

DK 539.373:691.7

Preoblikovanje kovin z velikimi hitrostmi

FRANC GOLOGRANC

Med razvojem tehnike preoblikovanja je človek nenehno izpopolnjeval izdelovalna sredstva in povečeval njihove dimenzije, moč in energijo. Vendar je bila naposled dosežena kritična meja, nad katero iz tehničnih in gospodarskih razlogov ni kazalo več povečevati omenjenih parametrov. Tako so normalne hitrosti, kakršne dosega orodje pri udarcu na nakovalo pri klasičnih padalnih kladivih 5...6 m/s, pri kladivih z dodatno pospešenim ovnom 8...9 m/s, medtem ko se giblje orodje pri delovnem gibu na običajnih prešah s hitrostjo, ki znaša komaj 0,25...1,25 m/s. Desetletja smo imeli te vrednosti za nekako zgornjo praktično mejo tehničnih zmogljivosti preoblikovalnih strojev in postopkov.

Vse kaže, da smo ta čas na pomembni prelomnici v razvoju preoblikovalne tehnike. Za izreden napredek, ki ga zaznamujemo v zadnjih letih, pa prihajajo pobude zlasti iz drugih vej tehnike. Zlasti na področju tehnologije kovin sta znanost in praksa mnogo pripomogli k širši industrijski uporabi tehnike preoblikovanja in njenih postopkov. Skokovit vzpon letalstva ter jedrske in raketne tehnike so omogočila predvsem nekatera nova gradiva z veliko toplotno in mehansko trdnostjo (posebne vrste jekel ter titan, berilij, niob, cirkonij idr.). Ker je ta gradiva s klasičnimi tehnološkimi postopki zelo težko obdelovati ali pa sploh ne, je bila njihova obdelava do nedavna zelo problematična. Vzporedno z materiali je bilo torej treba razvijati tudi povsem novo tehnologijo in nova izdelovalna sredstva, ki so pravzaprav šele odprla možnosti za oblikovanje delov iz takih gradiv in ustvarila možnosti za njihovo gospodarno izdelavo.

V Združenih državah Amerike, Sovjetski zvezi in nekaterih evropskih deželah že nekaj let razvijajo in preskušajo vrsto novih preoblikovalnih postopkov, ki potekajo pri skrajno velikih hitrostih in visokih tlakih. Ti postopki se razlikujejo od klasičnih načinov preoblikovanja predvsem po tem, da poteka prenos energije na obdelovance kar za več velikostnih redov hitreje, da teče potemtakem proces plastične deformacije z izredno naglico. Velika koncentracija energije v zelo kratkem času (nekaj mikrosekund) ima za posledico veliko moč, ki jo lahko oddajajo tovrstne naprave.

Ceprav se omenjeni postopki po izvoru oziroma načinu prenosa energije močno razlikujejo, jih glede na zgoraj omenjeno značilnost lahko zajamemo s skupnim imenom: oblikovanje z velikimi hitrostmi (high energy rate forming). Sem spadajo predvsem eksplo-

zijsko oblikovanje, oblikovanje z električno energijo ter oblikovanje z visokotlačnimi kladivi. V nasprotju s klasičnimi postopki preoblikovanja na mehaničnih ali hidravličnih prešah oziroma na parnih ali zračnih kladivih dobivamo pri teh postopkih oziroma napravah potrebno preoblikovalno energijo z detonacijo razstreliv, s trenutno ekspanzijo močno komprimiranih plinov, s kratkotrajnim razelektrenjem ali z elektromagnetnimi impulzi. Pridobljena energija deluje na obdelovance neposredno ali pa posredno rabi za pogon (premikanje) ustreznih orodij. V tabeli I so podane nekatere glavne karakteristike postopkov preoblikovanja z velikimi hitrostmi, za primerjavo pa so dodani tudi podatki za klasični način preoblikovanja na strojnih kladivih.

Pri vsakem preoblikovalnem postopku je za spremembo oblike obdelovance potrebno določeno deformacijsko delo, ki ga morajo opraviti zunanje sile. Naloga preoblikovalnega stroja je, da z ustreznimi oblikovanjem orodjem deluje na obdelovance z določeno silo in jim med delovnim procesom oddaja potrebno energijo. Razpoložljivo kinetično energijo gibajočih se mas preoblikovalnega stroja (orodja) lahko izrazimo z enačbo

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

kjer je m masa orodja oziroma padajočih delov stroja in v hitrost orodja v trenutku dotika z obdelovancem.

Ce primerjamo obe veličini, to je maso in hitrost, ki sta zastopani v zgornji energijski enačbi oziroma njun delež pri celotni kinetični energiji, ki se sprošča pri posameznih načinih preoblikovanja, dobimo npr. za energijo $E_k = 1000$ kpm vrednosti, prikazane v tabeli II.

Iz tabele vidimo, da je pri oblikovanju z velikimi hitrostmi vpliv drugega člena zelo velik, ne samo zato, ker se pojavlja hitrost v enačbi z drugo potenco, temveč tudi zaradi tega, ker poteka tu proces preoblikovanja neprimerno hitreje. Medtem ko lahko povečujemo preoblikovalno energijo pri običajnih postopkih plastičnega preoblikovanja v glavnem le linearno s povečanjem mase gibajočih se delov stroja, je z visokimi tlaki in velikimi hitrostmi, kakršne so na voljo pri omenjenih novih metodah, mogoče doseči tudi znatno večje energijske vrednosti. Čeprav se izkorišča za preoblikovanje samo del sproščene energije, je pridobljeno deformacijsko delo znatno večje, hkrati pa tudi cenejše.

Tabela I. Karakteristike preoblikovanja z velikimi hitrostmi

Način preoblikovanja (vrsta stroja)	Trajanje procesa s	Moč kpm/s	Hitrost preoblikovanja m/s	Specifični pritiski kp/mm ²
padalno kladivo	10 ⁻²	10 ⁶	5...6	10... > 100
visokotlačno kladivo	10 ⁻³	10 ⁷	30...40	
elektrohidravlično preoblikovanje	10 ⁻⁴	10 ⁸	200	25...70
elektromagnetno preoblikovanje	10 ⁻⁵	10 ⁹ ...10 ⁷	300	
eksplozijsko preoblikovanje				
a) tekoč prenosni medij	10 ⁻⁵	10 ⁹	...300	35...280
b) plinast prenosni medij	10 ⁻⁷	10 ¹¹	> 300	60... > 600

Tabela II.

Način preoblikovanja ($E_k = 1000 \text{ kpm}$)	m delež mase kp	v^2 delež hitrosti m^2/s^2	Razmerje $\frac{v^2}{m}$
s padalnim kladivom	56	36	0,65
z visokotlačnim kladivom	1,25	1600	$1,3 \cdot 10^3$
z električno energijo	0,033	$6 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^5$
z razstrelivi:			
a) tekoč prenosni medij	0,033	$6 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^5$
b) plinast prenosni medij	0,0022	$9 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^8$

Vpliv hitrosti delovanja zunanji sil je pri plastičnem preoblikovanju nasploh še zelo malo raziskan. To velja zlasti za aperioidične procese preoblikovanja (npr. globoko vlečenje, utopno kovanje idr.), pri katerih se hitrost med deformacijo spreminja. Pri preoblikovanju z velikimi hitrostmi so razmere še mnogo bolj zamotane. Zato je verjetno, da je tudi mehanizem plastične deformacije v takih pogojih drugačen kakor pri klasičnih preoblikovalnih postopkih. Preskusi so pokazali, da imajo celo nekatere kovine, ki jih je sicer komaj mogoče obdelovati, pri tako velikih hitrostih izredno dobre plastične lastnosti.

