

7. MATERIJALI ZA VODIČE I VODLJIVE ELEMENTE

- 7.1. Materijali za vodiče u užem smislu
- 7.2. Materijali za otpornike
- 7.3. Materijali za kontakte
- 7.4. Materijali za bimetale
- 7.5. Materijali za termoelemente
- 7.6. Materijali za provode kroz staklo
- 7.7. Materijali za lemове
- 7.8.



OPĆI ZAHTJEVI NA MATERIJALE

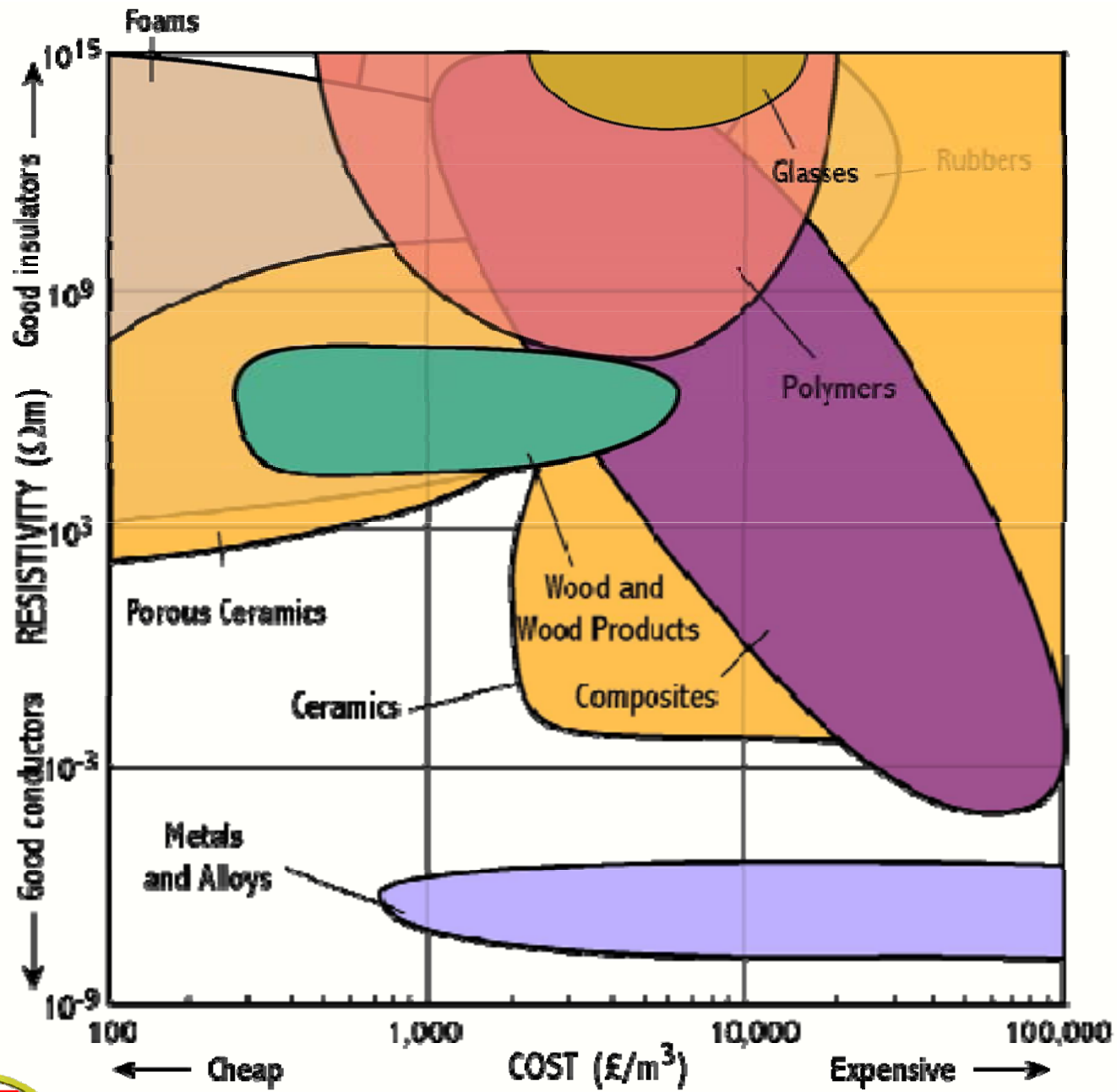
- ① vodljivost
- ② mehanička svojstva
- ③ sposobnost spajanja
- ④ kemijska postojanost
- ⑤ tehnološkičnost
- ⑥ specifični zahtjevi

