

TEHNOLOGIJA TOPLEGA STISKANJA JEKLENIH PRAHOV IN LASTNOSTI SINTRANIH JEKLENIH IZDELKOV

THE WARM COMPACTION OF IRON-BASED POWDERS AND THE PROPERTIES OF SINTERED STEEL PRODUCTS

**Borivoj Šuštaršič¹, Matjaž Torkar¹, Branislav Glogovac¹, Anton Jaklič¹,
Matjaž Godec¹, Bojan Arzenšek¹, Dušan Pelc², Milan Jelenko², Darko Dujmovič²,
Jože Medved³**

¹IMT, Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija

²UNIOR, Kovaška industrija, Zreče, Slovenija

³NTF, Univerza Ljubljana, Slovenija
borivoj.sustarsic@imt.si

Prejem rokopisa - received: 2000-02-10; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-03-10

Podjetje UNIOR iz Zreč je edini slovenski proizvajalec sintranih jeklenih delov, namenjenih predvsem avtomobilski industriji. V zahtevnejšem in višjem cenovnem razredu te vrste izdelkov se vedno pogosteje pojavljajo zahteve po nadaljnjem izboljšanju njihovih mehanskih lastnosti ali dodatni površinski zaščiti. Oboje je možno predvsem z nadaljnjim zmanjšanjem poroznosti izdelkov in povečanjem deleža duktilnega preloma. Zato so se v tovarni odločili, da v sodelovanju z IMT iz Ljubljane osvojijo tehnologijo avtomatskega, toplega (100-150 °C), enosnega stiskanja kovinskih prahov v jeklenih orodjih. Čeprav so osnovni principi postopka poznani že dolgo, se je ta tehnologija pričela uveljavljati v svetu šele v zadnjem desetletju.

V prispevku so predstavljeni laboratorijski in industrijski preizkusi ter preiskave, vezane na osvajanje tehnologije toplega stiskanja izbranega jeklenega prahu. Predstavljene so njegove morfološke in inženirske lastnosti ter njegovo vedenje med stiskanjem pri povišanih temperaturah. Podana je primerjava mikrostrukturnih in mehanskih lastnosti hladno in toplo stisnjene/sintrane jeklene izdelka (zapornega mehanizma servo volana).

Ključne besede: jekleni prahovi, toplo stiskanje, laboratorijski in industrijski preizkusi

UNIOR, Zreče, Slovenia, is the only producer of sintered steel parts designed for the automotive industry. These materials require constant improvement to their mechanical properties or the implementation of additional surface protection. This can be achieved by reducing the porosity of the sintered steel parts and by increasing their effective bearing cross-section. For this reason the automatic, uni-axial, warm compaction of steel powders in steel dies has been developed. Although the basic principles of this technology have been known for a long time and are well understood, it has only become an established technology in the last decade.

Laboratory and industrial experiments of the warm compaction of selected Fe-based powder mixtures are presented and discussed. A comparison between the microstructural and mechanical properties of a cold and warm compacted/sintered steel product (safety locker of a steering wheel) is given.

Key words: steel powders, warm compaction, laboratory and industrial experiments

1 UVOD

Podjetje UNIOR iz Zreč je edini slovenski proizvajalec sintranih jeklenih delov, namenjenih predvsem avtomobilski industriji. V zahtevnejšem in višjem cenovnem razredu te vrste izdelkov se stalno pojavljajo zahteve po izboljšanju njihovih mehanskih lastnosti ali njihovi dodatni površinski zaščiti. Velikoserijska proizvodnja sintranih jeklenih izdelkov temelji na hladnem stiskanju prašnih mešanic na čim višjo zeleno gostoto. Pri avtomatskem, enosnem, hladnem stiskanju prahu na osnovi Fe v jeklenem orodju so potrebni tlaki stiskanja 600-800 MPa, če želimo doseči normalne zelene gostote surovcev (6,9-7,1 g/cm³). Povečanje zelene gostote na 7,3-7,5 g/cm³ ter s tem nadaljnje izboljšanje statičnih in dinamičnih mehanskih lastnosti sintranih izdelkov z zaprto poroznostjo zahteva izredno povečanje delovnih tlakov stiskanja (>900 MPa), kar močno poslabša vzdržljivost orodij ter poveča nevarnost

njihovega zloma. Poleg posebnih in zato dragih postopkov "popolnega" zgoščevanja (dvakratno sintranje, kovanje itd.) kovinskih prahov je za velikoserijsko proizvodnjo manjših (1-100 g) sintranih jeklenih izdelkov zahtevnih oblik najbolj obetaven postopek toplega stiskanja. Ta se v osnovi razlikuje od konvencionalnega hladnega stiskanja le v tem, da kovinski prah in orodje segrejemo na 100-150 °C. Kot je znano¹ se v tem temperaturnem območju najbolj zmanjša napetost tečenja jekla, kar bistveno izboljša stisljivost prašne mešanice. Tako se pri še sprejemljivih tlakih stiskanja doseže pričakovano povečanje zelene in sintrane gostote.

Čeprav so osnovni principi avtomatskega, toplega, enosnega stiskanja kovinskih prahov v jeklenih orodjih poznani že dolgo¹, se je ta tehnologija pričela uveljavljati v svetu šele v zadnjem desetletju²⁻⁵. Zato so se tudi v tovarni Unior iz Zreč odločili, da v sodelovanju z IMT iz Ljubljane osvojijo to perspektivno tehnologijo, ki omogoča izdelavo sintranih izdelkov višjega cenovnega

razreda. RR fazo projekta je v okviru subvencij gospodarstvu finančno podprlo tudi MZT Slovenije⁶.

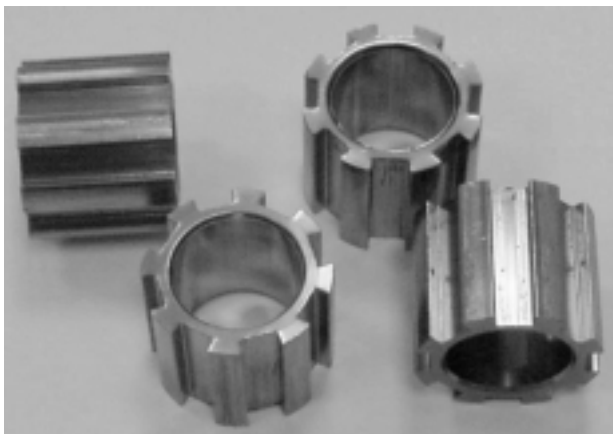
V prispevku so predstavljeni laboratorijski in industrijski preizkusi ter preiskave, vezane na osvajanje tehnologije toplega stiskanja izbranega jeklenega prahu. Predstavljene so njegove morfološke in inženirske lastnosti ter vedenje med stiskanjem pri povišanih temperaturah. Podana je primerjava mikrostrukturnih in mehanskih lastnosti hladno in toplo stisnjene/sintranega jeklenega izdelka (zapornega mehanizma servo volana, **slika 1**).

2 PRAKTIČNO DELO

RR-del projekta smo razdelili v tri faze. V okviru 1. faze smo pregledali obstoječo literaturo s področja toplega stiskanja, osvojili postopek določitve deleža duktilnega preloma, analizirali vzroke za prehitro odpoved orodij za stiskanje jeklenih prahov, izvedli fizikalno-kemijsko karakterizacijo izbranega jeklenega prahu in izvedli prilagoditev industrijske stiskalnice za postopek toplega stiskanja. V ta namen smo nabavili in delno sami izdelali ogrevalni sistem za prah in orodje. V 2. fazi projekta smo analizirali proces odžiga maziva, izvedli toplotno tehnične meritve na sinter peči in izvajali preizkuse toplega stiskanja. V zadnji fazi projekta smo izvedli preizkuse sintranja toplo stisnjenih surovcev, mikrostrukturno in mehansko karakterizirali toplo stisnjene surovce in sintrance ter na osnovi dobljenih rezultatov analizirali uspešnost osvajanja postopka.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Da bi lahko mikrostrukturno in mehansko ovrednotili lastnosti toplo stisnjenih jeklenih izdelkov, smo najprej morali osvojiti metodo določevanja deleža duktilnega



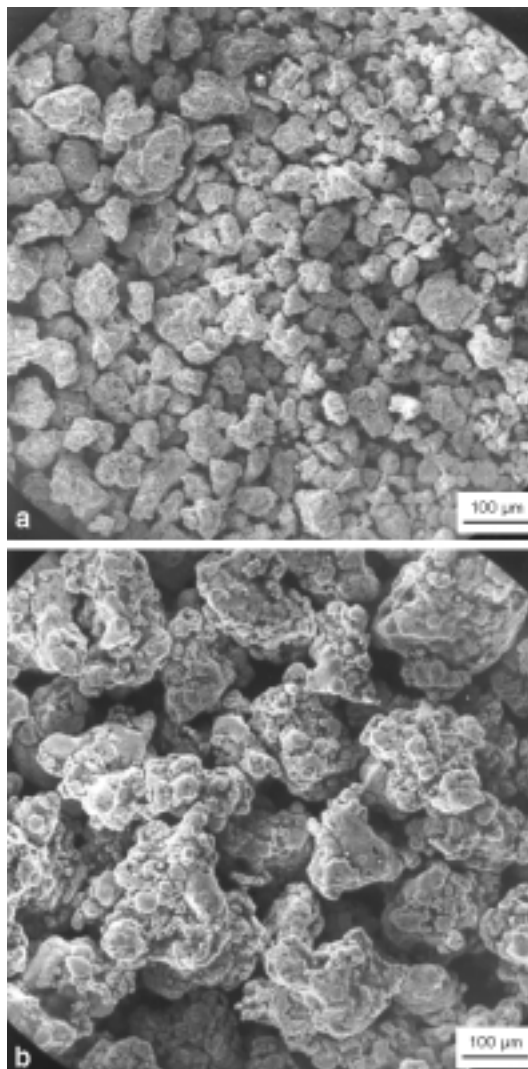
Slika 1: Surovi izdelki (zaporni mehanizem servo volana), stisnjeni v tovarni Unior Zreče na mehanski stiskalnici, prirejeni za toplo stiskanje jeklenega prahu Densmix

Figure 1: Green compacts of a steel product (safety locker of a steering wheel), compacted with the mechanical press adapted for warm pressing (Unior, Zreče factory, Slovenia)

preloma sintranih jeklenih izdelkov z avtomatsko analizo slike SEM-posnetkov prelomov⁷⁻⁸. Osvojena metoda je postala standardna analitska metoda metalografskega laboratorija IMT iz Ljubljane, za ovrednotenje lastnosti PM izdelkov različnih proizvajalcev.

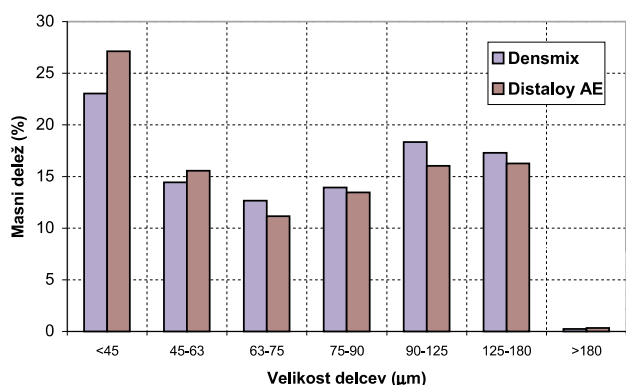
Analiza vzrokov za prehitro odpoved orodij za stiskanje jeklenih prahov je pokazala, da je glavni vzrok njihova neprimerna mehanska in toplotna obdelava, o čemer smo že obširno poročali⁹⁻¹⁰. Vse ugotovitve so bile upoštevane pri izdelavi orodja za toplo stiskanje. Z izdelanim orodjem med samimi preizkusi ni bilo večjih težav. Potrebne so bile le dodatne korekcije zaradi različnih dilatacij posameznih delov orodja.

Za preizkuse toplega stiskanja smo uporabili tržno dosegljivi jekleni prah, legiran s 4-5% Ni, 1,5-2% Cu in 0,5% Mo, švedskega proizvajalca Höganäs, ki se v



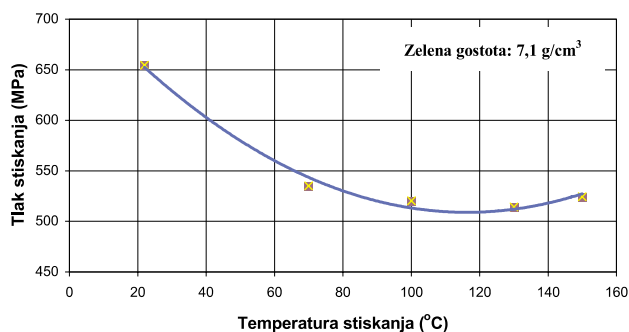
Slika 2: SEM posnetka komercialnega jeklenega prahu vrste Densmix (Höganäs, Švedska), posebej pripravljenega za enoosno toplo stiskanje v jeklenem orodju; **a**) pri 60- in **b**) pri 200-kratni izvorni povečavi

Figure 2: SEM micrograph of a commercial steel powder Densmix (Höganäs, Sweden), appropriate for uni-axial warm compaction in a steel die; original magnification **a**) 60 x and **b**) 200 x



Slika 3: Sejalna analiza komercialnih (Höganäs, Švedska) jeklenih prahov, uporabljenih za preizkuse hladnega (Distaloy AE) in toplega (Densmix) enoosnega stiskanja

Figure 3: Sieving analyses of commercial (Höganäs, Sweden) steel powders, used for cold (Distaloy AE) and warm (Densmix) compaction



Slika 4: Stisljivost komercialnega jeklenega prahu Densmix v odvisnosti od temperature stiskanja za izbrano zeleno gostoto. Powder Testing Center, Model PTC-03DT

Figure 4: Compressibility curve of commercial steel powder (Densmix, Höganäs, Sweden), used for warm compaction, determined at elevated temperatures with a Powder Testing Center, Model PTC-03DT

tovarni Unior tudi sicer največ uporablja. Vsebnost ogljika (0,3-0,35%) v jeklu oziroma prašni mešanici reguliramo z dodatkom grafita. Za hladno stiskanje se navadno uporablja jekleni prah te sestave s tržno oznako Distaloy AE. Ta prah se od tistega (Densmix), ki je posebej pripravljen za toplo stiskanje, razlikuje predvsem po vrsti dodanega maziva. Najprej smo fizikalno-kemijsko in mikrostrukturno karakterizirali izbrane jeklene prahove. Z njihovim poznanjem smo lažje obvladovali industrijske preizkuse toplega stiskanja. Na **slikah 2 a in b** ter **3** so prikazane osnovne morfološke značilnosti jeklenega prahu (velikost in oblika delcev), uporabljenega med preizkusi toplega stiskanja.

Poleg drugih inženirskih lastnosti prahu (tekočnost, nasipna gostota, nasipni kot, trenje na stenah z orodjem, kohezivnost itd.)¹¹ je za tehnologa, ki razvija in osvaja tehnologijo toplega stiskanja, najbolj pomembna stisljivost prahu. To smo določili na avtomatizirani napravi¹² za določevanje glavnih inženirskih lastnosti prahov, ki omogoča določevanje stisljivosti pri povišanih temperaturah (25-300 °C). Na **sliki 4** je prikazana stisljivost komercialnega jeklenega prahu Densmix v odvisnosti od temperature stiskanja za izbrano zeleno gostoto. Vidimo, da je optimalna temperatura stiskanja ugotovljena s to laboratorijsko napravo približno 120 °C, ko je tlak, potreben za želeno zgostitev, najmanjši.

DTA/TG-preiskave prahov so pokazale⁶, da poteka pri obeh jeklenih prahovih odžig maziva relativno enakomerno v temperaturnem intervalu med 210 in 480 °C. Glavnina procesa je končana že do približno 300 °C, kar je dokaj ugodno.

Toplotno tehnične meritve na peči za sintranje so bile osnova za spoznavanje industrijskega postopka in izdelavo predlogov za njegovo optimiranje. Potek meritev in rezultati so razvidni s posnetkov, podanih na **slikah 5 in 6**. Iz izmerjenih temperaturnih profilov (**slika**



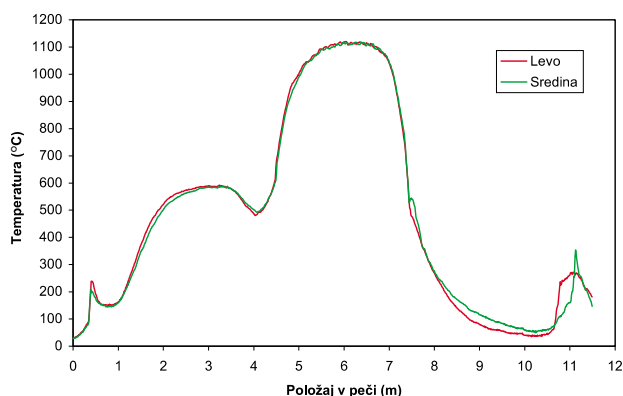
a)



b)

Slika 5: a) Vstop v peč za sintranje in namestitvev oziroma razporeditev termoelementov na transportnem traku ter b) uporabljena merilna oprema med merjenjem temperaturnih profilov na peči za sintranje

Figure 5: a) Sintering furnace entrance and set up of thermocouples on the furnace mesh-belt, and b) measuring equipment used during measurement of temperature profile in sintering furnace



Slika 6: Izmerjeni temperaturni profil glede na položaj v peči

Figure 6: Measured temperature profiles of sintering process in terms of position in the furnace

6) lahko dobro vidimo posamezna področja v sinter peči: cono odžiga maziva, cono sintranja in cono ohlajanja. Dobro je viden tudi prehod iz cone odžiga maziva v cono sintranja, kjer temperatura rahlo pade v prehodu, kjer ni grelcev. Takšen padec temperature je nezaželen in ga bi bilo treba odpraviti z dodatno toplotno izolacijo.

Meritve temperaturnega profila v peči so pokazale izrazito hiter dvig temperature na začetku in koncu peči (slika 6), ko sta termoelementa potovala skozi zaščitni plamen, kjer zgorevata prebitni H_2 in CO iz endo plina. Vzrok za to je slabo delovanje plamenskih zapor. Posledica pa je dokaj velika razlika trdote sintranih izdelkov po njihovi višini, ki smo jo ugotovili med mehanskimi preiskavami.

Za doseganje želenih mehanskih lastnosti je zelo pomembna tudi hitrost ohlajanja s temperature sintranja.

V temperaturnem območju 900-600 °C je bila izmerjena hitrost $\approx 90-100$ °C/min. oziroma 1,5-1,7 °C/sekundo. Celotna povprečna hitrost ohlajanja pa ≈ 35 °C/min., oziroma 0,6 °C/s. Izmerjene hitrosti ohlajanja so nekoliko premajhne za doseganje izrazitejših "kalilnih" učinkov med ohlajanjem (4-7 °C/s), ki pa jih z obstoječo konstrukcijo peči ni možno bistveno povečati.

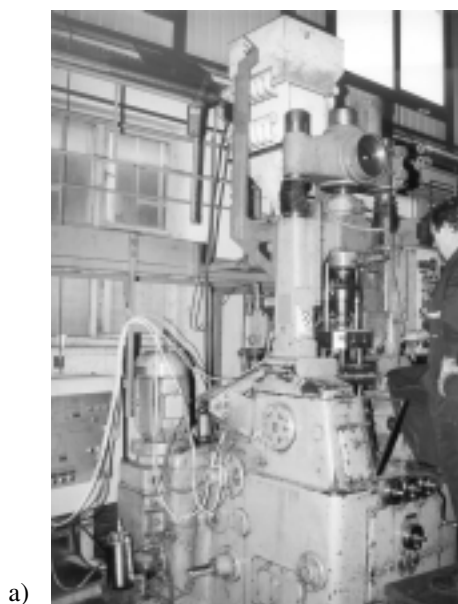
V najpomembnejši fazi projekta smo izvajali sistematične industrijske preizkuse toplega stiskanja izbranega prahu v temperaturnem območju med 20 in 150 °C. V ta namen smo med trajanjem projekta nabavili ogrevalno regulacijsko opremo za ogrevanje zalogovnika, v katerem se je nahajal jekleni prah. V tovarni Unior pa je bil izdelan ogrevalni sistem za električno uporovno ogrevanje polnilnega čevlja, zgornjega pestiča in matrične plošče. Celoten sistem je bil nameščen najprej na starejšo 600 kN mehansko stiskalnico (Dorst, Nemčija; **sliki 7 a in b**), kasneje pa tudi na novo 500 kN računalniško krmiljeno stiskalnico Dorst TPA 50 t.

Z laboratorijskimi preizkusi stisljivosti smo ugotovili, da lahko odvisnost med tlakom stiskanja p in povprečno zeleno gostoto surovca ρ_z zapišemo z naslednjima empiričnima enačbama polinomske oblike:

$$\rho_z = 3,4026 + 0,1822 \cdot \sqrt{p} - 0,0014 \cdot p; \text{ pri } 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\rho_z = 3,3675 + 0,20598 \cdot \sqrt{p} - 0,0019 \cdot p; \text{ pri } 150 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Iz **enačb (1) in (2)** lahko izračunamo potreben tlak stiskanja oziroma zeleno gostoto za izbrani tlak stiskanja. Izračunane zelene gostote se zelo dobro ujemajo s praktično doseženimi gostotami surovcev pri tlakih stiskanja, ki so bili uporabljani na novi industrijski



a)



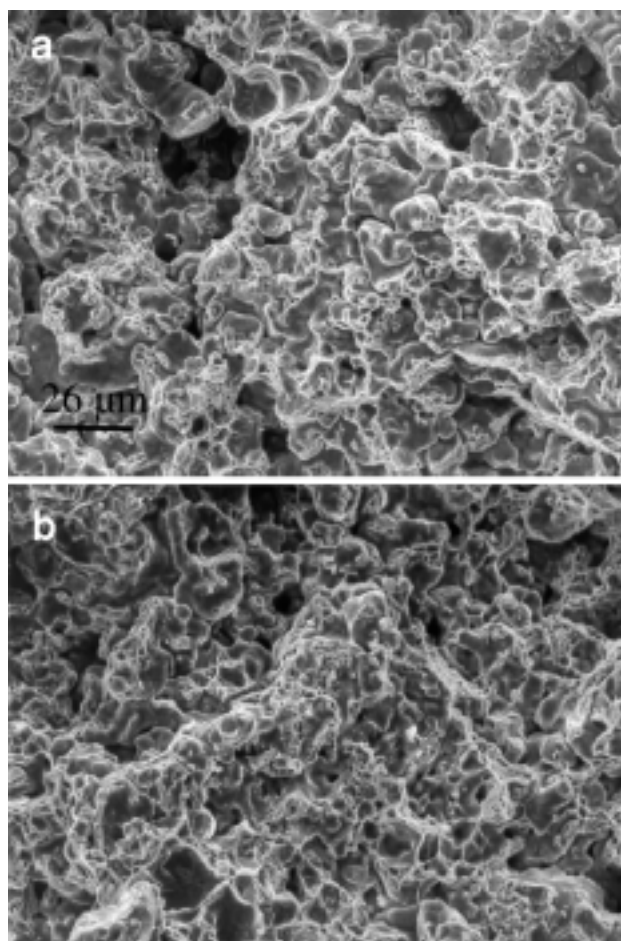
b)

Slika 7: a) Fotografski posnetek starejše 600 kN mehanske stiskalnice Dorst z nameščenim ogrevalnim sistemom, ki je omogočal industrijske preizkuse toplega stiskanja in **b)** posnetek toplega stiskanja z dobro vidno izvedbo ogrevanja zgornjega pestiča in polnilnega čevlja (detajl med polnjenjem orodja)

Figure 7: a) snap-shot of older 600 kN Dorst (Germany) mechanical press with powder slot heater enabling industrial experiments of warm compaction and **b)** snap-shot of warm compaction with clearly visible construction of upper-punch heating (detail of powder filling position)

stiskalnici. Preiskave so nam pokazale, da so sile, potrebne za doseganje bistveno višje zelene gostote (7,3-7,4 g/cm³), med toplim stiskanjem praktično enake silam stiskanja med hladnim stiskanjem za doseg zelene gostote 6,95-7,05 g/cm³. Največja dosežena (izmerjena) zelena gostota med preizkusi toplega stiskanja je bila celo 7,5 g/cm³, kar je približno 99% teoretične gostote.

Po sintranju v starejši industrijski kontinuirni tračni peči (Safed, Delemont, Švica, **slika 5**) pri standardnih temperaturnih in atmosferskih razmerah (1120 °C v endo-plinu) smo vzorce sintrancev mikrostrukturno in mehansko karakterizirali. Mikrostrukturna karakterizacija je poleg metalografskega pregleda pod optičnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) obsegala tudi določitev deleža duktilnega in krhkega loma na SEM-posnetkih prelomnih površin, ki smo jih dobili po poružitvi izdelka zaradi mehanskega utiskovanja trna



Slika 8: Posnetek prelomne površine: **a)** hladno stisnjene in sintranega (delež duktilnega preloma 30 %) ter **b)** toplo stisnjene in sintranega vzorca (delež duktilnega preloma 41 %), SEM, originalna povečava: 390-krat

Figure 8: SEM micrograph of fractured surface: **a)** cold compacted and sintered (effective bearing cross-section 30 %) and **b)** warm compacted and sintered sample (effective bearing cross-section 41 %), original magnification: 390 x

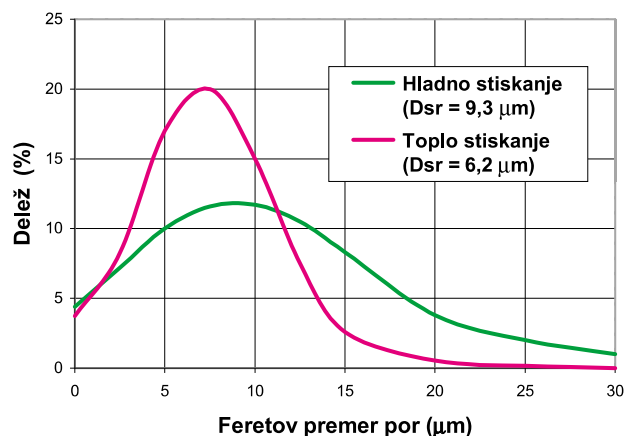
predpisanih oblik in dimenzij v luknjo sintranega izdelka.

Rezultati mikrostrukturnih in mehanskih analiz so pokazali, da smo s toplim stiskanjem zaradi večje zelene in sintrane gostote močno povečali delež notranje povezanosti oziroma duktilnega loma. Pri hladno stisnjenih vzorcih se le-ta giblje med 20% in 33% (**slika 8 a**), medtem ko je bil pri optimalno toplo stisnjenih vzorcih med 40% in 50% (**slika 8 b**).

Z avtomatsko analizo slike smo določili tudi velikostno porazdelitev por pri toplo in hladno stisnjenih vzorcih. Iz mikrostrukturnih posnetkov poliranih/jedkanih vzorcev ter določene velikostne porazdelitve por (**slika 9**) je jasno razvidno, da imajo toplo stisnjeni vzorci ožjo velikostno porazdelitev por, manjšo povprečno velikost por in manjši delež velikih por, kar vse vpliva na izboljšanje mehanskih lastnosti sintranega izdelka. Zato se je tudi povečala trdota in radialna porušna trdnost izdelkov. Spremenil se je tudi način poružitve izdelkov med obremenjevanjem. Hladno stisnjeni in sintrani vzorci so se zlomili tako, da je razpoka potekala samo vzdolž izdelka (**slika 10 a**), medtem ko so toplo stisnjeni vzorci dajali mnogo večji odpor proti deformaciji in zlomu (**slika 10 b**) ter je razpoka potekala tudi prečno (cik-cak).

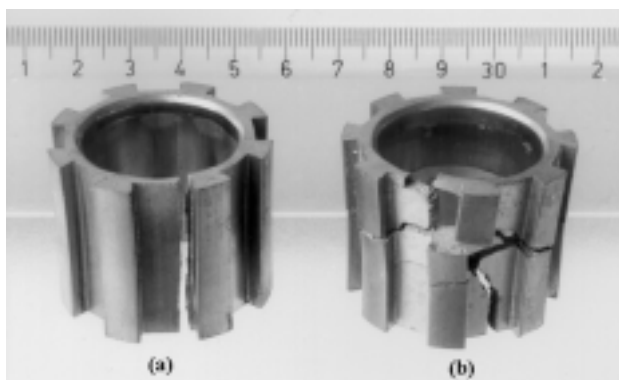
Poleg duktilnega loma se je na sintranih vzorcih pojavljala tudi manjši delež krhkega loma (glejte **sliki 8 a** in **b**). Ker se je le ta pojavljala nesistematično, vzroka za njegov nastanek ne gre iskati v pogojih stiskanja in doseženi stopnji zgostitve temveč drugje (neenakomerna mešanica, segregiran grafit, različni pogoji sintranja po kanalu peči itd.). Dejanske vzroke za njegov nastanek bo treba še ugotoviti z nadaljnjimi sistematičnimi mikroanalizami preloma.

Vsebnost C v sintranih vzorcih je bila praktično v vseh primerih nad predpisano zgornjo mejo. Korekcijo lahko izvedemo z zmanjšanjem dodatka grafita ali



Slika 9: Primerjava velikostne porazdelitve por pri hladnem in toplim stiskanju (dobljeno z avtomatsko analizo metalografskih posnetkov sintranega vzorca)

Figure 9: Comparison of pore size distribution of cold or warm compacted and subsequently sintered samples (automatic image analysis of polished metallographic specimens)



Slika 10: Način loma sintranih vzorcev med utiskovanjem trna: a) hladno stisnjen vzorec in b) toplo stisnjen vzorec

Figure 10: Fracture mode of sintered samples obtained during in-pressing of a steel cone-shaped piston into the product bore a) cold pressed/sintered and b) warm pressed/sintered sample

regulacijo razmerij CO/CO_2 in H_2/H_2O v peči, ki pa jih žal ni bilo mogoče kontrolirati ter s tem ustrezno nadzirati proces sintranja. Z nabavo nove moderne računalniško vodene peči je merjenje temperature rosišča endo-plina rešeno, saj je v sklopu peči tudi naprava za avtomatsko merjenje parcialnega tlaka kisika v varovalnem plinu.

Kontrolne meritve dimenzij sintranih vzorcev so pokazale tudi zmanjšanje notranjega premera izdelka. Dimenzijske spremembe zaradi večje zelene/sintranega gostote bo zato nujno potrebno upoštevati pri izdelavi novih orodij.

4 SKLEPI

Mehanske in mikrostrukturne preiskave so pokazale, da smo s postopkom toplega stiskanja bistveno povečali delež duktilnega preloma sintranih izdelkov in s tem tudi njihove mehanske lastnosti. Najboljše mehanske lastnosti smo dosegli pri vzorcih, ki so bili v industrijskih razmerah toplo stisnjeni pri 110 °C. Ti so imeli tudi najvišjo zeleno gostoto ($>7,3 \text{ g/cm}^3$). Na osnovi laboratorijskih in industrijskih preizkusov smo tako ugotovili, da so v naših razmerah optimalne temperature stiskanja med 110 in 120 °C, kar je nekoliko nižje kot poroča oziroma priporoča tuja literatura (130-140 °C). Vzrok za to lahko iščemo v okoliščinah merjenja temperature. Med našimi preizkusi smo temperaturo merili neposredno v dozirni cevi pred vstopom v polnilni čevelj, medtem ko v literaturi poročajo o temperaturi prahu, ki je merjena v zalogovniku oziroma temperaturi olja, ki posredno ogreva prah v zalogovniku. Naše ugotovitve, dobljene med industrijskimi preizkusi toplega stiskanja, se tudi dobro ujemajo z laboratorijskimi preiskavami (slika 4). Potrditev, da je s preizkusi ugotovljena temperatura res optimalna, bi lahko dosegli tudi z izvedbo mehanskih preizkusov (določitev napetosti tečenja) pri povišanih temperaturah na

popolnoma zgoščenih vzorcih primerne (standardne) velikosti, ki pa jih je s postopki metalurgije prahov zelo težko izdelati.

V okviru projekta je bil praktično osvojen postopek toplega stiskanja, potrebne so le še manjše korekcije (kontrolirano hlajenje matrične plošče in adapterja) ter nadaljnje optimiranje postopka glede na specifičnosti posameznih sintranih izdelkov, ki se bodo stiskali na ta način.

Zahvala

Avtorji prispevka se zahvaljujejo Ministrstvu za znanost in tehnologijo, Republike Slovenije, ki je finančno podprlo RR-fazo projekta in s tem omogočilo začetek razvoja in uvajanja nove ter perspektivne tehnologije v obrat Sinter, tovarne Unior iz Zreče.

5 LITERATURA

- J. Tengzelius: Höhere Dichten durch Warmpressen, 16.-17. November 1995, Symposium in Hagen, Höganäs Iron Powder Information PM 95-2, 1-21
- U. Engström, B. Johansson: Production experience of warm compaction of Densmix powders, Proceedings of the PM²TEC'96 World Congress, June 16-21, Washington, D.C., ZDA, 2(1996)5, 181-192 in Höganäs Iron Powder Information PM 96-6, 1-12
- Owe Mårs: Dynamic properties of warm compacted high strength sintered steels, Proceedings of the PM²TEC'96 World Congress, June 16-21, Washington, D.C., ZDA, 2(1996)5, 171-180
- U. Engström, B. Johansson, J. Rasmus: Porosity and properties of warm compacted high strength sintered steels, Proceedings of the Powder Metallurgy World Congress, Granada, Spain, 2(1998)10, 21-26
- S.S. Laurent, F. Chagnon: Behaviour of steel powder mixes processed by warm compaction, Proceedings of the Powder Metallurgy World Congress, Granada, Spain, 2(1998)10, 27-32
- B. Šuštaršič, D. Pelc in drugi sodelavci: Osvajanje tehnologije toplega stiskanja sintranih jeklenih izdelkov, fazna poročila in zaključno poročilo IMT Ljubljana, Unior Zreče in MZT Slovenije (+ priloge) 61-2646, april 1999, 1-28
- M. Godec, B. Šuštaršič, M. Jenko: Določanje deleža duktilnega preloma sintranih jeklenih izdelkov, posterska predstavitev na 7. konferenci o materialih in tehnologijah, 13.-15. oktober 1999, Portorož, Slovenija, program konference 1999 in povzetki, 129
- M. Godec, B. Šuštaršič, M. Jenko: Determination of effective load-bearing cross-section of sintered steel products, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, New York, ZDA, in print
- B. Šuštaršič, V. Leskovšek: Merila za pravilno izbiro materialov in izdelavo orodij za stiskanje jeklenih prahov, Strojniški vestnik, Ljubljana, 44(1998)5-6, 195-200
- B. Šuštaršič, V. Leskovšek: Izboljšanje vzdržljivosti orodij za stiskanje jeklenih prahov, Materiali in geokolje, Ljubljana, 46(1999)1, 115-130
- B. Šuštaršič: Lastnosti kovinskih prahov, izdelanih z vodno atomizacijo, magistrsko delo, FNT, Univerza v Ljubljani, april 1993
- Karol Z. Korczak: Powder Testing Center, Model PTC-02DT-X in PTC-03DT, opis naprave ter navodila za upravljanje naprave pri določevanju inženirskih lastnosti kovinskih in keramičnih prahov, 1996, KZK Powder Technologies Corp., Cleveland, Ohio, ZDA