

Međutim, ovde će se, iz više razloga, usvojiti sledeća podela, kao prikladnija s obzirom na način tretiranja problematike:

- a) simulativne metode;
- b) ocena obradivosti na osnovu mehaničkih svojstava;
- c) ocena obradivosti na osnovu ostalih — indirektnih pokazatelja.

Na ovaj način su u posebnu grupu izdvojena ispitivanja karakteristika koje na obradivost utiču indirektno, uslovljavajući odgovarajuće mehaničke, odnosno tehnološke osobine. Osim toga, priroda njihovog ispitivanja, interpretacija rezultata, korišćena oprema i dr. bitno se razlikuju u odnosu na ostale postupke. Napred je objašnjeno da se one mogu uslovno smatrati sekundarnim za korisnika materijala, pa je njihovo zasebno grupisanje i sa tog stanovišta opravdano.

III PRIKAZ RAZLIČITIH METODA ISPITIVANJA

1. OPŠTE NAPOMENE

Rasprostranjenost primene pojedinih postupaka, kao i njihov opšti značaj veoma su različiti. Zato će prikaz onih koji se samo izuzetno sreću, ili su ranije bili u primeni, biti dat skraćeno, tj. samo informativno, radi upotpunjenja izlaganja i iscrpnijeg uvida u dosadašnje pokušaje i ostvarenja na ovom području. Nastojaće se, naime, da se na početku pojedinih poglavlja najpre prikažu oni postupci koji nalaze širu primenu u industriji, a tek onda oni koji se koriste, prvenstveno, u istraživačke svrhe, ili se, uopšte, samo izuzetno primenjuju.

S obzirom na veliku raznolikost u načinu izvođenja, odnosno rešenja pojedinih konstruktivnih i drugih detalja uređaja namenjenih ispitivanjima istog tipa, neće biti moguće da se izlože sve ovakve specifičnosti, već će se kroz šematske prikaze i neophodna objašnjenja pokazati, pre svega, suština postupaka.

1.1. Značaj trenja

Na mogućnost da se izvrši uspešno duboko izvlačenje utiču, kako je već izloženo, različiti faktori. Da bi se u njihovom mnoštvu moglo govoriti, u užem smislu, o obradivosti materijala, korisno je u toku opita, po mogućstvu, fiksirati, tj. zadržati konstatnim, one uticajne faktore koji se ne odnose na svojstva materijala. Kako su geometrijski odnosi, kao i temperaturni i brzinski uslovi, normalno, u laboratorijsko-eksperimentalnim okolnostima ustaljeni, odnosno konvencionalno definisani, to rezultati opita postaju zavisni isključivo od osobina materijala i uslova trenja.

Nepovoljna je činjenica da trenje pri ispitivanjima može biti veoma varijabilan i zato posebno problematičan faktor (pri ovome treba imati u vidu da je ta varijabilnost velika, kako u relativnom, tako i u apsolutnom smislu). To se može ilustrovati sledećim primerom.

Ispitivan je [71] po metodi Engelhardt (v. 2.4.2.) tehnički čist aluminijum (Al 99,5) u različitim stanjima s obzirom na prethodnu deformaciju i to: »mek«, »1/8 tvrdo valjan«, »1/4 tvrdo valjan« i »1/2 tvrdo valjan«. Pri ispitivanju su primenjene četiri vrste maziva (a, b, c, d). Rezultati ispitivanja zatezanjem i tvrdoće dati su u tabeli 2.

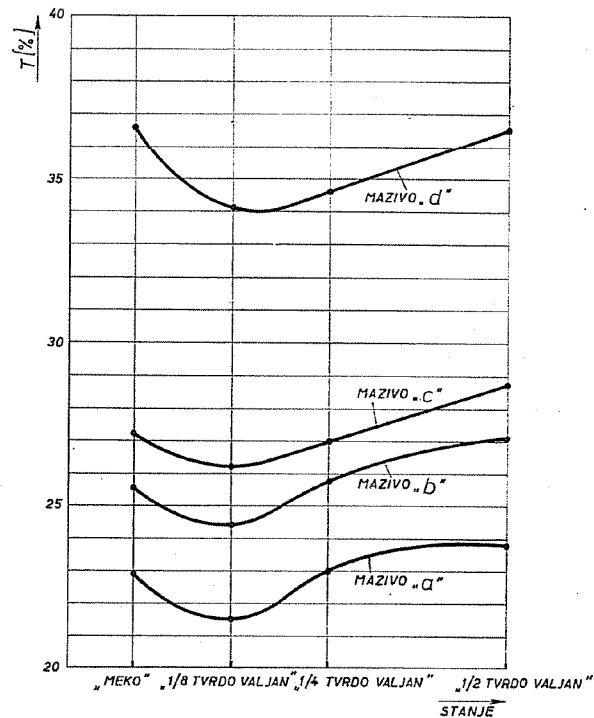
Rezultati ispitivanja sposobnosti dubokog izvlačenja (ovde Engelhardt-ovi brojevi) prikazani su grafički na sl. 38.

Ovi rezultati pokazuju da je uticaj stanja materijala (aluminijuma) na sposobnost dubokog izvlačenja ovde relativno mali i ne prelazi 3%. Sa druge strane, razlike koje su prouzrokovane primenom različitog maziva su upadljivo veće i kreću se do 14% (i to samo za primenjena maziva, dok se one primenom drugih maziva mogu eventualno još i povećati). To istovremeno znači da svojstva materijala ne moraju uvek biti dominantna komponenta stepena njegove obradivosti. Iz toga takođe proizilazi da i pri ispitivanju istog materijala na različitim mestima ili u različito vreme, pomoću sasvim određenih opitnih uređaja, može doći do znatnih razlika u

rezultatima ukoliko se ne ostvare identični uslovi trenja. Napominje se da pri tome, pored vrste maziva, primetan uticaj može imati takođe i način, kao i obim podmazivanja (učestanost, debljina sloja i mesto podmazivanja).

Tabela 2

Karakteristika	S t a n j e			
	meko	1/8 tvrdo	1/4 tvrdo	1/2 tvrdo
Zatezna čvrstoća				
$\sigma_m \left[\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \right]$	8,3	8,9	9,5	10,5
Maksimalno izduženje				
$\delta_{p \max} [\%]$	42	28	20	17
Tvrdoća po Brinell-u				
HB $\left[\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \right]$	19	25	17	27



Sl. 38. Zavisnost sposobnosti dubokog izvlačenja aluminijuma (po Engelhardt-u) od vrste maziva i stepena prethodne deformacije (stanja)

Ne bi trebalo ispustiti iz vida da uslove trenja ne stvara samo mazivo, već i hrapavost kontaktnih površina. Hrapavost lima je posebno problematična, jer je nju teže održati ustaljenom nego hrapavost alata.

Zaključujući ovaj osvrt, ističe se da je pri ispitivanju lima neophodno svesti faktore koji utiču na kolebljivost uslova trenja u što je moguće uže okvire, putem dovoljno preciznog definisanja vrste maziva, načina i obima podmazivanja, pritiska na držaču lima, hrapavosti alata, veličine zazora i sl. Na taj način može se u prihvatljivom približenju smatrati da osobine materijala ostaju kao jedini faktor koji predodređuje laboratorijske rezultate nekog standardnog, odnosno unapred definisanog postupka ispitivanja.

2. SIMULATIVNE METODE

Mada ispitivanje lima normalno obuhvata relativno jednostavan opit zatezanjem (ne samo radi utvrđivanja obradivosti, već i radi provere neophodnih iznosa mehaničkih karakteristika, koje se zahtevaju s obzirom na konstruktivno-mehaničke zahteve za deo) nije uvek jednostavno na osnovu tako dobijenih rezultata doneti zadovoljavajući sud o njegovoj obradivosti. Naime, interpretacija rezultata u ovom smislu nekada je vrlo problematična. Zato u mnogo takvih slučajeva mogu biti od velike koristi simulativne metode ispitivanja.

Već prema samom nazivu može se zaključiti da se ove metode odnose na ispitivanja kojima se deformacioni procesi u materijalu odvijaju na sličan način kao i pri stvarnoj industrijskoj obradi. Potpuna istovetnost tih procesa postiže se u redim slučajevima, a češće se može računati samo sa delimičnom sličnošću, odnosno analogijom. Stoga pojam simulativnosti treba shvatiti šire, što, uostalom, proizlazi iz očiglednih razlika i specifičnosti postupaka koji će u daljem biti izloženi.

Ispitivani materijal se, dakle, u toku industrijske obrade izvlači pod manje-više izmenjenim okolnostima s obzirom na oblik i dimenzije alata, brzinu deformacije i uslove trenja. Eventualna laboratorijsko-proizvodna podudarnost nekog uticajnog faktora može se pre smatrati izuzetkom nego pravilom. Svakako da su pri tome od suštinskog interesa iznosi stvarnih razlika u jednom i drugom slučaju. Ukoliko su one manje, ostvarena je veća simulativnost, a time i veća pouzdanost kriterijuma obradivosti.

To istovremeno znači da je izbor adekvatne metode ispitivanja između više raspoloživih isto toliko značajan kao i korektno izvođenje opita i interpretacija rezultata.

Kako simulativne metode obuhvataju relativno veliki broj postupaka, korisno je izvršiti dalje raščlanjavanje istih na sledeće podgrupe:

- postupci koji odgovaraju čistom dubokom izvlačenju
- postupci koji se zasnivaju na razvlačenju
- kombinovani i specijalni simulativni postupci.

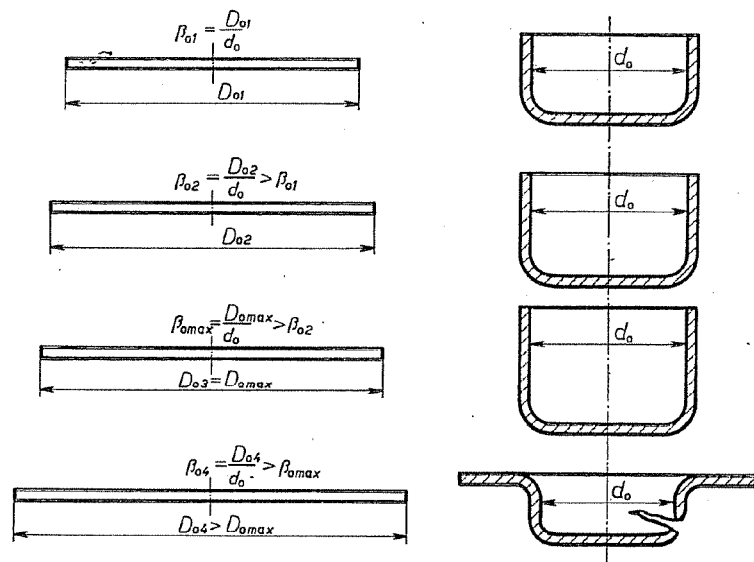
2.1. Postupci koji odgovaraju čistom dubokom izvlačenju

Princip na kome se zasnivaju ovi postupci sastoji se najčešće, u određivanju graničnog maksimalnog prečnika razvijene ploče ($D_{o \max}$) koja se još može sa uspehom izvući u standardnom alatu sa izvlačem određenog prečnika (d_o) i određenog oblika (sl. 34). Odnos

$$\frac{D_{o \max}}{d_o} = \beta_{o \max}$$

poznat je kao granični odnos (stepen) izvlačenja i on se u zavisnosti od kvaliteta materijala, debljine lima, vrste, veličine i oblika alata, kao i uslova trenja, kreće najčešće između 1,65 i 2,20.

