

YUTRIB'05
9^{ta} JUGOSLIVENSKA KONFERENCIJA O TRIBOLOGIJI
JUN.15-18. 2005
Kragujevac, Srbija i Crna gora

**UVOD U TRIBOLOŠKA ISTRAŽIVANJA
PRI OBLIKOVANJU MIKRO DELOVA
DUBOKIM IZVLAČENJEM**

Milica Samardžić, Institut za automobile, Zastava automobili, Kragujevac
Milentije Stefanović, Mašinski fakultet, Kragujevac
Srbislav Aleksandrović, Mašinski fakultet, Kragujevac
Tomislav Vujinović, Čajevec MEGA, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

Abstract

Due to the trend of miniaturization of products, the significance of procedures for their production is constantly growing. Deep drawing, in addition to bulk forming, represents a procedure which can be used for production of such parts. In the course of that, many problems can appear as the consequence of the fact that technology cannot be directly transferred from macro to micro parts.

One of the effects of micro parts dimensions is the change of friction conditions in relation to parts of usual size. It has been observed that, in the same forming conditions, friction coefficient has higher value at micro forming in relation to macro forming. The effect of micro parts size also influences the other aspects of the process, such as construction of tools and machines.

The paper gives survey of problems which appear at miniaturization and of results of researches of influence of micro parts size effects onto the friction process at deep drawing obtained so far.

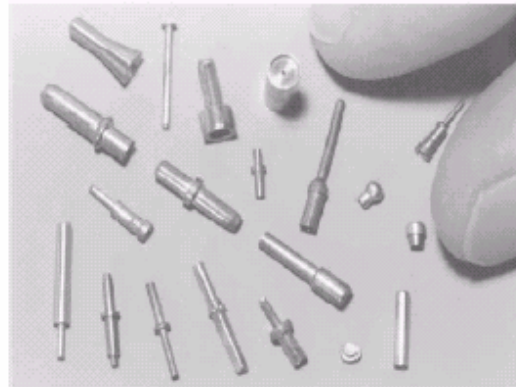
Key words: *micro forming, size effect, tribology, deep drawing*

1. UVOD

U poslednjih 7 godina vrednost ugrađenih mikrodelova u SAD porasla je sa 15 na 35 milijardi dolara što dovoljno ukazuje na sve veći značaj njihove izrade [1].

Proizvodnja mikro delova postaje sve prisutnija zbog trenda smanjivanja dimenzija proizvoda. Zahtevi za smanjivanjem dimenzija dolaze ne samo od potrošača koji žele manje elektronske uređaje sa povećanim brojem funkcija već su to potrebe pojedinih oblasti kao što su računari, mobilni telefoni, medicinski uređaji itd. Ovi proizvodi pored ostalog sadrže i određene mehaničke delove kao što su: ručice, konektorski pinovi, sitni zavrtnjevi, kontaktne opruge itd. Na slici 1 prikazani su neki mikro delovi dobijeni istiskivanjem.

Od 1980 započinju razmišljanja da se pored klasičnih postupaka obrade rezanjem, kao što su struganje i glodanje, koriste i postupci izrade plastičnim deformisanjem. Tada je zapaženo da ne postoje potrebna osnovna inženjerska znanja o



Sl. 1: *Primeri mikro delova*

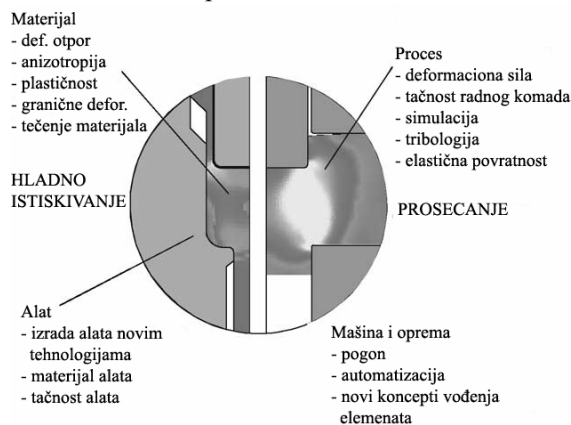
mikro oblikovanju i da nema primera radova iz ove oblasti . Od tog vremena započinju određena istraživanja, posebno u oblasti obrade istiskivanjem i dubokim izvlačenjem.

