

DK 621.785.545.4

O induktivnem površinskem kaljenju

BOJAN KRAUT

Lani v juniju je bil v Parizu 6. mednarodni kongres za strojne izdelke (VI^{ème} Congrès International des Fabrications Mécaniques), ki je obravnaval sodobne probleme v zvezi s površinsko obdelavo kovin, zlasti za izboljšanje odpornosti proti obrabi s povečanjem trajnosti površine in ugodnejšimi tornimi karakteristikami, dalje za izboljšanje odpornosti proti vročini in koroziji nasploh ter slednjič za izboljšanje optičnih lastnosti in dekoracijo.

Med razpravami o površinski obdelavi kovin za izboljšanje odpornosti proti obrabi je bila s posebnim poudarkom prikazana sodobna razvojna stopnja induktivnega površinskega kaljenja, s katerim naj bi ta članek seznanil bralce SV. V naslednjih številkah pa bodo po vrsti prišli na vrsto tudi vsi tisti nadaljnji postopki za površinsko obdelavo kovin, ki jim v sodobnem industrijskem razvoju posvečajo posebno pozornost.

NAČELA INDUKTIVNEGA POVRŠINSKEGA KALJENJA

Leta 1930 je podjetje »The Ohio Cranshaft Company, Ohio« (TOCCO), ZDA, začelo kot prvo uporabljati induktivno površinsko kaljenje, ki se po njem tudi imenuje »postopek TOCCO«.

Pri tem postopku gre za zelo ustrezno površinsko gretje predmeta s pomočjo visokofrekvenčnega električnega toka, ki ima to lastnost, da je gostota toka v površinskem sloju neprimerno večja kakor v jedru, in to tem bolj, čim višja je frekvenca toka (Skin-efekt).

Visokofrekvenčni tok v predmetu povzročimo z indukcijo, in sicer tako, da predmet, ki ga nameravamo površinsko segreti, položimo v magnetno polje tuljave z visokofrekvenčnim tokom. Pri tem delujeta oba dela kot transformator, pri katerem je tuljava njegova primarna stran, a sekundarna predmet sam, v katerem se inducirajo vrtilinasti toki. Ti imajo zaradi visoke frekvence največjo gostoto v površinskem sloju.

Gretje s porajanjem toplote neposredno v predmetu samem je zelo učinkovito, saj ni potreben za njeno dovajanje noben prestop ali prevod toplote.

Električni tok, ki teče skozi prevodnik z določeno električno odpornostjo, porablja pri tem energijo, ki se v prevodniku pretvori v toploto (Jouleova toplota). V predmetu, v katerem imajo inducirani visokofrekvenčni vrtilinasti toki največjo gostoto v površinskem sloju, se bo tudi ustrezna toplota razvila predvsem v tem sloju in mu znatno povišala temperaturo. V prvem trenutku induktivnega gretja bo torej temperatura površinskega sloja visoka, medtem ko bodo naslednji sloji do jedra ostali hladni.

Zaradi temperaturne razlike med sloji začne seveda toplota takoj teči s segretega površinskega sloja k jedru, ki se pri tem postopoma greje. Če bo torej induktivno gretje zelo kratkotrajno, se bo segrel samo površinski sloj. Pri daljšem trajanju induktivnega gretja pa se bo ogrelo tudi jedro, vendar ne neposredno z induciranimi vrtilinastimi toki, ampak le posredno s prevodom toplote iz površinskega sloja, segretega neposredno z indukcijo. Z uporabo krajšega ali daljšega trajanja induktivnega gretja površinskega sloja lahko torej po volji ogrejemo tanjši ali debelejši sloj predmeta, celo tudi ves njegov prerez.

Za izid induktivnega gretja so po tem važni:

- frekvenca toka; čim višja je, tem tanjši je segreti površinski sloj,
- moč toka; čim večja je, tem višja je temperatura segrevanega sloja,
- trajanje gretja; čim daljše je, tem globlji je segreti sloj.

Ti faktorji se lahko odlično regulirajo, tako da lahko dosegamo z njihovo kombinacijo poljuben izid gretja.

Ker torej z visokofrekvenčno indukcijo zlahka dosegamo potrebne kalilne temperature jekla, in to v poljubno debelem sloju, je ta način gretja posebno ugoden za površinsko kaljenje jekla. Za ta namen moramo le izbrati jekla, ki se po svoji sestavi dajo dobro kaliti: ogljikova ($C > 0,35\%$) ali legirana. Z jekli C 45 in Ck 45 so bili doseženi najboljši rezultati.

