

TERMOMEHANSKA OBDELAVA ZOBATIH VENCEV A TERMO-MECHANICAL HEAT TREATMENT OF STARTER RING GEARS

**Dušan Vodeb¹, Vlado Hrnčič¹, Ferdo Grešovnik², Sonja Hrnčič², Peter Ribič³,
Franc Veršnik³**

¹SIRD, d.o.o., 2390 Ravne na Koroškem, Slovenija

²SŽ Metal Ravne, d.o.o., 2390 Ravne na Koroškem, Slovenija

³Kovinska industrija KLS, d.d., 3333 Ljubno ob Savinji, Slovenija
dusan.vodeb@guest.arnes.si

Prejem rokopisa - received: 2000-09-26; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-08-30

Izdelava zobatih vencev je program za potrebe avtomobilске industrije. Sedanji nivo tehnologije v družbi KLS ni konkurenčen, imajo previsoke proizvodne stroške in tudi stabilnost procesa izdelave ni v mejah, ki se zahteva po standardih, ki veljajo za avtomobilsko industrijo.

Z izkoriščanjem efektov visokotemperaturne termomehanske obdelave (VTTMO) pri toplotni obdelavi zobatih vencev smo želeli ugotoviti izboljšanje mehanskih lastnosti vencev Rm, A, Rp_{0,2}, hkrati pa ugotoviti vpliv na znižanje zaostalih napetosti in izdelku. Raziskovali smo vpliv mikrolegiranosti jekla na povišanje mehanskih lastnosti, povečanje žilavosti in vpliv legirnih elementov na zmanjšanje deformacij zobatih vencev.

Največji tehnološki problem so bile deformacije zobatih vencev po kaljenju. S projektom smo želeli odkriti vzroke in poiskati tehnično in tehnološko rešitev za linijsko proizvodnjo zobatih vencev. Z indukcijskim ogrevanjem obročev na temperaturo normalizacije, vročim kalibriranjem, kjer smo izrabili učinke termomehanske obdelave, smo izboljšali strukturo na mestih, kjer bodo venci ozobljeni. Znižali smo porabo energije in skrajšali čas izdelave vencev. Ugotovili smo tudi optimalno strukturo materiala, iz katerega je treba izdelovati zobate vence, da bomo dobili najboljše rezultate po indukcijskem kaljenju.

Optimalni tehnološki proces za proizvodnjo zobatih vencev je rezultat razvojnega dela v udeleženih podjetjih.

Raziskave in preizkusi so nam pokazali, v kateri smeri moramo iskati rešitve problema:

- Izbor ustreznega jekla CK-35 ali modificirane sestave CK-35 z dodatkom mikrolegirnih elementov (proizvajalec zahteva to jeklo)
- Navijanje in razrez spiral se mora izvesti na namenskih strojih.
- Kontrolirano se mora izpeljati uporovno varjenje in obdelava zvara (avtomatizacija).
- Indukcijsko ogrevanje se mora izvesti na temperaturi normalizacije in pri tem vključiti proces vročega kalibriranja, ki izkorišča v celoti ali delno efekt VTMO.
- Kontrolirano je treba izvesti proces ohlajanja zobatega venca.
- Modernizirati je treba struženje in ozobljenje obročev.
- Avtomatizirati je treba proces induktivnega kaljenja in popuščanja.

Ključne besede: avtomobilska industrija, avtomatizacija, induktivno kaljenje, normalizacija

The program for starter ring gears is a highly specialized program for the manufacture of rings and ring gears for the automotive industry. The manufacture takes place in technological phases that are now too expensive, while the process stability is still not within the limits required by the automotive industry.

The introduction of high-temperature thermo-mechanical treatment (VTTMO) for gear rims improves their mechanical properties Rm, A, Rp_{0,2}, and simultaneously reduces the residual stresses. Further, we will try to establish the influence of steel microalloying elements on the reduction of gear-rim deformations.

The major technological problem lies in the deformations. In our research project we found the real cause of problems, technical and technological solutions, and with a thermo-mechanical treatment and induction heating we reduced energy consumption, optimized the technology for robotized production of 1,900,000 starter ring gears.