Iako principijelno veoma jednostavan, ovaj pokazatelj ponekad može zahtevati dosta truda u eksperimentalnom smislu, s obzirom da je za određivanje dovoljno tačne vrednosti $D_{o,max}$ potrebno prethodno izraditi prosecanjem veći broj uložnih delova (razvijenih ploča), čiji se prečnici D_{oi} međusobno razlikuju za dovoljno male stupnjevite iznose. Pri tome se opit nastavlja sve do dostizanja graničnog prečnika $D_{o,max}$ (sl. 39).



Sl. 39. Postupno iznalaženje graničnog odnosa izvlačenja, odnosno maksimalnog prečnika razvijene ploče

Poznato je da se oblikovanja delova na ovaj način mogu vršiti u okviru jedne ili više operacija. Mogućnost naknadnih izvlačenja u konkretnim slučajevima zavisi od geometrijskih odnosa, stepena prvog izvlačenja, svojstava materijala, itd. Zato se takođe vrše i odgovarajuća simulativna ispitivanja obradivosti materijala višestrukim izvlačenjem (mada rede).

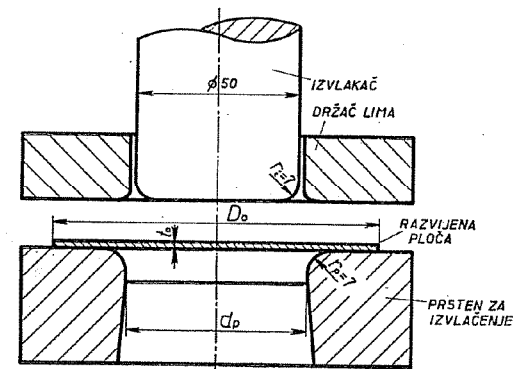
Uticaj trenja na rezultate ispitivanja, odnosno obradivost čistim dubokim izvlačenjem, kako je rečeno, nije istovetan u svim slučajevima. On je zavistan, pored ostalog i od oblika čela izvlačka. Načelno, ukoliko se radi o većem poluprečniku zaobljene ivice čela (pri čemu je granični slučaj polusferni izvlačak) utoliko je uticaj trenja na maksimalnu silu koja se može preneti u toku izvlačenja manji. U vezi sa tim i povećano podmazivanje izvlačka vodi ka smanjenju sposobnosti dubokog izvlačenja, odnosno smanjenju maksimalne sile koja se može preneti. Drugim rečima, povećanjem trenja između izvlačka i lima (usled povećane hrap-

vosti, smanjenog podmazivanja na tom mestu, a i oblika čela izvlačka) povećava se i sila pri kojoj se razara materijal (tj. sila koju on može preneti) a sposobnost dubokog izvlačenja bi trebalo da raste. Međutim, ovaj zaključak je uslovan utoliko što se podmazivanjem u širem smislu ne menja trenje samo na čelu izvlačka, već i u zoni materijala ispod držača lima. Ali kako i u uslovima ravnomernog podmazivanja oblik čela izvlačka utiče na trenje, jasno je da prednje objašnjenje ukazuje na opštu tendenciju uticaja promene ovog oblika na obradivost čistim dubokim izvlačenjem.

2.1.1. A.E.G. — postupak

Ovaj postupak ispitivanja pogodnosti materijala da se duboko izvlači razvila je i uvela firma »Allgemeine Elektrizitäts — Gesellschaft« (A.E.G.).

Opit se obavlja pomoću specijalnog alata (sl. 40) na običnoj proizvodnoj presi. Prečnik izvlačka (prema klasičnoj varijanti) je stalna i iznosi $d_o = 50$ mm, sa poluprečnikom zaobljenja ivice čela $r_i = 7$ mm, koliko iznosi i poluprečnik zaobljenja ivice prstena za izvlačenje.



PRIMER ZA VELIČINE PREČNIKA d_p (GARNITURA SADRŽI 20 RAZLIČITIH PRSTENOVA):

ZA DEBLJINU LIMA	$t_o = 0,2$ mm,	$d_p = 50,44$ mm,
- II -	- II -	$t_o = 1,0$ mm,
- II -	- II -	$t_o = 3,5$ mm,
		$d_p = 57,21$ mm;

ITD.

Sl. 40. Osnovne dimenzije alata za ispitivanje klasičnim A.E.G. — postupkom

Kako se, međutim, zazor između izvlačka (koji se ne menja) i prstena za izvlačenje mora prilagođavati debljini lima, alat se izrađuje sa garniturom promenljivih prstenova za izvlačenje, koji se međusobno razlikuju jedino u veličini njihovih unutrašnjih prečnika. Na taj način, uobičajena garnitura od 20 prstenova omogućuje ispitivanje limova različitih debljina od 0,2 do 3,5 mm.

Prvobitna namera tvorca ovog postupka nije bila da se njime odredi granični odnos $D_{o,max}/d_o$ i time dobije kvantitativna karakteristika sposobnosti materijala da se duboko izvlači, već da on posluži kao kontrolni opit kojim bi se ustanovilo da

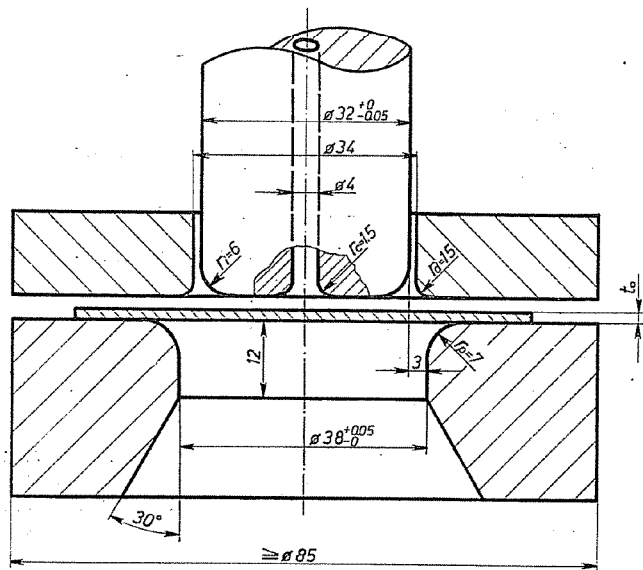
li se pri nekom zahtevanom (propisanom) odnosu $\beta_0 = D_0/d_0$ može ostvariti uspješno izvlačenje (Do u tom slučaju nije maksimalno moguć prečnik razvijene ploče, već njegova donja granica sa kojom se u posmatranom slučaju mora izvršiti uspješno izvlačenje, a njegov iznos se određuje iskustveno, pri čemu se obično računava sa izvesnom rezervom). Takav pristup predstavlja ograničavanje primene postuoka, a obradivost koja se na taj način ispituje samo je relativna, dok se njeni apsolutni, kvantitativno izraženi iznosi ne dobijaju.

Jasno je da iznalaženje graničnog odnosa $\beta_{0,max}$ nije nemoguće, već samo zahteva dugotrajan opit, koji se sastoji u postupnom eksperimentalnom traženju najvećeg prečnika razvijene ploče $D_{0,max}$ putem variranja D_0 . Ukoliko nije poznata ni približna vrednost ovog prečnika obično je potrebno izvršiti probu sa oko šest polaznih epruveta različitih prečnika $D_{0i} (i=1-6)$ u cilju njegovog iznalaženja.

Međutim, najčešće se pri korišćenju ovog postupka, ipak, za ispitivani materijal poznaje približna vrednost $D_{0,max}$ čime se trajanje ispitivanja skraćuje, tj ono se svodi na manji broj proba.

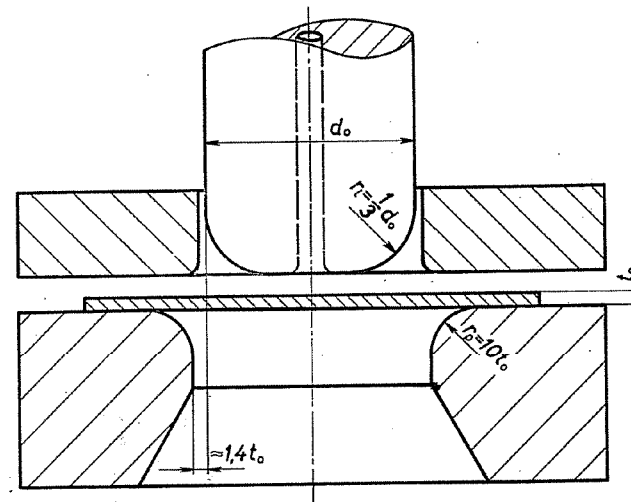
U svakom slučaju, ovakva postupnost ispitivanja dovodi, pored ostalog, i do znatnog utroška materijala. Da bi se on smanjio (naročito kada su u pitanju skupi visokolegirani čelici) i sveo u okviru koji približno odgovaraju rasprostranjenom ispitivanju po Erichsen-u (2.2.1.), prvobitni prečnik izvlakača smanjen je od 50 mm na 32 mm (sl. 41). Inače, danas su takođe rasprostranjeni opiti ovog tipa sa prečnikom izvlakača od 33, 45, 50 i 75 mm.

Treba istaći da je ustanovljeno da promena prečnika izvlakača i u znatno širim granicama praktično ne utiče na granični odnos izvlačenja, tako da prednjom izmenom nije izvršen nikakav primetan uticaj na rezultate ispitivanja.



Sl. 41. Osnovne dimenzije alata sa prečnikom izvlakača $d_0 = 32$ mm (za limove debljine 0,5 — 2,0 mm)

Dalje analize kompleksnog uticaja debljine lima, prečnika prstena za izvlačenje i veličine poluprečnika zaobljena ivica prstena i izvlakača dovele su takođe do izvesnih izmena u odnosu na prvobitnu AEG varijantu. Naime, ovi poluprečnici su najpre bili istovetni (po 7 mm), ali su kasnije nastali predlozi da se poluprečnik zaobljena ivice prstena bira u zavisnosti od debljine lima. U tom smislu ima više preporuka (Oehler, Kaczmarek, i dr.). Prema jednoj od njih najpovoljniji granični odnosi izvlačenja dobijaju se ako je poluprečnik zaobljenja ivice prstena jednak desetostrukoj vrednosti debljine lima. Na sličan način došlo je do preporuke da se poluprečnik zaobljenja ivice čela izvlakača svode na jednu trećinu prečnika njegovog cilindričnog dela (sl. 42).



Sl. 42. Dimenzije alata koje obezbeđuju najpovoljniji odnos izvlačenja (prema Siebel-u)

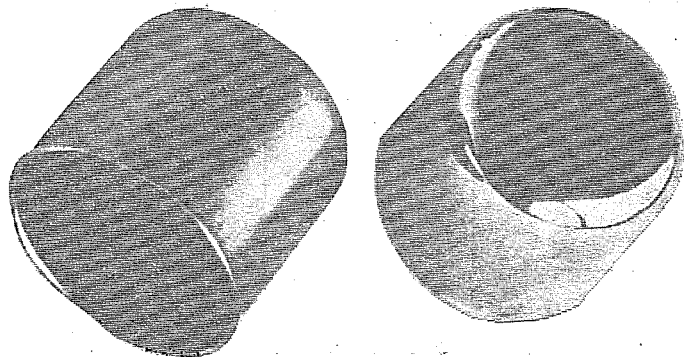
Prihvatajući takve geometrijske odnose, uglavnom, kao optimalne treba uočiti da oni ne moraju imati principijelan značaj pri opštoj oceni obradivosti lima. Uslovi njegovog industrijskog oblikovanja razlikuju se od laboratorijskih uslova, pa su i ustanovljeni kriterijumi relativni. Na postojeće razlike zbog promene geometrijskih odnosa pri različitim ispitivanjima treba obratiti pažnju onda kada se upoređuju rezultati tih ispitivanja.

