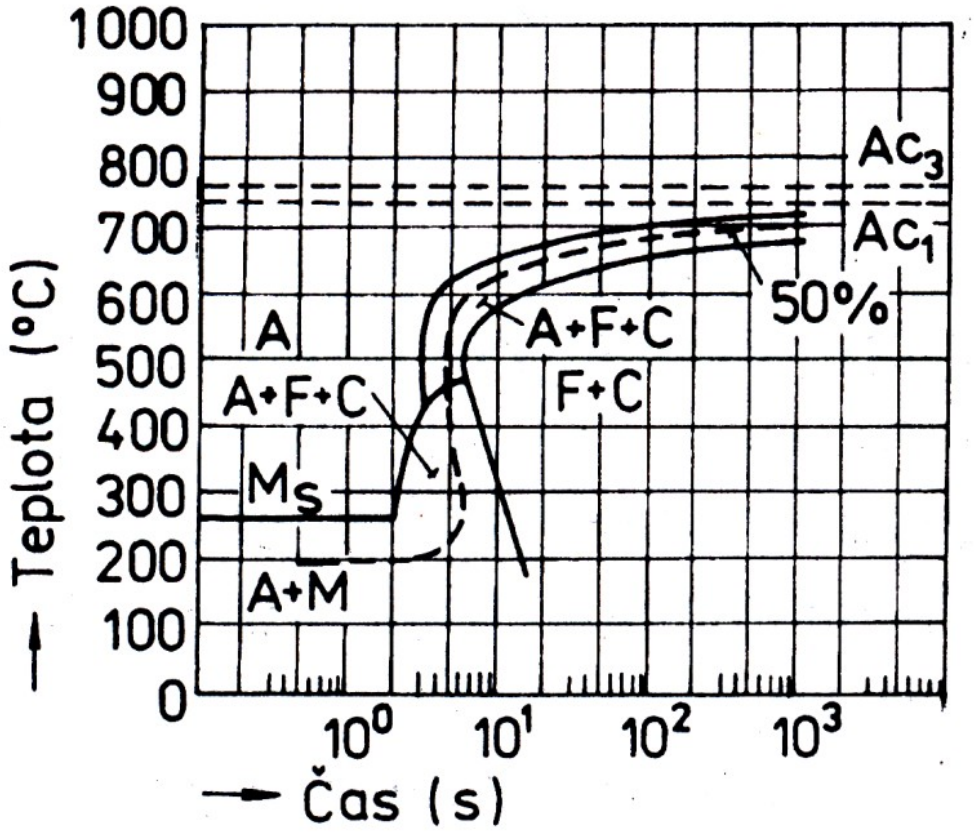
Je to postup pro výrobu ocelových drátů tažením. Ocel se při tažením průvakem mechanicky zpevňuje. U ocelí s malým obsahem uhlíku se pro odstranění zpevnění mezi jednotlivými tahy zařazuje žíhání. U ocelí s vyšším obsahem uhlíku (např. 12 081, ARA diagram na obr. 4.1) se volí izotermické kalení na bainit. Takto zpracované oceli se nazývají patentované. Vyznačují se vysokou pevností při dobré houževnatosti, což je předurčuje pro použití na pružiny.

4.2 Zušlechťování

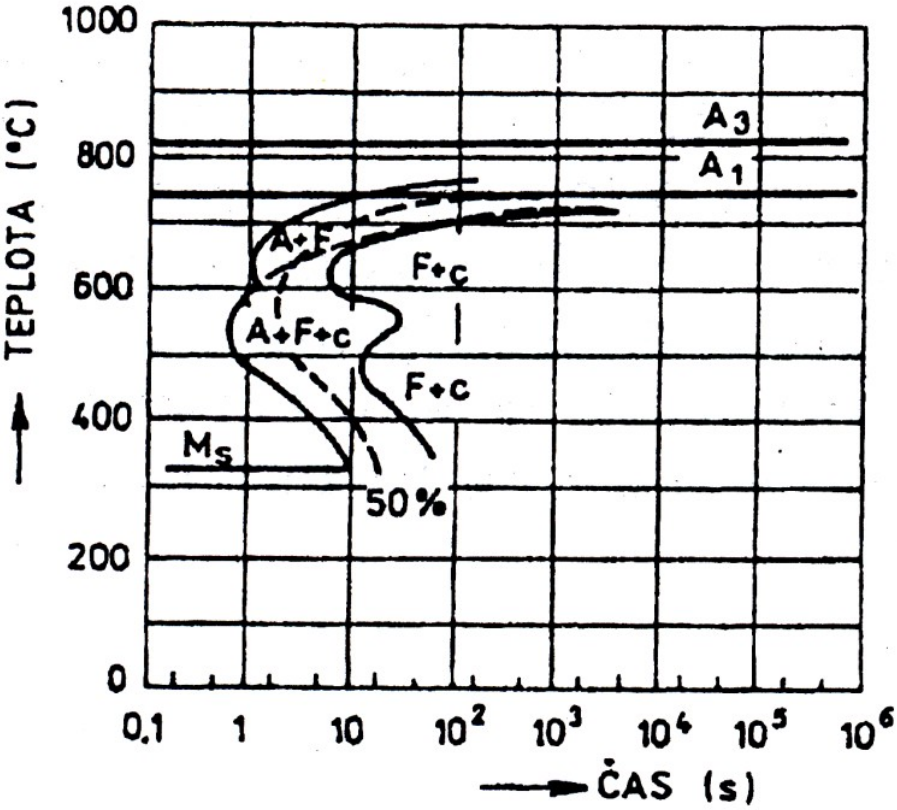
U pružin z legovaných ocelí je možno zařadit zušlechťování. To se skládá z kalení a následného vysokoteplotního popouštění. Například pro ocel 13 251 je určeno izotermické kalení do oleje z teplot 840 až 880°C a následné popouštění při teplotě 570 až 680°C [3]. Výslednou strukturu lze vyčíst v IRA diagramu na obr. 4.2.

Při kalení dochazí k rozpadu austenitu. Podle rychlosti ochlazování vznikají různe struktury. Při malém přechlazení vzniká perlit, lamelární směs feritu a cementitu. Za jeho vznikem stojí především difuze uhlíku a legujících prvků. Při vyšších rychlostech vzniká bainit, nelamelární směs perlitu a cementitu. Bainit vzniklý při vyšších teplotách se nazývá horní a svou strukturou se blíží k perlitu. Za nižších teplot vzniká dolní bainit podobný spíše martenzitu. Bainitická transformace neprobíhá úplně, část austenitu zůstává nepřeměněna ve formě zbytkového austenitu. Při rychlosti ochlazování vyšší než je kritická dochází k přeměně na martenzit. Jedná se o přesycený tuhý roztok uhlíku v alfa železe. Martenzit vzniká bezdifuzním procesem a je provázen deformací mřížky které způsobuje vnitřní pnutí. Pro odstranění pnutí následuje popouštění.

