

NUMERIČNA IN EKSPERIMENTALNA ANALIZA VLEČENJA ALUMINIJEVE ZLITINE 6262

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DRAWING ALUMINIUM 6262 ALLOY

Peter Cvahte¹, Peter Fajfar², Boris Arzenšek³, Tomaž Rodič²

¹Impol, d.d., 2310 Slovenska Bistrica, Slovenija

²Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

³Inštitut za kovinske materiale in tehnologijo, Lepi pot 10, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 2000-01-12; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-03-21

V članku je obravnavana eksperimentalna in numerična analiza vlečenja in potiskanja palic iz aluminijeve zlitine 6262. Cilj numeričnih analiz z metodo končnih elementov je optimiranje oblike matrice za kombinirano potiskanje/vlečenje palic premera 35 mm, brez predhodnega šiljenja konic palic. Eksperimentalne analize vključujejo preizkuse mehanskih lastnosti zlitine 6262 z nateznimi preizkusi, merjenje sile vlečenja v industrijskih razmerah in določitev koeficienta trenja po Burgdorfu. Numerična analiza obsega določitev trenja med orodjem in preoblikovancem po inverznem postopku, analizo občutljivosti procesa na geometrijo orodja in tribološke pogoje, optimiranje geometrije votlice za palice premera 35 mm ter analizo nakrčevanja palic med potiskanjem. Z analizo nakrčevanja je določena zgornja meja trenja, ki med procesom potiskanja ne sme biti presežena.

Ključne besede: vlečenje, palice, potiskanje palic, optimiranje matrice, metoda končnih elementov, trenje

In this paper experimental and numerical analyses of a combined extrusion and drawing process of rods made from 6262 alloy are presented. The main aim of finite element analyses applied in this work was to optimise the combined extrusion and drawing of rods to obtain 35 mm diameter without applying a pointing process prior to deformation. The experimental investigations including tension tests of the 6262 alloy, measurements of the drawing forces in the industrial conditions, and prediction of the friction coefficient by Burgdorf. The numerical analyses comprise an analysis of contact between the tool and the workpiece to evaluate frictional coefficient using an inverse approach, a sensitivity analysis of the process with respect to tool geometry and tribological conditions, as well as optimisation of the tool design for rods of 35 mm diameter. Extrusion defects such as folding due to upsetting effects is also considered and upper limit for friction is determined.

Key words: rod drawing, rod extrusion, tool design optimisation, finite element method, friction

1 UVOD

Tehnologija izdelave palic premera 35 mm na kombiniranem potisno-vlečnem stroju O.C.N. v Impolu zahteva predhodno šiljenje konic palic. Da bi postopek izdelave racionalizirali, to je skrajšali za operacijo šiljenja, je bila opravljena numerična analiza preoblikovalnega postopka. Za določevanje robnih pogojev trenja so bile izvedene industrijske meritve sil vlečenja palic¹. Preoblikovalne lastnosti zlitine 6262-AA (AlMg1SiPb-ISO, AC41-Impol) so bile pridobljene iz nateznega preizkusa. Prav tako so bili določeni koeficienti trenja po Burgdorfovi metodi. Numerična analiza je vključevala inverzno analizo trenja med orodjem in preoblikovancem, analizo občutljivosti procesa na geometrijo orodja in tribološke pogoje, optimiranje geometrije votlice za palice ter analizo nakrčevanja.

2 EKSPERIMENTALNA ANALIZA

2.1 Merjenja sile vlečenja v industrijskih razmerah

Iz meritev sile vlečenja pri industrijskih pogojih je bil določen koeficient trenja μ . Kot mazivo je bilo uporabljeno olje Metalube Tubol 1000Al. V ta namen so bile pripravljene iztiskovane palice premera 35 mm stanja

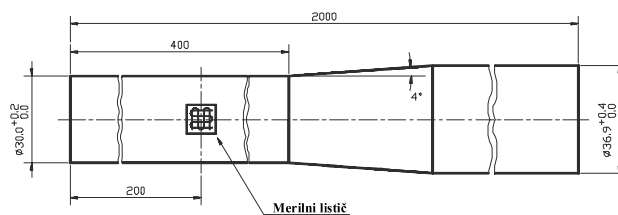
T1 (tabela 1). Merilni del, na katerega so bili nameščeni merilni lističi (slika 1), je bil v dolžini 400 mm stanjššan na premer 30 mm. Merilno mesto na stroju je prikazano na sliki 2.