The optimal technological process for the production of starter ring gears is the result of RR activities and is available in the following direction:

- selection of suitable CK-35 steel or a modified composition of CK-35 with the addition of microalloyed elements (a requirement of the automotive industry),
- winding and cutting of spirals on specialized machines,
- controlled resistance welding with weld treatment (automation),
- induction heating to VTTMO temperature (partially or completely),
- hot and/or cold calibration and controlled cooling (automation),
- modernization of ring-gear turning and gearing,
- automation of induction hardening and tempering.

Key words: automotive industry, automation, induction hardening, normalizing

1 UVOD

Slovenska podjetja se vse bolj vključujejo v verige podjetij, ki izdelujejo razne izdelke za potrebe avtomobilске industrije. V ta sklop podjetij spada tudi

družba Kovinska industrija KLS, d.d., za katero smo pomagali iskati boljšo tehnologijo izdelave zobatih vencev, kot jo imajo sedaj. Za zobate vence se nenehno zahtevajo novi, ostrejši kakovostni pogoji, večja zanesljivost in nižji proizvodni stroški.

Ugotovili smo, da je možno najti boljšo tehnologijo, s katero se lahko znižajo proizvodni stroški, z novo tehnologijo je možno zagotoviti višji nivo zagotavljanja kakovosti in zanesljivosti izdelkov. Poleg boljših tehnoloških rešitev je tehnološki proces potrebno avtomatizirati in robotizirati, ker bo le tako v proizvodnji dala predložena tehnologija pričakovane rezultate.

Z obstoječo tehnologijo izdelave obročev v družbi KLS je sedaj možno izdelati 600.000 vencev na leto, vendar je njihova proizvodnja na meji rentabilnega poslovanja.

Predložena tehnologija zagotavlja rentabilno izdelavo 3 mio kosov/leto, ki so cenovno in kakovostno enakovredni konkurenčnim proizvajalcem. Le s takim obsegom proizvodnje in predvideno kakovostjo izdelkov se bo družba KLS lahko enakovredno vključila v verige avtomobilske industrije.

Glavna slabost obstoječe tehnologije izdelave zobatih vencev je bila toplotna obdelava: klasična normalizacija topovarjenih obročev, peskanje in hladno kalibriranje. Glede na možne rešitve tega problema smo se odločili za vključitev efektov VTMO v izdelavo zobatih vencev. Tako smo rešili prvi del naloge, najti najboljšo tehnologijo. Bistveno večje težave nam je pomenila avtomatizacija delovnega procesa, kjer je bil zahtevan delovni ritem. Delovne operacije smo morali izpeljati v zelo kratkih časih: 15 sekund smo imeli za postopek za normalizacijo zobatih vencev in 12 sekund za indukcijsko kaljenje in popuščanje vencev, kjer smo izkoristili učinek zaostale toplote, ki je bil še v obroču.

Problem smo reševali z laboratorijskimi in praktičnimi preiskusi, ki smo jih opravili doma in v tujini. Pri iskanju posameznih tehnoloških rešitev smo konsultirali razne strokovnjake in proizvajalce tovrstne opreme.

Tako smo prišli do optimalne tehnologije, ki nam sočasno zagotavlja ponovljivost tehnološkega postopka, kvaliteto izdelka, konkurenčno ceno in ustrezno produktivnost. Najugodnejša rešitev je kontrolirano uporovno varjenje, delna ali celotna induktivna normalizacija v času od 6 do 15 sekund in kasnejše hladno kalibriranje ali pa vroča kalibracija v območju temperatur nad AC3. Na osnovi izvedenih preizkusov in zahtev kupcev, zahtev po čim nižjih proizvodnih stroških smo delno spremenili idealno tehnološko rešitev in se odločili za varianto hladne kalibracije obročev za zobate vence.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

Analizirali smo obroče in zobate vence, izdelane po različnih tehnologijah in na opremi določenih proizvajalcev. Analizirali smo kalibrirane in nekalibrirane vzorce, kjer smo preiskovali žilavost zvara. Poleg tega smo na nekalibriranih vzorcih pregledali mikrostrukturo zvara, ugotovili toplotno vplivne cone (TVC) ter vpliv osnovnega materiala na kakovost zvara. Na kalibriranem obroču smo izvršili natezni preizkus osnovnega



Slika 1: Slika zvara

Figure 1: Weld (1:1)

materiala in zvarjenega mesta ter žilavost zvara in izmerili deformacije, ki so nastale pri kalibraciji.