2. ELEMENTI SISTEMA MIKRO OBLIKOVANJA

Pod mikro oblikovanjem podrazumeva se izrada delova čije su dimenzije reda veličine mikrometra [2]. Klasični postupci obrade se mogu koristiti i kod mikrodelova ali se pri tome javljaju mnogi problemi zbog malih vrednosti dimenzija. Mikro oblikovanje se može uslovno podeliti na tri oblasti primene : zapreminsko oblikovanje, oblikovanje lima i oblikovanje profila.

Slično makro obradnom sistemu mikro, sistem se sastoji iz četiri sastavna dela (sl. 2):

- materijal,
- proces,
- alat,
- mašina i oprema.



Sl. 2: Elementi sistema mikro oblikovanja

Pored problema koji postoje i kod postupaka obrade rezanjem kao što su: geometrija alata, habanje, termička obrada materijala, javljaju se određene poteškoće pri plastičnom oblikovanju kao posledica smanjenih dimenzija delova.

Pri oblikovanju mikro delova uočava se promena karakteristika materijala. Deformacioni otpor, anizotropija, plastičnost i granične deformacije zavise od reda veličine dimenzija i to se mora uzeti u obzir pri analizi procesa [3]. Takođe parametri procesa kao što su: deformaciona sila, elastična povratnost, trenje, zavise od veličine dimenzija.

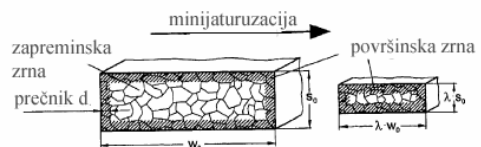
Osnovni problem vezan za alat predstavlja njegova izrada, jer je veoma složeno napraviti alat malih dimenzija. Da bi se to rešilo uvode se i nove tehnologije izrade. Npr. alat sa dimezijama manjim od 200 nm izrađuje se snopom elektronskih zraka pomoću litografskog postupka.

Pored toga javljaju se problemi vezani za mašine i prateću opremu. Neodgovarajuće vrednosti zazora između alata mogu rezultirati dobijanjem potpuno neodgovarajućih komada. Vađenje delova je otežano zato što su površine veoma male a težina delova manja u odnosu na adhezione sile. Razvoj adekvatne merne tehnologije za delove i alat takođe predstavlja problem. Izrada delova zahteva radni prostor sa strogo definisanim karakteristikama (tzv clean room) čime se proces dodatno poskupljuje.

3. PROCES MIKRO-OBLIKOVANJA

Istraživanja su pokazala da pri oblikovanju mikro delova neki parametri ostaju isti i pored smanjivanja dimenzija. Mikrostruktura materijala je nezavisna od veličine dimenzija. Takođe i topografija površine ostaje nepromenjena. Usled smanjivanja dimenzija odnos između dimenzija delova i parametara mikrostrukture ili topografije površine se menja. To dovodi do tzv. efekta veličine. On veoma utiče na ponašanje materijala i proces trenja.

Istraživanja mikro oblikovanja i efekata minijaturizacije se vrše uobičajenim testovima koji su se dosada koristili pri čemu se vodi računa o poštovanju geometrijske sličnosti. To znači da se dimenzije komada i alata određuju preko faktora geometrijske sličnosti λ . Ograničavajući vreme odvijanja procesa na vrednost 1 i brzina deformisanja se izražava preko faktora λ .



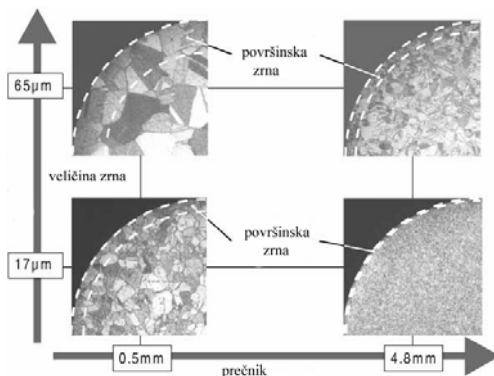
Sl. 3: Promena odnosa površinskih i zapreminskih zrna pri minijaturizaciji

3.1 Efekat reda veličine dimenzija

Prema postojećoj teoriji smatra se da su vrednosti napona nezavisne od dimenzija komada ali su istraživanja pokazala da pri minijaturizaciji dolazi do pada deformacionog otpora. Uticaj dimenzija na deformacioni otpor ispitivan je preko testova zatezanja i sabijanja pri čemu postoji geometrijska sličnost procesa.