Povprečna izmerjena sila vlečenja je bila 78,5 kN.

2.2 Določitev mehanskih lastnosti

Mehanske lastnosti zlitine 6262 so bile določene z nateznim preizkusom po standardu DIN 50125. Preizkušanci so bili tipa A 10 x 50. Meritve so potekale v mehanskem laboratoriju Impola na elektronskem trgalnem stroju ZWICK 1478.

Rezultati meritev za stanji T1 in T5 (tabela 1) so prikazani na sliki 3.



Slika 1: Namestitev merilnih lističev na vlečeni palici
Figure 1: Position of strain gauges on the drawn rod



Slika 2: Merjenje sile vlečenja
Figure 2: Measurements of drawing force

Tabela 1: Termomehanske obdelave palic (Aluminium Association - AA)²

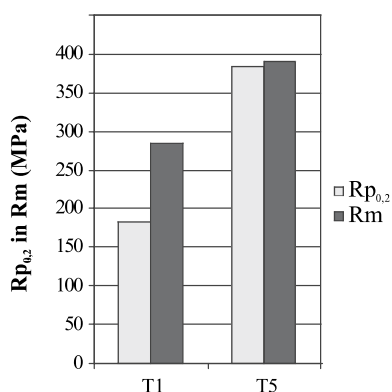
Table 1: Thermomechanical treatment of rods (Aluminium Association - AA)²

Stanje	Postopek izdelave
T1	Gašeno na iztiskovalnici in naravno starano
T5	Gašeno na iztiskovalnici in umetno starano

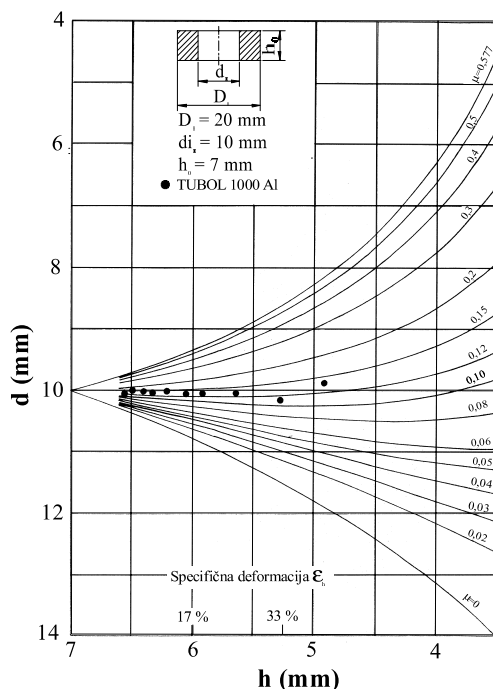
2.3 Določitev trenja po Burgdorfovi metodi

Po Burgdorfovi metodi so bili določeni koeficienti trenja za olje Metalube Tubol 1000Al, ki je bilo uporabljeno tudi pri meritvi sile vlečenja. Po tej metodi se obročast preizkušanelec (slika 4) stiska med dvema ravnima, vzporednima ploskvama orodja. Dimenzija preizkušanca se med nakrčevanjem spreminja glede na torne razmere na stičnih ploskvah. Poleg višine se spreminjata tudi zunanji in notranji premer. Burgdorf je računsko določil nomogram, iz katerega je mogoče iz izmerjenega notranjega premera d in višine preizkušanca h po nakrčevanju oceniti koeficient trenja μ .