Iz kalibriranega in nekalibriranega obroča smo izrezali žilavostne preizkušance po ISO V na mestu zvara.

Iz kalibriranih in normaliziranih obročev smo izrezali natezne preizkušance tipa 9 (merni del 5 mm, merna dolžina 25 mm, celotna dolžina preizkušanca 56 mm).

Mikrostrukturo zvara mo pregledali po celotnem preseku obroča (16 x 12,3 mm) na območju zvara. Sam var je širok 2 mm, **slika 1**.

Naredili smo tudi analizo poteka trdot na bočnih površinah zobatih vencev, ki smo jih indukcijsko kalili. Vzorce smo kalili pri temperaturi 920 °C. Temperaturo smo merili s sevalnim pirometrom. Čas gretja vzorca je bil 5,7 sekunde, čas ohlajanja do sobne temperature pa 4 sekunde.

3 REZULTATI

Rezultati nateznih preizkusov so prikazani v **tabeli 1**.

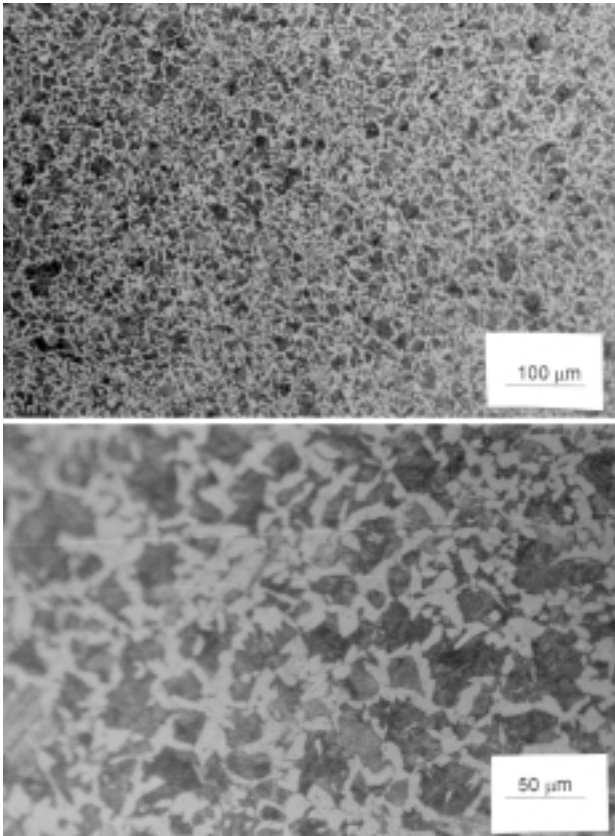
Tabela 1: Rezultati nateznih preizkusov

Table 1: Results of tensile tests

| Re (MPa) | Rm (MPa) | A5 (%) | Z (%) | Opomba |
|----------|----------|--------|-------|---------------|
| 480 | 675 | 21,0 | 58 | nevarjeni del |
| 585 | 693 | 13,9 | 41 | varjeno mesto |

Ob varu izkazuje material slabšo plastičnost in ima višjo trdnost, kot jo ima osnovni material, kar pomeni, da je treba vzorce obvezno normalizirati.

Kontrolirali smo mikrostrukturo normaliziranega zvara, ki je sestavljena iz zrn ferita in lamelnega perlita (velikost zrn je od 8 do 10 po ASTM E112). Var s tako mikrostrukturo je širok 0,2 mm. Delež ferita je tu večji kot v mikrostrukturi osnovnega materiala. Levo in desno od zvara je toplotno vplivna cone (TVC), ki je široka od 0,1 do 0,15 mm. Mikrostruktura te cone je pri 100-kratni povečavi prikazana na **sliki 2**. Sestavljena je iz zrn ferita