Eksperimenti su pokazali da pri minijaturizaciji dolazi do pada deformacionog otpora. Kod testa zatezanja pri smanjivanju debljine lima sa 2 mm na 0,17 mm ostvaren je pad deformacionog otpora od 30%. Testovi su izvršeni pri istoj veličini zrna što ukazuje da je smanjenje otpora nastalo usled minijaturizacije i nije posledica različite strukture materijala.

Smanjenje deformacionog otpora se objašnjava pomoću tzv modela površinskih slojeva koji se zasniva na činjenici da se materijal u oblasti mikro dimenzija ne može posmatrati kao homogeni kontinuum. Presudan kriterijum je odnos veličine zrna prema dimenzijama komada (cilindra kod testova). Kod mikro delova udeo površinskih zrna



Sl. 4: Mikroskopska slika površinskih zrna

je veoma veliki u poređenju sa zapreminskim (sl. 3, [1]).

Iz teorije fizike metala je poznato da slobodna površinska zrna imaju manju tvrdoću u odnosu na zapreminska što se može objasniti različitim mehanizmima pomeranja dislokacija i činjenicom da su manje izloženi umanju. Zbog toga je deformacioni otpor koji je određivan testovima zatezanja i sabijanja u funkciji od stepena učešća površinskih zrna. Povećanje učešća površinskih zrna sa promenom veličine zrna i smanjivanjem dimenzija može se videti na slici 4, [2].

Kod testa zatezanja limova dolazi do još jedne pojave koja je posledica efekta veličine. Koeficijent normalne anizotropije opada sa smanjivanjem dimenzija. To znači da se obradivost pogoršava sa smanjivanjem dimenzija jer dolazi do intenzivnijeg stanjivanja što predstavlja posebno negativnu pojavu pri dubokom izvlačenju. Takođe pri minijaturizaciji se smanjuje ravnomerno izduženje.

4. TRIBOLOŠKI ASPEKTI MIKRO OBLIKOVANJA

Mikrotribologija predstavlja novu oblast nauke i tribologije ali sa izraženom tendencijom brzog napredovanja. Mikrotribologija predstavlja jednu vrstu mosta između nauke i inženjerstva [5]. Tribološke karakteristike mikrodelova u velikom stepenu zavise od površinskih interakcija. Atomski mikroskopi i specijalni mikro tribometri omogućavaju lakše određivanje topografije površine i mehaničkih karakteristika .

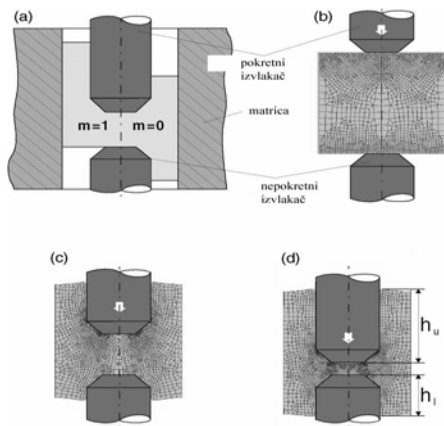
4.1 Testovi za određivanje koeficijenta trenja

Uticaj smanjivanja dimenzija na trenje ispitivan je preko testova sabijanja i dvostukog istiskivanja. Kod njih se prati promena unutrašnjeg prečnika komada. Istraživanja pokazuju da trenje raste sa smanjivanjem dimenzija u slučaju podmazivanja uljem dok u slučaju kad nema podmazivanja trenje ne zavisi od dimenzija.

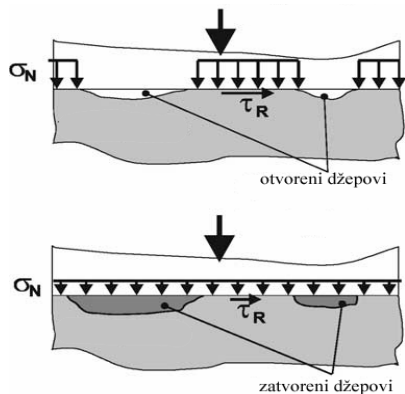
Prednost testa dvostrukog istiskivanja u odnosu na test sabijanja je u većem rastu površinske zone, većim deformacijama i većem pritisku između komada i alata. Time su uslovi mnogo sličniji stvarnom procesu istiskivanja. Na slici 5, [2] je prikazan test sa simulacijom po fazama.

