

## Procesi atomizacije kovinskih gradiv in konsolidacije kovinskih prahov—II. del

### Preparation of Metal Powders by Atomization and their Consolidation

B. Šuštaršič, M. Torkar, M. Jenko, B. Breskvar, F. Vodopivec, *Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, Ljubljana*

*Materiali izdelani na osnovi upraševanja kovinskih talin imajo v primerjavi s konvencionalnimi postopki vrsto prednosti, saj imajo lastnosti, ki jih prej praktično ni bilo mogoče doseči. Kot primer vzemimo hitroreznina in orodna jekla, super zlitine, itd. Dosežene lastnosti PM izdelkov so predvsem posledica hitrega strjevanja med postopkom izdelave prahu.*

*Na Inštitutu za Kovinske Materiale in Tehnologije (IMT) v Ljubljani smo laboratorij za metalurgijo prahov in hitro strjevanje opremili s pilotno napravo za vodno atomizacijo in napravo za ulivanje amorfnih in mikrokristaliničnih trakov. Ta oprema omogoča vključevanje IMT Ljubljana v razvojno raziskovalno delo na trenutno tudi v svetu zelo aktualnem področju priprave različnih vrst kovinskih materialov.*

*V preteklem obdobju smo imeli tako vrsto aktivnosti v okviru našega RR programa. V prvi fazi naloge smo izvršili relativno zahtevno namestitev in preizkusni zagon opreme. Pričeli smo tudi že s pripravo različnih vrst vodno atomiziranih prahov z namenom, da osvojimo tehnologijo postopka. V drugi fazi smo pričeli s sistematično pripravo prahov hitroreznega jekla in njihovega zgoščevanja. V tej fazi smo določili glavne vplivne parametre vodne atomizacije (še posebej tlaka vode) na lastnosti izdelanih prahov. Prav tako smo določili stisljivost prahov in vsebnost kisika v izdelanih vodno atomiziranih prahovih, tako v atomiziranem, kot tudi toplotno obdelanem stanju. Pričeli smo tudi s preizkusi priprave popolnoma zgoščenih PM preizkušancev iz domačih in tujih vzorcev vodno atomiziranih prahov tip M-2 in T-15.*

*Materials produced by powder metallurgy (PM) in comparison with those produced by conventional procedures have many advantages. The most important fact is that the PM materials (e.g.: tool steels, high speed steels, super alloys, etc.) have much better mechanical and other physical properties. Firstly these properties are the result of rapid solidification (RSTechnology) during the powder preparation.*

*The Institute of Metals and Technologies in Ljubljana has started up a new pilot water atomizer and new laboratory equipment (Melt-Spinner) for RST ribbons and powders preparation in the last two years. The equipment completed with other recently installed R&D equipment (furnace for vacuum heat treatment and equipment for hot isostatic pressing-HIP), made it possible to start R&D work at this new very actual field of material preparation.*

*Therefore we had many activities on this field in the last two years. In the first stage of our work we installed and started up the equipment. The purpose of our work on the preparation of different water atomized powders is to become acquainted with the technology of water atomization and to establish the applicability of water atomization for the preparation of different complex metal powders. In the second stage of our work we started systematically on the preparation of high speed steel powders and their consolidation. In this stage we determined the main influent parameters of water atomization on the properties of HSS M-2 type powder. We determined oxygen content in water atomized condition and also in heat treated (in vacuum or hydrogen) conditions. In this stage we determined CIP compressibility of water atomized and heat treated HSS powders. We started also with experiments to prepare full dense PM samples from HSS M-2 and T-15 types of water atomized powders.*

#### 1 Uvod

Materiali, izdelani na osnovi upraševanja kovinskih talin, imajo v primerjavi s konvencionalnimi postopki vrsto prednosti, saj imajo lastnosti, ki jih prej praktično ni bilo mogoče doseči<sup>1</sup>. Kot primer vzemimo hitroreznina jekla

izdelana po postopkih metalurgije prahov (PM), ki imajo izredno kemijsko homogeno in drobno znato mikrostrukturo z enakomerno porazdelitvijo drobnih karbidov pravilnih oblik. Takšna jekla so zato dimenzijsko stabilna med toplotno obdelavo in se tudi lažje mehansko obdelujejo. PM jekla imajo večje žilavosti pri ohranjeni ali celo višji trdoti

in so zato bolj odporna proti obrabi<sup>2</sup>. Najbolj pomembno pa je, da nekatere vrste materialov po postopkih konvencionalne metalurške prakse ni možno izdelati<sup>3</sup>. Naš končni cilj je osvajanje tehnologije izdelave različnih vrst zahtevnih kovinskih materialov (kot so na primer: hitroreznega jekla, super zlitine, psevdolitine itd.) v obliki palic ali lamel namenjenih za preizkuse ali nadaljno predelavo. S tem bi lahko postopno prenašali na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije v Ljubljani (IMT) osvojene tehnologije v redno proizvodnjo slovenskih železarn in drugih podjetij metalurške ali strojno predelovalne stroke. Ne smemo pa pozabiti, da se kovinski prahovi ne uporabljajo samo za zgoščevanje in s tem izdelavo PM izdelkov končnih oblik in lastnosti. Pogosto se namreč uporabljajo tudi neposredno, v svoji osnovni obliki, kot kovinski prah (dodatki barvam in črnilom, goriva, vžigala, eksplozivi, prahovi za navarjanje, spajkanje in lotanje, plamensko in plazemsko naprševanje itd.)<sup>1,4,5</sup>. Eno najpomembnejših področij neposredne uporabe kovinskih prahov je plamensko in plazemsko naprševanje oziroma nanašanje korozijsko ali obrabno obstojnih plasti. Postopek je razširjen na mnogih področjih, predvsem pa v avtomobilski industriji za navarjanje trdih, pri povišanih temperaturah obrabno odpornih plasti na sesalne in izpušne ventile (Stelliti oziroma zlitine na osnovi Co-Cr-Ni-W)<sup>6</sup>. Razvojno raziskovalno delo pri izdelavi kovinskih prahov naj bi omogočalo bodočim proizvajalcem prahov ali njihovim odjemalcem izbiro najboljše tehnologije izdelave oziroma vrste prahu.

Izdelava prahov s plinsko atomizacijo in njihova konsolidacija ima pred vodno atomizacijo sicer določene prednosti<sup>2</sup>, vendar je cenovno v celoti gledano mnogo dražja. Postopek vodne atomizacije omogoča tudi večje hitrosti ohlajanja in zato izdelavo specialnih zlitin, ki pa naj bi praviloma bile sestavljene iz elementov z nižjo afiniteto do kisika. V večini primerov so vodno atomizirani prahovi nepravilne oblike, zato se lažje stiskajo v kompaktno surovce in zgoščujejo s sintranjem ali vročim ekstrudiranjem. Plinsko atomizirani prahovi imajo delce krogljčne oblike in se običajno konsolidirajo neposredno z vročim izostatskim stiskanjem<sup>3</sup>.

## 2 Procesi atomizacije kovinskih gradiv

V drugi fazi naloge<sup>7</sup> smo osnovni opremi za vodno atomizacijo dogradili nagibno indukcijsko talilno peč. S tem smo lahko v nadaljevanju pristopili h sistematičnemu razvojno raziskovalnemu (RR) delu na področju izdelave kovinskih prahov z atomizacijo.

### 2.1 Osvajanje tehnologije izdelave prahov hitroreznih jekel z vodno atomizacijo

V okviru osvajanja tehnologije izdelave hitroreznih jekel po postopkih PM smo pričeli s sistematičnim ugotavljanjem vpliva procesnih parametrov vodne atomizacije na morfološke lastnosti izdelanih prahov. Poleg tega smo pričeli tudi z RR delom na pripravi prahov nekaterih posebnih zlitin (super zlitina NIMONIC 80A, spajke na osnovi Cu in Ag, prahovi—zlitine za navarjanje na osnovi Co in Ni, magnetni materiali na osnovi Al-Ni-Co itd.). Na tem mestu se bomo omejili predvsem na rezultate dela priprave prahu hitroreznega jekla Č.7680 (BRM-2; oznaka Železarne Ravne).

V tabeli 1 so zbrani vsi tehnološki parametri, ki smo jih zasledovali med posameznimi preizkusi. Tlak razprševalnega sredstva smo spreminjali med 100 in 275

bari, to je skoraj v celotnem delovnem območju visokotlačne črpalke (0 do 275 bar).

### 2.2 Analiza dobljenih rezultatov izdelanih kovinskih prahov hitroreznega jekla BRM-2

#### Kemijska analiza vzorcev

Vzorci hitroreznih jekel smo analizirali na IMT s pomočjo klasične kemijske analitike in ARL kvantometra (tip 3460 Metal Analyzer). Zaenkrat nismo izvajali sistematične kemijske analize izdelanih prahov po velikostnih razredih, temveč smo samo rutinsko preverjali, ali je preizkušani material v okviru predpisanih meja. Analize kažejo, da smo sicer odstopali od nominalne sestave, ki jo navajajo specializirani proizvajalci<sup>11</sup>. To odstopanje pa na dobljene rezultate nima odločilnega vpliva, saj smo vse preizkuse izvajali pri podani (konstantni) kemični sestavi, ker je bil za vse preizkuse vložek vzeti iz iste šarže. Pomeni le, da dobljene vrednosti za povprečno velikost delcev in velikostno porazdelitev ne veljajo točno za nazivno kemijsko sestavo BRM-2 jekla.

#### 2.3 Mikroskopija vzorcev

Vzorci prahov smo metalografsko preiskali z optičnim in rasterskim elektronskim mikroskopom (REM) po posameznih velikostnih razredih. Izdelani prah je izrazil nepravilne oblike z oksidirano površino, zaradi prisotnosti elementov z veliko afiniteto do kisika. Med posameznimi delci opazimo tudi delno nagnjenost h sferoidizaciji delcev, ki pa je zavrtja z veliko hitrostjo ohlajanja in prisotnostjo elementov, ki tvorijo okside z visokim tališčem. Z naknadno toplotno obdelavo izdelanih prahov smo povečali njihovo stisljivost in znižali vsebnost kisika ( $z \approx 2000$  na  $\approx 100$  ppm  $O_2$ ). Na sliki 1 je prikazan posnetek prahu hitroreznega jekla BRM-2, na sliki 2 pa posnetek prahu nerjavnega jekla 19Cr-9Ni NC (angl.: Stainless Steel-SS). Obe vrsti prahov sta bili izdelani na naši laboratorijsko pilotni napravi za vodno atomizacijo.

#### 2.4 Določitev velikostne porazdelitve delcev prahov

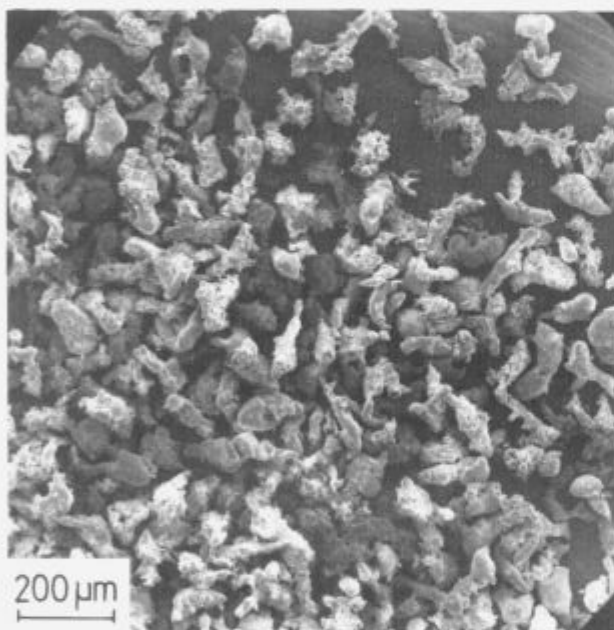
Najenostavnejša metoda določanja velikostne porazdelitve delcev je sejalna analiza<sup>9</sup>. V okviru raziskav smo naredili standardne sejalne analize vseh izdelanih prahov. Na sliki 3 je prikazana, na osnovi preizkusov, praktično dobljena odvisnost med povprečno velikostjo delcev ( $d_{50}$ ) izdelanega prahu hitroreznega jekla in tlakom vode. Regresijska analiza in dobljena eksponencialna krivulja odvisnosti kaže, da smo dobili relativno dobro odvisnost, s katero je možno vsak trenutek napovedati okvirno povprečno velikost in porazdelitveno krivuljo vodno atomiziranih prahov hitroreznih jekel. Na sliki 4 pa je prikazana sejalna analiza oz. stolpciasti diagram velikostne porazdelitve delcev prahov hitroreznega jekla za posamezne tlake razprševalnega sredstva. Vidimo, da v vseh primerih predstavlja glavni delež frakcija pod  $63 \mu m$ .

Praktične meritve velikostne porazdelitve delcev kažejo, da imamo tudi pri atomizaciji z našo napravo dva ločena stadija dezintegracije. Na to kaže bimodalna velikostna porazdelitev delcev. V primerih plinske in vodne atomizacije različni avtorji<sup>4,8</sup> omenjajo praviloma takšno velikostno porazdelitev. Le v primerih nadzvočnih hitrosti razprševalnega sredstva (ultrazvočna atomizacija—angl.: ultra sonic gas atomization) avtorji poročajo o enostopenjski dezintegraciji

**Tabela 1.** Procesni parametri izvedenih preizkusov izdelave prahov hitroreznega jekla BRM-2 (IMT Ljubljana).

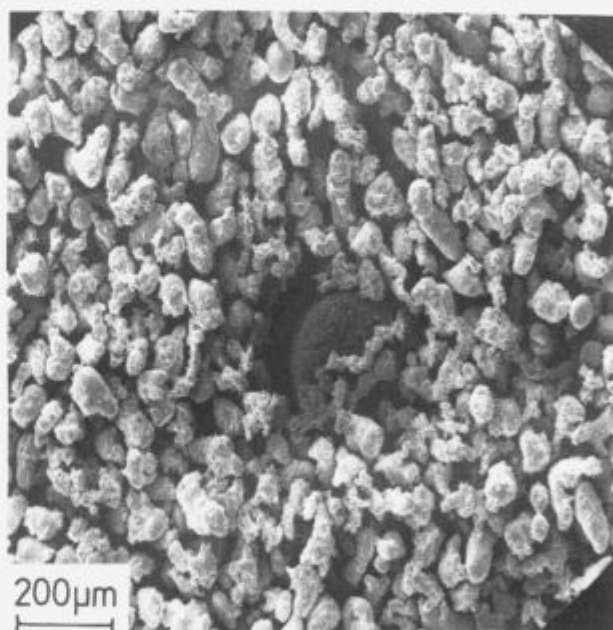
Procesni parameter			Opomba
Temperatura pregretja taline* (°C)		1580 (±20°C)	merjeno z optičnim pirometrom
Temperatura pregretja vmesne posode (°C)		1230 (±20°C)	merjeno s termoel. Pt-PtRh13
Premer šobe vmes. posode (mm)		4.5	taljeni kremen
Premer vodnih šob (mm)	glavne	1.20 × 1.05	tip 1503
	pomožne	1.10 × 0.85	tip 1502
Kot razprševanja šob (v stopinjah)	glavne	50	originalna
	pomožne	40	razdelilna glava
Tlak vode (bar)		100 do 275	v stopnjah po 50 bar
Zaščitni plin		dušik 0.8 m <sup>3</sup> /h	mer. rotometrično

\*Temperatura tališča BRM-2 je  $T_t \approx 1445^\circ\text{C}$ ; kar pomeni, da je bila temperatura pregretja približno  $135^\circ\text{C}$  nad temperaturo tališča in v okviru predpisov za pregretje taline (100 do  $150^\circ\text{C}$  nad  $T_t$ .)



**Slika 1.** REM, prah BRM-2. Frakcija: 75 do 90  $\mu\text{m}$ . Tlak vode: 275 barov.

**Figure 1.** SEM micrograph of water atomized M-2 type powder. 275 bars, fraction: 75–90  $\mu\text{m}$ .



**Slika 2.** REM, prah 19Cr-9Ni. Frakcija: 63 do 75  $\mu\text{m}$ . Tlak vode: 200 barov.

**Figure 2.** SEM micrograph of water atomized 19Cr9Ni SS powder. 200 bars, fraction: 63–75  $\mu\text{m}$ .

(angl.: one-step fragmentation). Prvi stadij dezintegracije tvori delce velikosti približno 100  $\mu\text{m}$ , drugi pa drobnejše (približno 40  $\mu\text{m}$ ).

### 2.5 Določitev nasipne in stresane gostote ter tekočnosti prahov

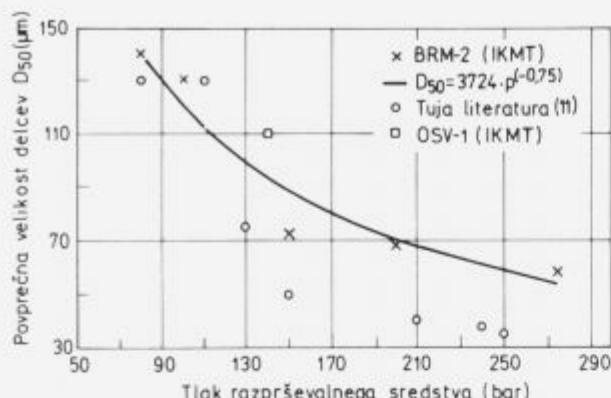
Tekočnost in nasipne gostote prahov smo določevali s pomočjo Hall-ovega merilnika<sup>9</sup>. Na sliki 5 je prikazana tekočnost vodno atomiziranega jekla BRM-2 v primerjavi z vodnoatomiziranim prahom nerjavnega jekla z 19% Cr in 9% Ni. Prah nerjavnega jekla teče boljše kot prah

hitroreznega jekla. To pomeni, da ima nerjavno jeklo pravilnejšo obliko delcev kot hitrorežno jeklo. To se vidi tudi iz posnetkov na raster elektronskem mikroskopu (sliki 1 in 2). Na sliki 6 pa so podane nasipne in stresane gostote izdelanih prahov hitroreznega jekla BRM-2 pri tlaku 275 bar po posameznih frakcijah.

### 3 Izdelava PM materialov s tehnologijo hitrega strjevanja

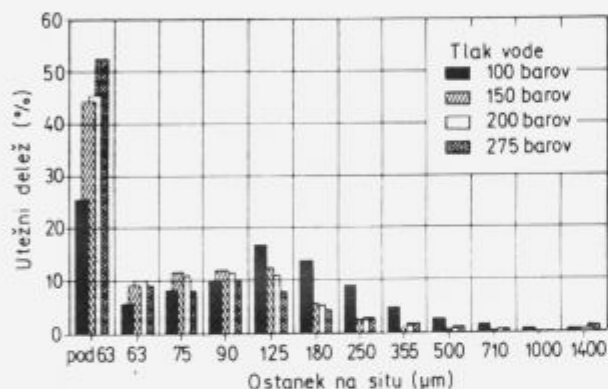
Poleg naprave za vodno atomizacijo nam na IMT Ljubljana omogoča izdelavo kovinskih prahov tudi nova lab-





Slika 3. Povprečna velikost delcev v odvisnosti od tlaka razprševalnega sredstva za hitrorežno jeklo BRM-2 (IMT Ljubljana—vodni atomizer D5/2 Davy Mc Kee).

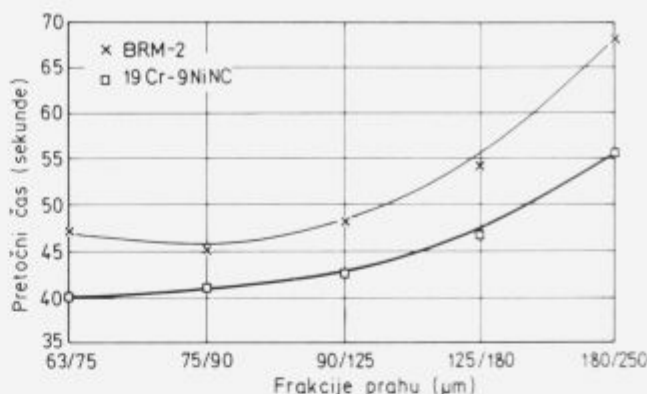
Figure 3. The variation of the median particle size with atomizing pressure for HSS type M-2 powder (Davy Mc Kee D5/2 water atomizer, IMT Ljubljana).



Slika 4. Histogram velikostne porazdelitve delcev prahu v odvisnosti od tlaka razprševalnega sredstva za hitrorežno jeklo BRM-2 (IMT Ljubljana—vodni atomizer D5/2 Davy Mc Kee) dobljen na osnovi sejnalne analize.

Figure 4. The histogram of particle size distribution based on the screening analysis data of water atomized powders for different atomizing pressures (HSS, M-2 type material, Davy Mc Kee D5/2 water atomizer—IMT Ljubljana).

oratorijska naprava za ulivanje amorfnih trakov Melt-Spinner (Marko Materials Inc.; ZDA), s pripadajočim drobilcem za upraševanje amorfnih trakov model 10 M Ribbon Pulverizer. Prednost te naprave je v tem, da omogoča delo v varovalni atmosferi ali vakuumu pri zelo velikih hitrostih ohlajanja ( $10^{6^{\circ}}\text{C/s}$ —RST—angl.: Rapid Solidification Technology). Poleg izdelave mikrokristaliničnih in amorfnih prahov pa naprava omogoča tudi izdelavo litih, tankih, amorfnih trakov iz mehkomagnetnih materialov, uporabnih predvsem v elektroniki in elektrotehniki. V okviru našega RR dela na področju amorfnih in mikrokristaliničnih materialov smo imeli vrsto aktivnosti. Obseg teh aktivnosti je bil podan na simpoziju o elektronskih sestavnih delih in materialih, SD-90 v obliki precej obširnega referata in ga zato na tem mestu ne bi ponavljali<sup>10</sup>. Preiskusni zagon in začetne preizkuse smo izvajali z znano mehkomagnetno zlitino nazivne sestave  $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ . V poizkusni fazi smo že izdelali prve lastne amorfne trakove širine 0.5 mm in debeline 20  $\mu\text{m}$ , primerne za upraševanje.



Slika 5. Tekočnost vodno atomiziranih prahov po posameznih velikostnih razredih (primerjava BRM-2 in nerjavno jeklo 19Cr9Ni NC pri tlaku vode 200 bar, IMT Ljubljana—vodni atomizer D5/2 Davy Mc Kee).

Figure 5. Flowability of water atomized powders versus particle size (fractions) for 200 bars water pressure (HSS, M-2 type and SS, 19Cr-9Ni type materials, Davy Mc Kee D5/2 water atomizer, IMT Ljubljana).

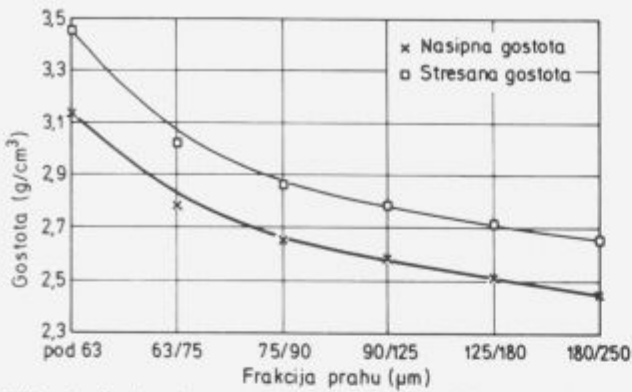
#### 4 Zgoščevanje kovinskih prahov

Naslednja stopnja izdelave končnega PM izdelka je konsolidacija oziroma zgoščevanje izdelanega kovinskega prahu. Popolna zgostitev je pogosto pogoj za doseganje posebnih lastnosti modernih materialov. V okviru praktičnega dela na zgoščevanju kovinskih prahov smo poleg pripravljajalnih del za vročo ekstruzijo hitroreznih jekel, izvajali preizkuse hladnega izostatskega stiskanja (CIP), sintranja v vakuumu in vodikcu ter vročega kovanja in vročega izostatskega stiskanja (HIP). V natančnejši opis opravljenega dela in rezultatov s področja zgoščevanja kovinskih prahov se zaradi omejenega prostora ne bomo poglobljali. Delo opravljeno v preteklem obdobju lahko zainteresirani najde v obsežnejšem zaključnem poročilu<sup>7</sup> in kratkem priloženem slikovnem gradivu. Na sliki 7 je tako prikazana stisljivost izdelanih vodno atomiziranih prahov v primerjavi s tujo literaturo<sup>11</sup>. Na sliki 8 so prikazane stopnje hladnega izostatskega stiskanja, na slikah 9 in 10 pa mikrostrukture na IMT Ljubljana sintiranih vzorcev predhodno hladno izostatsko stisnjenih vodno atomiziranih prahov.

#### 5 Zaključki

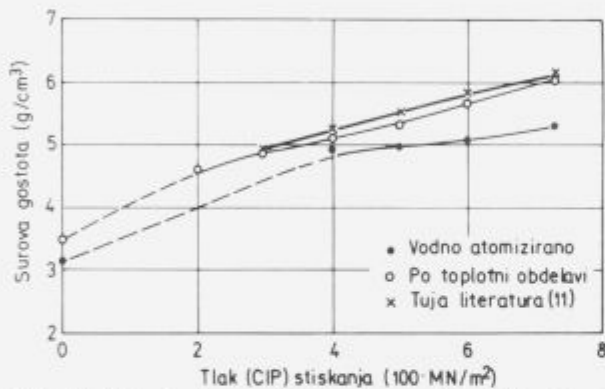
V drugi fazi naše RR naloge smo opravili v okviru zastavljenega programa sledeče delo:

- 1) Dodatno smo opremili laboratorijsko pilotno napravo za vodno atomizacijo z induktivnim talilnim sistemom, ki sedaj omogoča sistematično delo na pripravi različnih vrst posebnih kovinskih prahov.
- 2) Pričeli smo s sistematičnim določevanjem vplivnih parametrov vodne atomizacije na lastnosti prahov hitroreznih jekel. Tako smo določili za hitrorežno jeklo Č.7680 vpliv tlaka razprševalnega sredstva na glavne morfološke lastnosti prahu. Na osnovi preizkusov je postavljena empirična enačba odvisnosti povprečne velikosti delcev prahu od tlaka razprševalnega sredstva. Ta omogoča za dane parametre naprave okvirno napoved povprečne velikosti delcev in tudi ostalih morfoloških lastnosti izbranega hitroreznega jekla. Pričeli smo z natančnejšo analizo vsebnosti kisika v prahovih. Vsebnost kisika v izdelanih prahovih je po primerjavi s tujo literaturo v okviru tehnoloških



Slika 6. Nasipne in stresane gostote vodno atomiziranega prahu po posameznih velikostnih razredih (BRM-2 pri tlaku vode 275 bar, IMT Ljubljana—vodni atomizer D5/2 Davy Mc Kee).

Figure 6. Apparent and tap densities of water atomized powders for different fractions at 275 bars water pressure (HSS M-2 type material, Davy McKee D5/2 water atomizer, IMT Lj).



Slika 7. Stisljivost oziroma odvisnost zelene gostote od tlaka stiskanja vodno atomiziranega hitroreznega jekla BRM-2. Vzorci so bili hladno izostatsko stiskani v polivretanskih modelih na IJS Ljubljana.

Figure 7. Compressibility of water atomized HSS M-2 type material. (water atomization at IMT and CIP at IJS Ljubljana).

možnosti vodne atomizacije.

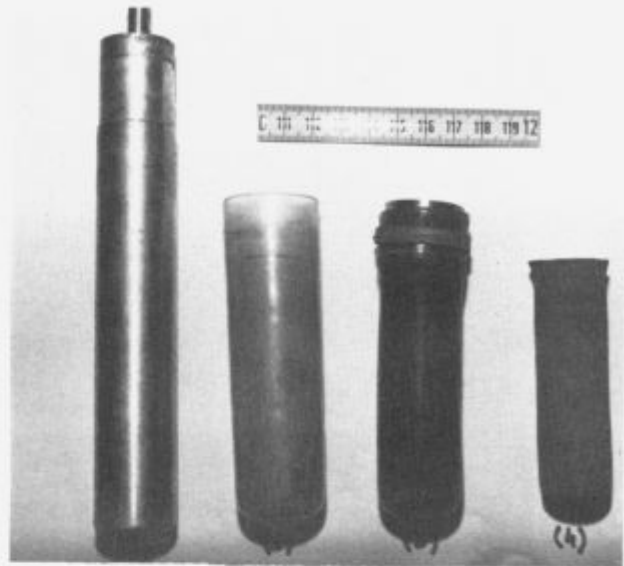
3) Dobljene rezultate preizkusov smo povezali z obstoječimi teoretičnimi modeli in praktičnimi izkušnjami tujih raziskovalcev. Bimodalna velikostna porazdelitev delcev kaže na to, da na naši napravi v primarnem stadiju dezintegracije prevladuje hidrodinamični mehanizem. Predstavljeni so tudi možni mehanizmi sekundarne dezintegracije med vodno atomizacijo.

4) Poleg prahov hitroreznih jekel smo preizkusno izdelali in analizirali tudi nekaj drugih vrst kovinskih prahov zanimivih za našo industrijo in druge uporabnike.

5) V laboratorij za metalurgijo prahov in hitro strjevanje smo namestili novo laboratorijsko napravo za izdelavo mikrokristaliničnih in amorfni materialov ter pričeli z njenim preizkusnim zagonom.

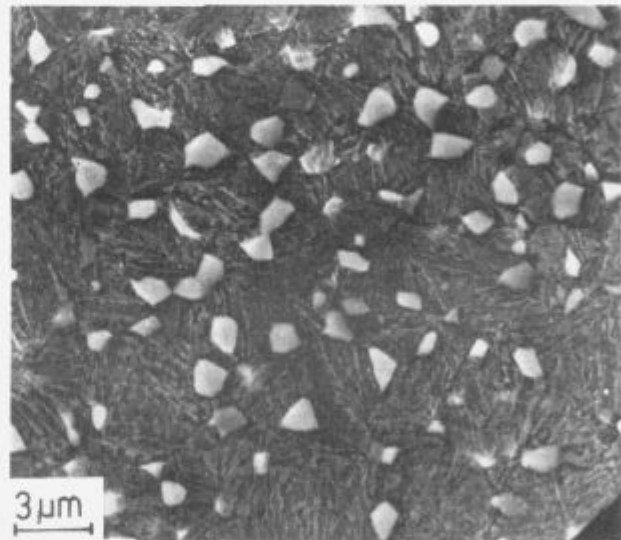
6) Izdelali smo vitalne dele ekstruzijskega orodja, ki naj bi v nadaljevanju omogočalo preizkusno vroče ekstrudiranje kovinskih prahov na industrijski stiskalnici.

7) Osvojili smo lastno izdelavo polivretanskih modelov za hladno izostatsko stiskanje. To nam omogoča pripravo stiskancev iz kovinskih prahov dimenzij  $\phi 25 \times 80$  mm primernih za nadaljne zgoščevanje s sintranjem.



Slika 8. Stopnje izdelave hladno izostatsko stisnjenih surovcev hitroreznega jekla in drugih vrst kovinskih prahov: (1) kovinski model, (2) poliuretanski model, (3) stisnjene po CIP v poliuretanskem modelu in (4) stisnjene iz hitroreznega BRM-2 jekla.

Figure 8. CIP steps for the preparation of green powder compacts: (1) metal mould, (2) polyurethane bag, (3) green compact in the polyurethane bag after CIP and (4) green compact.



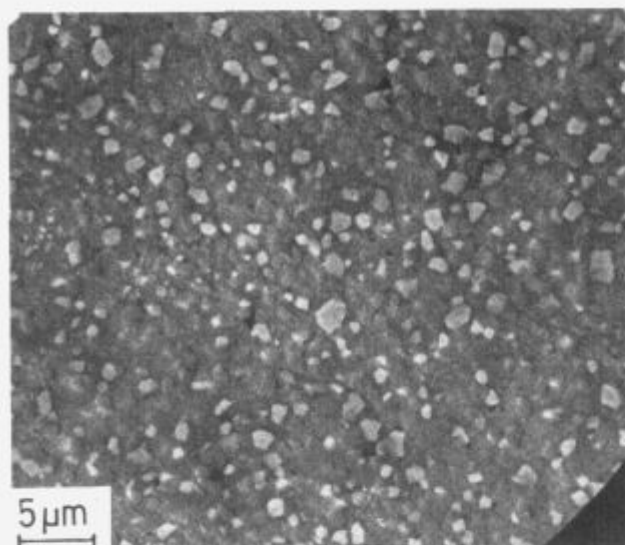
Slika 9. Mikrostruktura v vakuumu sintranega vzorca BRM-2 (vod. atomiz./CIP) REM, 2000 $\times$ .

Figure 9. SEM micrograph of vacuum sintered M-2 type powder (water atomiz./CIP).

8) Določili smo stisljivost izdelanih prahov hitroreznega jekla v surovem in toplotno obdelanem stanju.

9) Preliminarni preizkusi sintranja tujih in na IMT izdelanih vzorcev kažejo na relativno slabo sinterabilnost prahov hitroreznih jekel. Popolna zgostitev bo možna le z nadaljno vročo ekstruzijo ali vročim izostatskim stiskanjem. Sintranje do popolne zgostitve bi bilo možno le s primernimi dodatki, ki tvorijo tekočo fazo.

10) Na področju vročega izostatskega stiskanja smo pričeli



**Slika 10.** Mikrostruktura v vakuumu sintranega tujega vzorca vodno atomiz. prahu, REM (BR jeklo tip T15).

**Figure 10.** SEM micrograph of vacuum-sintered T-15 type water atomized powder.

s pripravo sistema za zgoščevanje prahu s stresanjem ter sistema za evakuiranje z varjenje kontejnerjev pred HIP.

## 6 Literatura

<sup>1</sup> B. Šuštaršič, F. Vodopivec, B. Breskvar: Literaturna študija o postopkih metalurgije prahov, Poročila IMT Ljubljana, junij 1989.

- <sup>2</sup> B. Šuštaršič, F. Vodopivec, B. Breskvar, A. Rodič, V. Leskovšek: Vodna atomizacija kovinskih talin in konsolidacije kovinskih prahov, interna naloga 88-066 IMT Ljubljana, 1988.
- <sup>3</sup> B. Šuštaršič, F. Vodopivec, M. Komac: Tehnologija vročega izostatskega stiskanja, Zbornik 39. Posveta o metalurgiji in kovinskih gradivih, Portorož, oktober 1988, str.: 119–138.
- <sup>4</sup> R.M. German: Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation (MPIF), Princeton, New Jersey, 1984.
- <sup>5</sup> F.V. Lenel: Powder Metallurgy—Principles and Applications, MPIF, Princeton, New Jersey, april 1980.
- <sup>6</sup> B. Kishor, M. Kulkarni: Metal Powders Used for Hardfacing, Metal Handbook, 9<sup>th</sup> edition, Volume 7, Powder Metallurgy, str.: 823.
- <sup>7</sup> B. Šuštaršič, M. Torkar, M. Jenko, F. Vodopivec, D. Gnidovec, J. Rodič, A. Rodič, V. Leskovšek, A. Kokalj, B. Rudolf: Procesi atomizacije kovinskih gradiv in konsolidacija kovinskih prahov, I. in II. del, Poročila IMT v Ljubljani, URP: Fizikalni procesi v trdnih kovinskih gradivih (C2-2557), Ljubljana, december 1989 in december 1990.
- <sup>8</sup> M. Buerger, E.V. Berg, S.H. Cho, A. Schatz: Fragmentation Process in Gas and Water Atomization Plant for Process Optimization Purposes, Powder Metallurgy International, 21, 1989, 6, 10–15.
- <sup>9</sup> MPIF: Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products, Metal Powder Industries Federation, Edition 1985/1986, Princeton, New Jersey.
- <sup>10</sup> B. Šuštaršič, M. Jenko: Izdelava amorfnih kovinskih materialov s tehnologijo hitrega strjevanja, Zbornik 26. Jugoslovanskega simpozija o elektronskih sestavnih delih in materialih, SD-90, Gornja Radgona (Radenci), september 1990, str.: 177–188.
- <sup>11</sup> Davy Mc Kee: Tool Steel Powders, komercialni prospekt podjetja Davy Mc Kee, No.: 021/2M/477.