V nadaljnjem naj bodo v obravnavi samo tisti postopki, pri katerih povzročajo plastično deformacijo hipne obremenitve obdelovancev z visokimi tlaki, ne da bi nanje delovalo posebno orodje. To so zlasti eksplozijsko oblikovanje ter postopki neposrednega oblikovanja z električno energijo. Hitrost obremenitve, to je časovna sprememba napetostnega stanja, ima pri teh postopkih velikostni red hitrosti zvoka. Te hitrosti seveda ne smemo zamenjavati s hitrostjo, s kakršno se giblje pri preoblikovanju orodje oziroma s kakršno se premika obdelovanec relativno nasproti orodju.

Hipno spremembo tlaka in gostote, ki se širi skozi medij z nadzvočno hitrostjo, imenujemo udarni val (shock wave). Udarni valovi, ki lahko nastajajo v plinastih, tekočih in trdnih snoveh, so v splošnem elastični valovi z velikimi amplitudami tlaka, gostote in temperature [1]. V čelu udarnega vala, ki ga shematično prikazuje slika 1, tlak hipoma naraste do največje vrednosti, za njim pa polagoma zopet upada. Če zadene tak udarni val, ki nastaja npr. pri detonaciji razstreliva, trdno snov, npr. kovino, se po njej širi, pri tem pa zaradi izgube energije pri prehodu skozi medij polagoma slabi, slika 2. V tekočinah in trdnih snoveh ima čelo udarnega vala določeno končno širino, tako imenovano kompresijsko cono, ki je odvisna od viskoznosti, stisljivosti, toplotne prevodnosti in faznih pretvorb snovi. Hitrost, s kakršno se udarni val razširja po trdnem mediju, je odvisna od lastnosti materiala in oblike predmeta. Podobno kakor pri zvočnem valovanju se razširjajo udarni valovi v trdnih telesih longitudinalno in transversalno. Hitrosti razširjanja in nekatere druge lastnosti udarnih valov so dandanes znane in jih je mogoče povzeti iz literature [2]. Značilno za udarne valove je, da se na mejah trdnih snovi odbijajo. Ker se tlačni valovi vračajo kot natezni, lahko povzročajo velike lokalne preobremenitve in celo porušitev materiala. Čeprav so zelo kratkotrajni, imajo torej veliko preoblikovalno in rušilno moč.

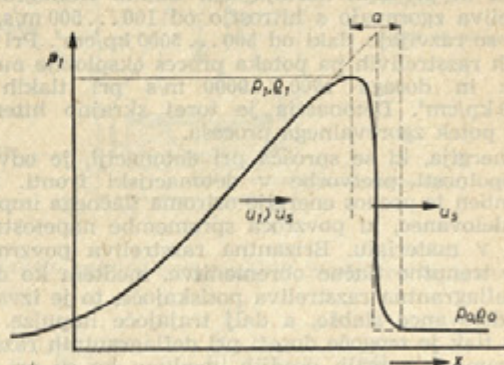
Zaradi hipne vsestranske obremenitve se material pod vplivom visokega tlaka stisne. To hidrostatično stanje pa z odmikanjem valovnega čela preneha. Velike

napetosti, ki delujejo za tem na obdelovanec, povzročajo plastično deformacijo materiala, ki nastaja zaradi translacije v drsnih ravninah kristalnih zrn, mehaničnega dvojenja ter nastanka in gibanja dislokacij. Ker se ne glede na vrsto mehanizma deformacije porablja energija, je udarno valovanje dušeno. Zaradi tega z oddaljenostjo od centra valovanja drsenje in gibanje dislokacij pojemata. Plastične deformacije so vedno manjše in prehajajo nazadnje v elastične.

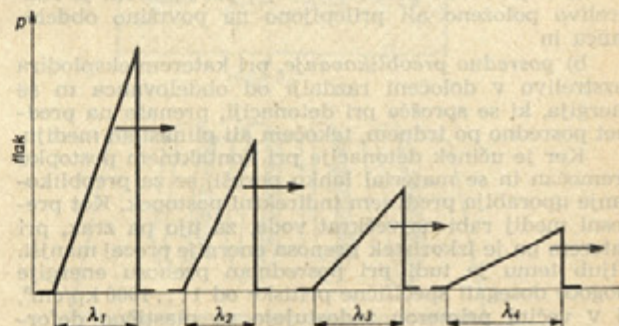
Nekateri dosednji preskusi pri eksplozijskem oblikovanju kažejo, da nastajajo v kovinah pod vplivom močnih dinamičnih obremenitev in velikih hitrosti dodatne strukturne spremembe, ki so posledica mehaničnega dvojenja, anomalnih translacij, faznih pretvorb, nastajanja praznin in intersticijskih atomov [3]. Te strukturne spremembe lahko vplivajo na posamezne lastnosti materiala (trdoto, mejo plastičnosti, žilavost, staranje), tudi če material ni imel bistvenih plastičnih deformacij. Ni še dognano, ali so za to odgovorni primarni tlačni ali odbojni natezni valovi. Struktura udarnega valovanja je namreč zelo zapletena. Ugotovljeno je, da se dislokacije nasploh ne morejo gibati tako hitro kakor čelo udarnega vala. Zato se koncentracija praznih mrežnih mest in intersticijskih atomov poveča, to pa lahko v znatni meri spreminja lastnosti materiala. Ta čas tečejo številne raziskave, ki naj bi podrobneje pojasnile mehanizem plastične deformacije in strukturne spremembe pri teh ekstremnih razmerah.

Eksplozijsko oblikovanje

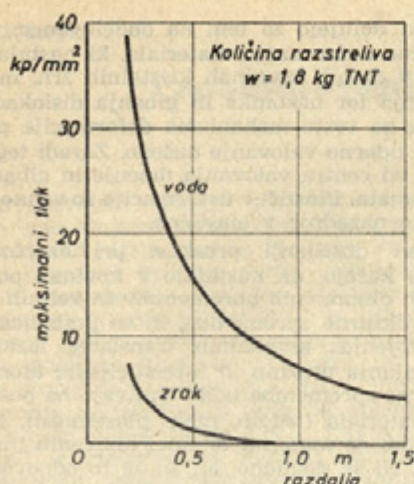
Pri oblikovanju z eksplozivom se za plastično deformacijo materiala izkorišča energija, ki se sprošča pri detonaciji razstreliva. Ta energija se prenaša na okolico, to je na medij, ki ga obdaja, v obliki kratkotrajnih tlačnih impulzov. Kakor vemo, je eksplozija eksoter-



Sl. 1. Shematični prikaz udarnega vala
 x — smer širjenja, a — valovno čelo



Sl. 2. Shema širjenja udarnega vala in pojemanja amplitude s časom in oddaljenostjo od izvora



Sl. 3. Sovisnost med maksimalnim tlakom, ki deluje na površino obdelovanca, in oddaljenostjo eksplozivnega naboja

mična kemična reakcija, pri kateri se razstrelivo v zelo kratkem času pretvarja v plin in se pri tem razvije mnogo toplote. Posledica tega je, da nastajajo v detonacijski coni zelo visoke temperature (več tisoč stopinj) in zelo visoki tlaki, ki se razširjajo na vse strani.

Za preoblikovanje kovin rabijo zdaj raznovrstna razstreliva (smodnik, pokalni plin, TNT, Tetryl, RDX, PETN, dinamit), ki se razlikujejo ne samo po fizikalnih in kemičnih lastnostih, temveč tudi po obliki in načinu uporabe. Po detonacijskem učinku jih lahko delimo v dve skupini: v deflagrantna in brizantna razstreliva. Razlika med njimi je predvsem v hitrosti zgorevanja in pri tem nastajajočih tlakih. Deflagrantna razstreliva zgorevajo s hitrostjo od 100...500 m/s, pri čemer se razvijajo tlaki od 500...5000 kp/cm². Pri brizantnih razstrelivih pa poteka proces eksplozije mnogo hitreje in dosega 1000...9000 m/s pri tlakih do 300.000 kp/cm². Detonacija je torej skrajno hiter in silovit potek zgorevalnega procesa.