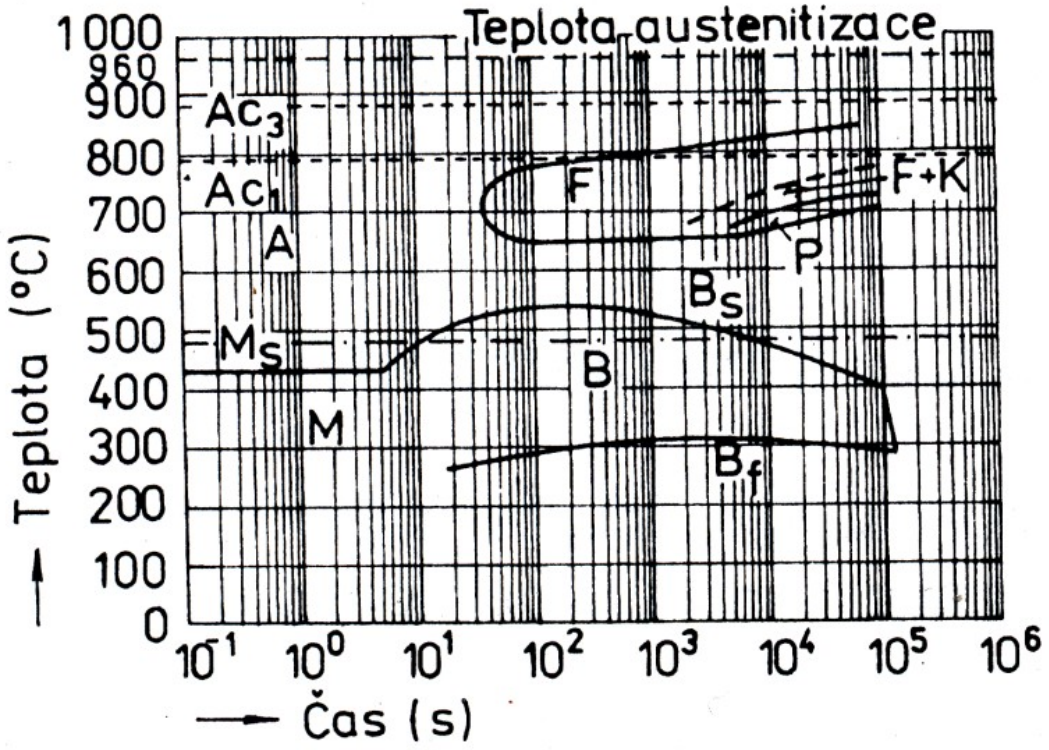
Při popouštění se ocel udržuje určitou dobu na určité teplotě. Při tomto dochází k difuzi uhlíku z martenzitu a jeho přeměnu na cementit. Ze zbytkového austenitu se transformuje bainit. Tímto mechanismem klesá tvrdost a vzrůstá houževnatost. Proto je nutné volit teplotu a dobu tak abychom dosáhli vhodnou kombinaci vlastností. Nežádoucím jevem je popouštěcí křehkost která vzniká precipitací karbidů a příměsí na hranicích zrn.



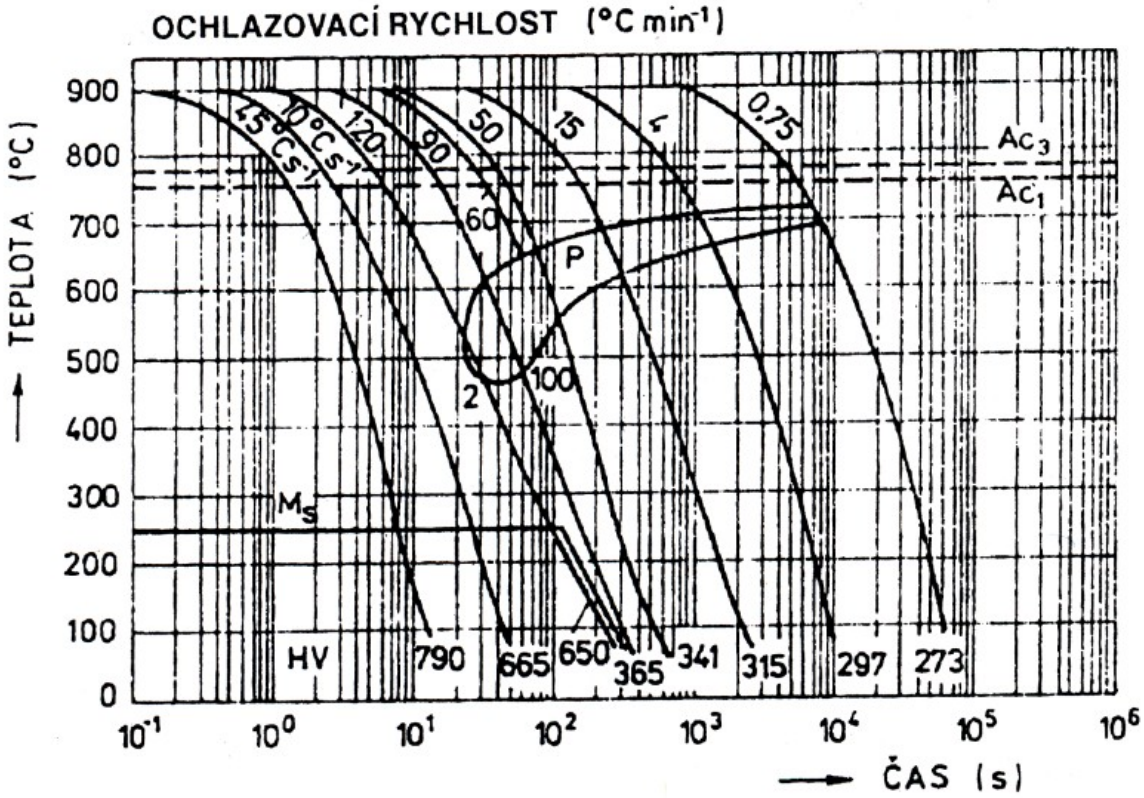
Obr. 4.1 ARA diagram oceli 12 081 [4]



Obr. 4.2 IRA diagram oceli 13 251 [4]



Obr. 4.3 IRA diagram oceli 14 260 [4]