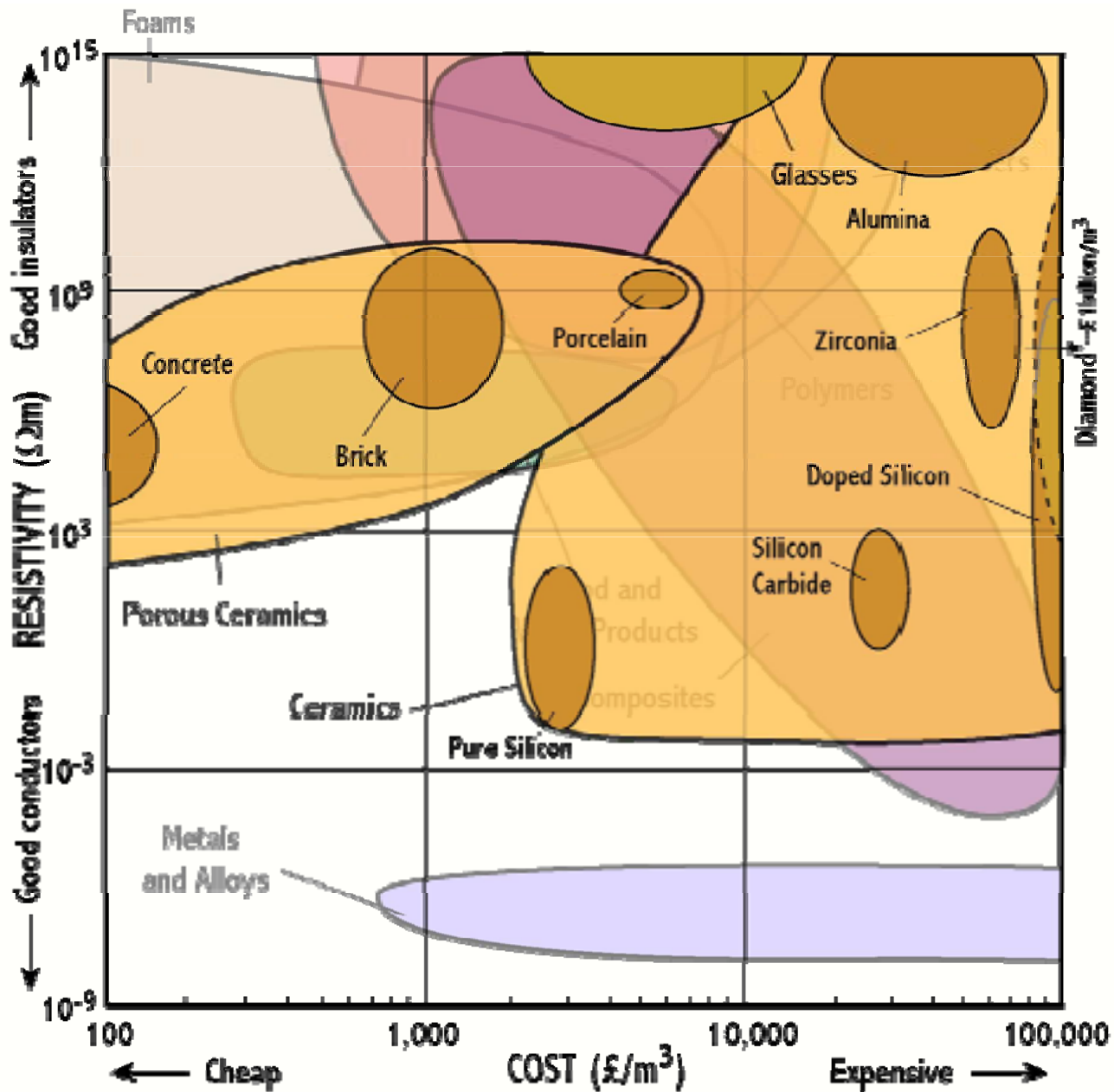


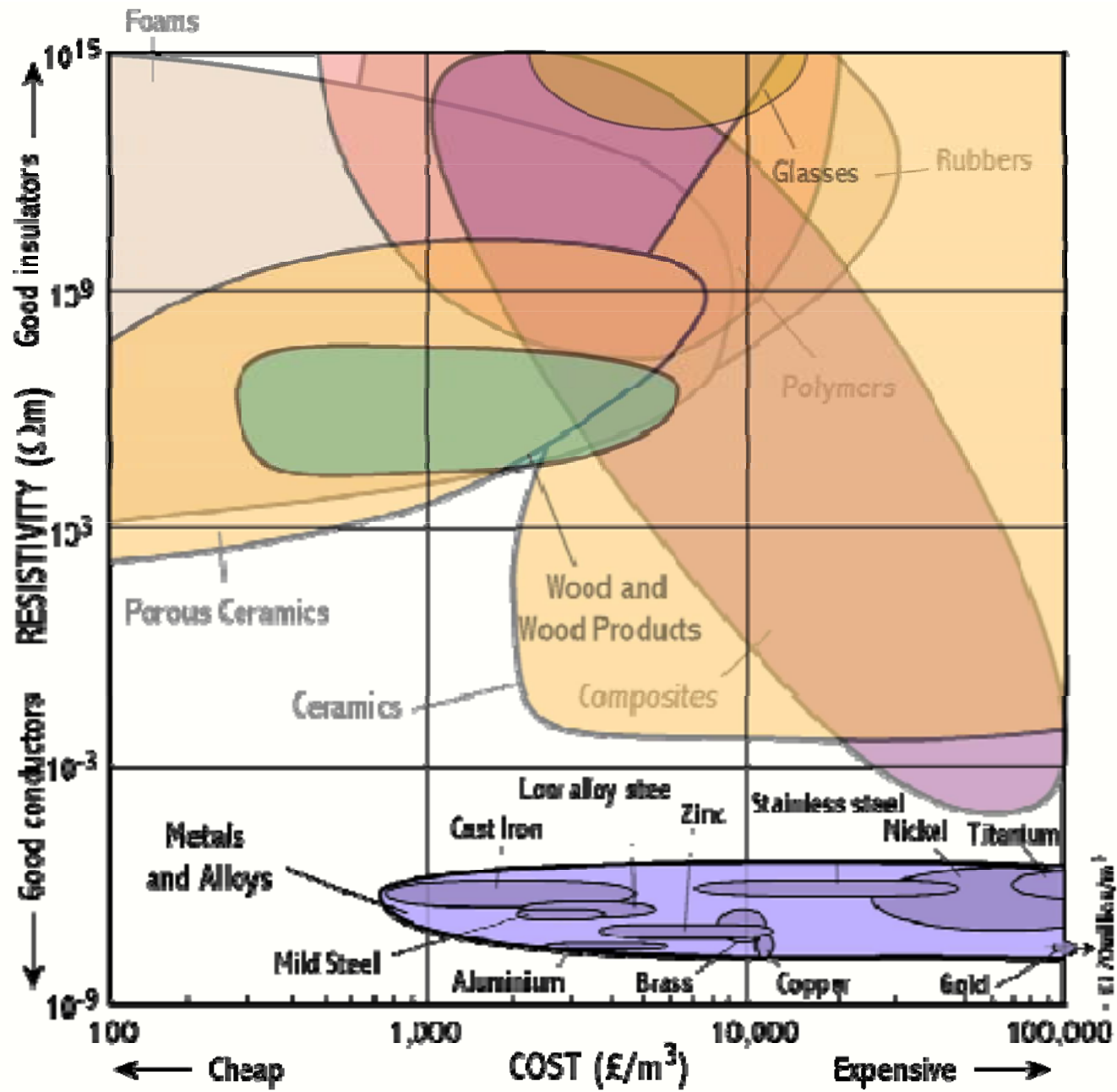
7.1. Materijali za vodiče u užem smislu

- ⇒ VODOVI → služe za transport električne energije (sadrže i prateće uređaje)
 - **vrste:** nadzemni, izolirani, kabeli (energetski, telekomunikacijski)
- ⇒ VODIČI → dio električnog voda koji provodi struju
 - **vrste:** goli, izolirani, pleteni, žice namota,....
 - **oblici:** žica, užad, bimetalni,...
- ⇒ ŽICA → osnovni element vodiča

- ☑ OSNOVNI ZAHTJEVI na materijale
 - ⊙ vodljivost
 - ⊙ mehanička svojstva







Kao vodiči najčešće se koriste Ag, Cu, Au i Al.

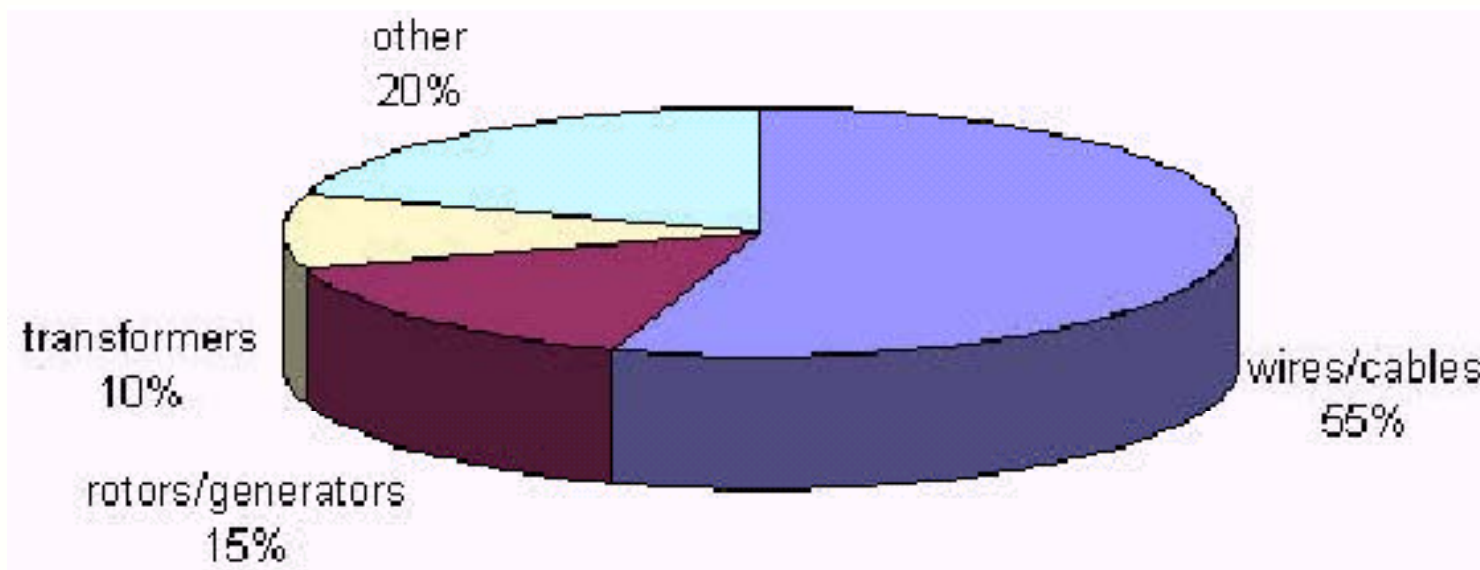


Fig. 1-2: Main fields of applications of metallic conductors

7.1.1..BAKAR

- dobra gnječivost (Pck) → dobro se oblikuje valjanjem, izvlačenjem
- otporan na koroziju
- slabo se obrađuje skidanjem čestica
- slabo se lijeva
- dobro se spaja i legira (niz slitina)
- više od 50% proizvedenog bakra se koristi za vodiče u elektrotehnici

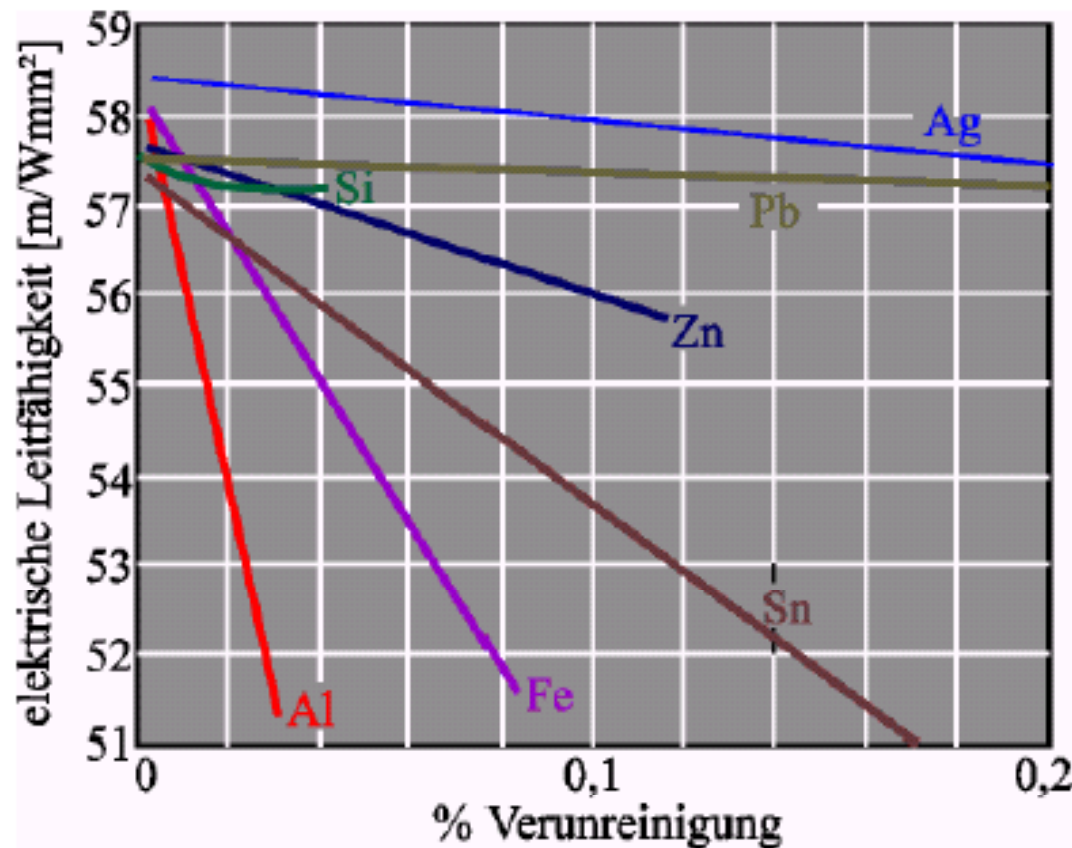
Dichte	[g/cm ³]	8.9 - 8.96
Schmelztemperatur	[°C]	1083
Elastizitätsmodul	[N/mm ²]	125·000
Ausdehnungskoeffizient	[10 ⁻⁶ /K]	17
elektr. Leitfähigkeit	[m/Ω mm ²]	35 -58
Wärmeleitfähigkeit	[W/Km]	240 - 386
Zugfestigkeit ¹	[N/mm ²]	200 - 360
Bruchdehnung ¹	[%]	2 - 45

