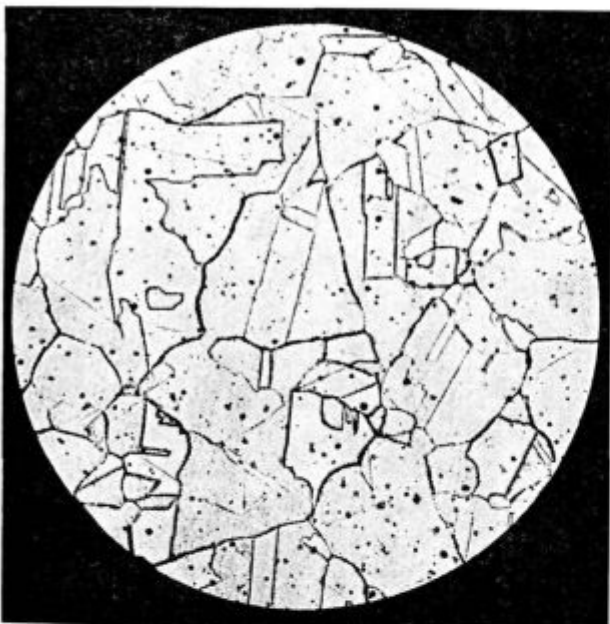


## Domači uporabni materiali za visoke temperature

*Elektrouporovni materiali na osnovi Cr-Ni ter Cr-Al zlitin imajo široko območje uporabe v industriji ter ostali potrošnji. Domača predstavnik teh zlitin — proizvoda Železarne Ravne — Ravnin in Ravnal pokrivata celotno področje uporabe do najvišjih temperatur. Pri vgradnji in eksploataciji teh materialov je treba veliko pazljivosti kakor tudi kompleksno poznavanje celotne elektrotplotne problematike. Le pri izpolnitvi cele vrste zahtev lahko pričakujemo optimalno življenjsko dobo grelnih elementov.*

### SPLOŠNO

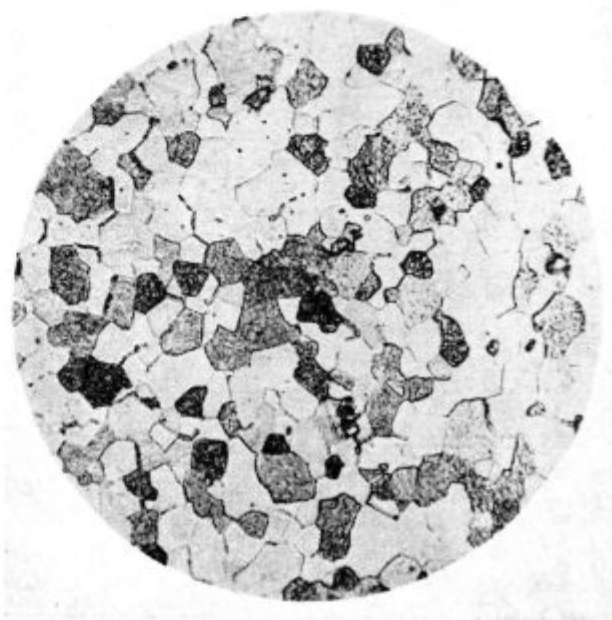
Ze v tridesetih letih — kmalu po prvi svetovni vojni — so se uporabni materiali za visoke temperature na bazi CrNi tako izpopolnili, da so postali splošno uporabni tako v Evropi kot v Ameriki.



Mikrostruktura Ravnin-a

Dobre lastnosti Cr-Ni zlitin so v tem, da se dajo lahko oblikovati ter nimajo v vsem temperaturnem območju uporabe nobenih kristalnih premen. Struktura je avstenitna. Zlitina ni krhka, določeno krhkost povzroča v Cr-Ni uporabnih materialih prevelik odstotek Si. Odpornost proti ognju je zelo dobra, saj je natezna trdnost še pri 1000°C

precejšnja in mnogo višja kot pri ostalih uporabnih materialih. Obstojnost Cr-Ni materialov na visokih temperaturah je zasnovana na zaščitni plasti kromovih in kobaltovih oksidov, s katerimi se material obda ob prvem segrevanju in ki so temperaturno zelo odporni. Specifična ohmska upornost



Mikrostruktura Ravnala

omenjenih zlitin se giblje okrog 1 [ohm mm<sup>2</sup>/m], vendar je precej odvisna od temperature; specifična upornost se pri 1000°C poveča celo za več kot 25%.

Predstavniki te skupine uporabnih materialov za visoke temperature so materiali z označbo RAVNIN. Ti obsegajo štiri vrste materialov, odvisno od velikosti in medsebojnega razmerja legur Cr in Ni. Tipičen in najbolj uporabljan je RAVNIN 2, za katerega je v nadaljnjem tekstu prikazanih več lastnosti in navodil za uporabo.

Druga skupina uporabnih materialov za visoke temperature — skupina RAVNAL-ov — so zlitine Cr-Al. To je feritni uporabni material, kakršnega je v prvotni obliki l. 1926 patentiral H. Kantzow in kakršnega je pet let kasneje začel proizvajati švedski Kanthal iz Hallstahammarja. Ta skupina omogoča uporabo grelnega uporabnega materiala do temperature ca. 1300°C. RAVNAL-i so za 15%

lažji od Cr-Ni zlitin RAVNIN-a, specifična ohmska upornost (1,35—1,40 ohma mm<sup>2</sup>/m) pa je za 20 do 35 % večja. Za svojo visoko temperaturno obstojnost se imajo RAVNAL-i zahvaliti površinski oksidacijski plasti iz pretežno Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ki štiti notranjost grelnega elementa pred nadaljnjim razkrojem. Trdnost RAVNAL-ov pri visokih temperaturah je manjša kot pri Cr-Ni zlitinah, zato jim pri navi-

janju v grelni element dajemo ustrezno manjši premer spirale kot npr. pri RAVNIN-u.

Slaba stran Cr-Al zlitin je v njih krhkosti in slabi zmožnosti deformacij, kar je posledica povečanja kristalov po večkratnem segrevanju in ohlajanju. S posebnimi tehnološkimi merami ali pa z dodajanjem karbidov in oksidov lahko do določene meje zmanjšamo njih nagnjenost h krhkosti.

Primerjalna tabela

Označba ZR	JUS	Werkstoff No	DIN	Kanthal
RAVNIN 2	Č. 4561	Nr 1.4860	NiCr 30/20	Nikrotal 40
RAVNAL 1	Č. 4905	Nr 1.4905	CrAl 20/5	Kanthal DS
RAVNAL 2	Č. 4961	Nr 1.4774	CrAl 30/5	Kanthal A

Tabela 1: Povprečna analiza

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Ti	P + S max.
RAVNIN 2	0,20	1,80	1,20	21,0	30,0	—	—	0,055
RAVNAL 1	0,06	0,70	0,35	22,8	—	4,5	0,8	0,030
RAVNAL 2	0,06	0,70	0,35	22,8	—	5,5	0,8	0,030

Tabela 2: Fizikalne lastnosti

Lastnosti	Enota	RAVNIN 2	RAVNAL 1	RAVNAL 2
Maksimalna temperatura grelnega elementa	deg C	1100	1150	1250
Specifična ohmska upornost pri 20° C	Ω mm <sup>2</sup> /m	1,04 ± 0,05	1,35 ± 0,05	1,40 ± 0,05
Specifična masa	kg/dm <sup>3</sup>	7,9	7,3	7,2
Specifična toplota	J/deg kg	575	630	630
Toplotna prevodnost	W/m deg	13,0	13,0	13,0
Emisijski količnik žarčenja		*0,80—0,95	*0,80—0,95	*0,80—0,95
Temperatura taljenja	deg C	1370	1505	1505
Natezna trdnost pri 20° C	kp/mm <sup>2</sup>	60—70	65—75	65—75
Meja plastičnosti	kp/mm <sup>2</sup>	30—40	50—55	50—55
Razteg	%	40—45	28—33	28—33
Kontrakcija	%	70—75	64—69	64—69
Trdota HB		130—150	200—260	200—260
Magnetne lastnosti		nemagnetno	magnetno	magnetno
Struktura		avstenit	ferit	ferit
Obdelava in deformacija		dobra	slabša	slabša

\* Pri temperaturah 400—1000° C; raste s temperaturo

Tabela 3: Natezna trdnost v toplem [kp/mm<sup>2</sup>]

[deg C]	600	700	800	900	1000	1100	1200	1250
RAVNIN 2	9,50	4,50	2,00	0,85	0,40	0,15	—	—
RAVNAL 1	4,00	1,50	0,60	0,25	0,10	0,03	0,01	—
RAVNAL 2	4,00	1,50	0,60	0,25	0,10	0,03	0,01	0,006

Tabela 4: Linearni koeficient raztezka [ $10^{-6} \text{ deg}^{-1} \text{ C}$ ]

[deg C]	0—100	0—300	0—500	0—700	0—900	0—1100	0—1200
RAVNIN 2	16,5	17,1	17,7	18,3	19,1	19,9	—
RAVNAL 1	13,4	14,2	14,9	15,8	16,7	17,8	18,9
RAVNAL 2	13,4	14,2	14,9	15,8	16,7	17,8	18,9

Tabela 5: Temperaturni faktorji  $F_t$  ohmskih upornosti

$F_t$	[deg C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
RAVNIN 2		1,029	1,067	1,096	1,125	1,154	1,173	1,192	1,212	1,231	1,251	1,270
RAVNAL 1		1,005	1,008	1,013	1,020	1,032	1,046	1,056	1,062	1,067	1,070	1,073
RAVNAL 2		1,002	1,006	1,011	1,017	1,027	1,036	1,042	1,048	1,052	1,055	1,057

## PROIZVODNI PROGRAM

Današnji proizvodni program Železarne Ravne za uporabne grelnne materiale obsega materiale na osnovi Cr-Ni — RAVNIN-e ter materiale na osnovi Cr-Al — RAVNAL-e. Tehnologija zajema pridobivanje zgornjih zlitin ter njih kompletno plastično predelavo do končnih proizvodov — vlečene žice. Zelo komplicirana tehnologija se prične pri taljenju zlitine v visoko frekvenčnih pečeh ter se nadaljuje preko litja taline v ingote, njihovega kovanja pod strogo določenimi pogoji do toplega valjanja ter hladnega vlečenja z medfazno termično in mehansko obdelavo. Opravljajo se številne kontrole proizvodnega procesa z namenom, da bi dosegli čimmanjše razsipanje kvalitete končnega izdelka.

Proizvajamo vlečeno grelnno žico od maksimalnega premera  $\varnothing$  6 mm do najdrobnejših debelin. Danes se praktično povsod po svetu uporabne žice proizvajajo v dimenzijah, ki sledijo aritmetični vrsti; tak je tudi naš program. Diferenca aritmetične vrste je spremenljiva: pri velikih premerih je velika, pri majhnih pa majhna, npr.: 5,00 do 4,75 — 4,50 ... 2,60 — 2,50 — 2,40 ... 0,65 — 0,60 do 0,55 itd.

Tolerance vlečene žice so v skladu s H 11.

## PODROČJE UPORABE

Proizvodni program uporabne žice za visoke temperature, kot je prikazan v zgornjih tabelah v kvalitetah RAVNIN in RAVNAL, pokriva potrebe celotne elektro toplote, ki zajema prtevorbo električne energije v toplotno na osnovi uporabnih grel do temperatur 1000—1250° C. Najširša področja uporabe RAVNIN-ov in RAVNAL-ov so predvsem:

- v kovinski industriji,
- v keramični industriji,
- v industriji stekla
- ter v industriji gospodinjskih aparatov.

Naprave, v katere so vgrajena uporabna grela iz materialov Železarne Ravne, so:

kalilne, žarilne, popustne peči vseh konstrukcij, ogrevne peči za trdne, tekoče in plinaste medije,

grelne in kuhalne plošče, likalniki, potopni grelci itd.

ter močnostni upori v elektrotehniki.

Ob upoštevanju navodil o uporabi nadomestujejo RAVNIN-i in RAVNAL-i — proizvodi Železarne Ravne — v celoti prej uvožene grelnne materiale, ki smo jih poznali pod imeni, kot npr.: cekas I, cekas II, kanthal DSD, kanthal DST, fekral, kromal, smit 10, RCA, megapyr, kanthal A itd.

## IZDELAVA GRELNIH ELEMENTOV

Osnovna oblika grelnnega elementa iz uporabne žice je spirala. Taka oblika grela se je rodila iz težnje, da se zmanjša velikost in skoncentrira toplotna moč v manjši prostor. Kako ta oblika grela vpliva na lastnosti naprave in na življenjsko dobo grelnnega materiala samega, je razvidno iz sledečih poglavij. Tu si bomo ogledali, kako se spirala izdelava in na kaj je potrebno pri tem paziti.