Slika 2: Vzorec, normaliziran na 890 °C - povečava: 100-krat in 200-krat

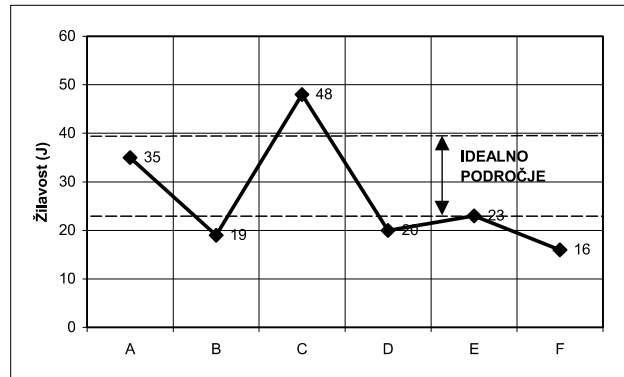
Figure 2: Specimen normalized to 890°C - magnification: 100x and 200x

in lamelnega perlita. Velikost zrn je za oceno 10 po ASTM E112 in je finejša od zrna na zvaru.

Najboljšo žilavost smo iskali po različnih tehnoloških postopkih: klasična tehnologija varjenja in normalizacija pri temperaturi 860 °C v elektroglobinski peči, ki zahteva uporabo zaščitne atmosfere. Če pa nimamo globinske peči z zaščitno atmosfero, moramo izdelek peskati kasneje.

Narejenih je bilo več preizkusov pri proizvajalcih opreme. Preizkušali smo tehnologijo indukcijske in kondukcijske normalizacije. Pri indukcijski normalizaciji je bila frekvenca 40 kHz, kar ni bila najboljša rešitev, saj je segala normalizirana struktura le do globine 2-3 mm. Pri kondukcijskem načinu smo imeli težave, ker se nam je obroč pregrel na mestu zvara, kar je povzročilo prenizko žilavost, velikost zrn pa je bila od 2 do 5 po ASTM in obroč za zobate vence je bil le delno normaliziran. Na **sliki 3** so zbrani podatki, kako se je spreminjala žilavost pri različnih tehnoloških postopkih.

Analizirali smo tudi mikrostrukturo vzorcev, ki smo jo dobili pri različnih tehnoloških parametrih. S preizkusi smo hoteli ugotoviti optimalno temperaturo normalizacije v temperaturnem območju od 890 do 970 °C. Ugotovili smo, da smo dosegli optimalno mikrostrukturo vzorca, ki je bil normaliziran pri temperaturi 890 °C.