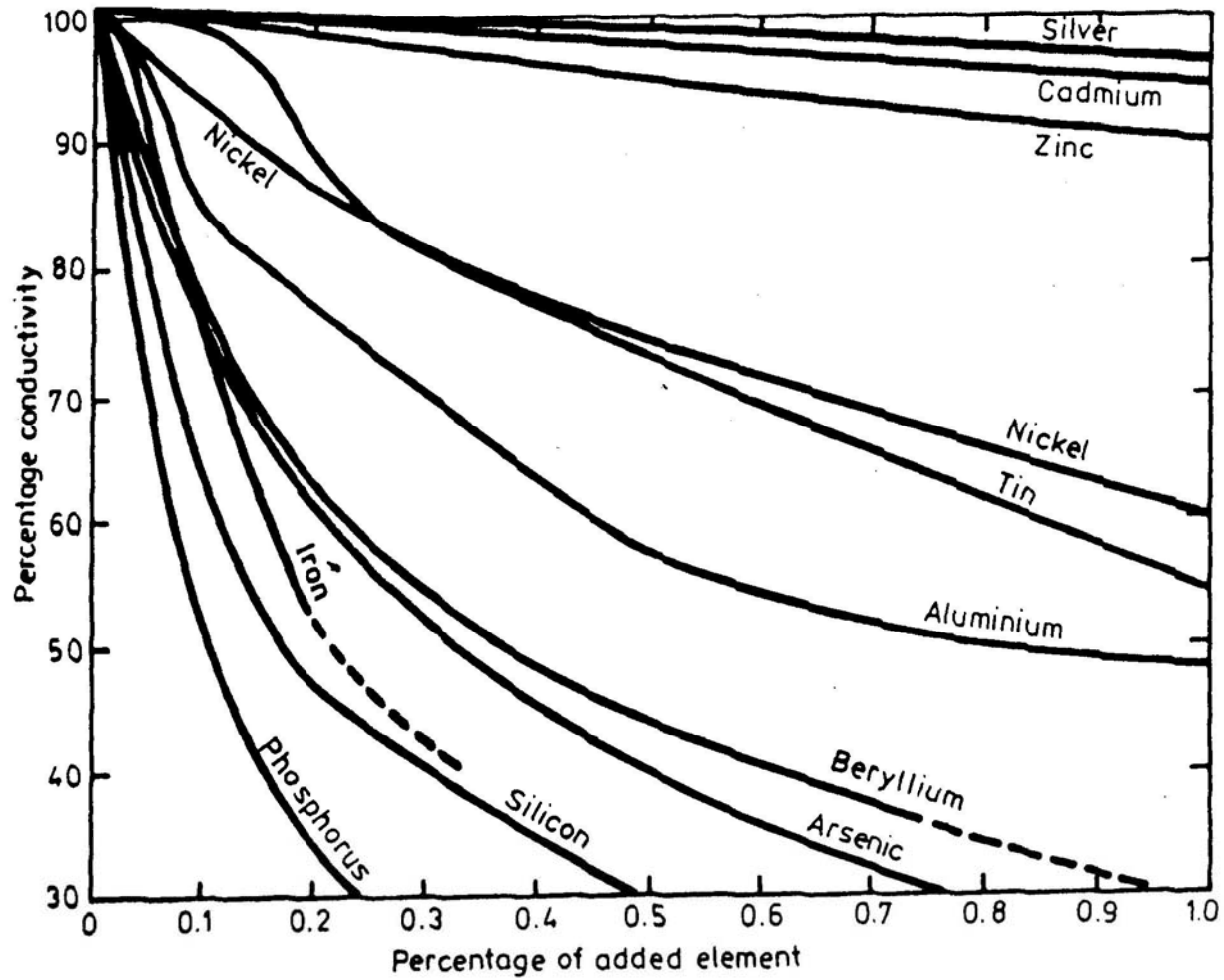


➔ UTJECAJ LEGIRANJA

Legiranjem se ruši vodljivost, ali poboljšavaju mehanička svojstva.

- za primjenu u elektrotehnici koristi se što čišći bakar
- najvi



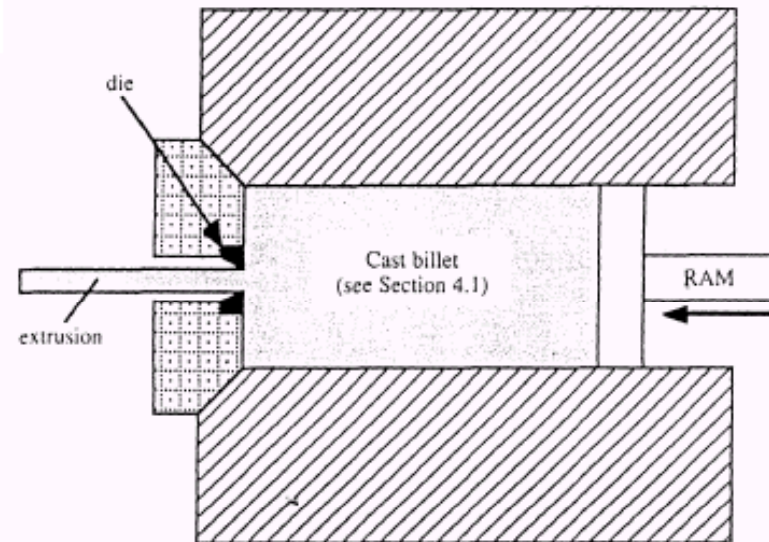
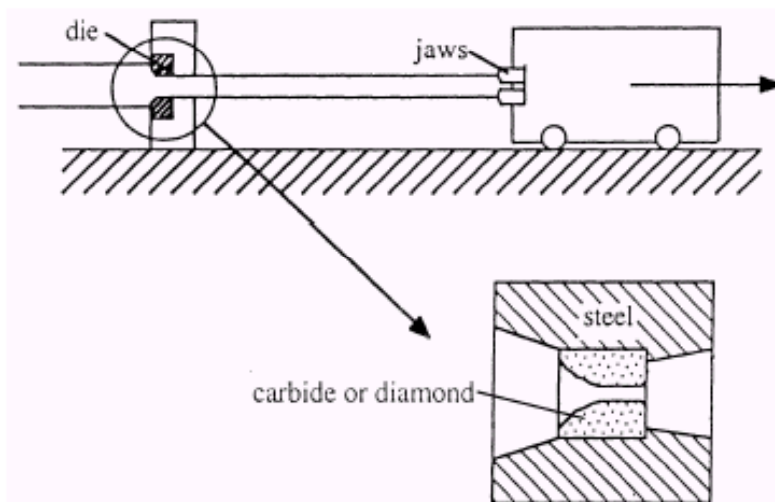


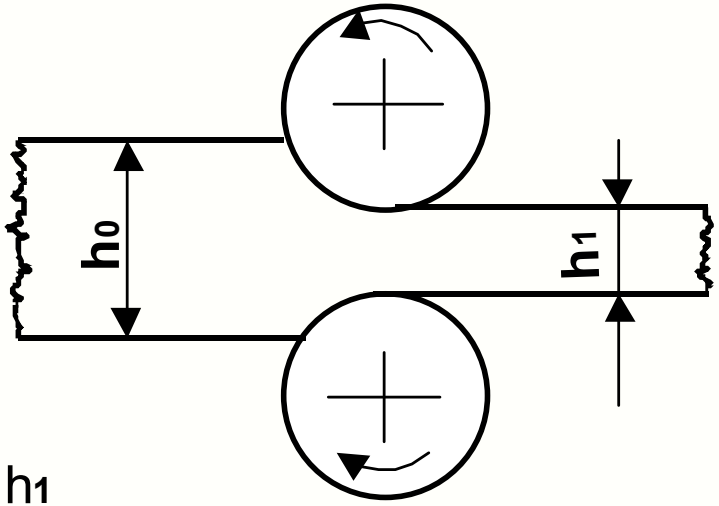
➤ UTJECAJ GNJEČENJA NA SVOJSTVA

- ◆ Cu se toplom ili hladnom **deformacijom** (gnječanjem - valjanje, izvlačenje...) oblikuje u limove, cijevi, žice, folije,
- Stupanj deformacije (u %) se izračunava prema

