

Toplotna obdelava verig s poudarkom na indukciji

Induction Heating in Heat Treatment of Chain

F. Legat, Tovarna verig, Lesce

Opisan je postopek termične obdelave verig s pomočjo indukcijskega ogrevanja, njegove prednosti in storilnosti. Prikazana je možnost selektivnega popuščenja, s katerim se doseže različna trdota na ravnih in ukrivljenih delih verižnega člena, kar lahko zagotovi večjo obrabno obstojnost verige.

Heat treatment of chain by use of induction heating is described. The productivity, advantages and possibility of selective annealing aimed to obtain different hardness of straight and curved parts of chain element which can result in better abrasion resistance are pointed out.

1 Uvod

V seriji člankov, objavljenih v zadnjih treh letih v Železarskem zborniku o problematiki izdelave verig, je bil obširno predstavljen postopek normalizacije verižnih členov v VERIGI Lesce. V tem prispevku pa je obravnavano poboljšanje verig s poudarkom na indukciji. Zaradi že objavljenih člankov splošni uvod v problematiko termične obdelave verig ni potreben.

Za doseganje enakomernih in zadovoljivih mehanskih lastnosti je po varjenju verižnih členov nujna termična obdelava s polno prekrizalizacijo. Za skupino navadnih tehničnih verig zadostuje že normalizacija, verige višjih kakovostnih razredov pa se poboljšajo in po potrebi tudi površinsko utrdijo. Zato se v te namene uporabljajo nizkolegirana jekla. K tabeli 1, v kateri so podana jekla za posamezne vrste verig po DIN 17115 in zanje primerne termične obdelave in tabeli 2, kjer so podane kvalitetne stopnje za sidrne verige, bi dodali še, da z nekaterimi mikrolegiranimi jekli dosežemo zahtevane lastnosti že s samo normalizacijo, kot je to npr. pri sidrnih verigah.

Glede na zahteve kupcev pri novih kvalitetnih verigah s poboljšanjem v klasični peči nismo več dosegali zahtevanih rezultatov. Tudi nemška kontrolna institucija je zahtevala toplotno obdelavo—poboljšanje, na novih modernejših agregatih in sicer za visokoodporne meterske verige za dvigala, obesne komplete ter za verige raznih transporterjev poboljšanje z indukcijo.

2 Prednosti poboljšanja verig z induktivnim ogrevanjem

Indukcijske naprave za proizvodnjo verig imajo celo vrsto prednosti pred dosedanjimi pečmi:

Naprave so sodobne in s svojo avtomatiko popolnoma odgovarjajo stanju tehnike. Na ta način dobimo v praksi najboljše rešitve. Skupaj s konduktivnim segrevanjem pa predstavlja postopek, ki najmanj škodi okolje. Odločilen pri postopku pa je način segrevanja materiala. Samo indukcijsko in konduktivno gretje segrevata material direktno; pri vseh ostalih postopkih pa teče segrevanje preko površine in nato s prevodnostjo v notranji del materiala.

Časi, ki so za segrevanje potrebni, so pri omenjenih dveh načinih najkrajši. Posebej pa je treba paziti na pravo izbiro frekvence, ki je vezana na material, ki ga ogrevamo, na njegove dimenzije in na tehnične pogoje same naprave.

Prednosti gretja v indukcijski napravi so:

- preprečuje razogljčenje na površini zaradi kratkih časov segrevanja;
- preprečuje nastajanje grobih zrn ter s tem zadrži visoke trdnosti v jedru za močno zahtevne izdelke. Tudi ta efekt se doseže s hitrim segrevanjem;
- zmanjšuje nastanek oksida, posebno pri temperaturah nad 800°C, kar močno vpliva na lepo površino. Če dodatno uporabimo še zaščitno atmosfero, se ta oksidacija še zmanjša;
- zagotavlja enakomerno temperaturo;
- omogoča avtomatsko regulacijo;
- časi transportiranja so enaki, kar je pogoj za enakomerno kvaliteto izdelkov.

Dodatne prednosti so še pri postavitvi in posluževanju:

- indukcijski agregat zavzema manj prostora. Glavni del potrebnega prostora veže nase naprava za podajanje komadov, ostali deli agregata pa so zaprti v ohišjih in omarah, ki pa ne potrebujejo veliko prostora.
- podstavek ni potreben, omare in naprava se postavijo neposredno na tla hale.
- ni razvijajočih se plinov; zato ne potrebujemo dimnika, niti posebnih naprav za ventilacijo. Plini, ki slučajno nastajajo, pa so odvisni od predpriprave komadov. Dovod energije je izveden preko posebnih fleksibilnih in vodnohlajenih kablov.
- priprava za proizvodnjo je hitra, ker niso potrebni časi predgrevanja. Že po nekaj minutah dobimo prvi komad segret iz naprave.
- ni posebnih toplotnih obremenitev delavcev, ker ni posebnega sevanja (površine so majhne) in odsesovalnih kabin; segret je samo komad, sama peč je vodnohlajena.
- strežba je enostavna; celotna naprava je izdelana tako, da z avtomatiko dajemo ritem količini in kompenzaciji. Strežba lahko teče s priučeno delovno silo.
- časi za razne menjave in popravila (sklopke, voda, kontakti) so kratki.