Spirale običajno navijamo v hladnem, le v izrednih primerih navijamo spirale iz RAVNAL-a pri temperaturi 100—200° C, npr. pri zelo majhnem razmerju med premerom spirale in debelino žice (razmerje 3). Pri navijanju spiral ločimo dva osnovna načina navijanja: navijanje spiral iz žice premera pod 1 mm ter navijanje spiral iz žice premera nad 1 mm.

### a) Navijanje spirale iz žice debeline pod 1 mm

Take spirale navijamo strojno na posebnih navijalnih strojih-avtomatih, ki samodejno izdelujejo kompletne spirale. Stroj navija spiralo ovoj do ovoja, zato jo je potrebno pred uporabo raztegniti na zahtevano dolžino. Kakor je razvidno iz posebnega odstavka o geometriji spirale — grelnnega elementa, je priporočljiv tak razmak med ovoji, ki je enak enkratni do dvakratni debelini žice, zato je potrebno spiralo navito ovoj do ovoja, raztegniti za enkratno do dvakratno dolžino. Hlad-

no spiralo raztegnemo samo toliko, da se sosednji ovoji ne dotikajo, nato jo segrejemo običajno tako, da jo priključimo na izvor napetosti. Tako segreto spiralo (temperatura naj bo nižja od 1000° C, šele raztegnemo na končno dolžino. Tak način izdelave spirale ima več prednosti: spirali lahko damo točno dolžino, ker se več ne skrči, kar bi se zgodilo, če bi jo raztegnili hladno. Ovoji spirale se pri toplem postopku enakomerno razporedijo po celi dolžini, kar je zelo važno za vzdržljivost naprave. Pri neenakomerni razporeditvi ovojev dobimo lokalna povišanja temperature, kar ima za posledico skorajšnje pregorete žice na teh mestih. Tretja ugodna prednost toplega raztegovanja spirale pa je v tem, da lahko spirala, ki se segreva v čistem zraku, lepo oksidira po površini žice, kar je tudi važno za njeno dolgo življenjsko dobo. Pri opisanem segrevanju spirale je potrebno paziti na varnost dela. Podloga, na kateri raztegujemo, mora biti neprevodna za električni tok.

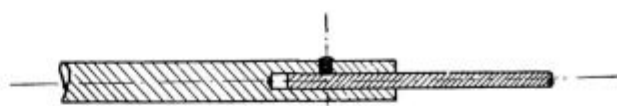
#### b) Navijanje spirale iz žice debeline nad 1 mm

Spirale iz večjih debelin grelne žice imajo kljub okvirnim zahtevam po določeni geometriji (ki so podane v poglavju o življenjski dobi grelne žice) tako raznolike parametre, da se jih ne izplača serijsko izdelovati tako kot spirale manjših dimenzij (za gospodinjke aparate itd.). Materialna vrednost takih spiral je tudi mnogo večja in njihova funkcija toliko pomembnejša, zato zahteva njihova izdelava vso skrbnost in natančnost. Navijamo jih na običajnih stružnicah na trn, ki je vpet med glavo delovnega vretena in med konus konjička. Navijamo lahko ovoj do ovoja ali pa že z zahtevano strmino ovoja. Ker so spirale teh dimenzij izdelane za velike moči (tudi več deset kW, bi bilo njih raztegovanje v toplem zelo nerodno in problematično. Zato izkoristimo lepo možnost stružnice, ki nam omogoča s pomočjo supporta navijanje s podajanjem, torej navijanje z zahtevano strmino navoja. Tako lahko navijamo vse dimenzije spiral poljubnih dolžin, saj ima stružnica običajno delovno vreteno votlo in skozenj potisnemo vsako navito dolžino spirale v posebno korito, ker lahko spirala lepo rotira. Paziti je treba, da navijamo z enakomerno zatezalno silo, kar dosežemo z lesenim vodilom, ki ga vpnemo v support stružnice. Grelna žica se ne sme nikjer drgniti po kovinskih delih, da ne bi nastale odrgnine in risi na njeni površini. Čeljusti vpenjalne glave zato podložimo s trdim lesom, da se ne poškoduje že navita spirala.

#### Priključni konci grelnih spiral

Priključki grelnih spiral se izvedejo ojačano, da se zmanjša temperatura spojnega mesta med spiralo in električnim vodnikom. Priključek naj ima približno trikratni presek žice, iz katere je spirala. Pri drobnih premerih žice izvedemo tak priključek preprosto tako, da na koncu spirale dvojno ali trojno žico zavijemo v čvrst vodnik.

Paličast priključek take spirale je izveden tako, da je palica, ki ima vrezan navoj, uvita v spiralo kot vijak in privarjena po ovogh na spiralo.



Spirale z večjimi premeri grelne žice imajo samo paličaste priključke. Na enem kraju ima palica izvrtino vzdolž osi, v katero se vstavi konec spirale. Pod stiskalnico ali v primežu se votli del palice tako deformira, da čvrsto drži vstavljen konec spirale. Skozi bočno izvrtino se nato oba spojna komada zavarita. Spojni komadi naj bodo praviloma iz istega materiala, kot je grelna žica, lahko pa so tudi iz specialnih konstrukcijskih jekel, kot npr.: prokron 10, prokron 19, prokron 20, vendar le tam, kjer priključki niso izpostavljeni maksimalni temperaturi, sicer se zaradi difuzijskih pojavov življenjska doba grelne žice na tem mestu zmanjša.

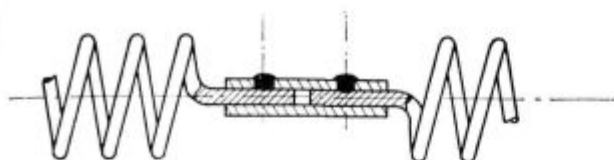
#### Varjenje RAVNIN-a in RAVNAL-a

RAVNIN-i in RAVNAL-i se dajo variti električno in avtogeno. Električno varjenje se naj vrši pod zaščitno atmosfero argona, helija ali vodika, če imamo volframove elektrode. Električno pa lahko varimo tudi z grafitnimi elektrodami premera ca. 4 mm, odvisno od debeline varjenca; pri manjši debelini varjenca elektrodo ošilimo. Dodajanje materiala običajno ni potrebno; dovolj je, če stalimo oba dela varjenca. Variti je potrebno hitro, da se material ne naogljjiči. Boljše je varjenje z enosmernim tokom, ker je obločni plamen bolj stabilen. Pri tem varjenju naj bo grafitna elektroda priključena na minus pol. Velikost električnega toka naj bo prilagojena debelini varjenca, kot sledi:

Premer žice [mm]	Tok [A]
ca. 1,0	30—50
2,0	50—75
3,0	75—100
4,0	100—125
5,0	125—150

RAVNIN-e in RAVNAL-e lahko varimo tudi avtogeno z elektrodami iste sestave, kot je grelna žica sama. Variti je potrebno hitro in sigurno. Varimo lahko z golimi elektrodami. V tem primeru je potrebno čimprej odstraniti žilindro, da se ohrani odpornost grelnega elementa proti ognju. Avtogeno varjenje je predvsem prikladno takrat, ko še varjenec ni bil segret na 700—800° C. Pri pregorelih grelnih elementih je potrebna velika mera opreznosti, ker so posebno RAVNAL-i v tem stanju

krhki in je vsaka deformacija v hladnem nedopustna. Tak element iz kvalitete RAVNAL-a je potrebno segreti na 600–800°C in ga pri tej temperaturi naravnati na obliko, v kateri ga bomo zavarili. Prekinjena konca grela zavarimo tako, kot je prikazano na spodnji skici.



## ZIVLJENJSKA DOBA GRELNE ŽICE

Življenjska doba grelnega uporabnega materiala je popolnoma odvisna od okoliščin, v katerih opravlja svojo funkcijo pretvornika energije. Nanjo bistveno vplivajo konstrukcija in temperatura peči, možnosti sevanja, površinska obremenitev, število vklopov in izklopov, konstrukcija spiral, nosilni material, pečna atmosfera itd. Kako vplivajo naštetih parametri grelnih elementov in peči na življenjsko dobo ali vzdržljivost materiala, je prikazano v naslednjih odstavkih. Preden pa preidemo k tem specifičnim razmotrivanjem, je potrebno, da si ogledamo merilne metode, preko katerih je ob določenih pogojih možno priti do podatkov, ki so osnovno merilo za vzdržljivost ali življenjsko dobo. V glavnem obstajata dve merilni metodi:

a) Merilna metoda po predlogu essenskega elektro toplotnega inštituta.

Metoda je priznana predvsem v kontinentalnem delu Evrope. Merilo vzdržljivosti je število vklopov, pri katerih se spirala iz žice debeline 0,4 mm v času 2 minut segreje na konstantno temperaturo 1050°C, nato pa se 2 minuti ohlaja. Ker je trajanje meritve pri novejših materialih lahko zelo dolgotrajno (preko 10.000 vklopov), so dopustne meritve tudi pri višjih temperaturah spirale (1250°C). Število vklopov intermitence 50 % se šteje do pregretja spirale; računa se s povprečjem najmanj 5 preizkušencev.

b) Merilna metoda po ameriškem ASTM sistemu (American Society for Testing Materials).

Grelna žica dolžine 300 mm ter premera 0,645 do 0,81 mm je prosto obešena med dva kontakta. Med poizkusom je napetost izvora električne energije konstantna. Intermitenca 50 % je ista kot pri evropski metodi. ASTM se uporablja predvsem v Ameriki in Angliji. Švedi (Kanthal) so aplicirali ASTM metodo na premer žice 0,7 mm ter delajo preizkuse običajno pri 1200°C.

Rezultati raznih merilnih metod se med seboj ne morejo primerjati, ker je v samih metodah mnogo specifičnosti; pri poizkusih s konstantno napetostjo dobimo na primer pri različnih materialih različne temperature. Danes se opaža tendenca, da bi naj bila temperatura merilo za

vzdržljivost grelne žice. Predlaga se ona temperatura, pri kateri bi bila življenjska doba gorenja 100 ur.

## 1. Vpliv formiranja

Vsi danes poznani metalurški ogrevni materiali bazirajo svojo obstojnost pri visokih temperaturah na oblikovanju zaščitnega sloja na površini žice. Ta v splošnem oksidni sloj je obstojen pri zelo visokih temperaturah ter ščiti material v notranjosti prereza žice pred nadaljnjo oksidacijo. Pri RAVNIN-u sestavljajo oksidacijsko plast kromovi, železovi ter kobaltovi oksidi ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CoO}$ ), pri RAVNAL-u pa poleg naštetih predvsem še aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in sicer več kot 95 % celotne sestave. Zelo važno za življenjsko dobo grelnega elementa je, da se mu pri prvem segrevanju na visoko temperaturo omogoči pravilno formiranje oksidacijskega sloja. Najlepše se oblikuje sloj v oksidacijski atmosferi, to je na zraku. Redukcijska atmosfera, ki sicer pozneje z minimalnim učinkom naogljčenja ne vpliva bistveno na življenjsko dobo, je v času formiranja ogrevnega materiala uničujoča. Nujno je torej treba pri prvem segrevanju peči ali naprave omogočiti grelnim elementom dober dostop svežega zraka.