Sličan zaključak može se izvesti i u vezi sa vrstom držača lima, odnosno veličinom sile držanja (postoje kruti-nepomični i elastični držači).

2.1.1.1. Ostale karakteristike i savremene verzije A.E.G. — postupka

Prema prednjem, konstruktivno-geometrijski detalji AEG postupka mogu se unekoliko međusobno razlikovati, što ne utiče na princip ispitivanja, jer se on u svim varijantama zasniva na određivanju odnosa D_0/d_0 , ili $D_{0,max}/d_0$.

Napominje se da se ni ovaj postupak, a ni ostali koji se odnose na čisto duboko izvlačenje, ne vezuju uvek u literaturi za izvorne nazive (A.E.G. i dr.). Veoma često oni se svrstavaju u zajedničku grupu postupaka za izvlačenje šupljeg cilindričnog tela — nemački: Näpfchenziehprüfverfahren; engleski: Cup-drawing tests; ruski: Вытяжка цилиндрического стакана; itd. Ovo je sasvim razumljivo ako se ima u vidu da se često posle niza modifikacija mnoge prvobitne geometrijske i druge pojedinosti sasvim menjaju, tako da i sami nazivi manje-više gube značaj (sl. 43).



Sl. 43. Izgled cilindrične epruvete izvučene čistim dubokim izvlačenjem

Doprinos novijim pokušajima da se detalji postupka ujednače u međunarodnim razmerama treba pripisati prvenstveno internacionalnoj organizaciji za duboko izvlačenje IDDRG («International Deep Drawing Research Group»).

Međutim, ova nastojanja još nisu dovela do konačnih rezultata, tako da, za sada, ispitivanja izvlačenjem cilindričnih proba još nisu standardizovana. Stoga pojedine firme izrađuju opitne uređaje koji u pogledu dimenzija i drugih pojedinosti odgovaraju izvornim postupcima, ili ih one same modifikuju i sistematizuju.

Firma »Erichsen« (čiji je osnivač A. M. Erichsen) uvela je svoju metodu, takođe na izloženom principu, dajući joj svoj naziv: Tiefziehen-Näpfchen-Probe nach Erichsen, ili Erichsen Deep Drawing Cup Test. Za njenu primenu ova firma proizvodi promenljive alate sa sledećim prečnicima i ostalim opštim karakteristikama.

a) Prečnik izvlakača \varnothing 33 mm:

- za limove debljine 0,2—6,0 mm
- sa prstenovima za izvlačenje čiji su prečnici prilagođeni promenama debljine lima od po 0,1 mm u čitavom opsegu od 0,2—6,0 mm (tj. za debljine 0,2; 0,3; 0,4; 6,0 mm)
- za pećnike razvijene ploče od 55—80 mm (promenljivi delovi alata omogućuju prosecanje razvijениh ploča u ovom opsegu u stupnjevima od po 1 mm).

b) Prečnik izvlakača \varnothing 50 mm:

- za limove debljine 0,2—6,0 mm
- sa prstenovima za izvlačenje u stupnjevima kao pod a)
- za prečnike razvijene ploče od 80 — 120 mm i stupnjevima kao pod a)

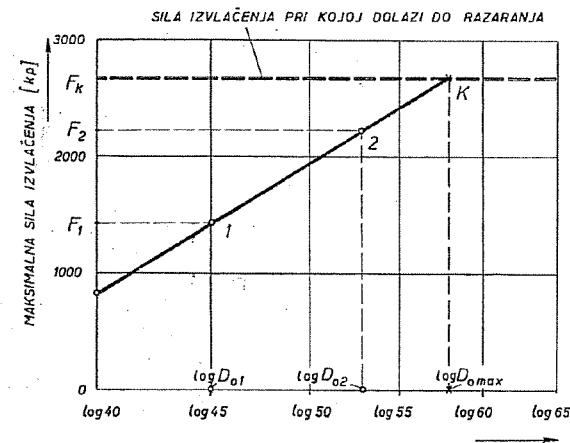
c) Prečnik izvlakača \varnothing 75 mm:

- za limove debljine 0,2—6,0 mm
- sa prstenovima za izvlačenje u stupnjevima kao pod a) i b)
- za prečnike razvijene ploče od 120 — 170 mm i stupnjevima kao pod a) i b).

Kao dalji primer navodi se da firma »Roell-Korthaus KG« primenjuje na svojoj mašini alate za izvlačenje proba prečnika: 33, 45 i 50 mm.

2.1.2. Postupak Schmidt-Kapfenverg (skraćeno Schmidt-ov postupak)

M. Schmidt je 1929. godine predložio postupak za pojednostavljenje određivanja graničnog odnosa $D_{o\max}/d_0$. Naime, on je ustanovio da postoji približno linearan odnos između maksimalnih sila koje se na izvlakaču javljaju u toku izvlačenja (F) i logaritma odgovarajućih početnih prečnika D_0 (odnosno kružnih površina razvijениh ploča, kako je najpre ustanovljeno). Ovakav odnos prikazan je šematski na sl. 44. Ako je on linearan, onda je očigledno da se može grafički definisati ako se utvrde položaji samo dve tačke, (1 i 2), jer se kroz njih može povući tražena linija. To praktično znači da je za njihovo određivanje potrebno izvršiti samo dva opita izvlačenjem. Treći opit vrši se radi registrovanja sile F_K koja je potrebna da se razori materijal u podnožju izvučenog dela. Razaranje će se, naravno, postići ako se uzme razvijena ploča dovoljno velikog prečnika.



Sl. 44. Odnos između maksimalne sile izvlačenja F i logaritma prečnika razvijene ploče D_0 (materijal: čelični lim za duboko izvlačenje; debljina 0,75 mm; prečnik izvlakača $d_0 = 30$ mm)

Na taj način presek ove dve prave linije K (sl. 44) određuje traženi najveći prečnik $D_{o\max}$. Njegovo iznalaženje posle samo tri opita može se smatrati dovoljno racionalnim i ekonomičnim.

Ove odnose nije teško izraziti analitički, jer je:

$$\log \left(D_{o_{\max}}^2 \frac{\pi}{4} \right) = \log \left(D_{o1}^2 \frac{\pi}{4} \right) + \left[\log \left(D_{o2}^2 \frac{\pi}{4} \right) - \log \left(D_{o1}^2 \frac{\pi}{4} \right) \right] \cdot \frac{F_k - F_1}{F_2 - F_1}$$

ili jednostavnije

$$\log D_{o_{\max}} = \log D_{o1} + \frac{F_k - F_1}{F_2 - F_1} (\log D_{o2} - \log D_{o1})$$

Analizirajući ovu materiju Esser i Arend su ustanovili da se od prikazane li-
nearnosti praktično ne odstupa ni kada se umesto logaritma prečnika D_o stavi nje-
gova stvarna vrednost, čime se postupak dalje pojednostavljuje.

Nedostatak metode je potreba za opitnom mašinom koja je opremljena ure-
đajem za merenje sile (a ne samo alatom), kako bi se registrovale sile koje se jav-
ljaju na izvlaču. To čini postupak skupim u odnosu na mnoge druge. Međutim
ovaj zaključak treba primiti samo uslovno s obzirom da se u poslednje vreme sve
više proizvode univerzalne mašine i uopšte složena opitna oprema, koja i inače
omogućuje merenje sila izvlačenja.

Osim toga, na osnovu bogatog iskustva ustanovljeno je da tačnost određi-
vanja $D_{o_{\max}}$ nije uvek sasvim zadovoljavajuća, pa se u tim slučajevima dobijena
vrednost smatra za približnu, odnosno polaznu za dalje eksperimentalno postupno
traženje stvarnog iznosa.

2.1.3. Swift-ov opit (sa ravnim čelom izvlačača)

Engleski profesor H. W. Swift je sredinom treće decenije ovog veka počeo
sa sistematskim istraživanjima radi iznalaženja načina ispitivanja obradivosti dubo-
kim izvlačenjem koji bi bio pouzdaniji u odnosu na takve opite kao što je Erichsen-
ov, opit zatezanjem i dr. U okviru ovih nastojanja on je svojevremeno izveo zaklju-
čak da »nijedan kriterijum obradivosti dubokim izvlačenjem ne može biti prirodni-
ji nego granični odnos izvlačenja«. Pri ovome se misli na čisto duboko izvlačenje.
Međutim, sam zaključak, dat u ovakvoj formi, ima relativan značaj jer postoje tako-
đe i druga mišljenja i kriterijumi. Šta više, i sam Swift je na osnovu svojih kasnijih
analiza ustanovio, pored ostalog, da se može početi od postavke da mogućnost us-
pešnog čistog dubokog izvlačenja određuju u osnovi dve veličine:

a) sila izvlačenja — koja se najvećim delom odnosi na savlađivanje otpora
ravnog oboda tela pri njegovom deformisanju i povlačenju ka centralnoj zoni;

b) najveća sila koja bi se mogla preneti u toku izvlačenja kroz kritičnu zonu
materijala (sila koja se graniči sa onom pri kojoj dolazi do razaranja).

Razlika između ove dve sile može se shvatiti kao kapacitet dubokog izvla-
čenja sa čijim porastom, dakle, raste obradivost materijala*).

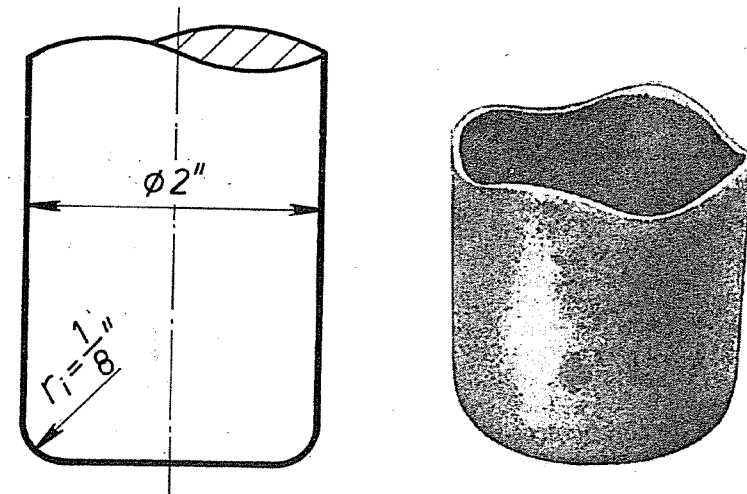
Međutim, nezavisno od ovoga, opšte je prihvaćeno da se pod Swift-ovom me-
todom ispitivanja lima podrazumeva čisto duboko izvlačenje šupljeg cilindričnog
tela u cilju iznalaženja graničnog stepena izvlačenja $\beta_{o_{\max}}$. Svakako da se pri tome
ne isključuje mogućnost vršenja samo kontrolnog ispitivanja, kada se ne određu-
ju granične vrednosti, već se samo proverava da li materijal može da se uspešno
izvlači pri nekim zahtevanim iznosima β_o odnosno D_o . To istovremeno znači da se
metoda principijelno ne razlikuje od metode A.E.G.

*) Sa istog stanovišta pošao je W. Engelhardt [32] pri uvođenju sopstvene metode ispi-
tivanja.

Za izvođenje svog opita Swift je svojevremeno konstruisao (na Univerzitetu
u Sheffield-u) laboratorijsku hidrauličnu presu. Danas se, međutim, ovaj opit ne ve-
zuje za određenu vrstu prese ukoliko raspoloživa presa može da obezbedi propisane
uslove (brzinu, centričnost, itd.). Inače, Swift-ov postupak se koristi od 1937. godine
(kada je uveden u Institution of Automobile Engineers).