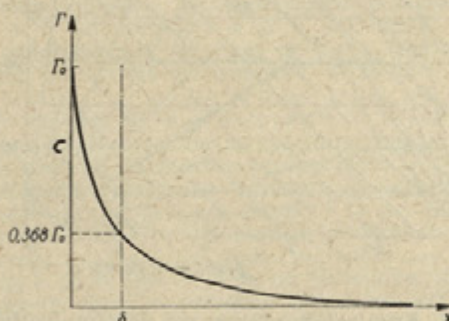
Pri zadostni moči visokofrekvenčnega generatorja zadošča za potrebno segretje površinskega sloja (0,5...1,5 mm) izredno kratek čas (deli sekunde), tako da toplota res nima potrebnega časa, da bi s prevodom mogla preiti v globlje sloje. Če gretju z namenom kaljenja takoj sledi izdatno gašenje segretega sloja, bo zakaljen res samo ta sloj, ne da bi globlji sloji pretrpeli kakršno koli strukturno spremembo. Določena kalilna temperatura se celo lahko prekoračuje brez nevarnost za rast kristalov in nastanek grobozrnate strukture. Finozrnata struktura, ki jo pridobivamo z vnaprejšnjo normalizacijo predmeta zaradi izboljšanja strukture jedra, se torej pri kaljenju tudi v površinskem sloju ne izgubi.

DEBELINA INDUKTIVNO ZAKALJENEGA SLOJA

Kakor je bilo že rečeno, izmenični tok v nekem prevodniku ni enakomerno porazdeljen po vsem prezu, ampak je gostota toka I' ob površini večja kakor v jedru. Ta porazdelitev gostote toka ustreza v ravnem prevodniku eksponentni funkciji (sl. 1):

$$I' = I_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}}$$

V tej enačbi je I_0 največja gostota toka ob površini, e baza naravnih logaritmov, x opazovana globina in δ izbrano globinsko prodiranje toka.



Sl. 1.

Kot globinsko prodiranje toka δ jemljemo globino ($x = \delta$), pri kateri se gostota toka zmanjša na e -ti del največje vrednosti:

$$I'_\delta = I_0 \cdot e^{-1} = \frac{1}{e} \cdot I_0 = 0,368 I_0$$

To globinsko prodiranje δ je funkcija specifične električne odpornosti ρ , permeabilnosti μ in frekvence f , kakršno kaže enačba po STEINMETZu:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

Ta enačba velja v celoti samo za šibka polja, vendar odkriva pogled v funkcionalno odvisnost globinskega prodiranja toka.

Kolikor večja je specifična električna odpornost ρ , toliko globlje prodira tok. Ker električna odpornost

jekla s temperaturo znatno raste, se z njo povečava tudi globinsko prodiranje toka.

Nasprotno deluje permeabilnost; kolikor je ta večja, toliko manjše je globinsko prodiranje toka. Permeabilnost pri paramagnetnih materialih (nemagnetnih, n. pr. Cu, Al, Pb itd.) je: $\mu = 1$, pri feromagnetnih kovinah (Fe, Co, Ni in njihove zlitine) pa je odvisna od sestave in termične obdelave kovine ter jakosti magnetnega polja. Z magnetnim nasičenjem se močno povečuje ($\mu \gg 1$).

Železo je feromagnetično do Curiejeve temperature ($\approx 768^\circ \text{C}$), nad to temperaturo in na vsem področju avstenitne strukture pa je paramagnetično. Čisto elektrolitno železo ima veliko permeabilnost, dodatki ogljika, Ni in Co pa jo zmanjšujejo.

Pri magnetnih materialih se toplota razvija tudi zaradi histereze. Njen vpliv se pri nizkih frekvencah še lahko opazi, pri visokih pa je tako neznaten, da ga lahko zanemarjamo.

Natančne srednje vrednosti električne odpornosti in permeabilnosti so torej za proces induktivnega gretja težko izračunljive. Razen tega so vrednosti, izračunane po Steinmetzovi enačbi, le teoretične, ker lahko veljajo le v ekstremno kratkem času, takoj nato pa se pojavlja prevod toplote v notranjost predmeta, ki rezultate močno spreminja.