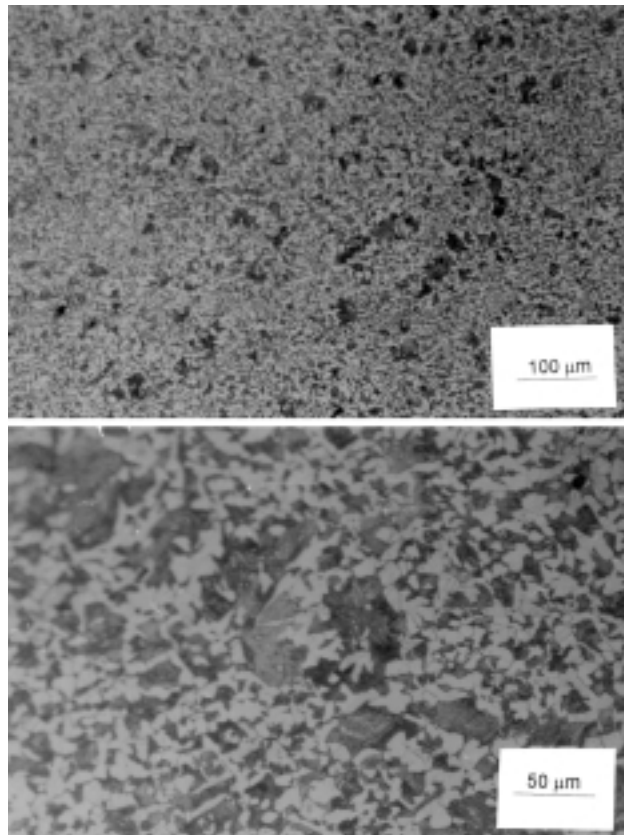


Slika 3: Analiza žilavosti pri različnih postopkih obdelave

Figure 3: Analysis of toughness at various machining processes

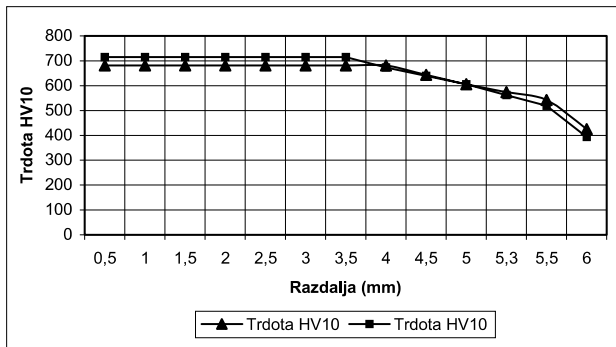
Analiza mikrostrukture zobatih vencev je bila narejena na prečnem prerezu zoba. Na mestu, kjer bo izdelan zob, smo ugotovili v globini 2 mm normalizirano mikrostrukturo zrn lamelnega perlita in ferita z velikostjo zrn 8-10 ASTM E112. Posamezna perlitna zrna so za oceno 5 po ASTM E112 in so prikazana na **sliki 4**.

Potek trdot na bočnih površinah na indukcijsko kaljenem zobatem vencu je razvidna s **slike 5** in odmik dimenzij notranjega premera obroča pred kaljenjem in

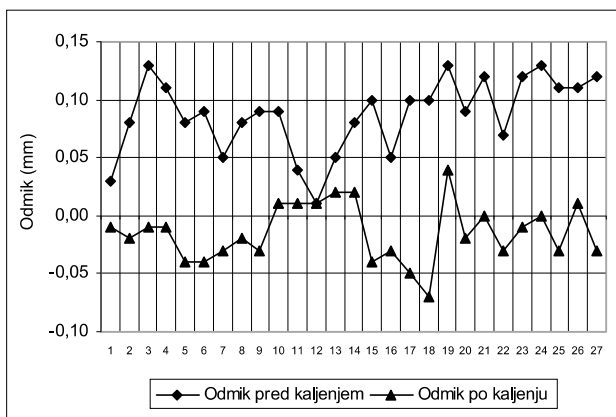


Slika 4: Vzorec, normaliziran na 890 °C - povečava: 100-krat in 200-krat

Figure 4: Specimen normalized to 890°C - magnification: 100x and 200x



Slika 5: Analiza trdot indukcijsko kaljenega venca na bočnih straneh
Figure 5: Analysis of hardnesses for an induction hardened rim on sides



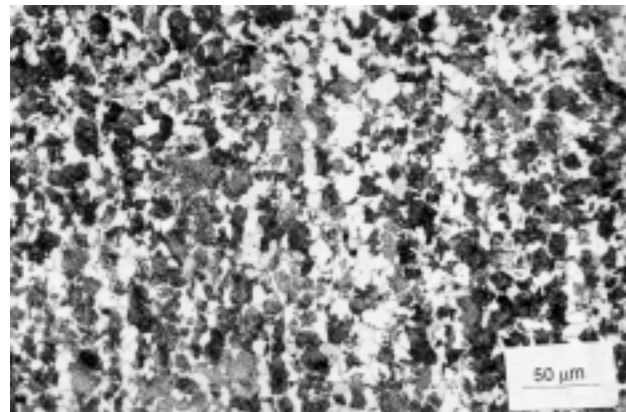
Slika 6: Analiza odmikov dimenzij notranjega premera zobatega venca pred kaljenjem in po njem
Figure 6: Analysis of dimensional deviations for inner diameter of a gear rim - before and after induction hardening

po njem je prikazano na **sliki 6**. Premer vzorcev je bil 264 mm.