Obr. 4.4 ARA diagram oceli 14 182 [4]

Tab. 4.1 Přehled pružinových ocelí, [4]

Značka	Chemické složení v %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni max.	Cu max.	V	P max.	S max.
12 041	0,37-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	max. 0,25	0,30	0,30		0,035	0,035
12 060	0,52-0,60	0,50-0,80	0,17-0,37	max. 0,25	0,30	0,30		0,040	0,040
12 061	0,57-0,65	0,50-0,80	0,17-0,37	max. 0,25	0,30	0,30		0,040	0,040
12 071	0,60-0,70	0,60-0,80	max. 0,35					0,035	0,035
12 081	0,70-0,80	0,40-0,65	max. 0,35					0,035	0,035
12 090	0,80-0,90	0,20-0,60	0,10-0,30					0,030	0,035
13 180	0,70-0,80	0,90-1,20	0,15-0,35	max. 0,30	0,40	0,30		0,035	0,040
13 251	0,42-0,52	0,50-0,80	1,50-1,90	max. 0,30	0,40	0,30		0,035	0,035
13 270	0,58-0,68	0,65-0,90	1,50-1,90	max. 0,30	0,40	0,30		0,040	0,040
14 160	0,50-0,80	0,70-1,00	0,30-0,50	0,30-0,50	0,40	0,30		0,040	0,040
14 182	0,70-0,80	0,55-0,75	1,30-1,50	0,25-0,45				0,030	0,030
14 260	0,50-0,60	0,50-0,80	1,30-1,60	0,50-0,70	0,50	0,30		0,035	0,035
14 262	0,55-0,65	0,70-1,00	0,20-0,50	0,70-1,00	0,35	0,25		0,035	0,035
15 260	0,47-0,55	0,70-1,00	0,17-0,37	0,90-1,20			0,10-0,20	0,035	0,035
17 023	0,26-0,35	max. 0,80	max. 0,70	12,0-14,0				0,040	0,030
17 024	0,36-0,45	max. 0,80	max. 0,70	12,0-14,0				0,040	0,030
65 V	0,60-0,70	0,50-0,80	0,12-0,30	max. 0,10	0,10	0,08	0,07-0,17	0,025	0,025
53 CrV	0,47-0,55	0,30-0,60	0,15-0,30	0,75-1,10			0,15-0,25	0,030	0,030

5. Pružinové slitiny mědi

Ze skupiny pružinových slitin na bázi mědi mají největší technický význam berylliové bronzy. Jejich velký rozmach nastal za 2. světové války a v následnách poválečných letech. Za války se uplatnily především v letectví a po válce dále jako prvky v elektrotechnice, spoje a kontakty v atomové a kosmické technologii.

K použití berylliových bronzů přispívá vysoká mez kluzu, odolnost proti korozi, vysoká elektrická vodivost, nemagnetičnost a dobré technologické vlastnosti. Kvůli nižšímu modulu pružnosti oproti ocelím jsou nežádoucími vlastnostmi těchto pružin menší pružná hystereze (dopružování). I přes vysokou cenu beryllia objem výroby beryliových bronzů roste. Průmyslově vyráběné Be bronzy lze rozdělit do dvou skupin - s velkou pevností a dobrou elektrickou vodivostí s obsahem Be 1,6 až 2,5% a s vysokou elektrickou vodivostí s obsahem Be 0,4 až 0,7%.

Tab. 5.1 Složení nejčastějších berylliových bronzů, [5]

Značka	Chemické složení v %			
	Be	Co	Co + Ni + Fe	ostatní
CuBe2 (Berylco 25)	1,8 - 2,0	0,2	0,6	zbytek
CuBe (Berylco 155)	1,6 - 1,8	0,2	0,6	stejný
CuBe2 (automatová)	1,8 - 2,0	0,2	0,6	0,2 - 0,3
CuCoBe (Berylco 10)	0,4 - 0,7	2,4-2,7		zbytek
CuCaAgBe	0,25 - 0,5	1,4-1,7		0,8 - 1,1

Tab. 5.2 Složení berylliových bronzů ruské výroby, [5]

Značka	Chemické složení v %			
	Be	Ni	Ti	Mg
CuBe2	1,8 - 2,1	0,2 - 0,5		
CuBe1,7NiTi	1,16 - 1,85	0,2 - 0,4	0,1 - 0,25	
CuBe1,9NiTi	1,85 - 2,1	0,2 - 0,4	0,1 - 0,25	
CuBe2,5	2,3 - 2,6	0,2 - 0,5		
CuBe1,9NiTiMg	1,85 - 2,1	0,2 - 0,4	0,1 - 0,25	0,07 - 0,13

5.1 Pružinové slitiny mědi bez obsahu beryllia

Pro zvýšenou elektrickou vodivost se používají slitiny bez Be, např. hořčíkové bronzy CuMg0,3, CuMg0,5, CuMg0,8, a také kadmiové bronzy, např. CuCd0,7. Pro zvýšenou pevnost bez nároku na elektrickou vodivost se používají deformačně zpevněné bronzy typu CuAl7, CuSn8P0,3, CuSn6,5P0,15, CuSi3Mn1 a některé mosazi, např. CuNi15Zn20. Pokud jsou požadavky na vysokou pevnost, tepelnou odolnost a korozivzdornost bez potřeby elektrické vodivosti, používají se vytvrditelné slitiny bez obsahu Be, například kamelon nebo kamelin.

Velký význam mají slitiny na bázi Cu-Ni-Al a Cu-Zn legované Cr, Mn, Si, V a Mg a jejich tepelně mechanické zpracování. Je doporučeno používat tyto slitiny místo Be bronzu při teplotách nad 250°C a požadavku na korozivzdornost. Pro tyto aplikace je však častěji používána

vysokolegovaná austenitická ocel. Ze slitin s nižší pevností mají velký význam kamelin a č. 156 (mosaz CuZnAlNiSiMn). Kamelin po tepelně mechanickém zpracování lze použít na pružinové prvky pro teploty do 170°C a napětí 700 MPa. Po rozpouštěcím žíhání a stárnutí se doporučuje na málo namáhané součásti.

Kromě slitin na bázi Cu-Ni-Sn jsou i slitiny jiných kovů. Jednou z nich je dle značení USA C68800 obsahující 73,5% Cu, 23% Zn, 3,4% Al a 0,4% Co. Při normální teplotě je tvořena jednofázovým tuhým roztokem s disperzními precipitáty intermetalické fáze obsahující Co. Tyto částice materiál zpevňují, zjemňují zrno a zmenšují riziko korozního praskání.

