

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE  
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

---

TEHNOLOGIJA OBLIKOVANJA METALA DEFORMIRANJEM

**SLOBODNO KOVANJE ČELIKA**

INTERNO IZDANJE

ZAGREB, 2005.

## SADRŽAJ

1.	Uvod	str. 1
2.	Temeljni kovački parametri kvalitete	5
2.1	Temperatura kovanja	7
2.1.1	Utjecajni parametri za izbor temperature kovanja	10
2.1.1.1	Utjecaj kemijskog sastava čelika i načina izrade sirovca	10
2.1.1.2	Utjecaj sheme djelujućih naprezanja	11
2.1.1.3	Utjecaj stupnja deformacije	11
2.1.2	Skлонost čelika pregrijavanju i pregaranju	12
2.2	Stupanj prokivanja	13
2.3	Iskorištenje materijala u postupku slobodnog kovanja	14
2.3.1	Odredjivanje kovačkih dodataka materijala	14
2.3.2	Odredjivanje mase čeličnog ingota kod slobodnog kovanja velikih otkovaka	17
3.	Vrijeme zagrijavanja	18
4.	Postupci slobodnog kovanja	20
4.1	Sabijanje	20
4.2	Iskivanje i raskivanje	24
4.3	Probijanje otvora	27
4.4	Iskivanje debelostijenog prstena	30
4.5	Ostali postupci slobodnog kovanja	31
5.	Kovački pribor za slobodno kovanje	35
6.	Primjeri izrade velikih otkovaka slobodnim kovanjem	38
7.	Manipulacija s velikim otkovcima u toku kovanja, raspored ljudi i strojeva u kovačnicama za slobodno kovanje	46
8.	Obrada otkovka	52
9.	Izrada otkovaka malih masa slobodnim kovanjem	68

# Slobodno kovanje čelika

## Oznake

$a$	mm	dužina
$A$	mm <sup>2</sup>	površina
$A_5, A_{10}$	%	istežljivost / konačno istežanje
$A_{c1}, A_{c3}$	°C	temperature stojne točke
$A_d$	mm <sup>2</sup>	površina nakon deformacije
$b$	mm	širina
$d, D$	mm	promjer
$E$	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti
$F$	N	sila
$G$	kg	masa
$h, H$	mm	visina
$k_f$	N/mm <sup>2</sup>	naprezanje plastičnog tečenja
$k_w$	N/mm <sup>2</sup>	naprezanje oblikovanja
$l$	mm	dužina
$n$	min <sup>-1</sup>	broj okretaja
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
$R_{p0.2}$	N/mm <sup>2</sup>	konvencionalna granica tečenja
$s$	mm/okr	posmak kod tokarenja
$t$	mm	dubina tokarenja
$T$	K	temperatura (termodinamička)
$T_{talj}$	K	temperatura taljenja
$V$	m <sup>3</sup>	volumen
$V$	.	stupanj prokivanja kod slobodnog kovanja ingota
$Z$	%	konačno suženje presjeka
$\alpha, \beta$	°	kut
$\epsilon$	%	relativna deformacija
$\vartheta$	°C	temperatura (celziusova)
$\vartheta_p$	°C	temperatura početka kovanja
$\vartheta_z$	°C	temperatura završetka kovanja
$\Delta\vartheta$	°C	temperaturni interval kovanja
$\mu$		faktor kontaktnog trenja
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	normalno naprezanje
$\tau$	s	vrijeme
$\varphi$		logaritamski stupanj deformacije

## 1. UVOD

Kovanje je jedan od načina oblikovanja metala deformiranjem pri kojem se višestrukim udarnim djelovanjem malja po zagrijanom metalu (*sirovcu*) tlačnom silom vrši oblikovanje i postizavanje željenog oblika (*otkovku*). *Slobodnim kovanjem* nazivamo ono kod kojega je postizavanje oblika obavljeno bez korištenja posebnog alata ili pomoću vrlo jednostavnih alata, tako da je tečenje metala u toku deformacijskog postupka *slobodno* i bez ograničenja okomito na pravac djelovanja deformacijske sile kovanja. Slobodno kovanje se dakle bitno razlikuje od *kovanja u ukovnjima* gdje se oblikovanje mase metala vrši u

unutarnjoj šupljini (*gravuri*) alata (*ukovnju*) pa je tečenje metala u toku deformacijskog postupka točno određeno stijenkama gravure.

Slobodno kovanje se koristi u pojedinačnoj ili maloserijskoj proizvodnji, pretežno čeličnih izradjevina. Sirovac će najčešće biti čelični valjani poluproizvod kružnog ili kvadratičnog presjeka. U takvim slučajevima se slobodnim kovanjem oblikuju relativno male mase metala. Ponekad se slobodno kovanje koristi u kombinaciji s kovanjem u ukovnjima kao pripremna faza oblikovanja sirovca prije kovanja u ukovnju.

Kod oblikovanja slobodnim kovanjem velikih masa, sirovac je lijevani blok čelika (*ingot*). U takovim slučajevima to je često i jedini način oblikovanja proizvoda deformiranjem.<sup>1</sup>

U suvremenim industrijski uvjetima slobodnim kovanjem izradjujemo:

- okrugle, kvadratične, plosnate i druge profile jednakih ili različitih presjeka koji mogu biti ili simetrični ili asimetrični;
- šuplja tijela jednake ili promjenljive površine presjeka, dužine veće od  $1,5 D$ ;
- diskove jednake ili promjenljive površine presjeka, pune ili s otvorom;
- bešavne prstenove većih debljina stijenki (dužina je manja od  $1,5 D$  prstena).

Otkovci izradjeni slobodnim kovanjem, bez obzira na vrstu i oblik sirovca te veličinu mase, smatraju se u strojarstvu visokovrijednim proizvodom (a ponekad i poluproizvodom). Od njih se izradjuju opterećeni dijelovi strojeva.

Kovanje je općenito jedna od temeljnih industrijskih djelatnosti u preradi metala i strojogradnji. U narodnom gospodarstvu ovakav način oblikovanja metala predstavlja vrlo važnu stavku pod uvjetom da je proizvodni program dobro odabran. Razmišljanja o proizvodnom programu kovačke industrije i kovačkih pogona svode se na donošenje strateških odluka

- što će se proizvoditi,
- za koga će se proizvoditi,
- kolika je moguća zarada s obzirom na svjetsku cijenu određene vrste otkovka.

Odluka se donosi po kriteriju veličine serija, očekivane proizvodnosti, raspoloživosti kapaciteta proizvodnih pogona, mogućnosti djelomične ili potpune finalizacije otkovka<sup>2</sup>, raspoložive energije, mogućnosti pouzdanog snabdijevanja materijalom. Za donošenje odluke vrlo je važna i profesionalna sposobnost zaposlenih. Sve navedeno ima direktni utjecaj na proizvodne troškove što utječu na cijenu otkovka. Ova može varirati od tehnologije do tehnologije kovanja, no te su varijacije u suvremenoj proizvodnji manje no što bi se na prvi pogled očekivalo.

Orijentacija za donošenje dobrih strateških odluka je uvijek proizvodnja industrijski razvijenih zemalja. Nama, kao nedovoljno proizvodno razvijenima, predstoji nesmiljena borba za prodor na svjetsko tržište. Svjetska cijena jedinične težine određene vrste otkovka je jedini i konačni čimbenik konkurentne sposobnosti kovačke industrije, naravno, uz jednaku kvalitetu otkovka. S obzirom da je ova cijena u nekom vremenskom periodu stalna, proizvođač mora

<sup>1</sup> Slobodno kovanje je jedan od najstarijih načina obrade metala. Početkom kovanja započinje i naša civilizacija. Od davnih vremena se oružje i orudje za rad kovalo. S obzirom na nepostojanje strojeva, u prošlosti slobodno se kovalo samo snagom ruke maljem po nakovnju, a za uspjeh posla i kvalitet izradjevine je bila bitna vještina kovača. Kovački obrt je u prošlosti bio vrlo cijenjen, a kovač je bio ugledna ličnost. To potvrđuju i mnogi primjeri iz naše usmene narodne književnosti. U nekim slučajevima kovačima su se sve do nedavno pripisivale magijske sposobnosti. To je lako shvatljivo ako si predočimo srednjevjekovnu kovačnicu i dojmove koje je praznovjermi gledalac morao pri tom steći: tupi udarci, užareni metal, vrućina, čadja, znoj - sve je to bilo blisko predodžbi pakla!

<sup>2</sup> Finalizacija otkovka u okviru vlastitog kovačkog pogona ili poduzeća je od prvorazrednog gospodarskog značaja za svaku kovačku proizvodnju. Finalizacijom otkovka, a to znači otkovka kojemu je nakon kovanja dan najveći mogući stupanj obrade (sve do gotovog proizvoda!), postiže se visoka vrijednost proizvoda, a time i najveći financijski učin. Općenito se ne smatra rentabilnom kovačnicu koja proizvodi samo "sirove" otkovke za tržište.

računati s činjenicom, da veću cijenu neće postići bez obzira na svoje troškove proizvodnje. Proizvodi li skuplje, uz određenu i poznatu cijenu na svjetskom tržištu, proizvodi sa smanjenim financijskim učinkom ili čak s gubitkom. Tako je svjetska cijena otkovka u suštini razlog svih nastojanja oko smanjenja proizvodnih troškova, unapređenja tehnologije, gospodarenja materijalom i alatima te povećanja proizvodnosti, sve uz pretpostavku ostvarene svjetske kvalitete proizvoda.

Ilustracije radi tablično su prikazani podaci o kovačkoj proizvodnji u Saveznoj Republici Njemačkoj u 1988 godini<sup>3</sup>. Ovo su izvanredno impresivni podaci koji pokazuju da je samo te godine kovanjem preradjeno 1,83 milijuna tona čelika s tržišnom vrijednošću od preko 13 milijardi USD. Kovački proizvodi izradjeni isključivo slobodnim kovanjem bili su 15,8% te vrijednosti, a valja imati na umu da je i tehnologija slobodnog kovanja djelomično bila uključena u proizvodnji otkovaka kovanih u ukovnjima te u proizvodnji prirubnica i cijevnih priključaka. Iz toga slijedi da je udio vrijednosti slobodnog kovanja u ukupnoj (tada još zapadnonjemačkoj) kovačkoj proizvodnji bio znatno veći.

Vrste otkovaka (prema načinu proizvodnje)	Proizvedeno u 1000 tona	Vrijednost miliona USD	Cijena USD/kg
<b>Kovano u ukovnjima</b> (na batovima i prešama)			
- za njemačku automob. industriju	305	2.107	6,91
- ostala njemačka industrija (armature, alati, strojogradnja)	100	702	7,02
- isporuke za izvoz	866	5.930	6,85
<b>Prirubnice</b>	87,9	636	7,23
<b>Cijevni priključci</b>	43,8	652,2	14,89
<b><u>SLOBODNO KOVANJE</u></b>			
<b>ukupno</b> od toga	295	2.107,7	7,14
- <u>kovanje prstenova</u>	97,1	683,8	7,04
- <u>ostale vrste otkovaka</u> (bez kovanja šipaka i bez otkovaka za potrebe željezničkog prometa)	197,9	1.423,9	7,19
<b>Istiskivanje u hladnom stanju<sup>4</sup></b>			
ukupno	132,7	1.164,2	8,77
od toga: - domaće potrebe	64	561,9	8,78
- izvoz	68,7	603,4	8.783
<b>Sveukupno</b>	1.830,4	13.299,1	

Značajke slobodnog kovanja u odnosu na druge postupke oblikovanja metala su:

a) slobodnim kovanjem je moguće izraditi proizvode velikih dimenzija kojih kvalitetnu izradu drugim postupcima nije moguće postići. Deformacijska sila kojom se kovanje obavlja je, zbog postepenog i lokalnog deformiranja u postupku oblikovanja, relativno malena;

b) slobodno kovanje je u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji ekonomično;

c) slobodnim kovanjem je moguće značajno poboljšati svojstva metala;

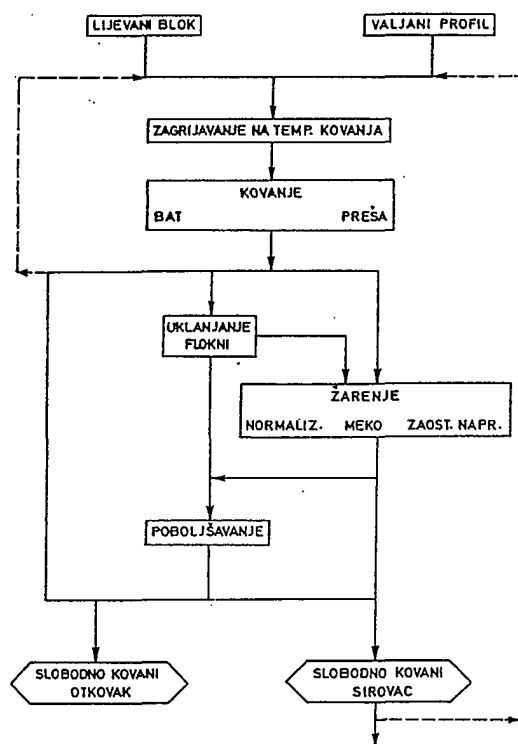
<sup>3</sup> Podaci su objavljeni u britanskom časopisu *Metalurgia*, Apr. 1991, Vol. 58, No.4, p.147/148.

<sup>4</sup> Čitalac će uočiti da je prema ovom pregledu istiskivanje u hladnom stanju uvršteno također u kovanje. Kod nas takova sistematizacija nije uobičajena, no unatoč tomu se za tu tehnologiju često upotrebljava popularni naziv "hladno kovanje".

d) slobodno kovanje je skromne proizvodnosti u odnosu na ostale postupke obrade metala deformiranjem. Potrebni su veliki dodaci za obradu i propisuje se široko polje tolerancija dimenzija koje je uvjetovano tehnološkim mogućnostima slobodnog kovanja. Zbog toga za postizavanje zadanog oblika predmeta valja računati s većim vremenima završne obrade uz slabije ukupno iskorištenje materijala.

Kovanje je uvijek povezano s korištenjem toplinske energije zbog zagrijavanja metala i toplinske obrade otkovka koja uvijek slijedi po završenom kovanju. Kod slobodnog kovanja velikih masa troškovi toplinske energije za zagrijavanje i toplinsku obradu su vrlo značajne stavke troškova proizvodnje pa je racionalno gospodarenje toplinom vrlo važno.

Temeljna predodžba o postupku slobodnog kovanja različitih oblika i vrsta sirovaca, kao i različitim toplinskim obradama koje će uslijediti nakon kovanja, dobiva se na slici 1.



Slika 1. Integralna shema tehnologije slobodnog kovanja

Na slici 1 su uobičajeni i mogući slijedovi pojedinih proizvodnih operacija prikazani punim crtama. Mogući su, međutim, i slijedovi prikazani isprekidanim crtama. Veze među operacijama ovise o namjeni proizvoda i traženoj kvaliteti otkovka. Na primjer, ako želimo izraditi zadani otkovak velikih masa i dimenzija (tada je sirovac lijevani čelični blok ili *ingot*), to je moguće načiniti u više kvalitetnih varijanti:

- a) nakon zagrijavanja kovanjem na preši bez ikakove toplinske obrade;

- b) nakon kovanja se uklanjaju *flokne*<sup>5</sup> i obavlja poboljšavanje otkovka;  
 c) nakon kovanja se vrši žarenje i poboljšavanje (sa ili bez uklanjanja flokni).

Rezultat slobodnog kovanja je *slobodno kovani otkovak* koji je izradjevina spremna za daljnju obradu, obično postupcima odvajanja čestica. *Slobodno kovani sirovac* je poluproizvod namijenjen daljnjem oblikovanju kovanjem, najčešće u ukovnjima.

S obzirom na važnost toplinske obrade metala u tehnologiji slobodnog kovanja prisjetit ćemo se temeljnih pojmova iz ovog područja. Žarenjem se smatra toplinska obrada nekog metalnog materijala pri čemu se ovaj zagrijava na određenu temperaturu, drži na toj temperaturi u toku određenog vremena, a nakon toga hladi točno određenim režimom. Svrha žarenja je postizavanje željenih svojstava metalnog materijala. Budući da se u praksi susrećemo sa slobodnim kovanjem *čelika*, opis operacije koji slijedi odnosi se na toplinsku obradu čelika. **Normalizacija** nastupa kod žarenja na temperaturi nešto većoj od  $A_{c1}$  s hladjenjem u *mirnoj* okolišnoj atmosferi. Koristi se inače za uklanjanje grubozrnate strukture čeličnih odljevaka, a nekad i zavara (Widmannstättova struktura<sup>6</sup>). Normalizacijom se povećava djelovanje prethodne toplinske ili deformacijske obrade u hladnom stanju. Kod otkovaka normalizacija služi ujednačenju veličine zrna. Budući da se zagrijavanjem iznad temperature  $A_{c3}$  ulazi u područje austenita, potrebno je paziti da se ne odabere previsoka temperatura austenitizacije zbog opasnosti od porasta (pogrubljenja)  $\gamma$ -kristala mješanaca što bi dovelo do pogrubljenja strukture nakon pretvorbe. Sitnozrnati čelici su manje skloni pogrubljenju zrna. Proces ohladjivanja ne bi smio biti prespor jer će se u tom slučaju dobiti grubo feritno zrno. **Meko žarenje** se kod ugljičnih čelika izvodi u području temperature  $A_{c1}$  sa svrhom da im se poveća *oblikovljivost*. Kod ove temperature se lamela cementita u trakastom perlitu prevode u kuglasti oblik (sferoidizacijsko žarenje). Ohladjivanje se obavlja sporo da bi se dobilo stanje sa što manjim zaostalim naprezanjima. Oblikovanje lamela cementita, a kod nadeutektoidnih čelika i cementitne mrežice, bit će olakšano višestrukim kratkotrajnim prekoračenjem temperature točke  $A_{c1}$ . **Zaostala naprezanja** (ili "vlastita") mogu nastati u otkovku zbog nejednolikog zagrijavanja ili nejednolikog ohladjivanja, nadalje, zbog pretvorbe faza ili zbog hladnog deformacijskog postupka. **Žarenje za otklanjanje zaostalih naprezanja** izvodi se nakon ravnanja otkovka, nakon zavarivanja ili nakon lijevanja odljevka. Zagrijava se na temperaturu manju od 650°C, a kod toplinski poboljšanih čelika svakako na temperaturi manjoj od temperature popuštanja da se ne bi smanjila čvrstoća postignuta poboljšavanjem. Ovim se žarenjem *reduciraju* zaostala naprezanja mehanizmom unutarnje plastične deformacije do veličine granice tečenja materijala, veličina koje će biti određena odabranom temperaturom žarenja. To znači da će kod više odabrane temperature žarenja biti niža granica tečenja žarenog metalnog materijala pa će nakon takovog žarenja zaostati i manja unutarnja naprezanja.

## 2. TEMELJNI KOVAČKI PARAMETRI KVALITETE

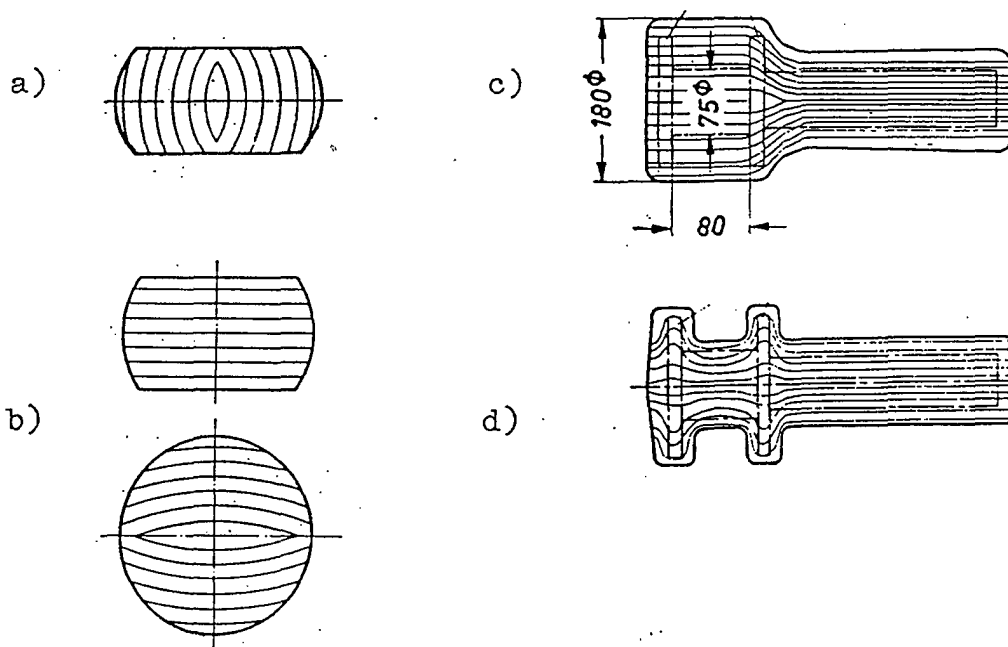
Poboljšanje mehaničkih svojstava metalnog materijala slobodnim kovanjem svodi se na nekoliko učinaka svojstvenih toj tehnologiji oblikovanja.

<sup>5</sup> *Flokne* (dolazi od njemačke riječi *Flocken*, *pl*, unutrašnja ispucanost) su unutrašnje greške čelika u obliku vrlo uskih pukotina čija prisutnost jako pogoršava kvalitetu čelika. Za riječ "flokne" nema odgovarajućeg hrvatskog stručnog izraza. Sklonost čelika stvaranju flokni raste s veličinom mase i površine presjeka odljevka i otkovka, dok se na presjecima promjera manjeg od 50 mm javljaju veoma rijetko. Osjetljivost čelika na stvaranje flokni ovisi o kemijskom sastavu čelika te uvjetima taljenja i lijevanja. Najveću sklonost stvaranju flokni pokazuju čelici legirani s kromom i niklom uz sadržaj molibdena ili volframa. *Flokne* se ne stvaraju u feritnim, ledeburitnim i austenitnim čelicima.

*Flokne* se najčešće susreću kod valjanih proizvoda i otkovaka valjkastog oblika većeg presjeka. Smanjenjem sadržaja vodika u talini znatno se smanjuje sklonost čelika stvaranju flokni. Najčešći način sprečavanja nastanka flokni je toplinska obrada otkovka njegovim zadržavanjem na temperaturi od 600°C duže vremena u području perlitne pretvorbe gdje je plastičnost čelika dovoljna, a brzina difuzije vodika velika.

<sup>6</sup> *Widmannstätten* je bio austrijski znanstvenik, 1754 - 1849, koji je otkrio specifičnu vrstu strukture metala proučavanjem metala meteorita na osnovi željeza i nikla. Metalografski je *W.* struktura značajna po geometrijski pravilnom rasporedu elemenata u obliku iglica ili pločica smještenih unutar zrna. U pravilu se ova struktura javlja u krupnozrnatom kovanom ili valjanom čeliku kod pregrijavanja. Posljedica postojanja *W.* strukture su nepovoljna mehanička svojstva čelika. *W.* struktura se ne javlja kod sitnozrnatih čelika.

Kovanjem velikih masa u području uobičajene temperature kovanja od 1000°C zavaruju se zbog djelovanja tlaka eventualno prisutne unutarnje šupljine čeličnog ingota (*lunker*, *plinski mjehurići*). Od tipične ljevačke grubozrnate strukture, kovanjem nastaje finoznata struktura orijentirana u pravcu najveće ostvarene deformacije. Metalografska slika pokazuje "vlakanca" što je subjektivna predodžba smještaja nemetalnih uključina i segregacije nekih elemenata na granicama zrna produženog zbog izvršene deformacije. "Vlakanca" dakle nisu svojstvo materijala, a njihov nastanak je uvjetovan kemijskim sastavom i količinom nemetalnih uključina. Usmjerenje kristala ukazuje na *anizotropiju* mehaničkih svojstava<sup>7</sup> što nas obavezuje na izbor načina slobodnog kovanja s obzirom na predviđeni pravac djelovanja vanjskih sila na otkovak u primjeni. Kada upotrebljavamo pojam "kvaliteta otkovka" podrazumijevamo da su sve prednosti što ih omogućuje slobodno kovanje zaista iskorištene, pa tako i anizotropija, na najbolji mogući način. Na četiri slučaja prikazana na slici 2 ilustriran je pravilan izbor pravca "vlakana" i svojstva anizotropije za različite primjene otkovaka.



Slika 2. Prikaz korištenja pravca "vlakana" ostvarenih slobodnim kovanjem (prema preporukama njemačkog standarda DIN 7522)

Slučaj a) sa slike 2 pokazuje izgled "vlakana" kada je sabijanje izvršeno u istom pravcu u kojem su bila "vlakana" usmjerena prije kovanja. Smatra se da je ovakav tok "vlakana" pogodan za otkovak od kojeg će se izraditi zupčanik. Za izradu zamašnjaka i poklopaca od otkovka pogodan je tok "vlakana" prikazan u slučaju b). To je ostvareno sabijanjem okomito na pravac "vlakana". Ostala dva slučaja prikazana na slici 2 imaju ucrtanu konturu gotovog proizvoda koji će biti izradjen tehnikom odvajanja čestica od otkovka. Slučaj c) pokazuje pravac "vlakana" postignut produživanjem slobodnim kovanjem. Na dva ucrtana vijenca promjera većeg od 75 mm ne bi bilo pogodno izradjivati

<sup>7</sup> Detaljnije o anizotropiji mehaničkih svojstava vidi u publikaciji Povržanović, A., *Oblikovljivost metala deformiranjem*, FSB, interno izdanje, Zagreb, 1993. U navedenoj publikaciji se nalaze podrobno opisani i svi pojmovi koje se koriste u ovim tekstovima, a u vezi s objašnjenjem izbora temperature kovanja.



zube zupčanika narezivanjem jer bi se "vlakanca" pri tom presijecala, a korijeni zubiju bi zbog toga bili bitno oslabljeni. Kod opterećenja zupčanika vanjskom silom moguć je lom zubiju. Bolje rješenje je prikazano u slučaju d). Promijenjen je oblik otkovka tako da je tok "vlakanca" prilagodjen obliku budućih ozubljenih vijenaca. U ovom slučaju se narezivanjem tok "vlakanca" neće prekidati pa valja očekivati veću čvrstoću korjena zuba.

Jedan od mogućih opisa kvalitete proizvoda, dakle i proizvoda dobijenog slobodnim kovanjem, je onaj koji obuhvaća *sveukupnost svojstava* postignutih u proizvodnom postupku. Kvaliteta proizvoda se određuje na temelju *istodobnih razmatranja i ocjene* tehničkih, eksploatacijskih, konstrukcijsko-tehnoloških parametara, normi pouzdanosti i trajnosti, estetskih kriterija i ekonomskih pokazatelja<sup>8</sup>. Ako sveukupnost svojstava nije propisana nekim standardom, naručilac određuje i zahtijeva kvalitet otkovka. Proizvodjač ima profesionalnu i moralnu obvezu da po svom najboljem znanju naručiocu ukaže na sve relevantne čimbenike koji će otkovku garantirati najviši mogući kvalitet čak i ako to naručilac posebno ne traži (ili ako to ne zna).

Kvalitet i ekonomičnost otkovka načinjenog od zadanog čelika osiguravaju tri temeljna kovačka parametra i to:

- a) temperatura kovanja;
- b) stupanj prokivanja;
- c) iskorištenje materijala u postupku slobodnog kovanja.

Svaki od ovih parametara je zbog velike važnosti za uspjeh slobodnog kovanja razmotren posebno.

## 2.1 Temperatura kovanja

Kovanje čelika uvijek započinje na višoj temperaturi  $\vartheta_p$ , a završava na nižoj  $\vartheta_z$ . Zbog tehnoloških razloga poželjna je što veća širina temperaturnog intervala kovanja  $\Delta\vartheta = \vartheta_p - \vartheta_z$ . Kod širokog temperaturnog intervala kovanja metalnog materijala moguće je u određenom vremenu obaviti više kovačkih operacija. Kod kovanja jednostavnijih oblika manjih masa unutar širijeg temperaturnog intervala kovanja biti će moguće dovršiti oblikovanje i bez dogrijavanja. Temperatura  $\vartheta_p$  je najviša dozvoljena temperatura početka kovanja, a  $\vartheta_z$  najniža temperatura kod koje se još može kovati bez štetnih posljedica, sve mjereno na površini sirovca.

Valja razlikovati *dozvoljeni* temperaturni interval kovanja od *racionalnog* temperaturnog intervala kovanja.

*Dozvoljeni temperaturni interval kovanja* je univerzalna značajka čelika određenog kemijskog sastava i nije ovisan o postupku kovanja i kovačkim operacijama. Taj je temperaturni interval ustanovljen ispitivanjem pogodnim laboratorijskim metodama za određivanje optimalne oblikovljivosti kovanjem. Ispitivanja obuhvaćaju ponašanje duktilnosti čelika unutar temperaturnog intervala i učinke rekristalizacije. Deformacijski postupak unutar tako određenog (dozvoljenog) temperaturnog intervala kovanja će se provoditi s minimumom

<sup>8</sup> Pod ekonomskim pokazateljima ovdje se smatraju odnosi troškova proizvodnje i troškova eksploatacije određenog proizvoda.

rada deformacije, pri čemu će se postići dobra mehanička svojstva otkovka. Podaci o temperaturama kovanja prikazani u tablici 1 i 2 su podaci o dozvoljenom temperaturnom intervalu kovanja različitih čelika s kojima se susrećemo u kovanju (u slobodnom kovanju kao i u kovanju u ukovnjima).

Tablica 1

Vrsta čelika	Oznaka Č.	$\Delta t$ °C
Ugljični strojogradjevni čelici s negarant. sastavom	0210, 0245, 0300, 0345 0400, 0445, 0545 0645, 0745	1200 - 900 1150 - 900 1100 - 850
Ugljični strojogr. s garantiranim sastavom (kotlovska pločevina)	1200, 1201 do 1207	1100 - 850

Tablica 2

Namjena čelika	Oznaka Č.	$\Delta t$ °C
za cementiranje	1120, 1121, 1220, 1221, 1281, 4120, 4320, 4321, 4520, 5420, 5421 4721, 4781, 7420, 7421	1100 - 850 1050 - 850
za nitriranje	4738 4531, 4739, 4784	1100 - 900 1050 - 850
za toplinsko poboljšavanje	1430, 1431, 1480, 1530, 1531, 1580, 3130, 3135, 4132, 4133 1330, 1331, 4738, 5480 1630, 1631, 1680, 1730, 1731, 1780, 4130, 4131, 4134, 4180, 4181, 4184, 4730, 4731, 4732, 4733, 4734, 4782, 4783, 4830, 5430, 5431, 5432, 5480	1100 - 850 1100 - 900 1050 - 850
za površinsko kaljenje	1534, 4830 4738 1633, 2133, 2332, 4131, 4230, 4531, 4732, 4734, 4739	1100 - 850 1100 - 900 1050 - 850
nehrdjajući i kemijski postojani	4170, 4171, 4172, 4571, 4572, 4573, 4574, 4580, 4582, 4583 4570	1150 - 750 1100 - 750
vatrootporni	4578 4579 4972 4970	1150 - 850 1100 - 850 1100 - 800 1100 - 750
otporni na trošenje	3134, 3160	1050 - 850
za rad na povišenim temperaturama	7100, 7400, 7401, 7431, 7432 4270, 4581, 4771 4588	1100 - 850 1100 - 900 1150 - 900
za kotrljajuće ležajeve	4142 4146	1100 - 850 1050 - 850
za opruge	4830 2133, 2332, 4230	1100 - 850 1050 - 850

alatni, ugljični nelegirani	1740, 1741, 1840, 1841 1940, 1941, 1943, 1944, 1946 1948	1050 - 800 1000 - 800 950 - 800
alatni, legirani, za rad u hladnom stanju	4172, 4173 3840, 4141, 4145, 4150, 4175, 4650, 4750, 4754, 4756, 4770, 4835, 4850, 5840, 6440, 6443, 6444, 6445, 6840, 6842, 6850 4755 4143, 4149	1100 - 850 1050 - 850 1050 - 900 1000 - 800
alatni, legirani, za rad u toplom stanju	4170, 4173, 4753, 4757, 6450, 9750 4751, 4752, 6451 4742 4758 4175, 4754, 4756, 4770, 5741, 5742 4755	1100 - 850 1100 - 900 1080 - 850 1080 - 800 1050 - 850 1050 - 900
brzorezni	6880, 6980, 9682 7680, 9720, 9683, 9880	1150 - 900 1100 - 900

*Racionalni temperaturni interval kovanja* se zasniva na dozvoljenom intervalu kovanja ali nije nužno identičan s njim. Odabire se za svaki slučaj posebno prema određenim uvjetima u kojima se kovanje obavlja, a koji od slučaja do slučaja mogu biti različiti. Pod "uvjetima kovanja" ovdje smatramo: udaljenost peći za zagrijavanja sirovaca od kovačkog stroja na kojem se obavlja kovanje, vrstu kovačkog stroja s obzirom na brzinu kovanja te način transporta zagrijanog sirovca od peći do kovačkog stroja. Ako su ovi uvjeti kovanja nepovoljni, u praksi se bez velikog razmišljanja odabire viša vrijednost  $\vartheta_p$  bez obzira na nepovoljne posljedice koje zbog toga mogu nastati.

U praksi se teži se izjednačenju racionalnog i dozvoljenog temperaturnog intervala. To određuje princip projektiranja kovačke linije gdje valja izbjeći sve prije navedene uvjete kovanja koji imaju utjecaj da se ovi temperaturni intervali razlikuju. Minimum transportnih puteva zagrijanog sirovca, maksimum brzine kovačkih operacija i učinkovitost kovača biti će temeljni čimbenici izjednačenja dozvoljenog i racionalnog temperaturnog intervala kovanja. To je posebno važno kod kovanja malih masa čelika, a manje izraženo kod slobodnog kovanja velikih masa. U toku kovanja velike mase čelika se hlade sporije od malih jer je odnos mase i površine, s obzirom na hladjenje, kod malih masa nepovoljniji.

Uspješan izbor temperaturnog intervala kovanja je složen zadatak jer valja pomiriti proturječne interese. Kovanje čelika želimo započeti na što višoj temperaturi jer će se tako pri kovanju postići najmanji otpor deformaciji, a mogući broj udaraca kojima obavljamo deformaciju je objektivno veći, no to uključuje rizik pogrubljenja zrna. Zbog potrebe da sa samo jednim zagrijavanjem, dakle bez dogrijavanja, izvršimo potpuno oblikovanje kovanjem, priželjkujemo što širji temperaturni interval na račun sniženja  $\vartheta_2$ . No sniženje  $\vartheta_2$  na vrijednost nižu od one u tablicama 1 i 2 može kod završnih kovačkih operacija izazvati pojavu pukotina u otkovku. Uzevši samo ovo u obzir i zanemarujući povećanu oksidaciju sirovca u peći s povećanjem temperature (u slučaju izbora više vrijednosti  $\vartheta_p$ ) te potencijalnu opasnost od razugljičenja površine čelika u toku zagrijavanja, proizlazi da je izbor temperaturnog intervala kovanja svojevrni kompromis, a da se nepridržavanje podataka iz tablica 1 i 2 redovito plaća defektima otkovka. Upravo zbog toga razmotrit ćemo važne utjecajne veličine koje određuju izbor temperature kovanja.

0,8% C

←  
podeut.

→  
nadeutektoidni

## 2.1.1 Utjecajni parametri za izbor temperature kovanja

### 2.1.1.1 Utjecaj kemijskog sastava čelika i načina izrade sirovca

U kovačkoj radioničkoj praksi smatra se da vrijedi osnovni princip: što je sadržaj ugljika u čeliku viši, to je  $\Delta\vartheta$  uži. Što je više legirnih dodataka,  $\Delta\vartheta$  je također uži. Stvarnost je međutim znatno složenija, a razmatranje slijedećih primjera će se to i dokazati.

**Podutektoidni** čelik srednjeg sadržaja ugljika kujemo kod  $\vartheta_p = 1200^\circ\text{C}$  ako su predviđeni veliki stupnjevi deformacije. Završetak kovanja je kod temperatura između  $\vartheta_z$  od 900 do 1000°C. Grubozrnatost nastala zbog visoke temperature početka kovanja uklonit će se po završetku kovanja normalizacijskim žarenjem. Normalizaciju ne bismo smjeli izbjeći, a pogotovo bi bilo loše da smo kovanje obavili s malim stupnjem deformacije. Tada ne bi došlo niti do djelomične rekristalizacije (i stoga djelomičnog nastanka sitnog zrna), a krupnozrnatost bi prevladala zbog visoke temperature  $\vartheta_p = 1200^\circ\text{C}$ . Slijedi dakle da  $\vartheta_p$  mora biti usklađen s veličinom ukupnog stupnja deformacije ostvarenog u toku izvođenja kovačkih operacija, a to je posebno važno onda kada nije predviđena naknadna toplinska obrada otkovka. Stoga se, ako se koristi visoka temperatura  $\vartheta_p$ , nakon kovanja zahtijeva normalizacijsko žarenje.

Kod **nadeutektoidnih** čelika temperatura početka kovanja  $\vartheta_p$  je znatno niža. Viša temperatura bi razorila karbidnu komponentu čelika, a niže temperature se odabiru i s razloga da se u toku zagrijavanja smanji mogućnost razugljičenja. Kovačke operacije se izvode s manjim stupnjem deformacije zbog cementita prisutnog kod nadeutektoidnih čelika. To, a također i izbor niže  $\vartheta_p$ , znači da će često biti potrebno dogrijavanje jer se predviđene kovačke operacije neće moći izvršiti unutar temperaturnog intervala kovanja.

Zagrijavanjem čelika na temperature intervala kovanja uvijek se ulazi u područje austenitne strukture. Homogena austenitna struktura zbog svog povoljnog rasporeda atoma u kristalnoj rešetki osigurava optimalnu oblikovljivost čelika pa je stoga deformacijski postupak moguć s najmanjim utroškom rada deformacije i najvećim stupnjem deformacije. Heterogena struktura bi, zbog postojanja različitih kristala sa strukturama različitog rasporeda atoma u kristalnoj rešetki, a zbog toga i sa različitih deformacijskim svojstvima, bila značajna po većoj vrijednosti naprezanja plastičnog tečenja i smanjenoj oblikovljivosti.

Primjerice, kod podutektoidnih čelika na temperaturama između  $A_{c3}$  i  $A_{c1}$  nalazi se ferit i austenit. Same po sebi ove obje komponente su dovoljno oblikovljive. Pa ipak, završetak kovanja u ovom temperaturnom području se ne prakticira. Razlozi su slijedeći: postojala bi opasnost od grubozrnatosti rekristalizacijskog porijekla, nastalo bi znatno smanjenje žilavosti, zbog povećanog  $k_f$  bio bi potreban veći rad deformacije, a pri tom bi oblikovljivost bila smanjena. Kod podutektoidnih čelika sadržaja ugljika više od 0,25% pojava grubozrnatosti rekristalizacijskog porijekla ne bi bila značajna, ali smanjena oblikovljivost kod takvih  $\vartheta_z$  može predstavljati ozbiljnu opasnost od stvaranja pukotina.

Postojanje **legirnih dodataka** u čeliku, koji kod povišenih temperatura daju više faznu strukturu, nalaže dakle poseban oprez kod određivanja temperaturnog intervala kovanja zbog redovito smanjene oblikovljivosti. To se uočava iz podataka prikazanih u tablici 2. Posljedica ove činjenice je da se za uspješno kovanje mora odabrati takova tehnologija i organizacija koja omogućava kovanje unutar uskog temperaturnog intervala kovanja.

Za izbor temperaturnog intervala kovanja mjerodavan je i **način dobivanja materijala sirovca**. Kada koristimo *valjani* profil (za otkovke manjih masa) temperaturni interval kovanja će ovisiti o eventualno neodgovarajućem stupnju deformacije kod valjanja ili o eventualnoj neodgovarajućoj temperaturi valjanja. Kako nam ni jedan od tih podataka nije dostupan, potrebno je jednostavnim tehnološkim probama oblikovljivosti kod kovanja (za svaku pošiljku čelika) odrediti  $\Delta\vartheta$  za konkretne uvjete kovanja. To znači da će se proba izvesti uz jednak stupanj ukupne deformacije i uz jednake brzine deformacije kao što će to biti ostvareno u realnom postupku kovanja.

Kada je sirovac **čelični odljevak** temperaturni interval kovanja  $\Delta\vartheta$  je obično nešto uži od onoga prikazanog u tablicama 1 i 2. Smanjuje se  $\vartheta_p$ , a povećava se  $\vartheta_z$ . Prve operacije kovanja izvode se s malim stupnjem deformacije, no daljnje operacije se obavljaju sa značajnim stupnjevima deformacije, a to znači i velikim radovima deformacije. Kovanje čeličnih odljevaka, koji su redovito sirovci za otkovke *velikih masa*, obično je dugotrajno. Na površinskim slojevima je stoga snižena temperatura. Unutrašnjost mase je, međutim, zbog akumulirane topline još uvijek dovoljno zagrijana. Temperaturni gradijent između sredine mase i površine sirovca je strm, a pri tom nikako ne treba zanemariti prirast temperature nastao zbog velikih radova deformacije unešenih udarcima radi postizavanja velikih stupnjeva deformacije. Značajan dio energije deformacije pretvara se u toplinu, podiže temperaturu cijele mase pa i površinskog sloja, a povećanje temperature mase povoljno djeluje na oslobađanje kovanjem izazvanih unutarnjih naprezanja, na difuzijski mehanizam procesa homogenizacije kemijskog sastava i strukture te na održavanje oblikovljivosti.

Kod kovanja u ukovnju temperatura  $\vartheta_p$  je redovito nešto viša nego kod slobodnog kovanja. Razlog je u znatno nižoj temperaturi ukovnja i potrebi da se kompenzira zbog toga izazvano ohladjivanje sirovca.

#### 2.1.1.2 Utjecaj sheme djelujućih naprezanja

*Shema djelujućih naprezanja* u deformacijskom postupku ima općenito suštinski utjecaj na oblikovljivost metala. Ova će biti to veća što je veći udio tlačne sile u kovačkoj operaciji. Stoga se kod slobodnog kovanja operacija produživanja izvodi kod više temperature da bi se na taj način kompenzirala smanjena oblikovljivost do koje dolazi zbog pojave vlačne sile. Nasuprot tomu, sabijanje, kod kojega se javlja samo tlačna sila, može se obaviti i kod temperatura bližih donjoj granici temperaturnog intervala kovanja, a da pri tom oblikovljivost ne bude umanjena.

#### 2.1.1.3 Utjecaj stupnja deformacije

Već je spomenuto da slobodno kovanje na temperaturama bližim gornjoj granici temperaturnog intervala kovanja s manjim stupnjem deformacije ima kao posljedicu *pogrubljenje zrna*. Iz toga logično slijedi da slobodno kovanje treba obaviti s većim stupnjem deformacije kako bi se postigla dobra mehanička svojstva otkovka.