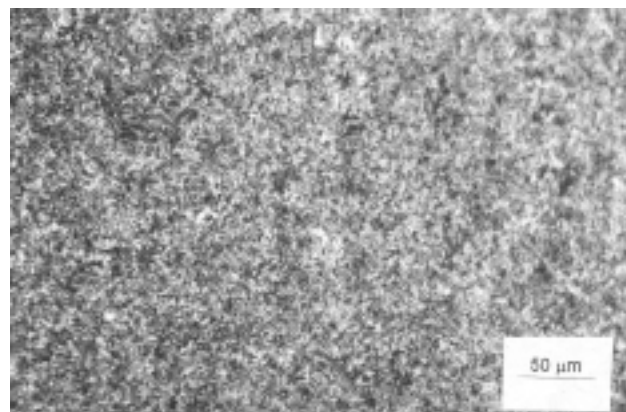
Meritve notranjega premera obroča so pokazale, da se bistveno zmanjša odmik notranjega premera pri pravilni uporabi indukcijske normalizacije po kaljenju in je v mejah, ki so predpisane za izdelek.

V nadaljevanju smo analizirali tudi vpliv zaostale toplote na popuščne učinke. Zobate vence smo popuščali pri temperaturah 240 in 280 °C. Analiza trdot indukcijsko kaljenega zobatega venca, popuščanega iz zaostale toplote indukcijskega ogrevanja, je prikazana na **sliki 7**. Mikrostruktura kaljenega venca in vencev, popuščanih iz zaostale toplote, pri dveh različnih temperaturah pa je podana na slikah 8 in 9.

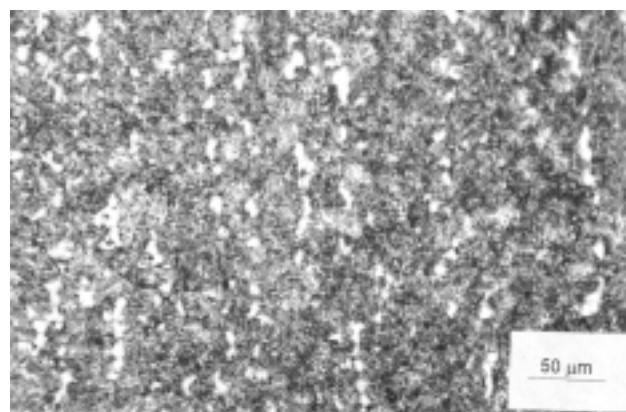
Vzorec, prikazan na **sliki 7**, je bil induktivno kaljen pri temperaturi 920 °C do globine 4,5 mm, kjer je čista martenzitna struktura z zrnom 6-8 ASTM 112. Posamezna zrna imajo velikost 5 in je prikazana na **sliki 7**, nato sledi 2 mm široka prehodna cona z mikrostrukturo martenzit-ferit, ki postopoma preide v osnovno normalizirano feritno perlitno mikrostrukturo z zrnom velikosti 8-10 ASTM E112.



Slika 7: Mikrostruktura kaljenega zobatega venca na zobu pri 200-kratni povečavi
Figure 7: Microstructure of a hardened gear rim tooth at 200x magnification

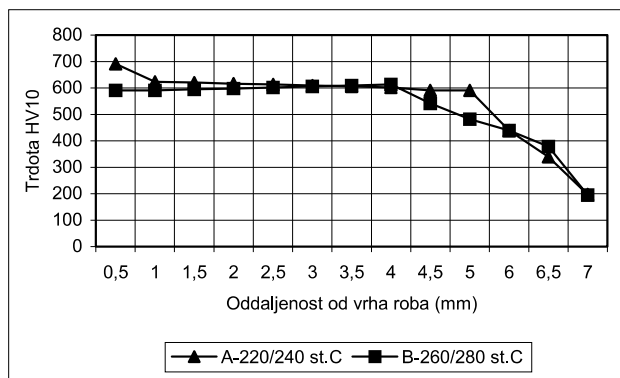


Slika 8: Vzorec kaljen in popuščen na 240 °C. Povečava: 200-krat
Figure 8: Specimen hardened and tempered to 240 °C. Magnification: 200x



Slika 9: Vzorec kaljen in popuščen na 280 °C. Povečava: 200-krat
Figure 9: Rim. hardened and tempered to 280 °C. Magnification: 200x

Skupina vencev je bila kaljena po enaki tehnologiji, kot je opisana pri sliki 7, s tem da so bili popuščani z zaostalo toploto, ki je bila še v obroču. Obrus je bil izdelan po sredini zoba. Bok zoba ima do globine 4,4



Slika 10: Analiza trdot zobatih vencev po kaljenju in popuščanju iz zaostale toplote

Figure 10: Analysis of gear rim hardness after hardening and tempering from residual heat

mm popuščni martenzit z zrnem 6-8 ASTM112 in posameznimi zrni z oceno 5, **slika 8**. Sledi 2 mm široka prehodna cona z martenzit-feritno mikrostrukturo, ki preide v normalizirano feritno perlitno mikrostrukturo. Vzorec (**slika 9**) je bil popuščan pri temperaturi 280 °C.