Prečnik izvlačača pri ovom izvlačenju je 2" (sl. 45), dok se unutrašnji preč-
nici prstenova za izvlačenje međusobno razlikuju za iznos koji odgovara promeni
debljine lima u različitim slučajevima. Držač lima je prvobitno bio konstruisan tako
da je u toku opita održavao stalno rastojanje od površine prstena za izvlačenje, ali
je kasnije podešen tako da je, po želji, mogao da ostvari konstantnu silu držanja
(umesto konstantnog zazora).

Izvlačenje je u početku vršeno standardnom brzinom od 9" na minut. Među-
tim, kasnijim standardima i drugim propisima predviđene su i druge brzine (pri
istraživačkim opitima ona može biti veoma mala, na primer, 0,1" na minut, itd.).



Sl. 45. Dimenzije izvlačača sa ravnim čelom za ispitivanje po Swift-u i izvučena epruveta

Napominje se da se ovaj Swift-ov opit odnosi na primenu izvlačača sa rav-
nim čelom, za razliku od varijante sa polusfernim izvlačačem o kome će biti reči u
odeljku o kombinovanim i specijalnim simulativnim postupcima.

Swift-ov originalni opit je odgovarajućim modifikacijama unekoliko prilago-
đen različitim zahtevima (na primer da se sa mera u inčima pređe na milimetarske
i time proširi područje primene van Velike Britanije, i dr.).

Tako se jedna od tih modifikacija odnosi na dimenzije izvlačača i prstena
(pored ostalog, dimenzije su izražene u milimetrima). Preporučene su, naime,
slededeće dimenzije izvlačača sa ravnim čelom:

- a) $\text{Ø } 32 \pm 0,05$ sa poluprečnikom zaobljenja ivice čela $4,5 \pm 0,1$ mm,
- b) $\text{Ø } 50 \pm 0,05$ sa poluprečnikom zaobljenja ivice čela $5 \pm 0,1$ mm.

Izvlačač sa prečnikom 32 mm upotrebljava se za lim debljine 0,3—1,24 mm,
a sa prečnikom 50 mm za debljine 0,45—1,86 mm.

Uređaju pripadaju, pored ostalog, garniture promenljivih prstenova za izvlačenje, sa odgovarajućim poluprečnicima zaobljenja njihovih ivica. Napred navedenim prečnicima izvlakača odgovaraju dimenzije promenljivih prstenova prema tabeli 3.

Tabela 3

Prečnik izvlakača d_0 [mm]	Grupe debljine lima t_0 [mm]	Unutrašnji prečnik prstena za izvla- čenje d_p [mm]	Poluprečnik zaoblje- nja ivice prstena r_p [mm]
S Ø 32 55-75	0,30 — 0,43	33,20 \pm 0,05	4,3 \pm 0,1
	0,43 — 0,61	33,72	6,1
	0,61 — 0,87	34,44	8,7
	0,87 — 1,24	35,48	12,4
S ₂ Ø 50 70-115	0,45 — 0,64	51,89	7,1
	0,64 — 0,91	52,56	9,1
	0,91 — 1,30	53,64	13,0
	1,30 — 1,86	55,20	18,6

Napomena: Pri ispitivanjima istraživačkog karaktera mogu se upotrebiti takođe izvlakači i prstenovi za izvlačenje koji su različiti od prikazanih. Na primer, u upotrebi su [17]: izvlakač prečnika 2" sa poluprečnicima zaobljenja ivice čela 1"; 3/8" i 1/8", kao i dva različita prstena sa prečnicima 2,128" i 2,175" (prvi omogućuje radialan zazor uvećan za 75% pri izvlačenju lima debljine 0,036", a drugi isti zazor za lim debljine 0,050").

Kao i za ostale simulativne postupke, standardima se i ovde propisuje vrsta maziva koja će se primeniti za podmazivanje epruvete, kao i način podmazivanja. Predviđa se, naime, da se razvijena ploča pre ispitivanja očisti i zatim potopi u ulje. Po vađenju iz njega ploča mora neko vreme da stoji oslonjena na ivicu kako bi višak ulja mogao da se ukloni slivanjem niz lim.

Osim toga, propisuju se i druge pojedinosti u vezi sa opitom, kao što su one koje se odnose na: materijal alata, kvalitet površine, tolerancije ekscentriciteta položaja izvlakača u odnosu na prsten za izvlačenje, brzina izvlačenja, sila na držaču i dr.

Brzina izvlačenja se mora održavati konstantnom i normalno treba da bude ispod 35 mm u sekundu, odnosno 7 stopa na minut.

Potrebno je, dalje, da sila na držaču lima bude veća za 50—75% od one pri kojoj se još mogu pojaviti vidljiviji nabori na obodu epruvete za vreme izvlačenja.

Ukoliko se na gornjoj ivici izvučenog dela pojave neravnine („ušići“) može se doneti zaključak o postojanju anizotropije u ravni materijala, odnosno vektorijalnosti osobina.

Da bi se izvršila selekcija lima prema debljini ona se kontroliše pre opita, a prečnik razvijene ploče sa kojim se otpočinje ispitivanje određuje se na osnovu prethodnog iskustva, ili se manje tačnim opitima iznalazi najpre orijentaciona vrednost $D_{o,max}$. Svakako da se ona može i znatno razlikovati za pojedine materijale.

Radi iznalaženja dovoljno tačnog podatka o graničnom stepenu izvlačenja $\beta_{o,max}$, odnosno $D_{o,max}$, prečnici razvijene ploče se u toku opita postupno menjaju u stupnjevima od po 0,025" — 0,050", u zavisnosti od željene tačnosti (prvobitno

su ispitivanja vršena grublje — sa stupnjevima 0,1"). Takođe se propisuje sa koliko ponovljenih opita treba potvrditi vrednost $D_{o,max}$ (na primer sa 5 opita).

Ukoliko se razvijene ploče izrađuju prosecanjem, predviđeno je da prosečeni prečnik bude nešto veći od potrebnog, kako bi se naknadnom obradom uklonio sloj materijala pored ivice u debljini od najmanje 0,5 mm, jer je on pretrpeo deformacione promene pri prosecanju. Isto tako, mora se voditi računa o kvalitetu obrade ivice.

Za ispitivanje uskih traka, debljine 0,3—0,6 mm, koristi se izvlakač prečnika $\text{Ø } 19 \pm_{0,05}^0$ mm sa zaobljenjem ivice čela $2,7 \pm 0,10$ mm.

Limovi debljine ispod 0,30 mm (0,012") ispituju se pomoću specijalnih alata čije se dimenzije zasnivaju na uslovu da slobodni radialni zazor u cilindričnom delu alata za vreme izvlačenja bude 50% od debljine lima, a poluprečnik zaobljenja ivice prstena za izvlačenje ravan desetstrukoj debljini.

Razumljivo je što je Swift-ova metoda našla najširu primenu u Velikoj Britaniji, ali je ona isto tako pobudila veliki interes i u drugim područjima (naročito među istraživačima), tako da danas spada među najpoznatije. Njenom značaju, nesumnjivo, doprinosi i činjenica da se ona može izvoditi i po drugoj varijanti (sa polusfernim izvlakačem).

2.1.4. Blum-ov kriterijum

Sušтина napred izloženih postupaka svodi se na određivanje graničnog prečnika razvijene ploče $D_{o,max}$.

Ona je zadržana i u ovom slučaju, samo što je Blum uveo nešto drukčiju kvantitativnu interpretaciju dobijenih rezultata. Prema njemu kriterijum sposobnosti materijala da se duboko izvlači bio bi

$$i = \frac{(D_o - d_m)^2}{4 d_m} \approx \left(\frac{\beta_o - 1}{2} \right)^2 d_m$$

$$\text{jer je } d_o \approx d_m \quad \text{ i } \quad \frac{D_o}{d_m} \approx \beta_o$$

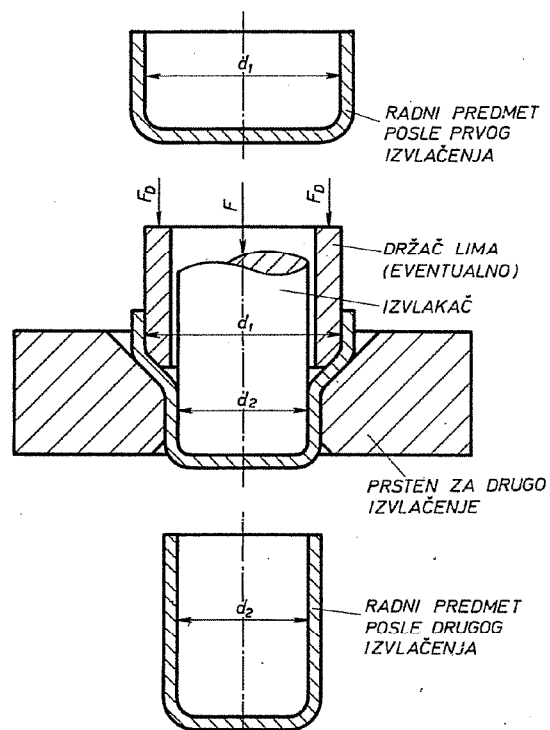
(d_m ima značenje koje odgovara obeležavanjima na sl. 34).

Time je, pored odnosa β_o , u kriterijum uključena i veličina izvlakača. Međutim, kasnijim opitima je ustanovljeno da granični odnos izvlačenja $\beta_{o,max}$, ipak, ne zavisi od prečnika izvlakača ukoliko se radi o uobičajenom opsegu. Na primer, za limove debljine 0,5 — 2 mm beznačajna je njegova promena između 10 i 70 mm [2]. Zato se ovaj kriterijum smatra zastarelim.

2.1.5. Ispitivanja višestrukim izvlačenjem

Posle prve operacije dubokog izvlačenja može se ono nastaviti kroz još jednu ili više naknadnih operacija. Na taj način postižu se u konačnom rezultatu znatno veći stepeni izvlačenja nego što je to moguće u samo jednoj operaciji. Principijelna šema ovakvog postupka data je na sl. 46.

U prvom stupnju ispitivanja određuje se, normalno, postignuti stepen izvlačenja $\beta_{o1} = \beta_1 = \frac{D_o}{d_1}$. Produženjem izvlačenja u sledećoj operaciji prečnik epruvete



Sl. 46. Naknadno (drugo) izvlačenje

se smanjuje od d_1 na d_2 , tj. postiže se stepen izvlačenja drugog stupnja $\beta_2 = \frac{d_1}{d_2}$. Na sličan način definiše se ovaj stepen i pri eventualnim daljnim stupnjevima — operacijama izvlačenja tj. $\beta_n = \frac{d_{n-1}}{d_n}$ (gde je n broj operacije). Međutim, ovakva ispitivanja najčešće se vrše u dva stupnja.

Za konačan rezultat pogodno je koristiti karakteristiku β_u , koja predstavlja ukupan stepen izvlačenja. Na primer, za dve operacije biće

$$\beta_u = \beta_1 \cdot \beta_2 = \frac{D_0}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} = \frac{D_0}{d_2}$$

Obično se u okviru prvog stupnja ispitivanja odredi granični stepen $\beta_{1 \max}$ odnosno najveći mogući prečnik razvijene ploče $D_{1 \max}$. Načelno nema smetnje ni da se počne sa $\beta_1 < \beta_{1 \max}$, ali pri tome ne treba računati da će se dobiti maksimalan ukupan stepen izvlačenja $\beta_{u \max}$. Kada je prečnik D_{\max} ustanovljen, treba na osnovu njega izraditi više razvijениh ploča i od njih izvući odgovarajuće delove u prvoj operaciji. Ovi delovi se zatim dalje izvlače u drugom stupnju na taj način

što se vrši variranje prečnika izvlakača sve dok se ne ustanovi granični prečnik d_2 pri kome nastaju prvi znaci razaranja materijala — kidanje na dnu epruvete (sl. 47), ili uopšte pojava prskotina na ma kom mestu (najčešće na gornjoj ivici tela). Pri promeni izvlakača menja se i prsten za izvlačenje, jer zazor između zidova izvlakača i prstena treba da ostane stalan. Zato je sastavni deo uređaja za ovo ispitivanje garnitura većeg broja izvlakača i prstenova čiji se prečnici međusobno razlikuju za male stupnjevite iznose.