OSBORN je na podlagi preizkusov dal naslednjo enačbo za odvisnost globinskega prodiranja δ neposredno od frekvence f [Hz] (v kateri so upoštevane ustrezne srednje vrednosti za ρ in μ):

$$\delta = \sqrt{\frac{4}{f}} \quad [\text{inches}]$$

kar daje — preračunano v mere metrskega sistema:

$$\delta \approx \frac{50}{\sqrt{f}} \quad [\text{mm}]$$

Ta enačba daje naslednje vrednosti za globinsko prodiranje toka δ pri različnih frekvencah f :

f [Hz]:	3 000	10 000	500 000
δ [mm]:	0,91	0,50	0,07

V teh vrednostih je upoštevano izključno samo čisto prodiranje toka. To je torej površinski sloj, ki se segreva neposredno z električnim tokom.

Zaradi temperaturnih razlik, nastalih med segretim površinskim slojem in nadaljnjimi sloji v predmetu, se hkrati z ogrevanjem takoj pojavlja tudi prevod toplote proti jedru. OSBORN je raziskoval tudi ta pojav in dognal za jeklo naslednjo odvisnost globine prodiranja toplote zaradi prevoda δ' od časa t [s]:

$$\delta' = \sqrt{0,0015 t} \quad [\text{inches}]$$

kar daje v metrskem sistemu obliko enačbe:

$$\delta' \approx \sqrt{t} \quad [\text{mm}]$$

Tej enačbi ustrezajo vrednosti:

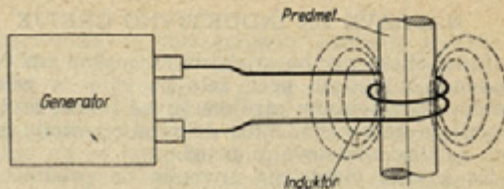
t [s]:	0,25	0,5	1,0	2,0
δ' [mm]:	0,50	0,71	1,00	1,41

Debelina celotnega segretega sloja — neposredno od induktivnega gretja in posredno od prevoda toplote — znaša torej $\delta + \delta'$ [mm].

Vse te vrednosti kažejo, da moramo za posebno tanke kaljene površinske sloje posegati po zelo visokih frekvencah in uporabljati izredno kratek čas gretja, ki znaša za te primere le dele sekunde. Če pa kaljeni površinski sloj ne mora biti izredno tanek, bo zadostila za induktivno gretje tudi nižja frekvenca. Osborn navaja za praktično globino čisto površinskega kaljenja za predmete v proizvodnji naslednje vrednosti:

f [Hz]:	3 000	10 000	500 000
$\delta + \delta'$ [mm]:	1,5	1,0	0,5

Globina površinskega kaljenja, kakršno želimo, znaša pri čisto površinskem kaljenju navadno 0,5 do 1,5 mm, pri velikih predmetih pa tudi 2,5 do 5 mm in



Sl. 2.

več, da bi po določenem trajanju uporabe predmeta lahko prebrušali površino, ne da bi odbušali zakaljeni sloj. Če želimo debelejšje zakaljene sloje, je potreben seveda ustrezno daljši čas segrevanja, kar uporabljamo predvsem pri nižjih ali srednjih frekvencah.

Da bi v teh kratkih časih mogli dosegati zadostno pregretje, to je zadostno temperaturo, je potrebna razmeroma precejšnja koncentracija energije, in to zlasti pri zelo kratkotrajnem visokofrekvenčnem segrevanju.

Jouleova toplota, ki se razvije v sloju, skozi katerega teče tok, je odvisna od jakosti toka I [A], električne odpornosti R [Ω] in časa t [s]:

$$Q = I^2 R t \quad [\text{J}]$$

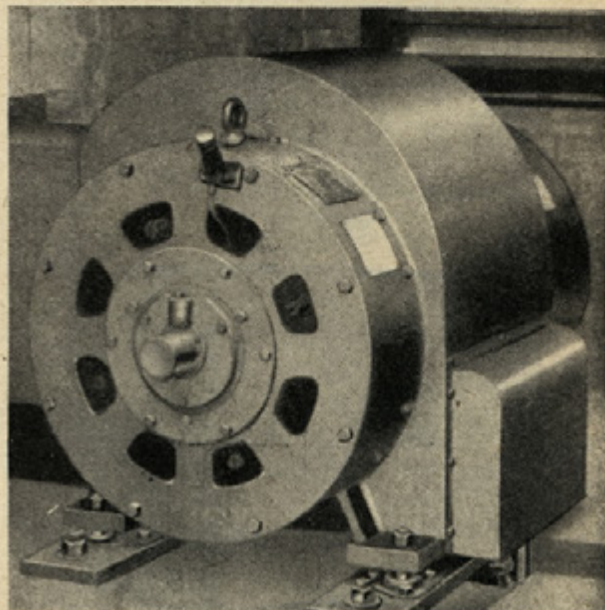
Pri enaki jakosti toka se torej v predmetu z večjo odpornostjo poraja več toplote; le-ta se hitreje greje kakor predmet z manjšo odpornostjo. Jeklo ima na primer približno šestkrat večjo električno odpornost kakor baker, pa se — pri enakem toku — tudi v enakem razmerju hitreje greje.

Za površinsko kaljenje jekla potrebna moč na enoto površine znaša (po LIEDHOLMU):

globina kaljenja [mm]:	do 1,5	1,5...4	4...10
frekvenca [Hz]:	>100 000	≤ 10 000	500...3000
potrebna moč [kW/cm ²]:	2...4	1,5...2,5	1...1,5

Za čisto površinsko kaljenje potrebna gostota energije je torej razmeroma velika. Z njo se dosega v prvem trenutku hitrost segrevanja okrog 10 000 °/s. Pa tudi pri hlajenju so dosegljive podobne hitrosti, ki so zato nesorazmerno večje kakor pri normalnem gašenju.

Za operacije, ki dopuščajo daljšo dobo gretja, je velikost moči manj važna.



Sl. 3.

(Metropolitan-Vickers Electrical Co.)

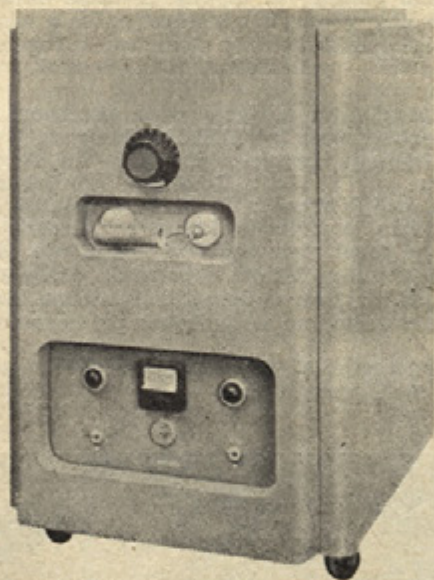
NAPRAVE ZA INDUKTIVNO GRETJE

Indukcijska grelna sredstva se močno razlikujejo od navadnih kalilnih peči, zelo pa so — v celoti — podobna obdelovalnim strojem in se lahko, kakor ta, vključujejo neposredno med delovne operacije na določeni serijski obdelovalni progi.

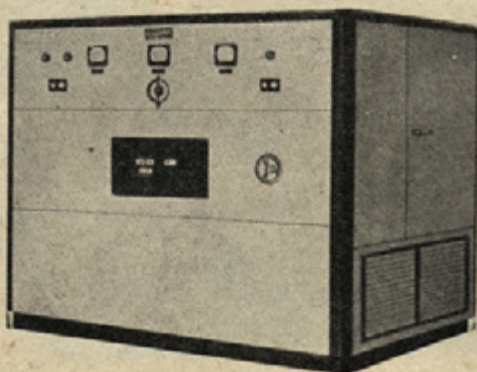
Za prenos električne energije na predmet služi induktor, ki sestoji — v najenostavnejšem primeru — iz tuljave kot primarnega navoja visokofrekvenčnega transformatorja, v katerem nastaja magnetno polje visoke frekvence. Vanj denemo predmet kot sekundarni navoj (sl. 2), nakar se v njem inducirajo vrtničasti toki.

Kot visokofrekvenčni generatorji, ki napajajo primarni navoj »transformatorja«, se uporabljajo pri nižjih frekvencah ($f \leq 10\,000$ Hz) največ rotacijski stroji (sl. 3), pri višjih frekvencah ($f > 10$ kHz) pa elektronski (sl. 4 in 5). Slednji dajejo ob visokih frekvencah z enostavnejšimi sredstvi večjo koncentracijo moči in so glede električnih karakteristik zelo stabilni, zaradi česar omogočajo precizno lokalizacijo gretja.

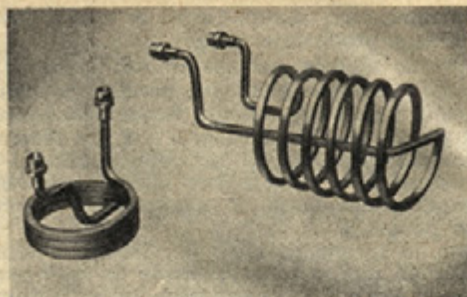
Induktor sam prevaja med vključitvijo tok z jakostjo 1000 do 5000 A. Da se zaradi tega ne bi preveč segrel, mora biti ustrezno hlajen. Za ta namen je oblikovan iz bakrene (tu in tam tudi srebrne) cevi okrogle



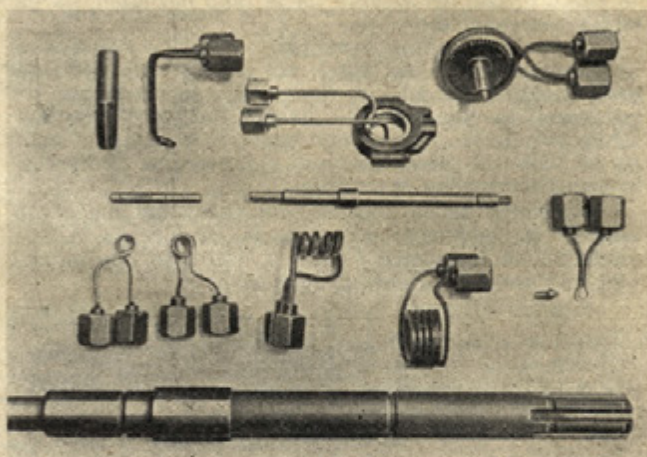
Sl. 4.
(Société de l'Electronique Française)



Sl. 5.
(Radio Heaters Ltd.)



Sl. 6.
(Philips)



Sl. 7.
(Hahn & Kolb)

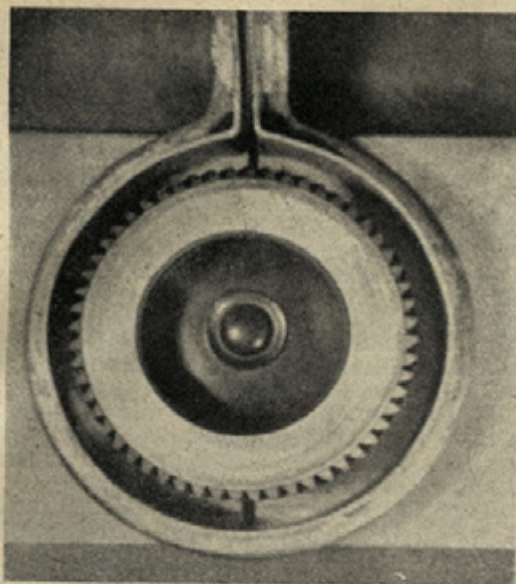
ali kvadratne oblike, v kateri se pod tlakom pretaka hladilna voda (sl. 6). Po obliki pa mora biti prilagojen obliki predmeta, da bi bila indukcijska vez med njim in predmetom kar najtesnejša (sl. 7).

Ustrezna razdalja med induktorjem in predmetom znaša 0,1 ... 1,5 mm, v izjemnih primerih tudi do 5 mm. Ta razdalja ima znaten vpliv na izkoristek naprave in koncentracijo toka v predmetu. Čim manjša je, tem boljši je izkoristek in tem večja je koncentracija toka. Njen vpliv na koncentracijo energije se menja s kvadratom same razdalje in je zato od nje močno odvisna temperatura. Zategadelj je treba razdaljo med induktorjem in predmetom držati zelo natančno.

Za prenos energije zelo važna je oblika predmeta. Idealna oblika za induktivno kaljenje je valj. Pri tem naj bi bila debelina kolikor mogoče enakomerna, prehodi in zaoblitve pa blagi. Pri nepravilnih oblikah mora biti induktor kar najbolj prilagojen obrisu predmeta, ker je sicer na izbočenih mestih (zaradi manjše razdalje med induktorjem in predmetom) segrevanje močnejše.

V nekaterih primerih številnih manjših izboklin (na primer pri zobnikih z razmeroma majhnimi zobmi, $m < 2$) oblikujemo lahko induktor ne oziraje se na te majhne izbokline (sl. 8). Pri tem pa se bodo vrhovi izboklin segrevali nekoliko bolj kakor njihova vznožja. Večjim izboklinam (večjim zobem, $m \geq 2$) pa moramo induktor prilagajati posebej.