## 2. Vpliv temperature

Razne merilne metode kakor tudi vsakdanja praksa kažejo s svojimi rezultati, da velja za vse grelne materiale ista funkcijska odvisnost življenjske dobe od temperature elementa. Funkcija je eksponentialna; s presenetljivo majhnim odstopanjem med grelnimi materiali z Raven in nemškimi ter švedskim kanthalom je eksponent 16. Enačba je sledeča:

$$\frac{t_2}{t_1} = \left( \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} \right)^{16}$$

pri čemer je:

$t_1$  — relativna življenjska doba pri temperaturi  $\vartheta_1$  [°C]

$t_2$  — relativna življenjska doba pri temperaturi  $\vartheta_2$  [°C]

Zastrašujoči eksponent, ki je elektrotehnikom poznan tudi iz dognanj o življenjski dobi žarilnih nitk v žarnicah, dobi polno vrednost, če ga preračunamo v %. Zakon pravi, da se življenjska doba grelne žice zmanjša na polovico, če se temperatura elementa poviša za 4,5 %. Procent se zelo dobro ujema s podatkom iz literature, da se namreč življenjska doba razpolovi pri temperaturi grelnega elementa ca. 1000°C ob njenem povišanju za 50°C. Zaradi tako velike občutljivosti grelnega materiala na temperaturo je potrebna velika mera pazljivosti pri dimenzioniranju grel, posebej pa še pri njih nameščanju. Vsako lokalno pregretje materiala iznad povprečka ima za posledico skorajšnje uničenje grelne žice na tem mestu. Odnos

Tabela 6: Izbor grelnega materiala z ozirom na pečno atmosfero

Atmosfera	Material	Maks. temp. [°C]	Opomba
Zaščitni plin	RAVNAL 2	1100	Zaščitni plin mora biti brez žvepla
	RAVNIN 2	1050	
Vodik	RAVNIN 2	1250	Vodik mora biti suh
Vodik vlažen	RAVNAL 2	1350	Na grelih se ne sme nabirati kondenzat
	RAVNAL 1	1250	
	RAVNIN 2	1050	
Plavžni plin	RAVNIN 2	1150	Velja za čisti plin
Para	RAVNIN 2	1000	
Ogljikov dioksid	RAVNAL 1	1050	
Ogljikov monoksid	RAVNIN 2	950	
	RAVNAL 2	1100	
Plini z žveplom in vodikom	RAVNAL 2	1100	
	RAVNAL 1	1050	
	RAVNIN 2	700	
Klor, brom, fluor	RAVNIN 2	max. 250	Halogeni so pri visoki temperaturi zelo agresivni

vzdržljivosti oziroma življenjskih dob med posameznimi materiali pri normalnih pogonskih okoliščinah ter pri enaki temperaturi je naslednji:

RAVNIN 2	100 %
RAVNAL 1	ca. 400 %
RAVNAL 2	ca. 500 %

Iz teh relativnih podatkov sledi, da lahko uporabljamo RAVNAL 1 in RAVNAL 2 za precej višje temperature kot RAVNIN 2. Skrajne temperature grelnih elementov za posamezne materiale pri normalnih pogojih (v zraku) so za:

RAVNIN 2	1100° C
RAVNAL 1	1150° C
RAVNAL 2	1250° C

### 3. Vpliv atmosfere

Atmosfera peči, to je ozračje v peči, s katerim pride grelni material v neposredni dotik, igra važno vlogo v življenju grelnih spiral. Različni sestavni deli atmosfere različno reagirajo s površinskim oksidnim slojem uporabne žice. Nekateri plini povečujejo obstojnost oksidov, drugi pa jo zmanjšujejo. Njih vpliv se najlepše vidi iz spodnje tabele, kjer so za posamezne materiale podane maksimalne temperature grelnih elementov. Iz tabele 6 je tudi razvidno, kdaj se posamezni materiali sploh lahko uporabljajo.

### 4. Vpliv površinske obremenitve

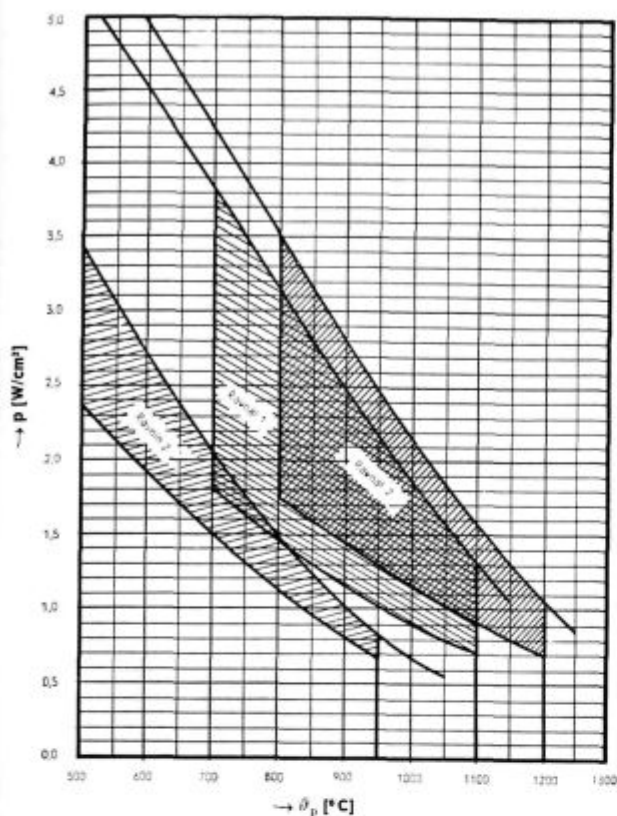
Površinska vatna obremenitev grelnega elementa je v neposredni povezavi s temperaturo spirale, zato je določitev pravilne površinske obremenitve za vzdržljivost materiala odločilna. Za vrednosti površinskih obremenitev je v literaturi mnogo podatkov; običajno se podajajo v odvisnosti od materiala in pečne temperature. Ti podatki izhajajo kot povprečje točnejših računov in merjenj za posamezne vrste peči in naprav. V diagramih

maksimalnih in normalnih površinskih obremenitev za industrijske peči so podane vrednosti za RAVNIN 2, RAVNAL 1 ter RAVNAL 2 v odvisnosti od temperature peči. Podani razponi površinskih obremenitev izhajajo iz različnih konstrukcij namestitve spiral oziroma samih peči. Kako vpliva konstrukcija namestitve grelnih elementov na povečanje dejanske površinske obremenitve in preko teh na povečanje temperature spiral, je podrobneje prikazano v poglavju o izračunu industrijskih peči v odstavku o temperaturnih razmerah v peči. Vsekakor je pri izbiri površinske obremenitve potrebna velika mera pazljivosti; pri določanju te velikosti se največkrat greši. Načelo, uporabljati čim nižje vrednosti, govori seveda v prid vzdržljivosti oziroma življenjski dobi, vendar je težko dosegljivo tako iz čisto elektrotehniškega gledišča (velike in dolge spirale z velikim presekom grelne žice) kakor tudi s stališča ekonomične konstrukcije peči (prevelike notranje površine). Iz nasprotujočih si zahtev posameznih elementov celotne naprave izhajajo torej podane normalne vrednosti površinskih obremenitev kot kompromis. Orientacijski podatki površinskih obremenitev za nekatere druge naprave so podani v naslednji tabeli:

Tabela 7: Okvirni podatki površinskih obremenitev grelne žice

Grelna naprava	Površ. obr. [W/cm <sup>2</sup> ]
1. Industrijske peči	1,5—3
2. Laboratorijske peči	2—3
3. Kuhalne plošče	4—6
4. Električni lonci in čajniki	4—6
5. Sušilci rok in feni	5—10
6. Potopni in pretočni grelci vode	10—30

**Maksimalna in normalna površinska obremenitev grelne žice za industrijske peči**



$p$  [W/cm<sup>2</sup>] — površinska obremenitev  
 $\theta_p$  [°C] — temperatura peči

**5. Vpliv konstrukcije grelnega elementa**

Življenjska doba raste z debelino grelnega vodnika, kakor to kaže diagram o vplivu debeline spirale na njeno življenjsko dobo. Zaradi tega uporabljamo debelejšje premere grelnih žic predvsem tam, kjer se zahteva boljša vzdržljivost in kjer so grelni elementi podvrženi vsem vplivom, ki zmanjšujejo njihovo življenjsko dobo. Za industrijske peči se na primer priporoča, naj ima grelna žica debelino večjo od 3 mm.

Da bi se dosegla približno enaka življenjska doba pri manjših premerih, je potrebno pri le-teh zmanjšati maksimalno temperaturo grelne žice, kot kaže tabela 8.

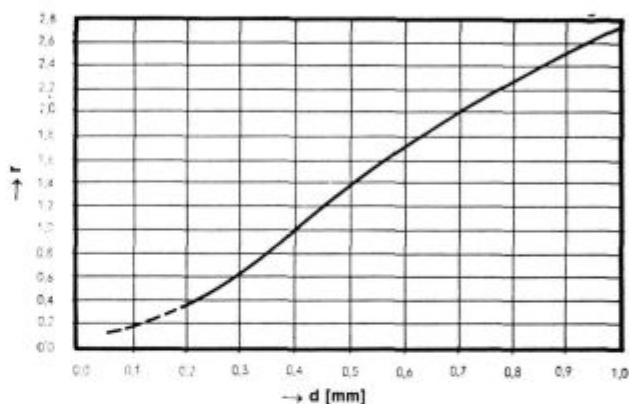
Važen vpliv na vzdržljivost grelnih elementov ima tudi sama geometrija grela, kot na primer

*Tabela 8: Maksimalne temperature grelnih materialov [°C]*

Material	d [mm] 0,15—0,4	d [mm] 0,41—0,95	d [mm] 1,0—3,0	d [mm] > 3,0
RAVNIN 2	850— 950	950—1000	1000—1050	1100
RAVNAL 1	900—1000	1000—1050	1050—1100	1150
RAVNAL 2	925—1050	1050—1150	1150—1200	1250

premer spirale ter strmina navoja spirale. Zaradi slabšanja mehanske trdnosti materiala s porastom temperature obstaja namreč nevarnost, da se spirala seseda oziroma ovoji prevrnejo. Posebno občutljive so ležeče spirale, posebno še, če so zaprte v dno. Običajno se ne kontrolira temperatura tako zaprte spirale, zato se dogajajo v tem delu peči najpogostejše poškodbe spiral. V sledeči tabeli so navedeni orientacijski podatki, kakšni naj bodo premeri spiral  $D$  mm v odvisnosti od premera grelne žice  $d$  mm, materiala ter temperature. Viseče spirale imajo lahko nekaj večje premere od spodaj podanih.

**Vpliv debeline spirale na njeno življenjsko dobo**



$r$  — razmerje življenjskih dob  
 $d$  — debelina spirale

*Tabela 9: Geometrija grelnih spiral*

Material	d [mm]	$\theta_s < 1000^\circ \text{C}$	$\theta_s > 1000^\circ \text{C}$
RAVNAL	$d < 1$	$D = (5-12) d$	$D = (5-8) d$
	$d > 1$	$D = (5-14) d$	$D = (5-10) d$
RAVNIN	$d < 1$	$D = (5-8) d$	$D = (5-6) d$
	$d > 1$	$D = (5-10) d$	$D = (5-7) d$

Strmina navoja  $s$  mm, to je razmak med sosednjima ovojema, mora biti:

- za ležeče spirale  $s \geq 2 d$
- za viseče spirale  $s \geq 1 d$

## 6. Vpliv nosilne konstrukcije

Nosilna konstrukcija grelnih spirali je oni del peči, s katerim pridejo grelni elementi v neposreden dotik. Ločimo konstrukcije za obešanje spirali ter konstrukcije, na katerih spirala leži. Pri slednji je predvsem važno, da omogoča grelnemu elementu čim ugodnejše sevanje v prostor peči (glej tabelo sevalnih faktorjev  $k_2$ ). Podporna opeka mora biti tako izdelana, da leži spirala v prerezu vedno le na dveh točkah, ki zagotavljata najmanjše deformacijske obremenitve spiralnega kolo-barja.

V življenju grelne spirale igra material, iz katerega je narejena nosilna konstrukcija, tj. proti ognju odporen material, veliko vlogo. Neposreden dotik površin spirale in površin nosilne konstrukcije ustvarja vedno ugodne pogoje kemičnim, termičnim in električnim razkrojevalnim reakcijam. Pri slabo izbrani kombinaciji obeh materialov in ob premajhnem upoštevanju temperature grelne žice je obstojnost le-te zelo ogrožena. V naših tržnih razmerah ni velike izbire pri nabavi za ta namen posebno izdelane negorljive opeke, zato se pač vgrajuje v peči material, ki je na razpolago. Vendar se je treba pri tem zavedati, da ni grelni material tisti, ki je kriv pogostnih defektov peči, marveč je to material nosilne konstrukcije. Mnoge raziskave so pokazale, da grelnemu materialu RAVNIN in RAVNAL najbolj odgovarja proti ognju odporen nosilni material po spodnji tabeli.

Tabela 10: Nosilni materiali

Temperatura spirale °C	Nosilni material
do 1000	Samotna opeka z min. 45 % $Al_2O_3$
1000—1200	Silimanitna opeka z min. 65 % $Al_2O_3$
Preko 1200	Korundna opeka z min. 70 % $Al_2O_3$

Zelo važno je, da opeka ne vsebuje alkalnih ali železooksidnih primesi, ki rade tvorijo zelo reaktivno žlindro. Posebno občutljiv je RAVNAL, ki zahteva v svojem materialu čim večji odstotek  $Al_2O_3$ .

Poleg velike obstojnosti pri visokih temperaturah je pri nosilnih proti ognju odpornih materialih za električne uporabne peči zelo važna velika specifična upornost. Zelo čisti materiali na bazi  $MgO$  in  $Al_2O_3$  imajo specifične upornosti pri običajni temperaturi reda velikosti  $10^{14}$  do  $10^{12}$  ohm cm: pri  $1000^\circ C$  padejo vrednosti že za več milijonkrat: od  $10^7$  do  $10^5$  ohm cm. Zato je treba paziti, da se grelne spirale priključujejo tako, da ne pride med dvema sosednjima utoroma do maksimalne napetosti. Tako zmanjšamo možnost preboja, ki je sicer redka, vendar težka okvara.