Energija, ki se sprošča pri detonaciji, je odvisna od popolnosti pretvorbe v detonacijski fronti. Zelo pomemben je prenos energije oziroma tlačnega impulza na obdelovanec, ki povzroča spremembe napetostnega stanja v materialu. Brizantna razstreliva povzročajo močne trenutne tlačne obremenitve, medtem ko delujejo deflagrantna razstreliva potiskajoče, to je izvajajo na obdelovance slabše, a dalj trajajoče impulze. Potreben tlak je mogoče doseči pri deflagrantnih razstrelivih samo v zaprtih orodjih, medtem ko so pri brizantnih razstrelivih orodja odprta.

Glede na lego eksploziva nasproti obdelovancu razlikujemo:

a) neposredno preoblikovanje, pri katerem je razstrelivo položeno ali prilepljeno na površino obdelovanca in

b) posredno preoblikovanje, pri katerem eksploziva razstrelivo v določeni razdalji od obdelovanca in se energija, ki se sprošča pri detonaciji, prenaša na predmet posredno po trdnem, tekočem ali plinastem mediju.

Ker je učinek detonacije pri kontaktnem postopku premočan in se material lahko poruši, se za preoblikovanje uporablja predvsem indirektni postopek. Kot prenosni medij rabi največkrat voda, za njo pa zrak, pri katerem pa je izkoristek prenosa energije precej manjši. Kljub temu je tudi pri posrednem prenosu energije mogoče dosegati specifične pritiske od 1...1000 kp/cm², ki v večini primerov zadostujejo za plastično deformacijo materiala.

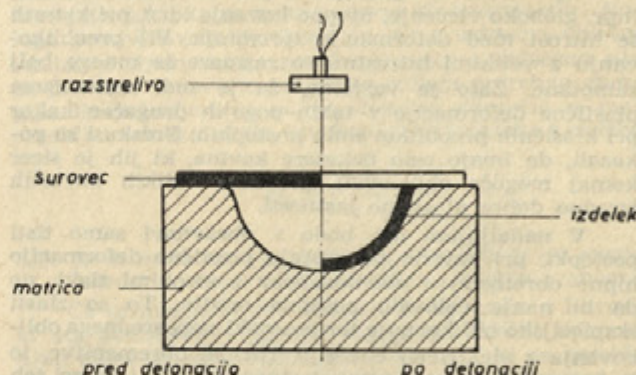
Velikost specifičnega pritiska, ki deluje na obdelovanec, je odvisna od vrste in količine razstreliva, od

oblike naboja in njegove oddaljenosti od predmeta, od vrste sredstva za prenos energije ter od nekaterih okoliščin, ki lahko vplivajo na udarni učinek, npr. odboj tlačnih impulzov. Na sliki 3 je prikazan diagram odvisnosti maksimalnega specifičnega pritiska, ki deluje na površino obdelovanca, od razdalje eksploziva za dve najvažnejši prenosni sredstvi — vodo in zrak.

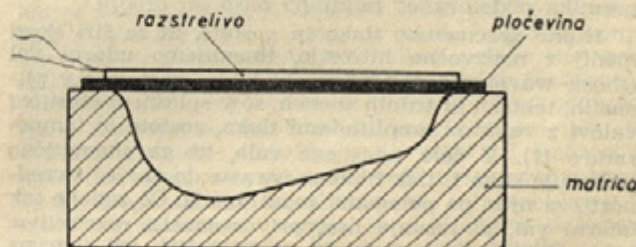
Pri izbiri vrste razstreliva in določanju potrebne količine je treba upoštevati, da so dopustne specifične obremenitve obdelovancev ter kritična preoblikovalna hitrost veliko manjše od tistih, ki se dajo sicer dosegati pri eksplozijskem oblikovanju. Če so te kritične vrednosti prekoračene, se material poruši.

Najbolj preprosto napravo za eksplozijsko oblikovanje po indirektnem postopku (z zrakom kot prenosnim medijem) prikazuje slika 4. Tu je potreben samo spodnji del orodja tj. matrica. Nad ravnim prerezmom je v primerni razdalji obešeno razstrelivo, ki pri detonaciji pritiska pločevino v matrico in jo v delcu sekunde spremeni v votlo obliko. Porazdelitev tlačnega impulza po ploskvi je tu neenakomerna, zato je izkoristek slab in ne presega 5 odstotkov.

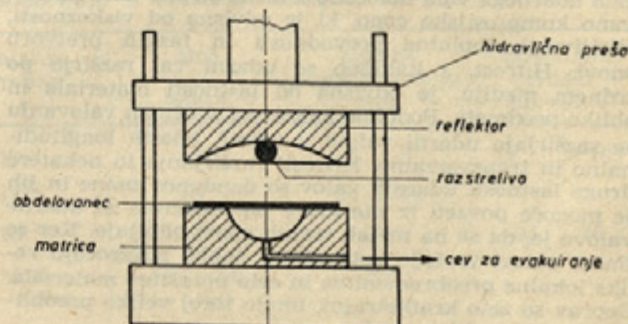
Kontaktna metoda oblikovanja, pri kateri se razstrelivo dotika suroveca, je shematično prikazana na



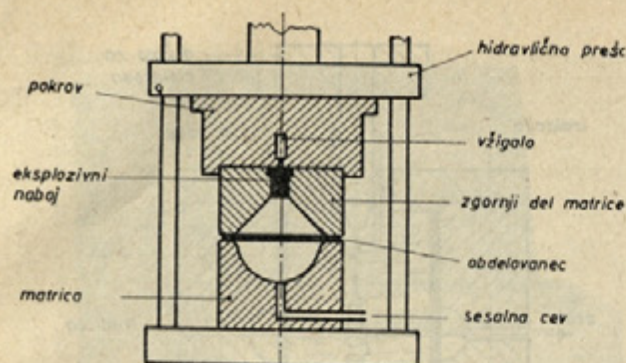
Sl. 4. Naprava za posredno preoblikovanje pločevine z eksplozivom



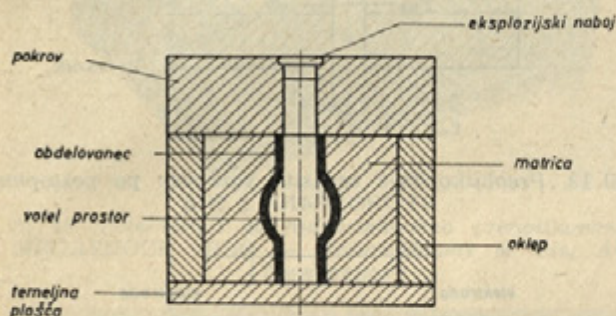
Sl. 5. Kontaktni način preoblikovanja z eksplozivom



Sl. 6. Eksplozijsko preoblikovanje v odprtem orodju z reflektorjem



Sl. 7. Preoblikovanje v zaprtem orodju z deflagrantnim razstrelivom



Sl. 8. Razširjanje cevastih surovcev

sliki 5. V rabi je ponajveč za poprejšnje oblikovanje večjih kosov pločevine ali za enostavnejše oblike.

Slika 6 kaže postopek oblikovanja z brzantnim eksplozivom, ki je nameščen pod posebno napravo — tako imenovanim reflektorjem. Naloga tega reflektorja je, da koncentrira oziroma usmerja tlačne impulze na površino pločevine in ojačuje njihov učinek. S tem se večja izkoristek. Oblika reflektorja je odvisna od končne oblike izdelka. Matrica ima v dnu cevko za izsesavanje zraka, da bi pločevina lažje izpolnila formo.

Značilno napravo za oblikovanje z deflagrantnim razstrelivom prikazuje slika 7. V zaprtem, dvodelnem oblikovalnem orodju, ki je lahko vgrajeno v normalni preši, se prenaša detonacijski tlak eksplozijskega naboja na pločevino. Za preoblikovanje v takih zaprtih orodjih obstajajo posebne patrone z brezdimnim smodnikom, ki dajejo določen pritisk v odvisnosti od prostornine gravure.