Preizkusi so bili izvedeni na preizkuševalnem stroju Instron na Inštitutu za kovinske materiale in tehnologije. Preizkušanci so bili stisnjeni le do deformacije vzorcev



Slika 3: Primerjava Rm in Rp_{0,2} za stanja T1 in T5
Figure 3: Comparison of Rm and Rp_{0,2} for T1 and T5 conditions



Slika 4: Nomogram za določevanje trenja po Burgdorfu
Figure 4: Nomogram for determining friction according to Burgdorf

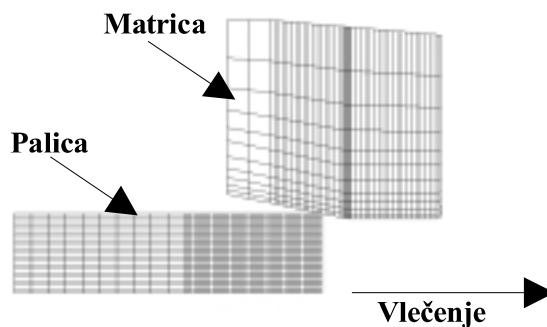
$\epsilon_s=30\%$, kar so tudi največje plastične deformacije, ki se v Impolu uporabljajo v praksi. Rezultati so bili vneseni v nomogram (slika 4). Do deformacije $\epsilon_s=17\%$ je koeficient trenja $\mu=0,15$. Pri deformacijah od 17% do 33% pa je koeficient trenja $\mu=0,11$.

3 NUMERIČNA ANALIZA VLEČENJA PALICE

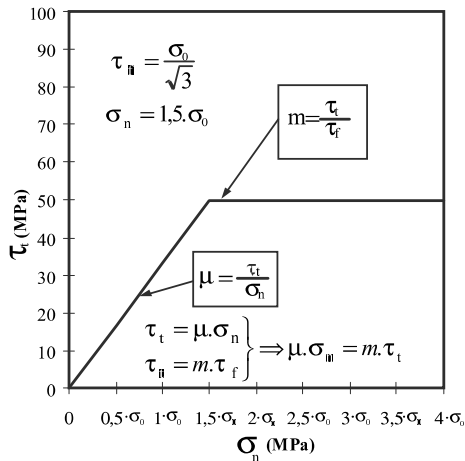
3.1 Numerični model

Numerična diskretizacija matrice in palice je prikazana na sliki 5. Zaradi osne simetrije je obravnavana samo polovica definicijskega območja.

Pri numerični analizi tehnološkega procesa mora imeti modeliran preoblikovanec zadostno dolžino, tako da dosežemo stacionarno stanje, pri katerem se vrednosti



Slika 5: Numerični model vlečenja palice
Figure 5: Numerical model for drawing of rod



Slika 6: Modela trenja uporabljen v numerični analizi
Figure 6: Friction model applied in numerical analysis

izračunanih napetosti, primerjalnih plastičnih deformacij itd. ustalijo.

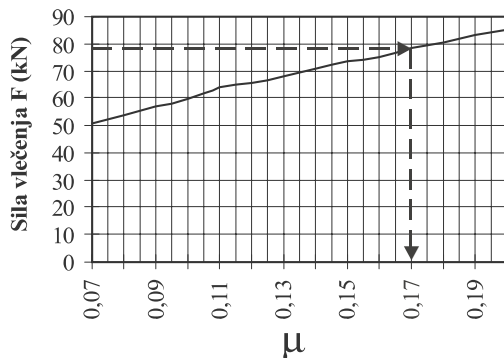
Ustrezna dolžina modela je določena na osnovi preiskovanj. Geometrija preoblikovanja je enaka tisti, s katero smo izvedli meritve sile vlečenja v industrijskih razmerah. Podobno, kot geometrija palice, je tudi geometrija orodja povzeta po vlečnem orodju (matrici), ki je bila uporabljena pri meritvi vlečne sile.

V numerični analizi sta preoblikovanec in matrica diskretizirana s štirivozliščnimi končnimi elementi SAXQ-4 (Structural Axisymmetric Solids with Enhanced Strain Field).

Za numerično analizo je bil uporabljen program za nelinearno analizo *ELFEN*. Pri analizi smo predpostavili, da se palica deformira elasto-plastično po Von Misesovem modelu z izotropnim utrjevanjem in da je orodje elastično. Numerična integracija po času je bila implicitna³.

3.2 Postopek za določevanje koeficienta trenja med vlečenjem

Koeficient trenja μ je bil določen po inverznem postopku^{4,5}, katerega cilj je bil določiti tisti koeficient



Slika 7: Določitev koeficienta trenja med vlečenjem
Figure 7: Determination of friction coefficient during drawing

trenja μ , pri katerem se bo izračunana sila ujemala z izmerjeno.

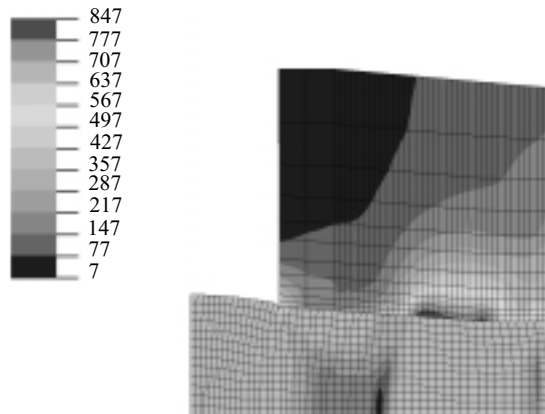
Za opis trenja je bil uporabljen matematični model, ki združuje Coulombov zakon trenja z zakonom o konstantni strižni napetosti^{6,7}, kot je prikazano na **sliki 6**. Maksimalna tangencialna napetost za stanje T1 je $\tau_{max}=50$ MPa, kar ustreza tornemu številu $m = 0,5$.

Za določitev trenja je bila opravljena serija analiz s koeficienti trenja med 0,07 in 0,20 s korakom 0,01. Rezultati so prikazani na **sliki 7**. Z diagrama je razvidno, da je pri izmerjeni sili $F=78,5$ kN koeficient trenja $\mu=0,17$.

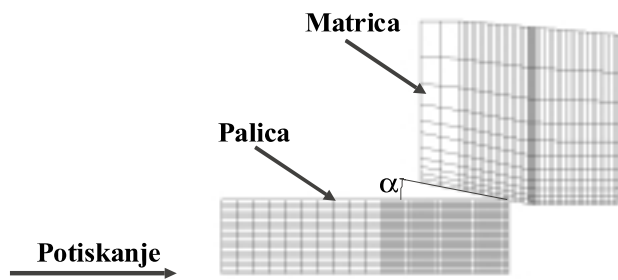
3.3 Analiza nakrčevanja palice za stanje T5

Pojav nakrčevanja palice pri potiskanju je bil analiziran za stanje T5. Preverjena je bila občutljivost procesa na spreminjanje koeficienta trenja in maksimalne strižne napetosti. Pri določevanju vpliva trenja na pojav nakrčevanja smo spreminjali koeficient trenja μ med med 0,20 in 0,57 pri konstantni strižni napetosti $\tau_{max}=80$ MPa. Nakrčevanje se ni pojavilo. Za določevanje vpliva velikosti maksimalnih strižnih napetosti na pojav nakrčevanja pa smo le-to spreminjali med 80 in 150 MPa pri konstantnem koeficientu trenja $\mu=0,3$. Vrednost koeficienta trenja $\mu=0,3$ je zgornja vrednost za mejno trenje⁶. Nakrčevanje nastopi, ko maksimalna strižna napetost preseže vrednost $\tau_{max}=120$ MPa. Velikost strižne napetosti ima tako mnogo večji vpliv na nastanek nakrčevanja palic kot pa koeficient trenja. Na podlagi analiz smo ugotovili, da je torno število m tisto, ki krmili proces potiskanja. Vrednosti tornega števila m , ki so nad 0,54 povzročijo nakrčevanje palic.

Na **sliki 8** je prikaz pojava nakrčevanja pri potiskanju palice, pri trenjskih robnih pogojih $\mu=0,3$ in $\tau_{max}=150$ MPa.



Slika 8: Nakrčevanje palice (polje primerjalnih napetosti)
Figure 8: Upsetting of rod (effective stress distribution)



Slika 9: Numerični model potiskanja palice
Figure 9: Numerical model for extrusion

3.4 Analiza spreminjanja kota orodja

Za nadaljnjo numerično obravnavo je bilo treba spremeniti diskretiziran model (**slika 5**), da pri večjih kotih orodja ne bi prihajalo do napak, zaradi slabe diskretizacije. Nov diskretiziran 2-D model potiskanja je na **sliki 9**. Nova diskretizacija je bila narejena na podlagi preskusov.