## II.

### ELEKTRO TOPLOTNI IZRAČUN

#### Elektro toplotni izračun grelnega elementa

Osnovna naloga grelnega elementa, to je uporabne grelne žice, je ta, da pretvarja električno energijo v toplotno. Pretvorba se vrši s popolnim izkoristkom. Pri določeni dimenziji grelnega elementa se običajno postavlja zahteva, da naj grelni element oddaja določeno toplotno moč  $P$  [kcal/h, W, kW] ob definirani napetosti izvora električne energije  $U$  [V]. Iz tako postavljenega problema takoj sledi, kakšna mora biti upornost  $R$  ohm celokupnega grelnega elementa:

$$R = \frac{U^2}{P} [\text{ohm}]$$

Skupna upornost pa je odvisna od premera grelne žice  $d$  [mm], njene dolžine  $l$  [m] ter od specifične upornosti materiala  $\rho$  [ohm mm<sup>2</sup>/m]:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{4l}{\pi d^2} [\text{ohm}]$$

Pri izračunu upornosti grelnega elementa je treba paziti, da se upošteva specifična upornost pri temperaturi, ki jo bo imela grelna žica ob nor-

malnih obratovalnih pogojih naprave. Iz dosedanjih sklepanj je razvidno, da lahko izbiramo pri določeni moči grelnega elementa poljubne dimenzije grelne žice, saj dobimo ob drobnem premeru ter kratki žici isto upornost grela, kot če imamo debelo žico z veliko dolžino. Z uvedbo nove veličine, to je s površinsko obremenitvijo  $p$  [W/cm<sup>2</sup>], pa se široke možnosti izbire dimenzij bistveno zmanjšajo. Pri majhnem premeru žice ter majhni dolžini bo seveda površinska obremenitev velika, pri obilnem premeru in veliki dolžini pa bo površinska obremenitev majhna. Zavedati se moramo važnosti pravilne določitve površinskih obremenitev (glej diagram normalnih in maksimalnih površinskih obremenitev za industrijske peči ter podatke o površinski obremenitvi v poglavju o življenjski dobi grelnih elementov), ker te ne vplivajo le na vzdržljivost vgrajenega materiala, temveč posega s potenco 4/3 v stroške za grelni material, s približno isto potenco pa v celotno investicijo, saj potrebujemo za namestitev večje količine grelnega materiala tudi večjo peč.

Površinska obremenitev  $p$  [W/cm<sup>2</sup>] je definirana kot moč  $P$  [W] na enoto površine celotnega grelnega elementa  $S$  [cm<sup>2</sup>]:

$$p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi dl} [\text{W/cm}^2]$$



Iz gornjih osnov sta izpeljani temeljni enačbi za dimenzioniranje grelnega elementa:

$$d = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot \pi^2 \cdot U^2 \cdot \rho}{4 \cdot P^2 \cdot p}} \text{ [mm]}$$

$$l = \frac{P}{10 \cdot \pi \cdot d \cdot p} \text{ [m]}$$

pri čemer je:

$P$  [W] — moč grelnega elementa,

$\rho$  [ohm mm<sup>2</sup>/m] — specifična upornost materiala pri temperaturi uporabe,

$U$  [V] — napetost na grelnem elementu,

$p$  [W/cm<sup>2</sup>] — površinska obremenitev grelnega elementa,

$d$  [mm] — debelina žice grelnega elementa,

$l$  [m] — razvita dolžina grelnega elementa.

Običajno navijamo grelno žico v spiralo. Odnos med posameznimi merami spirale je naslednji:

$$l = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1} - d \text{ [mm]}$$

pri čemer je:

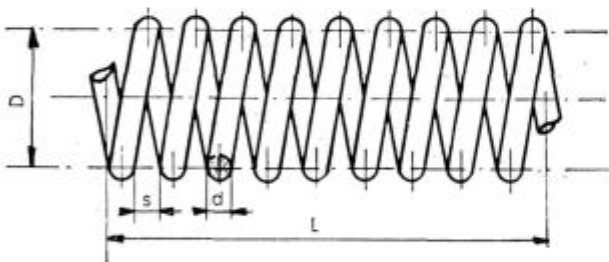
$s$  [mm] — strmina navoja spirale,

$D$  [mm] — srednji premer spirale,

$l$  [m] — razvita dolžina spirale,

$L$  [m] — dolžina navite spirale,

$d$  [mm] — premer grelne žice.



Vse zgornje osnovne relacije med električnimi in geometrijskimi dimenzijami so prikazane v diagramih (določitev parametrov spirale). Uporabnost teh diagramov je splošna; v veliko pomoč so pri preračunavanju industrijskih peči, kjer je potrebno upoštevati razpoložljiv prostor za namestitve spirale, njih debelino, premer, dolžino, strmino navoja, razdelitev na segrevalne cone, razdelitev na faze, na pravilno površinsko obremenitev ter na zahtevano skupno moč naprave. Med naštetimi faktorji je toliko možnih kombinacij, da je potrebno izvršiti niz zamudnih računskih operacij, preden dobimo vsestransko ugodno rešitev. S pomočjo diagramov tako rešitev kmalu dosežemo, ker lahko izhajamo ali iz geometrije prostora ali pa iz zahtevanih elektro toplotnih razmer.

Pri izračunu večjih naprav, na primer pri industrijskih pečeh, kjer vložimo tudi več sto kg grelnega materiala, pa je priporočljiva naknadna kon-

trola površinske obremenitve iz parametrov, ki smo jih dobili iz navedenih diagramov. Preko površinske obremenitve je namreč določena druga dimenzija grelnega elementa, to je dolžina  $l$  [m], obenem pa je važno tudi njeno točno poznavanje.

$$p = \frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{10 \cdot \pi^2 \cdot U^2 \cdot d^3} \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Drugi elementarni način določitve parametrov spirale je tako imenovana metoda površinske obremenitve. Ta metoda daleč ni tako eksaktna, ker bazira zgolj na izkustvenih podatkih, ki se razlikujejo od naprave do naprave. V diagramu Temperature viseče žice je prikazano, pri kateri površinski obremenitvi in pri kateri debelini žice dobimo določeno temperaturo grelnega elementa, če je ta vodoravno razpeta grelna žica v mirujočem zraku s temperaturo 20° C. Če grelni element oblikujemo kot spiralo in je ta nameščena v neki prostor, dobimo seveda že pri manjših površinskih obremenitvah iste temperature kot sicer. Konstrukcijski faktor  $c$  nam pove, s kolikokrat manjšo temperaturo ( $\vartheta_u$ ) moramo računati pri neki napravi, da dobi spirala tako temperaturo ( $\vartheta$ ), kot bi bila razvita in obešena žica v zraku s temperaturo okolice 20° C. Torej je:

$$\vartheta_u = \vartheta \cdot c \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Pri temperaturi ( $\vartheta_u$ ) nato odčitamo za neki premer žice ustrezno površinsko obremenitev, nato pa lahko določimo iz prejšnjih enačb direktno napetost  $U$  [V], katero moramo pritisniti na spiralo, da bo imela zahtevano moč  $P$  [W]:

$$U = \sqrt{\frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{10 \cdot \pi^2 \cdot d^3 \cdot p}} \text{ [V]}$$

Dolžina grelne žice je pri tem:

$$l = \frac{P}{10 \cdot \pi \cdot d \cdot p} \text{ [m]}$$

Lahko pa tudi direktno računamo, kakšno napetost moramo pritisniti na tekoči meter grelne žice:

$$\frac{U}{l} = \sqrt{40 \cdot \rho \cdot \frac{P}{d}} \text{ [V/m]}$$

Pri tem pa računamo moč iz dolžine, kot sledi:

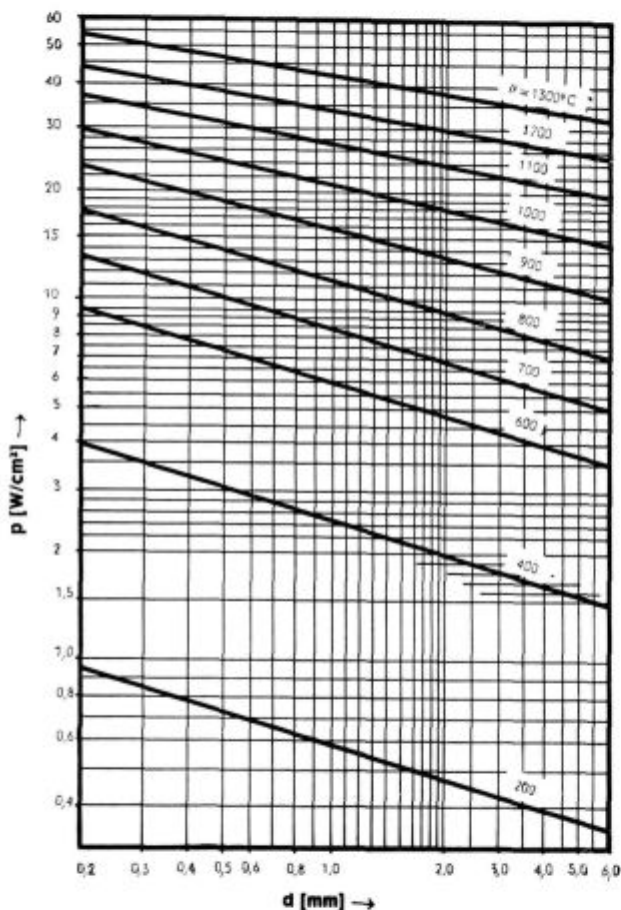
$$P = 10 \cdot \pi \cdot d \cdot p \cdot l \text{ [W]}$$

V splošnem je lahko konstrukcijski faktor večji ali manjši od 1. Večji konstrukcijski faktor dobimo pri forsiranju hlajenja grelnega elementa z zrakom ali z drugim medijem, manjši pa je povsod tam, kjer je odvajanje toplote težje kot pri mirujoči vodoravni grelni žici. V spodnji tabeli je zbranih nekaj izkustvenih podatkov za konstrukcijske faktorje.

Tabela 11: Konstruktivski faktor c

Konstrukcija grelnega elementa	Naprava	Konstruktivski faktor c
Vodoravno obešena žica v mirujočem zraku 20° C		1
Cilindrična spirala v zraku z oporami ali brez njih	Naprave s prosto obešenimi spiralami	0,8—0,9
Grelni element navit na podlago iz proti ognju odpornega materiala	Električne peči za ogrevanje prostorov	0,6—0,7
Grelni element položen v utor	Električni likalniki, kuhalne plošče	0,5
Grelni element obdan s plastjo toplotne izolacije	Električne peči	0,3—0,4

Temperatura viseče grelne žice



$p$  [W/cm<sup>2</sup>] — površinska obremenitev  
 $d$  [mm] — debelina žice

**Primer:** Določiti je treba spiralo za električno sevalno peč, ki naj seva s temperaturo 920° C. Ustrezna računaska temperatura:

$$\vartheta_u = c \cdot \vartheta = 0,65 \cdot 920 = 600^\circ \text{C}$$

Pri tej temperaturi dobimo iz diagrama za  $d = 1,0$  [mm] površinsko obremenitev  $p = 5,8$  [W/cm<sup>2</sup>]. Napetost na enoto dolžine:

$$\frac{U}{l} = \sqrt{40 \frac{p}{d} \cdot \rho} = \sqrt{40 \frac{5,8}{1} \cdot 1,44} = 18,2 \text{ [V/m]}$$

Pri napetosti 220 V potrebujemo:

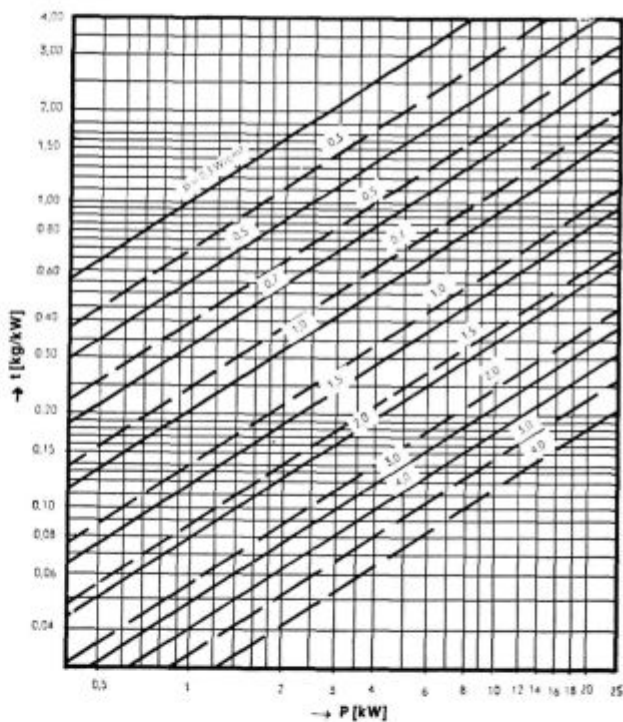
$$l = \frac{220}{18,2} = 12,1 \text{ m žice}$$

Dejanska moč naprave:

$$P = 10 \cdot \pi \cdot p \cdot d \cdot l = 10 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 5,8 \cdot 12,1 = 2100 \text{ W,}$$

kar je primerno za ogrevanje prostora.