Další skupinou jsou deformačně zpevňované slitiny - např. cínové bronzy, bronzy neobsahující cín a také speciální mosazi (viz. tab. 5.3)

Tab. 5.3 Složení deformačně zpevněných slitin mědi [5]

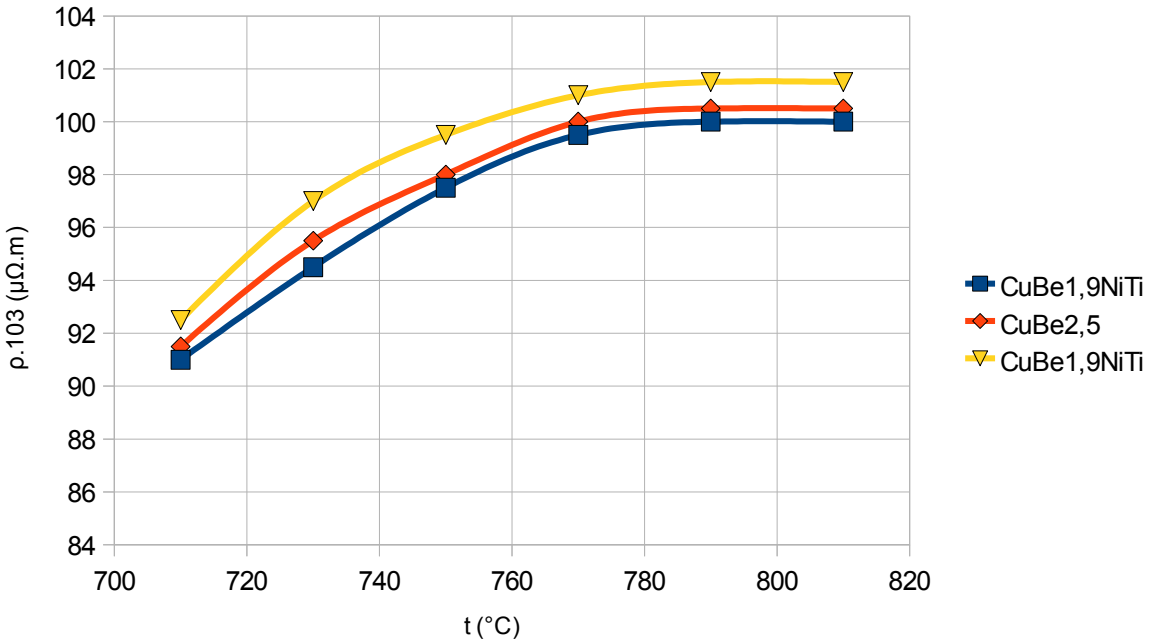
Značka slitiny	Sn	Zn	P	Ostatní
	Chemické složení v %			
CuSn8P0,3	7,5-8,5		0,25-0,35	0,1-0,2 Ni
CuSn6,5P0,15	6,0-7,0		0,25-0,1	
CuSn4Zn3	4,0-4,5	2,7-3,3		
CuSn4P0,25	3,5-4,0		0,2-0,3	
CuAl7				6-8 Al
CuSi3Mn1				0,1-1,5 Mn; 2,75-3,5 Si
CuNi15Zn20		18-22		13,5-16,5 Ni

Mechanické vlastnosti, zejména mez kluzu a odolnost proti relaxaci, se dají zlepšit nízkoteplotním žíháním.

6. Vliv tepelného zpracování na vlastnosti bronzů

6.1 Rozpouštěcí žíhání

Toto tepelné zpracování má při výrobě bronzů velký význam, především pro zvýšení plasticity a tvařitelnosti při válcování za studena, a také pro dosažení velkého vytvrzení při stárnutí. V první řadě se používá rouzpouštěcí žíhání. Zařazení žíhání jako mezioperačního zpracování při tváření vede ke zvýšení stejnorodosti složení a struktury. Teploty se pohybují v rozmezí od 710 až 810°C, nad teplotou 810°C dochází ke značnému růstu zrn a tím pádem ke zvyšování elektrického odporu. V grafu na obr. 6.1 ja závislost měrného odporu na teplotě rozpouštěcího žíhání. Žíhání bylo prováděno 15 minut a poté s ochlazením do vody.



Obr. 6.1 Závislost měrného elektrického odporu na teplotě žíhání [5]

Vytvrzování bronzu je závislé na stupni nasycení tuhého roztoku legujícími prvky, které při stárnutí precipitují. Stupeň nasycení lze hodnotit pomocí elektrického odporu, který s nasycením vzrůstá.

Důležitou roli hraje i velikost zrna, zvláště u velmi tenkých pásů. Při teplotách nad 810°C dochází k růstu zrn, což zhoršuje mechanické vlastnosti. Proto u pružin pracujících v podmínkách promněnného zatěřování je požadována jemnozrnná struktura. Tu lze dosáhnout pomocí velké plastické deformace za studena a následným krátkodobým rozpouštěcím žíháním při teplotě 770 až 780°C. U některých bronzů (např. CuBe2 nebo legovaných fosforem) lze jemnozrnnou strukturu dosáhnout i pouze rozpouštěcím žíháním a stárnutím. Jen je zapotřebí zajistit, aby rozpad tuhého roztoku probíhal diskontinuálně.

Při rozpouštěcím žíhání je třeba udržovat teplotu s přesností ±2°C a žíhat v elektrických pecích v atmosféře disociovaného čpavku, dusíku nebo argonu. Nelze žíhat v solných lázních, protože by mohlo dojít k ochuzení tuhého roztoku o beryllium. Rychlost ochlazování musí být co největší (obvykle do vody). Na druhou stranu příliš velká rychlost ochlazování vede k množství poruch vyvolaných kalením. Pro odstranění deformačního zpevnění se pro mezioperační žíhání doporučuje teplota 600 až 750°C a ochlazení na vzduchu.

6.2 Stárnutí

Celkové zpevnění slitin je dáno pevností precipitujících částic, jejich objemovým podílem, tvarem, strukturou, vazbou s matricí a stupněm disperznosti. Stupeň zpevnění je určen vzájemným působením disperzních částic a pohybujících se dislokací. Toto se může uplatnit na dlouhou vzdálenost mezi dislokacemi a poli elastických pnutí v okolí precipitátů nebo na krátkou vzdálenost, kde dislokace přicházejí do přímého styku s precipitáty. Při svém pohybu pak dislokace musejí překonávat tyto překážky. Jsou rozlišovány tyto mechanismy překonávání překážek:

1. Mechanismus protínání podle Ansella a Lenela [6]. Odpor proti pohybu dislokací má řadu příčin. Napěťová pole dislokací může působit na napěťové pole vznikající jako důsledek rozdílu objemů atomů precipitující fáze a matrice. Při průchodu přes částici mohou dislokace vyvolat porušení uspořádání na rozhraní matrice a částice. Mezi jádrem dislokace a částicí může dojít k silnemu vzájemnému působení.