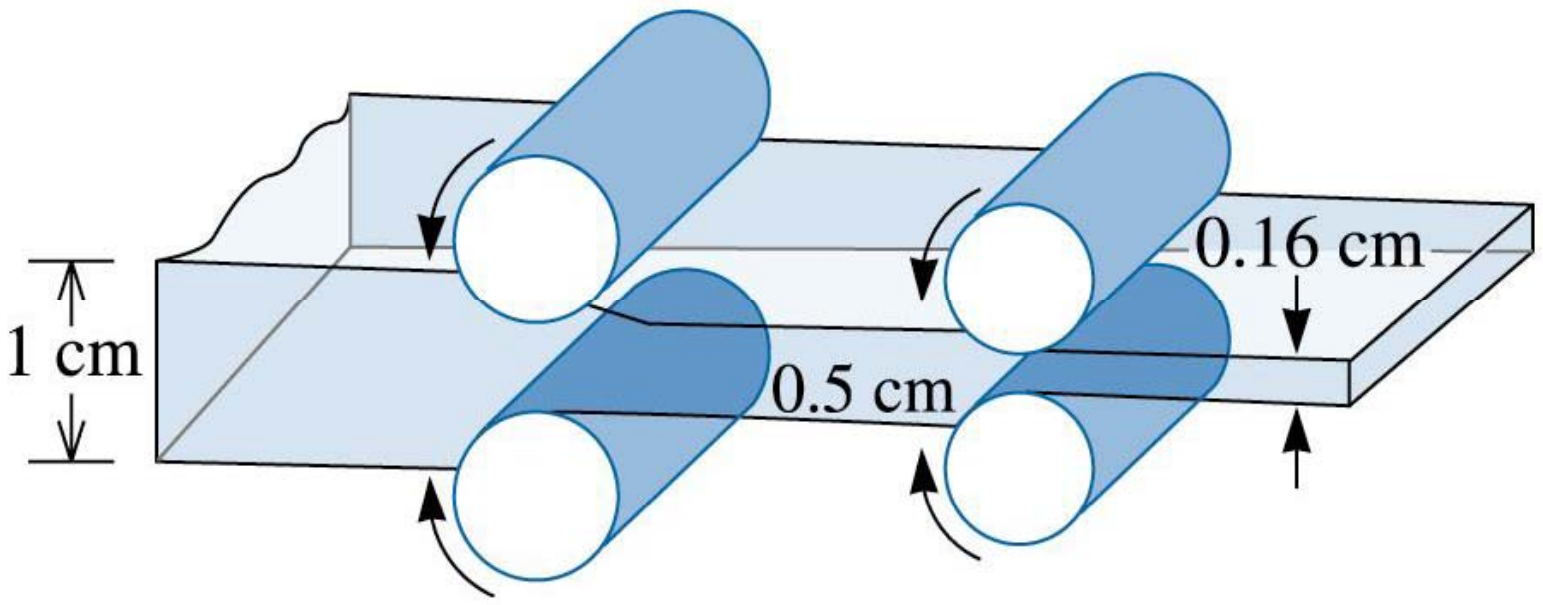
$$\varphi = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \cdot 100$$

- ugnječena struktura ima veću tvrdoću i čvrstoću, a smanjenu istezljivost i električnu provodnost ⇒ otklanja se **ŽARENJEM** (rekristalizacijskim) ugnječene strukture
- hladnom deformacijom se dobiva **polutvrdi i tvrdi Cu** (Tabl. 1)





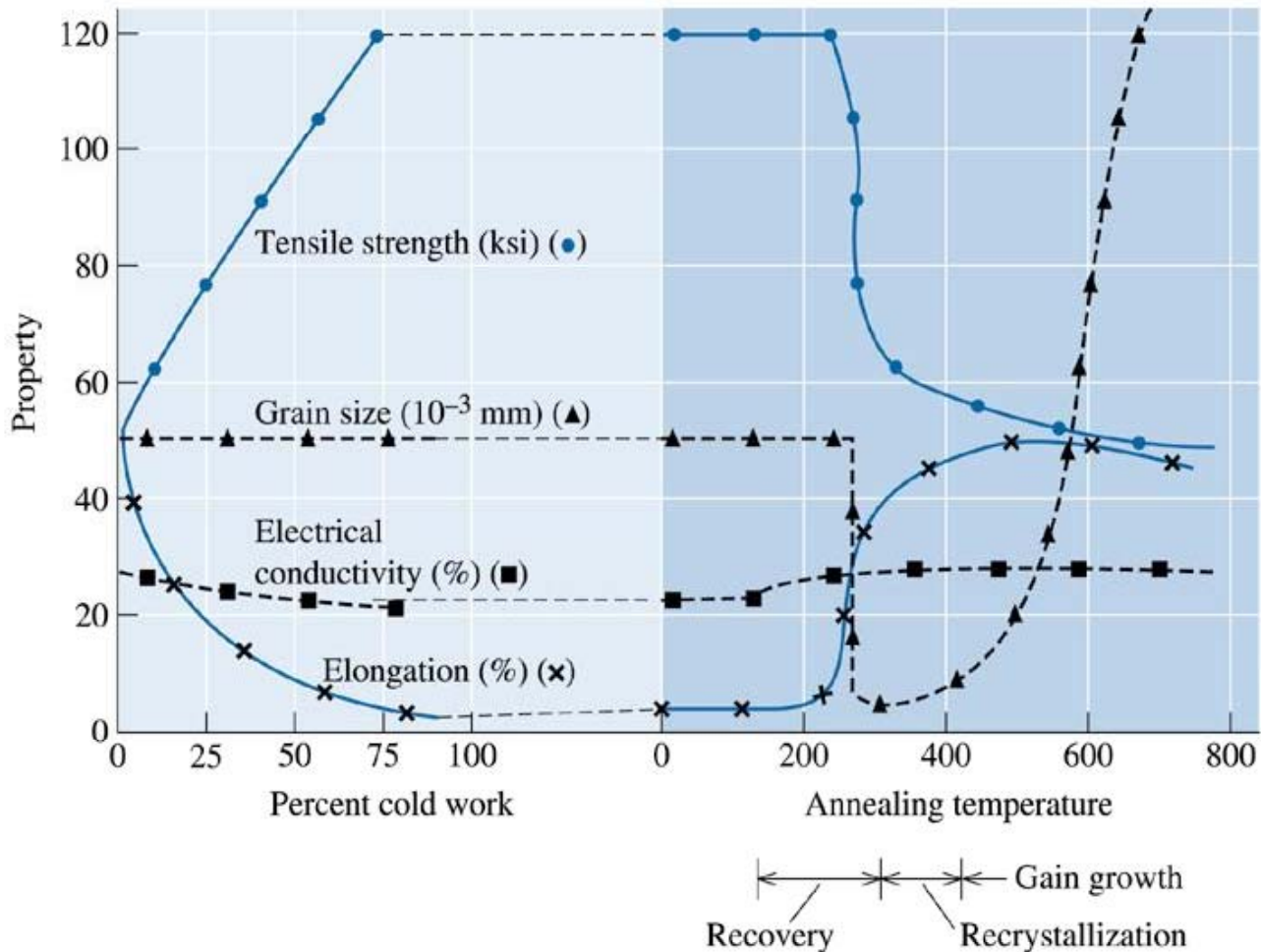
$$\varphi = \frac{h_0 - h_1}{h_0} 100 \%$$



➤ **ŽARENJE** je postupak toplinske obrade koji se sastoji od polaganog ugrijavanja na temp. 150 do 600 °C, držanja određeno vrijeme na toj temperaturi i polaganog ohlađivanja

- prema potrebi se obavlja u zaštitnoj atmosferi
- temp. žarenja za Cu iznosi od 250...600 °C
- **efekti:** smanjuje se neravnoteža izazvana gnječanjem, gubi se usmjerenost strukture i dr





©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

Figure 7.18 The effect of cold work on the properties of a Cu-35% Zn alloy and the effect of annealing temperature on the properties of a Cu-35% Zn alloy that is cold-worked 75%

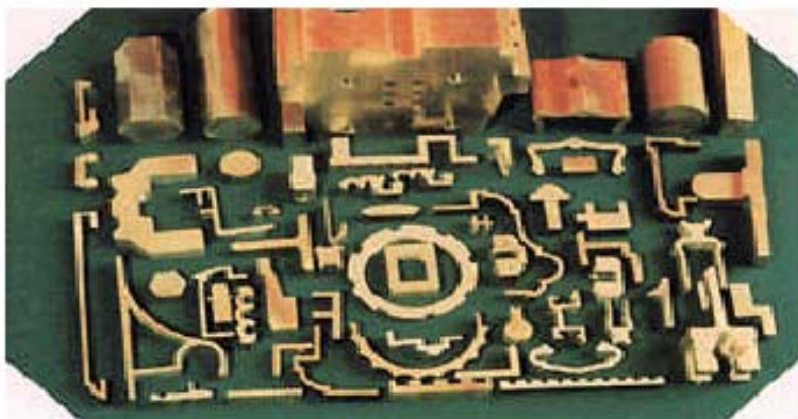




Boliden MKM Ltd



Cerro Extruded Metals Ltd



Boliden MKM Ltd, Cerro Extruded Metals Ltd and others



Metamec



SLITINE BAKRA

- najvažnije slitine su: MJED (Cu+Zn) i BRONCE (Cu bez Zn)
- kao Le se koriste elementi koji slabije ruše vodljivost (Ag,Zn,Cd,...)

➤ NISKOLEGIRANE SLITINE

● Cu+1%Cd (Cd bronca)

- električna provodnost malo opada (od 58 na 55)
- R_m veća za 50%
- žilavost veća 3 puta, broj previjanja 20 puta
- ✧ Uporaba: gornji vodovi kod tramvaja i el.željeznice

● Cu+1%Ag

- elek. provodnost manja za 2%
- veća otpornost na oksidaciju na povišenim temperaturama
- ✧ Uporaba: vodljive opruge, elek. kontakti, kolektori, itd.