Ocenitev količine materiala na enoto moči



$$t = 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot p \cdot \sqrt[3]{\frac{P^2 \cdot \rho}{U^2 \cdot p^4}}$$

———— 220 V  
 - - - - 330 V

$t$  [kg/kW] — teža spirale na enoto moči

$\gamma$  — specifična teža [kg/dm<sup>3</sup>]

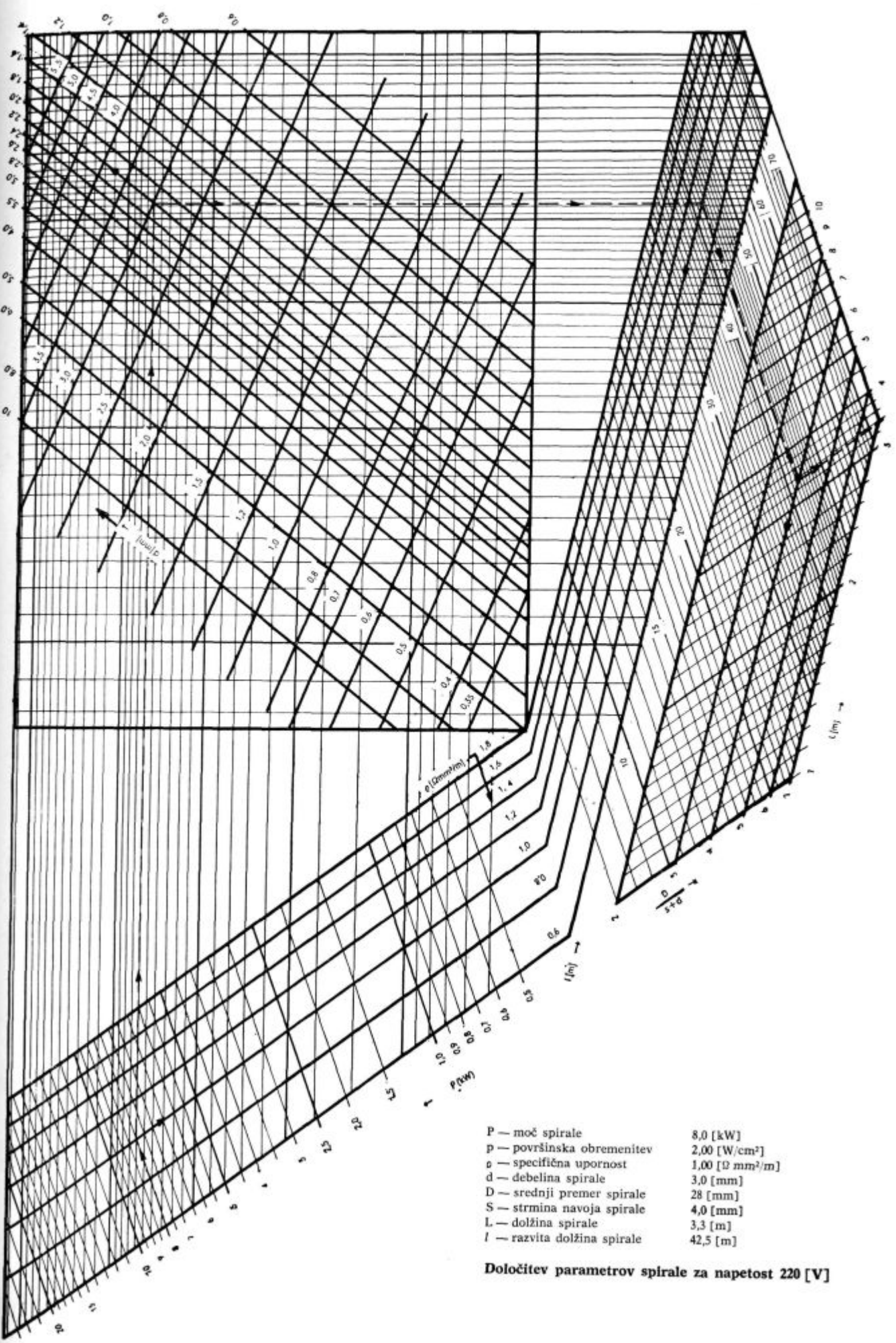
$\rho$  — specifična upornost [ $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m]

$\rho$  — specifična upornost [ $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m]

$U$  — napetost [V]

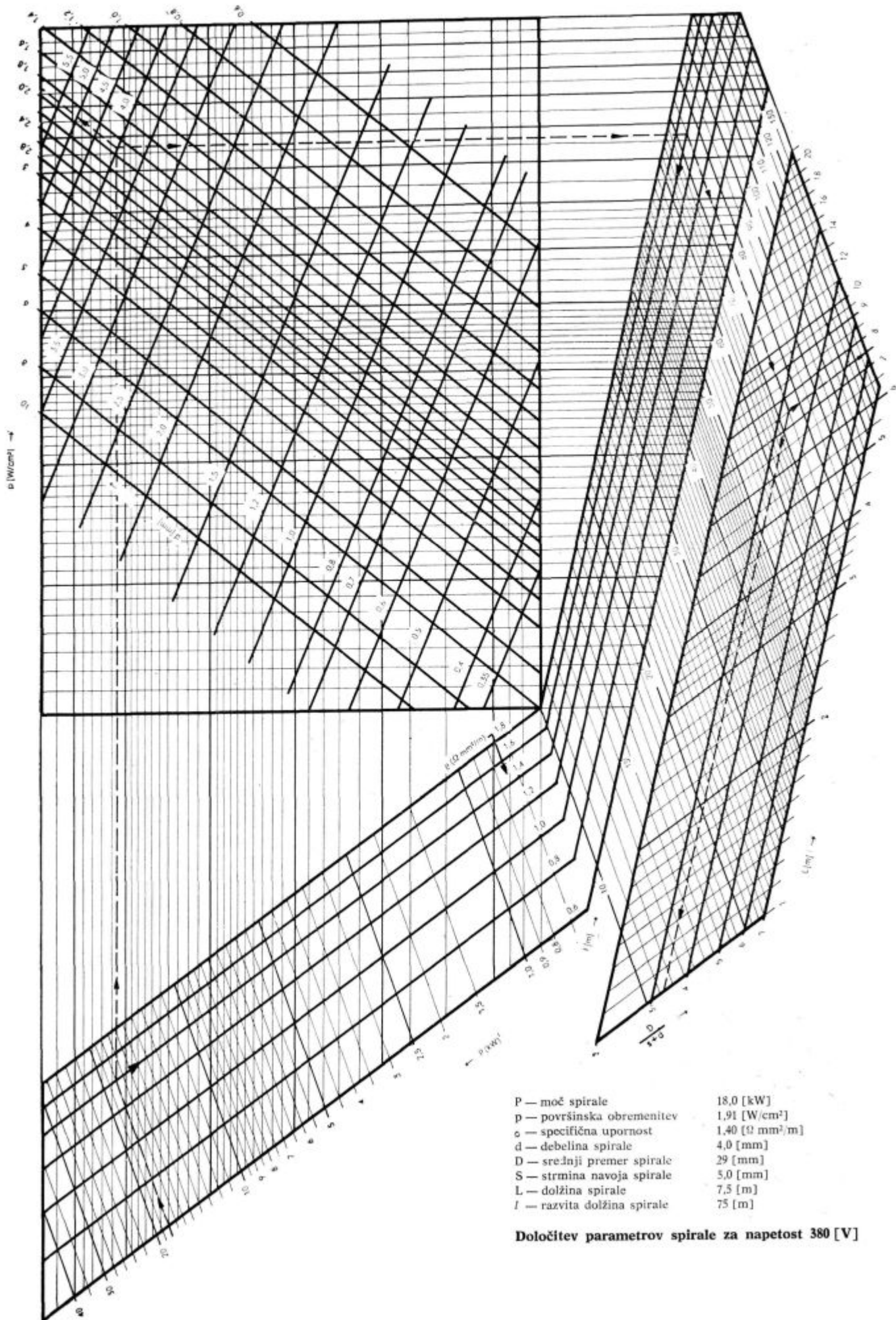
$p$  — površinska obremenitev [W/cm<sup>2</sup>]

$p$  [W/cm<sup>2</sup>]



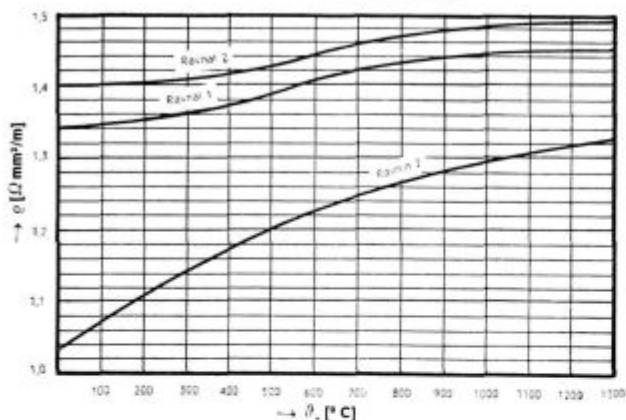
- P — moč spirale 8,0 [kW]
- p — površinska obremenitev 2,00 [W/cm<sup>2</sup>]
- e — specifična upornost 1,00 [Ω mm<sup>2</sup>/m]
- d — debelina spirale 3,0 [mm]
- D — srednji premer spirale 28 [mm]
- S — strmina navoja spirale 4,0 [mm]
- L — dolžina spirale 3,3 [m]
- l — razvita dolžina spirale 42,5 [m]

**Določitev parametrov spirale za napetost 220 [V]**



**Določitev parametrov spirale za napetost 380 [V]**

### SPECIFIČNA UPORNOST MATERIALA



### IZRAČUN INDUSTRIJSKE PEČI

#### a) Določitev peči

Prostorsko velikost peči je težko enosmiselno določiti; njeno geometrijo določajo predvsem način ogrevanja, hitrost ogrevanja, enakomernost ogrevanja, velikost in temperatura ogrevanca in druge posebne zahteve kot npr. ogrevanje v zaščitni atmosferi itd. Vse zgornje parametre za določitev peči določa tehnologija, kateri naj služi sama peč. Osnova za projektiranje peči je torej poznavanje tehnološkega procesa; ta bo odločal, ali bomo postavili komorno, globinsko, potisno ali koračno peč ali peč s posebnimi karakteristikami. Prvi gabariti ogrevnega prostora so torej podani z izbranim tipom peči, z velikostjo ogrevanca ter s hitrostjo oziroma temperaturo ogrevanja. Drugače rečeno: peč je določena s kapaciteto (urno tonažo) zagretega materiala.

#### b) Toplotni izračun peči

Na osnovi postavljene kapacitete peči je možno raziskati toplotne razmere v peči. Tehnologija nam mora podati: srednjo temperaturo ogrevanca, dovoljeno odstopanje od te temperature, enakomernost ogrevanja, to je temperaturno razliko najtoplejšega in najhladnejšega dela, maksimalno hitrost ogrevanja oziroma celoten časovni potek temperature ogrevanca, če je ta posebej zahtevan.

Če se omejimo predvsem na peči, s katerimi ogrevamo predvsem trde materije (kovine), in na one temperature peči, ki leže nad 500°C, ugotovimo, da se praktično vsa toplotna energija iz peči prenaša na ogrevanec s pomočjo sevanja. Procent konvekcije in kontaktnega prevajanja je običajno tako majhen, da je zanemarljiv. Časovni potek takega segrevanja vložka je komplicirana funkcija, kar dokazuje naslednja enačba segrevanja:

$$t = \frac{g \cdot c}{\alpha \cdot \tau} \ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_z}{\vartheta_o - \vartheta_k} [\text{sek}]$$

Pri tem pomeni:

$t$  [sek] — čas ogrevanja

$c$  [Ws/kg · deg] — specifična toplota ogrevanca

$g$  [kg/m<sup>2</sup>] — teža ogrevanca na enoto ogrevne površine

$\alpha$  [W/m<sup>2</sup> deg] — toplotna prehodnost

$\tau$  — koeficient, kot funkcija  $\frac{\alpha}{\lambda} x$  — glej sliko!