2. Mechanismus průchodu dislokací mezi disperzními částicemi a vznik dislokačních smyček kolem těchto částic dle Orowana [7].

3. Mechanismus příčného skluzu podle Hirsche.

Podle prvního mechanismu je deformační napětí určeno rovnicí

$$\sigma_T = \sqrt{G.b.G^*/2.d.C} \qquad (6.1)$$

kde G - modul pružnosti ve smyku matrice

G* - modul pružnosti precipitující fáze

b - Burgersův vektor

d - vzdálenost mezi částicemi

C - konstanta

Brown a Ham [8] ukázali že vliv rozdílu modulů pružnosti matrice a precipitátu je poměrně malý. Rozhodující vliv má stavba fáze samé.

Jestliže G*>>G, tak dislokace při libovolné hodnotě d již neprotínají částice, skluz se uskutečňuje ohýbáním dislokací mezi částicemi a vznikají dislokační smyčky dle Orowanova mechanismu. Maximálního zpevnění je dosaženo, když jsou částice koherentní, vysoce disperzní a rovnoměrně rozloženy. Podle Kellyho a Nicholsona je maximální zpevnění určeno rovnicí

$$\sigma_{max} = \frac{G.b}{4}\left(\frac{2-\nu}{1-\nu}\right)\ln\left(\frac{d-2\mathrm{r}}{2.\mathrm{b}}\right)\frac{1}{d-2\mathrm{r}} \quad (6.2)$$

kde ν - Poissonova konstanta

r - poloměr částic

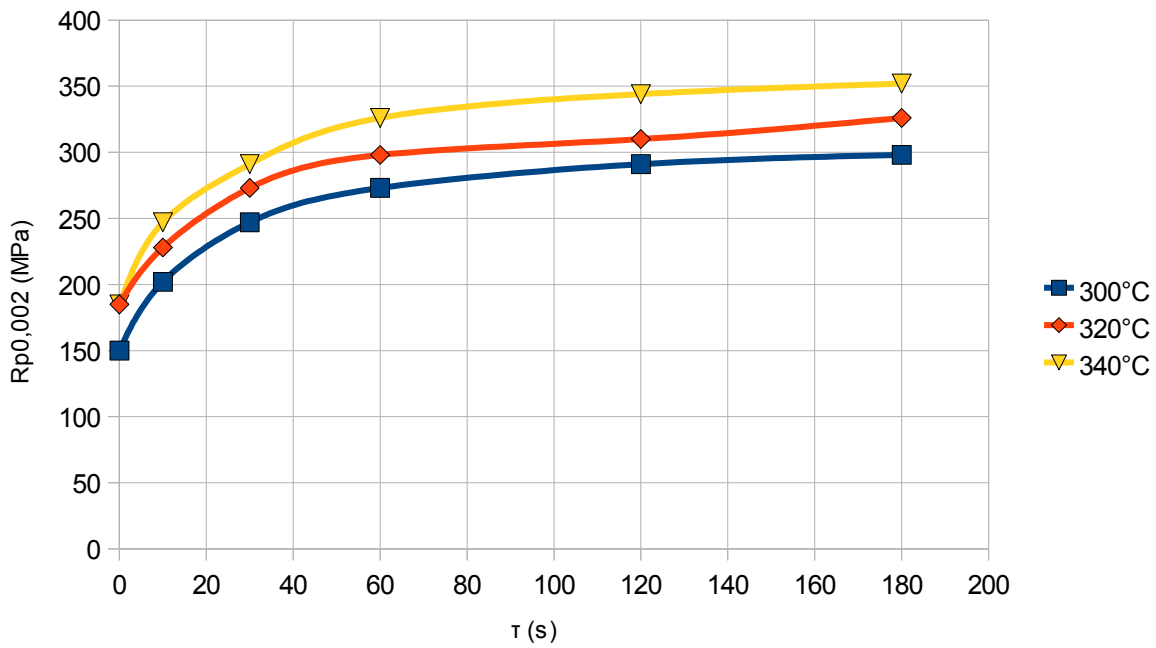
d - vzdálenost mezi částicemi

6.3 Počáteční stadia stárnutí

Vlastnosti slitin ve stavu maximálního zpevnění jsou určovány především změnami struktury v počátečním stadiu rozpadu tuhého roztoku. Zejména proto je třeba procesy stárnutí studovat nejdříve za nízkých teplot a až posléze za teplot vysokých.

Berylliový bronz patří ke slitinám, u kterých se z počátku objevují precipitáty s odlišnou mřížkou, než je mřížka matrice. Je s ní však koherentní.Výsledky studií [9] svědčí o tom, že v CuBe slitinách nemusejí vznikat v počátku Guinierovy-Prestonovy zóny, a proto, narozdíl od slitin hliníku, je u nich možný plynulý přechod ze stadia stárnutí za nízkých teplot do stadia stárnutí za vysokých teplot.

V grafu na obr. 6.2 je vynesena závislost meze kluzu v závislosti na prodlevě při stárnutí a teplotě stárnutí u materiálu CuBe1,9NiTi. Je vidět, že v počátečních stádiích (zhruba do 60 s) mez pevnosti znatelně roste, poté roste již skoro neznatelně.



Obr. 6.2 Závislost meze pružnosti na teplotě a době žíhání [5]

6.4 *Stárnutí za vysokých teplot*

Z technického hlediska je nejzajímavější stárnutí za vysokých teplot, při němž dosahujeme optimálních vlastností pro použití na výrobu pružinových prvků. Z těchto vlastností je nejdůležitější odpor proti malým deformacím, který tvoří nejdůležitější znak jakosti pružinových slitin. Podstatou mikroplastické deformace jsou elementární děje plastické deformace s časovým zpožděním. Její rychlost závisí na rychlosti skluzu po hranicích i uvnitř zrn. Podle B. M. Rovinského mohou probíhat tyto typy deformace:

1. Elasticko-plastická při teplotách nižších než 0,25 T_m. Podle [10] se plastické deformace zvyšuje podle logaritmického zákona $\varepsilon=\alpha.\log \tau + \beta$, kde ε - deformace, α, β - konstanty a τ - doba.