➔ BRONCE

- min. 60% Cu + Sn, Al, Si, Pb (dvo- ili višekomponentne slitine)
 - ◆ 10...20% Sn **ljevačke bronce** (dobra livljivost, slaba istezljivost)
 - ◆ do 10% Sn **gnječilačke bronce** (dobra istezljivost)
- sadrže i dodatke Mg, Cd, Zn...
- postoje meka, polutvrda i tvrda bronca (Bz I, Bz II, Bz III)

● Al-bronca

- skupi Sn zamijenjen s Al (do 12%)
- otporne na koroziju, kiseline, morsku vodu, ...
- Pr. CuAl5; CuAl7

⇒ MJEDI

- Cu s max.44% Zn
- ✧ u elektrotehnici konstrukcijski materijal (opruge,kabel.spojnice,instalac.dijelovi,..)
- ◆ **>63% Cu** → homogena struktura → dobra gnječivost
- ◆ **56...63% Cu** → heterogena struktura → dobra obradivost skidanjem čestica i štancanjem
- s porastom %Zn slabi antikorozivnost
- veća čvrstoća
- dobro se lemi
- često se dodaje Ni, Mn, Al, Si ...
- Pr.➤ Cu+15%Zn+35%Ni → NOVO SREBRO (otpornost na oksidaciju, kontaktna pera)
- Cu+Zn+Pb za kablove kod računala

Kovanica 1 kn

legura 65 % bakra, 23,2 % nikla i 11,8 % cinka



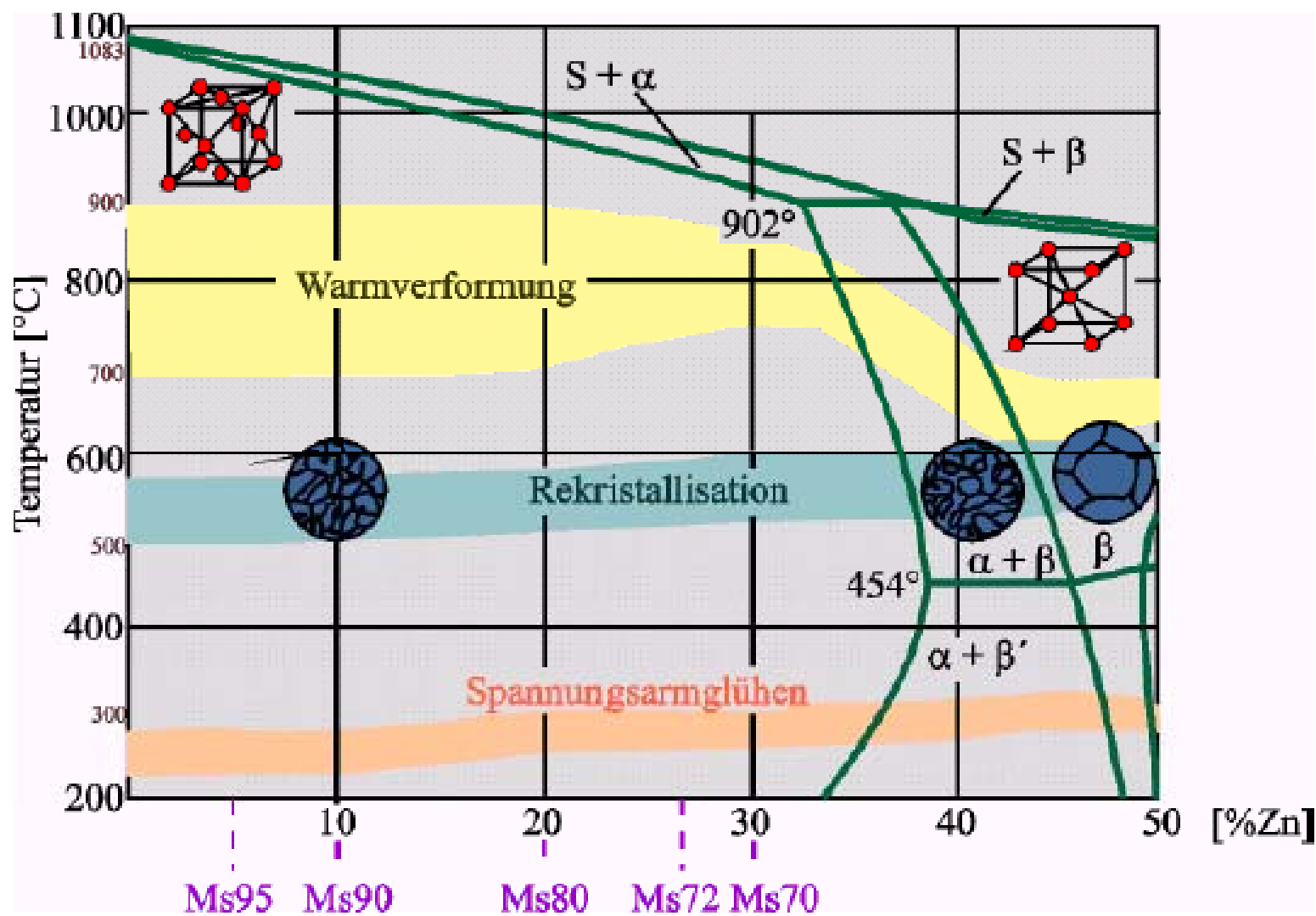


Fig. 23.3 Der Messingteil des Kupfer-Zink-Systems

Tab. 23.2 *Kupfer-Zink-Legierungen*

	$\sigma_{0,2}$ [N/mm ²]		σ_B [N/mm ²]		δ_5 [%]		Bem.
	weich	hart	weich	hart	weich	hart	
CuZn 28	80	340	300	440	45	10	1)
CuZn 40	140	400	340	490	30	8	2)
CuZn 40 Pb3	180	430	370	510	25	5	3)

- 1) Beste Legierung zum Kaltumformen (Tiefziehen)
 2) Beste Legierung zum Warmumformen (Schmieden)
 3) Beste Legierung für Zerspanung

Festigkeits- und elektrische Eigenschaften von Kupfer in der Elektronik

Werkstoff		Abmessungen entsprechend den Maßnormen	Festigkeitseigenschaften					Elektr. Eigenschaften		
			Zug- festigkeit	0,2- Grenze	Bruch- dehnung		Brinell- härte	Elastizitäts- modul	Spezifi. Widerstand bei 20°C	Leit- fähigkeit bei 20hC
Kurzeichen	Nummer	Dicke mm	R_m (δ_B)	$R_{p0,2}$ ($\delta_{0,2}$)	A_5 (δ_5)	A_{10} (δ_{10})	HB 2,5/62,5	E kN/mm ² (Anhaltswert)	ρ	$\frac{\kappa = 1}{\rho}$
			N/mm ²	N/mm ²	%				$\Omega \cdot \text{mm}^2$	$\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$
E-Cu 57 E-Cu 58 SE-Cu	2.0060 2.0065 2.0070									
F 20	.10	0,1 - 1	200 - 250	max. 120	38	32	45 - 70		0,01754	57
		> 1 - 5			45	38				
								0,01754	57	
E-Cu 57 SE-Cu CuAg0,1 CuAg0,1P	2.0060 2.0070 2.1203 2.1191									
F 25	.26	0,1 - 1	200 - 250	min. 200 (- 290)	17	14	70 - 90		0,01786	56
		> 1 - 5			20	16				
F 30	.30	0,1 - 1	300 - 360	min. 250 (- 350)	7	4	85 - 105		0,01818	56
		> 1 - 5			8	5				
F 37	.32	0,1 - 1	min. 360	min. 320	3	2	95 - 120		0,01818	55
		> 1 - 3			5	3				
E-Cu 58	2.0065									
F 25	.26	0,1 - 1	250 - 250	min. 200 (- 290)	17	14	70 - 90		0,01737	57,5
		> 1 - 5			20	16				
F 30	.30	0,1 - 1	300 - 360	min. 250 (- 350)	7	4	85 - 105		0,01786	56
		> 1 - 5			8	5				
F 37	.32	0,1 - 1	min. 360	min. 320	3	2	95 - 120		0,01786	56
		> 1 - 3			5	3				

SE-Cu und CuAg0,1P: Schweißbar, siehe Abschnitt 6.3

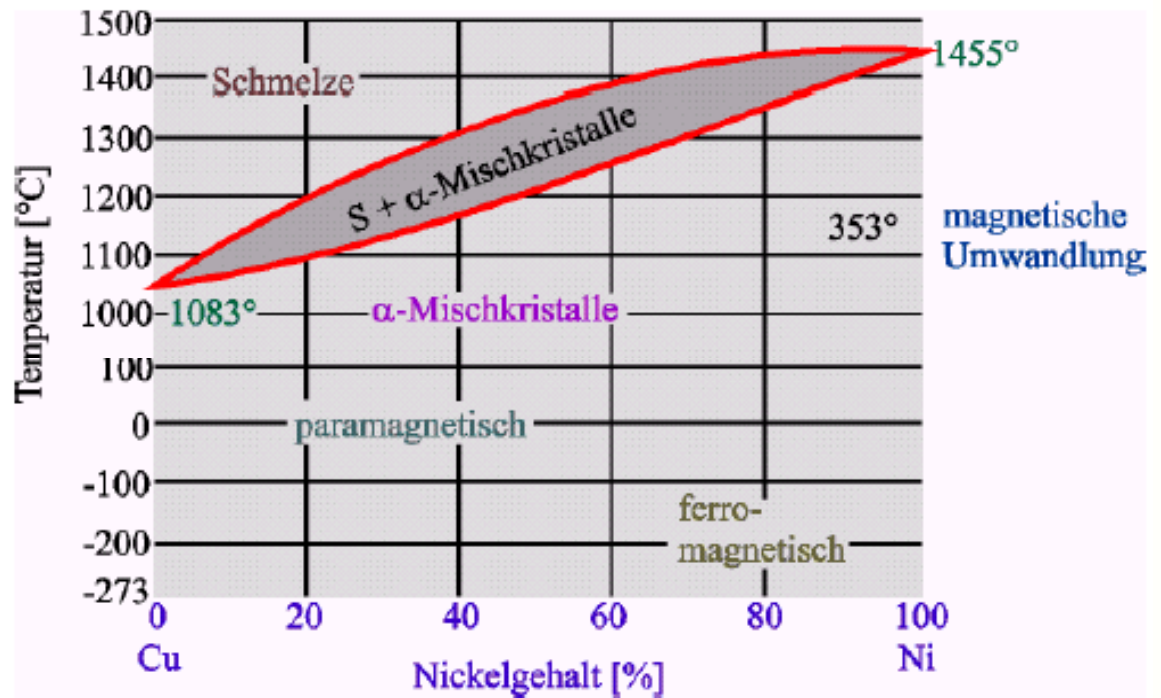
CuAg0,1 und CuAg0,1P: Erhöhte Erreichungsbeständigkeit, erhöhte Zeitstandfestigkeit, der Einfluß des Festigkeitszustands, der Temperatur und der Zeit ist zu beachten.