Sliki 8 in 9 prikazujeta dve orodji za razširjanje cevastih obdelancev, pri katerih se prenaša tlak z zrakom ali plinom, s tekočino ali gumijastim batom.

V nasprotju z zrakom je izkoristek pri prenosu tlačne energije skozi tekoč medij boljši. Voda je poceni in nestisljiva, varuje pločevino pred toplotnimi vplivi in ima še to lastnost, da prenaša tlak na vse strani enakomerno. Nadalje duši voda zvočne efekte in zelo slabi pok, ki nastaja pri eksploziji.

Načelo podvodnega oblikovanja z eksplozivom je shematično prikazano na sliki 10. Oblikovalna naprava, ki jo sestavljajo matrica, pločevina in držalo za pločevino ter eksplozijski naboj, je potopljena v posodi z vodo. Gravura matrice je evakuirana, da ne bi zračna blazina ovirala deformacije pločevine.

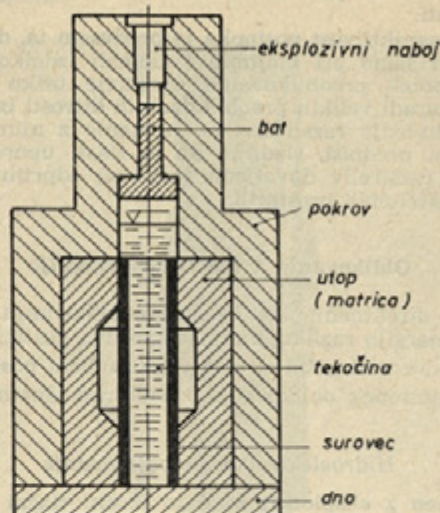
Konstruktivna izvedba orodij za eksplozijsko oblikovanje se bistveno ne razlikuje od orodij pri klasičnih postopkih oblikovanja. Največkrat so celo enostavnejša in je potrebna samo matrica. Pri globokem vlečenju tanke pločevine je potrebno še držalo, ki pritiska na pločevino nekoliko bolj kakor pri običajnem vlečenju.

Na izbiro materiala za orodje vplivajo razni faktorji, npr. gospodarnost, število obdelancev, njihova

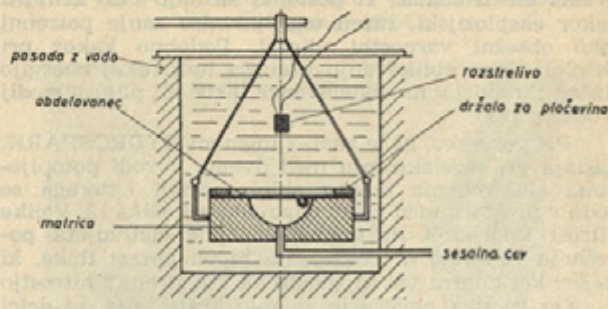
velikost in zahtevana natančnost itd. Za majhne serije so primerna mehkejša jekla, epoksidne smole, trd les pa tudi beton, medtem ko so pri večji količini izdelkov oblikovalna orodja izdelana iz jekla ali sive litine.

Pri tekočih prenosnih sredstvih mora biti matrica dobro zatesnjena, da tekočina ne bi mogla v prostor med surovcem in gravuro matrice. Če je potrebno zaradi oblike gravure, mora biti ta prostor tudi evakuiran.

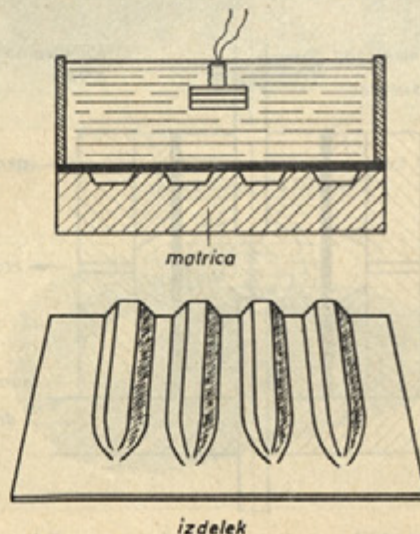
Razen za vtiskavanje, robljenje, globoko vlečenje in razširjanje se uporablja eksplozijsko preoblikovanje tudi za oblikovalno štancanje, slika 11. Hkrati s pre-



Sl. 9. Razširjanje cevastih surovcev



Sl. 10. Načelo podvodnega preoblikovanja z eksplozivom



Sl. 11. Oblikovalno štancanje z eksplozivom

oblikovalno operacijo se lahko material v ustreznih orodjih tudi odrezuje. Z večkratnimi orodji pa je mogoče izdelati hkrati tudi več enakih izdelkov.

Preoblikovanje z eksplozivni ima te prednosti:

- majhne investicijske stroške in cenena orodja oziroma pripomočke,
- prihranjuje preoblikovalne operacije,
- omogoča veliko oblikovno natančnost ter izdelavo kompliciranih oblik,
- omogoča obdelavo toplotno obstojnih in krhkih materialov, ki jih doslej ni bilo mogoče plastično oblikovati.

Pomanjkljivost postopka je predvsem ta, da je gospodaren samo pri majhnih količinah izdelkov, dalje da je potek preoblikovalne operacije težko določiti naprej zaradi velikih preoblikovalnih hitrosti in veljajo za skladiščenje razstreliv ter ravnanje z njimi strogi varnostni predpisi, slednjič pa je zlasti uporaba brizantnih razstreliv dovoljena samo na odprtih in primerno zaščiteneh prostorih.

Oblikovanje z električno energijo

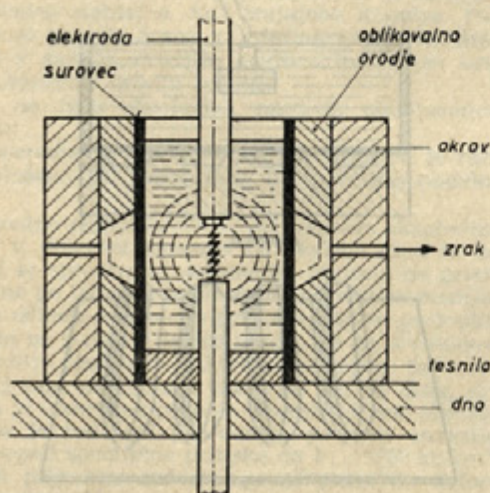
Pri direktnem plastičnem preoblikovanju z električno energijo razlikujemo načelno dva postopka:

- a) hidroelektrični ali elektrohidravlični postopek in
- b) postopek oblikovanja z elektromagnetnimi impulzi.

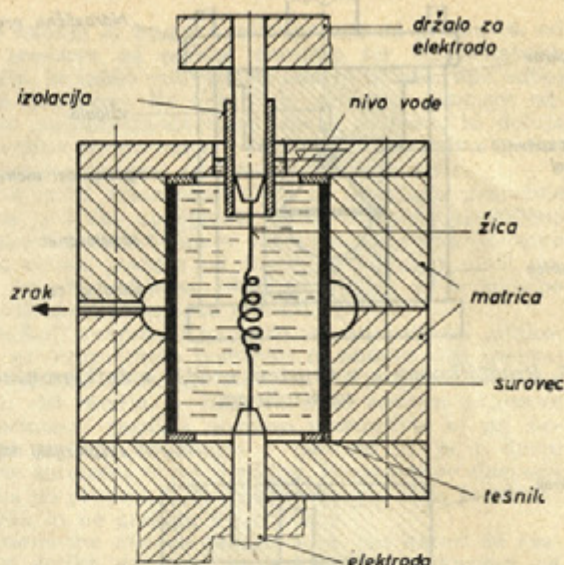
Hidroelektrično preoblikovanje

Razen z eksplozivi se dajo močni tlačni impulzi povzročati tudi s podvodnim razelektrenjem kondenzatorja, in sicer s prebojem ali kratkim stikom med dvema elektrodama. Ti postopki se dajo lažje krmiliti kakor eksplozijski, razen tega pa niso zanje potrebni tako obsežni varnostni ukrepi. Podobno kakor pri eksplozijskem oblikovanju prenaša tudi tukaj energijo tlačnih impulzov na obdelovance tekoč ali plinast medij (voda, zrak).