Tabela 1. Trdnostni razredi tehničnih verig.

Vrsta verige DIN		Material po DIN 17115	Toplotna obdelava
762	navadne tehnične verige	UR St 35-2	normalizacija
763		St 35-3	normalizacija
764		R St 41-2	normalizacija
766		St 41-3	normalizacija
764		15 Mn 3 Al	kaljenje ali poboljšanje
765		21 Mn 4 Al	kaljenje ali poboljšanje
5684	verige	20 NiCrMo 3	poboljšanje
5687	višjih trdnosti	20 NiCrMo 3	poboljšanje
5684	visokoodporne	23 MnNiCrMo 52	poboljšanje
5687	verige,	23 MnNiCrMo 53	poboljšanje
22252	rudarske verige C	23 MnNiCrMo 64	poboljšanje

UR nepomirjeno jeklo
R pomirjeno jeklo (s Si ali Al)

Tabela 2. Kvalitetne stopnje sidrnih verig.

Kvalitetna stopnja	Jeklo	Toplotna obdelava
K 1 a	R St 35.2	toplotno neobdelano, normalizacija
K 1 b	R St 41-2	normalizacija
K 2	21 MnSi 5	normalizacija
K 3	27 MnSi 5	normalizacija; normalizacija in popuščanje; kaljenje in popuščanje

3 Osnove ogrevanja in storilnosti naprav

Poznamo celo vrsto člankov, tablic in ocen, ki obdelujejo in obravnavajo indukcijsko segrevanje. Pri indukcijskem gretju teče skozi indukcijsko tuljavo el. tok s posebno frekvenco. Pri tem nastane v tuljavi magnetno polje, ki menja svojo smer glede na frekvenco. V vodniku, ki se nahaja v tem magnetnem polju, se inducira napetost. Nastali tok povzroča v komadu zaradi upora segrevanje materiala. Poleg tega pa pride še do dodatnega gretja zaradi nemagnetnih izgub. Oba upora seveda hitro segrevata material.

Izbor frekvence je zelo važen. Globina segretja je odvisna od frekvence (skin efekt). Moč toka od površine v globino pada (slika 1). Razdaljo v globino, kjer znaša le še 35% toka na površini imenujemo "vstopna globina" in se izračuna po naslednji formuli:

$$d = 50 \cdot 3 \frac{\rho}{f\mu}$$

d vstopna globina v cm
 ρ specifični upor
 μ magnetna permeabilnost
 f frekvenca v Hz

Tabela 3. Primerne frekvence za različne materiale in debeline

temp. materiala	jeklo 1200°	med. 800°	Alu 500°	baker °
naz.frekv. 50 Hz	OD 150	OD 110	OD	52
sred. frekvenca				
500	60–250	37–440	16	820
2000	30–120	18–210	8	410
5000	20–185	11–130	5	260
10000	14–60	9–100	3.5	180
visoka frekvenca				
450	2.5–8	1.0–15	0.5	26
1.0	1.5–6	0.8–12	0.35	18

vse vrednosti so v mm

Iz posebnih diagramov razberemo, da pri magnetnih vrstah jekel znaša vstopna globina (20°C), pri frekvenci 10 KHz približno 0.23 mm. Nad CURIE-jevo točko se dvigne globina na cca 5 mm, kar pomeni za približno 20 krat. Iz tega sledi, da ima tok nad CURIE-jevo temperaturo na

Tabela 4.

ϕ verige	klasa	$^{\circ}\text{C}$	št.ind.	v m/min	kW	kg/h	kWh/kg
5	6	900	1	1.3	35	39	0.90
7	6	900	2	1.6	45	103	0.44
7	6	420	2	2.6	34	167	0.20
8	SIP	910	2	1.6	45	134	0.33
8	SIP	910	3	1.4	36	118	0.30
8	SIP	910	3	3.2	45	270	0.17
9	6	910	3	1.4	43	147	0.29
9	6	415	3	2.0	38	210	0.18
11	6	960	3	1.1	47	178	0.26
13	6	900	4	1.2	51	274	0.19

Pri kaljenju pri 900°C so storilnosti na pilotni indukcijski napravi v verigami Verige Lesce naslednje:

ϕ 5 mm	=	0.72 kg/KWh
9 mm	=	2.8 kg/KWh
11 mm	=	3.5 kg/KWh
16 mm	=	3.7 kg/KWh
26 mm	=	4.35 kg/KWh
30 mm	=	4.7 kg/KWh
34 mm	=	4.8 kg/KWh

Rezultati obratovanja—skupno 1200 obratovalnih ur, dvoali tro-izmensko obratovanje pa so:

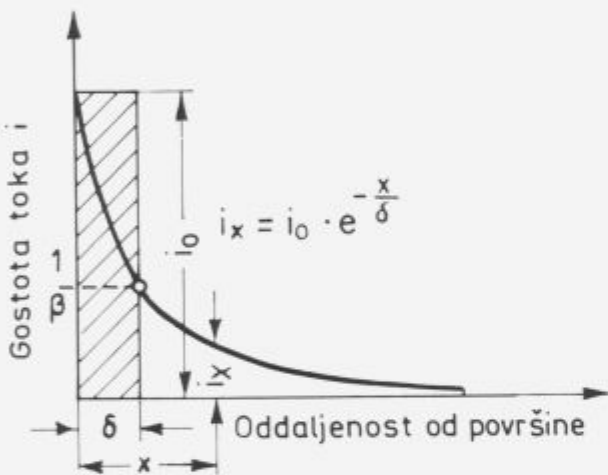
Če še enkrat povzamemo prednosti indukcijskega ogrevanja pri termični obdelavi verig:

- majhna oksidacija in časi zadrževanja
- lahka regulacija
- možnost ohlajanja v različnih kalilnih sredstvih
- ponovne nastavitve pogojev so praktično enake
- hiter zagon

pa moramo posebej poudariti še dve možnosti pri popuščanju:

1. pri normalnem popuščanju traja ogrevanje toliko časa, da je člen enakomerno ogret na vseh delih. S tem dobimo enako trdoto tako na ravnem kot tudi na radiusih členov;
2. pri selektivnem popuščanju dobimo novo kvaliteto členov s tem, da so radiusi členov manj ogreti kot ravni deli člena in zato ostanejo nekoliko trši. Prav ta lastnost verig pa je danes zaželena. Radialni deli so zaradi medsebojnega trenja izpostavljeni veliko večji obrabi. S selektivnim ogrevanjem pri popuščanju dobimo na ta način ravne dele členov, popuščane na 40–44 HRC kot zahteva kvaliteta 80 po normi DIN 5684 in radiuse, ki imajo precej višjo trdoto. Prav to pa daje verigi novo življenjsko dobo in novo vrednost. Praktične meritve so pokazale, da so temperature pri tem načinu na radiusu 300°C , na ravnem delu pa $450\text{--}650^{\circ}\text{C}$.

Postopek je dal dobre rezultate. Zaradi nižje temperature popuščanja na radiusih pa ima "lepotno" napako. Predpis nemške kontrolne institucije v Hannoveru zahteva za



Slika 1. Padec moči toka v oddaljenosti od površine.

Figure 1. Induction current vs. distance from surface.

razpolago dosti večjo ploskev in izgube prevodnosti toka kljub povečanemu uporabi segretega materiala močno padajo. Ker pa padejo istočasno tudi izgube nemagnetizacije, gre gretje od CURIE temp. do temp. kaljenja dosti počasneje kot pa gretje od 20°C do CURIE točke.

Praktične izkušnje pa kažejo, da je gospodarno segrevanje le takrat, kadar ima premer materiala vsaj 4 kratno vrednost "vstopne globine".

Najprej se segrejejo ravni deli člena, ker so najbližji induktoru. Ko imajo ti cca 764°C , dobi globina 10–20 kratno vrednost proti temp. 20°C , tedaj pade moč v ravnem delu člena in se radiusi močneje segrejejo. Pri žarenju do CURIE točke zadošča ta temp. za oba dela členov.

VDI 5/3132 nam daje posamezne frekvence za različne premere in debeline materialov (tabela 3).

Do sedaj smo imeli za kaljenje, normalizacijo in popuščanje različne peči. Najboljše so bile peči v pokončni legi z večmestno višino, v katerih se lahko vrši termična obdelava verig širokega dimenzijskega razpona. Pri indukcijskem ogrevanju pa moramo vsaki dimenziji verige prirediti pravi induktor zaradi boljšega učinka. Investicije so s tem nekoliko večje, vendar se izplačajo, ker so učinki pri velikih količinah odločilni.

F. Legat: Toplotna obdelava verig s poudarkom na indukciji

poboljšanje verige najnižjo temperaturo popuščanja 400 do 420°C. Temperatura popuščanja v radiusih je sicer po tem predpisu prenizka, vendar so dosežene ugodne statične in dinamične lastnosti verig.

Za utrditev in pripravo celotnega postopka za prakso izvajamo dodatne preiskave skupno z Inštitutom za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana.