

Procesi atomizacije kovinskih gradiv in konsolidacija kovinskih prahov (4. del)

Preparation of Metal Powders by Atomization and their Consolidation (Part IV)

B. Šuštaršič, M. Torkar, M. Jenko, B. Breskvar, V. Leskovšek, A. Rodič, F. Vodopivec,
Inštitut za Kovinske materiale in Tehnologije, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija

Študirali smo različne modele in mehanizme dezintegracije kovinskih talin pri plinski in vodni atomizaciji. Na osnovi obstoječih teoretičnih modelov, semi empiričnih in empiričnih enačb smo izdelali računalniški program za numerično simulacijo procesa plinske in vodne atomizacije. S pomočjo računalnika tako lahko hitro in enostavno napovemo, na osnovi izbranih parametrov atomizacije, najpomembnejše lastnosti izdelanega kovinskega prahu. Predvsem imamo v mislih tu povprečno velikost in obliko kovinskih delcev, kakor tudi teoretično hitrost ohlajanja, ki določa mikrostrukturo kovinskih delcev. Na ta način je omogočena verifikacija dejanskega procesa atomizacije, olajšano je preverjanje in planiranje eksperimentalnega dela ter dimenzioniranje atomizerja pri izbranih pogojih atomizacije.

V okviru praktičnega dela smo s postopkom vodne atomizacije izdelali različne, za našo industrijo zanimive, vrste kovinskih prahov (zlitine na osnovi Co za navarjanje, superzlitine na osnovi Ni, hitrorezna jekla itd.) in rezultate primerjali z rezultati računalniške simulacije. Predstavljene so tako osnove za izdelavo programa, sam računalniški program za numerično simulacijo plinske in vodne atomizacije, kakor tudi primerjava praktično dobljenih rezultatov z rezultati računalniškega izračuna.

Ključne besede: Metalurgija prahov (PM), izdelava kovinskih prahov, plinska in vodna atomizacija, modeli in napoved lastnosti, numerična simulacija procesa, računalniški program.

Gas and water atomization are the most common processes used for manufacturing different metal powders. The prediction of the mean particle size and shape for given conditions of atomization is of primary interest to most powder producers, researchers of new PM materials, as well as designers of new atomization equipment. Calculation of the cooling rate and other parameters that control the particle microstructure are also important.

With the aid of professional Borland's computer program Q-PRO and on the basis of theoretical and empirical relationships, the software for the simulation of gas and water atomization has been developed. The software makes it possible to change process parameters of atomization, to select the atomization medium and liquid metal, and to observe the resulting properties of atomized powders. The main parameters of computer calculations are: velocity and flow rate of the atomizing medium and liquid metal, nozzles diameter, mean particle size of atomized powder, cooling speed, spheroidization and solidification time, etc. This all makes it easier to verify the real process, to plan the R&D, especially experimental work, and to design new atomizers.

In this paper, the software for numerical simulation of gas and water atomization is presented. The results of practical experiments of water atomization of different metal powders in comparison with computer calculation are also presented.

Key words: Powder Metallurgy (PM), metal powder manufacturing, gas and water atomization, theoretical and empirical models, prediction of properties, numerical simulation, computer programs-software.

1 Uvod

Na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije (IMT), Ljubljana že več let raziskujemo različne postopke za izdelavo kovinskih prahov, kakor tudi raziskujemo obstoječe in razvijamo nove kovinske prahove-zlitine. Na IMT Ljubljana, v Laboratoriju za metalurgijo prahov in hitro strjevanje, se nahaja laboratorijsko-pilotni vodni atomizer, na katerem je mogoča praktična izdelava kovinskih prahov, kakor tudi študij procesa atomizacije.

V okviru projekta z gornjim naslovom smo študirali obstoječe teoretične modele atomizacije. Spoznali smo se z osnovnimi pol-empiričnimi in tudi povsem empiričnimi pristopi pri obravnavanju plinske in vodne atomizacije. Praktično smo spoznali in osvojili postopek vodne atomizacije. Izhajajoč iz modelov in praktičnih opazovanj, teoretične kakor tudi pol-empirične in empirične enačbe omogočajo izračun, oziroma napoved najpomembnejših lastnosti kovinskih delcev izdelanega prahu pri izbranih parametrih atomizacije. Izračunavanje za posamezne primere (vrste zlitin) in ponovitve pri spremenjenih pogojih atomizacije, vključno z grafičnimi predstavitvami je, ko spoznamo proces, relativno enostavno rutinsko a težaško opravilo. V literaturi nismo zasledili, da bi že obstajal program, ki bi omogočal, na osnovi znanega s pomočjo računalnika, zajeti vse najpomembnejše elemente izračuna procesov plinske in vodne atomizacije. Zato smo se na IMT Ljubljana odločili izdelati računalniški program (angl.: software), ki bi nam na osnovi poznanih modelov in enačb olajšal in zmanjšal obseg dragega teoretičnega, predvsem pa eksperimentalnega dela.

K izdelavi te vrste programske opreme oziroma računalniškega programa-software-a je mogoče pristopiti predvsem na dva načina:

- a.) v enem od znanih programskih jezikov, na osnovi praktičnega poznavanja procesa, napisati od začetka do konca svoj lasten program ali pa
- b.) uporabiti enega od znanih profesionalnih komercialnih programov uporabnih za ta namen.

V svetu danes obstaja že več vrst profesionalnih programov za katere smo menili, da bi bili uporabni za naš namen. Tu imamo v mislih predvsem računalniške programe (naprimer: Lotus 123, Microsoft Excel, Borland Quatro Pro), tako imenovane tabelarične kalkulatorje ali tabelarične preglednice (angl.: spread sheets), ki omogočajo hitro in enostavno obdelavo podatkov. S temi programi se lahko rešujejo konkretni matematično relativno zahtevni problemi^[1], ki se pojavljajo v praksi. Zato smo se tudi sami odločili, za naš, z matematičnega stališča relativno enostaven primer, uporabiti enega od teh računalniških programov.

2 Plinska in vodna atomizacija

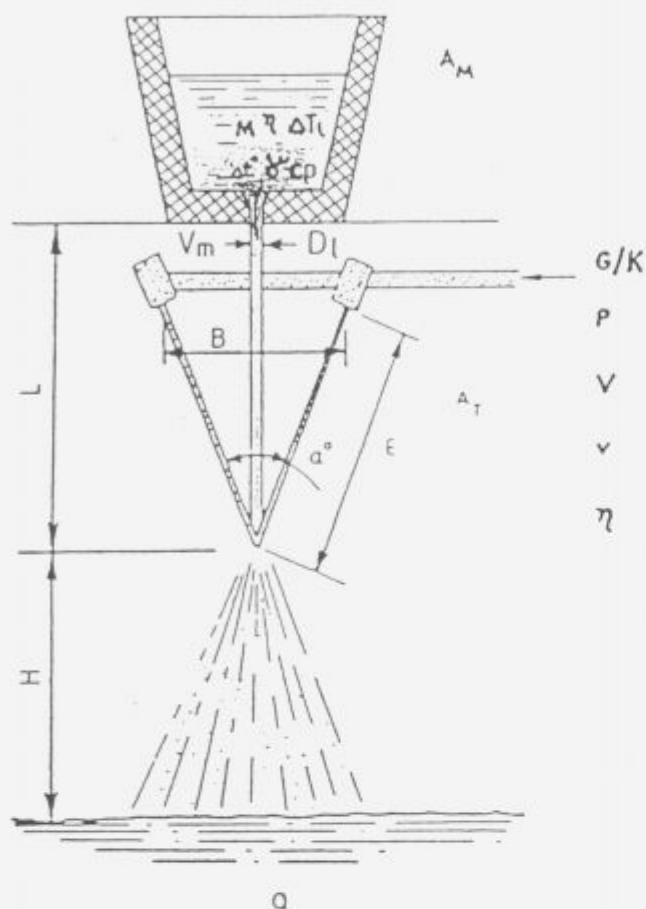
Med najpogostejše in zato tudi najpomembnejše postopke izdelave kovinskih prahov zlitin sodijo postopki tekočinske

in centrifugalne atomizacije. Med postopki tekočinske atomizacije pa sta najpomembnejša postopka plinska in vodna atomizacija^[2,3]. Kot že samo ime pove služi pri plinski atomizaciji kot razprševalno sredstvo curka raztaljene kovine eden ali več curkov inertnega plina (dušik, argon ali helij). Pri vodni atomizaciji pa uporabljamo kot razprševalno sredstvo visoko tlačne curke vode. S postopki plinske atomizacije lahko izdelujemo visoko kakovostne površinsko neoksidirane kovinske prahove z delci pravilne kroglične oblike. Vodna atomizacija je enostavnejši in cenejši postopek, omejen na zlitine z manjšo afiniteto do kisika oziroma z manjšo reaktivnostjo z vodno paro. Zaradi oksidativnega učinka vodne pare je kovinski prah običajno površinsko oksidiran, delci pa so nepravilne oblike. V novejšem času študirajo^[4,7] vse več tudi proces atomizacije z različnimi olji in tekočimi plini, da bi tako izkoristili vse prednosti kapljevine kot razprševalnega sredstva, istočasno pa odpravili negativni vpliv oksidacijskega učinka vode, oziroma vodne pare. Izdelani računalniški program je zanimiv tudi s tega stališča, saj je možna enostavna simulacija procesa atomizacije tudi s temi vrstami razprševalnih sredstev.

Na sliki 1 je shematično prikazan postopek vodne atomizacije z vsemi najpomembnejšimi vplivnimi parametri atomizacije, ki smo jih upoštevali tudi pri izdelavi računalniškega programa numerične simulacije. Plinska atomizacija se poleg razlik, ki izhajajo iz vrste atomizacijskega sredstva, razlikuje od vodne atomizacije načeloma predvsem še po zaprtosti sistema, načinu razprševanja in obliki šob za razprševanje.

Razprševanje curka tekoče kovine s pomočjo curka plina ali vode (kot smo že omenili lahko tudi druge kapljevine, na primer olja) je relativno zahteven proces, če želi-mo matematično (v obliki modela) opisati pri tem nastopajoča fizikalno-kemijska dogajanja.

V literaturi obstaja cela vrsta predstav in modelov o mogočih fizikalno-kemijskih dogajanjih med procesom atomizacije, vendar še nihče ni uspel, na nivoju matematičnih zapisov, zadovoljivo v celoti opisati proces atomizacije. Vsi modeli so, ko preidemo na nivo matematičnih zapisov zelo poenostavljeni ob kopici predpostavk. Težišče vseh poenostavljenih modelov je napoved, za dane fizikalno-kemijske lastnosti tekoče kovine ali zlitine in razprševalnega sredstva ter izbrane geometrijske in procesne parametre atomizacije, najpomembnejših lastnosti atomizacije izdelanega kovinskega prahu. Te so: velikostna porazdelitev delcev in povprečna velikost delcev prahu, oblika delcev in hitrost ohlajanja delcev med atomizacijo. Na osnovi določitve teh lastnosti in še nekaj drugih parametrov izračuna (hitrost razprševalnega sredstva, temperatura izenačitve itd.) lahko postavimo osnovne zahteve za nabavo ali konstruiranje novega atomizerja, planiramo eksperimentalno delo ali redno proizvodnjo, ne da bi bilo pri tem potrebno večje število preliminarjih



Atmosfera :

- med taljenjem (A_w)
- v atomizerju (A_T)

Baztaljena kovina :

- kemizen (M)
- viskoznost (η)
- površ. napetost (γ)
- tališče (ΔT_l -temp. območje)
- pregretje nad tališče ($\Delta t'$)
- specifična toplota (c_p)
- storilnost (V_m)
- premer šobe (D_1)

Razprševalno sredstvo :

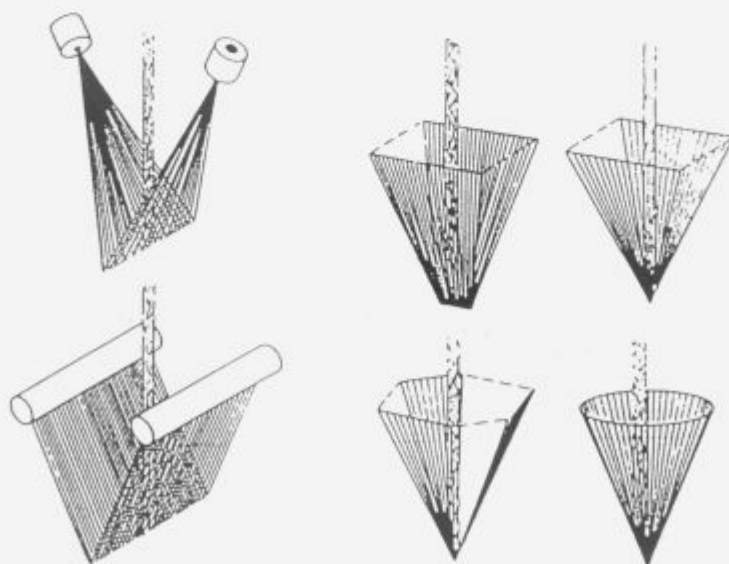
- plin ali kapljevina (G/K)
- tlak (P)
- hitrost, volumen (v, V)
- viskoznost (η)

Geometrija razprševanja :

- razdalja med sobama (B)
- dolžina curka tekočine (E)
- dolžina curka taline (L)
- kot razprševanja (α')

Parametri atomizerja :

- dolžina (pot) delcev (B)
- hladilno sredstvo (Q)
- višina atomiz. komore ($H \cdot L$)



Slika 1. Shematični prikaz postopka vodne atomizacije z najpomembnejšimi vplivnimi parametri procesa in možnimi konfiguracijami razprševanja^[2].

Figure 1. Major variables and possible configurations of disintegration in the schematically presented fluid atomization process^[2].

preizkusov. Obseg teoretičnih modelov in od tod izhajajočih enačb, kakor tudi število uporabljenih semi-empiričnih in empiričnih enačb je preobsežen za natančnejšo obdelavo v članku. Zanimirani jih lahko najde tako v tuji^[2,3,4] kot tudi domači^[5] strokovni literaturi. Opozorimo naj samo še, da je računalniški program zaradi različnih fizikalno-kemijskih lastnosti kapljev in plinov razdeljen na dva dela. V teku izboljšave programa smo poleg verzije, ki ne omogoča avtomatično upoštevanje temperaturnih odvisnosti fizikalnih lastnosti (toplotnih prevodnosti, specifičnih toplot, površinskih napetosti, viskoznosti itd.) izdelali tudi verzijo z njihovim avtomatskim prilagajanjem. Pri preverjanju in uporabi izdelanega računalniškega programa smo naleteli na največje probleme zaradi pomanjkanja literaturnih podatkov o fizikalno-kemijskih lastnostih tekočih kovin in zlitin ter razprševalnega sredstva.

3 Princip izdelave ATOSIM programa

Princip delovanja računalniških programov, ki temeljijo na tabelarnih preglednicah je zelo enostaven. Vsak podatek ali enačbo postavimo (lepše rečeno napišemo) v svoje "okno", oziroma na svoj karakterističen naslov (v obliki črk in števil, naprimer: A1, ..., Z4, ..., GG23, ... itd.) ali celico preglednice. Pri tem moramo biti v določenih primerih pazljivi, da si podatki in enačbe (seveda v predpisanem zapisu računalniškega programa) sledijo v logičnem zaporedju, tako kot bi sami enega za drugim ročno izvajali posamezne elemente izračuna. Na tem principu temelji tudi izdelava našega računalniškega programa numerične simulacije plinske in vodne atomizacije, ki smo ga imenovali ATOSIM.

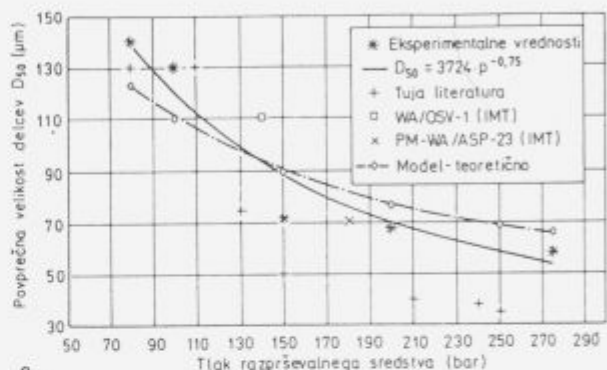
Izdelava takšnega programa zahteva, poleg poznavanja teoretičnih in praktičnih aspektov obravnavanega problema (v našem primeru atomizacije), tudi dobro poznavanje enega od profesionalnih programov, ki temeljijo na tabelarnih preglednicah (v našem primeru programa Q-PRO^[6]). Glavni problem pri izdelavi aplikacije oziroma uporabi takšnega programa je pravilno strukturiranje podatkov in novih podatkov, ki so rezultat predhodnih izračunov. Ob lastni kreativnosti lahko tako prosto in relativno enostavno v dveh (pri novejših programih tudi v 3 ali več) dimenzijah logično medseboj povezujemo posamezna polja (celice) oziroma elemente izračuna. Prednosti teh programov so tudi v tem, da lahko na osnovi že pripravljenega software-a takoj rezultate izračuna tudi grafično predočimo v obliki diagramov medsebojnih odvisnosti. Programi delani v obliki tabelarnih preglednic imajo tudi to prednost, da omogočajo enostavno oblikovanje ("kopiranje") novega bloka izračunov za nov set podatkov (oblikovanje baze podatkov), kakor tudi da omogočajo oblikovanje tako imenovanih oken (angl.: windows). Spreten in domiselni uporabnik programa lahko tako oblikuje takšno grafično interpretacijo izračuna, ki tekoče (sproti) na zaslonu monitorja seznanja uporabnika z rezultati izračuna.

Zaradi relativno velikega obsega programa je praktično nemogoče v članku, nazorno prikazati delovanje izdelanega programa. V obliki dveh tabel (tabeli 1 in 2) je prikazan skrajšan monitorski oziroma printerski zapis, ki poizkuša poenostavljeno prikazati delovanje izdelanega programa za numerično simulacijo plinske in vodne atomizacije. Zanimirani bralec lahko najde natančnejšo obrazložitev v lite-

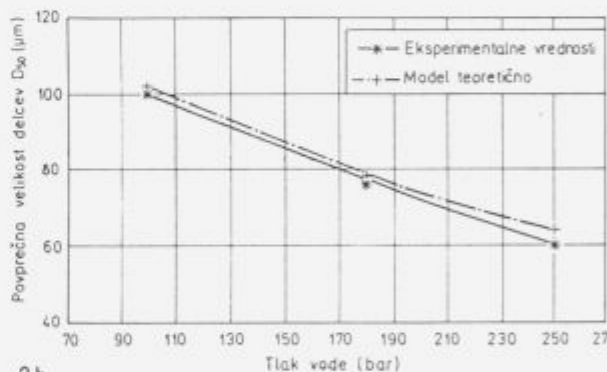
raturi^[5], ali pa se za demonstracijo in predstavitev izdelanega programa obrne tudi neposredno na prvega avtorja tega prispevka.

4 Rezultati in diskusija

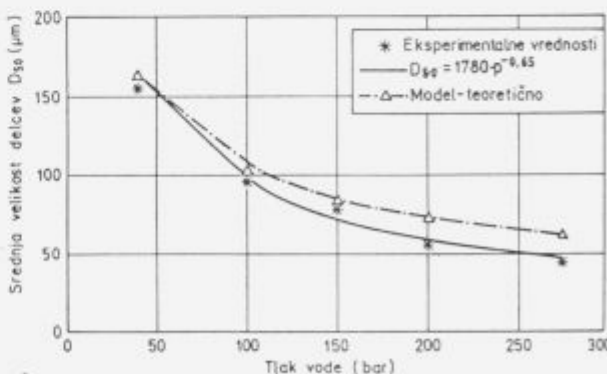
V okviru praktičnega dela smo, s postopkom vodne atomizacije, sistematično atomizirali, na laboratorijsko pilotnem atomizerju Davy McKee, zlitine Al (Al-Zn-Mg-Cu), Co (Milit F in 6), Fe (hitrorezni jekli M-2 in PM-23) in Ni (super zlitina Nimonic 80A). Dobljene praktične rezultate smo potem primerjali s pomočjo izdelanega



2a



2b



2c

Slika 2. Primerjava med povprečno velikostjo delcev dobljenih s teoretičnim izračunom in praktičnimi rezultati vodne atomizacije: a) High Speed Steel M-2, b.) Super Alloy Nimonic 80A in c.) Co zlitine za navarjanje Milit F.

Figure 2. Comparison among experimental results and numerical simulation results of water atomization for: a) High Speed Steel M-2 type, b) Super Alloy Nimonic 80A and c) Co base welding alloy F type.

Tabela 1. Primer skrajšanega izpisa numerične simulacije procesa plinske atomizacije za izbrane zlitine.

Table 1. Example of reduced print out of numerical simulation of gas atomization for selected alloys.

PLINSKA ATOMIZACIJA:

MATERIAL (LASTNOSTI) NAZIV (DIMENZIJE) OPOMBE	Dinam. viskoznost Eta (Pa*s;kg/s*m)	Površnj. napetost Gamma (N/m;kg/s**2)	FIZIKALNE LASTNOSTI RAZPRŠEVANJA SREDSTVA IN ATOMIZIRANE KOVINE: VISKOZNOST, POVRŠNJSKA NAPETOST, TEMPERATURNI PREKOVNOSTI, SPECIFIČNA TOPLOTA, GOSTOTA TALUJČICE, VREDNOSTI DALJINA IZPLAČA ITO	Premer šobe De (mm) (vmeane posode)	Maeni pretok dm/dt (kg/s) (raztaljene kovine)	PARAMETRI ATOMIZACIJE: TLAK RAZPRŠEVANJA SREDSTVA, PREMER ŠOBE, NOT. RAZPRŠEVANJA, MAŠNI PRETOK, TEMPERATURA PREGRETA, GEOM. KONFIGURA ITO
Ni superzlitina (1600oC,tekoča)	2.00E-03	1.20				
Argon (Ar,300K,1bar,plinaat)	2.26E-05					
Plinska atomizacija (z Ar)				4.0	0.300	
Ni superzlitina (1600oC,tekoča)	2.00E-03	1.20				
Dušik (N2,300K,1bar,plinaat)	1.78E-05					
Plinska atomizacija (z N2)				4.0	0.300	
Ni superzlitina (1600oC,tekoča)	2.00E-03	1.20				
Helij (He,300K,1bar,plinaat)	1.96E-05					
Plinska atomizacija (z He)				4.0	0.300	
Zlitina na osnovi Al (12%Si)	9.64E-04	0.86				
Dušik (N2,300K,1bar,plinaat)	1.78E-05					
Plinska atomizacija (z N2)				4.0	0.093	

Najmanjši premer šobe Dm (mm) (razprš. medija)	Presek curka Aa (mm**2) (raztalj. kovine)	SIMULACIJA PROCESA Z ZAHTEVNIMI IZRAČUNI: PREMER ŠOBE, POVPREČNA VEKLOST DELCEV HITROST OHLAJANJA, ČAS STRLEVANJA, ČASOVNO RAZMERJE ITO.	Povprečna velik. delcev D50 (mikrometri) (po Lubanska-I)	Hitrost ohlajanja dT/dt (K/s)	Čas sferoidizacije t(sph) (sek.) (po Nishiporenku za r2/r1=4)
6.8	12.57		84	1.08E+05	3.15E-05
7.3	12.57		65	2.50E+05	2.42E-05
12.0	12.57		9	2.17E+07	3.42E-06
7.3	12.57		118	7.41E+04	2.99E-05

Tabela 2. Primer skrajšanega izpisa numerične simulacije procesa vodne atomizacije za izbrane zlitine.

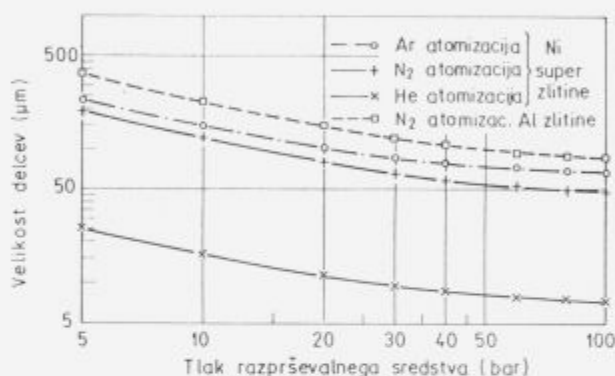
Table 2. Example of reduced print out of numerical simulation of water atomization for selected alloys.

VDNA ATOMIZACIJA:

MATERIAL (LASTNOSTI) NAZIV (DIMENZIJE) OPOMBE	Dinam. viskoznost Eta (Pa*s;kg/s*m)	Površnj. napetost Gamma (N/m;kg/s**2)	Topni prevodnost Lambda (W/m*K)	Temperatura Tm (K) (razprš. medija)	Temperatura pregreje Tst (K) (raztaljena kovina)	Zalutni čas t0 (s) (razprš. medija)	Kondenz. čas t1 (s) (z atomi, kovine)	FIZIKALNE LASTNOSTI RAZPRŠEVANJA SREDSTVA IN ATOMIZIRANE KOVINE: VISKOZNOST, POVRŠNJSKA NAPETOST, TEMPERATURNI PREKOVNOSTI, SPECIFIČNA TOPLOTA, GOSTOTA TALUJČICE, VREDNOSTI DALJINA IZPLAČA ITO	PARAMETRI ATOMIZACIJE: TLAK RAZPRŠEVANJA SREDSTVA, PREMER ŠOBE, NOT. RAZPRŠEVANJA, MAŠNI PRETOK, TEMPERATURA PREGRETA, GEOM. KONFIGURA ITO
Ni superzlitina (1600oC,tekoča)	2.00E-03	1.20	33.90						
Voda (H2O,300K,1bar,kaplinoat)	9.97E-04	0.083	0.63						
Vodna atomizacija (z H2O)				323	1873	2.80E+01	1.00E+05		
Cu zlitina (1200oC,tekoča)	1.82E-03	1.850	84.00						
Voda (H2O,300K,1bar,kaplinoat)	9.97E-04	0.083	0.63						
Vodna atomizacija (z H2O)				323	1743	1.50E+01	1.00E+01		
Ni superzlitina (1600oC,tekoča)	2.00E-03	1.20	33.90						
Voda (H2O,300K,1bar,kaplinoat)	9.97E-04	0.083	0.63						
Vodna atomizacija (z H2O)				323	1853	2.80E+01	1.00E+01		
Cu zlitina (1200oC,tekoča)	1.82E-03	1.850	84.00						
Voda (H2O,300K,1bar,kaplinoat)	9.97E-04	0.083	0.63						
Vodna atomizacija (z H2O)				323	873	2.10E+01	1.00E+01		
Sn zlitina (12%Cu,127oC,tekoča)	1.48E-03	0.558	34.33						
Voda (H2O,300K,1bar,kaplinoat)	9.97E-04	0.083	0.63						
Vodna atomizacija (z H2O)				323	700	1.50E+01	1.00E+03		
Ni superzlitina (1600oC,tekoča)	2.00E-03	1.20	33.90						
Dušik (N2,300K,1bar,plinaat)	1.78E-05	0.009	0.13						
Argon (Ar,300K,1bar,plinaat)	2.26E-05	0.011	0.12						
Plinska atomizacija (z N2)				190	1873	2.80E+01	1.00E+01		
Plinska atomizacija (z Ar)				190	1873	2.80E+01	1.00E+01		

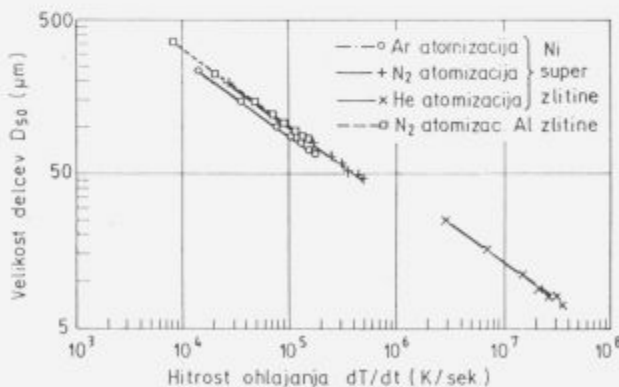
Najmanjši premer šobe Dm (mm) (razprš. medija)	Povprečna velikost delcev Dm (mikrometri) (po Kubacki)	Povprečna vel. delcev Dm (mikrometri) (po Lubanska)	Povprečna vel. delcev Dm (mikrometri) (Ekaplan, Dm=K*Vp/g)	SIMULACIJA PROCESA Z ZAHTEVNIMI IZRAČUNI: PREMER ŠOBE, POVPREČNA VEKLOST DELCEV HITROST OHLAJANJA, ČAS STRLEVANJA, ČASOVNO RAZMERJE ITO.	Hitrost ohlajanja dT/dt (K/s)	Čas sferoidizacije t(sph) (sek.) (po Nishiporenku za r2/r1=4)	Čas za sferoidizacijo t(sph) (sek.) (za solitane)	Časovno razmerje t(sph)/t(sph)
101	81	81	88		3.28E+07	2.28E-06	1.02E-06	0.42
140	80	80	78		1.97E+07	8.91E-06	8.84E-06	1.12
128	70	80	33		3.88E+07	3.88E-06	1.32E-06	0.31
130	148	124	103		1.22E+07	3.88E-06	4.82E-06	1.31
30	80	48	81		3.32E+07	3.81E-06	1.91E-06	0.34
110	80	84	81		1.00E+07	2.32E-06	7.23E-06	0.88
158	110	100	114		4.81E+06	4.11E-06	1.33E-04	0.31