## 2.1.2 Sklonost čelika pregrijavanju i pregaranju

Kada govorimo o izboru gornje granice temperaturnog intervala kovanja moramo biti svjesni činjenice da će čelik u peći morati biti zagrijan na temperaturu koja je nešto viša od  $\vartheta_p$ , zbog činjenice da će se u transportu od peći do stroja ohladiti. Sklonost čelika pregrijavanju i pregaranju stoga ima direktni utjecaj na izbor veličine  $\vartheta_p$ .

*Pregrijavanje i pregarenje* su dva pojma koja nisu uvijek točno razgraničena ali su uvijek posljedica previsoke temperature kojoj je čelik izložen. Rezultat im je međutim jednak: kohezija kristala čelika je bitno smanjena, a mehanička svojstva otkovka su bitno pogoršana. Razlikujemo nekoliko slučajeva pregrijavanja i pregaranja, posebno s obzirom na činjenicu da se neke posljedice mogu popraviti, a neke ne.

U čeliku kovanom na previsokoj temperaturi nastaje Widmannstättenova struktura zbog prekristalizacije grubog austenitnog zrna. Normalizacijskim žarenjem ova struktura nestaje, a namjesto nje se dobiva sitnozrnata struktura kao kod otkovka kovanog na nižoj temperaturi. Normalizacijskim žarenjem možemo dakle kovanom čeliku povratiti dobra mehanička svojstva.

Utjecaj pregrijavanja čelika na granice zrna ovisi o kemijskom sastavu čelika, o visini temperature kojoj je izložen te o trajanju izloženosti toj visokoj temperaturi. Ova se pojava tumači time što se sumpor u zrnu čelika kod visokih temperatura i dužeg izlaganja tim temperaturama veže u MnS i FeS te difundira na granice austenitnog zrna. Efekat difuzije je smanjena žilavost, istezljivost i kontrakcija čelika ali mu čvrstoća nije promijenjena. Ovako pregrijan čelik pokazuje sklonost krhkom lomu. Čeliku je moguće vratiti dobru duktilnost kovanjem s velikim stupnjem deformacije ili posebnim difuzijskim žarenjem na visokoj temperaturi<sup>9</sup>.

Površinsko pregaranje se ustanovljava na temelju pojave lokalnih površinskih pukotina. Nastaje kod izlaganja temperaturi većoj od  $\vartheta_p$ , zbog slobodnog kisika u atmosferi peći. U toku zagrijavanja kisik difundira na granice zrna te stvara oksid koji djeluje kao "obloga" oko austenitnog zrna. Ova pojava je ovisna ne samo o visini temperature nego i o vremenu izlaganja čelika toj temperaturi. Tragovi površinskog pregaranja se ne nalaze ispod površinskog sloja pa se tu ni struktura niti mehanička svojstva ne razlikuju od onih postignutih kovanjem unutar dozvoljenog temperaturnog intervala kovanja.<sup>10</sup>

Pregaranje čelika nastaje kod zagrijavanja na temperaturu blizu  $\vartheta_{talj}$ . Granice zrna austenita počinju se taliti te nastupa difuzija sumpora i fosfora. Rezultat je vrlo velika krhkostu čelika u hladnom stanju, mala oblikovljivost kod kovanja te stvaranje grubih pukotina. Ovako pregoreni čelik smatramo *nepovratno uništenim*, a njegovim kovanjem je moguće postići minimalno poboljšanje mehaničkih svojstava. Očito je da je od svih pojava pregaranja i pregrijavanja čelika ova najštetnija.

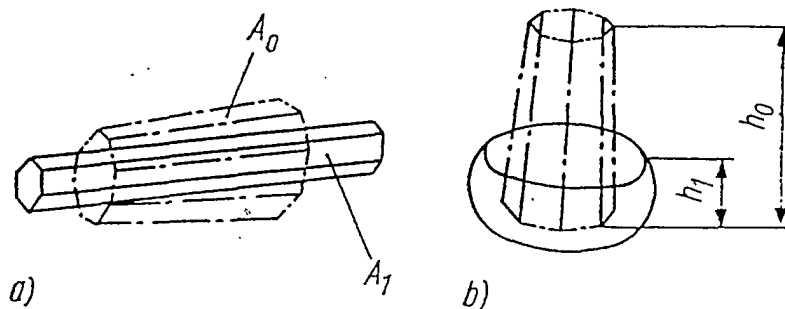
<sup>9</sup> Kratku informaciju o difuznom žarenju čitalac će naći na početku poglavlja 8.

<sup>10</sup> Pukotine nastale zbog površinskog pregaranja u kovačkoj proizvodnji se smatraju "škartom". Međutim, ako se površina otkovka kasnije obrađuje skidanjem čestica te ako je na toj površini predviđena dovoljna debljina dodatka za obradu, nema razloga odbacivanju takovog otkovka. Ovakva greška se javlja najčešće kod kovanja u ukovnjima, a kako se u takovom slučaju radi o većem broju otkovaka, preporuča se, ako se ustanovi postojanje površinskih pukotina zbog pregaranja, rigorozna kontrola mehaničkih svojstava otkovka.

## 2.2 Stupanj prokivanja

Stupanj prokivanja služi za procjenu relativnog poboljšanja mehaničkih svojstava postignutih kovanjem. Kod slobodnog kovanja velikih masa od lijevanog ingota to je posebno važno. Općenito grubozrnata ljevačka struktura ima slabu oblikovljivost. Stoga su kod kovanja takovog sirovca prvi udarci relativno blagi i s njima se postiže umjereni stupanj deformacije. Napredovanjem kovanja usitnjava se zrno i oblikovljivost se povećava. Željena mehanička svojstva postižu se značajnim prokivanjem cijele mase.

Na slici 3 je prikazano kako se izračunava stupanj prokivanja za dvije temeljne operacije slobodnog kovanja ingota: za produživanje i za sabijanje. Stupanj prokivanja označava se s  $V$  pa je prema slici 3 kod produživanja  $V=A_0/A_1$ , a kod sabijanja  $V=h_0/h_1$ .



Slika 3. Prokivanje ingota kod produživanja i sabijanja

Da bi se *bitno* poboljšala sva mehanička svojstva kovanog čelika u odnosu na svojstva lijevanog čelika ingota potrebno je ostvariti neki **najmanji stupanj prokivanja**<sup>11</sup> koji će to **osigurati**. To će kod produživanja ingota nelegiranih čelika biti postignuto kod vrijednosti  $V=2-3$ , što znači da će površina presjeka ingota biti smanjena za 50 do 70%. Kod produživanja ingota visokolegiranih čelika najmanji stupanj prokivanja će iznositi  $V=4$ . *Kombinacijom sabijanja i produživanja* u postupku kovanja moguće je ostvariti povoljna mehanička svojstva čelika i sa manjim stupnjem prokivanja<sup>12</sup>.

Navedene vrijednosti stupnja prokivanja  $V$  su one kojih se treba pridržavati u kovačkoj praksi. Veći stupanj prokivanja produživanjem od navedenog beznačajno poboljšava mehanička svojstva čelika u smjeru uzdužne osi, no pogoršava ih u poprečnom smjeru!

Kada je sirovac namijenjen slobodnom kovanju izradjen od valjanog materijala, kod određivanja minimalnog stupnja prokivanja uzimamo u obzir činjenicu da je takav materijal već prethodno bio izložen deformacijskom postupku i da je u tom postupku postignuto ono što je kod lijevanog sirovca tek bilo potrebno postići u prvim operacijama slobodnog kovanja. Stoga će minimalna vrijednost  $V$  u takovom slučaju biti znatno manja.

<sup>11</sup> Stupanj prokivanja u tehnologiji slobodnog kovanja je svojevrsni sinonim za stupanj deformacije, pojam koji koristimo kod drugih deformacijskih postupaka.

<sup>12</sup> Upravo se na toj spoznaji osniva najčešći redosljed kovačkih operacija slobodnog kovanja velikih masa: sabijanje - produživanje - sabijanje - produživanje.

## 2.3 Iskorištenje materijala u postupku slobodnog kovanja

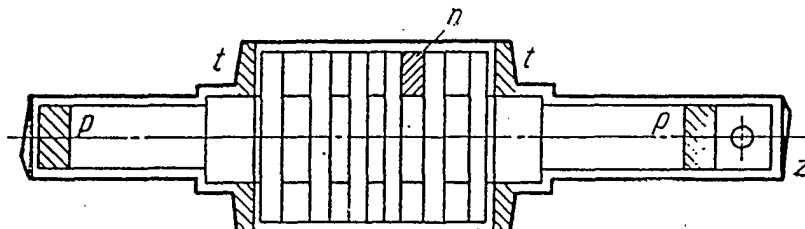
Da bi se postigao željeni oblik otkovka potrebno je odrediti *neophodno potrebnu masu* i *presjeke sirovca*. Budući da se slobodnim kovanjem oblikuju velike mase, izuzetno je važno imati na umu *gospodarski značaj* dobrog iskorištenja materijala otkovka<sup>13</sup>. Ne manje važno je da se ne troši energija na zagrijavanje i deformaciju suvišnog materijala sirovca.

### 2.3.1 Odredjivanje kovačkih dodataka materijala

Kada kao sirovac za slobodno kovanje koristimo valjani čelik (obično su to gredice kvadratičnog presjeka i stranice do 400 mm najviše) masa otkovka  $G_{uk}$  se određuje tako da se masi otkovka  $G_{otk}$  dodaje dio mase  $G_{dod}$  i dio koji će se izgubiti obgaranjem kod zagrijavanja u kovačkoj peći  $G_{obg}$ . Stoga vrijedi

$$G_{uk} = G_{otk} + G_{dod} + G_{obg}.$$

Presjek sirovca se u ovakovom slučaju određuje tako da se presjek otkovka postigne s minimalnim stupnjem prokivanja  $V=1,3-1,5$ . Veća vrijednost stupnja prokivanja  $V$  se izabire za čelike koji se zagrijavaju na više temperature  $\vartheta_p$ . Masa otkovka  $G_{otk}$  određuje se iz nacрта zadanog otkovka, a masa dodataka  $G_{dod}$  uključuje količinu materijala potrebnog za uzimanje epruveta radi kontrole mehaničkih svojstava otkovka te količinu materijala koju treba predvidjeti za potrebe transporta, tehnoloških dodataka i dodataka za obradu. Na slici 4 prikazani su shematski ovi dodaci.



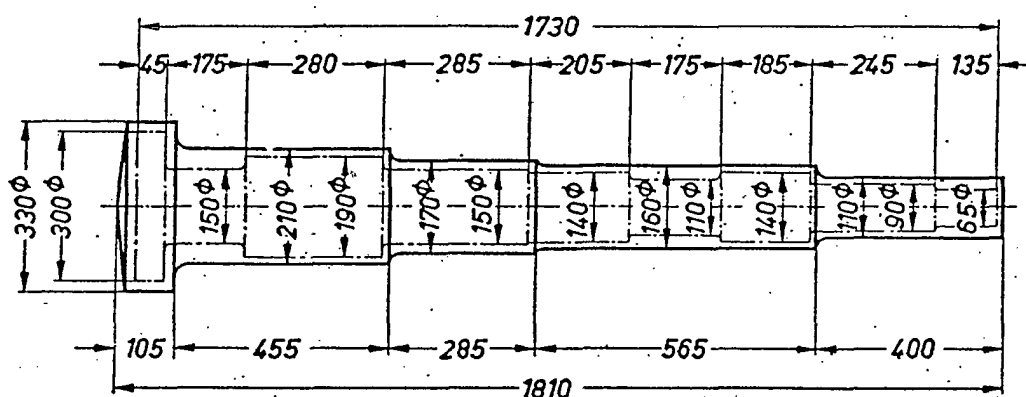
Slika 4. Shema kovačkih dodataka kod slobodno kovanog vratila sa šest diskova

Na slici 4 vanjskom (debljom) konturom crteža prikazan je otkovak vratila izradjen slobodnim kovanjem. Tanjom upisanom konturom prikazano je vratilo nakon obrade. Crtkane površine predstavljaju kovačke dodatke. Tehnološki dodatak označen je s  $n$  i predstavlja dio materijala između diskova koji će se tokarenjem odstraniti jer je slobodnim kovanjem nemoguće izraditi takova udubljenja. Dodatak za izradu epruveta za ispitivanje mehaničkih svojstava slobodno kovanog materijala u poprečnom smjeru označen je s  $t$ , a u uzdužnom smjeru s  $p$ . Za potrebe prijenosa teškog otkovka na toplinsku obradu predviđen je dodatak za ovjes označen s  $z$ .

<sup>13</sup> Svjedoci smo značajnih i opravdanih upozorenja o štednji i čuvanju električne energije što ih se svakodnevno promiče putem sredstava obavještanja. O štednji i gospodarenju materijalom se, međutim, takova promičba ne vrši. Posebno kod metala, ali i drugih materijala, moramo biti svjesni da je u materijalu uvijek ugrađena veća ili manja količina energije već u postupku dobivanja. Kod nekih metala je ta količina energije vrlo impresivna (na pr. aluminija i njegovih slitina). Stoga je štednja materijala ujedno i štednja energije.



**Tehnološki dodaci** otkovka izradjenog slobodnim kovanjem predstavljaju redovito značajne mase materijala. Na slici 5 je prikazana slobodno kovana osovina s prirubicom s kotiranim dimenzijama tako da je vidljiva razlika dimenzija otkovka (puna crta konture) i dimenzija nakon *grube* obrade otkovka (crtkana kontura). Grubo obradjena osovina ima devet različitih poprečnih presjeka, a otkovak zbog određenih tehnoloških ograničenja samo pet. Uočavamo stoga značajnu masu *tehnološkog dodatka* na promjerima  $\varnothing 210/150$ ,  $\varnothing 160/110$  i  $\varnothing 110/65$ . *Dodatak za obradu* je naznačen kao razlika promjera otkovka i grubo obradjene osovine. Na mjestima gdje nema posebnih tehnoloških dodataka, vidi se na slici 5, je kao dodatak za obradu predviđen za 20 do 30 mm veći promjer. To također vrijedi i za kote dužina. Ovako "bogati" dodaci su nužnost i posljedica su ograničenih mogućnosti postizavanja točnosti dimenzija slobodnim kovanjem. Skica prikazana na slici 5 je **kovački nacrt** koji vanjskom konturom crteža uvijek prikazuje otkovak, a unutarnjom grubo obradjeni izradak.



Slika 5. Tehnološki dodaci i dodaci za obradu slobodno kovane osovine

Svaki naručilac teži da mu se otkovak isporuči sa što manjim dodacima za obradu jer su mu tada i troškovi obrade najmanji. Kovačnice se međusobno i razlikuju po mogućnostima isporuke otkovaka sa standardnim, a ne suvišnim dodacima za obradu, pa to onda svjedoči o njihovoj tehnološkoj razini i konkurentnoj sposobnosti. Njemačkim standardom DIN 7527 su propisani dodaci za obradu i dozvoljena odstupanja tih dodataka samo za neke standardizirane otkovke izradjene slobodnim kovanjem operacijama sabijanja i produživanja: za kovane okrugle ploče (diskove), prstenove, debelostjene cilindre i slobodno kovane profile<sup>14</sup>. Standard DIN 7527 predviđa dvije kvalitete otkovaka s obzirom na dodatke za obradu i njihova dozvoljena odstupanja: kvalitetu F (za uobičajenu točnost izrade) i kvalitetu E (za strože zahtjeve točnosti izrade otkovka).

Kada se isporučuje kvaliteta E slobodno kovanje se obavlja pomoću posebnog pomoćnog alata i, naravno, uz veće troškove proizvodnje. Isporuka otkovaka kvalitete E uobičajena je stoga samo za veći broj jednakih otkovaka, a ne i za pojedinačnu proizvodnju. Na temelju navedenog standarda razmotrimo veličinu dodataka za obradu: primjerice, ako kvalitetom F kovana okrugla ploča ima grubo obradjeni promjer 280 mm i visinu 125 mm, dodatak za obradu promjera je 11 mm, a za obradu visine 10 mm. Otkovak se dakle isporučuje s promjerom

<sup>14</sup> Standard DIN 7527 odnosi se na navedene oblike otkovaka izradjenih slobodnim kovanjem od nelegiranog ili niskolegiranog čelika sa sadržajem ugljika do 0,9% ili zbrojem legiranih dodataka do ukupno 4%.

280+11=291 mm i visinom 125+10=135 mm. Dozvoljena odstupanja *tih dodataka* su u slučaju kvalitete kovanja F unutar  $\pm 4$  mm.

U masu dodataka na obradu treba ubrojiti i dodatke za odsijecanje produženog kraja otkovka, premda im po apsolutnoj vrijednosti veličina nije značajna. Kod produživanja, zbog nejednolikog tečenja površinskih slojeva spram unutarnjih, dolazi do *preklopa* slojeva koji radi postojanja oksida na površini čelika nisu međusobno *zavareni*. Preklopi se odstranjuje odsijecanjem, nakon svake operacije produživanja, da to kasnije ne bi postalo izvorom i razlogom nastanka dvoslojnosti i pukotina.

Dodatak za **obgaranje ili oksidaciju**  $G_{obg}$  se planira prema predviđenom vremenu zagrijavanja sirovca, broju nužnih dogrijavanja da bi se otkovak u potpunosti izradio te temperaturi zagrijavanja. U praksi se grubo računa s 2% gubitka mase čelika zbog oksidacije, a za svako dogrijavanje treba predvidjeti gubitak od daljnih 1,5% gubitka mase. Na veličinu gubitka mase čelika zbog oksidacije utječu kemijski sastav atmosfere ložnog i ogrjevnog prostora peći, a također i kemijski sastav čelika. S povećanje ugljika u čeliku opada brzina oksidacije. Legirni dodaci poput Al, Cr, Si, Mo i Co znatno smanjuju brzinu oksidacije. Nasuprot tomu, kada je Ni jedini dodatak čelika, onda on pogoduje oksidaciji. Međutim, Ni u prisustvu Cr i drugih legirnih elemenata čelika doprinosi smanjenju oksidacije. Na temperaturama nižim od 600 do 650°C oksidacija čelika je beznačajna. To znači da u toku nužnih toplinskih obrada otkovka nakon kovanja oksidacija neće predstavljati gubitak materijala. Međutim, kod zagrijavanja sirovca na temperaturu kovanja gubitak materijala je značajan. Utjecaj visine temperature na gubitak materijala zbog oksidacije možemo pratiti i pomoću podataka o intenzitetu stvaranja oksida čelika kod različitih temperatura. Ako kao referentnu vrijednost intenziteta stvaranja oksida uzmemo vrijednost 1 kod 900°C, kod temperature od 1100°C će referentna vrijednost iznositi 3, a kod 1300°C čak 7! Podaci mjerenja gubitaka materijala koji su nastupili zbog oksidacije kod zagrijavanja čeličnih ingota velikih dimenzija prikazani su u tablici 3.

Tablica 3

Srednji promjer (mm)	Masa (tona)	Vrijeme zagrijavanja (sati)	Površinski gubitak (g/cm <sup>2</sup> )	Debljina oksidnog sloja (mm)
900	8	10 - 11	1,22 - 1,8	4,25 - 4,45
1000	12	12	1,34	4,65
1100	15	15 - 19	1,5 - 1,7	5,1 - 5,85
1200	25	18 - 21	1,64 - 1,8	5,7 - 6,25

Gubici zbog oksidacije *valjanih* čeličnih sirovaca okruglog ili kvadratičnog presjeka (označeno s  $d$  i  $a$ ) različitih dimenzija koji su zagrijavani različito vrijeme na  $\vartheta_p$  prikazani su na temelju izvršenih mjerenja u tablici 4.

Za manje presjeke valjanih čeličnih sirovaca ( $d$  ili  $a$  do 50 mm) gubitak mase zbog oksidacije iznosi kod izgaranja mazuta 0,5 do 1,0%, a 0,4 do 0,7% kod izgaranja zemnog plina, u vremenu koje je minimalno potrebno za zagrijavanje na  $\vartheta_p$ . Veličina površinskog gubitka zbog oksidacije je pored visine temperature na koju se sirovac zagrijava ovisna i o odnosu veličine mase i njene površine.

Tablica 4

<i>d</i> ili <i>a</i> (mm)	Trajanje zagrijavanja (sati)	Površinski gubitak (g/cm <sup>3</sup> )	Gubitak mase (%)
100	3/1,3	0,18/0,13	0,9/0,65
150	4,4/2,2	0,445/0,316	1,53/1,07
200	5,7/2,9	0,93/0,6	2,1/1,52
250	7,5/3,6	1,13/0,8	2,35/1,65

### 2.3.2 Određivanje mase čeličnog ingota kod slobodnog kovanja velikih otkovaka

Ukupna masa ingota će se izračunati prema izrazu

$$G_{uk} = G_{otk} + G_{dod} + G_{obg} + G_{gl} + G_{pe}$$

Oznake su jednake onima već prije upotrebljenim, a  $G_{gl}$  i  $G_{pe}$  označavaju masu glave i pete ingota, pri čemu se, jer je ingot odliven u obliku blagog konusa, pod "glavom" smatra kraj ingota s većim promjerom, a pod "petom" kraj s manjim promjerom. Željezare koje liju ingote imaju svoje standarde iz koji se odabire potrebna masa. Važno je pri tom provjeriti veličinu srednjeg presjeka odabranog ingota u odnosu na presjek otkovka da bi se ustanovilo može li se kovanjem ostvariti minimalni stupanj prokivanja. Veličina mase glave i pete (koja se u toku izrade otkovka odbacuje) ovisi o obliku kokile u koju se lijeva čelik, a za određivanje mase glave i pete važan je i zahtjev za mehaničkim svojstvima koja se očekuju od otkovka: ako se očekuju bolja mehanička svojstva više se mase odbacuje i iz područja glave i iz područja pete. Tako se dešava da sa strane glave otpada čak 14 do 25% ukupne mase ingota, dok sa strane pete to iznosi samo 4 do 7%.

Razlog toliko velikog otpada materijala ingota je u činjenici da je u toku lijevanja ingot bio uspravan (glava u gornjem položaju). Sve nečistoće lijevanog čelika su se u toku skrućivanja taline kao specifično lakše smjestile u glavu. Ovaj dio ingota očito zbog toga treba odbaciti, a koliki je to dio ovisi o propisanoj kvaliteti otkovka.

Da bismo dobili predodžbu o masama ingota (nominalnim, koje moramo nabaviti, te korisnim, koje ćemo moći iskoristiti kovanjem) i njihovim dimenzijama, načinjen je prikaz u tablici 5 koji obuhvaća samo neke mase i dimenzije ingota korištene u europskoj praksi. Očito je korisna masa ingota određena relacijom kada od ukupne nominalne mase ingota odbijemo mase glave i pete. U nekim slučajevima se na temelju iskustva minimalna masa ingota određuje prema izrazu

$$\eta = (G_{otkovka} / G_{ingota}) 100\%$$

ako su poznate karakteristične procentualne vrijednosti iskorištenja  $\eta$  materijala ingota za određenu vrstu slobodno kovanog otkovka. Karakteristične vrijednosti  $\eta$  za neke vrste velikih otkovaka možemo naći u tablici 6.

Tablica 5

Nominalna masa ingota (tona)	Korisna masa ingota (tona)	Ukupna visina (mm)	Visina glave (mm)	Promjer glave (mm)	Promjer pete (mm)	Srednji promjer ingota (mm)
1,8	1,3	1350	445	450	370	410
5	4,05	1535	665	745	620	682
10	7	2050	900	880	700	790
25	18,1	2200	1140	1300	1100	1200
45	31,5	2600	1310	1570	1400	1485

Tablica 6

Vrsta otkovka	$\eta$ (%)
Osovine: konstantnog kružnog presjeka	58 - 62
promjenljivog kružnog presjeka	58 - 60
konstantnog kvadratičnog presjeka	58 - 60
promjenljivog kvadratičnog presjeka	57 - 59
koljenaste osovine	55 - 58
ploče	50 - 60
cilindri	58 - 60
prsteni	45 - 55
prirubnice	55 - 58
maljevi kovačkih batova	50 - 55

Glede iskorištenja materijala sirovca, bez obzira koristi li se valjani blok ili lijevani ingot kao sirovac, valja uočiti da je stupanj iskorištenja materijala ovisan i o opremi kovačnice, o raspoloživim pećima, o organizaciji i sredstvima transporta, o brzini rada kovačkih strojeva, o udaljenostima koje mora preći zagrijani sirovac ili otkovak - dakle o čimbenicima koji su tehničko organizacijskog značaja. Stoga treba već u fazi projektiranja kovačnice za slobodno kovanje velikih masa to imati na umu.

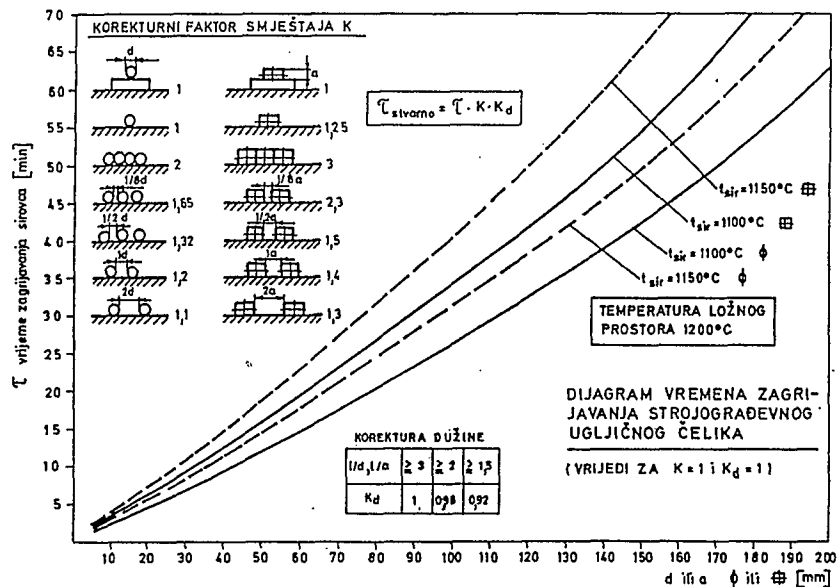
### 3. VRIJEME ZAGRIJAVANJA

Vrijeme zagrijavanja je, kako se to na temelju do sada iznešenog moglo ustanoviti, važno s obzirom da ono može utjecati na kvarenje čelika, odnosno na veličinu gubitka zbog oksidacije. Važno je i zbog činjenice da za potrebe kovanja masa čelika mora biti potpuno progrijana kako bi bila jednoliko oblikovljiva i slobodna od unutarnjih naprezanja koja bi nastala ako temperatura mase ne bi bila ujednačena.. To znači da temperaturna razlika mase mjerena na površini i u unutrašnjosti ne bi smjela biti veća od 50°C<sup>15</sup>.

Nažalost, egzaktan proračun vremena zagrijavanja sirovca u peći na temelju današnjih znanstvenih spoznaja nije moguć. Na taj način možemo dobiti samo približne ili

<sup>15</sup> U praksi se tolerira razlika do 100°C.

orijentacijske podatke o vremenu zagrijavanja ovisno o uvjetima u kojima se zagrijavanje sirovca obavlja. Bitni uvjeti za određivanje vremena zagrijavanja su: vrsta čelika, geometrijski lik presjeka zagrijavanog sirovca, temperatura prostora peći u kojem se obavlja zagrijavanje, temperatura na koju treba čelik zagrijati i, što može biti posebno važno, položaj i smještaj sirovca u peći u toku zagrijavanja. S obzirom na mnoštvo utjecajnih veličina očito je da će mjerenje biti osnovni način dobivanja podataka o potrebnom vremenu zagrijavanja. Na temelju tako dobivenih podataka izradjen je dijagram prikazan na slici 6.



Slika 6. Vrijeme zagrijavanja sirovca od valjanog ugljičnog čelika

Dijagram je izradjen na temelju mjerenja podataka o vremenu zagrijavanja na temperaturu  $\vartheta_p$  od 1100°C i 1150°C valjanih okruglih i kvadratičnih profila sirovca različitih dimenzija od ugljičnog strojogradjevnog čelika. Podaci o vremenu zagrijavanja su dobiveni za uvjete idealnog smještaja sirovca u prostoru peći zagrijanog na temperaturu od 1200°C te za sirovac kojega dužina nema utjecaja na potrebno vrijeme zagrijavanja. Za slučaj kada su realni uvjeti smještaja sirovca u peći drugačiji od idealnog smještaja, stvarno potrebno vrijeme zagrijavanja se računa po izrazu

$$\tau_{stvarno} = \tau \cdot K \cdot K_d,$$

gdje je  $\tau$  vrijeme očitano iz dijagrama sa slike 6,  $K$  korekturni faktor smještaja, a  $K_d$  korekturni faktor dužine sirovca. Veličina korekturnog faktora smještaja  $K$  prikazana je s odgovarajućim skicama na slici 6. Vidi se da se idealnim smještajem može smatrati slučaj kada se zagrijava jedan jedini sirovac u horizontalnom položaju u prostoru peći namijenjenom zagrijavanju. U tom slučaju je  $K=1$  i dijagram je načinjen za tako izmjerene vrijednosti  $\tau$ . Svaki drugi smještaj daje vrijednost  $K > 1$ , a iz toga slijedi da se kod drugačijih smještaja sirovca vrijeme zagrijavanja na potrebnu temperaturu relativno povećava. Uzimajući dakle u obzir korekturni faktor  $K$  dobivamo stvarno vrijeme zagrijavanja  $\tau_{stvarno}$ . Da bismo bili potpuno precizni uzet ćemo u obzir pri tome i korekturni faktor dužine  $K_d$ .

Vrijednosti ovoga faktora, prikazane takodjer na slici 5, pokazuju malen utjecaj dužine sirovca na veličinu vremena  $\tau_{stvarno}$ .

Ako se poslužimo dijagramom sa slike 6 radi analize da odredimo koliko je potrebno vrijeme zagrijavanja sirovca okruglog presjeka  $d=100$  mm ili gredice kvadratičnog presjeka stranice  $a=100$  mm da bi se postigla temperatura sirovca  $\vartheta_p=1150^\circ\text{C}$ , ustanovit ćemo da će se to u idealnom slučaju postići (dakle, kada je sirovac smješten sam u prostoru zagrijavanja i kada se nalazi na *roštilju* tako da mu toplina može dostrujati i s donje strane) kod  $d=100$  mm za 32 minute, a kod  $a=100$  mm za 41 minutu<sup>16</sup>. Međutim, ako sirovci budu složeni *na podu peći* jedan do drugoga bez ikakova razmaka (za kružni presjek tada je  $K=2$ , a za kvadratični presjek  $K=4$ ) vrijeme se povećava u prvom slučaju na 64 minute a u drugom slučaju na 164 minute! Na temelju ovakove analize ekstremnih slučajeva lako je zaključiti da je *uređan* i točno određen smještaj sirovaca u peći bitan čimbenik razumnog gospodarenja energijom, materijalom sirovca i kapacitetima kovačnice. Odnos dužine i promjera ili stranice kvadrata sirovca  $l/d \geq 1,5$  može kod *kratkih sirovaca* smanjiti ovo vrijeme najviše za 8%.

#### 4. POSTUPCI SLOBODNOG KOVANJA

Temeljni postupci slobodnog kovanja su **sabijanje** radi smanjenja visine sirovca, **iskivanje** i **raskivanje** radi smanjenja njegovog poprečnog presjeka, promjene debljine ili povećanja promjera i stanjenja stijenke kod kovanja prstena te **probijanje** otvora (rupe). Ove postupke ćemo uvijek koristiti kod izrade otkovka slobodnim kovanjem. Pomoćnim postupcima slobodnog kovanja možemo smatrati **zasijecanje** koje obično prethodi operaciji iskivanja, **produživanje**, **proširivanje**, **savijanje**, **ravnanje**, **zagladjivanje** i **odsijecanje**. Ovi se postupci koriste prema potrebi. Svi se ovi postupci, i temeljni i pomoćni, koriste kako za otkovke malih masa, tako i za otkovke najvećih masa. U proizvodnim uvjetima otkovak se izrađuje primjenom i kombinacijom ovih postupaka.

##### 4.1 Sabijanje

Djelovanjem aksijalne deformacijske sile sirovcu se smanjuje visina, a povećava poprečni presjek. Pri tom u radialnom smjeru nastupa *slobodno* tečenje materijala, tj. tečenje materijala nije ničim ograničeno<sup>17</sup>. Ne nastupa promjena veličine volumena deformiranog materijala, a redovita je i neizbježna pojava *bačvanja* nastala zbog djelovanja trenja na površinama dodira alata s deformiranim materijalom. Djelovanjem *kontaktnog trenja* slojevi materijala sirovca uz kontaktne površine otežano teku u odnosu na slojeve dovoljno udaljene od kontaktnih površina pa se nakon izvršene deformacije sabijanjem jasno uočava kontura bačve. Veća sila kontaktnog trenja više otežava tečenje, a postignuta izrazitija kontura bačvanja ukazuje na veličinu sile kontaktnog trenja. Pojava bačvanja je nepogrešiv znak postojanja *neravnomjerne deformacije*, a stoga i neravnomjernog učinka deformacijskog postupka sabijanja na strukturu i svojstva materijala<sup>18</sup>.

<sup>16</sup> Povećanje vremena zagrijavanja u tom slučaju je 21,95%, a masa sirovca kvadratičnog presjeka je na istoj dužini veća za 21,46% od one okruglog sirovca. Povećanjem  $K$  odnosi povećanja vremena zagrijavanja se bitno mijenjaju!

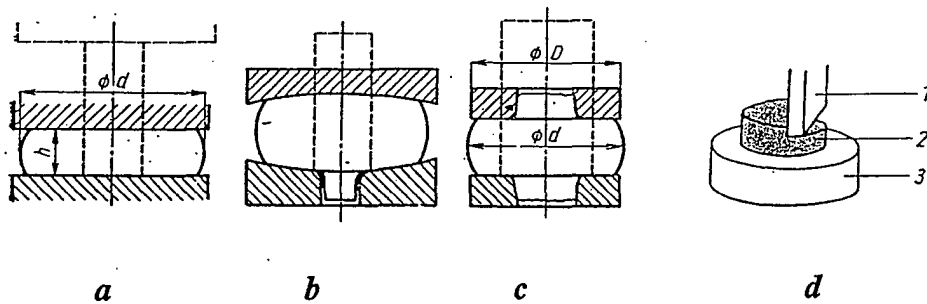
<sup>17</sup> Od te činjenice i potječe pojam *slobodno kovanje*.

<sup>18</sup> Podrobnije o neravnomjernosti deformacije i posljedicama neravnomjernosti zainteresirani čitalac može naći u publikaciji Povrzanović, A., *Temeljni zakoni obrade metala deformiranjem*, poglavlje 4. *Zakon neravnomjernosti deformacije, dopunska i zaostala naprežanja*, FSB, interno izdanje, Zagreb, 1993. U publikaciji istog autora *Trenje, podmazivanje i trošenje alata za oblikovanje deformiranjem*, FSB, interno izdanje, Zagreb, 1993., u pogl. 6 je opisano kako se pojava bačvanja, koja je u korelaciji s faktorom kontaktnog trenja, može smanjiti korištenjem "*mekih podloga*" i *kompensacijom trenja* na kontaktnim površinama.

Kod slobodnog kovanja lijevanog bloka (ingota) moramo računati s postojanjem šupljina te pukotina u masi materijala. Sabijanjem će, zbog tečenja materijala u smjeru poprečnom na djelovanje deformacijske sile, širenje pukotina i šupljina s obzirom na deformacijom određeni smjer vlaknaca, biti ograničeno. Neravnomjernost deformacije će stoga nepovoljno djelovati na ovu pojavu, koju inače smatramo velikom prednošću postupka sabijanja radi *homogenizacije* materijala sirovca.

Ovisno o *stupnju sabijanja*, koji je identičan sa *stupnjem prokivanja*  $V$  prikazanim na slici 3, slučaj **b**, postižu se bolja mehanička svojstva u aksijalnom, radijalnom i tangencijalnom smjeru cilindričnog sirovca. Kod izbora stupnja sabijanja sirovca valja izbjeći opasnost od izvijanja izazvanog aksijalnom deformacijskom silom tako da je na početku sabijanja omjer dužine sirovca spram njegovog promjera manji od  $2,2^{19}$ .

Na slici 7 su skicama prikazani postupci sabijanja različitim oblicima tlačnih ploha kod slobodnog kovanja. Slučaj **a** prikazuje sabijanje ravnim plohamalja i nakovnja koji se najčešće i izvodi na batovima i kovačkim hidrauličkim prešama. U slučaju **b** sabija se pomoću zakrivljenih tlačnih ploha (što je česta praksa kod slobodnog kovanja lijevanog ingota) s otvorom na plohi nakovnja radi izrade izdanka koji će u kasnijim kovačkim postupcima poslužiti kao mjesto prihvata za manipulaciju pomoću manipulatora ili nekog drugog transportno-manipulacijskog uređaja. Moguće je sabijanje uz izradu dva izdanka kako je prikazano u slučaju **c**. Djelomično sabijanje sirovca, slučaj **d** (2), s maljem prizmatičnog oblika (1) i okruglim nakovnjem (3) koristi se u slučajevima kada se ne raspolože s kovačkim strojem dovoljne deformacijske sile, ako je to preša, ili energije deformacije, ako je to kovački bat.



Slika 7. Postupci sabijanja sirovca velike mase

Veličina faktora kontaktnog trenja utječe na intenzitet bačvanja. Pored toga, ova veličina ima i direktan utjecaj na veličinu deformacijske sile. S obzirom da se kod realnog sabijanja u toplom stanju temperatura unutar temperaturnog intervala kovanja stalno mijenja, a da se sabijanje (a i svako drugo kovanje) odvija uz raznolike brzine deformacije, nije

Bačvanje predstavlja neželjenu pojavu i zbog mogućeg značajnog odstupanja oblika otkovka od cilindričnog oblika koji poslije deformacijskog postupka mora biti postignut daljnjom obradom odvajanjem čestica. Jaka kontura "bačve" znači duže vrijeme obrade i veću količinu strugotine koju valja skinuti te stoga skuplju proizvodnju, a u svakom slučaju predstavlja gubitak materijala.

<sup>19</sup> Prema nekim literaturnim podacima ovaj omjer može biti i do 3.

moguće s potpunom sigurnošću odrediti za svaki pojedini slučaj *točnu* vrijednost faktora kontaktnog trenja. U literaturi se nalazi niz pokušaja da se za praktične potrebe dadu podaci o *redu veličine prosječnog* faktora kontaktnog trenja. Takovi podaci, čije se korištenje udomaćilo u industriji, dani su u tablici 7 za različite temperature kovanja nekih najčešće kovanih metalnih materijale uz uvjete:

- a) da veće vrijednosti  $\mu$  iz tablice 7 vrijede za brzine deformacije veće od  $1 \text{ s}^{-1}$  i za udarno djelujuću deformacijsku silu,
- b) da vrijednosti  $\mu$  iz tablice 7 vrijede za kontaktno trenje bez podmazivanja. Uz korištenje maziva vrijednosti iz tablice 7 su niže za 15 do 20%<sup>20</sup>.

Tablica 7

Temperatura deformiranja metala K	Ugljični strojogr. čelici	Legirani čelici	Slitine teških neželjeznih metala	Slitine lakih metala
(0,8 - 0,95) $T_{talj}$	0,40 - 0,35	0,28 - 0,25	0,32 - 0,30	0,50 - 0,48
(0,5 - 0,8) $T_{talj}$	0,45 - 0,40	0,26 - 0,22	0,35 - 0,32	0,48 - 0,45
(0,3 - 0,5) $T_{talj}$	0,35 - 0,30	0,24 - 0,20	0,26 - 0,24	0,35 - 0,30

Podatke o veličini  $\mu$  pod navedenim uvjetima koristimo i u izrazima za određivanje deformacijske sile sabijanja koji su dobiveni na temelju metode analize naprezanja elementa volumena /"slab metoda"/. Zbog nejednolike raspodjele tlaka na tlačnim plohama sabijanog valjkastog tijela<sup>21</sup> određuje se *srednja veličina tlaka* pa je za tlačnu površinu kružnog presjeka ova veličina tlaka određena izrazom

$$p_{sr} = k_f(1 + \mu d/3h)$$

dok za tlačnu površinu pravokutnog presjeka izraz glasi

$$p_{sr} = 1,15 k_f(1 + \mu b/3h).$$

Kod korištenja ovakovog izraza uvijek se javlja problem određivanja veličine naprezanja plastičnog tečenja koja je osim od vrste metalnog materijala i brzine deformacije ovisna i o temperaturi. Budući da je kod sabijanja temperatura varijabilna, često smo u nedoumici kolika je *točna veličina*  $k_f$ , a kad bismo ju i znali, to bi ipak bila samo prosječna vrijednost  $k_f$ . Stoga nije neobično da se u praksi služimo različitim izrazima koji zahvaljujući nekim pojednostavljenjima daju samo približne rezultate, ali rezultate koji su u uvjetima kovačke prakse zadovoljavajući.

Poznavanje srednje veličina tlaka je potrebno za izračunavanje deformacijske sile sabijanja po izrazu  $F = p_{sr} A$ . Poznavanje deformacijske sile je neophodno da bismo mogli izabrati prešu kojom će se sabijanje obaviti ili da bi se izračunao deformacijski rad ako se

<sup>20</sup> Podaci iz tablice 7 koriste se kao približne i orijentacijske vrijednosti veličine faktora kontaktnog trenja osim za kovanje i za druge postupke obrade metala deformiranjem u toplom stanju.

<sup>21</sup> Po navedenoj metodi se dobiva da najveći tlak djeluje u simetrali, a najmanji na rubu tlačne plohe. Na tom mjestu je veličina tlaka jednaka veličini naprezanja plastičnog tečenja.



sabijanje obavlja batom. U posljednjem slučaju izbor kovačkog bata vrši se na temelju izračunavanja mase padajućih dijelova kovačkog bata.

U praksi se često koriste empirijski izrazi pomoću kojih se izračunava masa padajućih dijelova kovačkog bata kojim će se obaviti slobodno kovanje. Jedan takav izraz iz literature na ruskom jeziku glasi

$$G = 0,17 \left( 1 + 0,17 \frac{D_k}{H_k} \right) R_{poz} \epsilon_k V \quad [kg]$$

gdje je značenje oznaka slijedeće:

$G$ /kg/	masa padajućih dijelova kovačkog bata;
$D_k$ /cm/	promjer otkovka <i>nakon</i> završetka kovanja;
$H_k$ /cm/	visina otkovka <i>nakon</i> završetka kovanja;
$R_{poz}$ /MPa/	konvencionalna granica tečenja metala kod temperature kovanja. Uzima se da je <u>približno</u> jednaka čvrstoći metala kod temperature kovanja;
$\epsilon_k$	relativna deformacija kod posljednjeg udarca. Kod malih otkovaka uobičajeno je uzeti $\epsilon_k=0,06$ , a kod velikih $\epsilon_k=0,025$ ;
$V$ /cm <sup>3</sup> /	volumen otkovka.