Legure Cu+Ni

CuNi44 (konstantan)

- elektrootporni materijal
- termoelementi





nickel-aluminum-bronze (Cu-Ni-Al) sailboat



7.1.2. Aluminij

- otkriven 1852.g.
- energija u kWh potrebna za proizvodnju 1 tone metala

Al	Cu
17 000	250

- laki metal \Rightarrow gustoća $2,7 \text{ kg/dm}^3$ (**3,3 puta manje od Cu**)
- **dobra električna i toplinska vodljivost**
- **antikorozivan** (stabilni, ali nevodljivi oksid Al_2O_3 , otežava spajanje)
- **loše se lijeva** (osim tlačnog lijevanja i slitina **Al-Si**)
- **Pek rešetka** \Rightarrow dobra gnječivost, mala čvrstoća, mekan
- **legiranjem opada vodljivost**
(najviše Ni, Si, Fe, Cu, Ag, Mg, najmanje Ti, V, Mn)
- **svojstva zavise o načinu obrade**
- **spajanje Al i Cu je nepoželjno zbog opasnosti od elektro-korozije (galvanski članak), koriste se spojnice od bimetala Al-Cu (kupal)**



Aluminium Alloys in Aerospace



Airbus A340

Despite competition from other materials, Al alloys still make up > 70% of structure of modern commercial airliner

Al+Cu i Al+Zn+Mg+Cu legure



A. Pintarić: INŽENJERSKI MATERIJALI U
ELEKTROTEHNICI

7. Materijali za vodiče

25



OBLICI POLUPROIZVODA

- žice, limovi, folije, šipke, profili i dr.
- koriste se postupci: valjanje, prešanje, izvlačenje, ekstruzija i dr.

PODRUČJA UPORABE

- ◇ za izradu vodova i kablova (E Al99,5, tvrdovučeni E Al F17, Alu-Če vodovi s čeličnom žicom u jezgri), više od 50% su aluminijski vodovi
- ◇ za namote transformatora i elektromagneta kod uređaja koji trebaju imati malu masu
- ◇ za izradu kućišta, kazaljci, membrana, kondenzatora, hladila, sabirnica, kontaktnih elemenata itd.



SLITINE ALUMINIJA

Podjela s gledišta osnovnog postupka prerade

- gnječilačke
- ljevačke

Podjela s gledišta topl. očvrstivosti

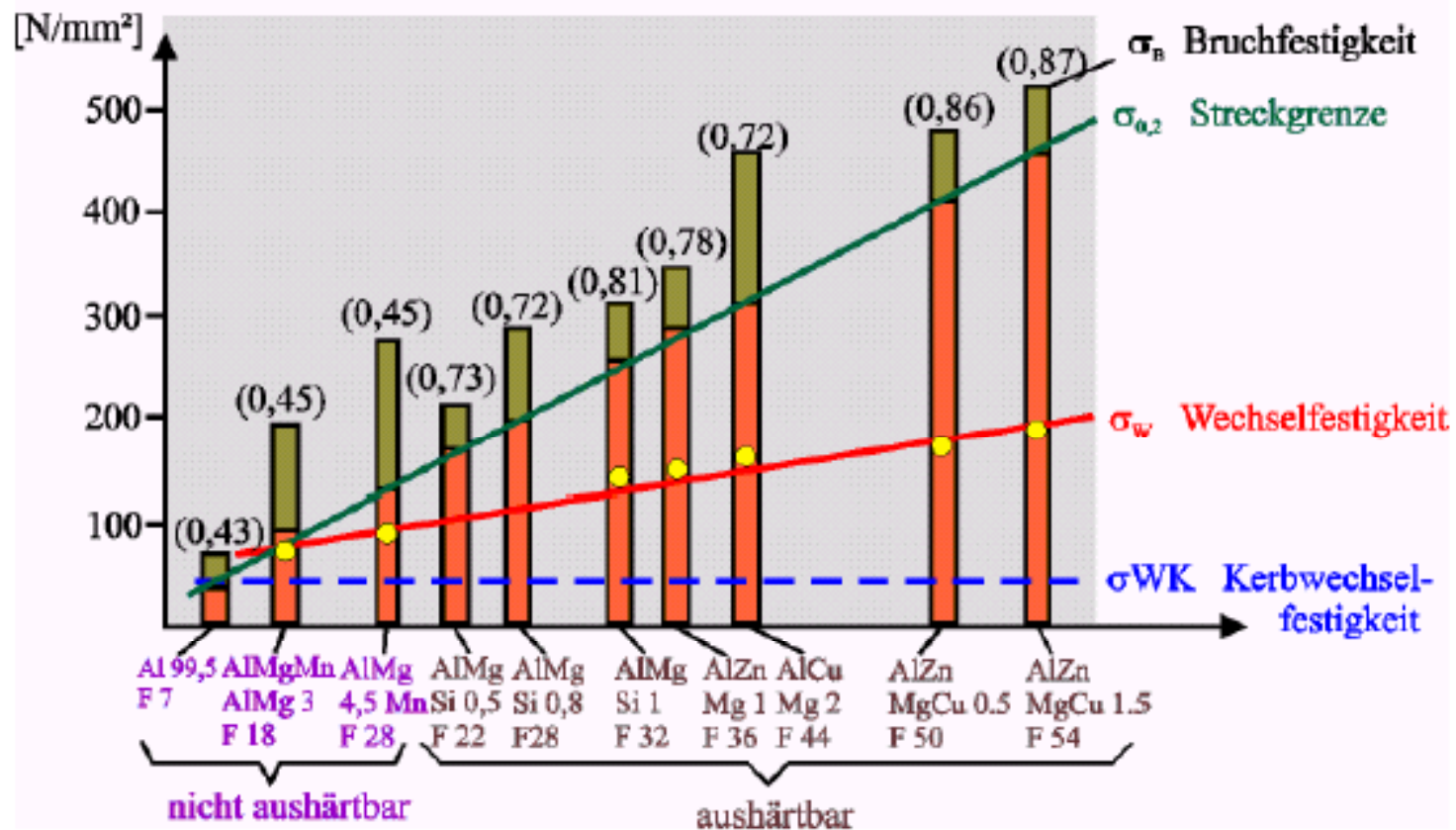
- ◊ tolinski očvrstive
- ◊ toplinski neočvrstive

Važnije slitine za primjenu u elektrotehnici

- **ALDREY E AlMgSi** (0,5% Mg, 0,5% Si, 0,3% Fe)
 - toplinski očvrstiva, antikorozivna slitina
 - svojstva slična tvrdom bakru
- **Al-Mn** ➤ (otporne na koroziju, gnječive)
- **Al-Mg** ➤ (otporne na koroziju, topl. očvrstive)
- **Al-Si** ➤ (AlSi12 ili Silumin, dobro se lijeva, za složene odlijevke)
- **Al-Cu** ➤ (slabo otporne na koroziju, izrazito očvrstive, gnječive)

Duraluminij (Al-Cu-Mg-Mn) slitina visoke čvrstoće

Streckgrenzenverhältnis $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B}$





Can End (5XXX Alloy – Mg rich)



Can Body (3XXX Alloy – Mn rich)

TOPLINSKO OČVRŠĆAVANJE ALUMINIJSKIH SLITINA

(DOZRIJEVANJE, STARENJE)

- **zasniva se na promjeni topivosti faza**, od kojih jedna mora biti **intermetalni spoj**
- **ishodna struktura** sadrži intermetalni spoj (**β -faza**) na **granicama zrna α -mješanaca aluminija**, što **smanjuje istezljivost i žilavost**
- **zagrijavanjem** se rastvara intermetalni spoj
- **naglim hlađenjem** (gašenjem) se na sobnoj temperaturi postižu prezasićeni α -mješanci unutar kojih se **izlučuju sitni kristali intermetalnog spoja**, što se može provoditi:
 - **na sobnoj temperaturi** \Rightarrow **PRIRODNO DOZRIJEVANJE** koje traje nekoliko desetaka dana, ili
 - **na povišenoj temperaturi (do 150 °C)** \Rightarrow **UMJETNO DOZRIJEVANJE** koje traje nekoliko sati
- **odnosu na ishodna svojstva povećava se čvrstoća, istezljivost i žilavost**