računalniškega programa s teoretičnimi izračuni. Podobno smo tudi za plinsko atomizacijo rezultate računalniškega izračuna primerjali s praktičnimi podatki iz literature^[3,4]. Primerjava rezultatov dobljenih z numerično simulacijo in eksperimentalno dobljenih rezultatov kaže, da lahko z izdelanim programom relativno dobro napovemo povprečno velikost delcev ($\pm 10\%$) in obliko delcev, dočim pa so izračunane teoretične hitrosti ohlajanja predvsem pri vodni atomizaciji previsoke. Na slikah 2 a, b in c so tako prikazane primerjave med z numerično simulacijo izračunanimi povprečnimi velikostmi delcev in dejansko dobljenimi pri preizkusih z vodno atomizacijo. Na sliki 3 je prikazana odvisnost, dobljena z izdelanim programom, med povprečno velikostjo delcev in tlakom razprševalnega sredstva, na sliki 4 pa med teoretično hitrostjo ohlajanja in velikostjo delcev pri plinski atomizaciji izvedeni z različnimi plini.



Slika 3. Odvisnost povprečne velikosti delcev od tlaka razprševalnega sredstva za Ni super zlitino pri atomizaciji z Ar, He in N_2 ter zlitino Al-Si atomizirano z N_2 pri ostalih izbranih (in konstantnih) procesnih parametrih atomizacije. Odvisnost je dobljena s pomočjo izdelanega računalniškega programa simulacije procesa plinske atomizacije.

Figure 3. Results of numerical simulation of gas atomization with different atomizing media: mean particle size versus pressure of atomizing medium for Ni superalloy and Al-Si based alloy.



Slika 4. Odvisnost teoretične hitrosti ohlajanja od velikosti delcev Ni super zlitine pri atomizaciji z Ar, He in N_2 ter zlitino Al-Si atomizirano z N_2 pri ostalih izbranih (in konstantnih) procesnih parametrih atomizacije. Odvisnost je dobljena s pomočjo izdelanega računalniškega programa simulacije procesa plinske atomizacije.

Figure 4. Results of numerical simulation of gas atomization with different atomizing media: theoretical cooling rate versus mean particle size for Ni superalloy and Al-Si based alloy.

5 Zaključki

Na osnovi enega od profesionalnih računalniških programov, ki temeljijo na principu tabelarnih preglednic smo izdelali računalniški program za numerično simulacijo plinske in vodne atomizacije. Praktično smo osvojili izdelavo tudi več vrst zlitin s postopkom vodne atomizacije in rezultate primerjali s teoretičnimi izračuni. Prikazani pristop uporabe te vrste programov za izdelavo lastnih aplikacij naj bi v bodoče stimuliral tudi druge za izdelavo lastnih rešitev s področja simulacije procesov.

6 Literatura

1. M. Bolčina: Uporaba PC preglednic s poudarkom na reševanju temperaturnih polj in polj mešanja taline, Kovine, zlitine in Tehnologije, Leto 26, št. 3, 1992, s.: 283/288.
2. F. V. Lenel: Powder Metallurgy - Principles and Applications, MPIF, Princeton, New Jersey, april 1980.
3. W. Graf, J. Pötschke, H. Sibum, W. Weiglin: Die Herstellung gasverduster Metallpulver, Metall, 45 Jahrgang, Heft 4, April 1991, s.: 348/354.
4. J. Bäcker, W. Graf, W. Kawaters, J. Pötschke: Die Herstellung von Metallpulver durch Verdüsen der Schmelze mit tiefkaltem Flüssiggas, Metall, 45 Jahrgang, Heft 8, August 1991, s.: 764/771.
5. B. Šuštaršič: Lastnosti kovinskih prahov, izdelanih z vodno atomizacijo; Magistrsko delo, Ljubljana 1993.
6. Quattro Pro, Version 3.0, User's Guide, Borland International Inc., USA 1991.
7. K.U. Kainer, B.L. Mordike: Oil Atomization-A Method for the Production of Rapidly Solidified Iron-Carbon Alloys, Metal Powder Report, januar 1989, s.: 28/31.