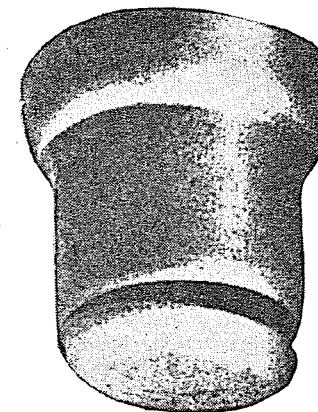
Opiti su pokazali da promena odnosa prvog izvlačenja β_1 , ipak, ne utiče znatnije na veličinu graničnog odnosa drugom stupnju, tj. $\beta_{2 \max}$, pa se on praktično koleba u vrlo uskim granicama ($\beta_{2 \max} \approx 1,4$)

Ova okolnost objašnjava zašto se višestupno ispitivanje vrši relativno retko, već se opšta sposobnost materijala da se duboko izvlači procenjuje pretežno na osnovu rezultata jednostupnog opita.

Uzimajući u obzir maksimalne stepene izvlačenja koji se mogu postići u prvoj operaciji, proizlazi da se, normalno, pri dvostupnom izvlačenju može postići $\beta_{u \max} \approx 2,6 - 3,0$.

Značajno je uočiti da na konačan rezultat u ovom slučaju imaju veoma veliki uticaj geometrijski odnosi u alatu, a pre svega veličina ugla konusa α i pojedini poluprečnici zaobljenja (sl. 46).

U tabeli 4. navedeni su, prema Stebel-u [2], rezultati višestupnih ispitivanja 12 različitih materijala. Pri tome su prve operacije izvođene sa izvlakačem prečnika 45,7 mm, ali su u tabeli uporedno navedeni i rezultati jednostupnog opita sa izvlakačem prečnika 32 mm. U savremenim uređajima, međutim, najčešće se koriste izvlakači za prvu operaciju sa uobičajenim prečnicima: 33, 45, 50 i 75 mm, dok za drugu mogu biti, na primer, 26, 33, 43 mm itd.



Sl. 47. Izgled epruvete posle neuspelog izvlačenja u drugom stupnju

2.1.6. Osvrt na relevantnost kriterijuma $\beta_{0 \max}$

Vidi se da se svi izloženi postupci zasnivaju uglavnom, na određivanju graničnog stepena izvlačenja $\beta_{0 \max}$, ili proveru prihvatljivosti postojećeg odnosa

Broj materijala	Prečnici izvlačka za prvu operaciju		2. operacija	3. operacija	4. operacija	5. operacija	6. operacija	7. operacija	β_u
	$d_1 = 32 \text{ mm}$	$d_1 = 45,7 \text{ mm}$							
1	71	98	—	—	—	—	—	—	2,15
	D_{max} ili d_n	2,22	2,15	(1,14)*					
	β_{max}	69	96	32,0					
2	D_{max} ili d_n	2,16	2,10	1,43	25,2	—	—	—	3,80
	β_{max}	70,5	98	32,0	1,27	(1,06)			
3	D_{max} ili d_n	2,20	2,15	1,43	—	—	—	—	3,06
	β_{max}	69	95	27,5	(1,07)				
4	D_{max} ili d_n	2,16	2,08	1,66	1,17	—	—	—	4,04
	β_{max}	71	98	32,0	29,7	(1,05)			
5	D_{max} ili d_n	2,22	2,15	1,43	1,08	—	—	—	3,30
	β_{max}	70	98	32,0	25,2	(1,08)			
6	D_{max} ili d_n	2,19	2,15	1,43	1,27	1,24	—	—	4,80
	β_{max}	70	97	32,0	25,2	20,4			
7	D_{max} ili d_n	2,19	2,12	1,43	1,27	1,24	—	—	4,75
	β_{max}	70	96	32,0	25,2	20,4			
8	D_{max} ili d_n	2,19	2,10	1,43	1,27	1,24	—	—	5,50
	β_{max}	70	97	32,0	25,2	20,4	(1,05)		
9	D_{max} ili d_n	2,19	2,12	1,43	1,27	1,24	1,17	—	6,50
	β_{max}	70	98	32,0	25,2	20,4	14,9		
10	D_{max} ili d_n	2,19	2,15	1,43	1,27	1,24	1,11	—	6,25
	β_{max}	70	98	34,3	27,5	22,0	16,5	(1,04)	
11	D_{max} ili d_n	2,19	2,15	1,33	1,25	1,25	1,11	—	5,95
	β_{max}	70,5	99	34,3	27,5	22,7	16,5	(1,05)	
12	D_{max} ili d_n	2,20	2,17	1,33	1,25	1,21	1,18	—	6,00
	β_{max}						1,17	(1,05)	

*) Brojevi u zagradama odnose se na stepene izvlačenja pri kojima je u toku ispitivanja došlo do rezaranja materijala. Na primer, materijal pod rednim brojem 1. ne može se uspešno izvlačiti u drugoj operaciji.

$\beta \leq \beta_{\text{max}}$. Korišćenjem savremene laboratorijske opreme ova ispitivanja se mogu izvoditi veoma brzo i sa velikom tačnošću. Međutim, suštinsko pitanje koje se pri tome postavlja jeste: da li i u kojoj meri dobijeni rezultati reprezentuju stvarnu industrijsku obradivost materijala dubokim izvlačenjem?

Odgovor na to pitanje je relativno jednostavan ako su razlike u obliku (tj. geometrijskim odnosima) delova koji se izrađuju iz ispitivanog lima i optine epruvete, kao i razlike u uslovima izvlačenja u oba slučaja, neznatne.

Isto tako, ako izvesne razlike i postoje, ali je nedvosmisleno utvrđeno da neki određen odnos β_{ogar} garantuje uspešno izvlačenje u proizvodnji, pa se u toku opita samo kontroliše da li materijal obezbeđuje taj odnos (koji, svakako, treba da bude postavljen i sa izvesnom rezervom s obzirom na nehomogenost materijala, varijabilnost proizvodnih uslova i sl.), onda se može govoriti o relativno pouzdanoj oceni obradivosti.

Ali i ova konstatacija je samo uslovna. Naime, opit bi mogao na taj način da ukaže samo na garantovanu obradivost. Eventualne mogućnosti materijala preko te neophodne granice ostale bi, manje-više, nepoznate, ili bi se o njima moglo samo naslućivati. Čak i posle određivanja graničnog odnosa β_{max} najčešće nije moguće, bez opsežnijeg pogonsko-laboratorijskog ispitivanja, zaključiti da li registrovana razlika $\beta_{\text{max}} - \beta_{\text{ogar}}$ (neophodan iznos) predstavlja racionalnu rezervu u kvalitetu materijala ili je ona nepotrebno velika i neekonomična.

U mnogim slučajevima, međutim, dobijeni rezultati nisu savršeni kriterijumi čak ni garantovane — kontrolne obradivosti materijala. Oni omogućuju da se obradivost oceni samo sa odgovarajućom verovatnoćom i često zahtevaju još i dopunska ispitivanja (mehanička ili druga). Nema sumnje da je ovo izraženo utoliko više ukoliko je manja simulativnost postupka ispitivanja u odnosu na stvarno izvlačenje delova. Na primer, napred istaknuta praktična irelevantnost prečnika izvlačka pri određivanju β_{max} odnosi se samo na laboratorijska ispitivanja (naveden je primer mogućnosti njegove promene od 10—70 mm bez vidnijeg odraza na β_{max}) i ne bi se mogla olako generalisati i primeniti za sve prečnike izvlačka koji dolaze u obzir u proizvodnim uslovima. Alati u kojima se vrše opiti mogu biti geometrijski slični industrijskim, odnosno njihovi minijturni modeli, ali iz toga ne treba izvući zaključak o identičnosti uslova izvlačenja. Na primer, uslovi trenja nisu zavisni samo od površinske hrapavosti lima i alata, ili primenjenog maziva, već i od sile držanja — pritiska na držaču, što se u oba slučaja obično razlikuje kako u apsolutnom, tako i u relativnom smislu.

U okviru toga pokazalo se da je od veoma značajnog uticaja međusobni odnos prečnika izvlačka i debljine lima d_0/t_0 . Od strane Siebel-a i njegovih saradnika [18], a i drugih, vršena su sistematska istraživanja sa ciljem da se dođe do veze između graničnih karakteristika izvlačenja i veličine izvlačka. Pri tome su korišćeni mali i veliki alati, a sličnost izvlačenja postizana je tako što su uslovi (prvenstveno uslovi trenja na držaču lima — hrapavost, podmazivanje i pritisak) podešavani u različitim slučajevima tako da se za isti materijal dobije isti granični stepen izvlačenja. To znači da su aksijalna naprezanja pri dnu cilindričnog dela epruvete uvek ista.

Uopšte je aksijalno naprezanje

$$\sigma_1 = e^{\mu\alpha} \left(K_m \ln \beta + \frac{\mu}{2} p \cdot \frac{\beta_0^2 - 1}{\beta} \frac{d_0}{t_0} \right) + K_{d_0/2} \frac{t_0}{2r_p}$$

gde su:

- μ — koeficijent trenja između lima i alata;
- α — ugao između ravnog oboda i cilindričnog dela (pri čistom dubokom izvlačenju $\alpha = \frac{\pi}{2}$);

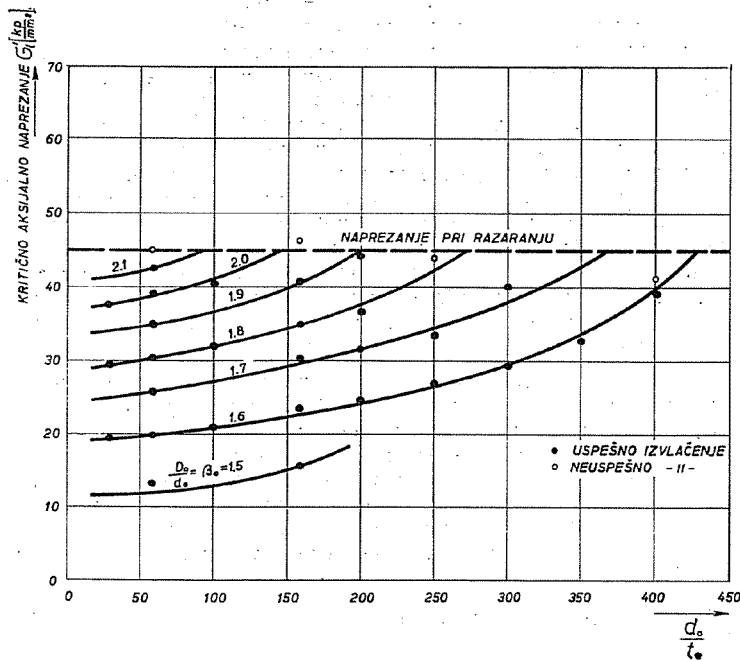
- K_m — srednja vrednost deformacionog otpora na obodu;
- β — trenutna vrednost odnosa D/d_0 ;
- p — specifični pritisak držača lima;
- $K_{d_0/2}$ — deformacioni otpor na zaobljenju alata;
- r_p — poluprečnik zaobljenja ivice prstena za izvlačenje.