Pripremak oblika cilindra se postavlja između pokretnog i nepokretnog izvlakača. Kada nema trenja visine oba dela su jednake. Sa povećanjem trenja oblikovanje u donjem delu postaje otežano i ostvaruje se manja visina u odnosu na gornji deo komada. Rezultati su pokazali da dolazi do izrazitih razlika u vrednostima koeficijenta trenja. Pri smanjivanju dimenzija utvrđen je porast koeficijenta trenja pri čemu se u nekim slučajevima javilo povećanja od 20 puta.

4.2 Model otvorenih i zatvorenih džepova



Sl. 5: Test dvostrukog istiskivanja sa prikazom po fazama

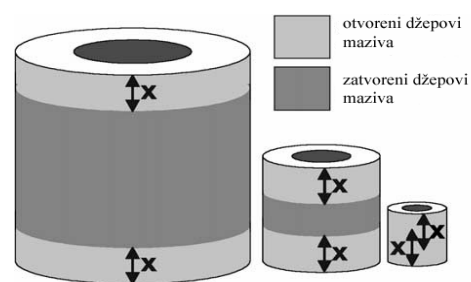


Sl. 6: Otvoreni i zatvoreni džepovi maziva

Pojava trenja pri oblikovanju delova može se objasniti preko modela otvorenih i zatvorenih džepova maziva koji se još nazivaju i dinamički i statički džepovi (slika 6). Kada se radna sila prenosi na komad kod koga je ostvareno podmazivanje, vrhovi neravnina (pikovi) se poravnavaju t.j. počinju da se plastično deformišu usled čega raste pritisak u mazivu koji se zadržava u dolinama profila. Doline profila koje se nalaze u ivičnim zonama komada ne mogu da zadrže mazivo. To su tzv. otvoreni džepovi maziva. Pri povećanju pritiska mazivo se istiskuje i ne može

da se ostvari prenos sile. U tom slučaju radna sila deluje samo na vrhovima neravnina pri čemu se povećava pritisak, ostvaruje se veće poravnanje neravnina i raste koeficijent trenja. Zatvoreni džepovi se ne nalaze na ivici komada tako da mazivo biva zarobljeno i izloženo dejstvu pritisku tokom oblikovanja. Mazivo pomaže da se prenese radna sila čime se smanjuje pritisak na pikovima usled što omogućava smanjenje koeficijenta trenja.

Primenjujući ovaj model na test istiskivanja uočava se da mora postojati uticaj efekta veličine na odnos otvorenih i zatvorenih džepova kao što je dato na slici 7, [2].



Slika 7: Uticaj minijaturizacije na međusobni odnos otvorenih i zatvorenih džepova sa mazivom

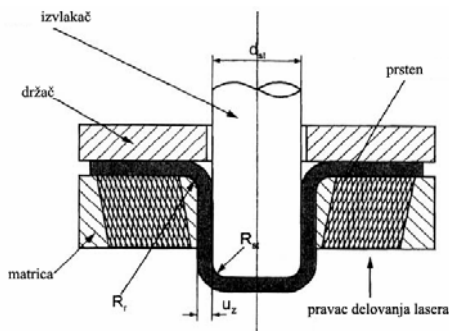
Smatrajući da zona sa otvorenim džepovima ima stalnu širinu pri smanjivanju dimenzija raste njen udeo. Ovakvo objašnjenje je potvrđeno brojnim istraživanjima.

5. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA U OBLASTI DUBOKOG IZVLAČENJA

Većina obavljenih istraživanja je izvršena za postupke savijanja i prosecanja. Mikro duboko izvlačenje je bilo predmet manjeg broja istraživanja zbog kompleksnijeg uticaja anizotropije i trenja na sam proces.

Oblikovanje mikro delova odvija se na isti način kao i dobijanje delova uobičajenih dimenzija. /6/.