Mechanismus deformace má dvě stadia. První je charakteristické skluzovým pohybem dislokací ve skluzových rovinách vyvolaný tepelnou aktivací. Druhým je tlumení průběhu relaxace a zpevnění při tečení, které je podmíněno vyčerpáváním pohyblivých dislokací.

2. Elasticko-plastická deformace probíhající podél hranic zrn za teplot 0,25 až 0,5 T_m. Deformace tohoto typu je řízena šplháním hranových dislokací a dvojitého příčného skluzu, které vyvolávají odpevnění a rychlost deformace se nesnižuje.

3. Elasticko-viskózní deformace v celém objemu vyvolaná difuzí atomů při teplotách nad 0,5 T_m. Stejně jako v předchozím případě nepozorujeme zpevnění.

Odolnost proti relaxaci je určena vnějšími i vnitřními faktory. K vnějším faktorům patří především teplota, doba a charakter zatěžování. K vnitřním faktorům patří chemické složení, které udává její strukturu. Značný vliv má také velikost zrna a u vytvrzovatelných slitin, a i ty faktory, které určují odpor proti mikrodeformacím. Při zkouškách relaxace však musí být stav struktury stabilní.

Krom uvedených vlastností má velký význam únavová pevnost, úroveň zbytkových pnutí, schpnost hlubokého tahu, deformace při tepelném zpracování, svařitelnost, odolnost proti korozi a elektrické vodivost. V následujících tabulkách jsou zpracovány optimální režimy stárnutí a mechanické vlastnosti po rozpouštěcím žíhání a stárnutí v optimálním režimu. Pro všechny bronzy je teplota rozpouštěcího žíhání 770°C.

Tab. 6.1 Optimální režimy stárnutí, [5]

Značka bronzu	Režim 1		Režim 2	
	t (°C)	τ (h)	t (°C)	τ (h)
CuBe2	220	4 až 5	340	1,5 až 2
CuBe2,5	320	3	340	2
CuBe1,9NiTi	320	4	340	2 až 3
CuBe1,7NiTi	320	5	340	3

Tab. 6.2 Mechanické vlastnosti Be bronzů, [5]

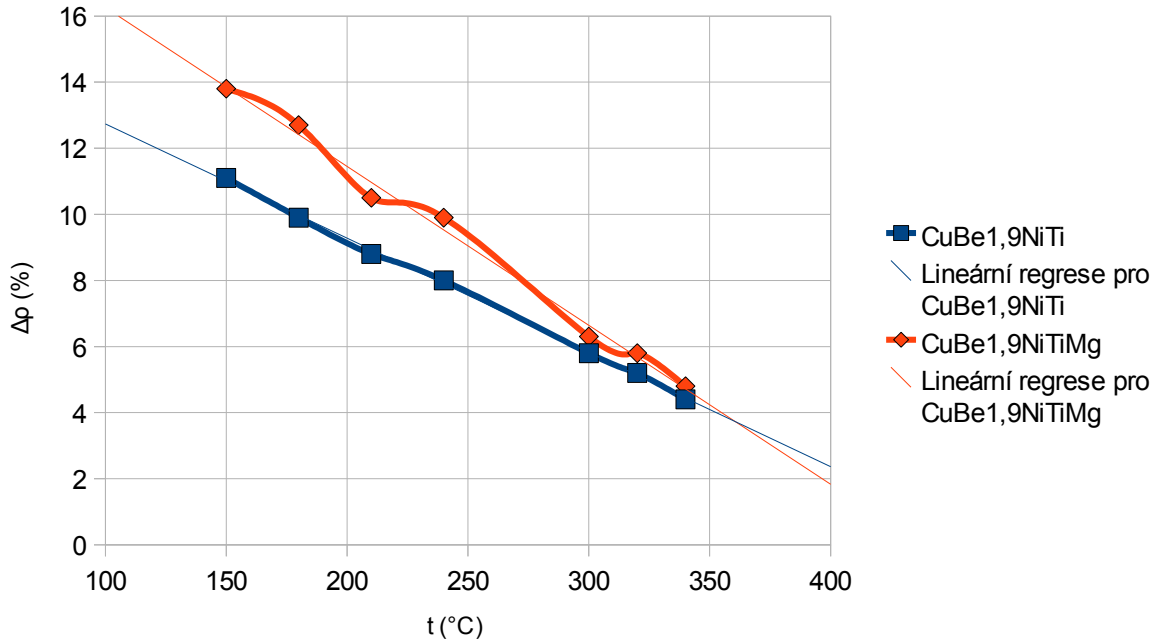
Značka bronzu	Rozpouštěcí žíhání			Stárnutí optimálním režimem	
	HV	R_m (MPa)	A (%)	R_m (MPa)	A (%)
CuBe2	90 až 100	400 až 500	38 až 40	1150 až 1250	4 až 6
CuBe2,5	90 až 110	400 až 500			
CuBe1,9NiTi	90 až 100	400 až 500	38 až 45	1150 až 1250	4 až 6
CuBe1,7NiTi	90 až 100	300 až 400	45 až 50	1000 až 1100	5 až 7

6.5 Stupňovité stárnutí

Stupňovité stárnutí je moderní metoda pro dosažení lepších mechanických vlastností než u stárnutí jednostupňového. Je známo, že zahrnuje předběžné nízkoteplotní a vysokoteplotní stárnutí disperzně vytvrditelných slitin a může vést k růstu množství částic sekundárních fází a jejich lepšímu rozdělení v matrici. Možnost realizace závisí na chemickém složení slitiny a na výběru podmínek obou stupňů stárnutí.

V některých případech jsou pevnostní charakteristiky nižší než u běžného jednostupňového stárnutí. Dochází k tomu tehdy, když při nízkoteplotní fázi dojde k ochuzení tuhého roztoku a při následujícím ohřevu se v podstatě rozpustí a při stárnutí na vyšší teplotě bude méně nových zárodků a velké zárodky z první fáze budou dále růst a struktura bude hrubší. Zmenšení pevnosti přímo souvisí se zmenšením disperznosti struktury.