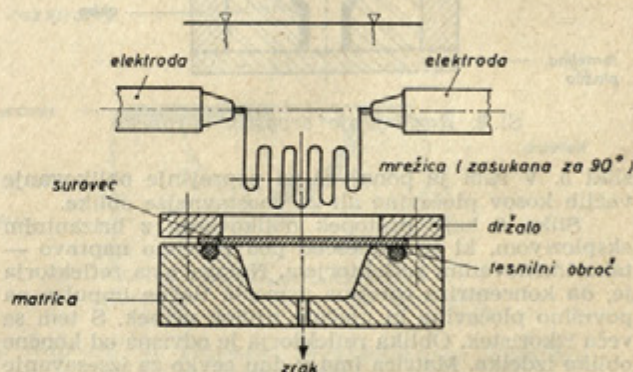
Pri postopku, ki je znan z imenom HYDROSPARK, nastaja pri razelektrenju med dvema v vodi potopljenima elektrodama močan oblok, zaradi katerega se voda v prostoru med elektrodama upari, slika 12. Velika hitrost uparjanja in vztrajnost vode zadržujeta povečanje volumna in povzročata hipen porast tlaka, ki se širi kot udarni val kroglasto na vse strani s hitrostjo u_s . Ker se tlak poveča le za zelo kratek čas, se delci vode, ki so dobili zaradi pospeška hitrost u_f , za valovnim čelom zopet umirijo.



Sl. 12. Preoblikovanje s podvodnim razelektrenjem (HYDROSPARK)



Sl. 13. Preoblikovanje cevastih surovcev po postopku HYDROSPARK z žico



Sl. 14. Preoblikovanje ravnih surovcev po postopku HYDROSPARK z žico

Ko zadane udarni val površino obdelovanca (npr. pločevine), mu podeli impulz

$$I = \rho_0 u_s u_m \cdot \Delta t \cdot A,$$

maksimalno silo

$$F_I = \rho_0 u_s u_m A$$

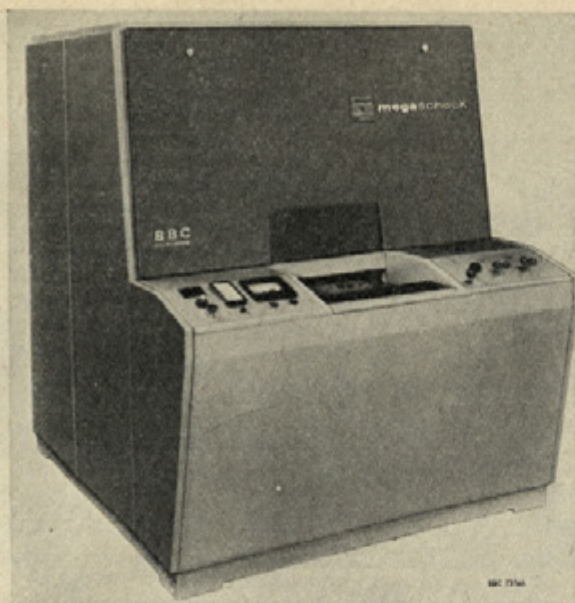
ter maksimalni pospešek

$$a_I = \frac{\rho_0 u_s u_f}{\rho_I s}$$

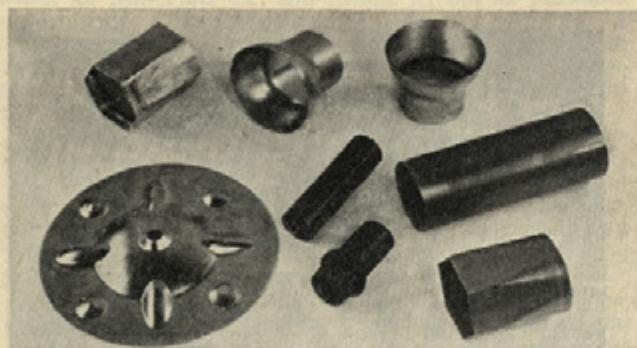
kjer je

- ρ_I — gostota preoblikovanega materiala,
- ρ_0 — gostota prenosnega medija (vode),
- A — površina, na katero deluje udarni val,
- s — debelina pločevine,
- u_m — srednja hitrost delcev prenosnega medija, ki jo odmerimo iz hitrostnega diagrama,
- Δt — trajanje udarnega vala.

Z veliko silo udari pločevina naslednji hip na stene ustrezne odprtine v orodju ter povzame obliko matrice. Ker traja proces razelektrenja samo nekaj mikrosekund, dosega jakost toka v kanalu razelektrenja več deset tisoč amperov. Tako se hipoma sprosti velika količina energije, njen učinek pa je na videz zelo podoben učinku detonacije razstreliva. Tako velike energije seveda ni mogoče odvzemati direktno iz omrežja, ampak jo je treba dalj časa zbirati v posebnem hranilniku, ki jo za tem v zelo kratkem času lahko odda.



Sl. 15. Poliautomat za hidroelektrično preoblikovanje MEGASHOCK (BBC — Brown-Boveri & Cie, AG, Mannheim)



Sl. 16. Po hidroelektričnem postopku izdelani oblikovanci (BBC)

Hranilnik sestavljajo električni kondenzatorji, ki se glede na želeno energijo ($CU^2/2$) nabijajo na ustrezno končno napetost U 10...30 kV.

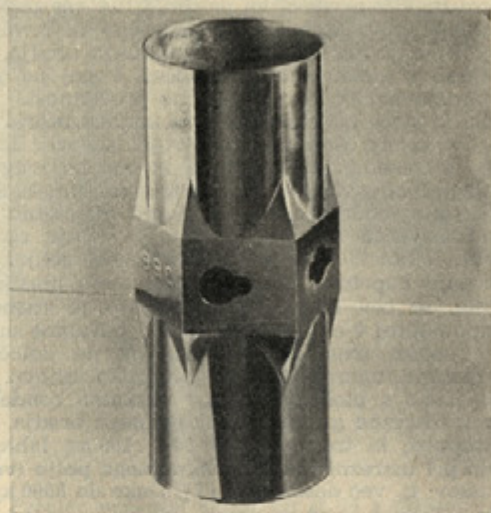
Razdaljo med elektrodama lahko premoščujemo tudi s tanko žico, ki se pri razelektrenju stali in izpari ter s tem še poveča učinek trenutne spremembe volumna. Razen tega vpliva oblika žice na nastanek in širjenje udarnega impulza, tako da je mogoče z ustrezno obliko žice (vozlom, zanko, obročem ipd.) koncentrirati tlačno energijo na določeno mesto na obdelovancu.

Slika 13 prikazuje načelno konstrukcijsko izvedbo takega orodja za preoblikovanje surovcev v obliki cevi, slika 14 pa orodje za preoblikovanje ravne pločevine v votlo telo. Prostor med surovcem in gravuro matrice mora biti zatesnjen in evakuiran, da se lahko pločevina dobro prilaga na steno matrice. Zračni kanal je priključen na vakuumsko črpalko. Prednost tega postopka je, da je mogoče energijo, ki se sprošča pri razelektrenju, tudi regulirati.