$\lambda$  [W/m deg] — specifična prevodnost

$x$  [m] — debelina ogrevanca (gl. en.)

$\vartheta_o$  [deg C] — temperatura peči

$\vartheta_z$  [deg C] — začetna temperatura ogrevanca

$\vartheta_k$  [deg C] — končna temperatura ogrevanca

Pri določeni kvaliteti in geometriji materiala ter pri določenih začetnih in končnih temperaturah ogrevanca lahko vplivamo na čas segrevanja zgolj s temperaturo peči. To je lepo razvidno iz zgornje enačbe, posebno še, če upoštevamo, da je toplotna prehodnost praktično odvisna tudi samo od temperature peči in temperature ogrevanca. Logaritemski del enačbe segrevanja se zelo leno spreminja z njegovim kvociantom, zato lahko pri neki sponirani temperaturi v peči ( $\vartheta_o$ ) poiščemo ono toplotno prehodnost ( $\alpha$ ), ki nam da po enačbi zahtevan čas segrevanja. Iščemo torej temperature, ki nam dajo zaželeno toplotno prestopnost ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \sigma' \frac{\left(\frac{T_o}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{sr}}{100}\right)^4}{\vartheta_o - \vartheta_{sr}}$$

Pri čemer so:

$\vartheta_o$  [deg C] — temperatura peči

$T_o$  [deg K] — temperatura peči

$\vartheta_{sr}$  [deg C] — srednja temperatura ogrevanca

$T_{sr}$  [deg K] — srednja temperatura ogrevanca

$\sigma$  [W/m<sup>2</sup>deg K] — sevalna konstanta (5,77 w/m<sup>2</sup> deg K)

$E_1, E_2$  — emisijski koeficienti peči in ogrevanca

$$\sigma' = \sigma \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - 1}$$

Upoštevati moramo srednjo temperaturo segretka, ki jo dobimo iz:

$$\vartheta_{sr} = \vartheta_o - \frac{\vartheta_k - \vartheta_z}{\ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_z}{\vartheta_o - \vartheta_k}}$$

Pri izračunu toplotne prestopnosti oziroma potrebnih temperatur se lahko poslužimo tudi diagrama (temperaturne razmere v peči), iz katerega lahko z izračunano površinsko obremenitvijo ( $p$ ) ter srednjo temperaturo ogrevanca ( $\vartheta_{sr} = \vartheta_p$ )

določimo temperaturo peči ( $\vartheta_o = \vartheta_s$ ). Upoštevati moramo, da je

$$p = \alpha (\vartheta_o - \vartheta_{st}) \cdot 10^{-4} \cdot k_o \text{ [W/cm}^2\text{]}.$$

Pri čemer je:

$k_o = \frac{\sigma'}{\sigma}$  — korekcijski faktor sevanja za realna telesa.

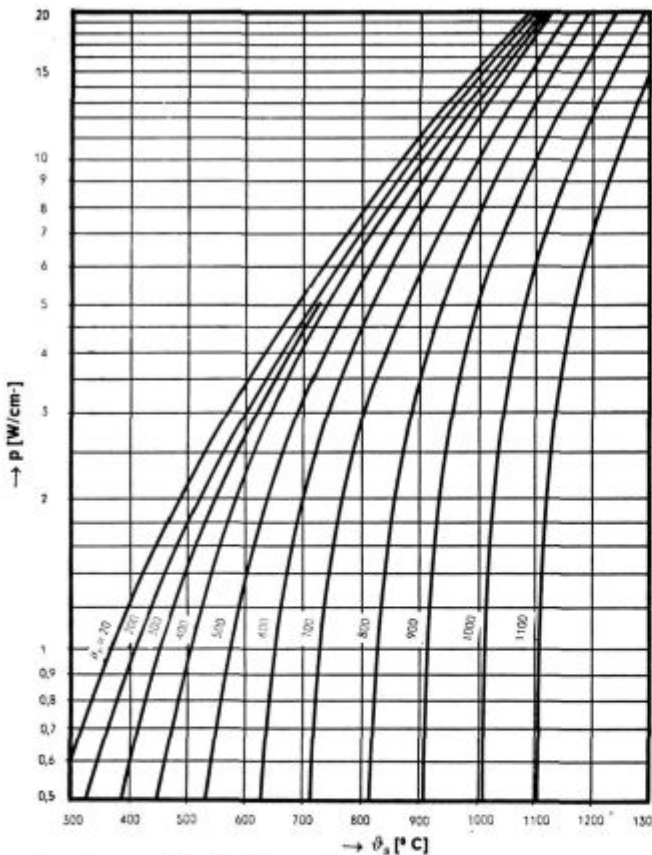
Tako dobljena temperatura ( $\vartheta_o$ ) je srednja vrednost temperaturnega polja v peči, ki oddaja energijo na ogrevanec tako, da se ta segreje na zahtevano temperaturo ( $\vartheta_k$ ) v času  $t$  sek. Ta temperatura peči je časovno konstantna vrednost: peč mora imeti ob hladnem vložku enako temperaturo kot ob času, ko je vložek že na zahtevani temperaturi. Predpostavka o konstantni temperaturi peči ( $\vartheta_o$ ) ima za posledico ostre zahteve. Dovolj je pogled na krivulje temperaturnih razmer v peči, ki nam takoj povedo, da bi morali pri konstantni temperaturi peči ( $\vartheta_o$ ) v začetku segrevanja imeti 3- do 15-kratno večjo površinsko moč peči in s tem skupno moč, kot je potrebno ob koncu segrevanja. Mnogokrat tej zahtevi ne moremo ugoditi, posebno ne tam, kjer ogrevamo naenkrat velike mase, npr. v globinskih in velikih komornih pečeh. Zelo ugodne razmere imamo pri pečeh, skozi katere potuje material. Časovni potek temperature zame-

nja tu krajevna razporeditev temperature vzdolž peči. S pravilno razmestitvijo moči ogrevnih površin se lahko zelo dobro približamo zahtevi po časovno (tu krajevno) konstantni temperaturi peči ( $\vartheta_o$ ).

Kadar nimamo možnosti menjati površinske moči ogrevnih površin v takem širokem razponu, da bi obdržali temperaturo peči ( $\vartheta_o$ ) konstantno, dobimo pri hladnem vložku nižjo temperaturo peči: temperatura se sesede, kot pravimo. V splošnem je temperatura peči v vsem intervalu do  $\vartheta_o$  določljiva s Stefanovim zakonom (če zanemarimo konvekcijo) oziroma preko krivulj in diagramov, ki govore o temperaturnih razmerah v peči. Izračun ogrevnega časa bi sedaj potekal tako, da se temperaturni interval od najmanjše začetne temperature peči do končne temperature peči  $\vartheta_o$  razdeli na primerne odseke ter se za te izračuna posebej toplotna prestopnost in ogrevni čas pri predpostavki, da je v posameznih odsekih temperatura peči konstantna. Seveda moramo v enačbo ogrevanja vstavljati vedno nove začetne temperature ogrevanca ( $\vartheta_s$ ).

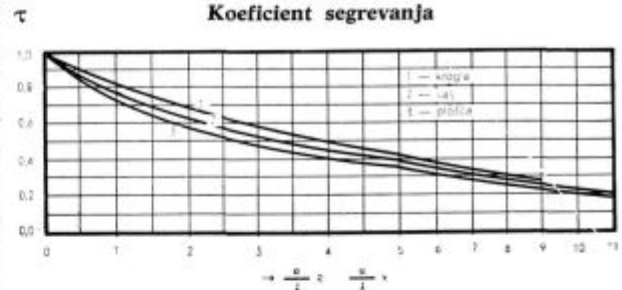
Pripomniti je treba, da je sicer tak izračun pravilen, vendar pa nastopi nova težava, ker pri zmanjšanju temperature peči ( $\vartheta_o$ ) dobimo dodatno oddajanje energije ogrevancu iz akumulirane toplotne energije same mase peči (obzidave, izolirnega materiala). Sprememba temperature peči razdre stacionarne temperaturne razmere v zidovih obzidave.

Temperaturne razmere v peči



$p$  [cm] — površinska obremenitev  
 $\vartheta_p$  [°C] — temperatura peči (vložka)  
 $\vartheta_s$  [°C] — temperatura spiral

Koeficient segrevanja



$\alpha$  [W/m² deg] — toplotna prehodnost  
 $\lambda$  [W/m deg] — toplotna prevodnost  
 $R, x$  [m] — polmer, debelina ogrevanca  
 $\tau$  — koeficient segrevanja

$$t = \frac{g \cdot c}{\alpha \cdot \tau} \ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_s}{\vartheta_o - \vartheta_k} \text{ [sek]}$$

Stacionarnost se je vzpostavila na podlagi notranje temperature ( $\vartheta_o$ ) ter temperature okolice ( $\vartheta_{ok}$ ). Ker imajo industrijske peči običajno velike mase obzidnega materiala, je vpliv oddajanja energije ogrevancu iz obzidave ter kasneje vračanja te energije v obzidavo na čas segrevanja vložnega materiala lahko občuten. Pri hladnem vložku na ta način seveda pridobimo na času segrevanja, ko pa se temperatura vložka približuje svoji končni vrednosti — posebno, če je ta blizu temperaturi peči — pa za ta interval segrevanja porabimo več

časa, ker se del moči peči koristi za segrevanje same peči. Teoretično je izguba večja kot profit ter gre pač na račun rezervnega časa, ki ga dodamo izračunanemu zaradi temperature. Srednja temperatura ogrevanca:

V času ogrevanja  $t$  [sek] ter pri konstantni temperaturi peči ( $\vartheta_o$ ) dobimo namreč sledečo temperaturno neenakomernost ogrevanca, ki je podana kot razlika temperatur najtoplejšega in najhladnejšega mesta:

$$\Delta\vartheta = n(1 - \tau)(\vartheta_o - \vartheta_k)$$

Pri tem je  $n$  poseben koeficient oblike ter ima naslednje vrednosti:

za ploščo  $n = 1,5$

za valj  $n = 2,0$

za kroglo  $n = 2,5$

Pri uporabi enačb segrevalnega časa in temperaturne neenakomernosti je treba upoštevati, da ne veljajo splošno, temveč samo ob naslednjem pogoju:

$$\frac{at}{X^2} > 0,2 \text{ ali } \frac{at}{R^2} > 0,15$$

pri čemer je

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} [\text{m}^2/\text{s}]$$

Pri segrevanju kovin je zgornji pogoj skoraj vedno izpolnjen, paziti pa je potrebno pri materialih z manjšo prevodnostjo in veliko specifično toploto.

**Primer:** Kakšen je čas segrevanja jeklene osi debeline 360 mm pri naslednjih podatkih:

začetna temperatura	$\vartheta_z = 20^\circ \text{C}$
končna temperatura	$\vartheta_k = 860^\circ \text{C}$
temperatura peči	$\vartheta_o = 890^\circ \text{C}$
specifična toplota	$c = 580 [\text{Ws}/\text{kg deg}]$
specifična prevodnost	$\lambda = 37 [\text{W}/\text{m deg}]$
specifična teža	$\gamma = 7850 [\text{kg}/\text{m}^3]$
emisijski količnik šamota	$E_1 = 0,75$
emisijski količnik jekla	$E_2 = 0,80$
polmer valja	$R = 0,18 [\text{m}]$

Sevalna konstanta realnih razmer:

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - 1} = \frac{5,77}{\frac{1}{0,75} + \frac{1}{0,80} - 1} E^2 = 3,65 [\text{W}/\text{m}^2 \text{deg}^4]$$

Toplotna prehodnost:

$$\alpha = \sigma \frac{\left(\frac{T_o}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_s}{100}\right)^4}{\vartheta_o - \vartheta_{sr}} = 3,65 \cdot \frac{11,63^4 - 9,13^4}{890 - 640} = 163 [\text{W}/\text{m}^2 \text{deg}]$$

Srednja temperatura ogrevanca:

$$\vartheta_{sr} = \vartheta_o - \frac{\vartheta_o - \vartheta_z}{\ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_z}{\vartheta_o - \vartheta_k}} = 890 - \frac{890 - 20}{\ln \frac{890 - 20}{890 - 860}} = 640^\circ \text{C}$$

Koeficient  $\tau$  je dobljen iz diagrama preko:

$$\frac{\alpha}{\lambda} R = \frac{163 \cdot 0,18}{37} = 0,795 \rightarrow \tau = 0,82$$