Ako se učine pretpostavke da:

a) deformacioni otpor K_m i $K_{d_0/2}$ imaju iste vrednosti za minijturni i veći alat,

b) da se koeficijent trenja ne menja

i ako se pritisak p i odnosi t_0/r_p zadrže stalnim (oko 10—20%), onda će u kritičnom trenutku postizanja maksimalne sile izvlačenja naprezanje σ_1 biti zavisno samo od prečnika izvlačača, odnosno njegovog odnosa prema debljini lima d_0/t_0 .



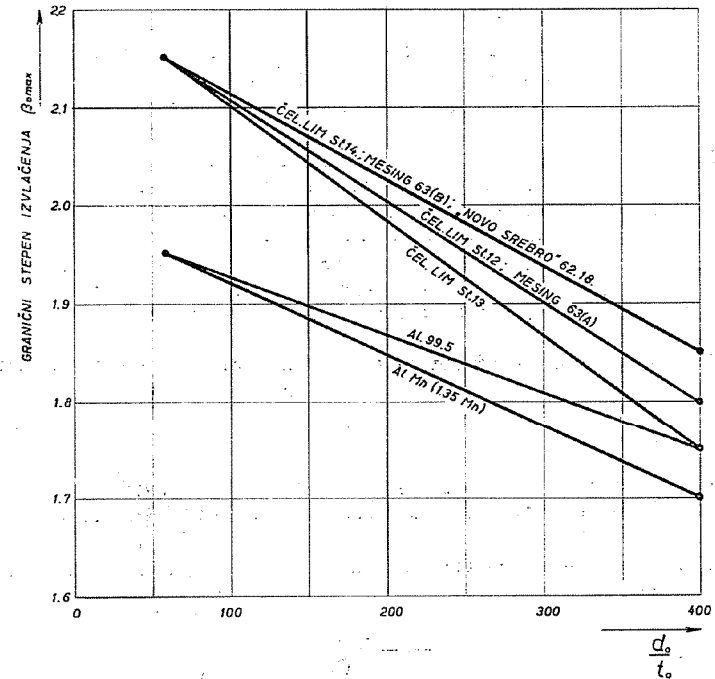
Sl. 48. Zavisnost maksimalnog aksijalnog naprezanja od odnosa d_0/t_0 pri različitim stepenima izvlačenja (za čel. lim St. 14)

To se isto može reći i za granični odnos β_{0max} .

Prema Siebel-u pritisak na držaču može se uzeti kao:

$$p = 2,5 \cdot 10^{-3} \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0,005 \frac{d_0}{t_0} \right] \sigma_m$$

(gde je σ_m zatezna čvrstoća materijala).



Sl. 49. Opadanje β_{0max} sa porastom odnosa d_0/t_0 za različite limove od čelika i obojenih metala

Zamenom u jednačini za σ_1 dobija se za momenat postizanja maksimalne sile izvlačenja:

$$\sigma_1 = e^{\mu\alpha} \cdot K_m \cdot \ln \beta' + \left[2,5 \cdot 10^{-3} \cdot e^{\mu\alpha} \cdot \frac{\mu}{2} \cdot \frac{(\beta_0^2 - 1)(\beta_0 - 1)^2}{\beta'} \cdot \sigma_m \right] \cdot \frac{d_0}{t_0} + \left[12,5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\mu\alpha} \cdot \frac{\mu}{2} \cdot \frac{(\beta_0^2 - 1)}{\beta'} \cdot \sigma_m \right] \cdot \left(\frac{d_0}{t_0} \right)^2 + K_{d_0/2} \cdot \frac{t_0}{2r_p}$$

pri čemu apostrofi u oznakama ukazuju na trenutne vrednosti promenljivih članova u posmatranom kritičnom trenutku.

Usvajajući navedene pretpostavke, može se ova jednačina napisati u jednostavnijem opštem obliku kao:

$$\sigma_1 = C_1 + C_2 \left(\frac{d_0}{t_0}\right) + C_3 \left(\frac{d_0}{t_0}\right)^2 + C_4 \left(\frac{t_0}{r_p}\right)$$

gde oznake C_i obuhvataju β' i β_0 kao parametre.

Osim toga, postoji približna veza između β' i β_0 .

$$\beta' \approx 0,77\beta_0 + 0,23$$

(do nje se dolazi na osnovu pretpostavke da se maksimum sile izvlačenja postiže kada izvlakač pređe jednu trećinu svog aktivnog hoda).

Ovi analitički odnosi su potvrđeni eksperimentalno za različite vrednosti β_0 i d_0/t_0 , uključujući i granične iznose β_{0max} (sl. 48).

Zavisnost prikazana na slici 48. je i od praktičnog značaja jer omogućuje odgovarajuću korekciju laboratorijskih rezultata u slučajevima za koje važe pretpostavke. Inače, ona predstavlja i svojevrsnu ilustraciju nesavršenosti čak i onih metoda koje na prvi pogled izgledaju potpuno simulativne.

Na sl. 49. prikazana je u istom smislu zavisnost između β_{0max} i d_0/t_0 za nekoliko različitih materijala. Pri tome su korišćeni rezultati koji se odnose na samo dva različita odnosa d_0/t_0 (64 i 400, tj lim debljine 0,5 mm i prečnici izvlakača 32 i 200 mm).

Oznake materijala korišćene na sl. 49. odgovaraju nemačkim standardima DIN.

2.1.7. Zaključak

Kritički osvrt kojim je praćen prikaz svakog od navedenih postupaka omogućuje da se na osnovu njihovog međusobnog upoređenja izvedu sledeći zaključci:

- a) Sve ove metode se zasnivaju, uglavnom, na određivanju graničnog odnosa

$$\beta_{0max} = \frac{D_{0max}}{d_0}$$

- b) Njihovi originalni oblici, kao i modifcirane varijante nisu podjednako rasprostranjene u prameni.

U evropskim zemljama najviše se koriste postupci koji su potekli od A.E.G.-metode.

U Velikoj Britaniji i drugim područjima u kojima se ne koristi isključivo metrički sistem mera najširu primenu našla je Swift-ova metoda. Međutim, ona se u manjem obimu takođe koristi i u ostalim zemljama. U tom slučaju, originalna Swift-ova metoda se obično primenjuje u istraživačke svrhe, dok se iz nje izvedene varijante koriste i za rutinska ispitivanja.

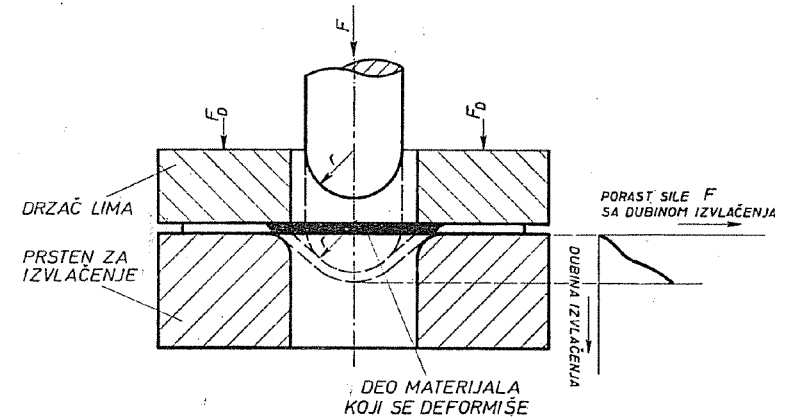
c) Navedeni postupci se ne vezuju uvek za njihove izvorne nazive (A.E.G. i dr.). Veoma često oni se svrstavaju u zajedničku grupu postupaka za izvlačenje šupljeg cilindričnog tela. Ovo je sasvim razumljivo s obzirom na varijabilnost načina njihovog izvođenja, na šta je ukazano u odgovarajućim poglavljima. To, među-

tim, ne pričinjava praktične teškoće, jer se pri ispitivanju specifičnosti i inače moraju respektovati, bez obzira na usvojene nazive za pojedine postupke.

d) Uporedivost rezultata dobijenih različitim postupcima nije potpuna čak ni onda kada su oni principijelno istovetni. Osnovni razlog za ovo je uticaj dimenzijsko—geometrijskog faktora. U okviru toga, od posebnog je značaja oblik čela izvlakača, tj. veličina zaobljenja njegovih ivica, koja znatno utiče na trenje, odnosno rezultat ispitivanja. Međutim i ostale razlike u pojedinostima različitih metoda dovode do primetnog međusobnog neslaganja rezultata (zaobljenje ivice prstena za izvlačenje, sila držanja itd.).

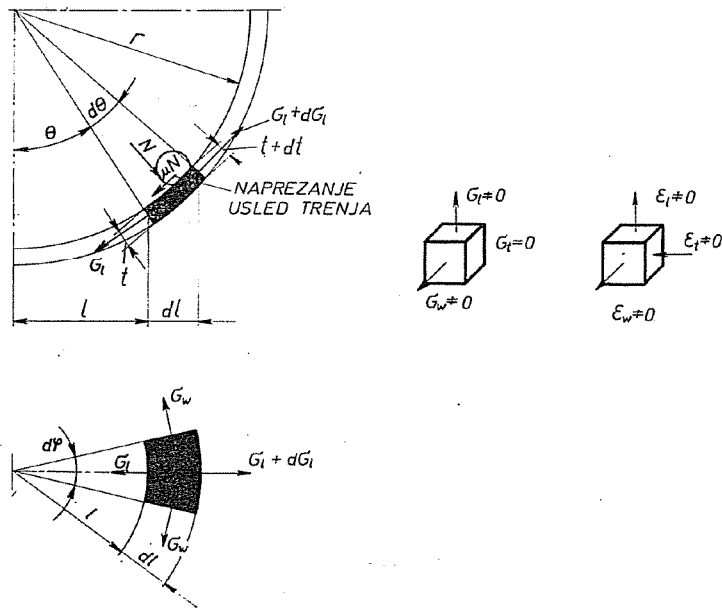
2.2. Postupci koji se zasnivaju na razvlačenju

Pod razvlačenjem treba podrazumevati oblikovanje u okviru kojeg se vrši istovremeno izduženje lima u više pravaca, pri čemu se obod tela drži čvrsto držačem (ne povlači se ka centralnom delu, kao kod čistog dubokog izvlačenja). Osnovna šema ovakvog vida deformisanja data je na sl. 50. dok su na sl. 51. prikazana odgovarajuća naprezanja i deformacije.



Sl. 50. Principijelna šema oblikovanja materijala razvlačenjem

S obzirom na položaj glavnih naprezanja najčešće se ovakva deformacija tretira kao dvoosno istezanje. Dok je kod čistog dubokog izvlačenja osnovni vid deformacije karakterisalo tangencijalno sabijanje i radijalno istezanje materijala (uz njegov postupan prelaz ka cilindričnom omotaču), kao i savijanje preko ivica alata, dotle se kod razvlačenja vrši lokalno istezanje i u uzdužnom i u tangencijalnom pravcu. Ovakva deformacija, uopšte, može biti ostvarena na različite načine: izvlakačem (čvrstim ili elastičnim) ili hidrauličnim putem. Pri ispitivanju materijala koristi se najčešće čvrsti izvlakač, odnosno uređaj za izvlačenje epruvete, dok se hidraulični medijum ređe primenjuje.



Sl. 51. Šema naprezanja i deformacija pri razvlačenju

2.2.1. Erichsen-ov postupak

A. M. Erichsen je predložio prvu metodu za ispitivanje sposobnosti dubokog izvlačenja materijala još 1912. godine, posle čega je ona svestrano prihvaćena i našla najširu primenu. Uz neznatne izmene, koje je pretrpela tek u novije vreme, ona je ostala do današnjih dana, u svetskim razmerama, najviše korišćena metoda tehnološkog ispitivanja lima, pa se može smatrati i najpoznatijom.