Napajanje kondenzatorjev traja pri napetosti več tisoč voltov samo okrog 15 sekund ali še manj, tako da je postopek primeren tudi za serijsko izdelavo. Mehanični del naprave sestoji samo iz posode za vodo in ustreznih oblikovnih orodij, pri preoblikovanju ravne pločevine pa je potrebna še vakuumška črpalka. Slika 15 ponazarja najnovejši polavtomatični preobli-

kovalni stroj MEGASHOCK trrdke BBC z energijo 1,5...9 kW in maksimalno močjo 5 kW. Nekatere — ne ravno tipične — oblike, izdelane po hidroelektričnem postopku, prikazujejo slike 16, 17 in 18, medtem ko je s slike 19 razvidna tudi oblika žice, s kakršno se usmerja tlačna energija na mesto največje deformacije.

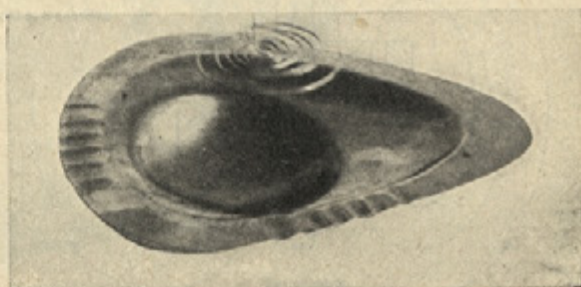
Elektrohidravlični postopek preoblikovanja je mogoče uporabljati za luknjanje, vlečenje, razširjanje, oblikovalno štancanje, za preoblikovanje cevi ipd., pa tudi za spajanje, predvsem pri izdelkih z manjšimi dimenzijami.



Sl. 17. Po hidroelektričnem postopku izdelani oblikovanci (BBC)



Sl. 18. Po hidroelektričnem postopku izdelani oblikovanci (BBC)

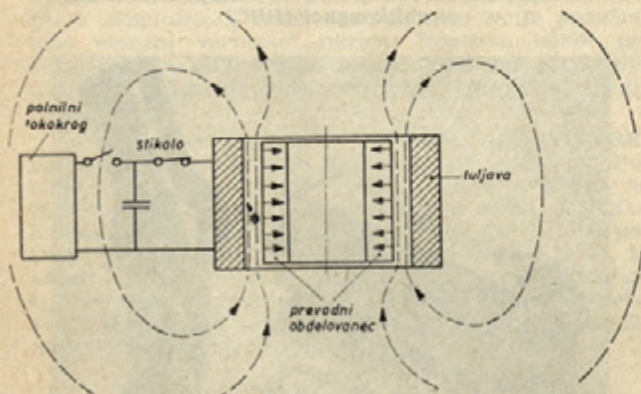


Sl. 19. Pepelnik, izdelan po hidroelektričnem postopku (BBC)

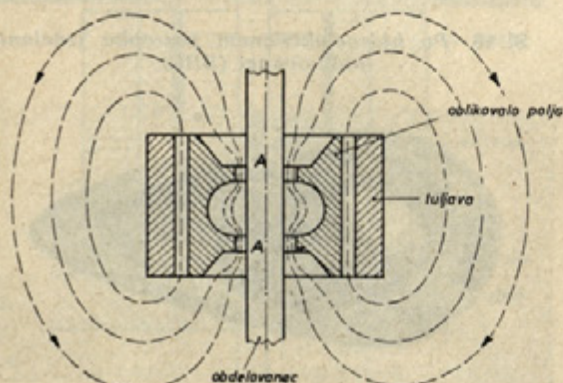
Preoblikovanje z elektromagnetnimi impulzi

Drugače kakor po prej opisanih postopkih preoblikovanja z udarnimi valovi, ki nastajajo pri detonaciji ali podvodnem razelektrenju, dobivamo pri elektromagnetnem preoblikovanju potrebno deformacijsko silo v obdelovancu samem z močnimi magnetnimi polji. Če v zelo kratkem času izpraznimo nabit kondenzator prek tuljave, ki je induktivno sklopljena z obdelovancem, lahko inducirano magnetno polje izzove močan impulz, ki deluje na obdelovanec. Ker izolatorji magnetnemu toku ne dajejo posebnega odpora, se magnetni impulz prenaša na predmet tudi, če ga obdaja neprevodna snov. Material se plastično deformira in oblikuje brez neposrednega oblikovalnega orodja, to je brez dotika z zunanjimi pripomočki. Pogoji pa je, da imajo obdelovanci dobro električno prevodnost.

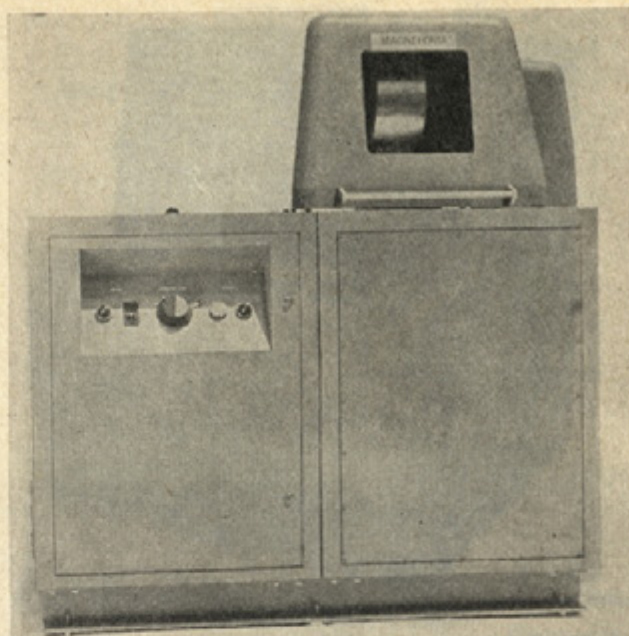
Tok, ki steče pri razelektrenju kondenzatorja skozi tuljavo, v katero smo postavili votel surovec iz prevodnega materiala, izzove hipno in močno magnetno polje, ki inducira v njem močan tokovni sunek. S tem se ustvarja v obdelovancu nasprotno magnetno polje in temu ustrezna mehanična sila, ki deluje radialno navznoter, slika 20. Če je ta sila dovolj velika, tako da dosega napetosti v obodu cevi mejo plastičnosti materiala, se cev trajno deformira, to je stisne. Če vtaknemo poprej v cev še poseben trn, povzame surovec zunanjo obliko trna. Če hočemo cev na določenem mestu razširiti, uporabljamo ekspanzijsko tuljavo, medtem ko lahko s ploščato tuljavo stiskamo rondela ali platine v ustrezne gravure oblikovalnega orodja. Magnetni impulzi, ki trajajo samo $10 \dots 100 \mu s$, lahko povzročajo pri ustrezni jakosti magnetnega polja (več sto kilogaussov, tj. več deset tesel [T]) tlake do 3500 kp/cm^2 in več.



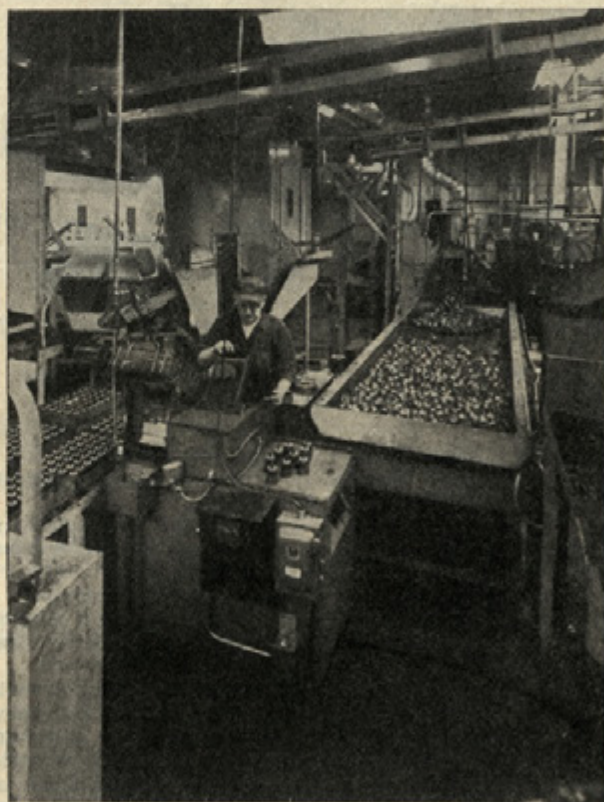
Sl. 20. Osnovni električni krog pri magnetnem preoblikovanju