Sila sabijanja koju treba odrediti, ako se kuje prešom, računa se (prema istom izvoru) po izrazu

$$F = \psi \left( 1 + 0,17 \frac{D_k}{H_k} \right) R_{poz} A_k 10^{-6} \quad [MN],$$

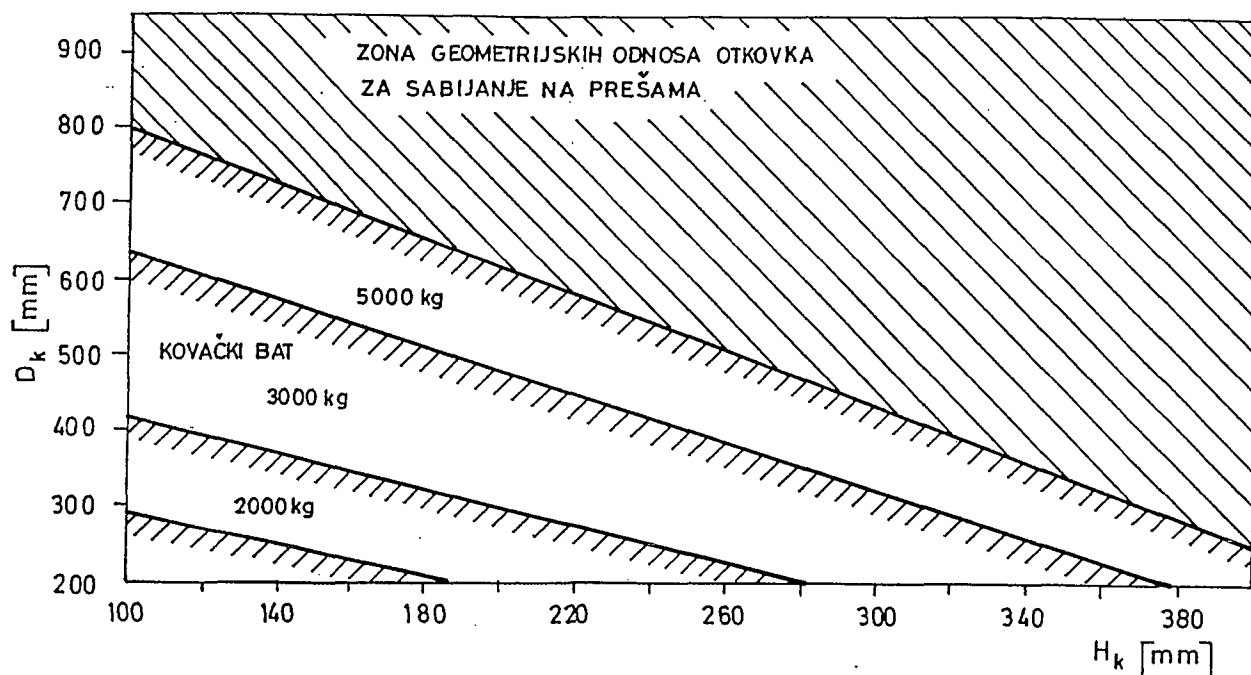
a oznake su:  $\psi$  faktor koji iznosi 0,75;  
 $A_k$  površina otkovka nakon dovršenog sabijanja /mm<sup>2</sup>/,  
dok druge oznake imaju isto značenje kao u prethodnom izrazu.

Za izbor kovačkog bata (njegovih masa padajućih dijelova) ili kovačke preše možemo se orijentaciono poslužiti i slikom 8 koja pokazuje mogućnosti izvedbe sabijanja slobodnim kovanjem ovisno o *konačnim dimenzijama* otkovka nakon sabijanja (promjer  $D_k$  i visina  $H_k$ ).

Usporedivši navedene aproksimativne izraze s izrazima za  $p_{sr}$  moguće je naslutiti da su ovi također osnovani na "slab" metodi.

Izbjegnuto je korištenje veličine  $k_f$  koju je teško odrediti zbog stalne promjene temperature u toku sabijanja pa je ta vrijednost zamijenjena s približnom vrijednošću  $R_m$  kod temperature kovanja. Budući da se i čvrstoća značajno mijenja s temperaturom jasno je da su izrazi samo aproksimativne vrijednosti.

Podaci sa slike 8 su također približni a dobijeni su na temelju mnoštva u praksi ostvarenih slučajeva sabijanja čelika.



Slika 8. Dimenzije slobodno sabijanog otkovka na odgovarajućim kovačkim strojevima

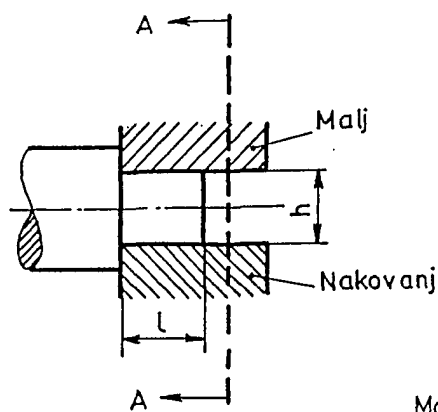
#### 4.2 Iskivanje i raskivanje

Smanjenjem poprečnog presjeka sirovca iskivanjem postiže se produženje njegovog prvobitnog oblika. Ova se operacija izvodi učestalim lokalnim sabijanjem u smjeru okomitom na uzdužnu os uz istovremeni posmak kovane mase u smjeru te osi. Postupak iskivanja će, pored produžavanja, smanjiti unutarnje defekte metala i poboljšati mu mehanička svojstva u pravcu uzdužne osi. Na takovo poboljšanje kvalitete utječe ostvarena veličina redukcije presjeka udarca malja i odabrani posmak kojim napreduje postupak (što označavamo kao *korak* napredovanja iskivanja). Stoga, poštujući dozvoljeni stupanj prokivanja (usporedi sliku 3), u svakom koraku iskivanja treba ostvariti najveće moguće lokalno sabijanje koje ovisi o trenutačnoj temperaturi kovanog metala<sup>22</sup>.

Shematski prikaz produživanja iskivanjem je prikazan na slici 9. Korak napredovanja iskivanja označen je s  $l$ , a visina kovanja (na slici 9 je to promjer ostvaren iskivanjem) s  $h$ . Mogući profili radnih površina malja i nakovnja prikazani su za tri slučaja: a - ravne plohe, b - V ploha nakovnja i c - V ploha i malja i nakovnja. Radne površine oblikovane s V utorom se koriste za teže oblikovljive metale, a u slučaju c postiže se za 20 do 40% veća proizvodnost produživanja nego kod korištenja ploha a za isti kovani metal. Razlog je u tome da se pomoću V ploha može postići veća deformacija<sup>23</sup>.

<sup>22</sup> Izuzetak od ovog pravila je prvo produživanje kovanjem odlivenih čeličnih ingota. U takovom slučaju se preporuča produženje za samo 20 do 60 mm više od prvobitne dužine ingota zbog mogućnosti nastanka mjehura ispod površine otkovka.

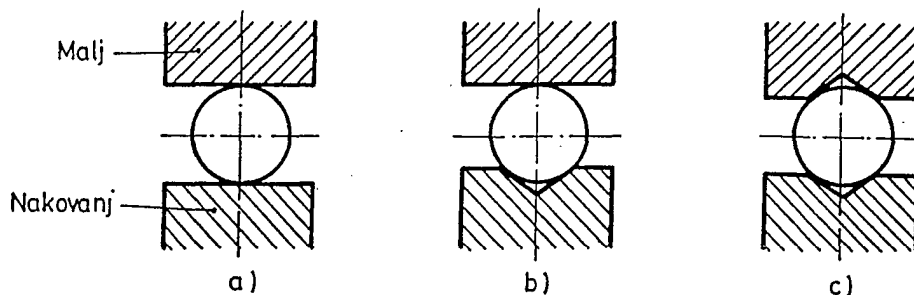
<sup>23</sup> Zainteresiranog čitaoca se upućuje na teorijsko objašnjenje ovog fenomena koje je obradeno u publikaciji Povzranović, A., *Oblikovljivost metala deformiranjem*, FSB (interno izdanje), Zagreb, 1993., poglavlje 3.5.



$h$  = visina kovanja (promjer)

$l$  = korak napredovanja kovanja  
zbog ravnomjernosti deformacije

$$0,5 < \frac{l}{h} < 1$$



Slika 9. Shema produživanja iskivanjem

Deformacijska sila potrebna za produživanje se, kao i kod sabijanja, računa pomoću izraza  $F = p_{sr} A$ , pri čemu za veličinu *srednje vrijednosti tlaka* vrijedi u slučaju produživanja otkovka pravokutnog presjeka

$$p_{sr} = k_f \left[ 1 + \mu l (3b - l) / 6hb \right] \quad (\text{N/mm}^2).$$

U izrazu za  $p_{sr}$  oznaka  $b$  je širina, a oznaka  $h$  je visina pravokutnika presjeka dok  $l$  označava dužinu koraka napredovanja produživanja. Sve ove geometrijske veličine su dane u /mm/, a za veličinu faktora kontaktnog trenja mjerodavne su vrijednosti prikazane u tablici 7. Navedeni izraz za  $p_{sr}$  je samo jedan od mnogih sličnih koji se navode u literaturi, a praktično računanje po izrazima takovog tipa je nepouzđano zbog potrebe poznavanja vrijednosti  $k_f$ . U slučaju produživanja kružnog profila koristi se izraz ( $d$  označava promjer kružnog profila)

$$p_{sr} = k_f (1 + \mu 2 l / 3d) \quad (\text{N/mm}^2),$$

a površina na koju taj srednji tlak djeluje je  $A = dl$  (projekcija površine!). Na ovaj način je moguće odrediti deformacijsku silu potrebnu za odabir kovačke preše no pomoću tih izraza nije moguće odrediti izbor kovačkog bata. Zbog toga se i u ovom slučaju izbor kovačkog bata ili kovačke preše za produživanje iskivanjem vrši na temelju empirijskih izraza. Jedan takav, dan na temelju literature na ruskom jeziku, za određivanje mase padajućih dijelova kovačkog bata  $G$  je

$$G = 1,7 \nu \left( 1 + 0,17 \frac{l}{h} \right) R_{p02} e h b l 10^{-1} \quad [\text{kg}].$$

U ovom izrazu označeno je s

$\nu$

faktor koji uzima u obzir vrstu površine malja. Vrijednost  $\nu = 1$  pridaje se glatkim plosnatim površinama malja, a vrijednost  $\nu = 1,25$  zaobljenim površinama.

- $R_{p02}$  /Mpa/ konvencionalna granica tečenja metala kod temperature kovanja. Za ovu granicu tečenja uzima se da je približno jednaka čvrstoći metala kod temperature kovanja.
- $\epsilon$  relativna deformacija, a za jedan udarac se uvrštava vrijednost  $\epsilon=0,3$ .
- $h, b, l$  (cm) su geometrijske veličine prema slici 9.

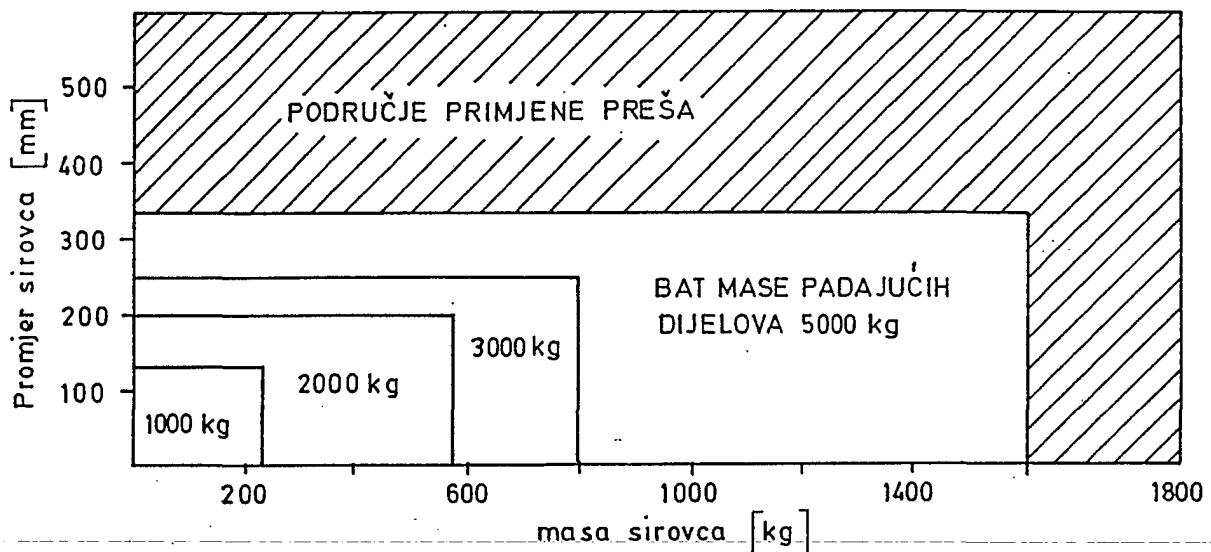
Izbor kovačke preše se, prema istom literaturnom izvoru, temelji na izrazu za izračunavanje deformacijske sile

$$F = \nu \Phi \left(1 + 0,17 \frac{l}{h}\right) R_{p02} b l 10^{-5} \quad [MN]$$

pri čemu je  $\Phi$  označen faktor vrijednosti 0,75 dok je vrijednost  $\nu$  jednaka kao kod prethodnog izraza za izračunavanje mase padajućih dijelova kovačkog bata.

Na slici 10 su analogno slici 8 prikazani geometrijski odnosi sirovca i potrebne mase padajućih dijelova batova koji omogućavaju produživanje iskivanjem.

Označeno je i područje geometrijskih odnosa sirovaca kada se mora primijeniti kovačke preše.



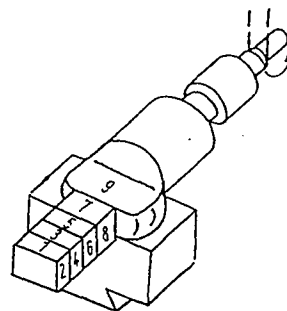
Slika 10. Primjena kovačkih batova i preša za iskivanje sirovaca od čelika različitih geometrijskih odnosa

Tablica 8 pokazuje praktičke mogućnosti iskivanja sirovaca određenih dimenzija na uobičajenim kovačkim batovima s kojima se susrećemo u praksi.

Tablica 8

Kovački bat mase padajućih dijelova $G$ (kg)	Zračni dvoradni bat sirovac kvadratičnog presjeka (stranica $a$ ) ili kružnog presjeka (promjer $d$ ) (mm)	Konzolni zračni bat (autonomna jedinica) sirovac kvadratičnog presjeka (stranica $a$ ) ili kružnog presjeka (promjer $d$ ) (mm)
150		40/110
250		60/140
400		75/160
500	80/180	80/180
750	95/200	
1000	110/230	
1500	125/260	
2000	140/280	
3000	165/330	

Postupak produživanja iskivanjem prikazan je na slici 11. *Raskivanjem* (prikazano je brojem 9 na slici 11) se kovani sirovac proširuje i samo djelomično produžuje. Rotacijom kovanog predmeta za  $90^\circ$  i deformacijom metala vrši se produživanje. Prema slici 11 redoslijed je dakle slijedeći: udarac 1 (kojim se materijal raskiva), rotacija za  $90^\circ$  te nakon toga udarac 2, ponovno rotacija za  $90^\circ$  ali sada u suprotnom smjeru te udarac 3 (ponovno raskivanje), a nakon toga rotacija u smjeru kao kod udarca 1 pa slijedi udarac 4 i tako redom do postizavanja dimenzije zadanog produživanja. Ovakav način produživanja se primjenjuje kod slobodnog kovanja kratkih otkovaka ili otkovaka sa šupljinom.



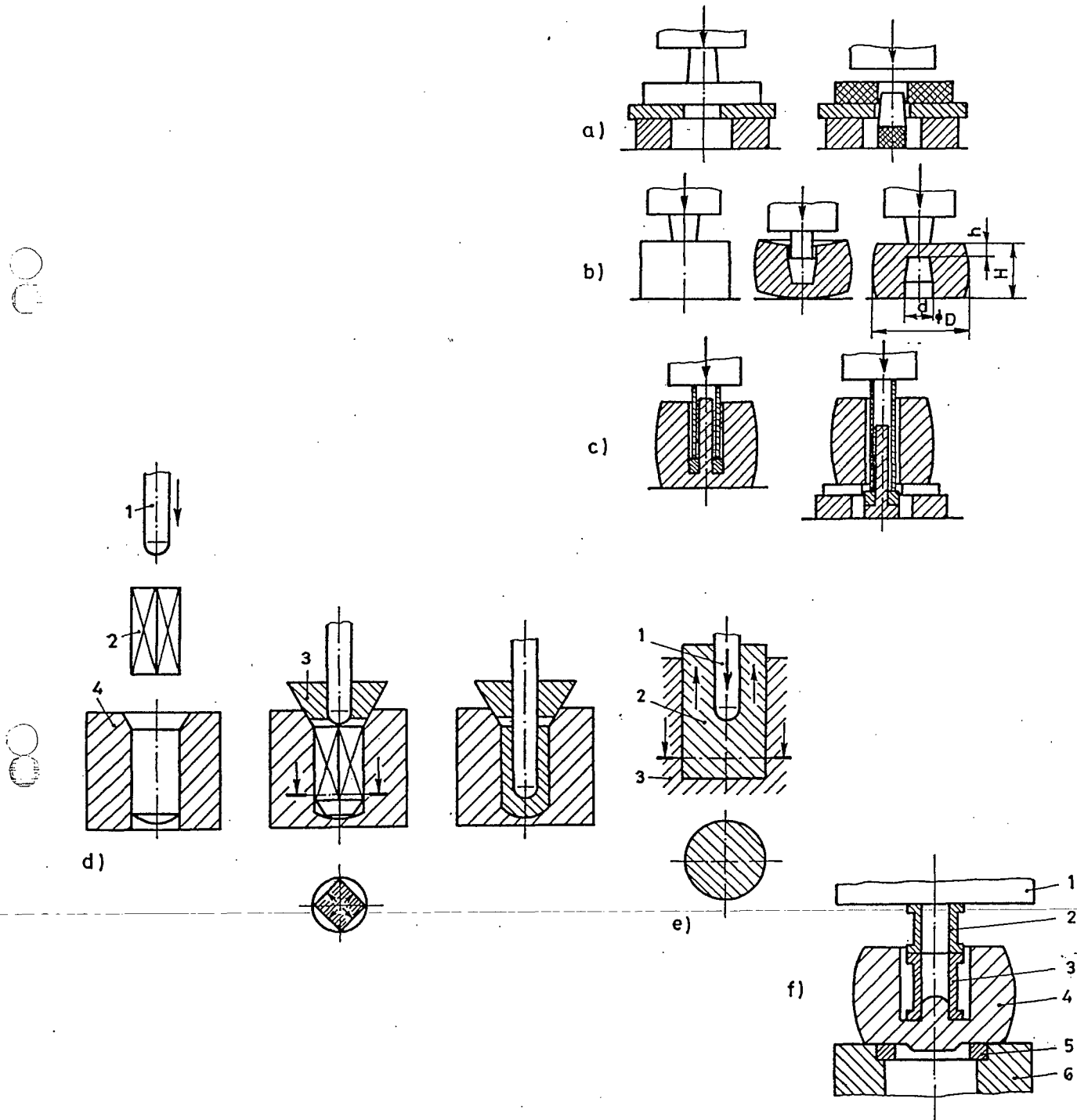
Slika 11. Postupak produživanja iskivanjem i raskivanjem

Produživanje otkovaka većih dužina iskivanjem obavlja se bez rotacije: prvo slijedi raskivanje (poput br. 9 na slici 11) po cijeloj dužini otkovka, a tek tada se cijeli otkovak zakrene za  $90^\circ$  pa se nastavlja iskivanje (opet po cijeloj dužini otkovka) dok se ne postigne potrebna dužina.

### 4.3 Probijanje otvora

Probijanje otvora u masi otkovka je postupak i oblikovanja i razdvajanja slobodnim kovanjem. Obično se probijanje kod slobodnog kovanja velikih masa obavlja nakon sabijanja kao neophodna faza izrade prstena ili cjevastih otkovaka. Promjer otvora  $D_{otv}$  koji se

slobodnim kovanjem može probiti određen je postignutim promjerom mase nakon sabijanja  $D_{sab}$  i namjenom otkovka. Kod izrade otvora za slobodno kovani prsten vrijedi da je  $D_{otv} = 0,35D_{sab}$ , a kod izrade cjevastih otkovaka  $D_{otv} = 0,5D_{sab}$ . Kod slobodnog kovanja malih masa otvori se probijaju na ravnim ploham koje su također ostvarene sabijanjem, ali općih ograničenja veličine promjera otvora nema. Različiti načini probijanja otvora koji se koriste u tehnologiji slobodnog kovanja prikazani su na slici 12.



Slika 12. Probijanje otvora velikih slobodno kovanih otkovaka

Na slici 12, slučaj a, prikazano je probijanje otvora pomoću *trna za probijanje i matične ploče* s rupom. Na ploču je postavljen prethodno sabijeni sirovac (koji je još uvijek na temperaturi unutar temperaturnog intervala kovanja), a trn za probijanje se utiskuje pomoću udarca kovačkog bata ili s deformacijskom silom kovačke preše. Probijeni materijal propada kroz otvor matične ploče. Ovakav način probijanja, koji omogućava relativno točno razdvajanje, upotrebljava se za izradu otvora manjih promjera i to na tanjim diskovima dobivenim sabijanjem.

Kod probijanja otvora na otkovcima malih masa, pogotovo ručno slobodno kovanih, ovakav način probijanja otvora se najčešće upotrebljava bez obzira da li je otvor okrugao ili je bilo kojeg drugog oblika (pravokutni, kvadratični, šesterokutni i sl.).

Otvori većih promjera (do 400 mm) na diskovima (ili blokovima) veće debljine izrađuju se prema slici 12, slučaj b. Trn se utiskuje na dubinu koja odgovara veličini  $2H/3$ , a nakon toga se blok okrene pa se trn ponovno utiskuje da bi se konačno probio otvor i iz njega izbacila ploča suvišnog materijala promjera  $d$  i visine  $h$ , kako je to naznačeno na skici b.

Otvore je moguće izraditi i bez trna ali pomoću korištenja *prstena za probijanje*. Takav postupak prikazan je načelno na slici 12, slučaj c i na istoj slici, slučaj f, s detaljima tog alata.

U ovom posljednjem slučaju s 1 je označena tlačna ploča kovačke preše, 2 označava međuprsten, a 3 prsten za probijanje. Međuprsten je neophodan jer se probija otvor veće dužine. Otkovak 4 je postavljen na matičnu ploču 5 koja se nalazi na podložnoj ploči 6 s otvorom za prolaz razdvojenog materijala. Upotreba matične ploče osigurava čisti rez razdvajanja.

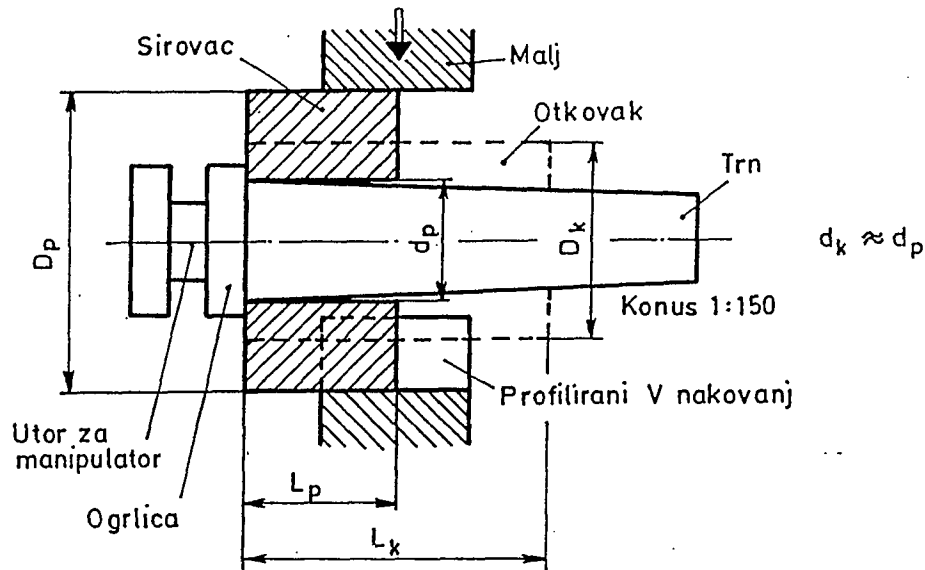
U kovačko probijanje otvora ubrajamo i *ubadanje* prikazano na slici 12, slučaj d i e. Ovo nije tipičan slučaj slobodnog kovanja premda se nekad koristi i u toj tehnologiji. Blok lijevanog ili valjanog zagrijanog metala 2 ulaže se u matricu 4, a u blok se pomoću deformacijske sile preše ubada do potrebne dubine trn 1 koji ostvaruje otvor presjeka identičnog po dimenzijama i obliku s onim kod trna. Budući da se koristi matrica koja ograničava tečenje materijala u bočnom smjeru, postupak se ne može smatrati pravim postupkom slobodnog kovanja. Nekad se koristi i vodilica trna 3 koja pored vodjenja ima i zadatak osiguranja tlaka na površini materijala, a koji će zbog ubadanja istjecati u smjeru suprotnom gibanju trna. Bez ostvarivanja značajnog tlaka na toj površini moglo bi doći do stvaranja pukotina koje bi se negativno odrazile na kvalitet proizvoda u daljnjim fazama obrade plastičnom deformacijom<sup>24</sup>.

Slučaj e sa slike 12 pokazuje ubadanje gdje nije korištena vodilica i u kojem slučaju se radi o *protusmjernom istiskivanju* zagrijane mase metala 2 koja je uložena u matricu 3 uz utiskivanje trna 1. Ovaj način ubadanja se sve više koristi u suvremenoj tehnologiji kovanja u *ukovnju na mehaničkim kovačkim prešama* za izradu otkovaka s unutarnjom šupljinom. Protusmjerno istiskivanje na temelju jednakog principa tečenja metala koristi se i u deformacijskim postupcima tehnologije *istiskivanja metala u hladnom stanju*, postupcima suvremene tehnologije *masovne* izrade manjih metalnih proizvoda.

<sup>24</sup> Na jednak se način izrađuje *cijevnica* koja je prva faza deformiranja bloka metalnog materijala kod valjanja bešavnih cijevi.

#### 4.4 Iskivanje debelostijenog prstena

Od prethodno otkovanog diska s otvorom *iskivanjem s trnom*<sup>25</sup> se izrađuje debelostjeni prsten prema shemi prikazanoj na slici 13.



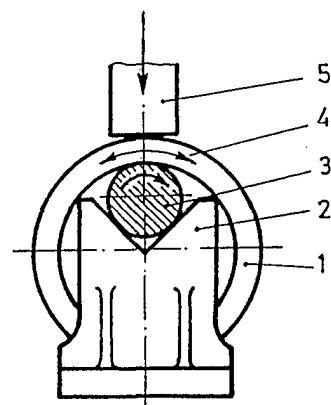
Slika 13. Iskivanje debelostijenog prstena s trnom

Kovanje započinje iz početnog položaja koji je prikazan na slici 13 zbog bržeg hladjenja desnog kraja. Sirovac (s prethodno probijenog rupom) prvobitne dužine  $L_p$  i promjera  $D_p$  se kuje na promjer  $D_k$  dužine  $L_k$  kovanjem preko blago koničnog trna kojega je promjer  $d_k$  približno jednak promjeru prethodno probijene rupe  $d_p$ . Pomicanjem trna u lijevo i materijal teče u istom pravcu te se oslanja na ogrlicu trna. Radne plohe malja i nakovnja su redovito izrađene kao V profil, no moguće je koristiti i ravnu plohu malja ali uz to profiliranu plohu nakovnja, kako je to i prikazano na slici 13 (i slici 14). Nakon svakog udarca vrši se djelomična rotacija otkovka i trna za dužinu  $l$  na opsegu. Na slici 14 prikazano je iskivanje debelostijenog prstena preko trna u presjeku bokocrta. Prsten (1) se nalazi obješen na trnu (3) koji je oslonjen na V profilirani nakovanj (oznaka 2), a deformacija se postiže udarcima malja po prstenu (5). Pogodnim manipulacijskim uređajem ostvaruje se potrebna rotacija prstena i trna (4).

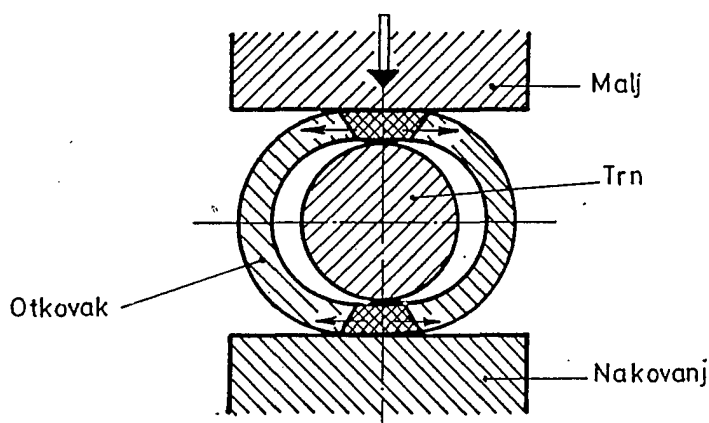
Razlog zbog kojeg je preporučljivo iskivanje debelostijenog prstena s barem jednom plohom koja je V profilirana vidljiv je na slici 15. Naime, kada se kuje s ravnim ploham malja i šabota kontura presjeka otkovanog prstena nužno mora postati ovalna zbog značajno nejednolike deformacije svoje stijenke na mjestu dodira s tlačnim ploham, kako je to prikazano na slici 15.

<sup>25</sup> Ova se operacija nekad naziva i proširivanjem. To je u svojoj suštini tangencijalno produživanje plašta prstena ili plašta drugog oblika šupljeg tijela. Kod velikih otkovaka promjera većih od 650 mm to je jedini način proizvodnje prstena slobodnim kovanjem, no jednak se postupak provodi i kod slobodnog kovanja sličnih otkovaka manjih dimenzija.





Slika 14. Iskivanje debelostijenog prstena s trnom - presjek



Slika 15. Iskivanje debelostijenog prstena s ravnim tlačnim ploham

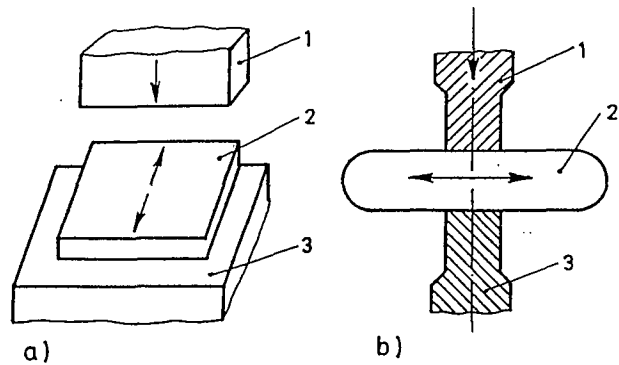
I u ovom slučaju se kvaliteta okovka ocjenjuje na temelju gnječenja materijala sirovca ostvarenog produživanjem. Kod kovanja debelostijenih prstena, koji su obično namijenjeni gradnji posuda pod visokim tlakom, koristi se kao mjerilo prokovanosti značajka produžavanja  $y$  koja se izražava odnosima

$$y = \frac{A_p}{A_k} = \frac{D_p^2 - d_p^2}{D_k^2 - d_k^2} = \frac{L_p}{L_k} = \frac{\delta_p D_{p \text{ sred}}}{\delta_k D_{k \text{ sred}}}$$

pri čemu su oznake jednake onima na slici 13, a s  $\delta_p$  i  $\delta_k$  su označene debljine stijenke sirovca prije i prstena nakon kovanja.

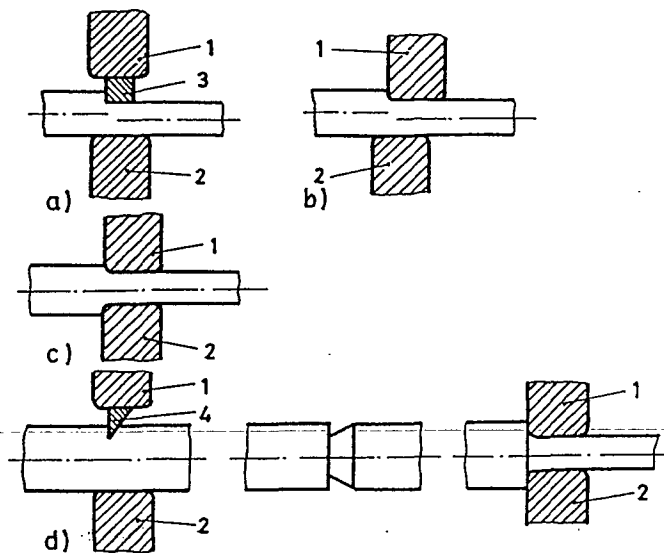
#### 4.5 Ostali postupci slobodnog kovanja

Širenje kod slobodnog kovanja označava postupak povećanja širine sirovca smanjivanjem njegove debljine, a da mu se dužina pri tom skoro i ne mijenja. Ovaj način kovanja se koristi za izradu plosnatih profila svih dimenzija. Na slici 16 (slučaj a) prikazano je širenje sirovca 2 koje se obavlja kovanjem ravnim ploham a 1 i šabota 3, a slučaj b sa iste slike pokazuje širenje u bočnom presjeku. Strelice na sirovcu 2 označavaju pomak otkovka koji treba ostvariti da bi se postiglo željeno širenje.



Slika 16. Širenje slobodnim kovanjem

Užljebljivanje i stanjivanje su kovački postupci koji su u tehnologiji slobodnog kovanja međusobno povezani: užljebljivanjem se označava mjesto na sirovcu s kojeg treba otkovak stanjivati i tako *redukcijom presjeka* postići zadanu dimenziju, pri čemu se postizava produženje otkovka. Razumljivo je da je s obzirom na potrebu što točnijeg postizavanja zadane dužine i debljine otkovka te ekonomično iskorištenje materijala vrlo važno odrediti mjesto s kojega mora započeti operacija stanjivanja. Stoga je užljebljivanje na sirovcu vrlo važna operacija koja se pažljivo izvodi jer se time označava mjesto sa kojega treba započeti "preseljenje" metala<sup>26</sup>. Na slici 17 prikazani su različiti slučajevi izvodjenja stanjivanja: a - asimetrično (jednostrano) stanjivanje kovanjem između malja 1 i šabota 2 pomoću pomoćnog alata 3 (ovaj jednostavni alat spada u kovački pribor za slobodno kovanje i prikazan je na slici 23, skica 6); b - asimetrično stanjivanje bez pomoćnog pribora; c - simetrično stanjivanje pomoću malja i šabota; d - simetrično stanjivanje uz pomoć noža za užljebljivanje 4 koje se u kasnijoj fazi obavlja samo pomoću malja i šabota (različiti profili noževa za užljebljivanje, koji se također smatraju kovačkim priborom, prikazani su na slici 23, skica 3). Dužina dijela otkovka koji se stanjuje mora biti jednaka najmanje polovini širine šabota.



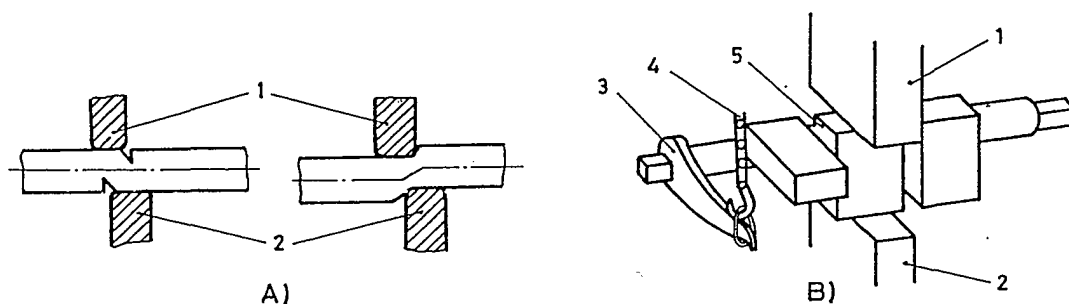
Slika 17. Postupak stanjivanja slobodnim kovanjem

<sup>26</sup> Važnost označavanja mjesta promjene dimenzije presjeka može se uočiti i na slici 23 gdje su u okviru prikaza brojnog pribora za pomoćne postupke oblikovanja slobodnim kovanjem pokazani različiti profili noževa za užljebljivanje te različiti profili podmetača koji služe za postizavanje zadanih oblika prijelaza kod promjene presjeka slobodno kovanog otkovka.

**Zakretanje** je važan kovački postupak izrade asimetričnih otkovaka. Na slici 18 A prikazano je zakretanje otkovka okruglog ili pravokutnog presjeka uz prethodno užljebljivanje. Slučaj B prikazuje primjenu postupka zakretanja kod izrade koljenaste osovine, gdje se masa budućeg koljena 5 mora zakrenuti u odnosu na susjedne mase za 90°. To se postiže korištenjem zakretnog ključa 3.

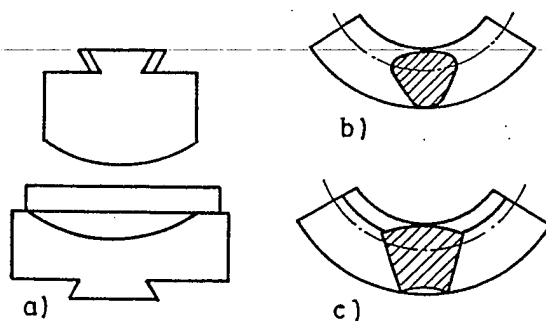
Usporedi sliku 22, skica 10, gdje je među kovačkim priborom prikazan i zakretni ključ. Treba uočiti da su krajevi osovine koja se zakreće na slici 18 prethodno otkovani na kvadratični presjek kako bi se mogao nasaditi zakretni ključ.

Moment zakreta ostvaruje se vučnom silom kovačkog granika na kojega je lancem 4 ovješeno zakretno ključ. Malj 1 se pri tom nalazi u svom donjem mrtvom položaju i s nepomičnim šabotom 2 osigurava nepomičnost mase budućeg koljena 5. Da bi se postiglo zakretanje u području plastične deformacije metala važno mu je održati temperaturu unutar temperaturnog intervala kovanja. S obzirom na sporst ovakovog postupka nužno je kod oblikovanja čelika masu 5 *lokalno* zagrijavati tako da se održi temperatura od oko 1000°C. Napredovanje zakretanja kao i rezultat ove operacije se kontrolira pomoću posebne šablone.



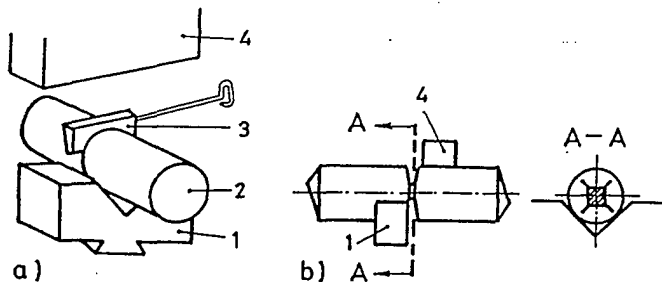
Slika 18. Operacija zakretanja kod slobodnog kovanja

**Savijanje** u postupku slobodnog kovanja omogućava postizavanje zakrivljenosti no bez spomena vrijedne promjene presjeka. Obavlja se posebno oblikovanim alatom za točno određeni polumjer zakrivljenosti. Takav alat je prikazan na slici 19, skica a. Operacija savijanja se koristi u završnoj fazi izrade različitih savinutih oblika otkovaka (kranske kuke, segmenti vijenaca velikih zupčanika na kojima će biti izradjeno ozubljenje, različiti kutnici i sl.). Kod takovog savijanja valja imati u vidu mogući tip deformacije poprečnog presjeka nakon savijanja (slika 21, skice b i c), što će zavisiti o dimenzijama profila i polumjeru zakrivljenosti.



Slika 19. Kovačko savijanje

**Odsijecanje** je kovački postupak razdvajanja sirovca radi dobivanja mase zadanog otkovka, radi odvajanja pete i glave ingota od ostatka mase sirovca ili zbog uzimanja materijala za laboratorijske probe. Postupak se izvodi pomoću noža za odsijecanje kako je to prikazano na slici 22 a (usporedi prikaz kovačkog pribora prikazan na slici 23, skice 1 i 2). Zasijecanje prikazano na slici 22 a: otkovak 2 je oslonjem na V oblikovanu plohu šabota, a maljem 4 se utiskuje nož za odsijecanje 3 uz rotaciju otkovka 2 u jednom smjeru nakon svakog udarca malja. Kod odsijecanja velikih presjeka nož dopire samo u površinske slojeve mase pa se prorezivanje obavlja lomljenjem kako je to prikazano na slici 20 b.



Slika 20. Kovačko odsijecanje

**Zagladjivanje** površine otkovka radi uklanjanja tragova udaraca malja ili tlačenja žiga obavlja se pomoću pribora prikazanog na slici 23, skica 7, 8 i 9. Deformira se samo površinski sloj dovršenog otkovka tako da je promjena presjeka zanemariva, a tečenje materijala ograničeno samo na vanjsku rubnu zonu. Otkovak je zagrijan na temperaturu blizu donje granice temperaturnog intervala kovanja.

**Ravnanje** je nezaobilazan postupak kovačke završne obrade slobodno kovanih otkovaka s produženom osi. Zbog velikih sila kojima se u toku slobodnog kovanja deformira visoko zagrijani čelik nemoguće je slobodnim kovanjem izraditi potpuno ravan otkovak tipa osovine. Takav je otkovak uvijek donekle savijen<sup>27</sup>. Svrha ravnanja je ispravljanje savinutog otkovka. Ravnanjem dakle treba ostvariti deformaciju *savijanjem*, ali u suprotnom smjeru od onoga u kojem je savinut otkovak.

Ravnanje se može izvoditi u *toplom* ili u *hladnom* stanju materijala. U toplom stanju se ravnanje izvodi na temperaturi otkovka od 500 do 600°C. Ovakav je postupak uobičajen za otkovke od nisko legiranih čelika te za sve otkovke kojih je promjer veći od 250 mm, bez obzira na kemijski sastav materijala. Za otkovke manjih promjera moguće je ravnanje izvršiti i u hladnom stanju materijala, dakle materijala koji ima okolišnu temperaturu. Postupak ravnanja se obavlja na posebnoj hidrauličkoj preši s ravnim tlačnim plohami i odgovarajućim podlogama, ovisno o iskrivljenosti otkovka<sup>28</sup>.

<sup>27</sup> Kada bi se isporučio savinut otkovak tipa osovine koji će poslije kovanja biti grubo tokaren, dodaci za obradu bi morali biti toliko veliki da se uzmogne kompenzirati odstupanje simetrale otkovka od pravca.