Ovom ispitivanju podvrgavaju se, obično, samo tanki limovi, debljine 0,2—2 mm. Izuzetno se ispituju i limovi veće debljine (v. 2.2.1.1.).

Sam postupak ispitivanja sastoji se u sledećem.

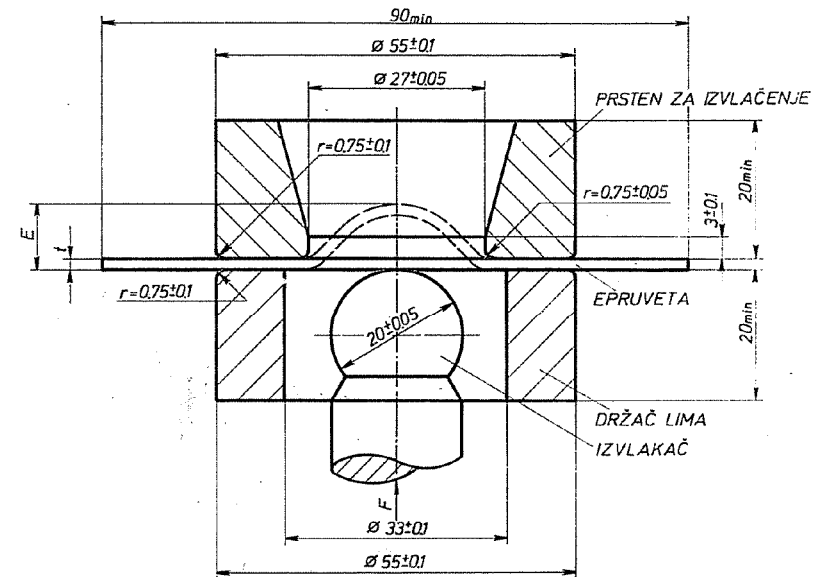
Kvadratna ploča izrađena od ispitivanog lima, dimenzija 90 mm x 90 mm (prema klasičnoj verziji 70 mm x 70 mm) postavlja se najpre u Erichsen-ov uređaj — alat (sl. 52.). Umesto kvadratne ploče može se upotrebiti i traka iste širine. Zatim se izvlakačem sfernog oblika, sa prečnikom sfere $\varnothing 20$ mm, vrši izvlačenje, tj. formiranje odgovarajućeg prostornog oblika na limu (udubljenje, odnosno ispupčenje). Pri tome se vodi računa da mesto delovanja izvlakača bude na sredini kvadratne ploče, ili najmanje 45 mm udaljeno od njene ivice. Da bi se periferni delovi ploče, koji se nalaze van izvučenog dela, održali ravnim i da bi se sprečilo njihovo znatnije uvlačenje u prsten za izvlačenje, oni su za vreme ispitivanja pritisnuti prstenastim krutim držačem lima.

Napominje se da postoje dve varijante, s obzirom na dejstvo ovog držača.

Prema klasičnom izvođenju držač na početku izvlačenja ne dodiruje površinu lima, već ostvaruje sa njom mali zazor u iznosu od 0,05 mm. Praktično se to postiže na taj način što se ploča najpre dodirne, a zatim prema postojećoj skali držač vrati natrag za 0,05 mm.

Novija varijanta, nastala 1958. godine (modificirana Erichsen-ova metoda) predviđa, međutim, čvrsto stezanje lima preko držača silom od oko 1 Mp. Time se deformacija svodi na čisto razvlačenje, tj. sprečava se ma kakvo uvlačenje perifernih zona materijala u prstenasti deo alata, a disperzija rezultata u odnosu na klasičnu metodu se smanjuje.

Rezultati koji se dobijaju prema ovim varijantama obično se sasvim ne podudaraju, ali razlike nisu velike. Jasno je da zbog prirode ovih razlika ne dolazi u obzir preračunavanje jednih rezultata u druge.



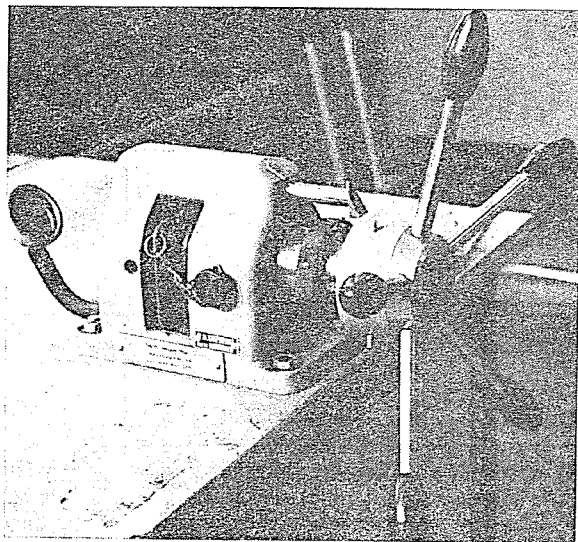
Sl. 52. Šema ispitivanja lima po Erichsen-u i osnovne dimenzije uređaja

Izvlačenje se vrši ravnomerno i lagano sa brzinom koja je propisana odgovarajućim standardom (obično u opsegu 0,1—0,3 mm/sec ili 5—20 mm/min) sve do pojave prvog znaka razaranja materijala, tj. prskotine na izvučenom delu. Da se ovaj kritični trenutak ispitivanja ne bi prekoračio, preporučuje se da se brzina smanji pri kraju ispitivanja. Na primer, može se izvlačenje vršiti brzinom od 20 mm/min do pred kraj, a onda smanjiti na oko 5 mm/min. Ipak treba reći da se ovakvo provođenje opita ne vrši uvek, jer se vrlo često ispitivanja vrše sa stalnom brzinom od početka do kraja, na primer, brzinom 10 mm/min.

Kada počne razaranje materijala dalje kretanje izvlakača se prekida i na skali aparata očitava ostvarena dubina izvlačenja. Ova dubina, izražena u mil-

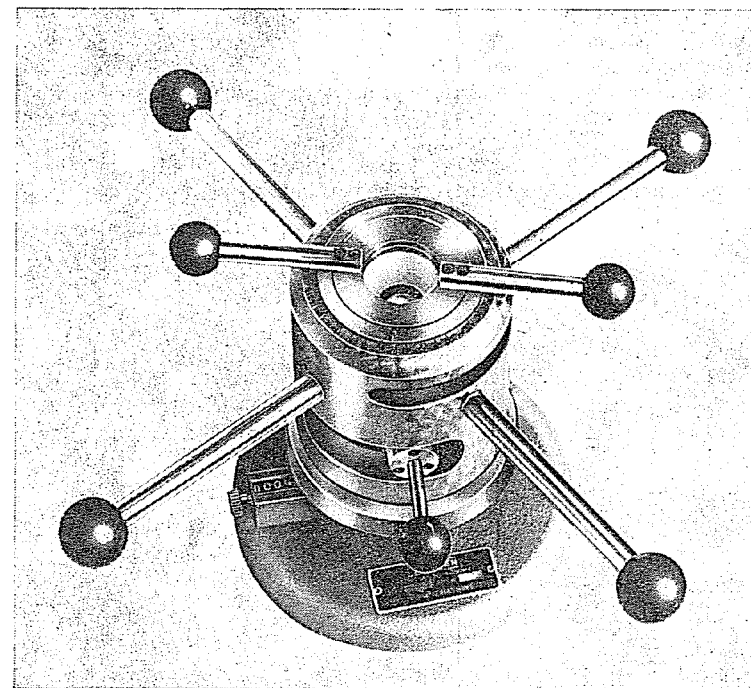
metrima, ujedno je i rezultat ispitivanja. Očitavanje postignute dubine vrši se sa tačnošću koju omogućuje skala aparata i ona obično iznosi 0,1 mm (ova tačnost je, normalno, zadovoljavajuća pri običnim ispitivanjima, ali se u okviru istraživačkih eksperimenata može zahtevati i veća tačnost, što podrazumeva korišćenje savremenih preciznih aparata).

Da bi se moment nastajanja prskotine mogao lako uočiti, uobičajeno je da se jednostavniji aparati za ispitivanje po Erichsen-u izrađuju sa pogodno postavljenim ogledalom (sl. 53. i 54.) u kome se ogleda spoljna strana izvučenog dela lima (ispupčenje), gde se najpre pojavljuje uočljiva lokalna deformacija materijala, a odmah zatim i kidanje.



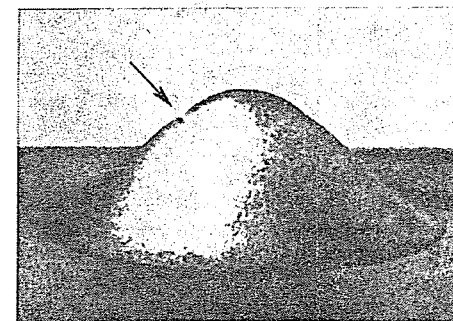
Sl. 53. Uređaj za ispitivanje po Erichsen-u sa ogledalom (Typ 05, proizvod VEB Schnittwerkzeuge- und Metallwarenfabrik Klingenthal)

S obzirom na ovakav kriterijum za definisanje završnog momenta izvlačenja, može mu se eventualno pripisati nedovoljna preciznost. Naime, opisano uočavanje prve pojave, pa i veličine, nastale pukotine dobrim delom je subjektivno. Pogotovo je to slučaj kada prelaz iz lokalizovane deformacije ka razaranju materijala nije nagao. Da bi se subjektivnost svela na što manju meru, uvedene su različite praktične preporuke u vezi sa ovim kriterijumom. Obično se smatra da izvlačenje treba produžiti dotle dok se na probnom delu ne pojavi pukotina po čitavoj debljini lima kroz koju može da prođe svetlost. Razume se da je i ovakva preporuka samo orijentaciona jer posmatranje svetlosnog procepa u toku opita nije moguće. Ipak, jedanput ustanovljen procep zadovoljavajuće veličine za neki materijal može, po spoljnjem izgledu i veličini odgovarajuće prskotine poslužiti kao uzorak na osnovu koga će se vršiti vizuelno ocenjivanje kritične veličine nastale prskotine pri daljim ispitivanjima istog materijala (sl. 55.).



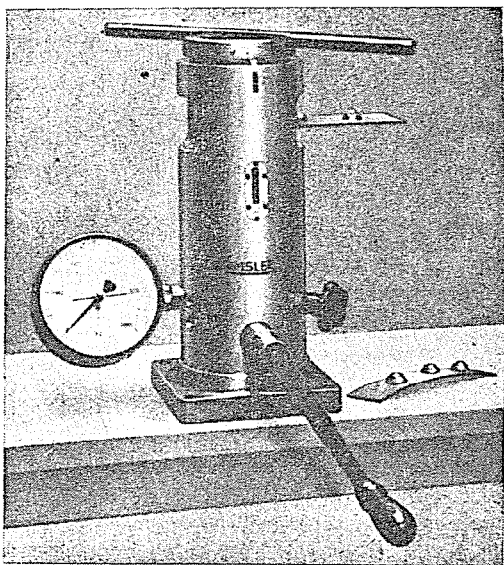
Sl. 54. Uređaj za ispitivanje po Erichsen-u (Modell 122, firme »Erichsen«)

U svakom slučaju, ova okolnost otežava primenu postupka za vrlo precizna ispitivanja koja se vrše u istraživačke svrhe, ali ne sprečava da se on pri običnim ispitivanjima, korišćenjem olakšica i preporuka, veoma uspešno primeni.