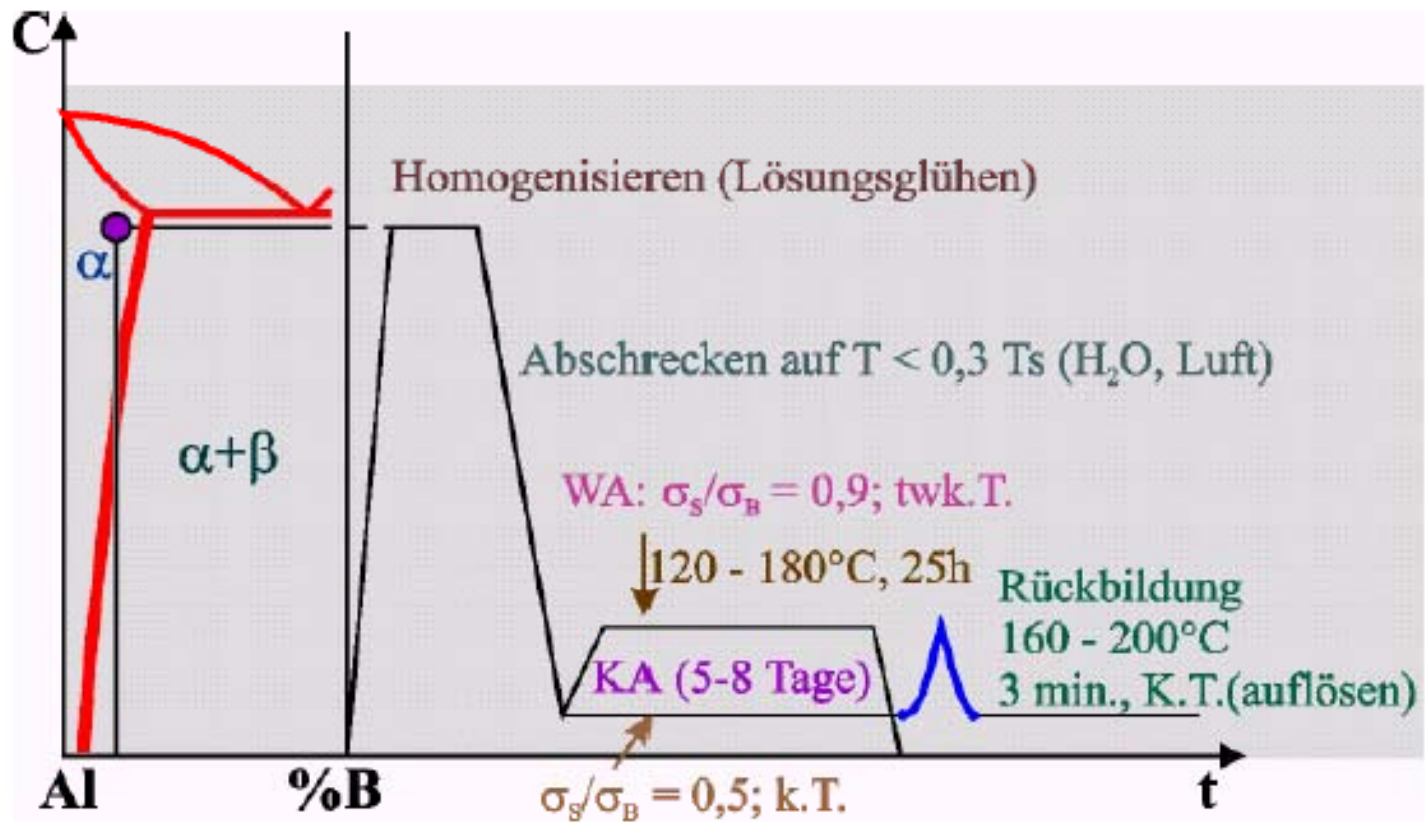


Fig. 22.3 Wärmebehandlung von Al-Legierungen

7.2. MATERIJALI ZA OTPORNIKE

- regulacija U-I, žarne niti, pretvaranje elek. u topl. energiju,...
- opći zahtjevi na materijale (veliki ρ , mali α , topl. i kem.postojanost,...)
- podjela prema radnim temperaturama (do 400°C, do 1200, do 2000, >2000)

- ⊙ REGULACIJSKI I OPĆI OTPORNICI (konstantan, novo srebro, nikelin,...)

- ⊙ PRECIZNI OTPORNICI (manganin, izabelin, novokonstantan,...)
 - vremenski stabilni ρ
- ⊙ SLITINE AZ ELEKTROTERMIJU (Cr+Ni, Cr+Ni+Al, Cr+Ni+Si,...)
 - toplinska postojanost (grijači)
- ⊙ VISOKOTEMPERATURNI METALI (Pt, PtRo, Mo, W,...)
 - posebno otporni na oksidaciju (žarne niti žarulja, elektrode, elek. kontakti,...)



Table 1-1: Materials for precision resistors after DIN 17471.

Werkstoff	Legierungselemente in Gewichts-%			Grenztemp. [°C]	ρ_{sp} [$10^{-8}\Omega m$]	$\alpha_T^{\rho_{sp}}$ [°C ⁻¹]	Thermospannung gegen Cu [$\mu V/°C$]
	Mn	Ni	Al				
CuMn12Ni	12	2	—	140	43	$\pm 10^{-5}$	-0,4
CuNi20Mn10	10	20	—	300	49	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	-10
CuNi44	1	44	—	600	49	$+4 \cdot 10^{-4}$ $-8 \cdot 10^{-4}$	-40
CuMn2Al	2	—	0,8	200	12	$4 \cdot 10^{-4}$	0,1
CuNi30Mn	3	30	—	500	40	10^{-4}	-25
CuMn12NiAl	12	5	1,2	500	40	$\approx 10^{-5}$	-2

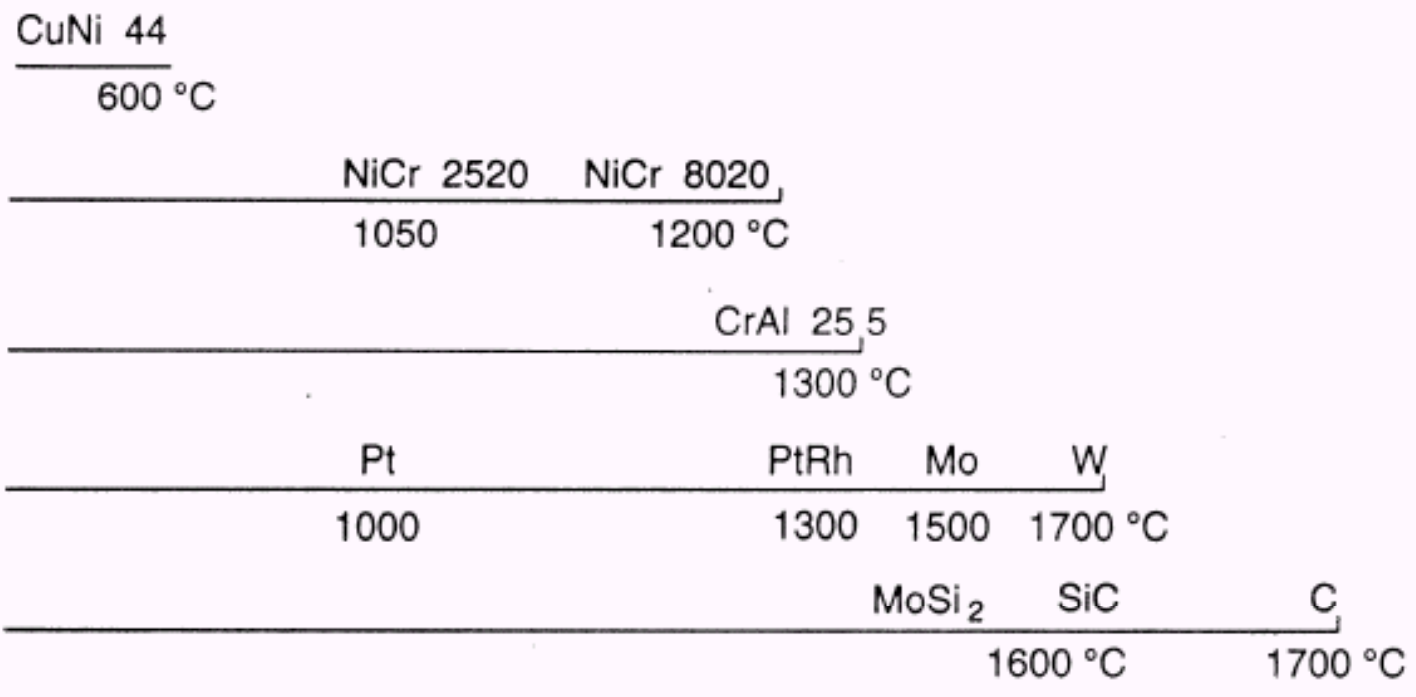
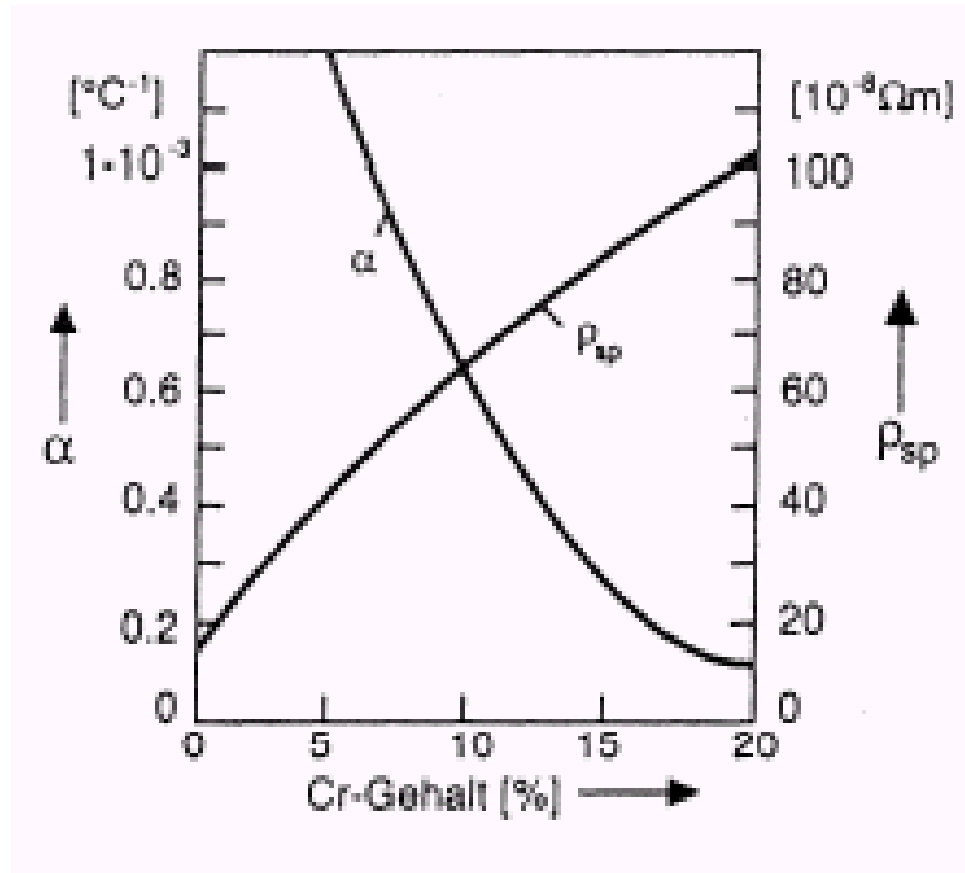