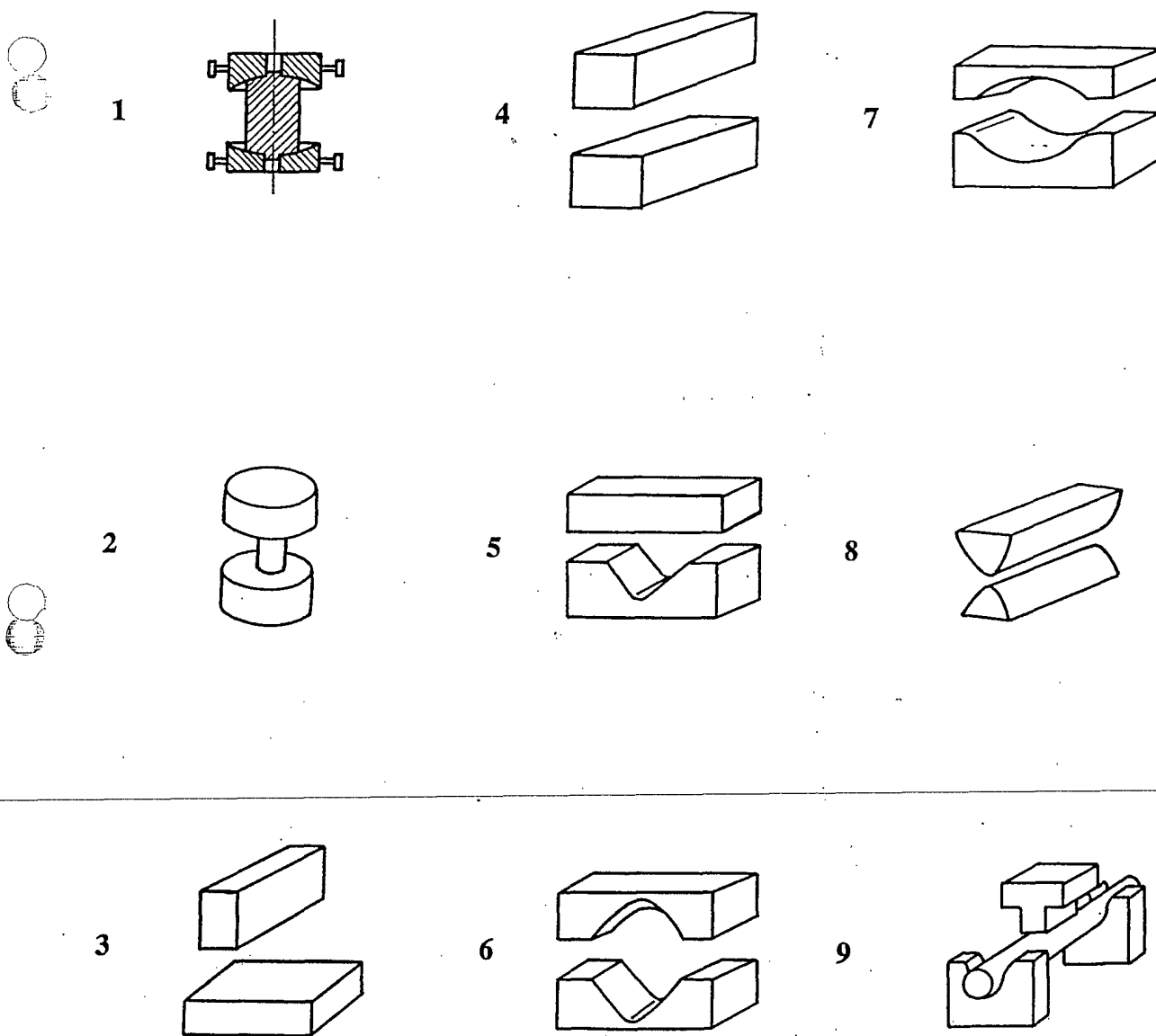
<sup>28</sup> Ravnanjem, a to znači savijanjem, u otkovak se unose zaostala naprezanja. Veličina ovih napreznja je manja kod toplog, a veća kod hladnog postupka. Nakon daljnje obrade ovakovog otkovka moguće je da dodje do prirodnog oslobadjanja zaostalih napreznja, što onda znači nedopustivo savijanje već obradjenog otkovka. To se radi oslobadjanja od zaostalih napreznja spriječava posebnom toplinskom obradom koju će se uvijek provoditi kod otkovaka namijenjenih odgovornim dijelovima konstrukcije.

## 5. KOVAČKI PRIBOR ZA SLOBODNO KOVANJE

U kovački pribor za slobodno kovanje ubrajamo:

- a) različite oblike radnih (tlačnih) ploha malja i šabota;
- b) različite tipove i oblike trnova za probijanje;
- c) alate za pomoćne operacije slobodnog kovanja.

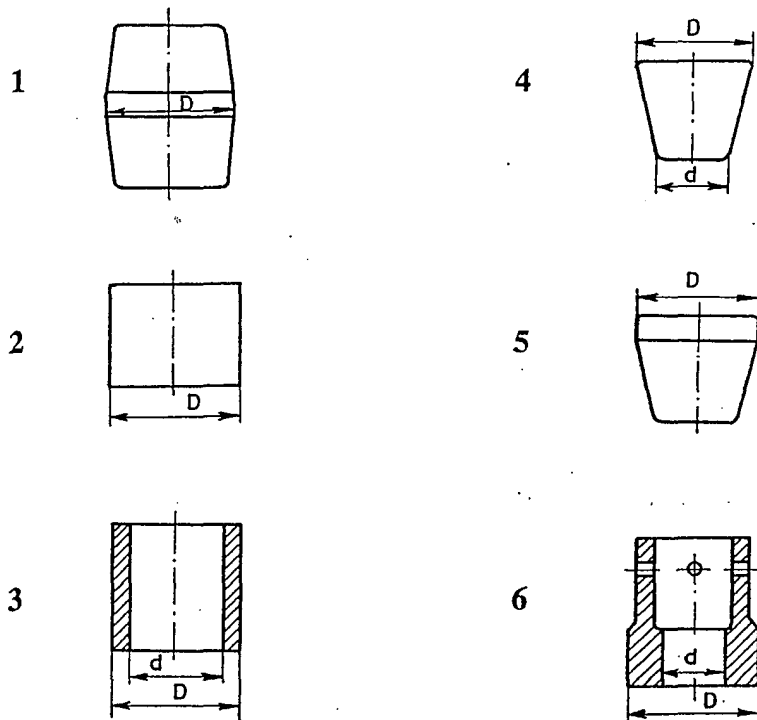
Na slici 21 prikazani su shematski različiti oblici tlačnih ploha malja i šabota koji se koriste za različite vrste i operacije slobodnog kovanja.



Slika 21. Oblici tlačnih ploha malja i šabota

Na slici 21 s 1 su označene tlačne plohe koje se koriste za sabijanje odlivenih čeličnih ingota velikih masa. Sabijanje cilindričnih i prizmatičnih oblika otkovaka izvodi se pomoću tlačnih ploha prikazanih skicom 2 i 3. Ova se posljednja može primijeniti i za proširivanje. Primjena tlačnih ploha za sabijanje i produživanje otkovaka višekutnih presjeka prema skici 4 je univerzalna. Produživanje kružnih presjeka se obavlja s plohamo prema skici 5, a kada se slobodno kuje veliki promjeri koristi se kombinacija ploha prema skici 6. Produživanje i zagladjivanje otkovaka kružnih presjeka od visoko legiranih čelika obavlja se tipom ploha prikazanim na skici 7. Širenje i produživanje kvadratičnih i pravokutnih presjeka uz intenzivno tečenje materijala u toku kovanja obavlja se plohamo prema skici 8. Za izradu prstenova slobodnim kovanjem upotrebljava se kombinacija podloga i trna prema skici 9.

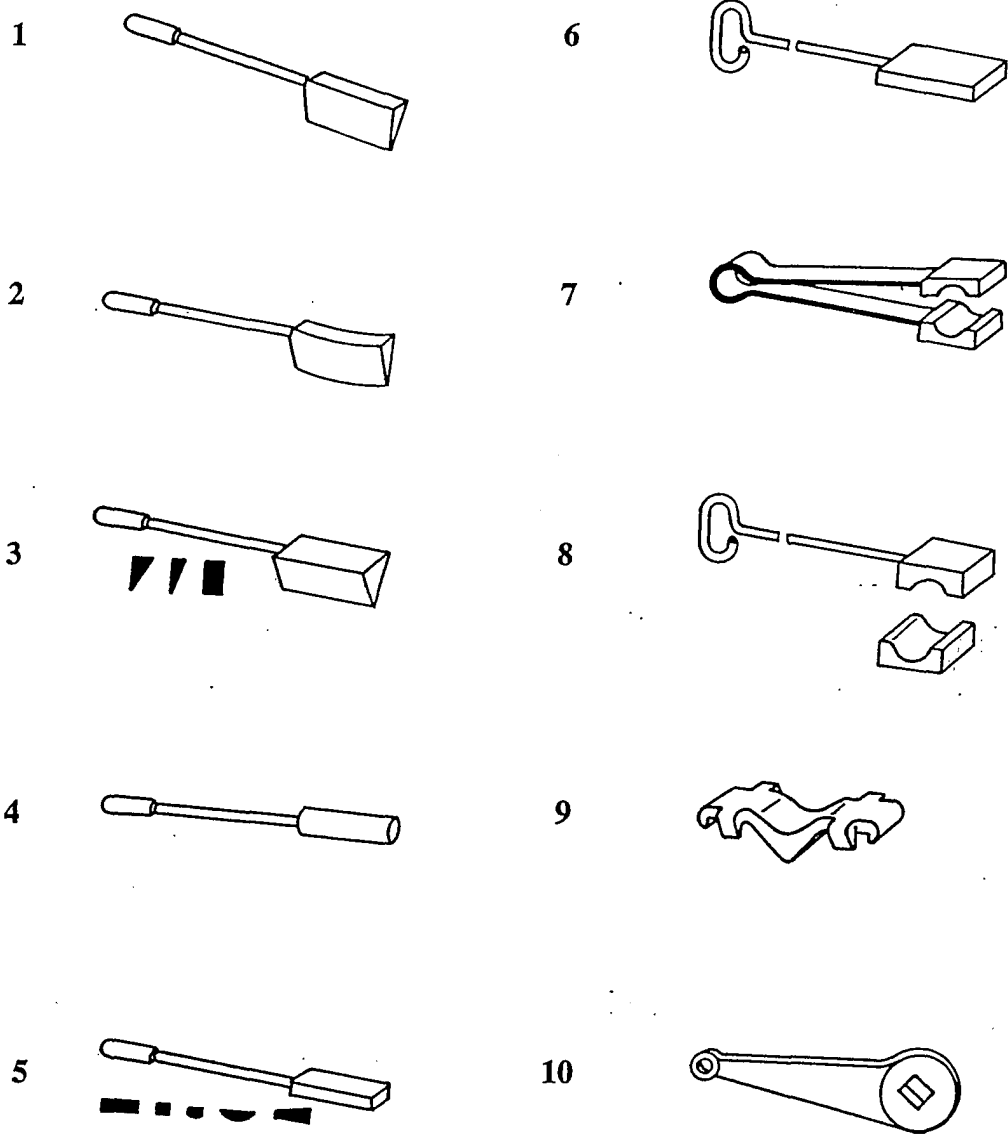
Različiti tipovi trnova za probijanje otvora prikazani su na slici 22.



Slika 22. Tipovi trnova za probijanje

Za predprobijanje otvora promjera  $D$  od 60 do 110 mm služi trn prikazan skicom 1 na slici 22. Konačno probijanje otvora obavlja se trnom prema skici 2 za promjere  $D=35$  do 300 mm. Probijanje velikih promjera otvora ( $D=300$  do 600 mm) obavlja se s trnom prikazanim na skici 3. Odnos dimenzija kod ovih trnova je  $d/D \approx 0,65$  do  $0,75$ . Za probijanje dubokih otvora koristi se nastavak trna prikazan na skici 4 kojega je promjer  $D=0,95D_{trna}$ . Nastavak šupljeg trna 3 za probijanje dubokih otvora prikazan skicom 5. Dimenzijske značajke ovog nastavka su:  $d/D \approx 0,8$ , a promjer mu je  $D \approx D_{trna}$ . Trn za kalibriranje i zagladjivanje probijenih otvora prikazan je skicom 6. Kod trna za kalibriranje vrijedi da je  $D=D_{trna}$  (kojim je izvršeno prethodno probijanje).

Niz jednostavnih pribora koji se koriste za pomoćne postupke slobodnog kovanja prikazan ja na slici 23.



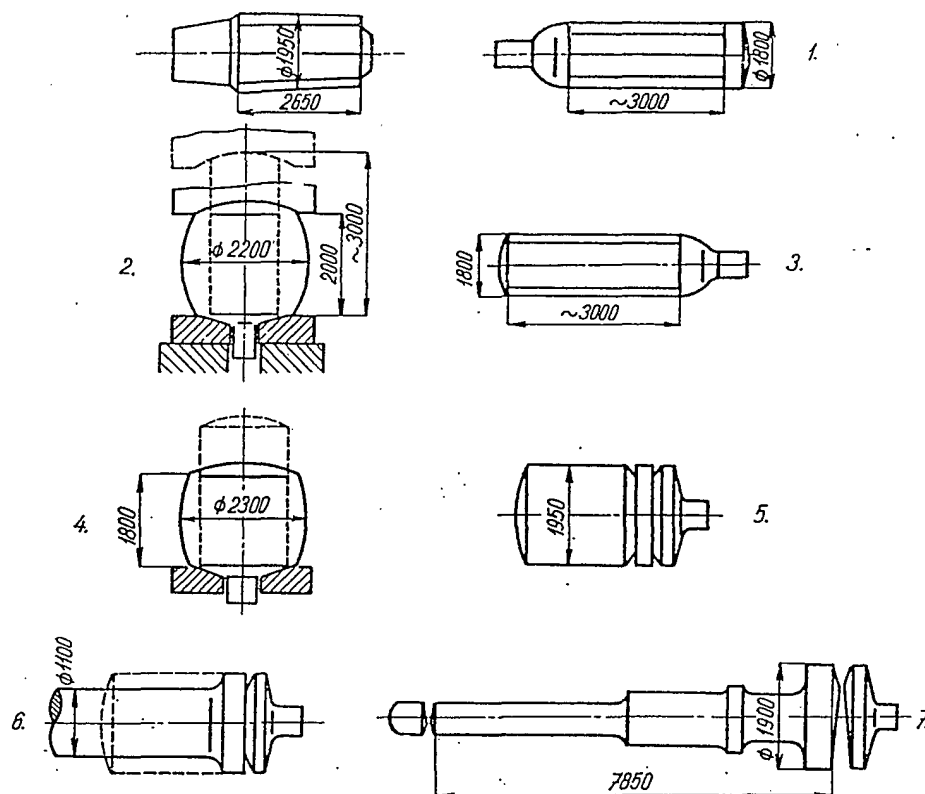
Slika 23. Kovački pribor za pomoćne postupke slobodnog kovanja

Ravni nož za odsijecanje prikazan je skicom 1 na slici 23. Za odsijecanje zaobljenih otkovaka služi nož prikazan skicom 2. Označavanje mjesta početka promjene presjeka, kada se označavanje vrši užljebljivanjem, vrši se nožem različitih profila oštrice prema skici 3. Kod plosnatih otkovaka mjesto početka promjene označava se podmetačima sa skica 4 i 5. Naznaka asimetrične promjene presjeka se obavlja pomoćnim alatom prema skici 6. Skica 7 prikazuje pomoćni alat za zagladjivanje i ravnanje otkovaka manjih promjera, a skica 8 alat za iste operacije ali promjera srednje veličine. U tom slučaju je donji dio alata pričvršćen na šabot. Za ravnanje i zagladjivanje većih promjera koristi se uložak pričvršćen na šabot kako je to prikazano skicom 9. Skica 10 prikazuje zakretni ključ.

## 6. PRIMJERI IZRADE VELIKIH OTKOVAKA SLOBODNIM KOVANJEM

Kod izrade otkovka slobodnim kovanjem primjenjuju se gotovo svi postupci opisani u poglavlju 4. To vrijedi za otkovke i velikih i malih masa. U industrijskim uvjetima izradjuju se vrlo raznoliki oblici otkovaka pa će ovdje prikazani i opisani primjeri biti ograničeni na nekoliko tipova velikih otkovaka koji se najčešće izradjuju.

**Primjer 1:** Postupak izrade osovine  $L=7850$  mm s prirubnicom  $D=1900$  mm slobodnim kovanjem. Prikaz postupka dan je na slici 24.



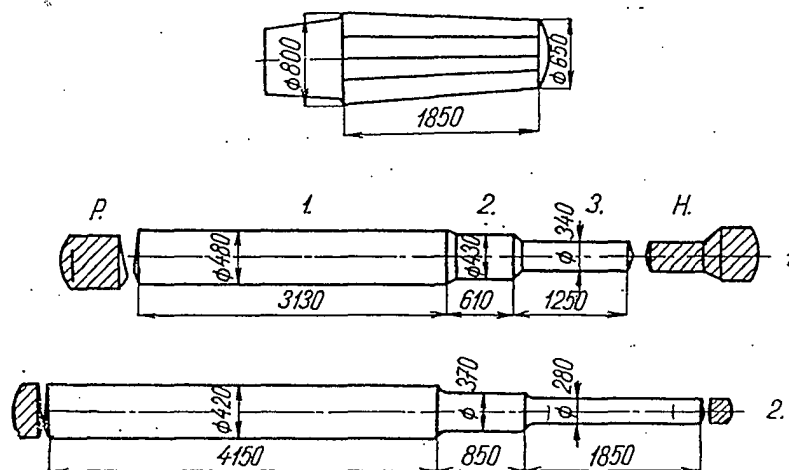
Slika 24. Izrada osovine s prirubnicom velikih dimenzija

Sirovac od kojeg je otkovana osovina sa slike 24 je lijevani čelični ingot mase 85000 kg srednjeg promjera 1950 mm i korisne dužine od 2650 mm. Sve kovačke operacije koje su prikazane izvedene su na kovačkoj hidrauličkoj preši nazivne sile od 50 MN. U prvoj fazi kovanja (oznaka 1 na slici 24) ingot je iskovan na osmerokutni presjek i promjer od 1800 mm pri čemu mu je dužina povećana na oko 3000 mm. Nakon toga je u drugoj fazi kovanja (2) izvršeno sabijanje pa je prethodna dužina od 3000 mm sada postala visinom od oko 2000 mm, a najveći promjer (zbog "bačvanja") je postignut od 2200 mm. U trećoj fazi (3) ponovnim iskivanjem su postignute dimenzije kao i u slučaju (1). Četvrta faza kovanja (4) je ponovno sabijanje na najveći promjer od 2300 mm i visinu od 1800 mm. Ponovljenim sabijanjem ujednačena je struktura lijevanog čelika i odstranjene su eventualne grube



strukturalne greške. Valja uočiti da je dio glave ingota otkovan kao izdanak koji služi za prihvat manipulatora<sup>29</sup>. Taj izdanak će poslužiti i kao dio za centriranje kod postavljanja na podložnu ploču kod operacije sabijanja (faza 2 i 4). U fazi kovanja 5 je izvršeno blago produživanje i smanjenje promjera na 1950 mm što je nešto više od promjera prirubnice (1900 mm). U ovoj fazi kovanja je izvršeno i užljebljivanje kao naznaka mjesta s kojeg će se u idućoj fazi (6) kovanja obaviti produživanje tako da se postigne promjer od 1100 mm, odnosno mjesta na kojem će se izvršiti odrezivanje bivše glave ingota. U posljednjoj fazi kovanja (7) postižu se zadane dimenzije otkovka uz odvajanje bivše glave i pete ingota<sup>30</sup>. Valja napomenuti da je izrada ovakovog otkovka rijetka, a u nizu zemalja se i ne prakticira. Razlog je prvenstveno u tomu što se u ovom slučaju koristi čelični ingot nominalne mase od oko 50 tona (usporedi tablicu 5), a lijevanje čeličnih odljevaka ovakovih masa zahtijeva peći i ostale uređaje primjerenih dimenzija i kapaciteta koji se instaliraju samo u najvećim čeličana.

**Primjer 2: Kovanje osovine s tri različita presjeka** ukupne dužine  $L=6850$  mm. Prikaz postupka kovanja dan je na slici 25.



Slika 25. Kovanje osovine

Kovanje osovine od sirovca-ingota niskolegiranog strojogradjevnog čelika mase 8 tona obavlja se produživanjem otkovka na kovačkoj hidrauličkoj preši (usporedi sliku 10) bez prethodnog sabijanja. Minimalni stupanj prokivanja postignut produživanjem na promjer od 420 mm (u drugoj fazi kovanja) iznosi 2,97, što je u skladu sa uobičajenim zahtjevima kvalitete prokivanja (usporedi tč.2.2 i sliku 3)<sup>31</sup>. Maksimalna stupanj prokivanja osovine je postignut kod promjera 280 mm, a taj iznosi 6,7. Izostanak sabijanja je dakle opravdan jer je osigurano dobro prokivanje zahvaljujući *spretno odabranom odnosu dimenzija promjera*

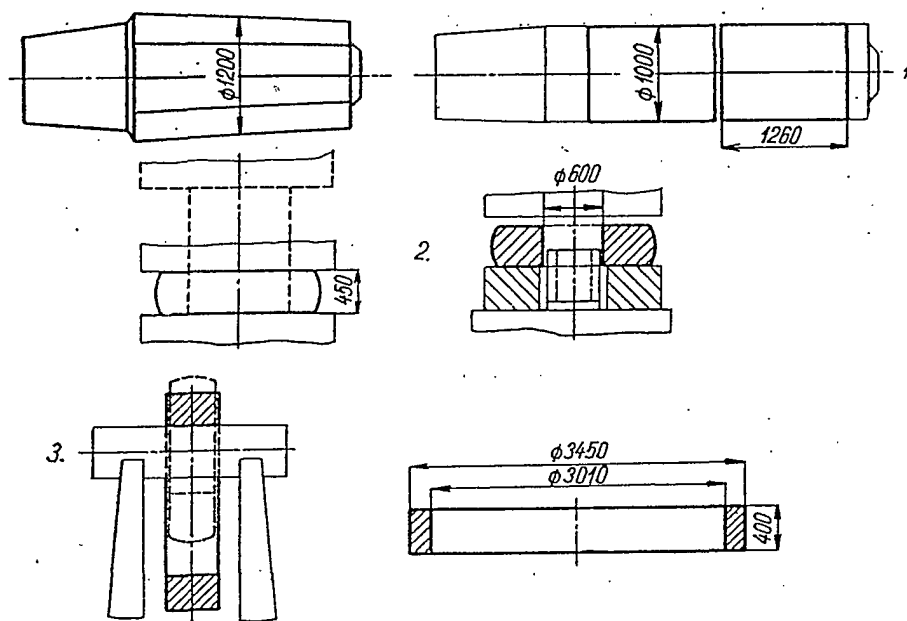
<sup>29</sup> O načinima manipulacije i transporta u toku kovanja velikih masa kod slobodnog kovanja bit će riječi u poglavlju 7.

<sup>30</sup> Dio materijala koji je pripadao prije kovanja peti ingota odvaja se zbog preklopa materijala kod produživanja kovanjem. Kod produživanja površinski slojevi lakše teku od onih bližih sredini. Zbog nagle oksidacije površine (visoka temperatura) neće doći do spajanja površina pa je to razlog postojanja neželjene višeslojnosti koju u metalu smatramo defektom.

<sup>31</sup> Srednji promjer ingota sa slike 25 iznosi 725 mm, a površina njegovog presjek je u tom slučaju  $A_0=412824$  mm<sup>2</sup>. Promjeru otkovka od 420 mm odgovara površina presjeka  $A_1=138544$  mm<sup>2</sup> pa je stoga stupanj prokivanja  $V=A_0/A_1=2,97$ .

ingota spram promjera otkovka<sup>32</sup>. Na slici 25 se vidi da su u prvoj fazi kovanja (1) otkovani promjeri za 60 mm veći od onih u drugoj i završnoj fazi kovanja (2). To je učinjeno s razloga što je nakon prve faze zbog dužine trajanja kovanja i hladjenja materijala nužno dogrijavanje nedovršenog otkovka. U toku dogrijavanja postoji realna bojazan od nastanka grubozrnate strukture. Ako do toga i dodje, kovanjem u drugoj fazi i smanjenjem promjera za 60 mm (što znači redukciju presjeka od oko 15%) ponovno se zbog izvršene deformacije postiže zadovoljavajuća sitnozrnata struktura. Nakon prve faze kovanja odsječen je dio materijala koji je pripadao glavi ingota (označen s na slici 25 s H) i dio koji je pripadao peti (P). Ovi krajnji dijelovi su prije produživanja kovanjem na dimenzije prikazane na slici 25 oblikovani tako da mogu poslužiti kao hvatišta manipulatora. Nakon druge faze se ponovno odsijekaju oba kraja otkovka, a ovaj puta tomu je razlog odstranjivanje preklopa materijala.

**Primjer 3: Kovanje čeličnog prstena  $\phi 3450/3010$  mm** prema slici 26. Nakon obrade na mjere prema konstrukcijskom crtežu prsten je mase od 3600 kg.



Slika 26. Slobodno kovanje velikog čeličnog prstena

Ingot nominalne mase od 25000 kg koristit će se za izradu dva prstena. U fazi 1 ingot se produžuje na  $\phi 1000$  mm te se od njega razdavaju dva sirovca  $L=1260$  mm uz odstranjivanje materijala glave ingota i manjeg dijela s pete<sup>33</sup>. Ovim produživanjem ingota

<sup>32</sup> Na temelju ovog primjera može se dakle uočiti važnost izbora dimenzije sirovca-ingota za kovanje velikih masa. Pogodnim izborom dimenzije ingota izbjegnuta je kovačka operacija sabijanja te je uštedjeno vrijeme izrade, energija zagrijavanja i eventualnog dogrijavanja te zauzimanje kapaciteta tom operacijom. Suprotno tomu, u slučaju izrade otkovka sa slike 24, nije bilo moguće izbjeći operaciju sabijanja. Tamo je srednji promjer ingota bio 1950 mm, a promjer otkovane prirubnice 1900 mm. Zbog poboljšanja strukture i postizavanja određenih mehaničkih svojstava odgovarajući stupanj prokivanja bilo je moguće ostvariti samo sabijanjem.

<sup>33</sup> Izrada više otkovaka od jednog ingota je česta praksa zbog gospodarenja s materijalom. U svim slučajevima se odbacuje materijal s glave ingota pa je onda jasno da je u ovom slučaju racionalnije odbaciti jednu glavu većeg ingota nego dvije glave manjeg. Zbroj mase dviju glava manjeg ingota je veći od mase jedne glave.

postignut je nedovoljan stupanj prokivanja  $V=1,44$  što znači da će nužno morati uslijediti naknadno sabijanje svakog sirovca. I zaista u fazi (2) vrši se jako sabijanje sa  $L=1260$  mm na  $L=450$  mm. Pri tom je postignut stupanj prokivanja  $V=2,8$ . Na ovako sabijenom disku probija se pomoću trna otvor  $\varnothing 600$  mm. U fazi (3) postepeno se proširuje promjer prstena iskivanjem preko horizontalno postavljenog trna. Stijenka se stanjuje do dimenzije gotovog otkovka i potrebnih promjera. U ovom slučaju slobodno kovanje je obavljeno na kovačkim hidrauličkim prešama: produživanje na preši nazivne sile od 25 MN, a ostale operacije na preši nazivne sile od 50 MN.

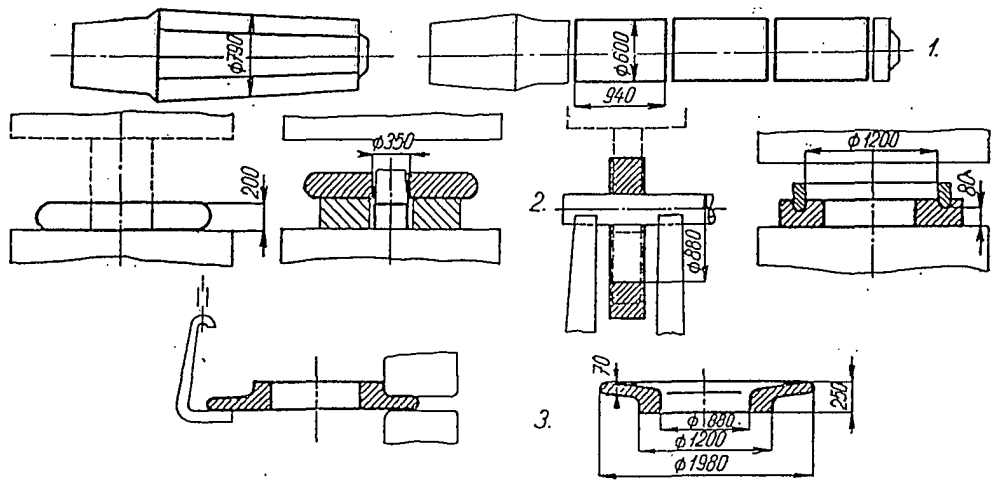
Ovaj primjer služi za dobivanje uvida u iskorištenje materijala kod slobodnog kovanja prstena. Na temelju bilance iskorištenja materijala vidi se iz tablice 9 da je nakon obrade u prstenu svega 27,7% materijala sirovca. Podatak će biti koristan kao objašnjenje relativno visoke cijene jedinice mase na taj način izradjenog proizvoda.

Tablica 9

Slobodno kovanje prstena $\varnothing 3450/3010$ mm	Masa (kg)	Masa (%)
sirovac za kovanje prstena	13.000	100
otpad: od glave	4.125	32,4
od pete	875	6,7
zbog prosijecanja	200	1,5
zbog probijanja	380	2,9
gubitak zbog zagrijavanja	420	3,2
otkovak nakon kovanja	7.000	53,3
prsten obradjen na mjere prema konstrukcijskom crtežu	3.600	27,7

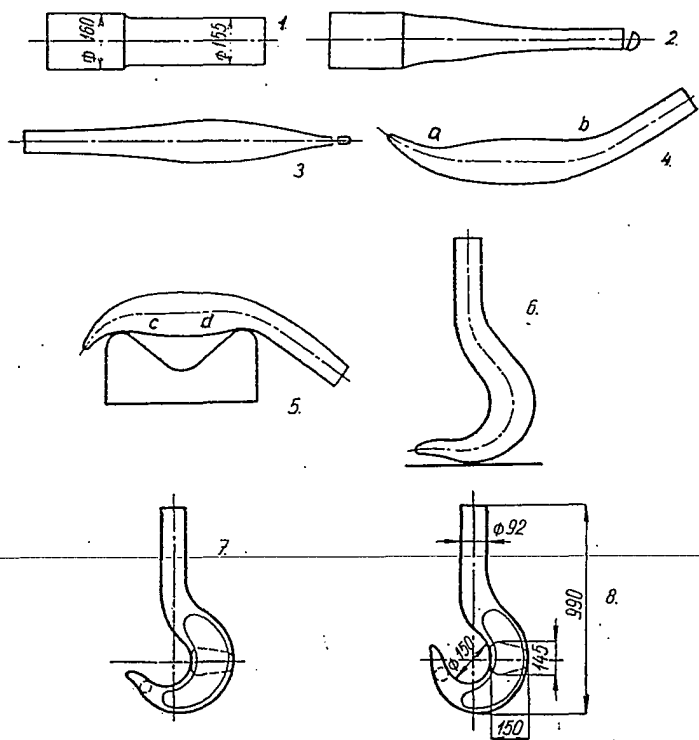
27. **Primjer 4:** Slobodno kovanje prirubnice  $\varnothing 1980/880$  mm mase 1600 kg. Prikaz na slici

Zbog već prije navedenog razloga dobrog gospodarenja materijalom u ovom slučaju je ingot srednjeg promjera 790 mm poslužio za kovanje tri prirubnice. U prvoj fazi kovanja (skica 1), nakon odbacivanja materijala glave i pete ingota, dobivena se tri sirovca promjer 600 mm i dužine 940 mm kojih je proračunom određena masa dovoljna za izradu prirubnice. Na temelju do sada iznešenog o iskorištenju materijala ingota (oko 50%) moguće je procijeniti da je masa ingota prije odvajanja sirovaca bila oko 10000 kg. Sabijanjem svakog sirovca u fazi kovanja 2 sa  $L=940$  mm na  $L=200$  mm ostvaren je potpuno zadovoljavajući stupanj prokivanja sabijanjem  $V=4,7$  pa novo produživanje i drugo sabijanje neće biti nužno. Nakon sabijanja slijedi probijanje otvora trnom  $\varnothing 350$  mm, a otvor se iskivanjem vijenca na horizontalno ležećem trnu proširuje na  $\varnothing 880$  mm što mu je ujedno i konačna dimenzija. Slijedi utiskivanje pomoćnog alata (noža u obliku prstena  $\varnothing 1200$  mm) zbog užljebljivanja na dubinu od 80 mm kako bi se odredio dio materijala koji će se raskovati u vijenac prirubnice. Raskivanje vijenca prirubnice (3) obavlja se kovanjem s ravnim ploham uz pridržavanje i ostvarivanje postepene rotacije pomoćnom napravom ovješnom u granik.



Slika 27. Slobodno kovanje velike prirubnice

**Primjer 5: Slobodno kovanje kuke granika.**

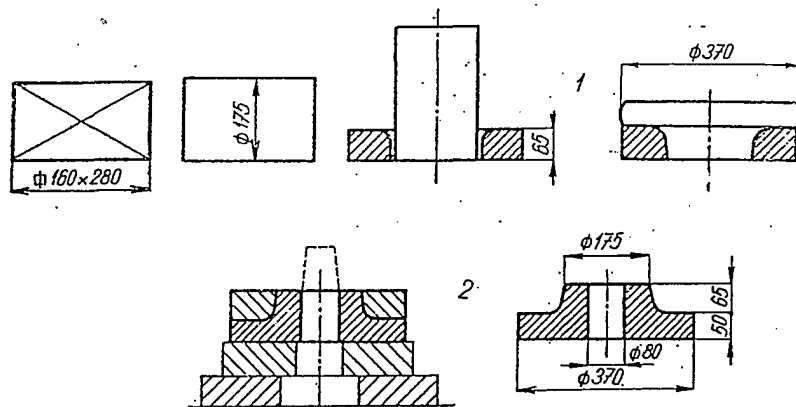


Slika 28. Kovanje kuke granika

Sirovac je u ovom slučaju valjana čelična kvadratična gredica stranice 160 mm  $L=650$  mm mase 130 kg. Kako je sirovac izradjen valjanjem, stupanj prokivanja je postignut već tom prethodnom plastičnom deformacijom pa sabijanje, s kojim smo se do sada uvijek susretali (zbog lijevanjem dobivenog sirovca), neće biti potrebno. Pored toga oblikovanje

kuke s njenim specifičnim i raznolikim presjecima će u toku slobodnog kovanja osigurati vrlo veliku prokovanost. U prvoj fazi kovanja (1) kvadratični profil 160x160 mm se produžuje na  $\phi 155$  mm, a u drugoj fazi kovanja se ovaj promjer postepeno stanjuje. U trećoj fazi (3) se postiže po cijeloj dužini okrugli presjek specifične konture. S obzirom na produživanje u fazi kovanja (2) i (3) odvajaju se krajevi radi pojave preklopa. Sve ove operacije izradjene su na kovačkom zračnom dvoradnom batu težine padajućih dijelova 1200 kg. Ostale kovačke operacije (od 4 do 8) izvode se na kovačkoj hidrauličkoj preši nazivne sile 6MN. Savijanje u fazi 4 izvodi se na podlozi s V profilom na dijelu a-b, a kontrola savijanja se vrši pomoću šablone. Slijedeće savijanje (5) ojačanog dijela presjeka na dijelu c-d izvršeno je korištenjem pomoćnog alata prikazanog na skici. U šestoj fazi se obavlja aksijalno tlačenje radi dobivanja oblika kuke, a u sedmoj se postiže trapezni oblik presjeka i jače zaobljenje kuke. Tek u osmoj fazi kovanja kuka je dovršena u svim detaljima, zagladjena i kalibrirana.

**Primjer 7: Kovanje prirubnice mase 56 kg.**



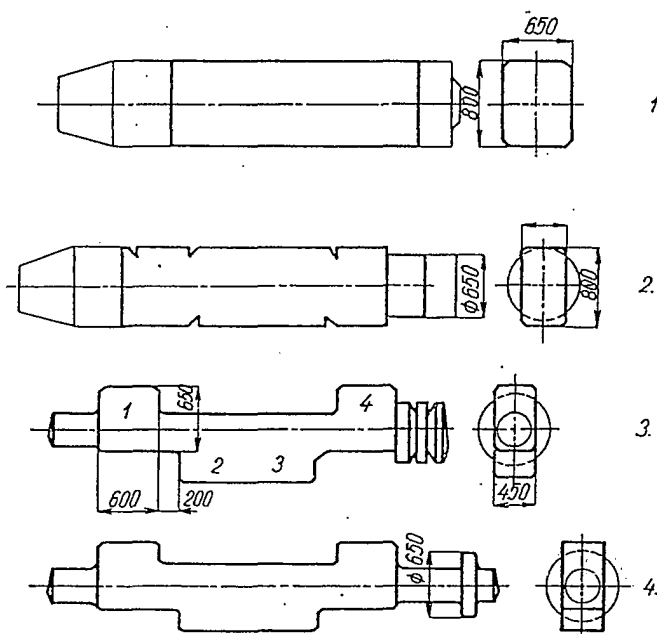
*Slika 29. Kovanje prirubnice*

Za kovanje prirubnice, koje je postupak kovanja prikazan na slici 29, korišten je valjani sirovac odrezan od gredice kvadratičnog presjeka sa stranicom 160 mm  $L=280$  mm. Slobodnim kovanjem će se sirovac prekovati na kružni presjek s  $\phi 175$  mm, što će biti i jedan od promjera gotovog otkovka<sup>34</sup>. Korištenjem pomoćnog alata u vidu prstena visine 65 mm (1) i sabijanjem sirovca te u slijedećoj fazi kovanja probijanjem otvora  $\phi 80$  mm pomoću trna (2), uz istodobno kovanje preko pomoćnog alata (ploče), dobiva se zadani oblik prirubnice vanjskog promjera 370 mm i ukupne visine 115 mm.

**Primjer 8: Izrada slobodnim kovanjem koljenaste osovine s međusobno zakrenutim koljenima za 180°.** Jedino je slobodnim kovanjem moguće izraditi otkovak koljenaste osovine velike mase u pojedinačnoj ili maloserijskoj proizvodnji. Ima više načina kako je to moguće

<sup>34</sup> Kao sirovac je u ovom slučaju mogao poslužiti i čelični valjani kružni presjek promjera 170 mm. Sabijanjem bi se lako postigao  $\phi 175$  mm. Međutim, dva su moguća razloga da je korištena gredica kvadratičnog presjeka: prvo, valjani trupci  $\phi 175$  mm se rijetko proizvode, a drugo, gredica je po jedinici mase uvijek jeftinija od profila kružnog presjeka.

izvesti<sup>35</sup>. Razmotrit ćemo dva načina izrade: prvi način, koji je prikazan u ovom primjeru i drugi, koji će biti opisan u primjeru 9.

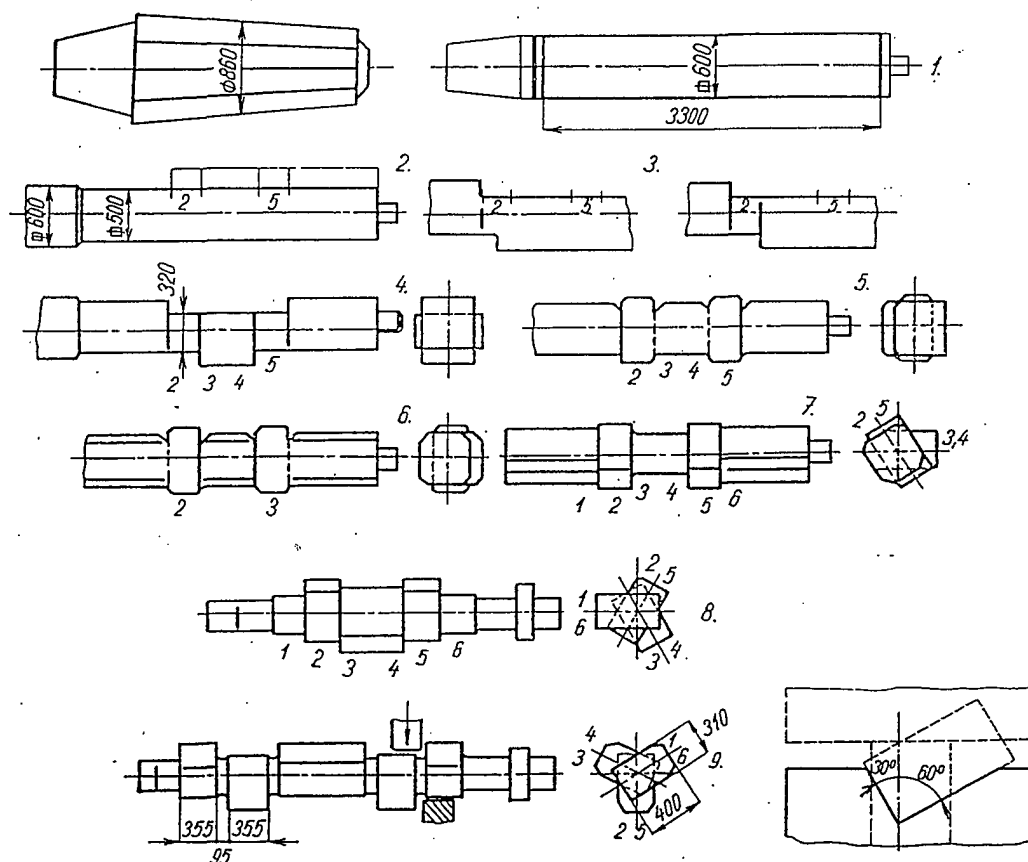


Slika 30. Kovanje koljenaste osovine

Na slici 30 prikazan je načelno jednostavan postupak kovanja koljenaste osovine s koljenima koja su međusobno zakrenuta za 180°. Masa gotovog otkovka iznosi oko 9000 kg. Materijal sirovca je ingot koji će biti iskovan na pravokutni presjek dimenzija 650x800 mm uz odrezivanje i odbacivanje materijala sa strane glave i pete ingota (1). Nakon užljebljivanja kanala koji označava mjesto za daljnje raskivanje (2) i iskivanja desnog kraja na  $\phi 650$  mm (od čega će nastati prirubnica), u operaciji (3) dolazi do premještanja materijala budućih koljena koja se u ovom slučaju nalaze u istoj ravnini, te do oblikovanja lijevog ležajnog rukavca i užljebljivanja desnog ležajnog rukavca s prirubnicom. Ovaj dio će se konačno oblikovati u slijedećoj fazi kovanja (4). Mase koljena 1, 2, 3 i 4 su u fazi kovanja (3) oblikovane na nešto veću dimenziju od one zadane kovačkim crtežom. Tek u fazi kovanja (4) koljena će biti otkovana na zadanu dimenziju. Tomu je razlog taj što nakon faze (3) slijedi dogrijavanje. Zbog opasnosti od pogrubljenja zrna biti će izvedena relativno mala deformacija u fazi kovanja (4) koja će biti dovoljna da ukloni posljedice eventualno postignute grubozrnate strukture zbog dogrijavanja. U fazi (4) izradjuje se desni rukavac s prirubnicom  $\phi 650$  mm, otkovak se zagladjuje i toplo ravna, a obavlja se i kontrola dimenzija. Nakon ravnjanja slijedi relativno dugotrajna toplinska obrada otkovka radi oslobadjanja od zaostalih naprezanja.

<sup>35</sup> Kod opisa temeljnih kovačkih postupaka (tč. 4.5, slika 18) spomenut je princip izrade koljena zakretanjem s pomoćnim alatom (zakretnim ključem). Treba ali naglasiti da je korištenje zakretanja (torzije) kod kovanja preporučljivo samo do veličine zakreta od 60°. To naročito vrijedi za slučaj izrade koljenaste osovine slobodnim kovanjem ako su dužine ležajnih rukavaca male u odnosu na promjer koljena, što je vrlo čest slučaj.

**Primjer 9: Izrada slobodnim kovanjem koljenaste osovine sa 6 koljena medjusobno zakrenutih za 120°.**



*Slika 31. Kovanje koljenaste osovine sa šest koljena*

Masa otkovka prikazanog na slici 31 je 4500 kg. Postupak izrade započinje kovanjem ingota koji se u fazi (1) iskiva na kvadratični presjek  $a=600$  mm i  $L=3300$  mm uz uobičajeno odstranjivanje materijala glave i pete. Ovim je ostvaren stupanj prokivanja  $V=1,61$ . U fazi (2) iskiva se manji kvadratični presjek sa  $a=500$  mm pa je sada postignut još dodatni stupanj prokivanja od  $V=1,44$ . Minimalni stupanj prokivanja je dakle ostvaren, a daljnjim kovanjem će se još i povećati. U ovoj fazi kovanja izradjen je i desni izdanak za manipulaciju, a užljebljivanjem su označene mase budućih koljena 2 i 5 koje treba premjestiti. Premještanje masa koljena 2 te koljena 3 i 4 zbiva se u fazi (3) bez promjene njihovih presjeka. U fazi (4) se obavlja identičan postupak s desne strane kod koljena 5. Sada se kovani predmet zakreće za 90° (5 faza kovanja) pa se užljebljivanjem naznačuju mase koje pripadaju dužini koljena 2 i 5, odnosno 3 i 4. Važna operacija "obaranja" bridova je izvedena u fazi (6) radi lakše manipulacije otkovkom. U fazi (7) zakreću se koljena 3 i 4 za oko 120° u odnosu na koljena 2 i 5. U sljedećoj, osmoj fazi, to isto se dešava s koljenima 6 i 1. U ovoj fazi se ostvaruje potrebna debljina masa koljena, izradjuje se prirubnica i odsijeca izdanak za manipulaciju s desne strane otkovka načinjen još u fazi 2. U posljednoj fazi kovanja (9) postiže se točan kut zakreta medju koljenima od 120° korištenjem pomoćnog

profiliranog alata na šabotu te se obavlja zagladjivanje i ravnanje otkovka. S obzirom na kompliciranost izvedbe i veliki broj kovačkih operacija, kovanje je u ovakovom slučaju dugotrajno, a stoga će biti potrebno više dogrijavanja.

## 7. MANIPULACIJA S VELIKIM OTKOVcima U TOKU KOVANJA, RASPORED LJUDI I STROJEVA U KOVAČNICAMA ZA SLOBODNO KOVANJE

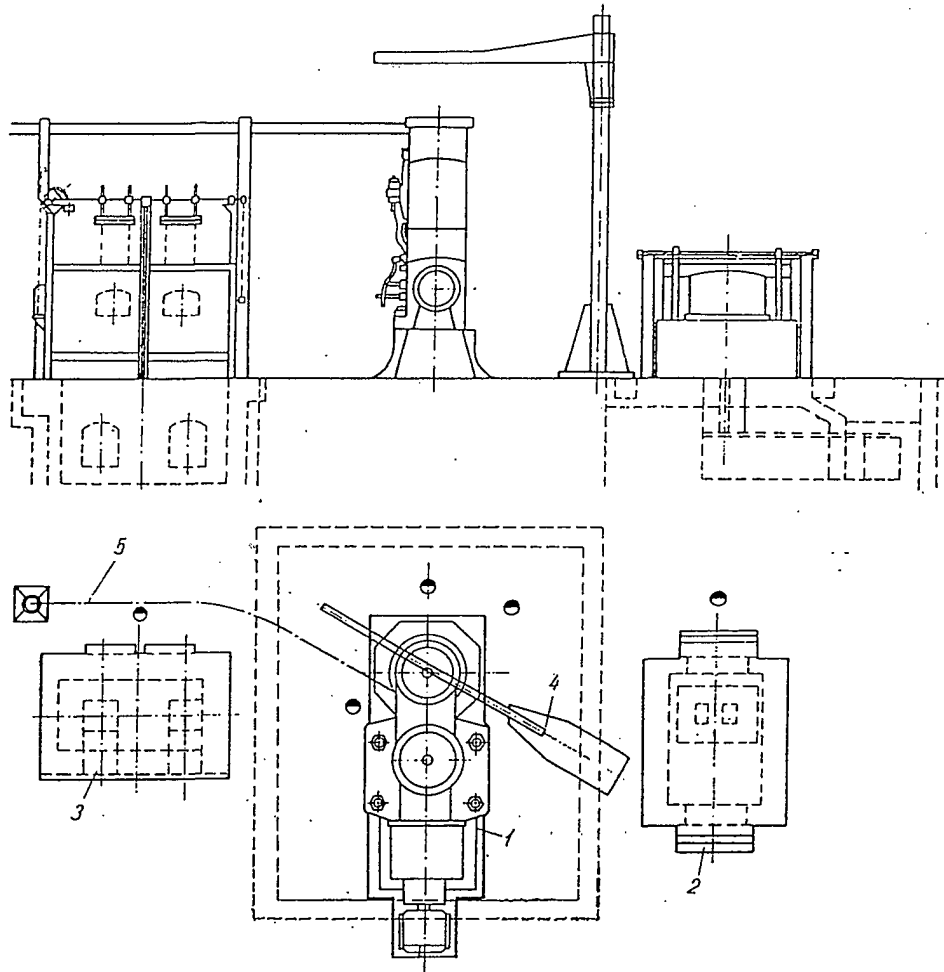
Kod svih prikazanih primjera slobodnog kovanja potrebno je vršiti gibanja kovanog materijala velikih masa zagrijanih na visoku temperaturu. Potrebno je masu sirovca prihvatiti, izvaditi iz peći, prenijeti do kovačkog stroja, vršiti u toku kovanja neophodna gibanja (napred, natrag, zakretanje, postepenu rotaciju) te konačno odložiti otkovak na određeno mjesto za hladjenje ili ga prenijeti do peći gdje će se obaviti daljnja toplinska obrada. Jasno je da takova *manipulacija* mora biti mehanizirana. Stoga u klasičnim kovačnicama za slobodno kovanje nalazimo barem dva nivoa mehanizacije: upotrebu *kovačkog okretnog stupnog granika*, odnosno, upotrebu posebnog *kovačkog manipulatora*, a najčešće se koriste obadva manipulacijska sredstva, svako uz svoju proizvodnu jedinicu predviđenu za kovanje odgovarajuće veličine mase. Koriste se i viseće transportne staze za transport sirovaca i otkovaka, a često se susreću i jednostavni limeni otvoreni kanali koji su najjeftinija transportna naprava po kojoj se otkovak kliže pod djelovanjem gravitacijske sile<sup>36</sup>. Tipični raspored peći, strojeva i ljudi kod slobodnog kovanja otkovaka manjih masa zračnim kovačkim batom konzolne izvedbe prikazan je na slici 32.

Na prikazanoj kovačkoj liniji (slika 32) oznakom 1 obilježen je zračni bat konzolne izvedbe uz kojega se nalazi kovački okretni stupni granik 4. Tri kovača poslužuju bat (označeno kružićima) u položaju koji najbolje odgovara slobodnom pristupu radnom prostoru kovačkog bata. U ovom slučaju pristup radnom prostoru stroja je moguć sa tri strane. Uz kovački bat se *uvijek* nalaze i kovačke peći za zagrijavanje. To se vidi i u ovom slučaju gdje postoje dvije peći: dvokomorna peć većeg (3) i jednokomorna manjeg kapaciteta zagrijavanja (2), a svaku peć poslužuje i nadzire proces zagrijavanja po jedan ložič. Broj i tip peći te njihov kapacitet zagrijavanja sirovaca ovisi uvijek o pretpostavljenom proizvodnom programu. S obzirom da se od ovakove kovačke linije očekuje velika fleksibilnost proizvodnih mogućnosti zbog slobodnog kovanja različitih veličina masa (do granice mogućnosti kovačkog stroja) raznolikih oblika, veći broj peći različitih kapaciteta omogućava istovremeno zagrijavanje više sirovaca različitih veličina masa i s različitim trajanjem zagrijavanja. Bitna je zamisao kod projektiranja ovakove kovačke linije da se u što većoj mjeri iskoristi radno vrijeme ljudi i stroja, a to je moguće samo u slučaju ako je pripremljen dovoljan broj sirovaca dovoljno zagrijanih da bi se kovanje moglo obaviti. Teži se dakle ostvarivanju kontinuiranog kovanja. U praksi je to često teško ili čak nemoguće postići pa je iskorištenje radnog vremena kovačke linije, a time često u određenoj mjeri i kakvoća organizacije rada, prikazano odnosom vremena utrošenog na kovanje spram ukupno raspoloživog radnog vremena. Teži se, naravno, da ovaj odnos bude što bliži vrijednosti 1. Sirovce manjih masa zagrijane na temperaturu kovanja u peći (2) dodaje ložič kovaču ručno. Teži sirovci zagrijani u peći (3) transportiraju se do kovačkog granika (4) pomoću viseće

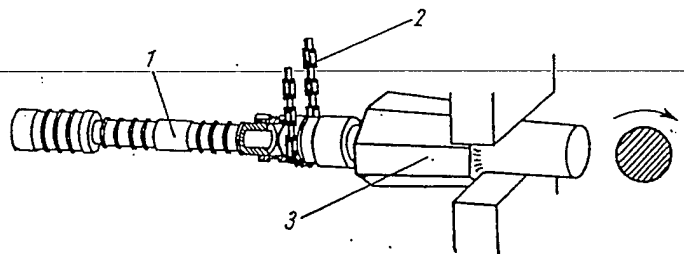
<sup>36</sup> Da bi se moglo koristiti ovako jednostavan način transporta sirovca klizanjem po kosini do kovačkog stroja često se postavlja kovačka peć na viši nivo od onoga na kojem se nalazi kovački stroj.



transportne staze (5). Kovačkim granikom (5) se ostvaruju potrebna gibanja mase sirovca i otkovka u toku kovanja pomoću posebne naprave s beskonačnim zglobnim lancem kako je to prikazano na slici 33.



Slika 32. Raspored ljudi, strojeva i opreme kod slobodnog kovanja

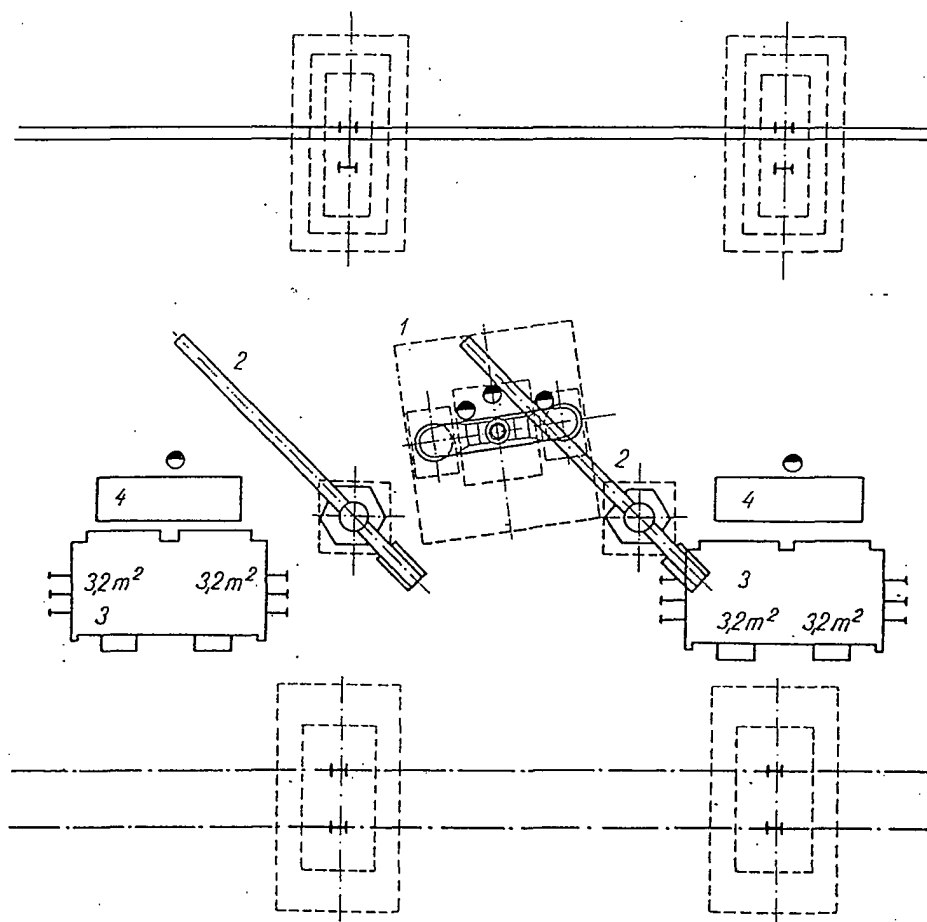


Slika 33. Okretanje sirovca u tijeku slobodnog kovanja pomoću beskonačnog zglobnog lanca kovačkog granika

Elastična izvedba granika i ovjesa lanca kompenzira udarce kovanja. Za produživanje ingota (1) obješenog o zglojni lanac (2), koji omogućava sukcesivno zakretanje ingota nakon svakog udarca, koristi se prema slici 33 posebni nastavak s "kovačkim zvonom" (1).

Tradicijski naziv "kovačko zvono" označava tuljac koji se nasadjuje na prethodno otkovani izdanak sirovca (usporedi prije prikazane primjere slobodnog kovanja u kojima se često nailazi na takav izdanak) i na koji tuljac se pričvršćuje potrebni broj nastavaka. Masa određenog broja priključenih nastavaka održava ravnotežu s masom sirovca pa je tako osigurano kovanje sirovca u horizontalnom položaju<sup>37</sup>.

Tipični raspored uređaja i ljudi kod kovačke linije predviđene za slobodno kovanje velikih masa pomoću kovačkog bata okvirne izvedbe i velike radne moći prikazan je na slici 34.



Slika 34. Raspored ljudi, strojeva i opreme kod slobodnog kovanja velikih masa

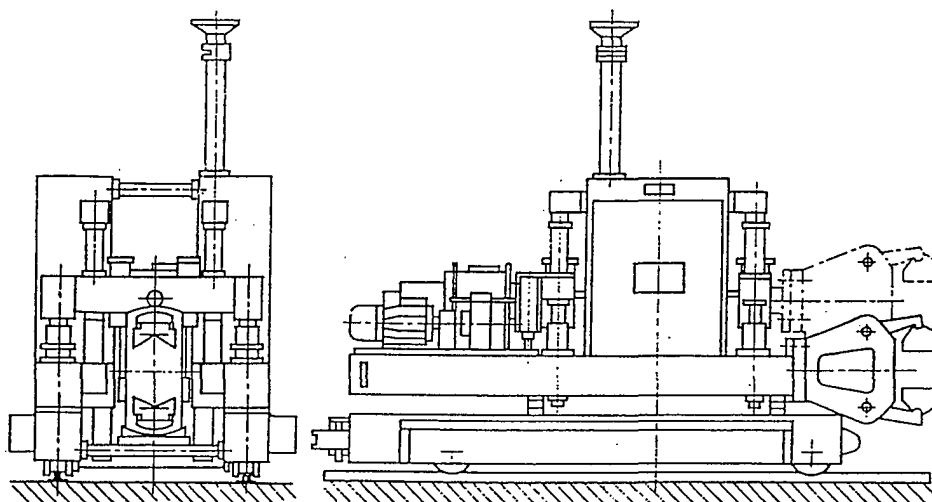
I u ovom slučaju se koriste kovački okretni stupni granici (2). Predviđena su dva takova granika za pojedinične i paralelne kovačke operacije, a i zbog dvije dvokomorne peći (3) velikog kapaciteta zagrijavanja površine poda svake komore od 3,2 m<sup>2</sup>. Uz peći su predviđeni roštilji za odlaganje zagrijanog sirovca kod vadjenja iz peći, odnosno za odlaganje hladnog sirovca (4) prije ulaganja u peć (ovaj se sa skladišta doprema pomoću

<sup>37</sup> U praksi se sklop većeg broja nastavaka kovačkog zvona naziva "ke" (fonetski, od franc. riječi *queue*, što označava štap za biljar). Do toga naziva je vjerojatno došlo po sličnosti relativnog oblika i funkcije s biljarskim štapom.

kрана kojega se staza može uočiti na slici 34). Zračni dvoradni kovački bat (1) okvirne izvedbe ima masu padajućih dijelova od 3000 kg i predviđen je za kovanje velikih sirovaca (usporedi slike 8 i 10). Zbog toga su granici nosivosti 2500 kg mase, što je za potrebe kovanja predimenzionirano, određeni najvećom masom koju treba premještati u toku remonta ili kvara kovačkog bata<sup>38</sup>. Položaj granika odabran je tako da svojim dosegom omogućavaju obavljanje svih kovačkih operacija i montažu pomoćnih alata i uređaja na kovački bat.

U suvremenim kovačnicama za slobodno kovanje velikih masa na kovačkim hidrauličkim prešama koristi se *kovački manipulator*, autonomni skupocjeni stroj posebne konstrukcije koji u svojim čeljustima drži sirovac-otkovak i vrši sva potrebna gibanja prije, u toku i poslije kovanja. Uzor svih ovih gibanja su pokreti ruke kovača kod kovanja malih masa. Razlika je samo u neprispodobivoj veličini mase otkovka.

Postoje različite izvedbe manipulatora: samohodni gusjeničar sa neograničenom slobodom gibanja po podu kovačnice, a najčešća je izvedba sa uzdužnim (slika 35) ili kružnim gibanje po tračnicama. Pogon je obično pomoću električne energije no nailazi se i na izvedbe s dizel motorima.



Slika 35. Kovački manipulator

Korištenjem manipulatora značajno se povećava proizvodnost slobodnog kovanja koja je u načelu vrlo niska<sup>39</sup>. Moguće je postići veću preciznost izrade dimenzija teških otkovaka i ubrzati postupak kovanja. Time se, zbog skraćenja vremena kovanja i manjeg broja dogrijavanja, sa stanovišta toplinskog gospodarstva i iskorištenja kapaciteta velikih peći

<sup>38</sup> U kovačnicama se kranovi dimenzioniraju upravo na temelju tog principa. Montaža i demontaža teških dijelova kovačkih strojeva i uređaja im je primarni zadatak pored transporta sirovaca i otkovaka.

<sup>39</sup> Kod projektiranja ovakove kovačnice računa se s prosječnim podatkom od samo 50% iskorištenja radnog vremena. Razlozi su višestruki: zbog samog tehnološkog postupka slobodnog kovanja koji je u većini slučajeva diskontinuiran, zbog čekanja na zagrijavanje sirovaca i dogrijavanje nedovršenog otkovka te zbog kvarova na strojevima i uređajima. Značajan gubitak vremena može nastati i zbog upotrebe kovačkog pribora koji će kod slobodnog kovanja većih masa imati također velike mase koje valja transportirati.

za zagrijavanja, ostvaruju mnogostruke koristi. Manipulatori bitno unapređuju humanizaciju radnih uvjeta u kovačnici jer je izloženost radnika toplini bitno smanjena<sup>40</sup>.

Rješenjem problema manipulacije sirovcima i otkovcima i korištenjem suvremenijih transportnih sredstava moguće je i stare kovačnice za slobodno kovanje osuvremeniti, bitno poboljšati uvjete rada i povećati kapacitet proizvodnje. Takav je slučaj prikazan na slici 36 na slijedećoj stranici. Prikazan je tlocrt rasporeda strojeva i uređaja jedne stare kovačnice *nakon rekonstrukcije* koja je u suštini obavljena uvođenjem u proizvodnju novijih manipulacijskih uređaja i ekološki povoljnijih peći sa izgaranjem plina i s boljim iskorištenjem topline zagrijavanja te njihovim drugačijim rasporedom<sup>41</sup>, sada bolje prilagodjen tehnološkom procesu kovanja. Na slici 36 označeno je s: 1 - dvoradni zračni kovački bat, 2 - hidraulička kovačka preša nazivne sile 15 MN, 3 - hidraulička kovačka preša 20 MN, 4 - dvoradni zračni kovački bat, 5 - kovački manipulator s mogućnošću gibanja po pravcu na tračnicama, 6 - stroj za ulaganje sirovca u peć i vadenje iz peći (tzv. "stroj za šaržiranje"), 7 - kovački mosni granik, 8 - mosni granik sa stazom duž kovačnice, 9 - peć za zagrijavanje sirovaca, 10 - peć za toplinsku obradu otkovaka (peć za žarenje), 11 - jama za hladjenje otkovaka. Tlocrt je podijeljen na tri tehnološki zaokružene cjeline:

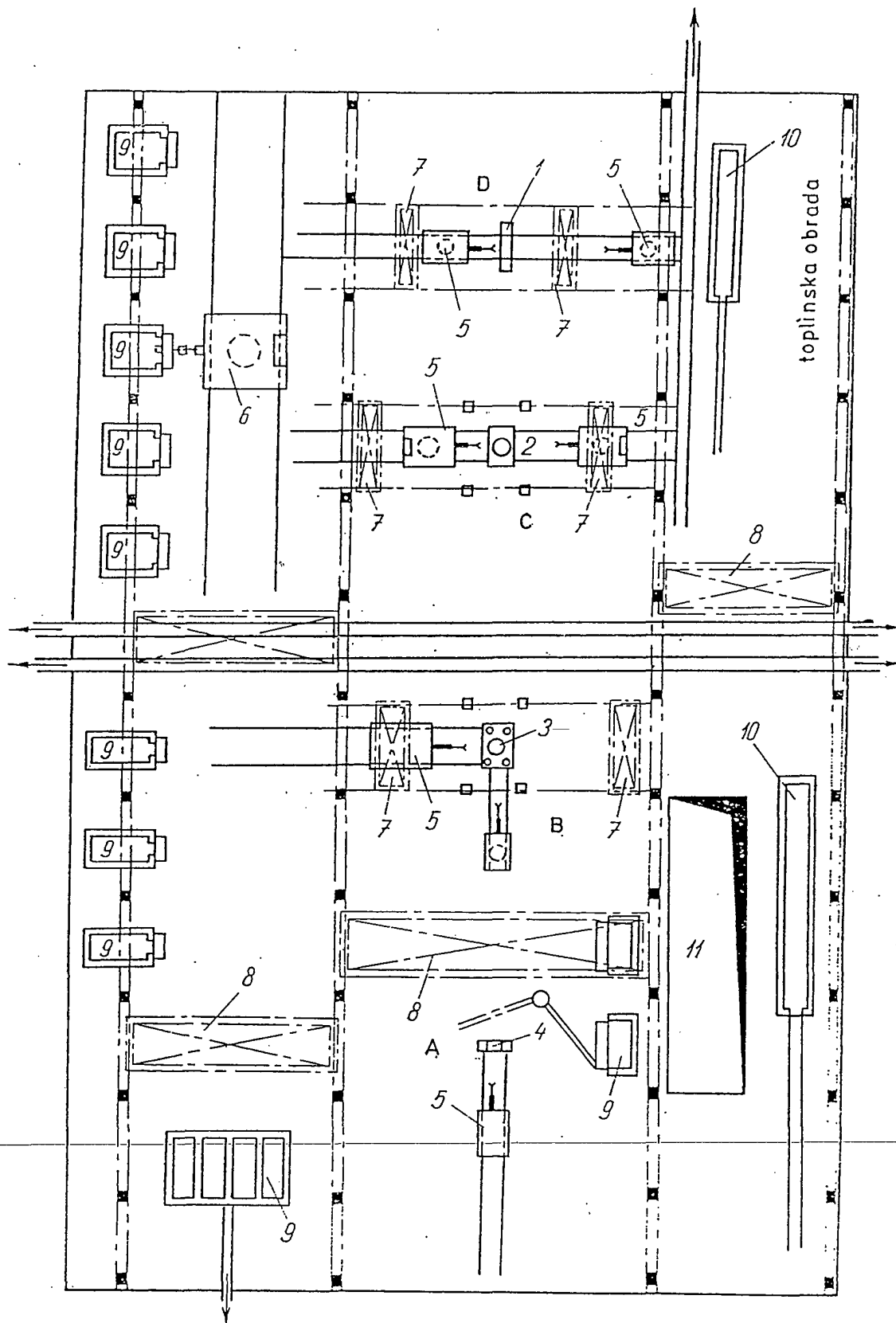
- dio hale (po cijeloj dužini) s pećima za zagrijavanje (9), strojem za ulaganje sirovaca (6) i vlastitim mosnim granikom (8);
- dio hale (takodjer po cijeloj dužini) za toplinsku obradu otkovaka nakon kovanja (10) i hladjenje (11) otkovaka s mosnim granikom (8);
- središnji dio hale za slobodno kovanje. Taj dio hale je viši od ostalih zbog visine kovačkih strojeva i staze granika.

Na temelju veličine tlocrta peći lako je prepoznati u kojem se dijelu hale kuju lakši otkovci. Osuvremenjenje kovačnice je ostvareno uvođenjem manipulatora (5) uz svaki kovački agregat ali uz zadržavanje granika koji su i prije toga bili prisutni. Prikazanim položajem peći za zagrijavanje sirovaca u jednom pravcu optimalno je iskorištena komunikacija s čeličanom da se s najkraćim transportnim putevima još vrući ingoti (nakon skrućivanja taline ingoti se transportiraju u kovačnicu s temperaturom od oko 700°C) stavljaju u peć radi zagrijavanja na temperaturu kovanja. Tako je postignuta znatna ušteda potrošnje tolinke energije.

Kovački agregati su smješteni duž osi središnjeg dijela hale kovačnice. Smjer kretanja materijala odredjen je logikom izbora najkraćih puteva transporta zagrijanog sirovca, odnosno dovršenih otkovaka, prema tehnološkom ciklusu: zagrijavanje → kovanje → toplinska obrada otkovka → hladjenje. To je ostvareno kod svih agregata (B, C i D) osim kod agregata A. Četiri kovačka agregata omogućavaju slobodno kovanje vrlo širokog dijapazona veličina masa sirovaca.

<sup>40</sup> Izloženost kovača zračenju topline, a kod ručnog kovanja malih masa i značajnom fizičkom naporu njegovih mišića, ima za posljedicu dehidraciju znojenjem, nekada i do 5 litara znoja u toku radne smjene. Gubitak soli u organizmu izaziva klonulost, neugasivu žeđ i psihičke promjene. U takovom stanju radnika vrlo su česte nezgode na radu. Osiguranje humanizacije rada u kovačnici započinje prvenstveno sa zaštitom radnika od toplinskog zračenja.

<sup>41</sup> Kod rekonstrukcije takovih pogona uvijek postoji ograničenje premještanja kovačkih batova zbog masivnih temelja. Tako zatečena lokacija strojeva postaje ishodišna točka od koje se traže nova rješenja.



Slika 36. Tlocrt kovačnice za slobodno kovanje velikih masa

8

Agregat A sastoji se od dvoradnog zračnog bata okvirne izvedbe mase padajućih dijelova od 1500 kg (4) s dvije peći (9) te jednog stupnog okretnog granika. Njegov manipulator (5) je pridodan u toku rekonstrukcije. Uočljivo je da je rješenje transporta materijala u toku kovanja u ovom slučaju drugačije nego kod ostalih kovačkih agregata. To je posljedica zatečenog stanja prije rekonstrukcije. Zbog štednje investicijskih sredstava projektant je često prisiljen na konceptijske kompromise pa rješenja obično nisu optimalna, što je i ovdje slučaj. Agregat B se sastoji od kovačke hidrauličke preše nazivne sile 20 MN (3), dva kovačka manipulatora (5) pridodana u toku rekonstrukcije pogona te dva naslijedjena mosna kovačka granika (7) koji su prije rekonstrukcije imala funkciju sadašnjih manipulatora. Staze ovih mosnih granika su u toku rekonstrukcije produžene u prostor lijevog i desnog bočnog prostora hale i to na nižem nivou od staza granika u tim dijelovima hale pa tako ova dva mosna granika sada služe za prihvat zagrijanog sirovca, odnosno gotovog otkovka koji se transportira na toplinsku obradu. Agregat C sastoji se od hidrauličke kovačke preše nazivne sile od 15 MN (2), dva manipulatora (5) i dva kovačka mosna granika (7) naslijedjena od stanja prije modernizacije. Agregat D čini kovački dvoradni zračni bat okvirne izvedbe mase padajućih dijelova 1100 kg (1) s dva manipulatora (5) i dva kovačka mosna granika. Duž cijele srednje hale postavljena je staza mosnog granika s nosivošću mase od 75 tona (8) na nivou višem od nivoa kovačkih mosnih granika. Granik (8) namijenjen je transportu alata, montaži i demontaži strojeva kod održavanja. U desnoj hali obavlja se toplinska obrada u dvije peći (10), a transport otkovaka do peći i iz peći obavlja se mosnim granikom (8). Prema raspoloživim podacima rekonstrukcija je dala pozitivne rezultate: povećanje proizvodnje i bolji kvalitet otkovaka. To je postignuto vrlo dobrim transportnim i manipulacijskim mogućnostima nakon rekonstrukcije, a posebno uskladjivanjem kapaciteta peći s kovačkim kapacitetima. Dio uspjeha se pripisuje i ljudskom faktoru koji je bitno povećao proizvodnost zbog boljih uvjeta rada.

## 8. OBRADA OTKOVKA

8

Obrada otkovka u kovačnici uključuje dva temeljna postupka: toplinsku obradu i grubu obradu odvajanjem čestica, obično grubo tokarenje. I jedan i drugi način obrade otkovka zahtijeva posebne strojeve i uređaje pa će ovi biti redovito uključeni u standardnu opremu kovačnice za slobodno kovanje. Vrste i načini obrada ovise o vrsti materijala, obliku i masi otkovka, a posebno o namjeni i uvjetima korištenja otkovka.

S obzirom na važnost toplinske obrade otkovaka podsjetit ćemo će se ponovno temeljnih postupaka toplinske obrade čelika unatoč tomu što je o tim postupcima već pisano na stranici 5. U okviru ovog poglavlja prikazati će se jedan slučaj iz prakse u kojem je toplinska obrada otkovka imala presudnu ulogu.

Žarenjem se smatra svaka toplinska obrada metalnog materijala kod određene *temperature* uz određeno *vrijeme* te određen način *hladjenja*. Svrha žarenja je postizavanje potrebnih *svojstava* materijala. **Normalizacija** nastupa kod žarenja na temperaturi nešto višoj od  $A_{c3}$  (kod nadeutektoidnih čelika višoj od  $A_{c1}$ ) uz kontrolirano hladjenje u mirnoj atmosferi. Općenito se primjenjuje za uklanjanje grubozrnate strukture pa ju susrećemo i kod toplinske obrade čeličnih odljevaka, a djelomično i zavara (uklanjanje Widmannstättenove strukture). Štetan je odabir previsoke temperature zagrijavanja (uobičajen je izraz "temperatura austenitizacije") jer u tom slučaju nastupa porast zrna  $\gamma$  kristala mješanaca što izaziva pogrubljenje strukture nakon pretvorbe. Manje su skloni ovakovom pogrubljenju sitnozrnati čelici. Brzina hladjenja je važan čimbenik strukture jer će presporo hladjenje izazvati grubo feritno zrno. **Žarenje radi oslobađanja od zaostalih naprežanja** se redovito provodi kod otkovaka većih dimenzija. Zaostala naprežanja (često se nazivaju i "vlastita") nastaju u otkovku zbog nejednolikog zagrijavanja ili ohladjivanja, zbog

pretvorbe faza materijala ili zbog izvršene hladne plastične deformacije<sup>42</sup>. Ovo žarenje se izvodi nakon ravnjanja otkovka. Temperatura zagrijavanja je kod čelika najčešće ispod 650°C, a kod izradjevina od toplinskih poboljšanih čelika ta je temperatura svakako ispod temperature popuštanja kako se ne bi smanjila čvrstoća postignuta toplinskim poboljšavanjem. Ovim se žarenjem *smanjuju (reduciraju) zaostala naprezanja mehanizmom plastične deformacije do veličine granice tečenja materijala koju on ima kod odabrane temperature žarenja*. Tako žarenjem kod više temperature, jer je tada niža granica tečenja metala, zaostaju manja unutarnja naprezanja no nikad nismo u stanju u potpunosti osloboditi otkovak svih zaostalih naprezanja. U daljnjem tekstu čitalac će uočiti važnost žarenja radi oslobađanja od zaostalih naprezanja. **Difuzno žarenje** se koristi za ograničenju zona nejednolikog kemijskog sastava mase čelika. Obavlja se na temperaturi nešto nižoj od temperature solidusa uz dugotrajno zadržavanje na toj temperaturi da bi se difuzijom postiglo izjednačenje koncentracije legirnih dodataka. Ako nakon ovakvog žarenja nije predviđena deformacijska obrada u toplom stanju, nužno je nakon difuznog provesti normalizacijsko žarenje radi smanjenja veličine zrna. Spomenimo ovdje i **rekristalizacijsko žarenje** premda ovo kod slobodnog kovanja čelika u toplom stanju nije uobičajeno, a primjenjuje se u načelu nakon hladne plastične deformacije radi uklanjanja očvršćenja i ponovnog postizavanja oblikovljivosti plastičnom deformacijom u hladnom stanju. Rekristalizacijskim žarenjem na temperaturama višim od temperature rekristalizacije postiže se novostvorena struktura s mehaničkim svojstvima jednakim onima prije hladne plastične deformacije. Ako je prethodna hladna plastična deformacija obavljena s malim stupnjem deformacije, postoji opasnost od pojave grubog zrna nakon žarenja. Temperatura rekristalizacije je višestruko ovisna veličina o nizu faktora koji se u suštini svode na količinu unosa energije na granice zrna. Za potrebe obrade odvajanja česticama obavlja se **meko žarenje** kojega je svrha dobivanje najmanje tvrdoće radi što lakših uvjeta obrade. **Kod ugljičnih čelika izabire se temperatura žarenja u području oko  $A_{c1}$** . Kod ove temperature lamela cementita u trakastom perlitu se prevode u kuglasti oblik pa se stoga ovo žarenje naziva i "sferoidizacijsko žarenje". Sporim ohladjivanjem se postiže struktura s malim zaostalim naprezanjima. Stvaranje lamela cementita, a kod nadeutektoidnih čelika cementitne mrežice, bit će olakšano višestrukim kratkotrajnim prekoračenjem veličine temperature  $A_{c1}$ . U slučajevima kada je kod obrade odvajanjem čestica potrebno postići kratku lomljenu strugotinu, koristi se **žarenje za dobivanje grubozrnate strukture**. Ovo se postiže zagrijavanjem čelika na temperaturu znatno većoj od temperature  $A_{c3}$ . Grubi  $\gamma$  kristali mješanci koji nastaju kod te temperature sporim hladjenjem se pretvaraju u grubozrnatu feritno-perlitnu strukturu.

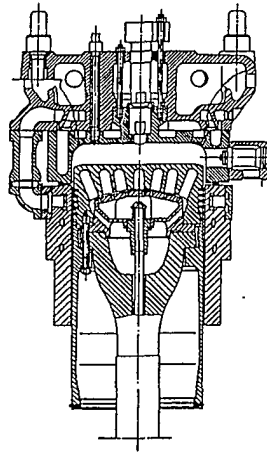
Na jednom primjeru iz prakse prikazati će se cjelokupan tehnološki postupak slobodnog kovanja relativno velike mase čelika, toplinske obrade otkovka i obrade odvajanjem čestica. Primjer je vrlo poučan jer će biti prikazane poteškoće i problemi koji *mogu* nastati u primjeni otkovka, a koji su posljedice tih postupaka. Razmotrit će se izrada stapajice broskog dvotaktnog šesterocilindričnog motora ukupne snage od 5310 kW<sup>43</sup>.

Na slici 37 prikazan je u presjeku klip jednog cilindra ovog motora *kruto* spojen sa jednim krajem stapajice koja će u toku ekspanzije goriva u cilindru obavljati samo *pravocrno* gibanje. Drugi kraj stapajice je spojen s križnom glavom koja će preko klipnjače omogućiti kružno gibanje radilice. Kroz stapajicu cirkulira sredstvo za hladjenje klipa pa su zbog tog razloga po cijeloj dužini stapajice izbušena dva provrta promjera 35 mm. Kruta veza klipa i stapajice **ne dozvoljava bilo kakovu deformaciju stapajice u radu. Ako nastupi deformacija stapajice dolazi, do zaribavanja klipa i cilindra te njihovog brzog uništenja. Stoga maksimalno** dozvoljeno odstupanje stapajice od idealno ravnog oblika *prije ugradnje u motor* iznosi svega

<sup>42</sup> U svojoj fizičkoj suštini svaki postupak obrade površine odvajanjem čestica je postupak hladne plastične deformacije. Iz toga slijedi da će nakon takove obrade biti u *površinskim* slojevima uvijek **unešena** naprezanja koja tamo ostaju nakon dovršene obrade. Veličina unešenih naprezanja je ovisna o režimu obrade površine odvajanjem čestica: nakon grube obrade zaostat će velika, a nakon fine mala naprezanja. Općenito o nastanku zaostalih naprezanja, koja su u obradi deformiranjem uvijek posljedica nehomogene deformacije, čitalac može naći podrobnija objašnjenja u publikaciji Povržanović, A., **Temeljni zakoni obrade metala deformiranjem**, FSB, Interno izdanje, Zagreb, 1993:

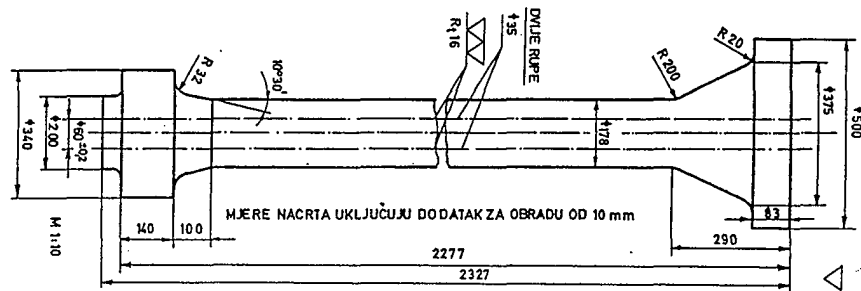
<sup>43</sup> Gabariti ovog motora su: dužina 7900 mm, visina 8300 mm i širina 2480 mm. Ukupna masa motora iznosi 190 tona. Promjer cilindra je 520 mm, maksimalni tlak u cilindru iznosi 105 bara, a broj okretaja radilice je 165 o/min tako da se u svakom cilindru može razviti snaga od 885 kW. Motor je proizveden u Hrvatskoj prema licencnoj dokumentaciji njemačke tvrtke MAN.

0,04 mm. S obzirom na masu i dužinu obradjene stapajice od preko 2000 mm ovaj zahtjev je vrlo strog.



Slika 37. Spoj stapajice i klipa motora

Stapajica se izrađuje od Č 1531 slobodnim kovanjem, a zbog veličine mase sirovac je lijevani ingot. Na slici 38 prikazan je otkovak stapajice s dimenzijama koje ova ima nakon grube obrade obavljene u kovačkom pogonu. Sve mjere prikazane na slici 38 povećane su za 10 mm jer se predviđa toliki dodatak za daljnju obradu kako bi se postigle tehničkom dokumentacijom predviđene dimenzije konačno obradjene stapajice.



Slika 38. Oblik i dimenzije otkovka stapajice nakon grube obrade u kovačnici

U ovoj fazi obrade (slika 38) masa stapajice je oko 700 kg. Prije grube obrade izvršene u kovačnici izvršena je toplinska obrada otkovka s ravnanjem tako da se postignu prema tehničkoj dokumentaciji zahtijevana mehanička svojstva otkovanog materijala stapajice i to:  $R_m = 590-720 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_e \geq 305 \text{ N/mm}^2$ ,  $A_5 \geq 16\%$  i udarna radnja loma od 27 J na DVM standardnoj probi. Otkovak stapajice se ultrazvučno ispituje da se ustanove eventualne nehomogenosti materijala, a u okviru grube obrade stapajice u kovačnici buše se po dužini cijelog otkovka stapajice dva provrta promjera 35 mm. Konačno oblikovanje stapajice, obradu na zadane mjere i postizavanje propisanih tolerancija obavit će proizvođač motora.

Proizvodnja većeg broja motora navedenih značajki započela je 1982. godine, a prve pritužbe na iskrivljenost većeg broja stapajica javile su se su 1983. Od 43 izrađena komada



stapajica iskrivilo se je 24 komada. Iskrivljenje je najčešće nastalo u pogonskim uvjetima nakon ugradnje u motor, odnosno brod, a rjeđe na probnom stolu<sup>44</sup>.

Kada se je 1986. analiziralo uzroke ovakovog ponašanja stapajica ispostavilo se je da su podaci o ponašanju stapajica u eksploataciji nepotpuni: samo za 10 stapajica se pouzdano znalo da nisu pretrpjele nikakve deformacije u toku dužih radnih uvjeta, za tri stapajice se je znalo da su pukle pri havariji cilindra, a za ostale nisu bili poznati nikakovi podaci.

Reklamacije su navele proizvajdača otkovka da promijeni način proizvodnje. Novom tehnologijom je probno izradjeno 6 komada stapajica koje ni nakon 7000 sati rada motora nisu pokazale nikakovo iskrivljenje. U toku 1986. godine poboljšana je i ta tehnologija pa je po njoj izradjen još 51 komad stapajica za koje u eksploataciji nije bilo nikakvih reklamacija.

U daljnjem tekstu razlikovati ćemo pod nazivom *tehnologija 1* prvi način proizvodnje 43 komada stapajica od kojih se je većina iskrivila. Pod nazivom *tehnologija 2* označavati će se način proizvodnje daljnjih 6 stapajica, a pod nazivom *tehnologija 3* način proizvodnje 51 komada stapajica iz 1986. godine. Ovima načinima proizvodnje odgovaraju i specifični načini tehnologije toplinske obrade otkovaka. U daljnjem tekstu, kada se bude razmatrala toplinska obrada, tehnologije koje odgovaraju tehnologijama proizvodnje označenim s arapskim brojkama 1, 2 i 3 biti će označene s rimskim brojevima I, II i III (*tehnologija I, tehnologija II, tehnologija III, što dakle znači da se takova oznaka odnosi samo na način izvršene toplinske obrade*).

Znatne materijalne štete nastale krivljenjem stapajica<sup>45</sup> i poljuljano povjerenje investitora bile su razlog za sistematsko (i skupo) istraživanje *uzroka* krivljenja stapajica. Prvi korak u istraživanju razloga krivljenja bila je provjera mogućnosti izvijanja stapajice u radu. Naime, proizvajdač stapajice je, ne želeći preuzeti odgovornost za krivljenje stapajica, smatrao da je stapajica suviše vitke konstrukcije i da je to razlog krivljenju, jer u GMT ("gornja mrtva točka") na stapajicu djeluje tlačna sila od 2,33 MN što u njoj izaziva stvarno naprezanje od 128,3 N/mm<sup>2</sup>. Medjutim, rezultati kontrolnog proračuna na izvijanje prema propisima JUS U.EZ.081 i DIN 4114 zbog djelovanja tlačne sile u najopterećenijoj točki radnog takta motora (opterećenje tlakom plinova izgaranja), inercijskim silama i težinom klipa pokazali su da stapajica zadovoljava sve kriterije navedenih standarda te da izvijanje nije razlog krivljenju stapajica.

Krivljenje stapajica, za koje se u prvi čas mislilo da je izazvano silom izvijanja, moglo je nastati zbog djelovanja zaostalih napreznaja, kojih *nesimetrična raspodijela* po presjeku stapajice ima djelovanje opterećenja *momentom savijanja*. Ova napreznaja su mogla zaostati u toku faza izrade stapajice: u postupku slobodnog kovanja, u toplinskoj obradi otkovka te u mehaničkoj obradi stapajice (odvajanje čestica u gruboj i finoj obradi). Daljnje istraživanje bilo je usmjereno na sistematičko istraživanje ovih faza izrade.

<sup>44</sup> Pod *probnim stolom* ovdje se smatra neprekinuti probni rad motora u radioni proizvajdača. Prije ugradnje na brod motor će se potpuno montirati te će mu se ispitati sve performanse. Tek nakon što se je ustanovilo da je rad motora besprijekoran i da su mjerenja dala očekivane rezultate, motor se rastavlja, u dijelovima se prenosi na brod i tamo ponovno sastavlja. S obzirom na dimenzije motora bilo bi ga i nemoguće drugačija montirati u strojarnicu broda. Naziv *probni stol* preuzet je iz proizvodnje lakih motora gdje su uređji za ispitivanje rada motora i sam motor u toku probnog rada smješteni na podlogu u obliku stola.

<sup>45</sup> Zbog krivljena stapajice nastaje zaribavanje cilindra motora. Brod nije sposoban za plovidbu, a u garantnom roku brodograditelj snosi, pored troškova popravka motora, troškove zbog izgubljenje zarade jer brod nije plovio.

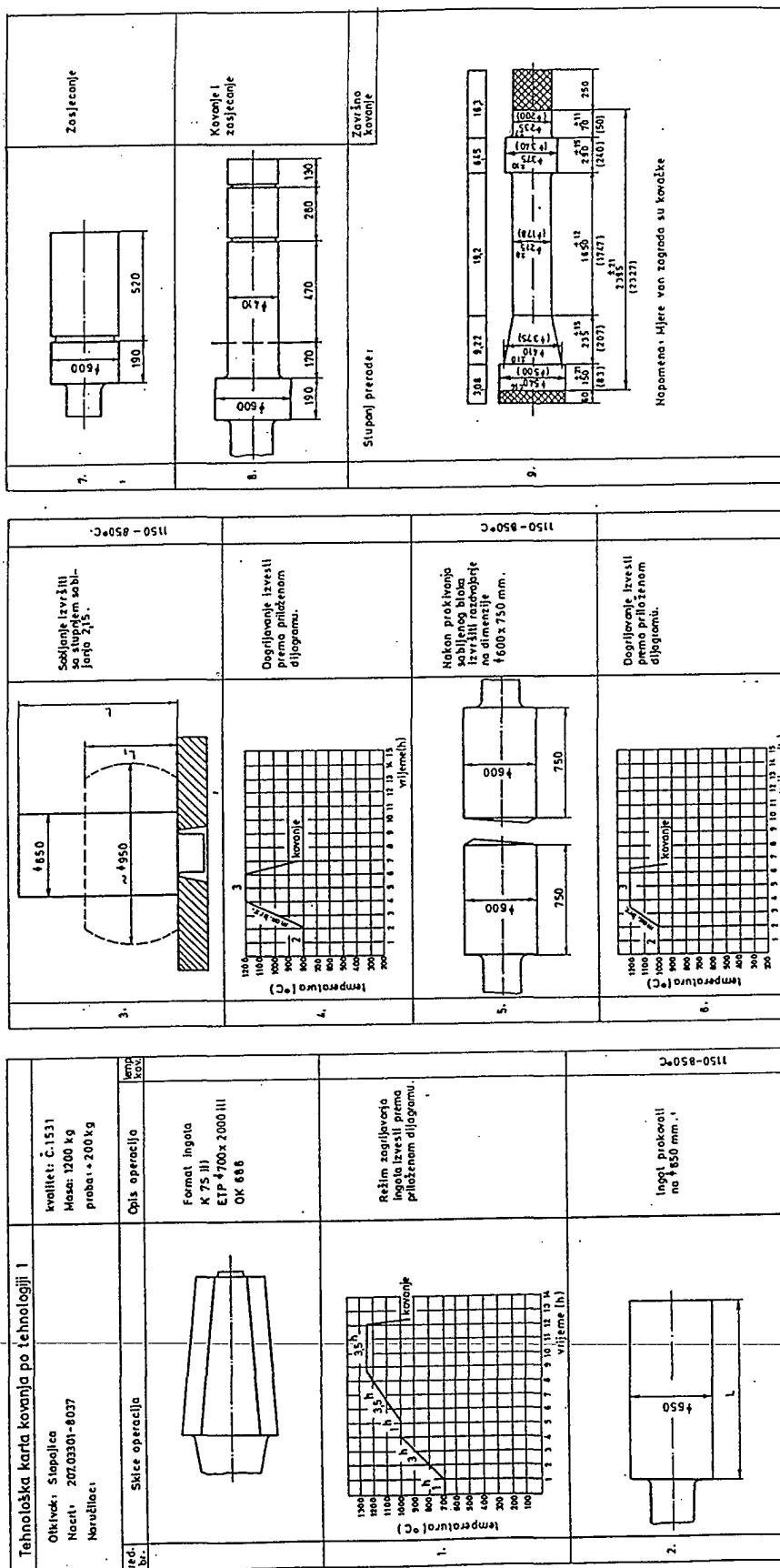
Upravo zbog toga će čitalac putem detaljnog prikaza istraživanja ovog slučaja iz prakse dobiti jasniju predodžbu o složenosti proizvodnje gotovog proizvoda od slobodno kovanog otkovka. Pored toga može se očekivati da će mu tako postati bliži inženjerski način razmišljanja o strojarskoj proizvodnoj tehnologiji te da će u potpunosti uočiti čvrstu povezanost konstrukcije, ponašanja materijala, tehnologije izrade i obrade, a nadalje kvalitete proizvoda.

Izvršena je analiza slobodnog kovanja stapajice po postupcima proizvođača predviđenim u *tehnologiji 1*. Originalna *tehnološka karta* takovog slobodnog kovanja prikazana je na slici 39.

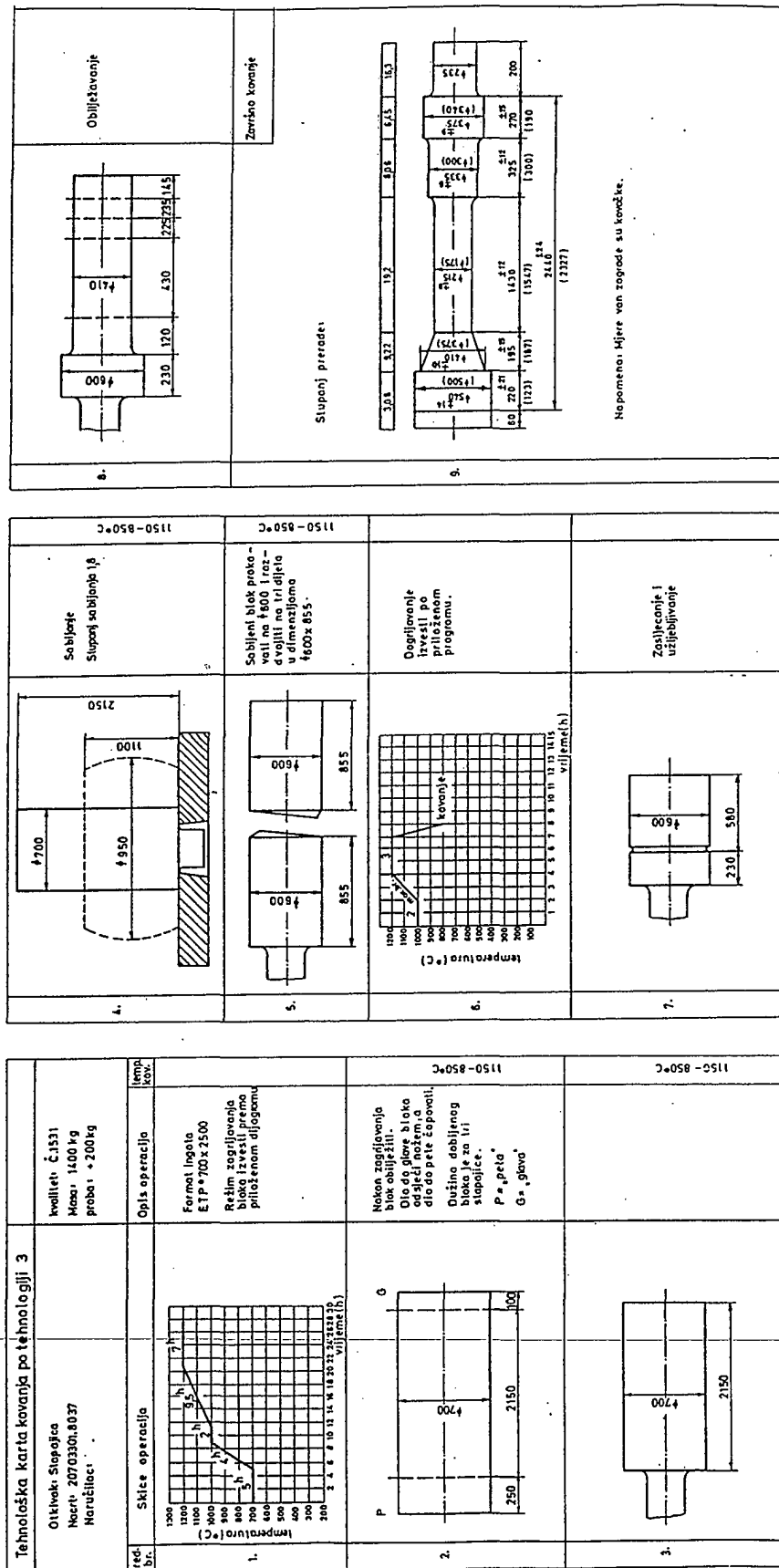
Iz slike 39 se vidi da je kao sirovac korišten čelični ingot mase oko 6 tona, a da je za masu otkovka predviđeno 1200 kg s dodatkom od 200 kg za izradu epruveta nakon kovanja kako bi se odredila postignuta mehanička svojstva otkovka. Ingot će dostajati za izradu tri stapajice. S obzirom na masu grubo obradjene stapajice od oko 700 kg proizlazi da je iskorištenje materijala 50%. To je u skladu s podacima iz tablice 6. Režim zagrijavanja ingota (operacija 1 na slici 39) pokazuje da je ingot prije kovanja zagrijavan 12 sati po određenom režimu koji mu je osigurao postepenu, dobru i jednoliku progrijanost mase<sup>46</sup>. Uočljivo je da je dijagram režima zagrijavanja započeo s temperaturom od 700°C. To znači da je ingot s tom temperaturom uložen u peć. Ovo je bilo moguće izvesti stoga što je ingot iz čeličane, koja se nalazi u blizini, nakon skrućivanja transportiran u toplinski izoliranoj posudi u kovačnicu. Na taj način je uštedjeno vrijeme zagrijavanja na 700°C i tome pripadajuća toplinska energija te vremenska zauzetost peći. Operacije 2 i 3 prikazane na tehnološkoj karti u skladu su s prije opisanim principima slobodnog kovanja velikih čeličnih masa i nužnosti postizavanja minimalnog stupnja prokivanja V. Zbog ohladjivanja ingota (na temperaturu nešto iznad 800°C) u toku operacija 2 i 3 na bilo je potrebno dogrijavanje mase kako je to predviđeno operacijom 4. Dogrijavanje je trajalo ukupno 6 sati pa su slijedeći postupci kovanja započeti na temperaturi nešto nižoj od 1200°C. Nakon prokivanja bloka sabijenog u operaciji 3 na  $\varnothing 600$  mm u operaciji 5 izvršeno je prokivanje i razdvajanje na tri komada dimenzija  $\varnothing 600 \times 750$  mm. Budući da je tek sada zaista izradjen sirovac za jednu stapajicu koji će se oblikovati slobodnim kovanjem, preventivno je izvršeno drugo dogrijavanje u trajanju od 6 sati (operacija 6) sa temperature od 1000°C na 1200°C (mjereno u peći) kako se ne bi prekidale kovačke operacije koje slijede. Operacijama 7 i 8 izvršeni su svi potrebni pripremni postupci da bi se izradio otkovak oblika prema 9. Na pripadajućoj skici prikazani su stvarni stupnjevi prokivanja postignuti u toku kovanja različitih presjeka otkovka stapajice. Mjere van zagrada su "kovačke", što znači da su postignute isključivo slobodnim kovanjem pa je to razlog za njihove vrlo velike tolerancije. Mjere u zagradama označavaju dimenzije koje će biti postignute grubim tokarenjem otkovka u pogonu kovačnice. Šrafirani dijelovi otkovka se odvajaju od otkovka nakon izvršene toplinske obrade, a od ovoga materijala izradit će se epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava otkovka.

U pokušajima da otkloni uzrok krivljenju stapajica proizvođač je samoinicijativno i bez čvrstog osnova mijenjao postupak slobodnog kovanja. Promjene nisu bile suštinskog značaja, no prikazati će ih se više s razloga da se uoči mogućnost i drugačijeg postupka kovanja nego zbog toga što bi te promjene dale izrazito bolja svojstva otkovka. Ova tehnologija kovanja (*tehnologija 3*) prikazana je na slici 40.

<sup>46</sup> Postepenost zagrijavanja velike čelične mase je nužna da bi se unutrašnja naprežanja mase zbog zagrijavanja održala na što nižem nivou. Do ovih naprežanja dolazi zbog temperaturnih razlika površinskih slojeva i unutrašnjosti mase.



Slika 39. Tehnološka karta slobodnog kovanja stapajice po tehnologiji 1



Slika 40. Tehnološka karta slobodnog kovanja stapažice po tehnologiji 3

Na slici 40 uočavamo da je u ovoj varijanti upotrebljen ingot dimenzija  $\varnothing 700 \times 2500$  mm, a u prethodnoj je bio  $\varnothing 700 \times 2000$ . Zagrijavanje ingota je produženo čak na 28 sati pa je sada operacija 1 znatno duža od one u tehnologiji 1. Razlikuju se i operacije 2. U tehnologiji 3 ingot je prokovan na  $\varnothing 700$  mm. Većom masom ingota i boljom organizacijom kovanja u tehnologiji 3 je izbjegnuto dogrijavanje nakon sabijanja. Ostale operacije se ne razlikuju od odgovarajućih operacija sa slike 38. Oblik gotovog otkovka je sada nešto drugačiji (operacija 9), međutim, otkovak stapajice ima jednake stupnjeve prokivanja kao i onaj izradjen po tehnologiji 1. Po tehnologiji 3 otkovak je s desne strane oblikovan s prijelaznim profilom  $\varnothing 335 \times 325$  mm. Ovu intervenciju je proizvođač poduzeo kako kod grubog tokarenja ne bi došlo do znatnog presjecanja "vlakana" kao što je to slučaj kod obrade gotovog otkovka izradjenog po tehnologiji 1. Konceptija slobodnog kovanja po tehnologiji 3 dala je znatno slabije iskorištenje materijala, a sve izmjene tehnologije učinjene su zbog želje da se otkloni sumnja da je čelični materijal i način kovanja uzrok krivljenju stapajica.

Činjenica je da stapajice kovane po tehnologiji 3 nisu u eksploataciji pokazale nikakovo krivljenje. Nakon svih izvršenih ispitivanja, što proizvođač nije mogao znati kada je donosio odluku da se kovanje obavi po tehnologiji 3, ustanovljeno je da ni tehnologija kovanja ni čelični materijal nisu razlog krivljenju. Ustanovljeno je, međutim, da je tomu razlog neodgovarajuća toplinska obrada otkovka, odnosno zaostala naprezanja koja nisu uklonjena toplinskom obradom nakon faze u kojoj se ta naprezanja najviše stvaraju. S pravom bi se moglo ustvrditi da je u suštini pomanjkanje sagledavanja cjelokupnog postupka proizvodnje i eksploatacije stapajice te robovanje tehnološkoj šabloni opće kovačke prakse bez odgovarajućeg inženjerskog i znanstvenog pristupa konkretnoj proizvodnji dovelo do problema koji je imao vrlo neugodne posljedice.

Toplinska obrada otkovka stapajice je takodjer u toku istraživanja doživljavala promjene. Na slici 41 (stranica 61) prikazan je režim toplinske obrade otkovaka stapajica izradjenih po tehnologiji 1 (koje su se većim dijelom iskrivile) pa stoga taj dijagramski prikaz nosi oznaku I. Na istoj slici oznaka II. se odnosi na poboljšanu varijantu toplinske obrade po kojoj je obradjeno 6 stapajica koje se nisu iskrivile u eksploataciji. Oba dijagramska prikaza prikazuju sve operacije i temperature toplinske obrade i druge operacije koje su izvršene na otkovku (ravnanje, gruba i fina obrada tokarenjem, bušenje provrta  $\varnothing 35$  mm i brušenje). Takovim prikazom, koji je uobičajen u praksi, dobivamo pregled zbivanja i mogućnost usporedbe različitih načina i redoslijeda obrade proizvoda.

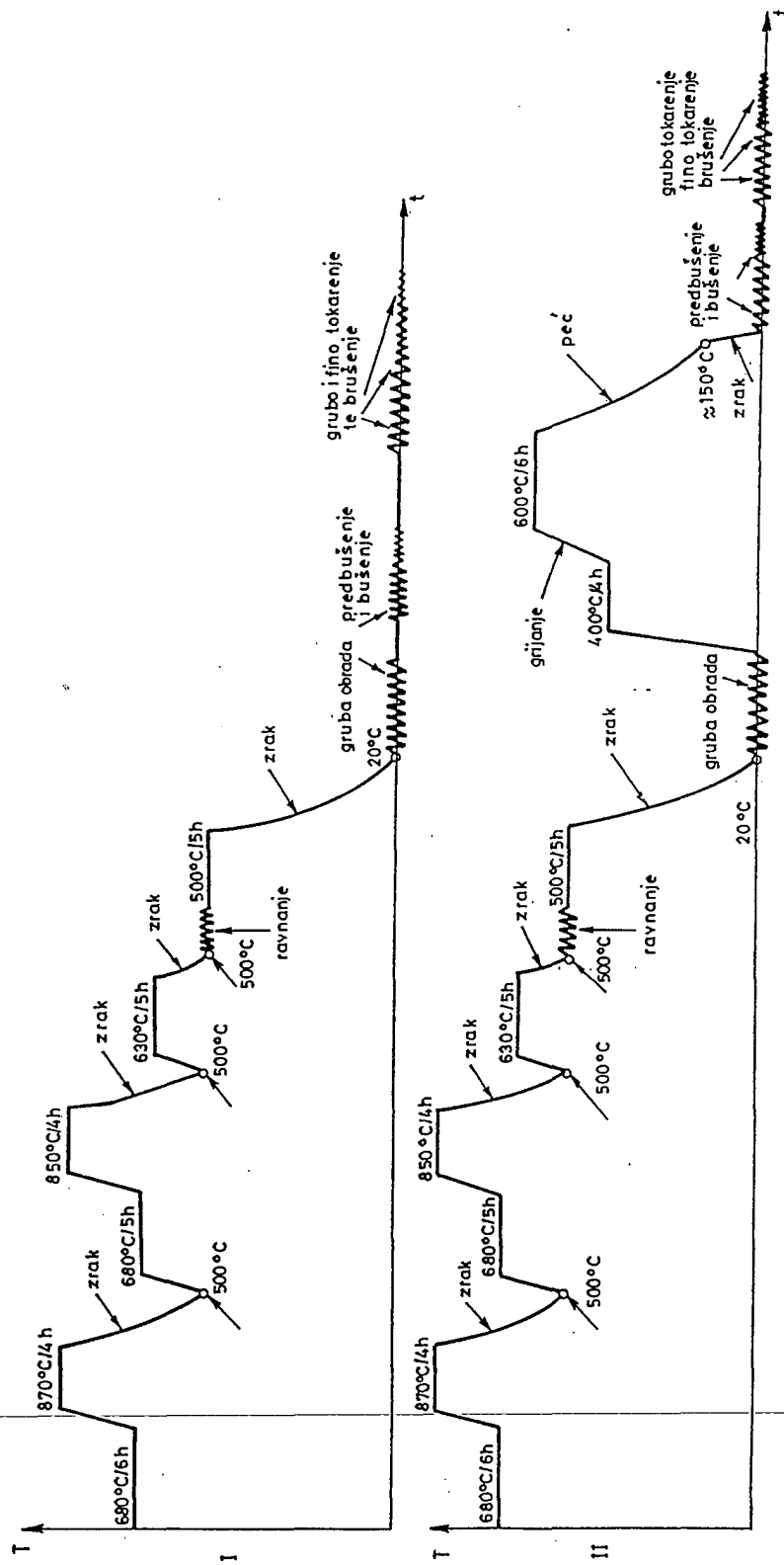
Toplinska obrada po stapajica po tehnologiji 1 (I.) i tehnologiji 2 (II.) započinje s dvostrukim normalizacijskim žarenjem. Ponavljanjem normalizacijskog žarenja se kod velike mase čelika postiže ujednačenost sitnozrnate strukture u čitavoj masi. Otkovak se drži na temperaturi od  $680^{\circ}\text{C}$  kroz 6 odnosno 5 sati zatim mu se temperatura naglo diže na  $870^{\circ}\text{C}$  pa se hladjenjem na mirnoj okolišnoj atmosferi postiže  $500^{\circ}\text{C}$ . Ponavljanjem ovakovog režima postignuta je sigurna austenitizacija. Ravnanje se obavlja pri temperaturi od  $500^{\circ}\text{C}$ , a nakon ravnanja slijedi daljnje grijanje na  $500^{\circ}\text{C}$  kroz 5 sati i hladjenje na okolišnu temperaturu izvan peći u mirnom zraku. Iz prikazana sa slike 41 vidljivo je da do ove faze obrade *nema razlike između dviju tehnologija, tj. između I. i II.*

Razlike među tehnologijama nastupaju u postupcima nakon ravnanja, odnosno hladjenja nakon ravnanja. Prema tehnologiji I. vrši se cjelokupna mehanička obrada bez naknadnog žarenja za uklanjanje zaostalih naprezanja dok tehnologija II. nakon grube obrade tokarenjem predviđa takovo žarenje. Imajmo na umu da su operacijom ravnanja u otkovak

unešena naprezanja jer je otkovak deformiran savijanjem. S druge strane, podsjetimo se da su se stapajice izradjene s toplinskom obradom po tehnologiji I. pretežno krivile, a onih 6 komada izradjenih po tehnologiji II. nisu. Sve ovo ukazuje da su zaostala naprezanja zaista mogla izazvati krivljenje stapajice. Ostalo je da se utvrdi da li je to zaista i razlog krivljenju, što je moguće ustanoviti na temelju saznanja kolika su ta naprezanja bila te kako su bila raspoređena po obodu stapajice. Zbog toga je bilo nužno izvršiti mjerenja zaostalih naprezanja<sup>47</sup>. Kako se radi o vrlo skupim mjerenjima, a i broj raspoloživih stapajica je bio oskudan, mjerenja su izvršena na stapajicama-reprezentantima izradjenim po tri tehnologije koje se međusobno značajno razlikuju u dijelu nakon normalizacijskog žarenja.

Načinimo sada kritički osvrt na režim toplinske obrade po tehnologiji I. Takovu analizu valja učiniti da bi se ustanovila ona faza izvršene toplinske obrade gdje je moguć nastanak zaostalih naprezanja. Na temelju slike 41 vidi se da toplinska obrada po tehnologiji I nakon ravnjanja na 500°C i hladjenja na zraku do sobne temperature ne predviđa nikakav postupak obrade radi oslobadjanja od zaostalih naprezanja. Stapajice se nakon toga obradjuju odvajanjem čestica. Proizvadžać otkovka je smatrao da nije potrebno izvršiti posebnu toplinsku obradu nakon grubog tokarenja otkovka jer se, po njegovom mišljenju, nakon toplog ravnjanja na temperaturi od 500°C i nastavka žarenja na toj temperaturi u trajanju od 5 sati te uz hladjenje otkovka na mirnom zraku do temperature od 100°C, postiže prosječna brzina hladjenja od oko 50 K/h. Po uvriježenom mišljenju to je unutar dozvoljene brzine hladjenja koja neće izazvati značajnija zaostala naprezanja. Osim toga valja istaknuti da je izostanak posebnog žarenja za oslobadjanje od unutarnih naprezanja za proizvadžaća koristan jer su tako izbjegnuti značajni troškovi energije još jednog žarenja, a ciklus proizvodnje je ubrzan. Ipak, naknadnim kontrolnim proračunom trajanja hladjenja (tek nakon što su ustanovljena krivljenja većeg broja stapajica!) ustanovljeno je da na dijelu stapajice promjera 215 mm izradjene od zadanog Č.1531 trajanje hladjenja od 500°C na 100°C u mirnom okolišnom zraku može biti od 4 do 6 sati, zavisno od metode po kojoj je proračun izvršen. Iz toga slijedi da je brzina hladjenja mogla biti i veća od pretpostavljene. Ako je proizvadžać utvrdio da je temperatura stapajice nakon 8 sati hladjenja 100°C mjereno na  $\varnothing 215$  mm, onda se i dijelovi stapajice promjera većeg od  $\varnothing 215$  mm hlade jednako sporo. Ako je, dakle, na kraju procesa ohladjivanja na  $\varnothing 215$  mm postignuto 25°C, onda u isto vrijeme na  $\varnothing 540$  mm (usporedi dimenzije otkovka prikazane na slici 39, operacija 9) mora postojati temperaturna razlika od 75 K. Izračunavanje naprezanja nastalog zbog takove temperaturne razlike daje veličinu od 260 N/mm<sup>2</sup> što je još uvijek niže od granice elastičnosti čelika Č.1531 kod 100°C. Iz toga slijedi da ta naprezanja nisu mogla biti uzrok trajne deformacije (krivljenja) u toku hladjenja. Kasnijim razmatranjem izvodjenja toplinske obrade po tehnologiji I ustanovljeno je da je hladjenje sa 500°C na 100°C više stapajica složenih na roštilju peći obavljano zajednički tako da je pokretni roštilj izvučen iz peći zajedno sa stapajicama. Moralo je nastupiti nejednoliko ohladjivanje stapajica. Računski nije moguće odrediti nejednolikost ohladjivanja "u hrpi", no nije sporno da je nejednolikost ohladjivanja stapajica postojala. Ova činjenica je moguć uzrok zaostalim naprezanjima nesimetrično po presjeku, a veličina ovih je zavisila o intenzitetu hladjenja, odnosno o neminovnim temperaturnim razlikama po obodu pojedinih otkovaka iz "hrpe". U kritičkoj analizi tehnologije I i traženju one faze postupka izvršene toplinske obrade u kojoj su mogla nastati zaostala naprezanja razmotreno je i toplo ravnjanje otkovka na temperaturi od 500°C. Ravnjanjem se moraju izazvati trajne deformacije i to

<sup>47</sup> Rezultati tih mjerenja prikazani su u tablicama 10, 11, 12 i 13.



Slika 41. Režimi toplinske obrade otkovaka po tehnologiji I. i II.

vlačne na bivšem konveksnom, a tlačne na bivšem konkavnom lokalitetu otkovka, dakle na dijametralno suprotnim točkama kružnog presjeka otkovka. Da se ostvari trajna deformacija mora se prekoračiti granica elastičnosti i doseći plastično područje čelika, u ovom slučaju one veličine koja pripada temperaturi od 500°C. Naprezanja koja pri tom nastaju su reda veličine od 150 N/mm<sup>2</sup>, a ta naprezanja se nisu mogla reducirati na jednakoj temperaturi na kojoj su i nastala<sup>48</sup>. Čak je vjerojatno da su ova naprezanja bila i veća od 150 N/mm<sup>2</sup> jer je u toku ravnjanja (za koje nije poznato koliko je trajalo i da li je u svim slučajevima podjednako trajalo) temperatura otkovka nužno smanjena, a granica elastičnosti čelika se zbog niže temperature povećala.

Vjerojatnost nastanka zaostalih naprezanja postoji i u fazi hladjenja sa 630°C na 500°C prije izvedenog postupka ravnjanja. Izvršeni kontrolni proračun naprezanja već samo na  $\varnothing 215$  mm pokazuje da je uz hladjenje na mirnom zraku na tom mjestu ostvaren pad temperature od 25 K/h. Naprezanje na tom mjestu je izračunato na temelju razlike temperatura, modula elastičnosti i pripadnih koeficijenata toplinske kontrakcije te iznosi u tom slučaju 76 N/mm<sup>2</sup>, što je za 50% više od granice elastičnosti čelika C.1531 kod 600°C. Ova zaostala naprezanja se superponiraju onima izazvanim ravnjanjem.

U normalnim slučajevima ohladjivanja, a bez utjecaja strukturnih transformacija, u jezgri otkovka zaostaju vlačna naprezanja, a u površinskim slojevima tlačna. Iz slike 41 slijedi da je cjelokupna obrada otkovka odvajanjem čestica obavljena nakon ravnjanja i žarenja na 500°C. Time se je presjek stapajice značajno smanjio što znači da se veličina svih zaostalih naprezanja bitno povećala.

Uzrok iskrivljenu stapajice je nejednolik raspored zaostalih naprezanja različitih veličina po opsegu. Nakon svake mehaničke obrade unose se u površinske slojeve zaostala naprezanja. U slučaju grubog tokarenja ta naprezanja mogu biti vrlo značajna. Međutim, tokarenjem mogu biti unešena samo jednaka, jednolika i istoimena naprezanja po cijeloj površini plašta. Nejednolikost zaostalih naprezanja, koja je evidentni uzrok iskrivljenja stapajice, nastaje zbog superpozicije jednolikih naprezanja unešenih tokarenjem i nejednolikih zaostalih naprezanja nastalih zbog nejednolikog ohladjivanja više komada stapajica "u hrpi" sa temperature od 630°C na 500°C. Očit je nedostatak tehnologije I da u njoj nije predviđeno posebno žarenje radi oslobađanja od unutarnjih naprezanja nakon grubog tokarenja u kovačnici. Da je takovo žarenje izvršeno, veličina zaostalih naprezanja bila bi po apsolutnoj vrijednosti znatno manja pa do iskrivljenja ne bi ni došlo.

Uočimo da je po tehnologiji II sa slike 41 žarenje za uklanjanje zaostalih naprezanja uslijedilo nakon grubog tokarenja otkovka u kovačnici<sup>49</sup> na mjere prikazane na slikama 39 i 40 (9). Ovakovim se načinom odvajanja čestica u površinske slojeve unose značajna naprezanja pa je, pored unošenja naprezanja kod toplog ravnjanja, logično da se žarenje izvrši u toj fazi obrade. Ovo je suštinsko poboljšanje u odnosu na tehnologiju I. Međutim, nakon

<sup>48</sup> Proračune brzina hladjenja i veličina zaostalih naprezanja izradio je prof. dr. M. Novosel, FSB Zagreb.

<sup>49</sup> Postoji na kraju dijagramskog prikaza još jedno grubo tokarenje. To je ono što se obavlja kod naručioca otkovka koje će uslijediti kod konačne izrade stapajice. Razlike između ovih grubih tokarenja je u režimu obrade, a posebno o dubini i posmaku tokarenja. Ovi parametri tokarenja su u kovačnici znatno grublji. U daljnjem tekstu su detaljno navedeni svi elementi režima obrade odvajanjem čestica.



ovog žarenja slijedi prebušenje (na  $\varnothing 28$  mm) i konačno bušenje provrta po cijeloj dužini stapajice (na  $\varnothing 35$  mm) čime se također unose u stapajicu naprezanja koja će neminovno zaostati u stapajici. Pored toga, u tehnologiji II režim žarenja na  $600^{\circ}\text{C}$  i dovodjenje stapajice na tu temperaturu, pa i nekontrolirani način hladjenja u peći, nisu davali dovoljno razloga da se vjeruje da je predviđeno dovoljno vremena da se proces oslobađanja od unutarnjih naprezanja (*relaksacije*) dovrši do njihovog najnižeg mogućeg nivoa. Izbor temperature žarenja od  $600^{\circ}\text{C}$ , što bi sa stanovišta oslobađanja od zaostalih naprezanja bilo povoljno, je negativno utjecao na čvrstoću čelika. Žarenjem na ovu temperaturu nije uvijek bilo moguće postići zahtijevanu čvrstoću nego je postizavana nešto manja vrijednost pa se je stoga  $600^{\circ}\text{C}$  pokazalo kao neprikladna i previsoka temperatura.

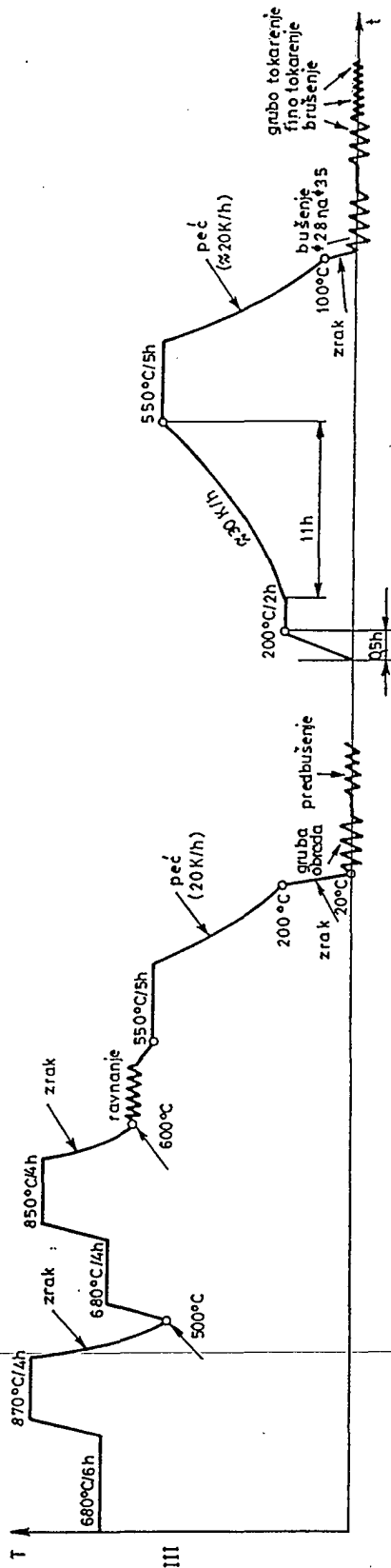
Zbog svega toga proizvođaču je predložen drugačiji način toka toplinske obrade s drugačijim i logičnijim redoslijedom operacija što je ukazivalo na veću vjerojatnost da će se stapajice izraditi s manjim zaostalim naprezanja. Ovo je usvojeno unatoč činjenici da u tom času zbog objektivnih razloga još nisu mogla biti izvršena mjerenja veličine zaostalih naprezanja koja bi to egzaktno i dokazala. Nova tehnologija, sada označena kao *tehnologija III*, prikazana je na slici 42 (stranica 64).

Usporedbom sa slikom 42 vidi se da je u tehnologiji III, nakon dvostrukog normalizacijskog žarenja i hladjenja u mirnom zraku na  $600^{\circ}\text{C}$ , toplo ravnanje obavljeno na toj temperaturi. U prethodnim tehnologijama to je obavljeno na temperaturi od  $500^{\circ}\text{C}$ . Izborom više temperature toplog ravnjanja u tehnologiji toplinske obrade III smanjena je veličina zaostalih naprezanja, a uz žarenje na  $550^{\circ}\text{C}$  kroz 5 sati (prije je to obavljano na  $500^{\circ}\text{C}$ ) i uz ovaj puta kontrolirano hladjenje (sa intenzitetom od 20 K/h do  $200^{\circ}\text{C}$ ), već je do izvjesne mjere izvršeno oslobađanje od zaostalih naprezanja. Slijedilo je grubo tokarenje u kovačnici i prebušenje uzdužnih provrta na  $\varnothing 28$  mm što također predstavlja razliku, posebno u odnosu na tehnologiju II. Ove dvije operacije su unijele nova naprezanja u otkovak pa je stoga valjalo izvršiti novo žarenje za njihovu relaksaciju. Dijagramski prikaz toka ovog žarenja na desnoj strani slike 42 pokazuje da je zagrijavanje bilo vrlo postepeno (s prirastom temperature od 30 K/h) i stoga dugotrajno (ukupno 13 sati), a da je zadržavanje otkovka na temperaturi žarenja od  $550^{\circ}\text{C}$  bilo 5 sati. Kontroliranim hladjenjem u peći s intenzitetom od 20 K/h do  $100^{\circ}\text{C}$  uklonjen je na najbolji mogući način maksimalni iznos zaostalih naprezanja u otkovku. Tek nakon ovog žarenja izvršeno je završno bušenje uzdužnih provrta sa  $\varnothing 28$  na  $\varnothing 35$  mm.

Na samom kraju dijagramskog prikaza naznačene su obrade grubog i finog tokarenja te brušenja koje se ne obavljaju u kovačnici već kod proizvođača motora.

Pod grubim tokarenjem kod proizvođača motora se podrazumijeva predobrada tokarenjem sa slijedećim režimom: dubina  $t=2$  mm, posmak  $s=0,39$  mm/okr i broj okretaja  $n=160$  min<sup>-1</sup>. Fino tokarenje je ujedno i završno tokarenje s  $t=0,5$  mm,  $s=0,21$  mm/okr te  $n=180$  min<sup>-1</sup>. Brušenje stapajice koje je nakon toga uslijedilo obavljeno je u svim slučajevima s  $t=0,01$  mm,  $s=350$  do 400 mm/min uz korištenje brusnog kola  $\varnothing 550$  mm koje se je okretalo s  $n=700$  min<sup>-1</sup> dok je stapajica prigodom brušenja imala  $n=30$  min<sup>-1</sup>. I predobrada i završno tokarenje su nužno unijele naprezanja u stapajicu no zbog relativno blagog režima obrade njihova očekivana veličina ne bi smjela biti zabrinjavajuća ili barem ne bi smjela biti uzrok krivljenu stapajice.

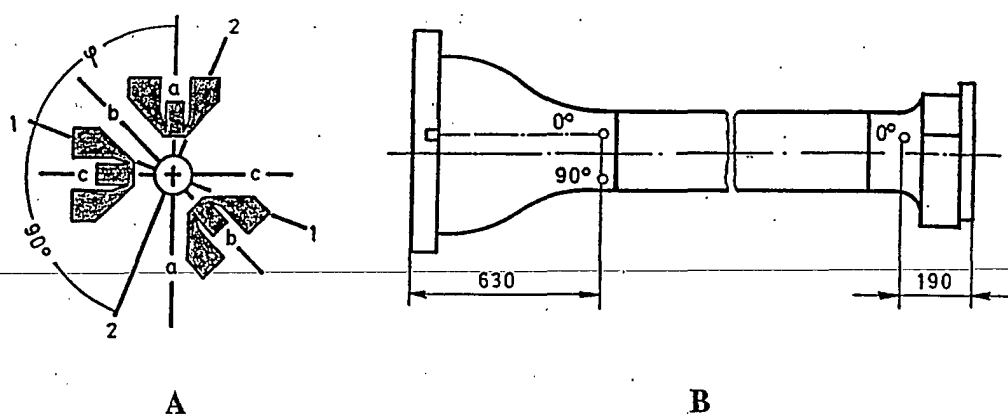
Brušenjem, odnosno takovim načinom odvajanja površinskog tankog sloja čestica stapajice, uklanjaju se zaostala naprezanja u površinskim slojevima što je sretna okolnost jer je maksimum zaostalih naprezanja uvijek lociran baš u površinskim slojevima.



Slika 43. Režim toplinske obrade po tehnologiji III

Toplinska obrada po tehnologiji III je skuplja od ostalih no dala je i bolje rezultate što su mjerenja veličine zaostalih napreznja u stapajici i potvrdila. To se je posebno povoljno odrazilo na veličine zaostalih napreznja tako toplinski obradjenih otkovaka nakon predobrade, završnog tokarenja i brušenja stapajica kod proizvođača motora, što će se vidjeti usporedbom rezultata mjerenja prikazanih u tablicama 10 - 13. Na temelju toga se zaključuje da je režim toplinske obrade po tehnologiji III optimalno rješenje sa stajališta veličine zaostalih napreznja u otkovku.

Mjerenja veličine zaostalih napreznja<sup>50</sup> su izvršena tenzometrijskom metodom. Posebno izradjena mjerna rozeta (slika 43, A) je lijepljenjem pričvršćena na površinu stapajice. Rozeta se sastoji od tri tenzometrijska elementa postavljena na zajedničkom nosaču na jednakoj udaljenosti od središta. U središtu rozete nalazi se mali metalni prsten s unutarnjim otvorom promjera 1,5 mm. Tenzometri mjere deformaciju površine na koju su nalijepljeni kada se u središtu rozete izbuši svrdlom plitka rupa kroz otvor promjera 1,5 mm. Do deformacije dolazi uslijed relaksacije zaostalih unutarnjih napreznja u površinskim slojevima zbog bušenja rupe. Na temelju izmjerenih deformacija pogodnim jednadžbama mehanike izračunavaju se napreznja koja su deformacije izazvala. Da bi rezultati mjerenja bili međusobno usporedivi, nužno je da se rupe buše uvijek jednakim (standardiziranim) svrdlom promjera manjeg od 1,5 mm te da dubina, geometrija oštrice svrdla i režim bušenja budu uvijek jednaki. Mjerenjem glavnih deformacija  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  i  $\epsilon_3$  pomoću tri tenzometrijska elementa rozete postavljene u smjerovima  $a$ ,  $b$  i  $c$  moguće je odrediti veličinu zaostalih napreznja u površinskom sloju koja su postojala prije bušenja provrta. Veličinama glavnih napreznja  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  određena su zaostala napreznja koja mogu biti vlačna (+) ili tlačna (-). Pravci djelovanja glavnih napreznja određeni su kutom  $\varphi$  koji zatvara pravac djelovanja većeg glavnog napreznja  $\sigma_1$  s pravcem koji je određen smjerom tenzometrijskog elementa u mjernoj rozeti. Pravac djelovanja drugog glavnog napreznja  $\sigma_2$  je okomit na pravac  $\sigma_1$ . Kut  $\varphi$  se određuje na temelju izraza koji sadrži izmjerene deformacije  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  i  $\epsilon_3$ . U svim mjerenjima je položaj mjernih mjesta bio jednak. Položaj mjernih mjesta prikazan je na slici 43 B.