Segrevalni čas:

$$\tau = \frac{g \cdot c}{\alpha \cdot \tau} \ln \frac{\vartheta_o - \vartheta_k}{\vartheta_o - \vartheta_z} = \frac{787,5 \cdot 580}{163 \cdot 0,82} \ln \frac{890 - 20}{890 - 860} = 11400 [\text{sek}]$$

$$t = 3,16 [\text{h}]$$

Neenakomernost segrevanja:

$$\Delta\vartheta = n(1 - \tau)(\vartheta_o - \vartheta_k) = 2,0(1 - 0,82)(890 - 860) = 10,8 [^\circ\text{C}]$$

Kontrola veljavnosti zgornjih enačb:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} = \frac{37}{580 \cdot 7850} = 0,815 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{a \cdot t}{R^2} = \frac{0,815 \cdot 10^{-5} \cdot 0,114 \cdot 10^5}{0,18^2} = 0,286 > 0,15$$

Če si iz diagrama temperaturnih razmer v peči odčitamo površinske obremenitve za pogoj, da je temperatura v peči konstantna, tj.  $890^\circ \text{C}$ , dobimo za hladen vložek  $p = 11 [\text{W}/\text{cm}^2]$ , za vložek s končno temperaturo pa  $p = 1,6 [\text{W}/\text{cm}^2]$ ; se pravi, da mora vsak kvadratni centimeter površine peči mora vsak kvadratni centimeter površine peči sevati moč  $11 [\text{W}]$  ali vsak kvadratni meter  $110 [\text{kW}]$ . Toliko moči pa ne moremo nikakor spraviti na stene peči. Potrebno je izhajati z nekimi vnaprej določenimi površinskimi obremenitvami (10 do  $40 [\text{kW}/\text{m}^2]$ ). Če si izberemo površinsko obremenitev stene peči  $22,5 [\text{kW}/\text{m}^2]$  ( $2,25 [\text{W}/\text{cm}^2]$ ), bo izračun segrevalnega časa potekal tako, kot je bilo že opisano. Tu navajamo za primer samo rezultate:

$\vartheta_z [^\circ\text{C}]$	$\vartheta_o [^\circ\text{C}]$	$\alpha [\text{W}/\text{m}^2 \text{deg}]$	$t [\text{h}]$
100	530	82	0,34
200	540	104	0,37
300	570	130	0,37
400	600	176	0,37
500	650	235	0,39
600	710	320	0,39
700	770	505	0,39
800	860	590	0,53
860	890	870	0,54

Skupaj  $\Sigma 3,69 [\text{h}]$

Vidimo, da se segrevalni čas bistveno ne razlikuje od prej izračunanega (17%), vendar je taka rešitev mnogo racionalnejša, ker je v tem primeru grelni material mnogo bolj izkoriščen. Skupno moč peči dobimo, če pomnožimo vse aktivne površine peči same s ploskovno obremenitvijo. Če so na primer te površine  $5 \text{ m}^2$ , bi dobili za prvi primer nemogočo moč  $110 \text{ kW/m}^2 \times 5 \text{ m}^2 = 550 \text{ [kW]}$ , za drugi primer pa  $22,5 \text{ kW/m}^2 \times 5 \text{ m}^2 = 112,5 \text{ [kW]}$ , kar bi bilo normalno za običajno globinsko peč.

### c) Temperaturne razmere v peči

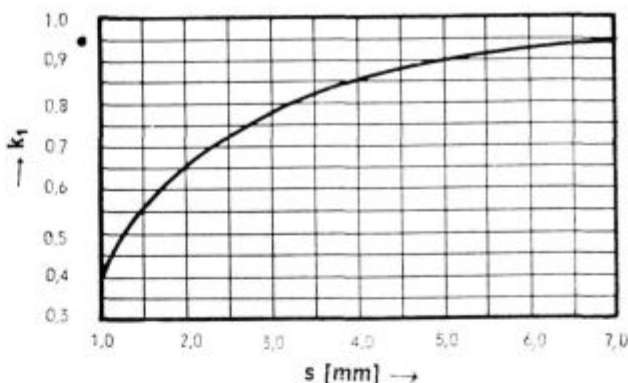
V vsakem realnem prostoru imamo gradientno temperaturno polje, ki je opisano s koordinatami prostora in vrednostjo dotične točke. Čeprav govorimo o temperaturi peči, temperaturi spiral, temperaturi ogrevanca, se moramo zavedati, da so to neke povprečne vrednosti temperatur vseh tistih geometrijskih mest prostora, kjer nas te vrednosti posebno zanimajo: na površini spiral, na površini ogrevanca, na površini obzidave itd. Ker smo navajeni računati z zelo grobimi povprečnimi vrednostmi, bodo tudi metode za njihovo določitev bolj aproksimativne. V toplotnem izračunu peči smo govorili o ogrevnih površinah, ki oddajajo energijo ogrevancu, in smo pri tem mislili na površine sten peči, kjer so nameščeni grelni elementi. Dejansko dobiva ogrevanec energijo z dveh strani: direktno od grelnega elementa — spirale ter indirektno od sten peči. Pri idealni namestitvi spiral na stene oziroma strop peči je delež direktne oddaje energije ca. 65%; procent tako oddane energije pada sorazmerno izgubam skozi stene ter sorazmerno zasenčenosti spiral ter lahko pade pod 10%. Temu primerno se razlikujejo temperature spiral in temperature zidov. Za idealen primer so procentualne razlike obeh temperatur:

- za hladen vložek ca. 40%
- za vložek s  $300^\circ \text{C}$  ca. 20%
- za vložek z  $800^\circ \text{C}$  ca. 10%,

kar se nekako ujema z izkustvenim podatkom  $50^\circ$  do  $100^\circ \text{C}$  za obešene spirale pri industrijskih pečeh s temperaturami  $1000^\circ \text{C}$  do  $500^\circ \text{C}$ .

Preden preidemo h konkretnemu izračunavanju temperatur spirale, moramo ugotoviti, kaj pravzaprav predstavlja temperatura  $\vartheta_o$  («temperatura peči»), s katero smo izračunali segrevalni čas. Kot smo ravnokar videli, je to fiktivna temperatura, pri kateri je sevanje ogrevnih površin enako vsoti iz sevanja spirale in sevanja zidu. Takoj lahko ugotovimo, da je temperatura spirale ( $\vartheta_s$ ) in s tem seveda temperatura zidu nižja od temperature peči  $\vartheta_o$ . Maksimalna razlika ca. 15% nastane pri hladnem vložku ter se zmanjša na nekaj procentov pri končni temperaturi ogrevanca. Če si postavimo določeno rezervo zaradi vseh aproksimacij v računu, lahko rečemo, da je maksimalna temperatura spirale ( $\vartheta_{so}$ ) pri idealnih sevalnih pogojih enaka fiktivni temperaturi peči ( $\vartheta_o$ ).

Sevalni faktor spirale



k — sevalni faktor  
s — strmina navoja

Kakšna pa je temperatura spirale v realnih sevalnih pogojih? Izhajati je treba iz dejstva, da se zaradi navijanja grelnice v spiralo zmanjša aktivna sevalna površina, o čemer govori sevalni faktor spirale  $k_1$  (glej sliko). V spodnji tabeli prikazani sevalni faktor  $k_2$  pa govori o tem, kako smo s samo namestitvijo spiral zmanjšali sevalne možnosti spiralnih površin.

Tabela 12: Sevalni faktor  $k_2$

spirala obešena na cevi . . . . .	0,85—0,80
spirala vložena v odprte kotne zidove	0,70—0,60
spirala vložena v polodprte utore . . .	0,60—0,45
spirale vložene v priprte utore . . . .	do 0,20

Jasno je, da se z zmanjševanjem sevalnih površin obratno sorazmerno povečuje površinska obremenitev grelnega elementa. Če je bila prvotna površinska obremenitev spirale  $p \text{ [W/cm}^2\text{]}$  ona vrednost, ki smo jo določili pri samem električnem izračunu, je stvarna površinska obremenitev, ki določa temperaturo spirale in izhaja iz aktivnih sevalnih površin, sledeča:

$$p_a = \frac{p}{k_1 \cdot k_2} \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Prvotna površinska obremenitev ( $p$ ) je bila izbrana na podlagi temperature peči ( $\vartheta_o$ ) oziroma na podlagi temperature spiral ( $\vartheta_{so}$ ) pri idealnih pogojih. Stvarno temperaturo spirale ( $\vartheta_s$ ) dobimo na podlagi diagrama temperaturnih razmer v peči iz nove površinske obremenitve ( $p_a$ ) ter temperature peči ( $\vartheta_p = \vartheta_o$ ) oziroma v posebnih primerih temperature vložka. Tako dobljena temperatura spirale ( $\vartheta_s$ ) mora biti vedno manjša od maksimalno dovoljene temperature ( $\vartheta_{max}$ ), ki je določena za vsako vrsto materiala grelnih elementov. Edino ta temperatura je tudi merodajna za ocenitev življenjske dobe grelnice.



**Primer:**

Strmina navoja spirale  $s = 3$  [mm].

Spirala je vložena v odprte kotne zidove.

Električni izračun je dal površinsko obremenitev  $p = 1,4$  [W/cm<sup>2</sup>].

Temperatura peči  $\vartheta_o = \vartheta_{90} = 850^\circ\text{C}$ .

Zivljenjska doba spirale pri temperaturi  $\vartheta_s = 800^\circ\text{C}$  je  $t_1 = 1,00$ .

Površinska obremenitev aktivnih sevalnih površin spirale:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0,78 \\ k_2 &= 0,75 \end{aligned}$$

$$p_a = \frac{p}{k_1 \cdot k_2} = \frac{1,4}{0,78 \cdot 0,75} = 2,4 \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Iz diagrama temperaturnih razmer v peči odčitamo za temperaturo peči  $850^\circ\text{C}$  ter za površinsko obremenitev  $p = 2,4$  [W/cm<sup>2</sup>] temperaturo spirale:

$$\vartheta_s = 910^\circ\text{C}$$

Zivljenjska doba spirale pri temperaturi  $\vartheta_s = 910^\circ\text{C}$ .

$$t_2 = t_1 \left( \frac{\vartheta_{s1}}{\vartheta_{s2}} \right)^{16} = 1,0 \cdot \left( \frac{800}{910} \right)^{16} = 0,131$$

Zahtevam iz gornjega primera bi zadostil material RAVNAL 1 ali RAVNAL 2, kot je to razvidno iz diagramov za površinske obremenitve spiral industrijskih peči.

**d) Izkoristek peči**

Običajno je izkoristek definiran s procentualnim kvocientom izgubljene energije (moči) ter koristno uporabljene energije (moči). Posebno pri pečeh, ki ne obratujejo s konstantnim režimom, moramo obračunavati energije, ker se moči s časom spreminjajo. Takšno ocenjevanje izkoristka se najbolje vidi iz sledečega primera:

**Primer:**

Jekleno os premera 360 mm in dolžine 3 m segrevamo v globinski peči.

Masa ogrevanca  $m = 2680$  kg

Temperatura peči  $\vartheta_o = 900^\circ\text{C}$

Končna temperatura vložka  $\vartheta_k = 860^\circ\text{C}$

Temperatura zunanjih zidov  $\vartheta_1 = 95^\circ\text{C}$

Površina vertikalnih zunanjih zidov  $S_1 = 10$  m<sup>2</sup>

Površina horizontalnih zunanjih zidov  $S_2 = 3$  m<sup>2</sup>

Specifična toplota  $c = 580$  [Ws/kg deg]

Segrevalni čas  $t = 4,2$  [h]

Čas zalaganja  $t_{za} = 10$  [min.]

Koristna toplotna energija:

$$Q_k = m \cdot c (\vartheta_k - \vartheta_o) = \frac{2680 \cdot 580 \cdot 840}{3600 \times 1000} = 362 \text{ [kWh]}$$

Specifične površinske izgube zunanjih zidov pri  $95^\circ\text{C}$ :

$$p_1 = 745 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$p_2 = 800$  [W/m<sup>2</sup>] iz diagramov izgub zunanjih sten.