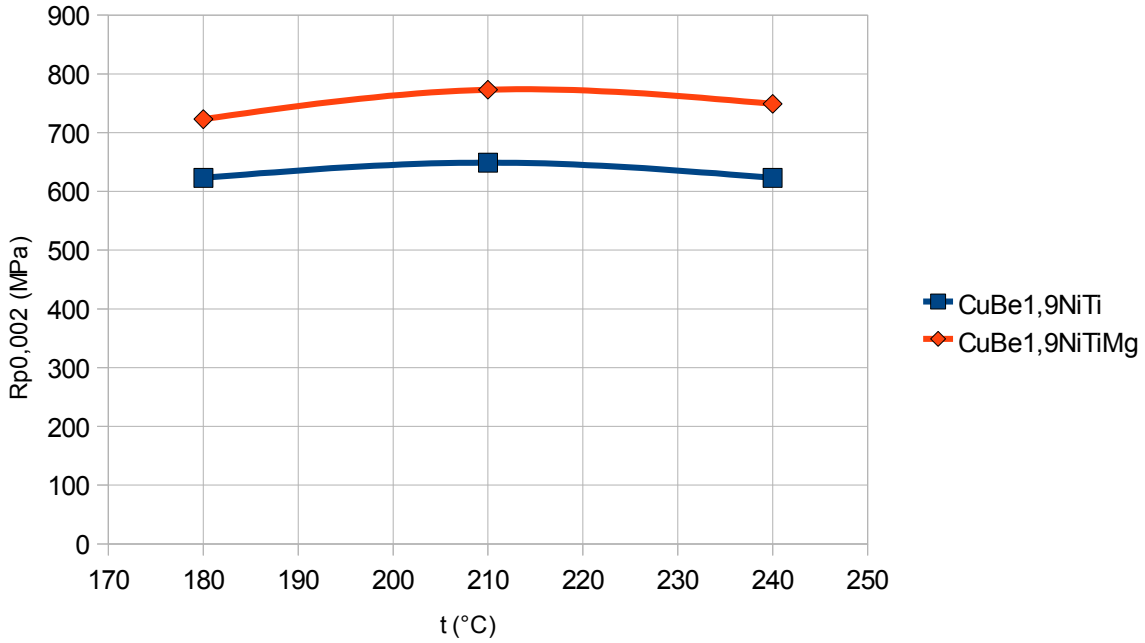
V prvním stadiu při 150 až 240°C se podstatně mění vlastnosti Be bronzu. Při legování bronzu adsorpčně aktivními prvky, např. hořčíkem, vznikají komplexy, které zrychlují nízkoteplotní stárnutí. Hořčík nejenže zvyšuje rychlost pochodu, ale také vede k dokonalejšímu průběhu, což se projevuje nárustem měrného elektrického odporu. Na obr 6.3 je možno vidět, jak postupně klesá přírustek měrného elektrického odporu, pro názornost byla do grafu doplněna lineární regrese.



Obr. 6.3 Závislost maximálního přírustku měrného elektrického odporu na teplotě stárnutí [5]

Změna měrného elektrického odporu při vyšší teplotě (340°C) vykazuje maximum již po krátkodobém ohřevu (15 až 60s). Avšak při stárnutí při vyšší teplotě u materiálu zpracovaného již nízkoteplotním stárnutím dochází nejdříve k mírnému poklesu a až poté se dosahuje maxima. Měřením měrného elektrického odporu lze sledovat teplotní závislost rychlosti nízkoteplotního rozpadu.

Analýza změn vlastností ukázala že největšího účinku bylo dosaženo v prvním stadiu rozpadu v momentě kdy měrný elektrický odpor dosahuje maxima. Provedeme-li nízkoteplotní stárnutí v rozmezí teplot 150 až 240°C po dobu odpovídající maximu měrného elektrického odporu a poté při 340°C vysokoteplotní fázi, tak pro teplotu 210°C v první fázi dosahujeme maximální zpevnění. Proto je teplota 210°C považována za optimální pro první stadium stárnutí Be bronzu (viz. obr 6.4)



Obr. 6.4 Závislost mezi kluzu v závislosti na teplotě nízkoteplotního stárnutí [5]

Dle [5] je pro dosažení maximálního zpevnění a odolnosti proti relaxaci pro bronzy CuBe1,9NiTiMg a CuBe1,9NiTi při statickém a cyklickém zatěžování doporučen režim pro první fázi 210°C po dobu 1h a pro druhou fázi 340°C po dobu 1,5 až 2h. Optimální jednostupňové stárnutí přitom odpovída režimu 340°C po dobu 3 h. Za povšimnutí stojí zvýšení meze kluzu z 650MPa na 680MPa, popř z 780 až 800MPa na 830MPa. Toto zlepšení mechanických vlastností přehledně ukazuje tab.6.3. Zvláště důležitou hodnotou je počet cyklů do lomu při danném cyklickém zatížení ukazující nárust výdrže až o 25% pro zatížení 450MPa. V tab. 6.4 vidíme rozdíl v mezi kluzu.

Tab 6.3 Zbytková deformace a únavová pevnost po různých režimech zpracování, [1]

Značka bronzu	R_0 (MPa)	$\varepsilon_{zbyt}.10^4$ (%) při relaxaci napětí		Počet cyklů do lomu
		statické 2000h	cyklické 5000 cyklů	
	Jednostupňové stárnutí			
CuBe1,9NiTi	450			200 000
	700	121	36	42 000
	800	160	70	30 000
CuBe1,9NiTiMg	450			1 500 000
	700	40	2	100 000
	800	60	14	60 000
	Stupňové stárnutí			
CuBe1,9NiTi	450			250 000
	700	115	33	50 000
	800	150	63	33 000
CuBe1,9NiTiMg	450			2 000 000
	700	32	1,5	120 000
	800	53	12	63 000

Tab 6.4 Mez kluzu pro různé režimy zpracování, [1]

	R_p 0,000 2	R_p 0,001	R_p 0,002	R_p 0,005
jednostupňové	140	400	570	754
vícestupňové	160	460	620	810

7. Materiály do extrémního prostředí

Jsou to materiály pro pružiny používané za agresivních podmínek, jako jsou:

- těžba ropy a plynu
- námořní aplikace
- letecká a kosmická technika
- výroba elektřiny
- chemický průmysl

V těchto odvětvích jsou potřeba unikátní materiály se specifickými vlastnostmi, například ty, které nazýváme superslitiny. Zpravidla jsou to slitiny na bázi niklu nebo kobaltu.

7.1 Niklové superslitiny

INCONEL X-750

Je precipitačně vytvrditelná niklová slitina s odolností proti korozi za vysokých teplot a velkou pevností při teplotách nad 700°C. Typickou aplikaci této slitiny je možné najít u plynových turbín, raketových motorů, spužin za vysokých teplot a u systému vytápění.

INCONEL 718

Je nikl-chromová slitina pro použití při teplotách od -250°C do 700°C. Dá se odlévat do složitých tvarů a má výbornou svařitelnost. Příkladem použití jsou raketové motory na tekuté paliva a části turbínových motorů. U pružin je nutný proces stárnutí, aby bylo dosaženo nejlepších vlastností.