Slika 43. Shema mjerne rozete (A) i položaj mjernih mjesta na stapajici (B)

<sup>50</sup> Mjerenja je izvršio mr. M. Husnjak, FSB, Zagreb. Čitaoca zainteresiranog za više informacija o mjerenju zaostalih napreznja upućuje se na magistarski rad M. Husnjaka pohranjen u knjižnici FSB-a, a koji je naveden u popisu literature.

Na udaljenosti 630 mm od mjesta gdje će biti veza klipa cilindra i stapajice postavljena su po obodu otkovka 4 mjerne rozete koje su međusobno razmaknute 90°. Na suprotnom kraju otkovka, na kraju koji je namijenjen spoju s križnom glavom, na udaljenosti od 190 mm od ruba nalijepljene su 2 mjerne rozete po obodu međusobno razmaknute za 180°.

Sve mjerne rozete su postavljene tako da pravac tenzometrijskog elementa od kojega se mjeri pravac djelovanja glavnog naprezanja  $\sigma_1$  bude okomit na uzdužnu os stapajice.

Karakteristični rezultati mjerenja prikazani su u tablicama 10, 11, 12 i 13. Rezultati mjerenja veličine zaostalih naprezanja u stapajici br. 000 415-01 B koja je izradjena po proizvodnoj tehnologiji 1 (i tehnologiji toplinske obrade I) s već navedenim režimima obrade odvajanjem čestica prikazani su u tablici 10. Ova stapajica se je iskrivila u toku rada te izazvala havariju cilindra u koji je bila ugradjena.

Tablica 10

Mjerno mjesto na stapajici	Deformacije mm 10 <sup>-6</sup>			Glavna naprezanja MPa		Pravac
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\varphi$
Prema klipu 0°	11	24	8	-7,2	-25,2	132°
90°	-6	-47	-66	81,2	41,6	79,9°
180°	-46	14	34	37,9	-17,4	166,7°
270°	-12	-32	-27	42,3	24,2	60,5°
Prema križnoj glavi						
0°	-140	-92	-116	241,0	194,9	144,2°
180°	-116	-196	-130	255,2	164,4	47,7°

Iz tablice 10 je uočljivo da su zaostala naprezanja na mjernim mjestima prema klipu relativno malena u odnosu na mjerna mjesta prema križnoj glavi. To se može protumačiti time što se u toku rada u motoru na tom mjestu stapajica jače deformira pod djelovanjem sumarnih naprezanja, tj. zaostalih i radnih naprezanja. Na tom mjestu to je izazvalo relaksaciju dijela zaostalih naprezanja.

Na lokalitetu prema križnoj glavi jače deformacije nije bilo te je relaksacija zaostalih naprezanja izostala pa je tako očuvana njihova originalna značajna veličina. Iskrivljenje stapajice je izazvano zaostalim naprezanjima nejednolikog rasporeda i predznaka.

Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja u dvije stapajice, koje su izradjene po tehnologiji 3 (i tehnologiji toplinske obrade III), prikazani su u tablicama 11 i 12. Obadvije stapajice su zatečene kod proizvođača motora u sirovom stanju, što znači da su isporučene nakon grube obrade tokarenjem u kovačnici i nakon izvršene toplinske obrade III. Kod stapajice br. 001 665-01 A ustanovljeno je:

Tablica 11

Mjerno mjesto na stapajici	Deformacije mm 10 <sup>-6</sup>			Glavna naprezanja MPa		Pravac $\varphi$
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	
Prema klipu 0°	-49	-57	-90	133,4	103,7	105,7°
90°	-70	-140	-200	270,6	189,9	87,8°
180°	-100	-104	-60	155,8	117,1	25,1°
270°	-40	-50	-50	81,1	72,4	67,5°
Prema križnoj glavi 0°	-168	-160	-164	287,1	279,3	144,2°
180°	-110	-140	-200	293,8	235,1	99,2°

Slični rezultati su ustanovljeni i kod stapajice br. 001.669-01 B:

Tablica 12

Mjerno mjesto na stapajici	Deformacije mm 10 <sup>-6</sup>			Glavna naprezanja MPa		Pravac $\varphi$
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	
Prema klipu 0°	-66	-100	-140	198,7	152,7	92,3°
90°	-66	-80	-75	126,8	113,8	57,7°
180°	-96	-108	-98	172,3	158,6	47,6°
270°	-95	-124	-160	237,7	197,3	93,1°
Prema križnoj glavi 0°	-164	-190	-150	288,1	246,9	39,0°
180°	-160	-140	-158	283,0	259,5	136,5°

Ove obadvije stapajice pokazuju relativno visoka zaostala naprezanja unatoč tomu što su bile nakon grubog tokarenja u kovačnici podvrgnute žarenju zbog oslobađanja od zaostalih naprezanja po tehnologiji III. Razlog još uvijek visokim vrijednostima unutarnjih naprezanja vrlo vjerojatno treba tražiti u grubom režimu tokarenja u kovačnici ( $t=10$  mm,  $s=0,52$  mm/okr), velikim silama odvajanja čestica i visokim vrijednostima tako *dodatno unešenih naprezanja*. Jedan od razloga je i to da je žarenje za oslobađanje od unutarnjih naprezanja obavljeno kod 550°C a ne 600°C, no to je, kako je prethodno spomenuto, bilo uvjetovano zahtjevanim mehaničkim svojstvima čelika. Možemo samo pretpostavljati koliko bi iznosila unutarnja naprezanja da nije uopće obavljeno žarenje! Na sirovim stapajicama nije bilo primjećeno krivljenje veće od dozvoljenog. Razlog za to je u činjenici da su sva izmjerena unutarnja naprezanja istoimena (vlačna) i da njihove *razlike* po obodu mjernih mjesta nisu signifikantne za izazivanje deformacije.

Blagotvoran utjecaj finalne obrade izvršene kod proizvođača motora na veličinu zaostalih naprezanja u stapajici koja je takodjer izradjena po tehnologiji 3 (i tehnologiji

toplinske obrade III) pokazuje mjerenje kojega su rezultati prikazani u tablici 13. S razlogom treba pretpostaviti da je ova stapajica (br. 001 663-01 C) prije finalne obrade imala podjednak nivo veličina zaostalih napreznja kao što je bio slučaj kod prethodno prikazanih. Naime, sve tri su izradjene po jednakoj tehnologiji. Ipak, rezultati mjerenja iz tablice 13 daju bitno drugačiji red veličina unutarnjih napreznja:

Tablica 13

Mjerno mjesto na stapajici	Deformacije mm 10 <sup>-6</sup>			Glavna napreznja MPa		Pravac $\varphi$
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	
Prema klipu 0°	-40	-8	-30	76,7	42,7	14,7°
90°	-66	-22	-13	87,0	47,7	163,3°
180°	-44	-13	-4	55,1	26,8	165,6°
270°	-36	-2	-1	46,4	16,8	158,3°
Prema križnoj glavi 0°	-49	-15	0	58,0	25,5	169,4°
180°	-18	-10	-19	12,3	14,0	14,8°

Mali red veličine zaostalih napreznja i njihov jednak predznak daju nakon finalne obrade sigurnost da se stapajica neće iskriviti. To je uostalom i dokazano ponašanjem većeg broja stapajica izradjenih po tehnologiji 3 (III) koje su ugrađene u motore i koje rade bezprijekorno. Razlog postojanju malih zaostalih napreznja valja pripisati nakon toplinske obrade izvršenoj predobradi tokarenjem s  $t=2$  mm,  $s=0,39$  mm/okr, završnoj obradi tokarenjem s režimom  $t=0,5$  mm,  $s=0,21$  mm/okr i posebno brušenju s  $t=0,01$  mm po jednom prolazu brusnog kola. Skidanjem sve tanjih slojeva materijala u svakom prolazu alata uklonjen je veći dio unutarnjih napreznja unešen prethodnom obradom, a pri tom je unos novi unutarnjih napreznja sve manji.

Ovaj cjeloviti prikaz tehnoloških postupaka izrade jednog strojnog elementa slobodnim kovanjem daje sada jasnu predodžbu o utjecaju tehnologije kovanja, a nadasve tehnologije toplinske obrade otkovka na kvalitetne zahtjeve strojarskog proizvoda.

## 9. IZRADA OTKOVAKA MALIH MASA SLOBODNIM KOVANJEM

Oblikovanje malih masa u pojedinačnoj industrijskoj proizvodnji, obrtu, održavanju i montaži obavlja se dobrim dijelom slobodnim kovanjem. Takova tehnologija je prisutna gotovo u svakoj radioni za obradu i preradu metala. Jednostavna sredstva za rad omogućavaju najširju primjenu ove tehnologije i u tehnički vrlo skućenim proizvodnim uvjetima.<sup>51</sup>

<sup>51</sup> S gledišta suvremenih načina obrade i oblikovanja metala te nekad vrlo sofisticiranih tehnoloških postupaka pojedinačna proizvodnja slobodnim kovanjem čini se na prvi mah anahronom. Generacije inženjera odgajanih za budućnost (pod utjecajem "white collar" stava spram proizvodnje) spremne su zaboraviti prošlost i svoje profesionalne korjene. U početku razvoja strojarstva slobodno kovanje je bilo temeljni i jedini način racionalnog oblikovanja metala pa zato i spada u korjene strojarskih tehnologija. Kumulacijom

Slobodno kovanje malih masa obavlja se najčešće samo pomoću fizičke snage kovača, a uz pomoć kovačkih strojeva opće namjene moguće je lakše i brže otkovati predmete i većih masa. U tu se svrhu koristi perni bat i zračni bat s autonomnom dobavom komprimiranog zraka do 500 kg mase padajućih dijelova. Osnovna sredstva za rad su pri tom čekić, kliješta, nakovanj i kovačko ognjište.

Različiti oblici i mase **kovačkih čekića** prikazani su na slici 44 (stranica 70), ovisno o različitim kovačkim operacijama i načinu kovanja. Primjerice, ako kovač oblikuje kovanjem metal sam (bez pomoćnika) upotiebit će čekić red. br. 1 sa slike 44. Ako kovač oblikuje metal s pomoćnikom ostale vrste čekića (red. br. 4 do 19) služe kao alat pomoću kojeg se metal posredno oblikuje kovanjem, ovisno o namjeni profila čekića prema slici 44. Pomoćnik će tada udarati s teškim *kladivom* (masa mu može biti i do 15 kg) po čekiću za oblikovanje. Kladivo je na ušici konično oblikovano, a smjer ušice može biti jednak smjeru drške ili može biti okomit na taj smjer. U prvom slučaju se radi o *križnom kladivu* ili o *baltašu*, a u drugom slučaju je to *obično kladivo*. Druga strana kladiva je plosnata i blago zakrivljena u kuglinu plohu. Plosnata strana kladiva služi za udaranje po čekiću za oblikovanje, a ušicom se zadaju udarci kod operacije produživanja. Izbor baltaša ili običnog kladiva ovisi o organizaciji slobodnog kovanja, odnosno o međusobnom položaju kovača i jednog ili dva pomoćnika.

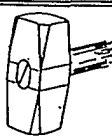
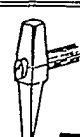
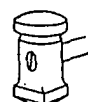

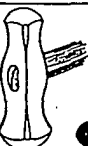
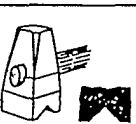


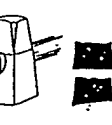
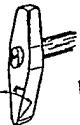



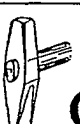
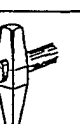
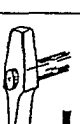
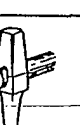
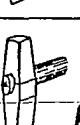
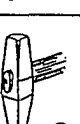
Unatoč dugoj tradiciji kovanja gubi se hrvatsko nazivlje kovačkog alata pa tako i čekića. U praksi nailazimo pretežito na upotrebu lošeg i iskrivljenog njemačkog nazivlja. Hrvatsko nazivlje čekića sa slike 44 bi bilo: red. br. 1 - *bat*; red. br. 2 i 4 - *zaobljčari*; red. br. 5 i 6 - *podmetači*; red. br. 7, 8, 9 - *probojnici*; red. br. 11, 12, 13 - *čekići-ukovnji*; red. br. 14, 15, 16, 17 - *sjekači*.

Izbor mase kladiva ovisi o deformaciji koju se želi ostvariti jednim udarcem te o nužnoj dubini prokovanosti metala. Veća masa uz isti zamah daje i veći deformacijski rad. Masa kladiva se bira u odnosu na masu nakovnja koji služi kao podloga za kovanje.

Različiti tipovi **nakovanja** prikazani su na slici 45. Tradicijski nazivi nakovanja vuku porijeklo prema zemlji u kojoj je razvijen taj tip nakovnja. U našim kovačnicama najčešće susrećemo tip a) prikazan na slici 45. Nakovanj je izradjen od čelika lijevanjem ili je oblikovan kovanjem. Na radnoj površini je navarena pločan od tvrdog čelika. Nakovanj je oblikovan tako da je moguća izvedba svih kovačkih operacija. Izdanci na lijevoj i desnoj strani zovu se *rogovi* ili *nosci*, a služe za kružno savijanje (lijevi rog), odnosno za sabijanje (desni rog). Na desnom rogu nalazi se rupa pravokutnog presjeka u koju se usadjuje ili ušica pomoćnog kovačkog čekića ili *usadnik*, tj. svojevrsni trn koničnog profila i različitog oblika poprečnog presjeka. Poznati zvonki zvuk nakovnja je znak njegova "zdravlja": masa mu je bez pukotina i većih nakupina troske.

Nakovnji su relativno velikih masa u odnosu na masu kladiva. U pravilu su i do 20 puta većih masa. Za većina kovačkih operacija koje se izvode ručnim radom koristi se kladivo mase od 5 kg što je još prihvatljivo s obzirom na zamor kovača. U takvim slučajevima se koristi nakovanj mase 75 kg ili 95 kg, no ima nakovanja i mase do 600 kg.

iskustava i spretnom primjenom temeljnih postupaka slobodnog kovanja u stanju smo izraditi niz različitih predmeta koji će biti prikazani u okviru ovog poglavlja. U ovoj tehnologiji uloga čovjeka-radnika je presudna: iskustvo, znanje, spretnost i fizička konstitucija su preduvjeti uspješnog postupka kovanja.

Red. br.	Tip	Masa kg	NAMJENA	Red. br.	Tip	Masa kg	NAMJENA
1		1 × 2	ravne i glatke površine	10		0,3 × 1,5	uske i duge rupe, prihvati ravnih rascjepa
2		1 × 2	kovanje zaobljenja	11		1 × 2	izdanci kružnog presjeka, zaglađivanje
3		0,2 × 0,5	umjetni obrt, čekićanje površine	12		1 × 2	izdanci kvadratičnog presjeka
4		0,5 × 1	užljebljivanje zaobljenja	13		1 × 2	izdanci šesterokut- nog presjeka
5		1	oštrobridno stanjivanje	14		0,5 × 1	razdvajanje u hladnom stanju
6		1 × 3	zaglađivanje, ravnanje	15		0,5 × 1	razdvajanje u toplom stanju
7		0,3 × 1,5	okrugle rupe	16		0,5 × 1	odsijecanje krajeva okruglih otkovaka
8		0,3 × 1,5	kvadratične rupe	17		0,3 × 1	izrada proreza i raspora
9		0,3 × 1,5	ovalne rupe	18		0,3 × 1	izrada pregiba potkove
				19		0,3 × 1	izrada koničnih utisniņa, skidanje okujine

Slika 44. Tipovi kovačkih pomoćnih čekića



Veličine masa nakovanja zasnovane su na teorijskom razmatranju iskorištenja energije udara kladiva. Korisna energija u kovačkom smislu je samo ona utrošena na deformaciju otkovka.

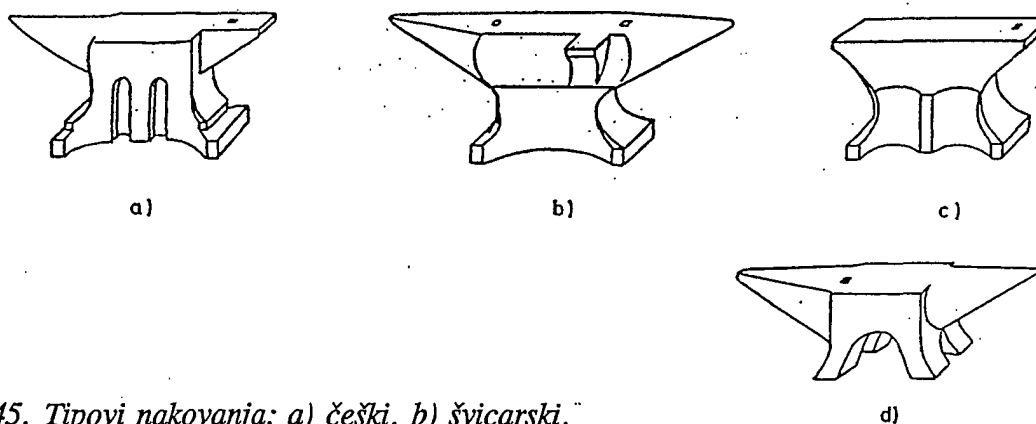
Označimo s  $E_1$  energiju udarca kladiva. Nakon udarca jedan dio energije  $E_2$  utrošen je na gibanje nekim brzinama i kladiva i nakovnja. Za kovanje je dakle iskorištena je dakle energija kovanja ( $E_1 - E_2$ ).

Pomoću pojma *stupnja iskorištenja energije*  $\eta$ , koji je uobičajen u strojarstvu (tj. odnosa dobivenog spram uloženog), slijedi da je  $\eta = (E_1 - E_2)/E_1$ . Do izvršenog udarca nakovanj miruje pa mu je brzina  $v_2 = 0$  dok je brzina kladiva  $v_1 > 0$ . Izraz za  $\eta$  može se napisati i u drugačijem obliku:  $\eta = (1 - k^2)m_2/(m_1 + m_2)$ . Ovdje je s  $m_1$  označena masa kladiva, a s  $m_2$  masa nakovnja.

*Koeficijent restitucije*  $k$  pokazuje za koliko će se kladivo vratiti u prvobitni položaj nakon udarca. Kod neelastičnog sudara vrijedi  $k=0$  (teorijski): nema dakle nikakvog povrata kladiva. To je vrlo blisko uvjetima kovanja unutar temperaturnog intervala kovanja kada je metal gotovo potpuno plastičan. Uvrstimo li sada u izraz za  $\eta$  vrijednosti  $m_1=5$  kg,  $m_2=95$  kg,  $k=0$  slijedi rezultat  $\eta=0,95$ .

Ako se metal kuje na temperaturi koja je ispod temperaturnog intervala kovanja, zbog njegove smanjene plastičnosti udio elastičnih sila se povećava, a koeficijent restitucije postaje  $k > 0$ . Lako je zaključiti da će u tom slučaju biti manje iskorištenje energije udarca, a da će pri tom, zbog niže temperature i stoga slabije oblikovljivosti metala, opasnost od nastanka pukotina biti velika.






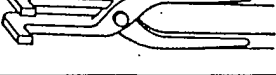


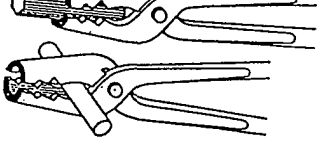

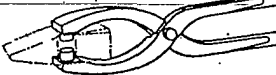
Izraz za  $\eta$  također pokazuje da se s udarcima izvedenim s preteškim kladivom po standardnom nakovnju postiže slabije iskorištenje energije. Uzmimo kao primjer kovanje dobro zagrijanog metala ( $k=0$ ) s kladivom od  $m_1=25$  kg po ukovnju mase od  $m_2=95$  kg: u tom slučaju  $\eta=0,79$ .



Slika 45. Tipovi nakovanja: a) češki, b) švicarski, c) holandski, d) talijanski

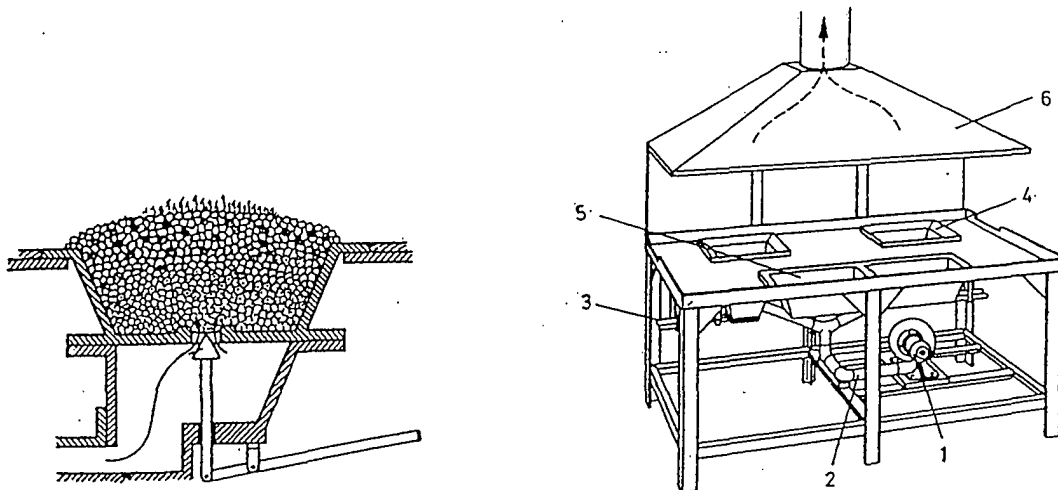
**Kovačka kliješta** su kovaču neophodan alat. Služe za prihvat sirovca ili otkovka, za držanje u toku kovanja te za obavljanje potrebnih zakreta i pomaka. Kovačka kliješta imaju duge ručice zbog smanjenja utjecaja topline na kovačevu ruku.

U toku rada na ručice se navlači prsten koji zamjenjuje zamorno stezanje rukom. Tipovi kliješta razlikuju se prema namjeni koju određuje oblik *zijeva*, kako je to prikazano na slici 46 (stranica 72).

Red. br.	Tip kliješta	Primjena
1		Prihvati plosnatog i kvadratičnog profila uzdužno i poprečno
2		Prihvati okruglog profila uzdužno
3		Prihvati kvadratičnog profila uzdužno
4		Osiguranje bočnog iskliznuća plosnatog i kvadratičnog profila
5		Isto kao i 4. za veće plosnate profile
6		Prihvati glomaznih otkovaka
7		Za glomazne otkovke posebnog oblika
8		Prihvati zakovica
9		Prihvati okruglog i šestokutnog profila uzdužno i poprečno
10		Navlačenje otkova na drvo većeg promjera
11		Prihvati otkovka s provrtima

Slika 46. Tipovi kovačkih kliješta

Kovačko ognjište se koristi za zagrijavanje malih sirovaca i za dogrijavanje otkovaka. Na slici 47 (stranica 73) prikazane su načelne sheme djelovanja i izvedbe kovačkog ognjišta. Oznake na slici 47 su: 1-ventilator, 2-dovod zraka za izgaranje, 3-ručke zasuna i otvora za odstranjivanje troske i pepela, 4-ognjište, 5- posuda za pepeo, 6-hvatač dimnih plinova.



Slika 47. Shema i izvedba kovačkog ognjišta

Na lijevoj strani slike 47 na shemi kovačkog ognjišta pokazano je da se kroz hrpu goriva propuhuje zrak. Izgaranjem goriva nastaje toplina koja zagrijava sirovac zatrpan u užareno gorivo. Kao gorivo se koristi *kovački ugalj*, *koks* ili *drveni ugalj*.

Pod nazivom *kovački ugalj* smatra se kameni ugalj usitnjen na granulaciju veličine "orah". Ovaj ugalj ima oko 80% ugljika, temperaturu paljena od oko 350°C te daje jak plamen i razvija dosta visoku temperaturu izgaranja. Dobro obuhvaća zagrijavani sirovac no temeljni mu je nedostatak sadržaj sumpora<sup>52</sup> i drugih nepoželjnih sastojaka. *Metalurški koks* nema sumpora, sadrži skoro 100% ugljika i stoga ima visoku temperaturu izgaranja. Temperatura paljenja mu je na 750°C. Gori žarenjem s malim svjetlim plamenom i daje izvrstan uvid u mjesto zagrijavanja sirovca. Koristi se za sve kovačke radove, a značajka mu je da u toku izgaranja jako iskri i prska što nalaže oprez ložača kod vadjanja sirovca iz ognjišta. *Drveni ugalj* je potpuno bez sumpora i gori vrlo brzo malim svjetlim plamenom. Za opće svrhe kovanja je neekonomičan zbog svoje visoke cijene, no za kovanje visokovrijednih čelika je nezamjenjiv.

Planiranje potrebne količine goriva za kovačko ognjište ilustrirati će se jednostavnim primjerom. Pretpostavimo da se u kovačkom ognjištu želi zagrijati masu čelika od 3 kg ( $m=3$  kg) na temperaturu od 1250°C sa okolišne temperature od 20°C ( $\Delta T=1230$  K). Na raspolaganju je kovački ugalj ( $H_d=29000$  kJ/kg). Potrebnu količinu ovog goriva dobivamo na temelju slijedećeg razmatranja:

- uz toplinski kapacitet čelika  $c=0,48$  kJ/kgK teorijski potrebna toplina je  $Q = m c \Delta T = 3 \cdot 0,48 \cdot 1230 = 1771,2$  kJ;

- zbog primitivnog ložišta i načina razvijanja topline iskorištava se svega 4 do 8% razvijene topline. Pretpostavimo da je u ovom slučaju iskorištenje razvijene topline 5%. U tom slučaju stvarno potrebna toplina za zagrijavanje mase čelika  $m$  pod zadanim uvjetima iznosi  $Q_{st} = Q/0,05 = 1771,2/0,05 = 35424$  J;

- da bi se u kovačkom ložištu ostvarila toplina  $Q_{st}$  izgaranjem kovačkog ugljena potrebna je količina od  $G = Q_{st}/H_d = 35424/29000 = 1,22$  kg ugljena.

<sup>52</sup> Općenito je za gorivo koje izgara u kovačkom ognjištu bitno da ima što manji sadržaj sumpora kako ne bi došlo do stvarnja sulfida na granicama kristala čelika. Sulfid ima relativno nisko talište i kod čelika zagrijanog na temperaturu kovanja (i nižu) izaziva *crveni lom*. Čelični sirovac se stoga uvijek ulaže u ognjište tek nakon izvjesnog vremena izgaranja i žarenja goriva, nakon što je izgorio sumpor. Važno je da je gorivo dovoljne težine kako ga struja zraka ne bi ispuhala, a da tom nakon izgaranja ima što manje troske i pepela.

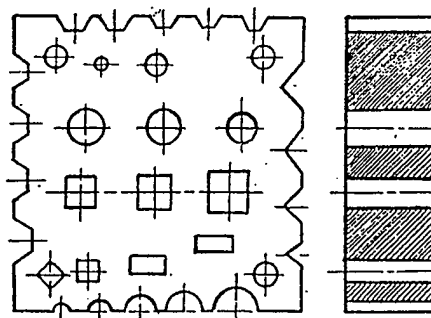
Sirovac se ulaže u razgoreno ognjište odozgo. Odmah ga se zatrpava užarenim gorivom tako da bude pokriven sa svih strana. Kod takovog zagrijavanja valja računati s intenzivnijom oksidacijom površine. Gubitak zbog oksidacije je od 5 do 10% volumena materijala. Oksid koje se javlja na temperaturi kovanja lako otpada pod udarcima no stvara se odmah novi oksidni sloj. Razugljičavanje površine zagrijavanog sirovca se sprečava režimom zagrijavanja u kovačkom ognjištu: čelik se progrijava na 700°C, a nakon izjednačenja temperature po cijelom presjeku naglo se zagrijava na temperaturu kovanja.

Odredjivanje postignute temperature zagrijavanja čeličnog sirovca kod obrtničkog načina slobodnog kovanja prepušteno je kovaču i njegovom iskustvu pa je iluzorno očekivati uske tolerancije ostvarene temperature. Kao orijentacija mu služi boja užarenog čelika. U tablici 14 navedene su boje žarenja čelika i temperaturno područje kojemu pripadaju te boje.

Tablica 14

Boja užarenog čelika	Temperatura čelika (°C)
bijela	1250 - 1350
svjetlo žuta	1150 - 1250
tamno žuta	1050 - 1150
žuto-crvena	880 - 1050
svjetlo crvena	830 - 880
svjetla trešnja	800 - 830
trešnja	780 - 800
tamna trešnja	750 - 780
tamno crvena	650 - 750
smedje-crvena	580 - 650

Pored nakovnja valja spomenuti i važan dio kovačkog pribora: masivnu podložnu ploču za probijanja rupa okruglog, kvadratičnog i pravokutnog oblika i za druga oblikovanja. Ova se ploča naziva ravnjača, a prikazana je na slici 48.



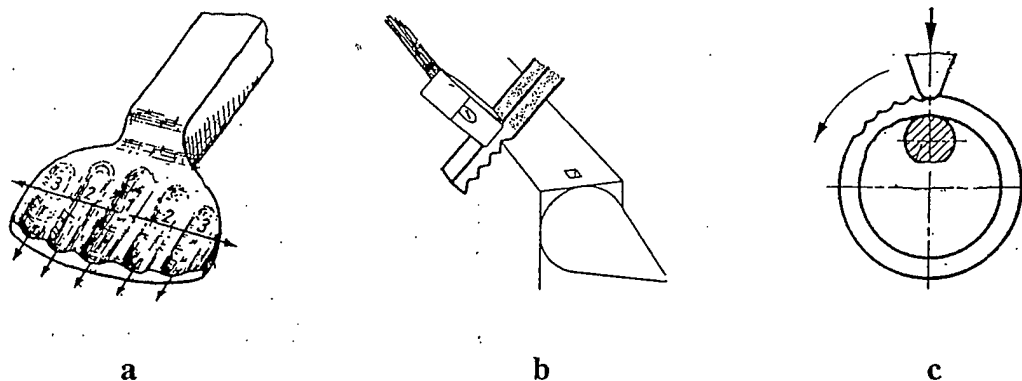
Slika 48. Podložna ploča za probijanje (ravnjača)

Postupci slobodnog kovanja malih masa pomoću čekića na nakovnju svode se u suštini na jednake postupke koji su već opisani u poglavlju 4. Kako se u ovom slučaju kao sirovac koristi čelični valjani poluproizvod plosnatog, kvadratičnog ili okruglog presjeka, dakle čelik koji je već bio prethodno izložen snažnoj plastičnoj deformaciji, sabijanje nema onu ulogu koju je imalo kod sirovca od lijevanog čelika. Postupci se sada svode samo na oblikovanje, a ne na poboljšanje strukture čelika. Sabijanje se čak i izbjegava (ako je to ikako moguće) zbog potrebe utroška velike energije deformacije. Sve ostale postupke oblikovanja slobodnim kovanjem moguće je ostvariti s manjim utroškom energije u okviru fizičkih mogućnosti kovača.

Za kovačko oblikovanje slobodnim kovanjem malih masa značajna je ritmika zvonkih i muklih udaraca čekića po nakovnju. Ritam udaraca slušan iz daleka često je bio povod mnogim glazbenim nadahnućima i asocijacijama te romantičnim interpretacijama u književnosti. Međutim, razlozi ritmičkih udaraca su vrlo prozaični: zbog buke u toku kovanja verbalno je sporazumijevanje kovača i njegovog pomoćnika nemoguće, a specifičnim taktovima i intenzitetima udaraca čekića po nakovnju kovač i pomoćnik se međusobno sporazumijevaju. Tako se određuje početak i završetak rada s kladivom, izbor ušice ili zaobljenog dijela kladiva, mjesto na kojemu treba učestalije udarati, snagu udarca i druge potrebne detalje da bi se obavilo oblikovanje.

Širenje, stanjivanje, produživanje i šiljenje sirovca u su najčešći postupci oblikovanja slobodno kovanog proizvoda, a u hrvatskoj stručnoj terminologiji se nazivaju **iskivanjem**. U nekim našim krajevima zadržao se je za te postupke još uvijek stari naziv **iščinjanje**.

Primjeri *širenja* prikazani su na slici 49. Skica a pokazuje kako se ušicom kladiva po naznačenom redoslijedu obavlja širenje (i stanjivanje) sirovca kvadratičnog presjeka, a strelice označavaju pravac tečenja materijala. Skica b pokazuje kako se rub nakovnja može iskoristiti za pripremu materijala za širenje, a skica c pokazuje kako se to obavlja kod širenja prstena na rogu nakovnja.

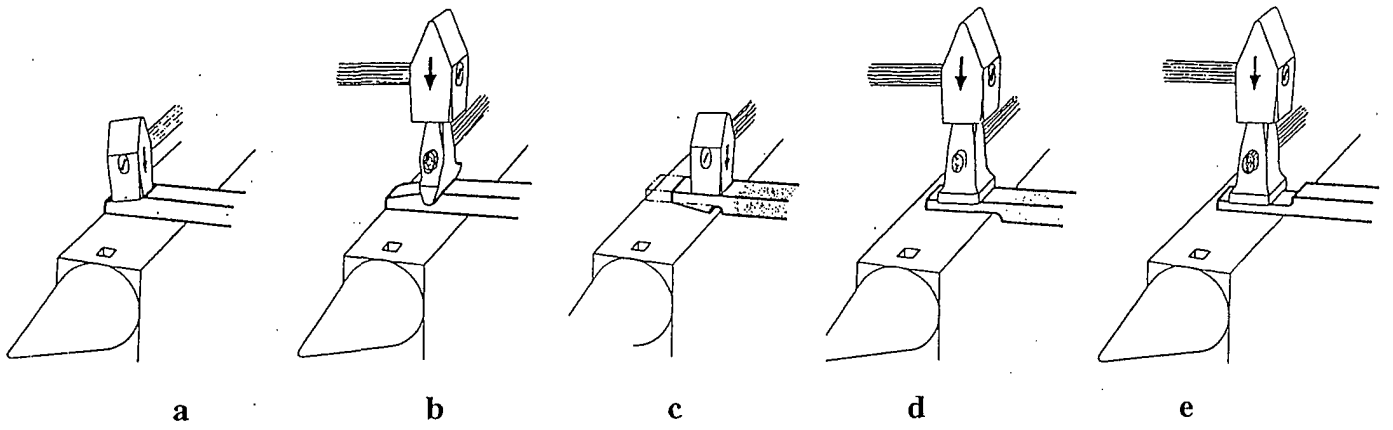


Slika 49. Postupci širenja

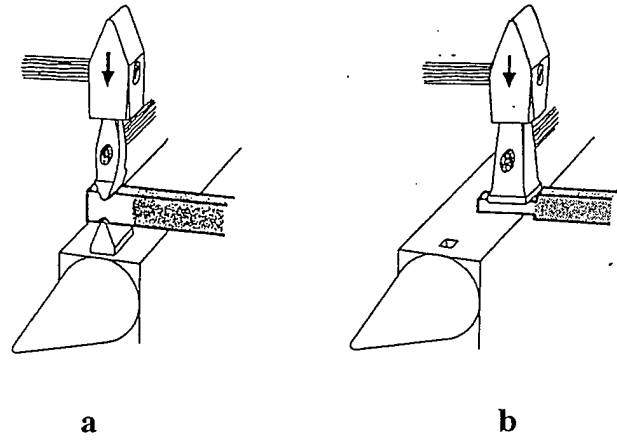
Elementi postupka *jedностранog stanjivanja* sirovca od plosnatog profila prikazani su na slici 50. Redoslijed operacija je sljedeći: a - skošenje ruba, b - užljebljivanje s pomoćnim čekićem sjekačem, c - iskivanje tako određenog i obilježenog dijela materijala, d - zagladjivanje donje površine, e - zagladjivanje gornje površine.

Na slici 51 prikazan je postupak *dvостаног stanjivanja* plosnatog profila sirovca. Skica a pokazuje kako se dvостано užljebljenje ostvaruje s pomoćnim sjekačem i usadnikom jednakog profila. Iskivanje se nastavlja kao u skici c slike 50. Skica b (slika 51) pokazuje završetak kovanja zagladjivanjem jednako kao i u prethodnom slučaju.

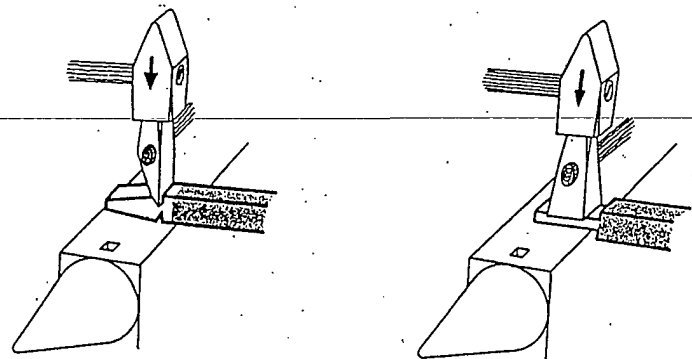
*Dvostrano stanjivanje s malim polumjerom* zaobljenja prikazano je na slici 52. Nakon prethodnog skošenja ruba (analogno operaciji a na slici 50) pomoću posebnog sjekača određen je dio materijala koji će se iskivati, a mali polumjer se postiže korištenjem pomoćnog čekića za zagladjivanje s oštrim bridovima.



Slika 50. Postupak jednostranog stanjivanja

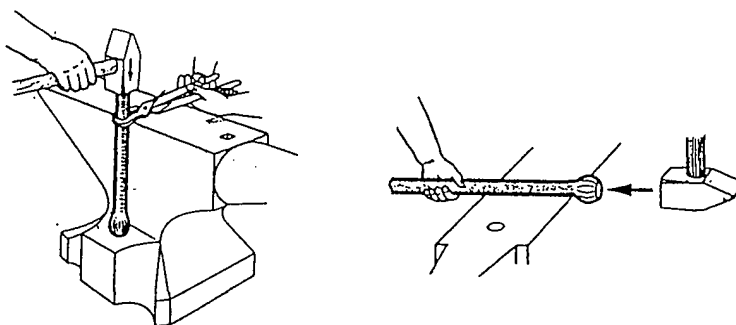


Slika 51. Postupak dvostranog stanjivanja



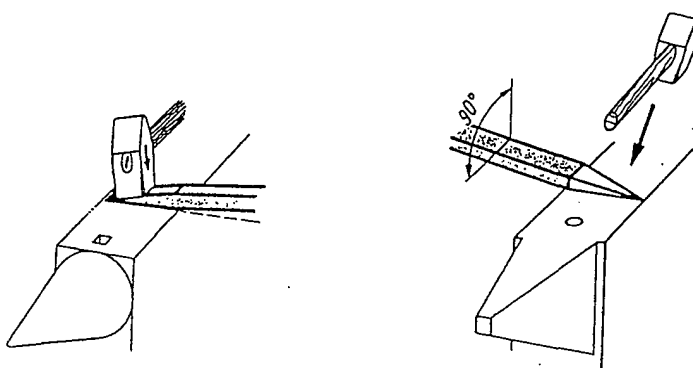
Slika 52. Postupak dvostrukog stanjivanja s malim polumjerom zaobljenja

Lokalno nagomilavanje materijala *sabijanjem* okruglog profila prikazano je na slici 53. Na temperaturu kovanja je zagrijan samo dio šipke koji će se sabijati. Ova operacija se izvodi samo pomoću kladiva i izdanka nakovnja.<sup>53</sup>



Slika 53. Lokalno sabijanje jednog kraja šipke

*Šiljenje* je jednostavna kovačka operacija kojom se izrađuje konični profil s jedne ili dvije strane, odnosno, sa sve četiri strane ako se izvrši zakretanje za 90°. Šiljenje je prikazano na slici 54.

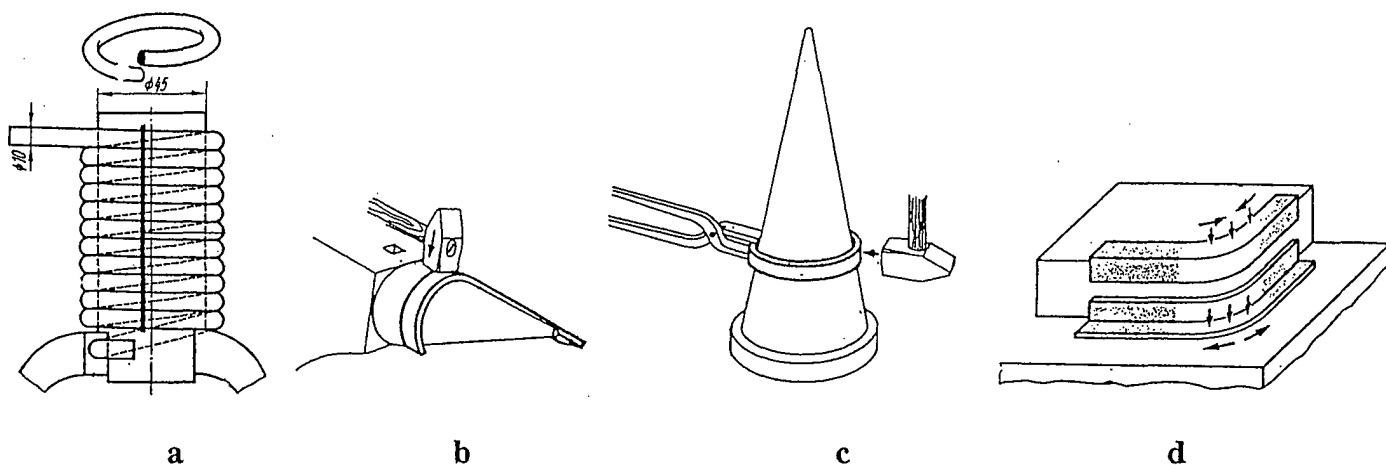


Slika 54. Šiljenje slobodnim kovanjem

Važna operacija slobodnog kovanja je *savijanje*. Na slici 55 prikazana su četiri slučaja savijanja. Skica a prikazuje kovački način izrade oka lanca unutarnjeg promjera 45 mm : užarena šipka kružnog presjeka ( promjera 10 mm) namata se oko trna koji je učvršćen u kovačkom škripcu. Nakon hladjenja i skidanja sa škripca namotaj se uzdužno reže. Tako dobiveni prsteni će se poslije kovački zavariti. Na skici b prikazano je kružno savijanje plosnatog profila na rogu nakovnja. S obzirom na koničnost roga moguće je savijanje s različitim polumjerima. Prsten dobiven savijanjem i kovački zavaren ravna se oko usadnika u obliku stošca (skica c), a moguće je to izvesti i na rogu nakovnja. Savijanje pravokutnog profila oko šablonske ploče s određenim polumjerom zaobljenja prikazano je skicom d.