Istraživanja koje je izvršio Saotome, [4] sa čeličnim limom debljine 0,1 mm pokazala su da postoji uticaj debljine lima na stepen izvlačenja. Posmatrajući porast relativnog prečnika (definiše se kao odnos prečnika izvlačka sa debljinom lima) došlo se do činjenice da dolazi do opadanja stepena izvlačenja sa njegovim povećanjem. Za vrednosti relativnog prečnika ispod 10 uočeno je

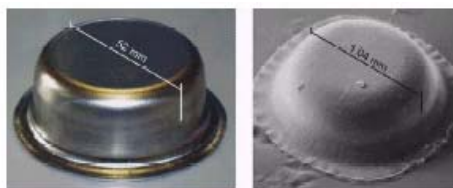


Sl. 8: Konceptija alata sa korišćenjem lasera

da savijanje predstavlja dominantan mehanizam deformisanja s obzirom da je uticaj sile držanja minimalan.

S obzirom na pogoršavanje karakteristika materijala i smanjenje obradivosti pri smanjenju dimenzija, Erhardt je predložio koncept alata sa delovanjem lasera na određene zone kao na slici 8, [1]. Laserski zrak deluje na obod kroz prsten od dijamanta ili safira. Delujući na obod gde se ostvaruju velike deformacije poboljšavaju se uslovi tečenja materijala. I neki drugi autori takođe smatraju da se korišćenjem lasera može poboljšati obradivost pri dubokom izvlačenju [7].

U istraživanjima Vollerstena, [1] izvršeno je upoređivanje procesa trenja pri izvlačenju dva dela koji su dati na slici 9. Dobijeni rezultati su pokazali da je koeficijent trenja veći kod mikro delova. Takođe registrovana je razlika u vrednostima koeficijenta tenja na mestima oboda i zaobljenja matrice kao i zavisnost koeficijenta trenja od pritiska.



d=50 mm; s=1 mm d=1 mm;
s=0,002mm

Sl. 9: Makro i mikro deo dobijeni

Takođe registrovana je razlika u vrednostima koeficijenta tenja na mestima oboda i zaobljenja matrice kao i zavisnost koeficijenta trenja od pritiska. Pored prethodnih zapažanja

primećena je razlika u uticaju količine maziva na trenje. Kod mikro delova sa povećanjem količine maziva zapažen je izrazitiji pad koeficijenta trenja.

6. ZAKLJUČAK

Postupak dubokog izvlačenja nudi određene mogućnosti pri izradi mikro delova ali zbog malih dimenzija javljaju se brojni problemi. Razlozi su sledeći:

- udeo površinskih zrna prema zapremninskim raste sa smanjivanjem veličine delova,
- adhezione sile (površinski pritisak) imaju veći efekat kod mikro delova,
- raste uticaj parametara zrna na proces,
- odnos zatvorenih džepova maziva u ukupnoj zoni podmazivanja se smanjuje sa minijaturizacijom.

Gore navedeni razlozi su objedinjeni korišćenjem pojma efekat veličine. Upravo zbog njegovog postojanja nije moguće direktno primeniti postojeću tehnologiju sa makro na mikro oblikovanje.

Efekat veličine se odražava na tribologiju procesa. Pri istim obradnim uslovima utvrđeno je da je koeficijent trenja veći kod delova sa mikro dimenzijama.

Uticaj efekta veličine utiče i na ostale aspekte procesa kao što je uvođenje novih konstruktivnih rešenja (posebno kod izrade alata i izbora koncepta mašine).

Pošto pri minijaturizaciji dolazi do pogoršavanja karakteristika materijala postoje razmišljanja o korišćenju tehnologija kojima će biti poboljšana obradivost kao što su upotreba lasera i polutopla obrada.

7. LITERATURA

- [1] F. Vollersten, Z. Hu, H. Schulze Niehoff, C. Theiler: State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing, Journal of materials processing technology 151, 2004, 70-79.
- [2] U.Engel, R. Eckstein: Microforming-from basic research to its realization, Journal of materials processing technology, 125-126, 2002, 34-44.

- [3] T. A. Kals, R. Eckstein: Miniaturization in sheet metal workig, Journal of materials processing technology, 103, 2000, 95-101.
- [4] Y. Saotome, K. Yasuda, H. Kaga: Microdeep drawability of thin sheet steels, Journal of materials processing technology, 113, 2001, 641-647.
- [5] Z. Rymuza K. Kato: Micro tribology, editorial, Wear, 254, 2003, 931.
- [6] Micro forming / Micro-deep-drawing, www.bias.de
- [7] X. Peng, Y. Qin, R. Balendra: Analysis of laser-heating methods for micro-parts stamping application, Journal of materials processing technology, 150, 2004, 84-91.