Za opis trenja je bil izbran enak model kot v poglavju 3.2. Orodje smo optimirali za potiskanje palic stanja T5 (materialne lastnosti za numerično analizo). Pri analizi smo uporabili koeficient trenja, izračunan na podlagi meritev sile vlečenja za stanje T1, $\mu=0,17$ in maksimalne strižna napetost $\tau_{\max}=80$ MPa (stanje T5). Kot α je z analizo določen na $0,5^\circ$ natančno. Rezultati so grafično prikazani v diagramu na **sliki 10**.

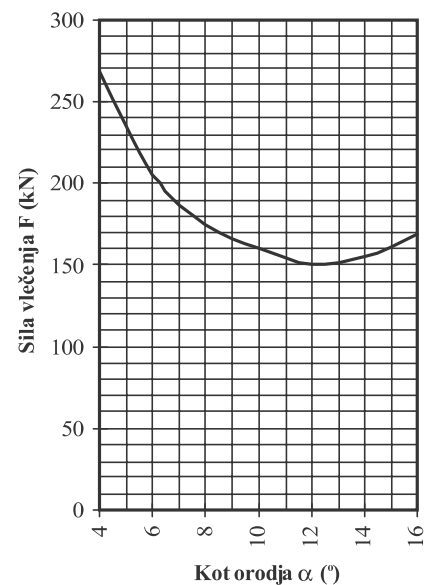
3.5 Rezultati

Z numerično analizo smo:

- določili koeficient trenja pri vlečenju palice, $\mu = 0,17$
- določili maksimalno vrednost tornega števila $m = 0,54$, pri katerem nastopi nakrčevanje palic pri potiskanju
- optimirali kot orodja iz $\alpha=4^\circ$ na $\alpha=11,5^\circ$
- zmanjšali silo potiskanja iz $F=269$ kN na $F=146$ kN.

4 SKLEPI

Sprememba tehnologije izdelave palic na kombiniranem potisno-vlečnem stroju zahteva poznanje robnih pogojev trenja in optimiranje orodja glede na zmanjševanje sil potiskanja. V ta namen sta bili narejeni eksperimentalna in numerična analiza. Z eksperimentalno analizo so bili določeni podatki za postavitve robnih pogojev trenja in mehanske lastnosti preoblikovanega materiala. Z numerično analizo je bil iz sile vlečenja določen koeficient trenja ter optimiran kot



Slika 10: Določitev optimalnega kota orodja
Figure 10: Determination of optimal die angle

matrice. Z optimalnim kotom orodja je možno silo potiskanja zmanjšati iz 269 kN ($\alpha = 4,0^\circ$) na 146 kN ($\alpha = 11,5^\circ$). Nakrčevanje palic nastopi, ko so presežene vrednosti maksimalne strižne napetosti ($\tau_{\max} > 120$ MPa) in tornega števila ($m > 0,54$), pri koeficientu trenja $\mu = 0,30$. Koeficient trenja ($\mu = 0,17$), ki je bil po inverznem postopku določen iz sile vlečenja, se dobro ujema z eksperimentalno določenim koeficientom trenja ($\mu = 0,15$) po postopku Burgdorf.

Z optimiranjem kota votlice lahko občutno zmanjšamo potisno silo.

5 LITERATURA

- ¹ P. Cvahte, V. Dragojevič, P. Fajfar, T. Rodič, Measurement of forces during extrusion and drawing of Al rods, *Kovine, zlitine, tehnologije*, 33 (1999) 249-252
- ² J. R. Davis ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1994
- ³ D. R. J. Owen, E. Hinton, Finite Elements in Plasticity, University College of Swansea, U.K., 1980
- ⁴ Rodič, T. and Grešovnik, I.: A Computer System for Solving Inverse and Optimization Problems, *Engineering Computations*, 15 (1998) 6-7, 893-907
- ⁵ Doltsinis, I.St.; Rodič, T.: Process Design and Sensitivity Analysis in Metal Forming, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 45 (1999) 661-692
- ⁶ K. Lange, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Book Company, New York, 1985
- ⁷ Z. Mroz, S. Stupkiewicz et al., Models of Friction and Wear in Metal Forming, Project: COPERNICUS ERB3512PL940841, Warsaw, 1995