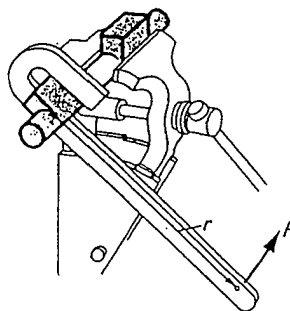
<sup>53</sup> Stari hrvatski naziv ove operacije je *strkanje*. Međutim, u razgovoru se kovačima srednje i mlađe generacije, kada se spomenu ti stari stručni izrazi, nailazimo na potpuno nerazumijevanje. Domaći izrazi su gotovo potpuno zaboravljeni!

Pravokutni profil se lokalno zagrijava, a zagrijano mjesto se onda lokalno iskiva u zoni savijanja. Iskivanjem je moguće povećati ili smanjiti debljinu stijenke, ovisno o položaju pravokutnog profila u odnosu na šablonski ploču, kako to slika 55 pokazuje.



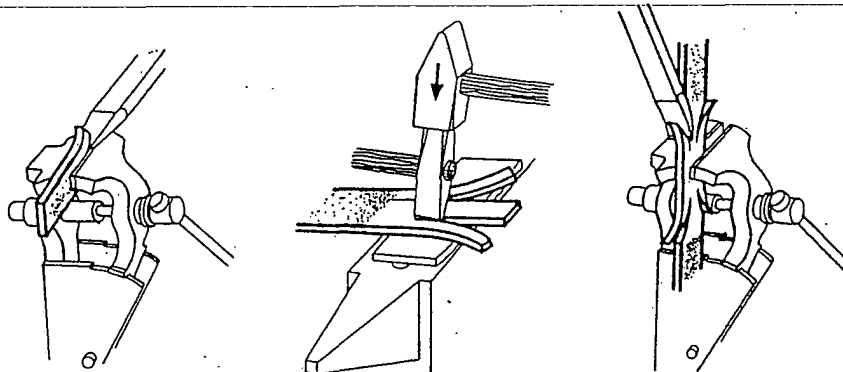
Slika 55. Kovačko savijanje

Kovačko uvijanje prikazano je na slici 56. Pomoću škripca i uz lokalno zagrijavanje mjesta koje se želi zakrenuti ovo se vrši momentom zakreta ostvarenog silom ruke  $F$  na kraju poluge kraka  $r$ .



Slika 56. Kovačko uvijanje

Izrada rascjepa je česta operacija u postupku izrade predmeta slobodnim kovanjem. Prema prikazu na slici 57 moguća su tri slučaja izrade rascjepa pomoću škripca, dlijeta i pomoćnog čekića sjekača.



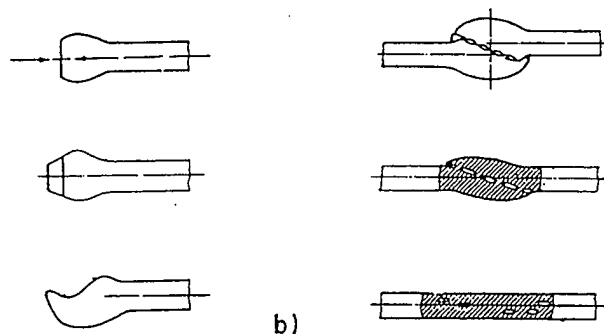
Slika 57. Izrada rascjepa



Kovačko zavarivanje u suvremenoj proizvodnji nema više onaj značaj koji je imalo još početkom ovog stoljeća. Danas je to način spajanja koji se koristi samo još u umjetničkom obrtu i to za niskougljične čelike. Za dobru kovačku zavarljivost čelika bitan je što manji sadržaj silicija i sumpora, a povećan sadržaj mangana je dobrodošao. Temeljna pretpostavka za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja je dobra priprema površina koje će se zavariti. Ove površine moraju osigurati pouzdano međusobno povezivanje unatoč željeznom oksidu nastalom u toku zagrijavanja na temperaturu kovanja.

Užareni krajevi čeličnog profila se pripremaju prema slici 58. Zagrijani su na temperaturu od cca 1300°C (bijeli žar, vidi tablicu 14) i toj su temperaturi izloženi u kovačkom ognjištu sve dok čelik ne postane tijestasto plastičan. Površina *sljubnica* posipa se otapateljem oksida<sup>54</sup> (borax ili posebni prašak za zavarivanje, a nekad može poslužiti i obični pijesak). Prvim blažim udarcima čekića dio će stvorene troske biti odstranjen s površine sljubnica, no manji dio će se ipak zadržati u zavarenom spoju. Daljnje će se oblikovanje zavara izvesti brzim i snažnim udarcima čekića uz sukcesivno zakretanje spoja za 90°. Na temelju slike 58 b) može se zaključiti da je tako izbjegnuta koncentracija troske u zavaru.

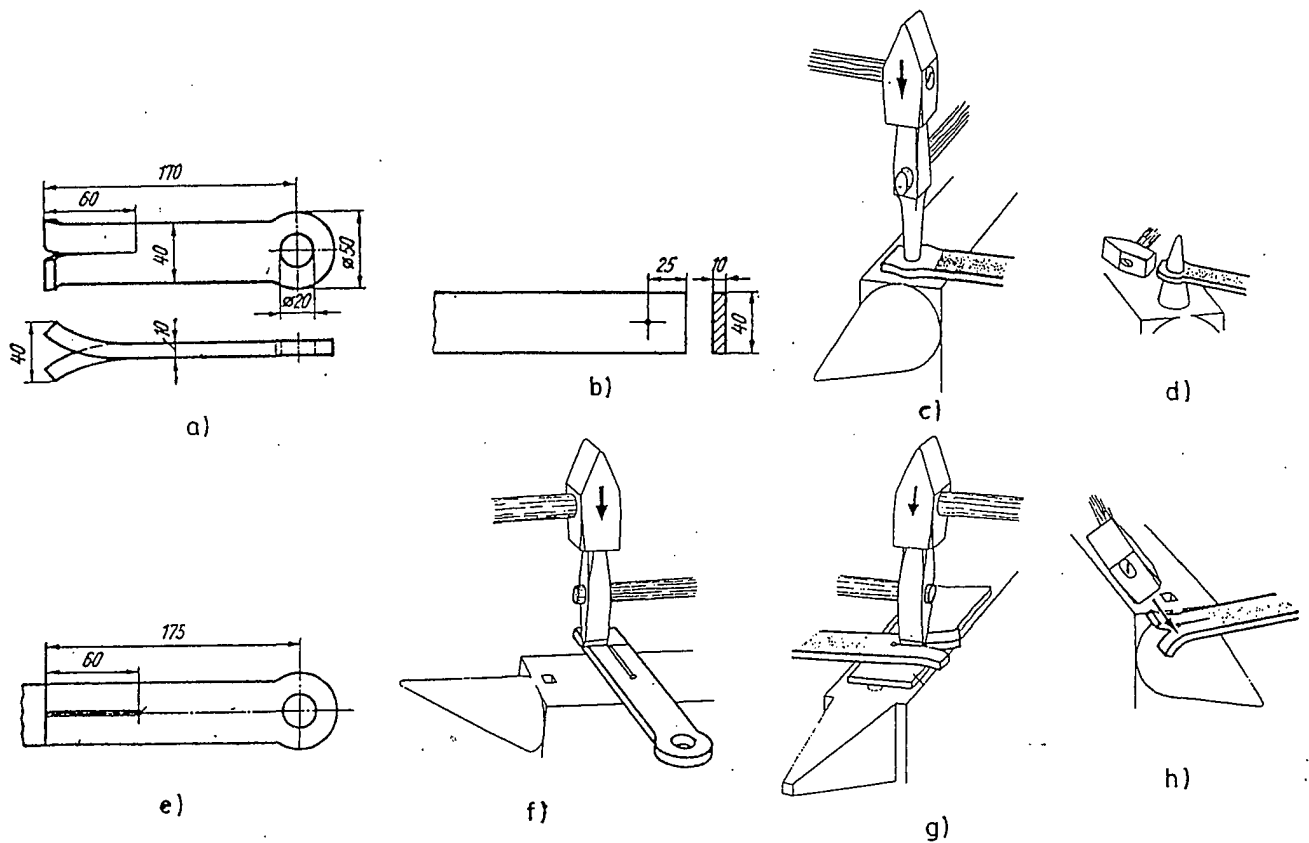
Važno je da se kovačko zavarivanje obavi u "jednom grijanju"; - dakle bez dogrijavanja, a radi izbjegavanja stvaranja grubozrnate strukture i zbog toga slabih mehaničkih svojstava zavara. Ipak, unatoč optimalno izvedenom kovačkom zavarivanju valja računati s najmanje 20% slabijom čvrstoćom spoja u odnosu na čvrstoću osnovnog materijala.



Slika 58. Kovačko zavarivanje

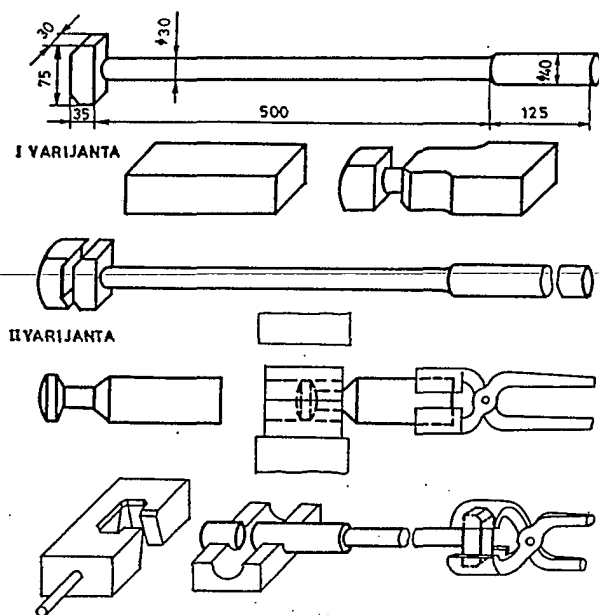
Primjeri izrade različitih unikatnih proizvoda obrtničkim načinom slobodnog kovanja prikazani su na slikama što slijede. Tako je na slici 59 prikazan postupak izrade sidrene pločice. Skica gotovog proizvoda je prikazana s a), a sirovac od kojega je započeto kovanje s b). Sve primijenjene operacije /c) do h)/ su u skladu s do sada opisanim postupcima.

<sup>54</sup> Otapatelj oksida ili *talilo* ima zadaću da otapa okside i da s njima tvori lako taljivu trosku. U toku izlaganja užarenih površina čelika zraku, a prethodno posutih talilom, ove su zaštićene od daljnje oksidacije. Primjerice, borax, koji dolazi u trgovinu kao bezbojni kristal, na površinu se nanosi u obliku praška. Ako nije dobijen prethodnim prženjem, u početku će se u dodiru s užarenom površinom čelika ispariti kristalična voda, a nakon toga slijedi reakcija po jednadžbi  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 = 2\text{B}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O}$ . Okside otapa i veže na površini metala  $2\text{B}_2\text{O}_3$ , a  $\text{Na}_2\text{O}$  djeluje kao fizičko otapalo. Kod lemljenja je izbor vrste talila vrlo važan, dok je u postupku kovačkog zavarivanja to manje važno jer se ne očekuju visoke čvrstoće ovako zavarenog spoja pa je stoga moguća primjena i dugih talila.

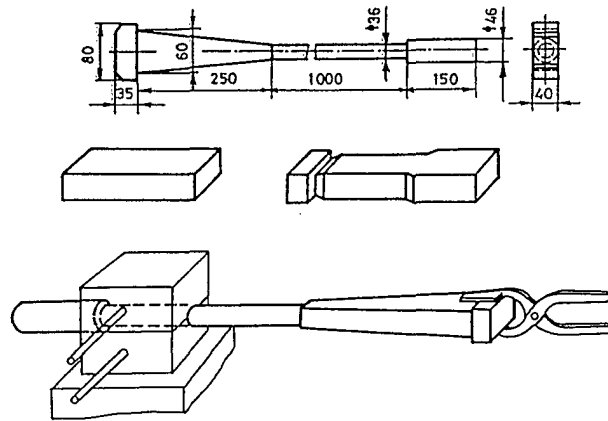


Slika 59. Izrada sidrene pločice

Na montažnim poslovima se često susrećemo s potrebom da izradimo manji broj sidrenih i temeljnih vijaka većih dimenzija ili nestandardnih oblika za temeljenje strojeva. Takova dva slučaja su prikazana na slikama 60 i 61. Pomoćnim ukovnjima koji su prikazani na ovim slikama postižu se potrebni jednaki promjeri na svim otkovanim vijcima.

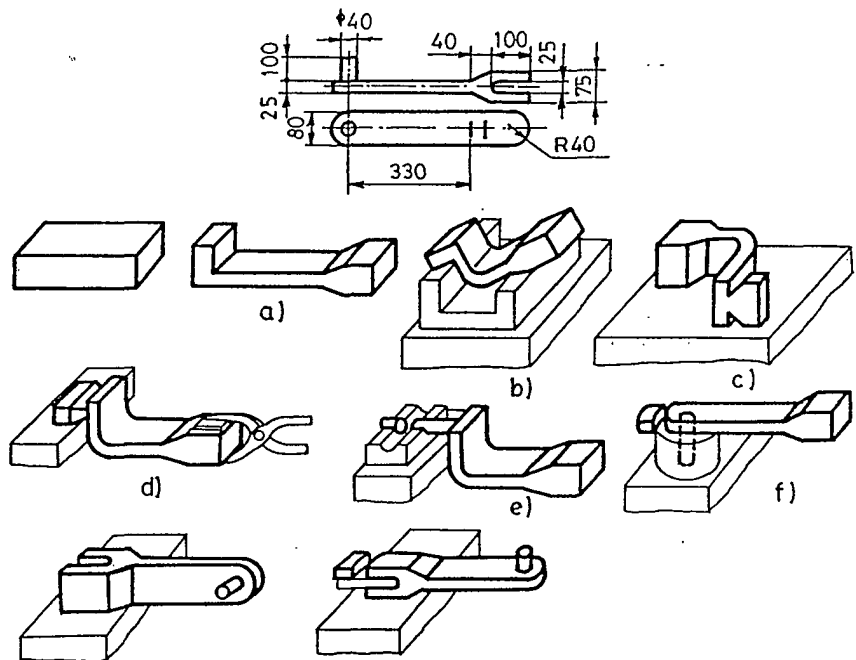


Slika 60. Kovanje sidrenog vijka

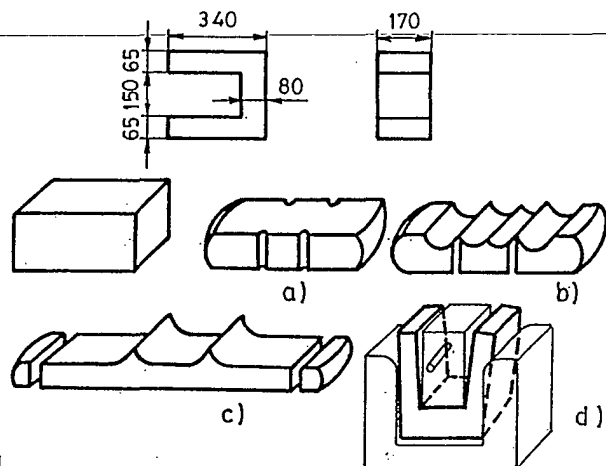


Slika 61. Kovanje temeljnog vijka

Postupak kovanja poluge prikazan je na slici 62, a kovanja stremena na slici 63. Za izradu ovih proizvoda, kojih je konstrukcijska skica prikazana na navedenim slikama, potrebno je malo vrlo jednostavnog kovačkog pribora prikazanog u skicama odgovarajućih operacija.



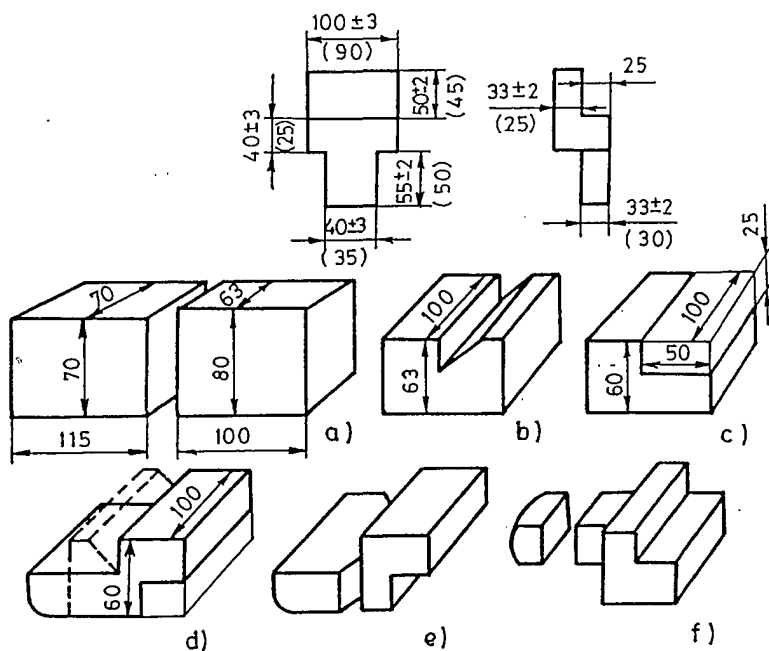
Slika 62. Kovanje poluge



Slika 63. Kovanje stremena

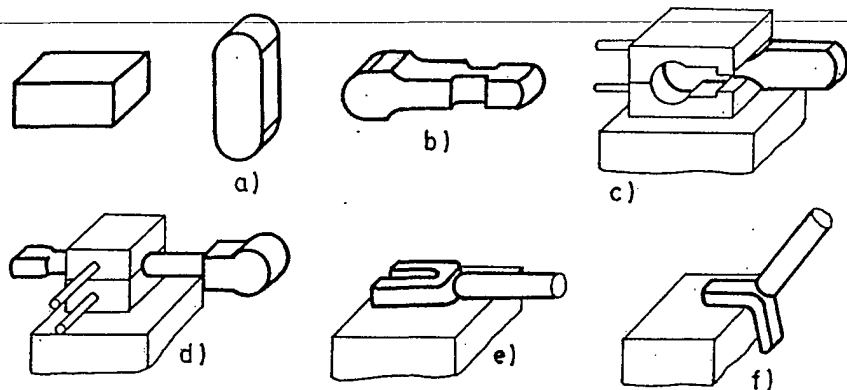
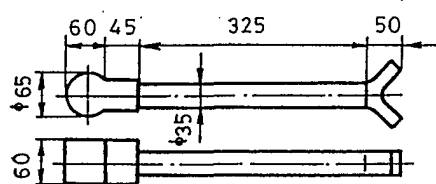
Za kovanje vodilice, što je prikazano na slici 64, gotovo da i nije potreban nikakav posebni kovački pribor. Kao sirovac je uzet dio kvadratične gredice 70x70 mm dužine 115 mm koji je u fazi kovanja a) prekovan na presjek 80x63 mm dužine 100 mm. Na skicama gotovog proizvoda upisane su kovačke mjere i tolerancije ovih mjera, a u zagradama su naznačene mjere nakon završne obrade.

Ovdje valja obratiti pažnju na razlog radi čega su u fazi kovanja a) ostvarene baš ove dimenzije. Ovo je dobar primjer kako se razboritim izborom prvih faza kovanja može znatno uštedjeti vrijeme kovanja, a s tim onda i potreba eventualnog dogrijavanja.

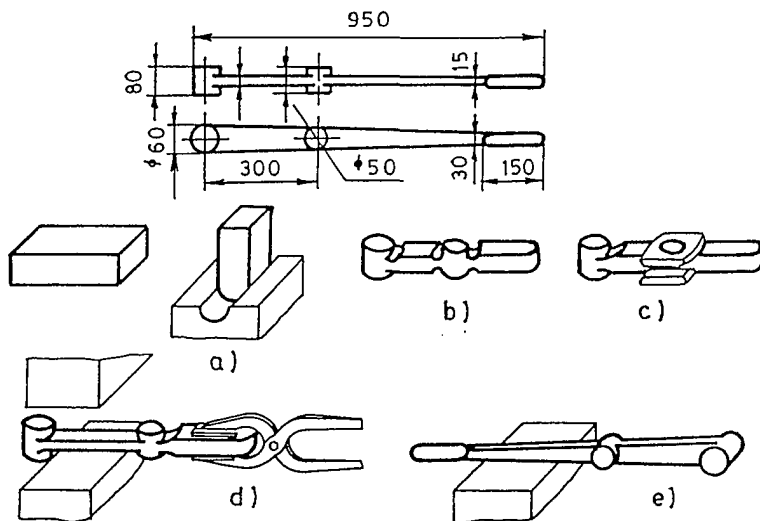


Slika 64. Kovanje vodilice

Kovanje vješalice s jednim rascijepljenim krajem prikazano je na slici 65, a kovanje ručke za okretanje, koja je pozamašne dužine, na slici 66.

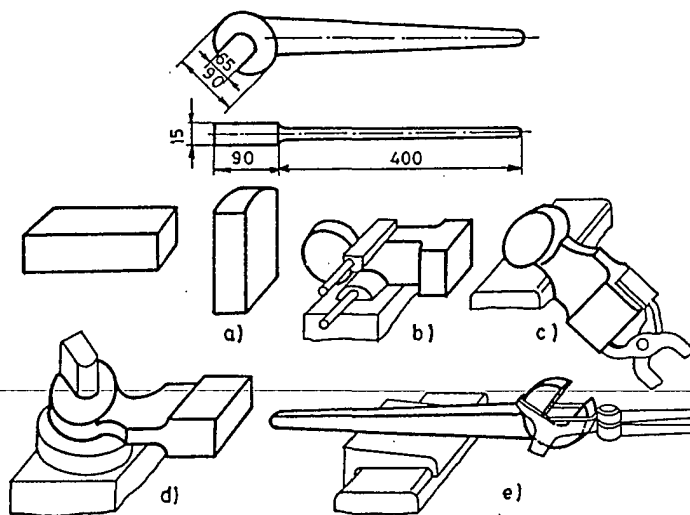


Slika 65. Kovanje vješalice



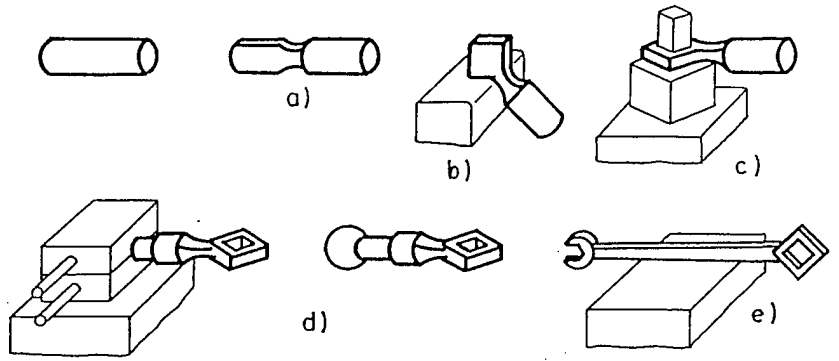
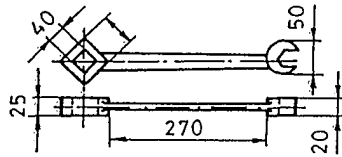
Slika 66. Kovanje ručke

Montažne ključeve velikih dimenzija redovito ne možemo kupiti niti u specijaliziranim trgovinama. Često smo prisiljeni sami izradjivati takove neophodne proizvode u vrlo skromnim tehničkim i proizvodnim uvjetima. Na slici 67 prikazan je postupak kovanja jednog montažnog ključa, a na slici 68 postupak kovanja kombiniranog ključa.

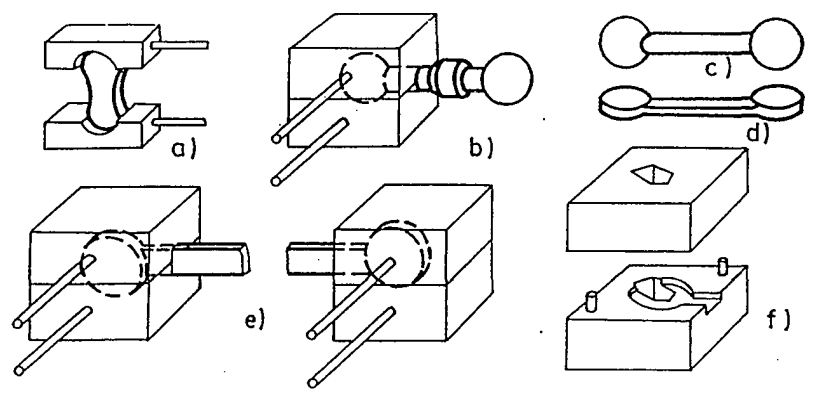
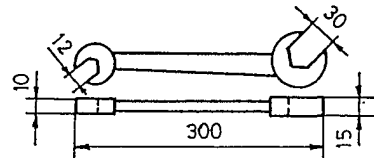


Slika 67. Kovanje montažnog ključa

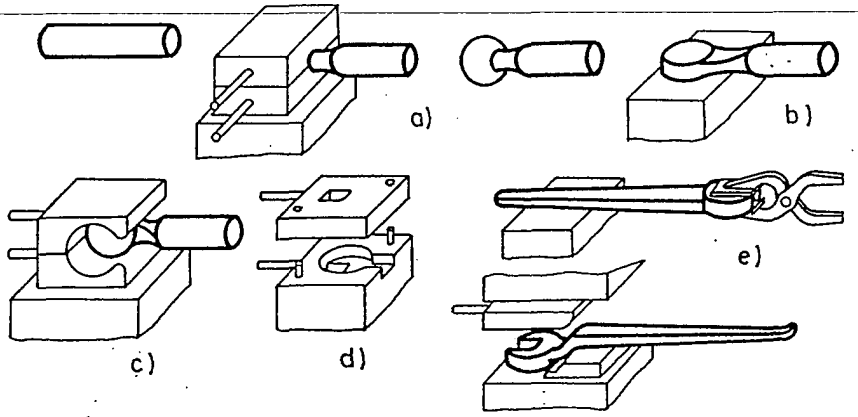
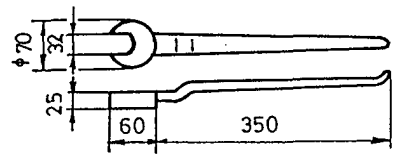
Kovanje kombiniranog ključa slobodnim kovanjem, ali sada u nešto složenijoj i preciznijoj izvedbi, prikazano je na slici 69. Taj prikaz, kao i prikaz kovanja montažnog ključa jednakih značajki na slici 70, pokazuje da je za to neophodno korištenje čitavog niza jednostavnih pomoćnih ukovanja.



Slika 68. Kovanje kombiniranog ključa

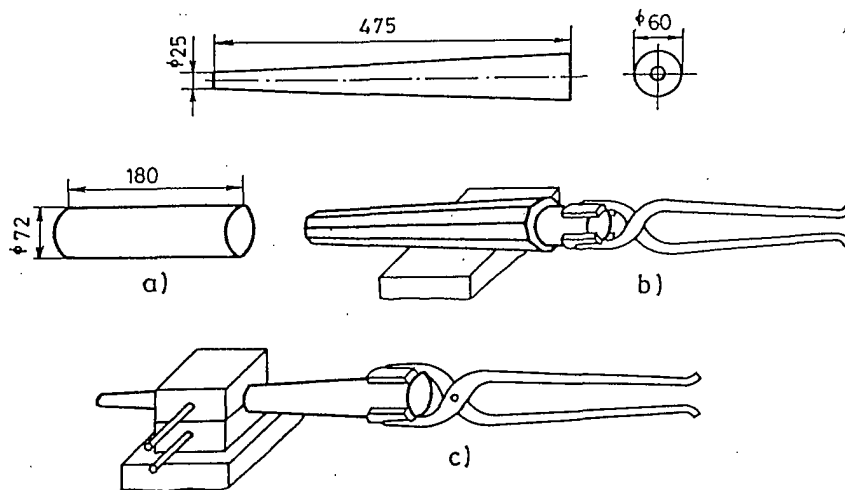


Slika 69. Kovanje kombiniranog ključa



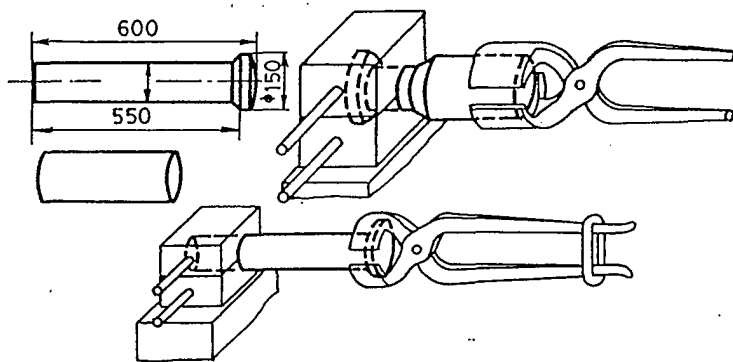
Slika 70. Kovanje montažnog ključa

Izrada koničnog šiljka većih dužina prikazana je na slici 71. Završno kovačko oblikovanje konusa kružnog presjeka postiže se pomoću posebnog ukovnja s jednakim unutrašnjim konicitetom.

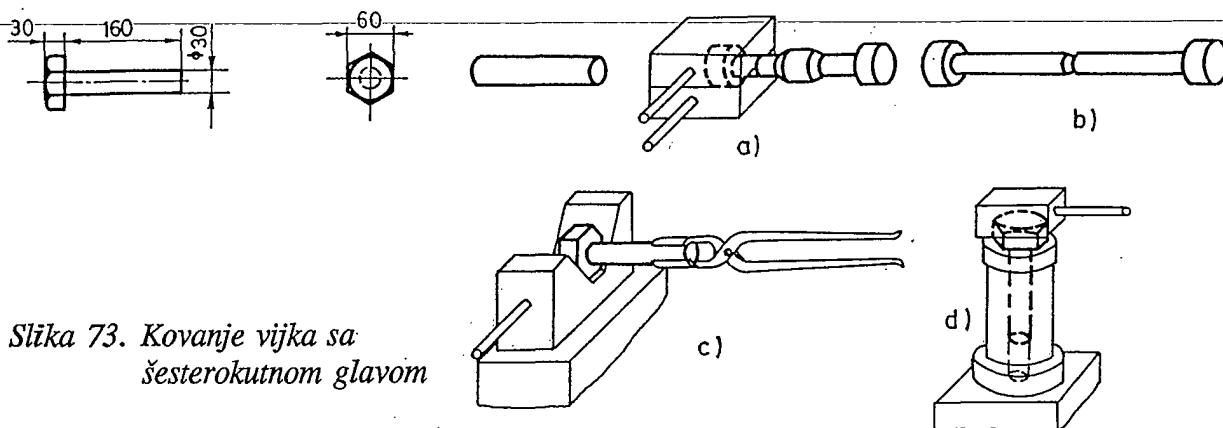


Slika 71. Kovanje šiljka

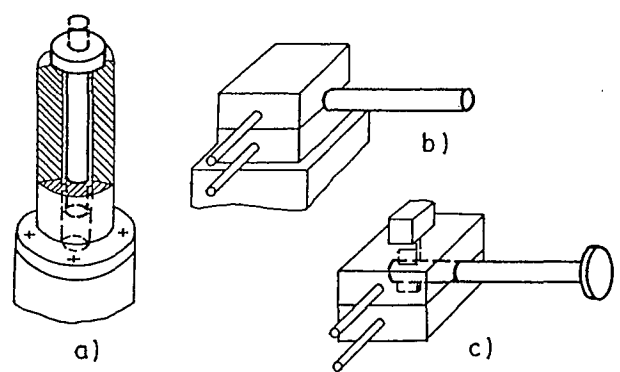
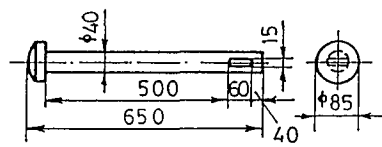
Na slijedeće tri slike pokazano je kovanje produženih oblika različitih proizvoda za koje su uvijek korišteni sirovci od valjanih cilindričnih profila. Kovanje osovine s glavom ukupne dužine 600 mm prikazano je na slici 72, kovanje tijela vijka sa šesterokutnom glavom na slici 73, a kovanje osovine dužine 650 mm s pravokutnim otvorom 60x15 mm na jednom kraju na slici 74. U svim ovim slučajevima značajno je nužno korištenje pomoćnih ukovnja.



Slika 72. Kovanje osovine s glavom

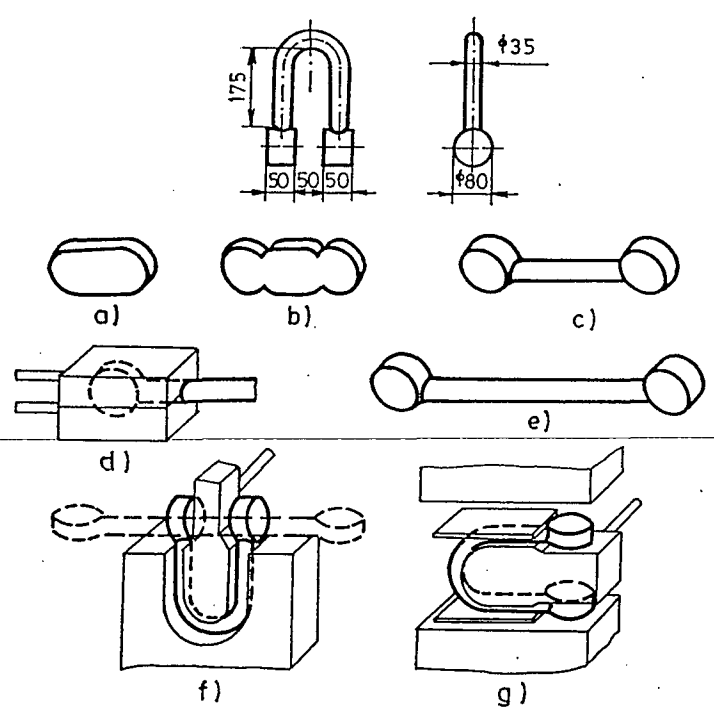


Slika 73. Kovanje vijka sa šesterokutnom glavom



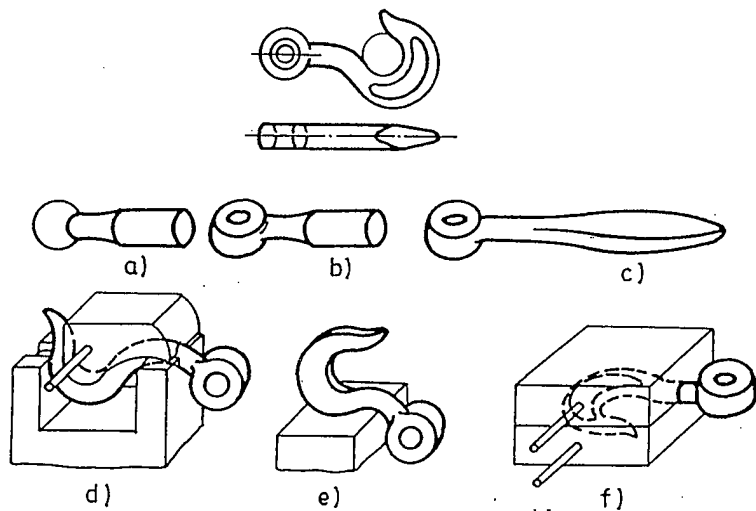
Slika 74. Kovanje osovine s glavom i otvorom

Tipični proizvodi maloserijske proizvodnje su stremeni, male kuke i sidra. Na slikama 75, 76 i 77 prikazani su postupci njihove izrade slobodnim kovanjem pomoću odgovarajućih pomoćnih alata.

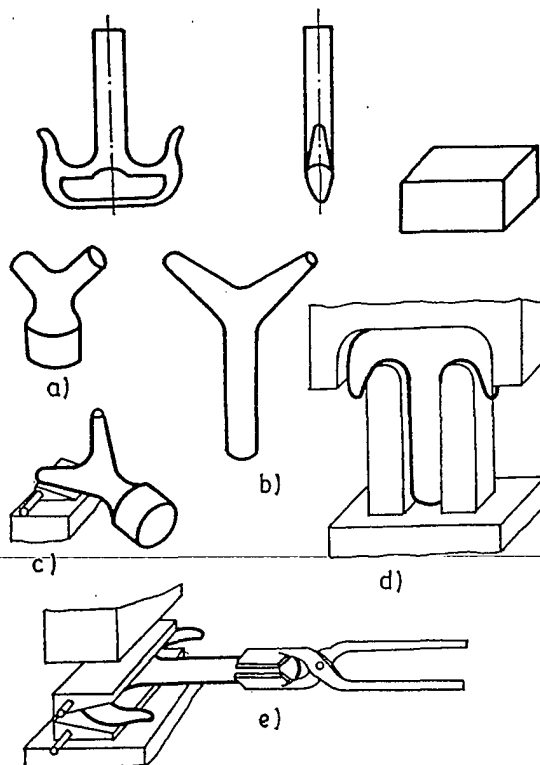


Slika 75. Kovanje stremena



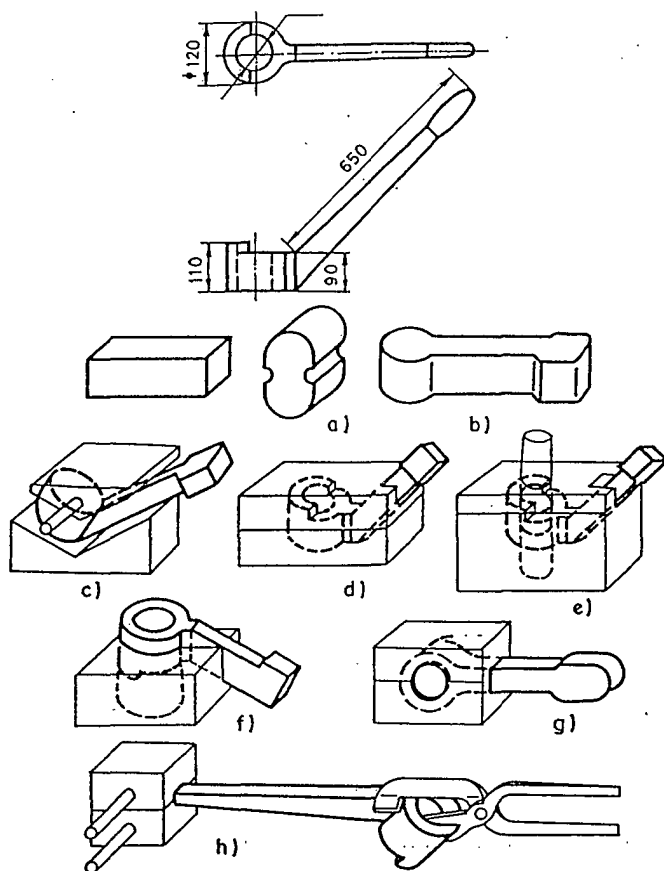


Slika 76. Kovanje male kuke

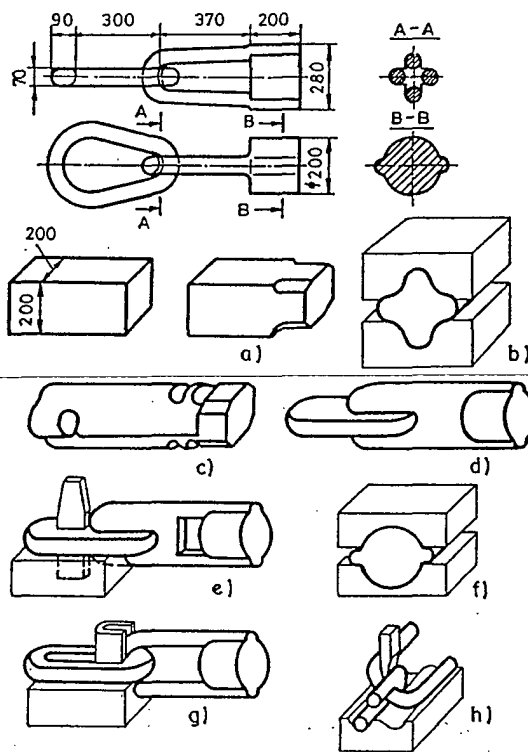


Slika 77. Kovanje sidra

Prikaz slobodnog kovanja velike ručke nešto kompliciranijeg oblika dan je na slici 78, a kovanje vješalice s prstenom značajnih dimenzija od punog sirovca i bez kovačkog zavarivanja prikazano je na slici 79.



Slika 78. Kovanje ručke



Slika 79. Kovanje vješalice

Raznolikost prikazanih primjera izrade vrlo različitih proizvoda relativno malih masa slobodnim kovanjem zorno pokazuje mogućnosti ovoga načina proizvodnje. U praksi će nam ovakovo slobodno kovanje često izvanredno poslužiti za izradu manjeg broja neophodnih strojnih dijelova.

### LITERATURA

Hašek, V. i grupa autora, *Kovani*, SNTL, Praha, 1965

Tarnovskij, I.Ja., Trubin, V.P., Zlatkin, M.G., *Svobodnaja kovka na pressah*, Mašinstroenie, Moskva, 1967

Metals Handbook, *Forging*, Vol.5, Part A, 8<sup>th</sup> Ed., ASM, Ohio 1972

Kordjukov, V.P., Korotkih, E.L., *Svobodnaja kovka na molotah*, Mašinstroenie, Moskva, 1974

Tempel, Fr.-K., i grupa autora, *Formgebung der Metalle*, VEB Deutsch. Verl. für Grundindustrie, Leipzig, 1980

Bazjanac, D., Tehnička mehanika, III. dio, *Dinamika*, Liber, Zagreb, 1980

Husnjak, M., *Mjerenje zaostalih naprezanja elektrootpornim i fotoelastičnim postupkom*, mag. rad., FSB, Zagreb, 1981

Hundeshagen, H., *Kleinschmiede*, VEB Verl. Technik, Berlin, 1982

Flimm, J., *Spanlose Formgebung*, C. Hauser Verl., München-Wien, 1984

Semenov, E.I., red., *Kovka i šampovka*, Spravočnik, Tom 1, Mašinstroenie, Moskva, 1985

Novosel, M., Povržanović, A., *Utvrdjivanje uzroka krivljenja stapajica*, obranjeni elaborat, FSB, Zagreb, 1987

Tehnička enciklopedija, knjiga 11, JLZ, Zagreb, 1988

Atrošenko, A.P., Fedorov, V.I., *Metalo-sbjerjegajuščije tehnologii kuznječno-šampovočnogo proizvodstva*, Mašinstroenie, Lenjingrad, 1990

Standardi DIN, GOST i JUS