Fig. 1-5: Operation range of different heater materials.



Električna otpornost (ρ) i temperaturni koeficijent otpora (α)

NiCr legura

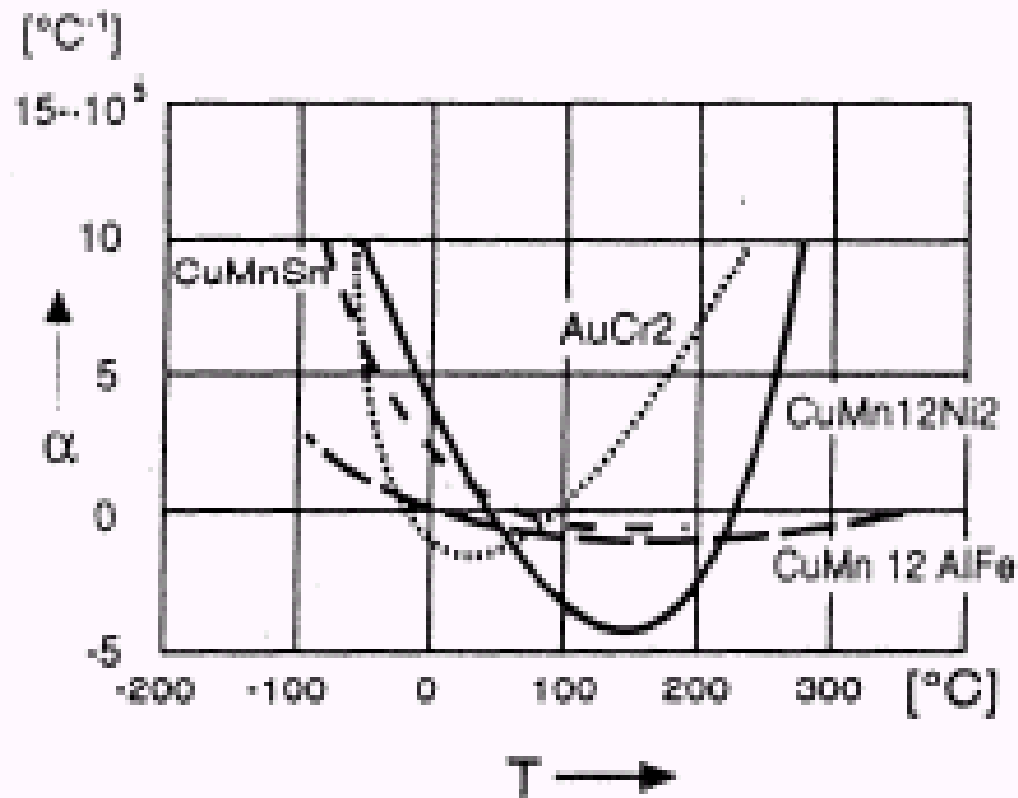


NAZIV MATERIJALA	Kemijski sastav	Gustoća	Električna otpornost	Temp.koef. elektr.otpora	Max radna temperatura
		kg/dm ³	Ohm.mm ² /m	1/ C	C
KONSTANTAN	55%Cu+45%Ni	8,9	0,49	0,00004	350
NIKELIN	67%Cu+30%Ni +3%Mn	8,7	0,40	0,00022	300
NOVO SREBRO	62%Cu+22%Zn +15%Ni+Fe,Mn	8,95	0,34	0,00025	400
MANGANIN (prec.otpor.)	86%Cu+12%Mn +2%Ni	8,4	0,43	±0,00001	60
IZABELIN (prec.otpor.)	84%Cu+13%Mn +3%Al	8,2	0,50	-0,00002	300
NOVOKONSTANTAN (prec.otpor.)	82,5%Cu+13,5%Mn +3%Al+1%Fe	8,2	0,50	0,00004	300
CUPRO	80%Cu+20%Ni	8,97	0,26	0,00029	350
MONEL	30%Cu+67%Ni +Fe,Mn	8,8	0,48	0,00200	425
Chromel A, Cekas 2	80%Ni+20%Cr	8,3	1,04	0,00011	1100
Chromel C	61%Ni+16%Cr +23%Fe	8,24	1,12	0,00026	900
Cronifer II	63%Ni+15%Cr +20%Fe+Mn	8,25	1,12	0,00011	1100
Cekas	65%Ni+15%Cr +20%Fe	8,3	1,13	0,00005	1100
Cekas I	25%Ni+20%Cr +55%Fe	7,8	0,95	0,00133	1050
Cekas extra	75%Fe+20%Cr +5%Al	7,1	1,4	0,00005	1300
Radiohm	83%Fe+13%Cr +4%Al	7,3	1,33	0,00070	1000
Platina		21,45	0,100	0,00400	1300
Rodij		12,5	0,043	0,00430	1700
Wolfram		19,3	0,055	0,00400	3000



Temperaturni koeficijent otpora (α) u zavisnosti o temperaturi

AuCr i CuMn legure



MATERIJALI ZA TERMOELEMENTE (termopar)

uporaba: za mjerenje temp. i regulaciju (-250 do 3000°C)

- zahtijeva se linearna ovisnost $U=U(t)$, visoko talište, otpornost na koroziju, osjetljivost reagiranja



MATERIJALI ZA TERMOBIMETALE

- dva čvrsto spojene trake od kovina bitno različitih temp. koef. istežanja
- porastom temperature bimetal se savija na stranu metala s manjim α
- služe za regulaciju temperature, starteri FR,...
- zahtjevi na materijale: topl.postojanost, dobra vodljivost, mehan. svojstva (elastičnost)
- **mali α** : Fe+Ni (36%Ni Invar)
- **veliki α** : mjed, konstantan, Ni, Al, Platinit (Fe+48%Ni)



PROVODI KROZ STAKLO

- zahtjevi: nepropusni spoj sa staklom, temp. koef. blizak staklu,...
- Cu, Pt, Fe+Ni (fink i platin žica), W, Mo, Fe+Cr,.....



MATERIJALI ZA RASTALNE OSIGURAČE

- najslabije mjesto u strujnom krugu (osiguranje od preopterećenja)
- brzi ($5I_0$, 0,1 sek) i spori ($10I_0$, 1 sek)
- brzina reagiranja se postiže izborom mater. i konstrukcijom (opruga, pijesak..)
- **važna svojstva:** talište, topl. taljenja, elek. otpornost, spec. toplina,...
- Ag, Pb+Sn, Al, Zn, Ag+Cu, Pt,



MATERIJALI ZA KONTAKTE

- brzo i pouzdano zatvaraju i prekidaju strujni krug, dio su strujnog kruga
- **zahtjevi:** elek. vodljivost, toplinska i kemijska postojanost, otpornost na trošenje,
- kontakti za
 - **mala** (Ag, Au i slitine),
 - **srednja** (Ag+Cd, Ag+W, Ag+Mo,...)
 - **velika opterećenja** (Cu, Ag+W,...) i
 - **klizni** (ugljene, grafitne, elektro- i metalo-grafitne četkice)



MATERIJALI ZA LEMOVE

- postupak nerastavljivog spajanja dva metala trećim, koji ima niže talište
- difuzija atoma lema (čistoća površine, talila → dezoksidacija)
- zahtjevi na materijale: elek. provodnost, dobro legiranje s drugim metalima, sposobnost kvašenja, nerastvorivost s talilom,....
- ⊙ **MEKI lemovi** ($t_{talj} < 450^{\circ}\text{C}$) Sn, Pb, Pb+Sn, Sn+Pb+Cu, Sn+Zn, Cd+Ag,...
- ⊙ **TVRDI lemovi** ($t_{talj} > 450^{\circ}\text{C}$) Cu+Zn, Cu+Sn, Cu+P, Cu+Ag+Zn, Al+Si,...

$$t_{talj}^{LEM} < t_{talj}^{OSNMAT}$$