Sl. 21. Tuljava z vložkom za koncentracijo sile magnetnega polja

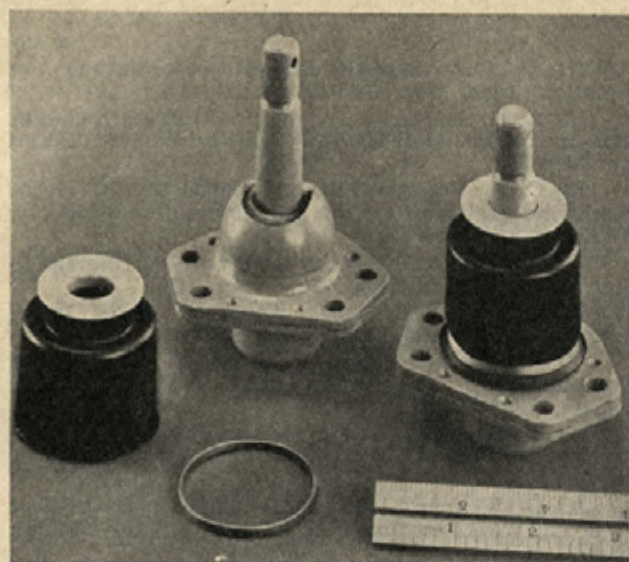


Sl. 22. Naprava za elektromagnetno preoblikovanje MAGNEFORM M-12 (General Atomic Europe)



Sl. 23. Naprava za elektromagnetno preoblikovanje MAGNEFORM M-1 v obdelovalni progi

Pritisk, ki ga povzročajo magnetne silnice, je tem večji, čim večja je indukcija in čim manjši je volumen obroča, ki ga izpolnjujejo magnetne silnice, čim manjša sta torej notranji premer tuljave ter zrak med tuljavo in obdelovancem. Z enostavno oblikovanimi kovinskimi vložki pa je mogoče magnetni pritisk v posameznih



Sl. 24. Primerki za uporabo elektromagnetnega preoblikovanja za spajanje dveh delov

predelih obdelovanca tudi povečati ali zmanjšati oziroma ga usmerjati na tista mesta, ki naj se plastično deformirajo. Slika 21 prikazuje tuljavo z vložkom, ki koncentrira pritisk magnetnega polja na dveh mestih obročasto okrog valjastega obdelovanca. Tuljave so izpostavljene velikim dinamičnim obremenitvam in morajo biti primerno izoblikovane.

Najvažnejši sestavni deli naprave za elektromagnetno oblikovanje so kondenzatorji za zbiranje električne energije, stikalne naprave ter tuljave. Da bi naprava zmogla potreben pritisk za preoblikovanje, mora biti energija kondenzatorjev zelo velika. Za to so potrebne velike napetosti (10 kV), tok pri praznjenju pa dosega več tisoč amperov.

Slika 22 kaže napravo MAGNEFORM tvrdke General Atomic Europe z energijo 12 kJ, ki zmore 8 do 10 praznitev v minuti. V razvoju so še večje, močnejše in hitrejšje naprave, ki bodo primerne tudi za množinsko izdelavo. Primerek manjšega stroja z energijo 6 kJ, vključenega v izdelovalno progo, je prikazan na sliki 23.

Po postopku MAGNEFORM je mogoče pločevino stiskati, upogibati, robiti, obrezovati, štancati itd., dalje razširjati, zoževati in stiskati cevi; možno pa je tudi spajati posamezne dele.

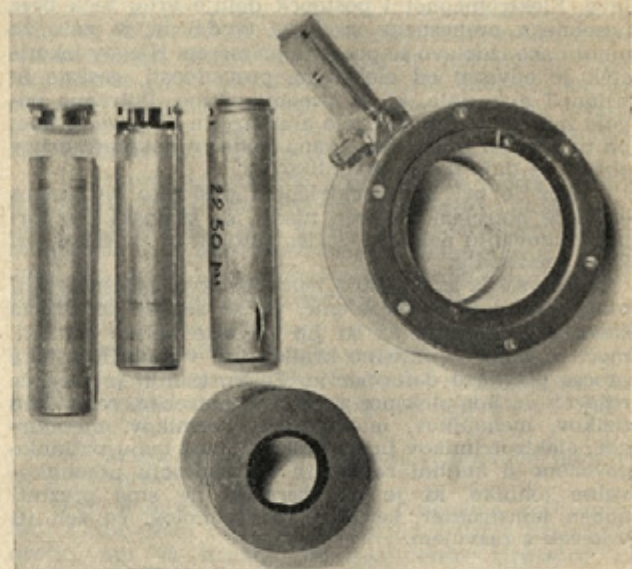
Posnetek na sliki 24 predstavlja primerki iz ameriške avtomobilske industrije. Tanek bakren obroč (v ospredju slike) se stisne preko zaščitnega pokrova iz sintetičnega kavčuka, ki varuje kroglasti zglob pred zunanjimi vplivi (voda, prahom itd.). Spajanje dveh ali več delov z elektromagnetnim preoblikovanjem lahko dostikrat prihranja veliko zahtevnejše in dražje tehnološke postopke kakor so lotanje, varjenje, robljenje ipd. Na sliki 25 sta poleg obdelovancev prikazana tudi tuljava ter vložek za oblikovanje magnetnega polja. Kakor je vidno na sliki 26, se je jeklena cev z 1,8 mm debelo steno, ki je bila na koncu elektromagnetno spojena z jekleno stročnico, pri torzijskem trdnostnem preskusu zvila, medtem ko je spoj med njima ostal nepoškodovan.

Sklep

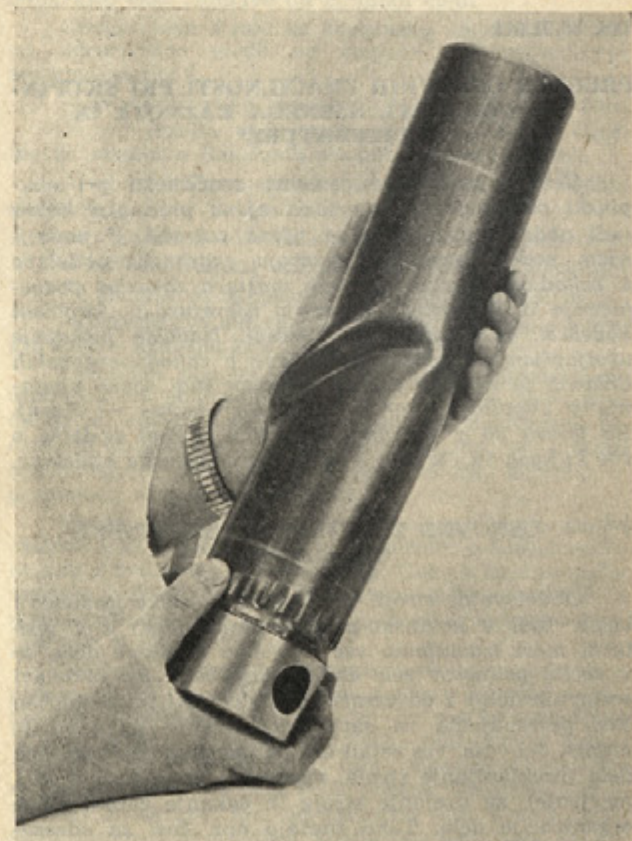
Če ob koncu na kratko povzamemo pglavitne značilnosti postopkov preoblikovanja z velikimi hitrostmi, ugotovimo, da imajo ti postopki v primerjavi z dosedanja tehnologijo mnogotere prednosti, vendar ima vsak izmed njih lastno uporabno območje. Razumljivo je, da ne morejo na mah izpodrinuti klasičnih

metod preoblikovanja in zdaj vpeljanih preoblikovalnih strojev, res pa je, da jih bodo nadomestili, kjer koli bodo spoznali to za potrebno in gospodarsko utemeljeno.