Strojnih delov valjaste oblike, ki jih želimo površinsko kaliti, je zelo mnogo, med njimi tudi razmeroma zelo dolgih. Za hkratno kaljenje vsega predmeta naenkrat bi potrebovali velike moči, kar bi bilo združeno z nesorazmerno dragimi investicijami. Bolj ekonomična je zatorej manjša naprava, s katero lahko



Sl. 8.
(Wild-Barfield Electric Furnaces Ltd.)

segrevamo samo del površine, predmet pa pri tem ustrezno pomikamo skozi induktor, tako da se postopoma segreje vsa površina. Seveda mora biti v tem primeru tudi za kaljenje potrebno gašenje segrete površine postopno, tesno za pomikanjem induktorja.

Napravi lahko moč zmanjšamo še nadalje, če jo koncentriramo na ožjo segrevano površino s pomočjo tako imenovanega »koncentratorja« (sl. 9 in 10). Koncentrator prenaša učinek večjega števila navojev na ozko površino predmeta. Za ta namen služi vmesni, vzdolžno prerezani valj, v katerem tok, induciran od obkrožujočih ga navojev, zaradi reza ne more teči po obodu, ampak le vzdolž reznih ploskev in po notranji površini delovne odprtine. Ta pa deluje nato na predmet z veliko koncentracijo energije. Pri večjih močeh je koncentrator izdelan iz dvojnih valjastih sten, med katerima se pretaka hladilna voda (ki pa nima stika s hladilno vodo za grelnik).

Delovna odprtina koncentratorja je prilagojena obliki predmeta, ki se postopno pomika skozi njega, da bi se zakalil po vsej površini. Za ta namen je ob delovni odprtini navadno nameščen tudi brizgalni obroč za takojšnje gašenje ploskve, segrete v delovni odprtini.

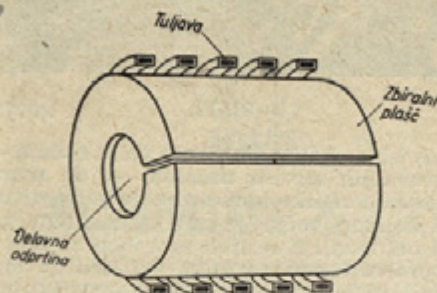
Posebno oblikovan koncentrator je lahko spojen z zamenljivim induktorjem, ki je prilagojen vsakokratni obliki predmeta (sl. 11).

Razumljivo je, da je delo s takim koncentratorjem neogibno navezano na avtomatično medsebojno pomikanje predmeta in induktorja. To se dosega s posebnimi stroji, na katerih so gibanja urejena po načinu, ki je znan z obdelovalnih strojev. Tako so oblikovani posebni indukcijski kalilni stroji (sl. 12).

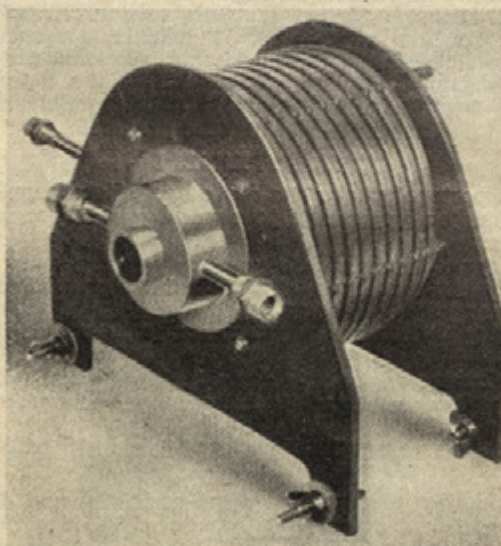
Kalilni stroji združujejo obe glavni fazi kalilnega postopka: segrevanje in gašenje. Pri obeh morajo biti — za dobro delo — izpolnjeni zelo natančni pogoji. Segrevati se sme samo določeni površinski sloj, gašenje pa mora slediti takoj, ko je v tem sloju dosežena potrebna temperatura. Da bi to dosegali, je za kalilne stroje potrebna predvsem kar največja avtomatizacija ob veliki natančnosti v odnosih med induktorjem in predmetom ter v zaporedju posameznih delovnih operacij. Spričo teh zahtev so kalilni stroji lahko oblikovani le kot izraziti stroji za serijsko proizvodnjo. Kot taki morajo biti opremljeni z enostavnimi vpenjalnimi napravami in enostavnim sistemom za upravljanje, da bi jim mogli streči tudi samo priučeni delavci.

Segrevanje v indukcijskih kalilnih strojih je urejeno tako, da induktor miruje, v njem pa miruje tudi predmet ali pa se — če je rotacijsko simetričen — vrti, da bi se s tem korigirale nepravilnosti magnetnega polja in oblik na predmetu. Po drugem načinu delovanja pa se induktor in predmet pomikata medsebojno postopno, zaradi česar lahko zakalimo večje površine z razmeroma manjšo močjo.