NIMONIC 90

Precipitačně zpevněná nikl-chrom-kobaltová slitina. Má dobrou odolnost proti únavovému lomu a odolnosti proti creepu za vysokých teplot. Její požití je v rozmezí teplot 100°C až 650°C, pro pružiny do 550°C. Použití zahrnuje letecké komponenty, plynové turbíny, ventily turbomotorů a pružiny pro vysoké teploty.

HASTELLOY C-276

Nikl-molybden-chromová slitina s přídavkem wolframu má výjmečnou odolnost proti korozi a široké spektrum použití. Lze ji aplikovat při kontrole znečištění, chemickém průmyslu, likvidaci odpadů, produkci papíru a pro součásti v kontaktu s mořskou vodou.

7.2 Kobaltové superslitiny

MP35N

Je kobalt-nikl-chrom-molybdenová slitina s unikátní kombinací vlastností – vysoká pevnost, houževnatost, tažnost a odolnost proti korozi. Typickým použitím jsou součásti vystavené mořské vodě s požadavkem na vysokou pevnost.

Phynox

Tato precipitačně vytvrditelná slitina na bázi kobaltu má extrémní odolnost proti korozi a vynikající biokompatibilitu. Má pevnost v tahu až 2500MPa a je použitelná od 4,2°K do 500°C. Typickým použitím jsou pružiny do hodinek, těsnění, nástroje pro ropné vrty a v lékařství.

7.3 Slitiny titanu

Titanium - Ti-3Al-8V-6C5-4Mo-4Zr

Tato titanová slitina se vyznačuje nízkou měrnou hmotností, vysokou pevností, tažností a odolností proti korozi. Vysoké pevnosti je dosaženo precipitačním zpevněním a slitinu je možno použít až do 350°C. Použití nalezla v letectví a v závodních automobilech na výrobu vinutých pružin. Je použitelná i pro součásti v ropných a plynových vrtech.

7.4 Materiály s tvarovou pamětí

Jedná se o materiál na bázi niklu a titanu. Jeho hlavní předností je, že jako deformovaný se po zahřátí vrací do původního stavu. Jeho použití je velmi široké, především jako různé senzory v automobilovém průmyslu a v domácích spotřebičích. Při správném použití dokáže snížit velikost mechanismu, zvýšit spolehlivost a poskytnout delší životnost. Pružiny vyrobené z tohoto materiálu se používají například ve ventilovém systému, kde změna teploty ovlivní sílu na pohon ventilu. Tímto lze například automaticky měnit tok maziva v převodovce.

Závěr

Pružiny jsou běžnou součástí všedního života. Setkat s nimi lze téměř při jakékoliv činnosti. Třeba obyčejná propisovací tužka obsahuje pružinu. Na materiály, ze kterých jsou pružiny vyráběny, jsou kladeny vysoké nároky – musí mít vysokou pevnost a současně musí umožňovat velké elastické deformace. Pro výrobu kovových pružin se nejčastěji používají uhlíkové oceli třídy 12 nebo slitinové oceli třídy 13, 14 a k dosažení požadovaných vlastností je nutná jejich tepelná úprava – zušlechťování. Mezi další pružinové materiály se řadí slitiny mědi, zejména beryliové bronzy, dále superslitiny na bázi niklu a kobaltu, slitiny titanu i slitiny s tvarovou pamětí.

Vyvíjeny jsou však i pružiny z na první pohled nevhodných materiálů, jako jsou např. skelná vlákna. Ta jsou sama o sobě velmi křehký materiál, ale v kombinaci se správnou matricí mohou být použita při výrobě kompozitních pružin. Automobilky Audi a BMW vivinuly první funkční pružiny vyrobené ze skelných vláken v polymerní matrici (FRP), které mohou významně snížit hmotnost. Konkrétním příkladem může být přední pružina sedanu A4. Kovová váží 2,66 kg, nová z FRP jen 1,53 kg, tedy o čtyřicet procent méně. Jádro pružiny je složeno z dlouhých podélně splétaných skelných vláken, které jsou obalovány epoxidovou pryskyřicí. Při výrobě jsou kolem tohoto jádra navíjeny další a další vrstvy vláken a střídá se přitom 45stupňový úhel překrytí vůči podélné ose, takže při namáhání se vlákna navzájem podporují. Nový typ pružin bude mít premiéru v letošním roce v elektrickém Audi R8 e-tron a o rok později se začnou montovat také do běžných modelů. Výhoda oproti ocelovým pružinám je kromě hmotnosti také odolnost vůči korozi.

Je tedy zřejmé, že vývoj materiálů pro výrobu pružin zdaleka nebyl ukončen a může přinést nová zajímavá řešení.

Seznam literatury

[1] YAMADA Y. Materials for springs. 1. vyd. Springer, 2007, 377 s. ISBN 3540738118

[2] JANÍČEK P., FLORIAN Z. Mechanika těles Úlohy z pružnosti a pevnosti I. 4. vyd. Brno, CERM, 2004, 170 s. ISBN 80-214-2655-1.

[3] TUMLIKOVO, Nízkolegované konstrukční oceli třídy 13, jejich složení a tepelné zpracování, dostupné na http://www.tumlikovo.cz/nizkolegovane-konstrukcni-oceli-tridy-13-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/

[4] FREMUNT P., PODRÁBSKÝ T. Konstrukční oceli. 1. vyd. Brno, CERM, 1998, 267 s. ISBN 80-85867-95-8.

[5] PASTUCHOVOVÁ Ž. P., RACHŠTADT A. G. Pružinové slitiny mědi. vyd. 1. Praha, SNTL, 1986, 276 s.

[6] ANSELL G. S., LENEL F. V. Criteria for yielding of dispersion-strengthened alloys, Acta Metallurgica vyd. Elsevier, 1960, vol. 8, Issue 9, str. 612 – 616

[7] OROWAN E. Symp. of internal stresses in metals and alloys, Londýn, 1948, str. 451

[8] BROWN L. M., HAM R. K. Strengthening methods in crystals, Londýn, 1971, str. 9-135

[9] ŤAPKIN JU. D., GAVRILOVA A. V., Itogi nauki i techniki, vyd. Moskva, VINTI, 1974, str. 64-124

[10] BORZDYKA A. M., GECOV L. B., Relaksacija naprjaženij v merallach i splavach, vyd. Moskva, Metallurgija, 1978, 304 s.

[11] LESJÖFORS, Super alloys springs, dostupné na http://www.lesjoforsab.com/technical-information/superalloy_springs_id1322.pdf

[12] FURUKAWA ELECTRIC EUROPE, Materials – NiTi alloys, dostupné na http://www.furukawa.co.uk/nt.html