Domena eksplozijskih postopkov oblikovanja bo bržkone ostala v posamični izdelavi in pri velikih izdelkih. Moč in energija pri teh postopkih po velikosti



Sl. 25. Primer uporabe kakor na sl. 24 s tuljavo (desno) in koncentradorjem (spodaj)



Sl. 26. Elektromagnetno oblikovan spoj jeklenega nastavka s cevjo (MAGNEFORM)

praktično nista omejeni, tako da je mogoče preoblikovati tudi dele z največjimi dimenzijami.

Oba električna postopka preoblikovanja je nasprotno mogoče opravljati v zaprtih prostorih. Regulacija oziroma doziranje potrebne energije sta zelo natančna, tako da je reproduktivnost posameznih operacij dobra. To ju usposablja predvsem za množinsko izdelavo. Elektromagnetni postopek deluje vrhu tega brez posebnega prenosnega sredstva (vode) in je zato za množinsko izdelavo še posebno primeren. Njegov izkoristek je odvisen od električne prevodnosti, gostote in trdnosti materiala, ki ga preoblikujemo. Potrebne pogoje zelo dobro izpolnjujejo aluminij in njegove zlitine; pa tudi baker, med, nelegirana jekla in nekatere druge zlitine se dajo dobro preoblikovati.

Ker je pri hidroelektričnem postopku za prenos energije potreben poseben medij, so stranski časi pri preoblikovanju nekoliko daljši, zato pa ni zadržkov pri izbiri materiala.

Ceprav je že uspelo s temi postopki uspešno rešiti mnoge izdelovalne probleme, pa so seveda še odprta številna vprašanja, ki so jih navrgle velike hitrosti, moči in tlaki ter izredno kratki časi, v katerih poteka proces plastične deformacije. Ta vprašanja je mogoče reševati le kompleksno, za kar je potreben velik štab fizikov, mehanikov, matematikov, kemikov, metalurgov, elektrotehnikov in strojnikov. Vzlic temu pa lahko govorimo o majhni revoluciji na področju preoblikovalne tehnike, ki je ne more in ne sme prezreti noben konstrukter, še manj pa tehnolog, če želi iti v korak z razvojem.

Literatura

- [1] R. M. Cavanaugh: Explosionsbearbeitung von Metallen. Tech. Mitt. 1960/10, str. 427/434.
- [2] K. H. Schramm: Daten zur Schallgeschwindigkeit in reinen Metallen. Z. f. Metallkunde 1962/11, str. 729/735.
- [3] C. A. Verbraak: Materialverhalten bei Hochgeschwindigkeitsumformung. Z. f. Metallkunde 1964/12, S. 723/732.
- [4] Zukas-Duvall-Fowler: Response of metals to high velocity deformation. New York, 1960.
- [5] G. E. Duvall: Shock waves in solids. International Science and Technology, 1963.
- [6] W. Johnson: High-rate forming of metals. Metal Treatment and Drop Forging 1963/7, 8, 9, str. 277/286, 305/314, 349/356.
- [7] W. Ecker — F. Müller — Axt: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung I. Werkstatt und Betrieb 1963/3, str. 163/176.
- [8] G. Weimar: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung II. u. III. Werkstatt und Betrieb 1963/5, 12, str. 297/305, 893/900.

Posnetki in informacije:

BBC-Brown-Boveri & Cie, A. G. — Mannheim.

General Atomic Europe (General Dynamics Corp.), Zürich.

Avtorjev naslov: doc. ing. Franc Golobranc, fakulteta za strojništvo univerze v Ljubljani

IZ PRAKSE ZA PRAKSO

DK 65.01.011

PREGLED OSNOVNIH ZNAČILNOSTI PRI SKUPINSKI OBDELAVI, NJENEGA RAZVOJA IN LITERATURE*

Članek pojasnjuje osnovne značilnosti pri skupinski obdelavi in obravnava njene prednosti kakor tudi obdelovalne stroje za njene potrebe. V nadaljnjem podaja pregled o razvoju skupinske obdelave v vzhodnoevropskih državah, našteva zadevna posvetovanja in kongrese ter navaja literaturo o skupinski obdelavi, razčlenjeno po vsebini. Nadalje prikazuje uveljavljanje skupinske obdelave v zahodnoevropskih državah in njihovo literaturo kakor tudi njeno uvažanje v Jugoslaviji ter v industriji »Iskra« — Kranj. Na koncu se v seznamu literature zbrani podatki o 204 knjigah in člankih s področja skupinske obdelave.

1. OSNOVNE ZNAČILNOSTI SKUPINSKE OBDELAVE

Obdelovalni stroji, na katerih v elektroindustriji kakor tudi v kovinsko-predelovalni industriji v pretežni meri izdelujemo vse potrebne sestavne dele, so v večini primerov zelo slabo izkoriščeni. Pri obdelavi sestavnih delov z odvzemanjem delcev, ki traja določen čas, potrebujemo za samo odrezavanje navadno le manjši del časa, ves ostali čas pa porabimo za pomožna dela (preklapljanje stroja, vpenjanje, menjanje orodij, merjenje), za urejanje stroja in čakanje zaradi slabe organizacije dela. Tako znašajo npr. časi za odreza-

vanje na strožnicah, revolverjskih strožnicah, brusilnih in vrtilnih strojih pri posamični in maloserijski proizvodnji največ 30 do 40 % celotnega časa, pri množinski in velikoserijski proizvodnji pa največ 55 do 65 %. Iz teh podatkov vidimo torej, da so izgubljeni časi zelo veliki in jih je treba brezpogojno skrajšati, če hočemo povečati proizvodnost.

V sodobni proizvodnji pa je mogoče povečati proizvodnost samo z uvajanjem mehanizacije in avtomatizacije ter z zboljšanjem ravni pri pripravi proizvodnje z upoštevanjem znanstvenih izsledkov iz sodobne tehnologije. Stopnja mehanizacije in avtomatizacije pa je predvsem odvisna od uporabljenih proizvodnih sredstev, ki morajo ustrezati vrsti proizvodnje in organizaciji proizvodnega procesa. Tako uporabljamo pri množinski in velikoserijski proizvodnji, kjer uvajamo tipizirane tehnološke procese, v pretežni meri avtomate ter avtomatizirane stroje in obdelovalne proge. Povsem drugačne razmere pa se pojavljajo v podjetjih s posamično in maloserijsko proizvodnjo. Čeprav imamo s to vrsto proizvodnje opraviti v več kakor 75 % vseh podjetij, se v njih ni mogla razviti mehanizacija in avtomatizacija predvsem zato, ker ni pri ta čas vpleteni organizaciji proizvodnje pokazala nobenih gospodarskih prednosti. Sele uvedba skupinske obdelave, pri kateri umetno povečujemo serije z združevanjem tehnološko in oblikovno podobnih sestavnih delov, omogoča ob uporabi novih načinov priprave proizvodnje in naprav za hitro preurejanje izrabljanje vseh prednosti množinske in velikoserijske proizvodnje.

Pri skupinski obdelavi najprvo klasificiramo sestavne dele in jih združimo v skupine po tehnološki in oblikovni podobnosti. Pri tem združevanju sestavnih delov pa upoštevamo predvsem:

* Izvleček iz študije, ki jo je financiral zvezni sklad za znanstveno delo v Beogradu s soudeležbo Iskre — Zavoda za avtomatizacijo v Ljubljani.