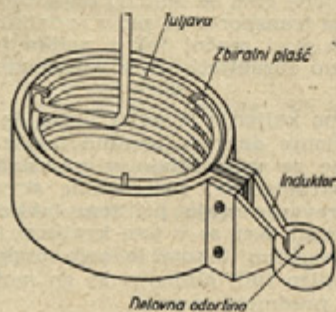
Kar se tiče gašenja, se opravlja pri kalilnih strojih po navadi z vodo. Uporablja se tudi dodatek kuhinjske soli ali natrijevega karbonata. Z oljem pa se gasi le izjemoma. Stroji so urejeni tako, da segreti predmet pade iz induktorja neposredno v gasilno sredstvo ali pa brizgne to nanj s pomočjo primerno oblikovanega gasilnika.



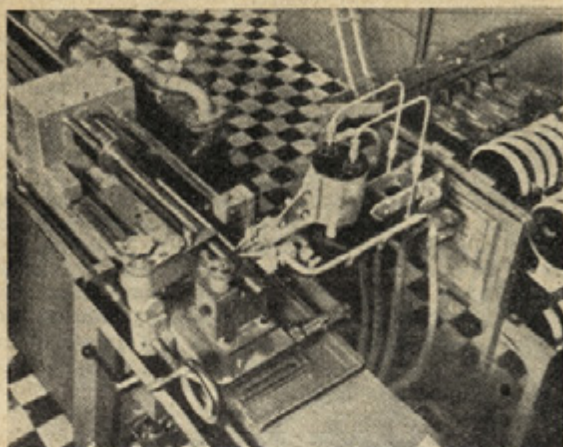
Sl. 9.



Sl. 10. (Philips)



Sl. 11.



Sl. 12. (AEG)

Glede izbire kalilnega stroja velja načelo — kakor pri obdelovalnih strojih nasploh —, da morajo biti njegove karakteristike tam skrbneje prilagojene obdelovancu, kolikor večja je serija, medtem ko mora biti stroj pri manjših serijah sposoben za bolj univerzalno uporabo. Glede na to se pri izrazito množinski proizvodnji, ki je zlasti pogostna v ameriški industriji, uporabljajo kalilni stroji z zelo močnimi generatorji in frekvenco, ki je prilagojena določeni globini kaljenja. Delo je v tem primeru zelo hitro, ker je čas segrevanja zelo kratek (nekaj stotink ali desetink sekunde). Zato pa je pri manjših serijah, ki so na splošno značilne za evropsko industrijo, primernejši nekoliko šibkejši generator z visoko frekvenco, pri kateri dosegamo poljubno globino kaljenja z ustrezno daljšim segrevanjem. Delo traja nekoliko dalj časa, naprava pa je uporabna za različne predmete.

POSEBNI PRIMERI

Za postopni prehod trdote od zakaljene površine do nezakaljenega jedra je primerno dvojno segrevanje, in sicer:

a) prvo segrevanje do zaželeno večje globine dosegamo s posebnim nizkofrekvenčnim generatorjem z veliko močjo (hitri postopek) ali pa z visokofrekvenčnim generatorjem z zmanjšano močjo in podaljšanim delovanjem,

b) končno segrevanje samo tankega površinskega sloja pa dosegamo z visokofrekvenčnim generatorjem in večjo močjo.

Za obe segrevanji lahko uporabljamo isti induktor.

Za kaljenje notranjih površin dolgih cevi je v rabi tako imenovano »kaljenje zebra«. To je kaljenje posameznih pasov, ki si — v koraku — slede drug drugemu. S tem dobimo menjajoče se trde in žilave pasove. Prvi zmanjšujejo obrabo cevi, drugi ji dajejo ustrezno žilavost.

Tako kaljene cevi se odlično obnašajo za namene pnevmatičnega transporta (n. pr. v rudnikih). Predmeti v cevi, ki jih nosi zračni tok z veliko hitrostjo, ne morejo občutno obrabljati ozkih nekaljenih pasov.

Induktivno kaljenje je edini način za uspešno in natančno kaljenje delov z izredno majhnimi debelinami, kakršne se uporabljajo v urarstvu, industriji preciznih instrumentov, pisarniških strojev in podobnem. Segrevanje traja pri tem lahko tudi samo nekaj milisekund. Ker se v tem kratkem času segreje z visokofrekvenčnim tokom le zelo ozek površinski sloj, je zelo hitro tudi hlajenje, ki ga močno podpira hladno jedro predmeta samega.