Izgubljena toplotna energija skozi obzidavo:

$$Q_{iz} = S_1 \cdot p_1 \cdot t + S_2 \cdot p_2 \cdot t = 10 \cdot 0,745 \cdot 4,2 + 3 \cdot 0,80 \cdot 4,2 = 41,2 \text{ [kWh]}$$

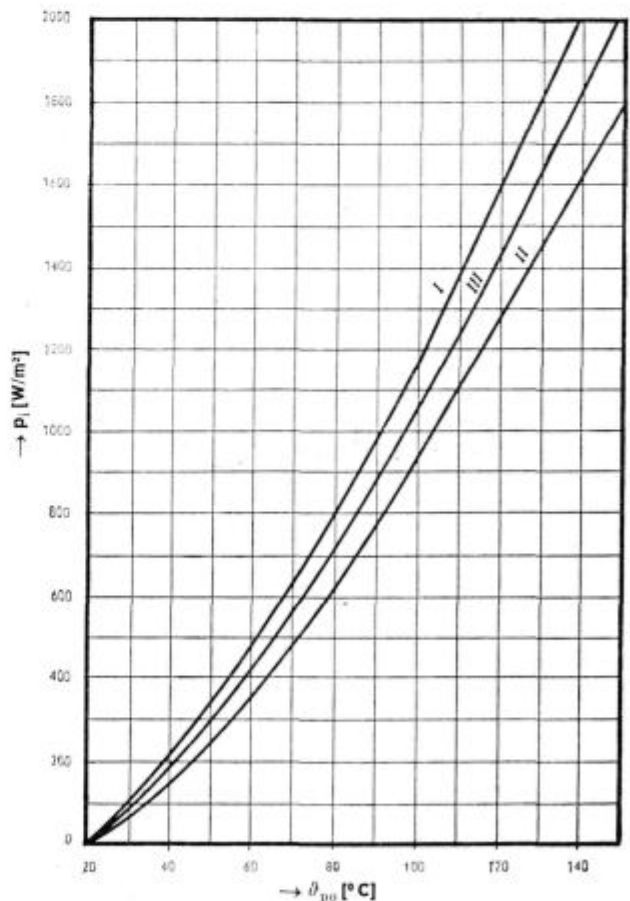
Izgube toplotne energije pri zalaganju:

$$Q_{za} = p_{iz} \cdot S_2 \cdot t_{za} = 110 \cdot 3 \cdot \frac{10}{60} = 55 \text{ [kWh]}$$

$p_{iz}$  — je vzet iz diagrama temperaturnih razmer v peči za primer  $\vartheta_p = 20^\circ\text{C}$  in  $\vartheta_s = 900^\circ\text{C}$

Izkoristek:

$$\begin{aligned} \eta &= \left( 1 - \frac{Q_{iz} + Q_{za}}{Q_k} \right) \cdot 100 = \\ &= \left( 1 - \frac{41,2 + 55,0}{362} \right) \cdot 100 = 73,4\% \end{aligned}$$

**Površinske izgube zunanjih sten industrijskih peči**

- I — vodoravne navzgor sevajoče površine
- II — vodoravne navzdol sevajoče površine
- III — navpične poševno sevajoče površine
- $\vartheta_{90}$  — temperatura površine
- $p_i$  — površinske izgube peči

### e) Regulacija temperature

V osnovi ločimo dvoje vrst reguliranja temperature v peči: programsko regulacijo, to je regulacijo, ki diktira časovni potek temperature v peči, ter regulacijo, ki časovno neodvisno omejuje temperaturo v mejah odstopanja. Kot vsaka avtomatska regulacija je tudi ta sestavljena iz vrste členov, ki sestavljajo zaprto verigo: merni, prenosni, regulacijski ter izvršni člen. Regulacija temperature se vrši na podlagi regulacije peči dovedene energije oziroma moči. Nas bosta zanimala predvsem merni ter izvršni člen, medtem ko je regulacijskih elementov toliko kot firm, ki jih proizvajajo.

Merni člen je naprava, ki spreminja vrednost temperature v neko drugo fizikalno veličino. V industrijskih pečeh sta običajno pirometer s termo členom ter optični pirometer. Le pri nizkih temperaturah se uporabljajo uporovni pirometri (termometri). Točnost celotnega regulacijskega sistema je odvisna od mernega člena, vendar je poleg točne transformacije fizikalnih veličin za merni člen bistvene važnosti, da je nameščen tako, da meri

vrednost, ki je najbližja povprečni temperaturi v peči. Kot smo videli, pa imamo v peči temperaturno polje s tolikimi različnimi vrednostmi, kot si jih lahko izmislimo. Nekih splošno veljavnih pravil za pravilno namestitev mernih členov v industrijskih pečeh ni, ker je praktično vsaka peč organska celota zase in je potrebno že pri konstrukciji peči misliti, kam se bodo namestili merni členi. Jasno je, da sama postavitev pirometra ne sme zmotiti temperaturnega polja, ki ga hočemo meriti, zato morajo biti odprtine, v katere je ta nameščen, dobro izolirane in tesnjene. Paziti je treba, da se izognemo najbližjemu sevanju spiral. Če se zamislimo v realne razmere uporovne industrijske peči, vidimo, da diktirajo temperaturo pirometra samega: temperatura spiral, temperatura obzidave, temperatura atmosfere ter temperatura vložka.

Namestiti merni člen tako, da ta meri, celotni sistem pa regulira ono ponderirano temperaturo, ki je najbližja stvarnemu povprečku, pa je seveda tak kompleksni problem, ki je rešljiv le ob dobri meri občutka ter prakse.

### Vlečenje grelne žice



Pri tako zastavljenem vprašanju regulacije temperature s pomočjo regulacije moči postane takoj jasno, da z enim mernim členom lahko merimo samo najbolj grobo povprečje in da bo temu členu katerikoli priklopljen regulator uravnaval samo povprečje potrebne moči v peči. Gradientna temperatura polja bo vedno nehomogena, celo še takrat, ko je energetska situacija v peči postala stacionarna, tj. ob koncu segrevalne periode, ko so zahteve po enakomernosti segrevanja največje. Teoretično dobimo homogeno temperaturo polja v prostoru, kjer se izvrši kakršnakoli izmenjava toplotnih energij, le ob pogoju, da se v vsaki točki prostora meri vrednost temperature ter se v odvisnosti od odstopanja te od zahtevane dovaja tej točki ustrezna količina energije. Če apliciramo to na realne razmere v uporovni peči, bi to pomenilo, da je potrebno ves prostor peči razdeliti na čimvečje število con, v katerih se lokalna povprečja preko verige merilnih in izvršnih členov regulirajo zase, seveda na enotno temperaturo peči. Za vsako regulacijsko cono potrebujemo ob kompletni regulacijski enoti tako prirejene grelne elemente, da ti po eni strani ustrezajo geometriji cone, po drugi strani pa omogočijo enostaven priklop na izvor električne energije brez vmesnih elementov direktno na omrežno napetost.

Izvršni element regulacije uravnava dovedeno moč v odvisnosti od temperature. Uravnavanje moči po posameznih conah je lahko različno: ali se odklapljajo delni grelni elementi ali se izvrši preklon trikot-zvezda ali pa kombinirajo razne vzporedne in zaporedne vezave spiral. Pri zasnovi regulacije moči, tj. pri zasnovi izvršnih elementov temperaturne regulacije, je treba upoštevati:

— da se moč spiral spreminja s kvadratom napetosti, na katero so priključene;

— da se temperatura spiral pri hladni peči (vložku) spreminja s četrtem korenem iz moči;

— da je pri topli peči vpliv spremembe moči na temperature spiral malenkosten posebno pri manjših površinskih obremenitvah (glej diagram temperaturnih razmer v peči);

— da je treba stremeti za tem, da se preklon moči izvede na vse grelne elemente, ker se pri tem material obremenjuje enakomerno, kar rezultira pri zmanjšanju moči zmanjšanje površinske obremenitve spiral;

— da se pri vsakem povišanju temperature spirale za 4,5 % zmanjša njena življenjska doba za polovico.

Pri izbiri in nastavitvi regulacijskih enot je treba upoštevati, da se mora temperatura peči počasi približati svoji končni vrednosti: končna vrednost mora biti tangenta na krivuljo časovnega poteka pečne temperature. Vsako hitro približevanje končni vrednosti izziva nevarnost, da bo temperatura peči prekoračila to vrednost, ker ima celoten organizem peči tendenco naraščanja temperature. Vztrajnost v naraščanju ima vzrok v višjih temperaturah spiral in notranje obzidave, kar povzroči tudi pri prekinitvi dovajanja energije v peč še vedno povečanje povprečne temperature peči. Ker pomeni torej končna izravnava temperatur v peči povečanje povprečka, mora to upoštevati regulacija, tako da z zmanjšanjem dovedenih moči pred dosegom končne temperaturne vrednosti izkoristi akumulirano toplotno energijo onih delov peči, ki imajo višjo temperaturo. Za koliko stopinj se dvigne temperatura peči zaradi toplotne vztrajnosti, je praktično neizračunljivo, le poizkus ali izkustvo nam pove, koliko Celzijevih stopinj pred dokončno temperaturo mora regulator izvršiti preklon moči.

## ZUSAMMENFASSUNG

I. Im Artikel sind die mechanischen, elektrischen und Wärmeigenschaften der heimischen Elektrowiderstandsmaterialie RAVNIN und RAVNAL aufgezeigt. Der Vergleich dieser Materiale mit ähnlichen von fremden Firmen erzeugten ist aufgestellt. Das Erzeugungsprogramm der Zelezarna Ravne umfasst die Fabrikation von gezogenem Draht aus RAVNIN und RAVNAL von  $\varnothing$  6 mm bis zu den feinsten Dicken und deckt somit den Bedarf der gesamten Elektrowärme, die die Umwandlung der elektrischen in die Wärmeenergie auf Grundlage von Widerstandsheizkörpern bis zu den Temperaturen von 1000—1250° C umfasst.

Die Lebensdauer des Heizdrahtes als Grundmasstab für die Qualität des Materials ist von der Temperatur des Heizelements, Formung des eingebauten Materials, von der Atmosphäre, die das eingebaute Material umgibt, von seiner Oberflächenbelastung, von der Geometrie des Heizkörpers sowie der Zusammensetzung des tragenden Materials abhängig.

II. Die elektrothermische Berechnung der Heizelemente umfasst alle Faktoren, die die Konstruktion des Heizkörpers bestimmen. Durch Diagramme ist die Berechnung sehr erleichtert, weil man ansonsten zur optimalen Lösung nur mittels Versuchen kommen kann. So sind die zeitraubenden Rechenoperationen eventuell nur für die Endberechnung erforderlich.

III. Besonders ist die Berechnung des Industrieofens bearbeitet sowie die spezifischen Temperaturverhältnisse, die hier auftreten. Beim Entwurf der Temperaturregulierung muss berücksichtigt werden, dass die Genauigkeit der regulierten Temperatur neben der qualitativen Regulationsausrüstung und der übrigen spezifischen Elemente der Umwandlung der elektrischen in die Wärmeenergie im grossen Masse von den Regulationskreisen abhängig ist, die das Messglied über den Regulator mit dem Funktionsglied der Regulation verbinden.

## SUMMARY

I Mechanical, electrical and heat characteristics of domestic material for electrical resistors Ravnin and Ravnal are described. Comparison is made with similar materials, made by foreign producers. Production program of Ravne Steel Mill includes production of drawn wire of Ravnin and Ravnal from 6 mm diameter down to the finest gauges. This dimension range covers all the design range for facilities transforming electric energy into heat on the basis of resistors up to the temperatures 1000°—1250° C.

Basic criteria for quality of heating wire is life time, which depends on forming of built-in material, atmosphere which surrounds heating element, surface load, geometry of heating element and chemical analysis of carrying material.

II Designing of heating elements should take in account all characteristics of material. Design is simplified by the use of diagrams since otherwise the optimum solution can be found by trial and error method only. This way tedious mathematical operations are needed for final computation only.

III Industrial furnace computation and temperatures in it is worked out separately. When designing temperature automatic control someone should take in account that accuracy of controlled temperature does not depend on quality of control equipment and other specific moments of electric energy transformation into heat only, but to the great extent also on the number of control loops connecting sensing element over controller with controlling element.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны механические, электрические и тепловые свойства домашних сплавов электросопротивления Ravnin и Ravnal; эти свойства сравнены с изделиями зарубежных фирм. Длительность проволоки как основная оценка качества зависит от конструкции и состава тела, от температуры и среды в котором оно находится, от загрузки поверхности и от формы проволоки. Электротепловой расчет элементов нагрева содержит все данные которые определяют конструкцию агрегата. Числовой расчет не

труден при помощи диаграмм иначе необходима практическое испытание. Рассмотрен также пример одной промышленной печи с её тепловыми данными. Надо принять во внимание что точность предвиденной температуры зависит от качества регулирующего механизма и остальных параметров превращения электро-энергии в тепловую. Металлургический завод Zelezarna Ravne (Югославия), производит упомянутую проволоку от малого до поперечного сечения 6 мм.

Odgovorni urednik: Joža Arh, dipl. inž. — Clani: Jože Rodič, dipl. inž., Janez Barborič, dipl. inž., Aleksander Kveder, dipl. inž., Edo Žagar, tehnični urednik

Tisk: ČP «Gorenjski tisk», Kranj