4 DISKUSIJA

Na osnovi preizkusov pri morebitnih dobaviteljih opreme in laboratorijski obdelavi vzorcev smo spoznali, da je možno zobate vence induktivno v celoti normalizirati v času takta predhodnih tehnoloških operacij. Čas normalizacije je možno izvesti v 12 do 15 sekundah pri temperaturi 890 °C. V predvidenem proizvodnem ritmu je možno izvesti indukcijsko kaljenje in izkoristiti učinek zaostale toplote v obroču za fazo popuščanja. Dobljene tehnološke parametre smo vključili v program za vodenje indukcijskega stroja za fazo normalizacije in kaljenja zobatih vencev.

Zaradi prevelikega razstroja rezultatov predhodnih analiz bo treba pred dokončno verifikacijo tehnologije za proizvodnjo 3 mio obročev še dodatno raziskati: strukturo zvara in ugotoviti vse možne vzroke notranjih napak v njem, optimirati tehnologijo toplotne obdelave glede na željeno strukturo in mehanske lastnosti zobatega vena za proizvodni ritem 12 sekund. Dodatno bo treba analizirati vplive, strukturo, mehanske lastnosti indukcijsko normaliziranega in kalibriranega obroča v vročem

stanju pri proizvodnem ritmu 12 sekund, in to na postavljeni proizvodni liniji za izdelavo zobatih vencev.

5 SKLEPI

Z realizacijo razvojnega projekta smo ugotovili, da je možno izboljšati tehnološki proces izdelave zobatih vencev. Izboljšave so naslednje:

- Dosegla se je zanesljivost varjenja obročev.
- Induktivno segrevanje in kalibracijo obroča v vročem je možno doseči v proizvodnem taktu delovanja tehnološke linije.
- Možna je avtomatizacija celotnega tehnološkega procesa: faza normalizacije, kalibriranja, induktivnega kaljenja ter popuščanja iz zaostale toplote in postopek mehanske obdelave obroča.
- Določili smo parametre za izbor indukcijskega stroja za normalizacijo in indukcijsko kaljenje.
- Avtomatizacija in robotizacija proizvodne linije poveča natančnost izdelave, omogoča ponovljivost, povečuje zanesljivost merjenja in zagotovi se popolna kontrola in statistična obdelava izmerjenih podatkov.
- Možno je znižati proizvodne stroške in doseči pričakovano kakovost izdelkov. Pri letni proizvodnji 1,9 mio zobatih vencev bi bil prihranek 22,8 mio SIT, pri proizvodnji 3,0 mio zobatih vencev na leto pa 40 mio SIT.

6 LITERATURA

- ¹ Günter Benkovsky: Induktionserwärmung-Härten, Glühen, Schmelzen, Löten, Schweißen, VEB Verlag Technik, Berlin 1980, 276
- ² Hoffmann, G.: Die Induktive Erwärmung und ihre Einsatzmöglichkeit in der Industrie. Fertigungstechnik 8 (1956) 12, 552-559
- ³ Jabbusch, G.: Unerwünschte Vervormungen beim HF-Oberflächenhärten. BBC-Nachrichten (1961), Julij/Avgust, 483-488
- ⁴ Höchne, E.: Oberflächenhärten von Zahnrädern. VDI, Zeitschrift 100 (1958) 6
- ⁵ Scheffler, F.: Induktionserwärmung für das Warmformen. AEG-Mitt 46 (1956) 9/10, 292-297
- ⁶ VDI-Richtlinie 3132, Induktives Erwärmen für das Warmumformen
- ⁷ Hans-Joachim Eckstein: Technologie der Wärmebehandlung von Stahl, VEB Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Berlin 1976, 170-183