Da bi dosegli ekstremno hitro gašenje, je mogoče induktivno segrevati predmet kar neposredno v teko-

čini za gašenje. Ta deluje nato v hipu takoj, ko se prekine tok za gretje. Po tej poti so bili doseženi odlični rezultati.

O EKONOMIČNOSTI INDUKTIVNEGA KALJENJA

Investicije za induktivne naprave so drage, saj znaša ta čas v Nemčiji cena večjih naprav — glede na moč 1 kW — okrog 800 DM/kW, pri manjših napravah pa tudi 2000 DM/kW. V Angliji stanejo visokofrekvenčni generatorji od 160 do 400 £/kW. Potemtakem so ti investicijski stroški mnogo večji kakor za druge vrste površinskega kaljenja. Vendar pa za presojo ekonomičnosti ti stroški niso edino odločilni. Treba je upoštevati niz prednosti, ki jih daje induktivno kaljenje:

1. Stroški za energijo so zelo občutno manjši kakor pri kaljenju v peči ali solni kopeli.
2. V primerjavi s cementiranjem ni pri njem nobenih stroškov za pripravo predmeta za cementiranje.
3. Obdelovalni čas je izredno kratek in neprimerno krajši kakor pri drugih postopkih.
4. Dana je možnost za popolno avtomatizacijo.
5. Zaradi velike proizvodne zmogljivosti kalilnih strojev in čistoče njihovega dela jih je mogoče razmeščati neposredno v proizvodnih progah, tako da za to delo niso potrebni nobeni stroški več za transport v kalilnico in iz nje.
6. Ker za to delo ni potrebna nobena posebna kalilnica, so odvečni tudi stroški za gradnjo ustreznega prostora za kalilnico in vmesno skladišče.
7. Pomemben prihranek prinaša tudi občutno zmanjšanje izmečka. Zaradi preciznega avtomatičnega dela kalilnih strojev je tega nasploh izredno malo. Vrh tega pa se morebitno napačno kaljenje z lahkoto popravlja s ponovnim kaljenjem.

8. Zakaljena površina je zelo čista, zaradi česar čiščenje večinoma sploh ni potrebno, stroški za brušenje pa so znatno manjši.

Povrh vseh naštetih zmanjšanih stroškov pri induktivnem kaljenju pa je treba pri presoji vrednosti tega postopka upoštevati še znatno izboljšano kakovost induktivno kaljenih predmetov, in sicer:

a) Z induktivnim kaljenjem dosegamo površinsko trdoto predmeta, ki je za 2 do 3 HRC večja kakor pri katerem koli drugem procesu kaljenja. To je posledica zelo energičnega gašenja, ki izvira od sredstva za gašenje in popolnoma hladnega jedra.

b) Izredna hitrost induktivnega segrevanja preprečuje možnost za razogljčenje površine; oksidacija je povsem neznatna, struktura ostane finoizirana, deformacij predmeta v splošnem sploh ni.

c) Odpornost proti utrujanju materiala je močno povečana.

d) Možno je segrevati natančno omejene dele ploskev.

e) Konstantnost v kakovosti je odlična.

V ugodnem primeru se naprava amortizira že v zelo kratkem času. — Pri majhnem številu posameznih obdelovancev pa je zaradi velikih investicijskih stroškov ekonomičnost induktivnega kaljenja sama sicer manjša kakor pri drugih postopkih, vendar jih po kakovosti izdelkov prekaša v vseh primerih.

Viri:

- Stansel, N. R.: Induction Heating, New York, 1949.
Zandstra, K. A.: High Frequency Heating in Industry, London, 1950.
Kegel, K.: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Induktionshärtmaschinen, 1951.
Voss, H.: Die Induktionshärtung und ihre Anwendung, (Schweissen und Schneiden, 1954.)
Osborn, H. B.: Surface Hardening by Induction Heat, (Metal Progress, 1955.)
Kuhlbars, H.: Die Induktionshärtung mit mittleren Frequenzen, (Maschine und Werkzeug, 1956.)
Predavanja na 6. kongresu za strojno obdelavo v Parizu v juniju 1956 (gg. Descarsin, Labrousse, Liedholm, Seulen, Di Pieri).

Avtor: prof. ing. Bojan Kraut, Oddelek za strojništvo Tehniške fakultete v Ljubljani