Sl. 55. Izgled izvučenog dela epruvete posle ispitivanja po Erichsen-u

Daljim usavršavanjem klasičnog Erichsen-ovog uređaja prednja nesigurnost je skoro potpuno eliminisana na taj način što je u aparat ugrađen i uređaj za merenje sile u toku izvlačenja (sl. 56. i 57.). Ovu silu u svakom momentu pokazuje kazaljka instrumenta na aparatu, a izvlačenje se nastavlja sve do momenta postizanja njenog maksimuma. Početak opadanja sile, koji se može uočiti preko početnog skretanja kazaljke na suprotnu stranu (slično kao po dostizanju maksimalne sile pri opitu zatezanjem) ujedno je i znak da izvlakač treba zaustaviti i izvršiti očitavanje postignute dubine izvlačenja na odgovarajućoj skali.

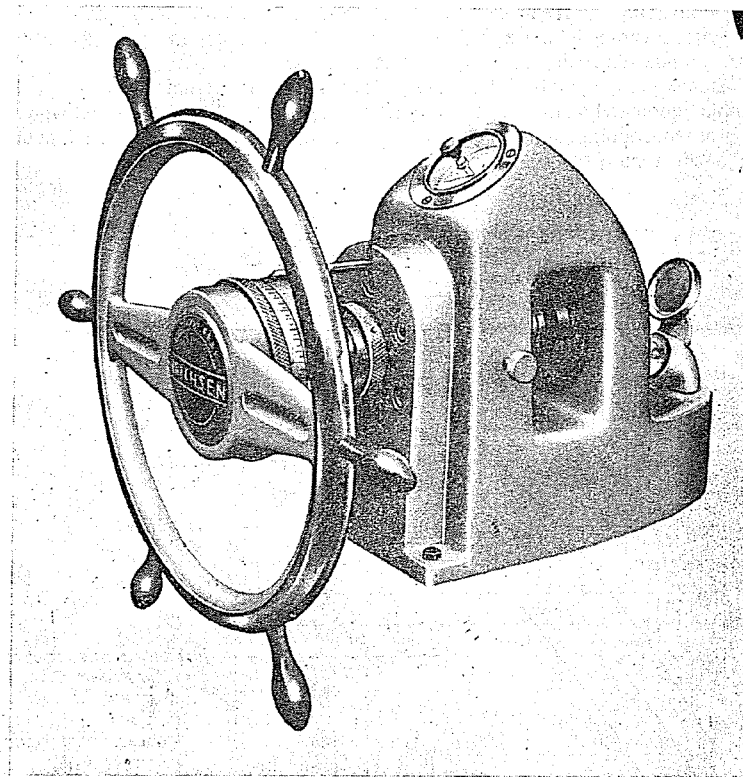


Sl. 56. Uređaj za ispitivanje po Erichsen-u (Modell EB 26 firme »Amsler«)

Nesumnjivo je da faktor subjektivnosti ni ovde nije sasvim eliminisan, jer preciznost, ipak, zavisi od sposobnosti da se trenutno uoči momenat početka opadanja sile izvlačenja. Zato su najnoviji aparati tako konstruisani da se obustavljanje daljeg izvlačenja vrši automatski, posle veoma malog (i uvek istog) opadanja sile, što omogućuju osetljivi mehaničko-elektronski delovi u aparatu. Time se postiže, kako vrhunska preciznost, tako i ustaljenost kriterijuma i potpuno eliminisanje subjektivnih grešaka koje bi inače mogle nastati.

Dimenzije funkcionalnih delova Erichsen-ovog uređaja su standardizovane. Sforni izvlakač, prsten za izvlačenje i držač lima se izrađuju od kaljenog čelika sa tvrdoćom $HV \geq 750 \text{ kp/mm}^2$, a klizne površine su polirane.

Kako na rezultate ovog ispitivanja ne utiču samo osobine materijala, već i uslovi trenja između izvlakača i lima, potrebno je obratiti pažnju na čistoću uzorka, kao i vrstu maziva koje će se primeniti radi smanjenja trenja. Klasični stan-



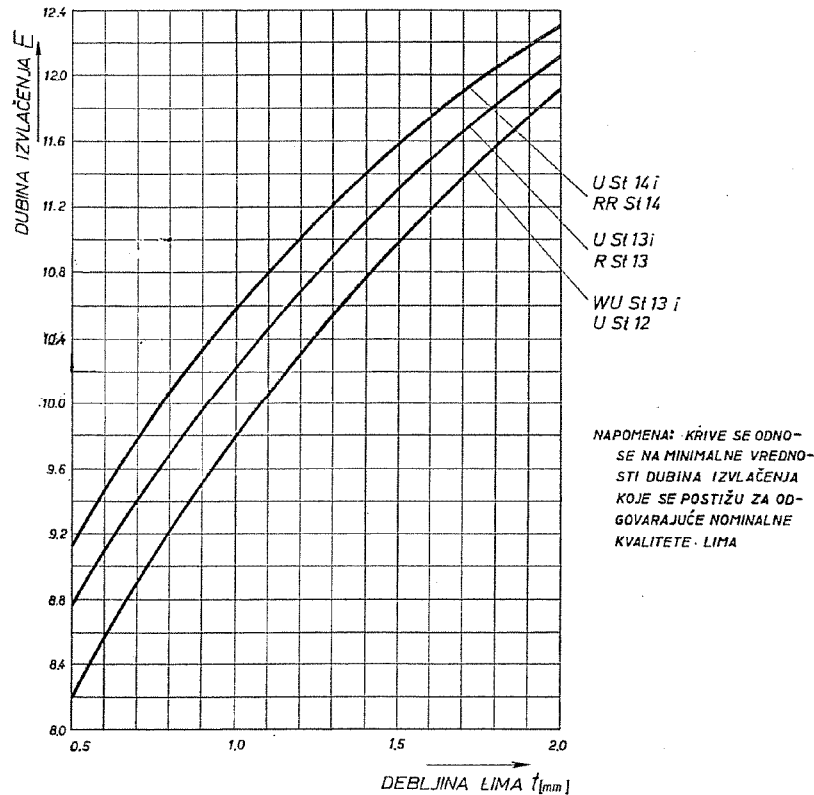
Sl. 57. Uređaj za ispitivanje po Erichsen-u (Modell 125 firme »Erichsen«)

dardi predviđali su da se koristi vazelin, ali je pomenutim izmenama 1958. godine on zamenjen grafitiranom mašću, na koju znatnije ne utiču uobičajene promene temperature. Ovo mazivo se, zapravo, sastoji od: kalcijumovog sapuna, rafinisanog mineralnog ulja i pahuljičastog grafita. Njime se premazuju pre ispitivanja obe strane epruvete i površina izvlakača. Na taj način se izbegavaju eventualne razlike koje bi mogle nastati usled primene različitih maziva, a rezultati dobijeni ispitivanjima na različitim mestima postaju uporedivi.

Za pravilnu interpretaciju ovih rezultata, odnosno njihovo korišćenje, neophodno je naglasiti da postignute dubine izvlačenja nisu zavisne samo od opšte sposobnosti materijala da se deformiše na ovaj način, već i od debljine lima. Za lim istog kvaliteta ove dubine (tj. rezultati ispitivanja po Erichsen-u) rastu sa porastom njegove debljine. Zakonitost ove promene za neke značajnije čelične limove vidi se na sl. 58. Svaka kriva odgovara jednom nominalnom kvalitetu materijala.

Uobičajeno je da proizvođači lima prezentiraju potrošaču krive minimalnih — garantovanih dubina za odgovarajuće materijale, ili ih upućuju na takve krive u standardima ili drugim izvorima.

Mesto prekida materijala, odnosno pojave pukotine, uslovljeno je načinom izvlačenja, geometrijskim odnosima i uslovima trenja. Slika 59. predstavlja dijagram promene debljine lima u pojedinim zonama izvučenog dela u zavisnosti od položaja tih zona [18].



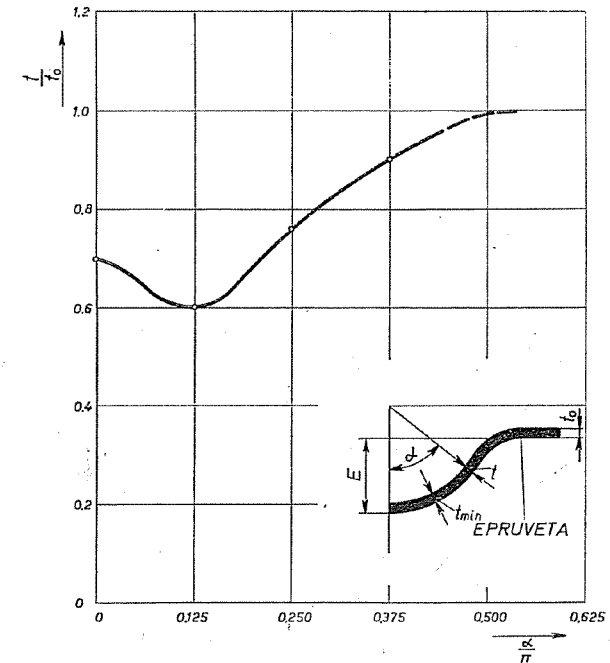
Sl. 58. Zavisnost dubine izvlačenja (Erichsen-ovog broja) E od debljine lima

Standardi predviđaju da se pri ispitivanju izvrše najmanje tri probe, ukoliko nije drukčije predviđeno (ugovorom ili dr.).

Ako bi se učinio kritički osvrt na Erichsen-ovu metodu trebalo bi prvenstveno skrenuti pažnju na činjenicu da njene mogućnosti nisu univerzalne, tj ona, kao uostalom i druge metode, ima samo ograničen značaj. To proizlazi iz načina deformisanja pri ispitivanju (razvlačenje) koji se znatno razlikuje, kako od čistog

dubokog izvlačenja, tako i od niza ostalih načina oblikovanja. Vršena su brojna istraživanja sa ciljem da se ustanovi korelacija između rezultata Erichsen-ovog i drugih opita (kao što je, na primer, granični stepen izvlačenja i dr.) i bez obzira na izvesne razlike u zaključcima do kojih su došli pojedini autori, može se reći da neka znatnija korelacija nije ustanovljena.

Načelno, treba očekivati da će rezultati ovog ispitivanja moći da pouzdanije ukažu na obradivost lima razvlačenjem ili, uopšte obradom u kojoj je dvoosno razvlačenje znatno zastupljen vid deformacije.



Sl. 59. Promena debljine lima u deformisanoj zoni epruvete (pri ispitivanju po Erichsen-u)

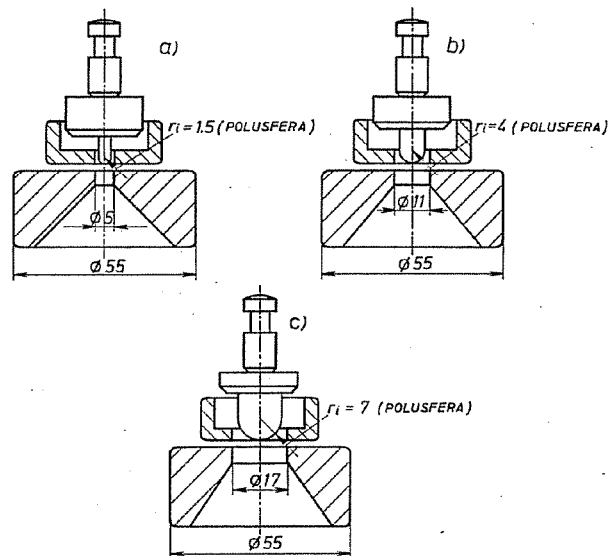
U obimnoj literaturi mogu se naći veoma različita mišljenja o značaju ove metode u poređenju sa ostalim, što govori o tome da se njeni rezultati moraju ocenjivati sa dovoljno stručne kritičnosti, a nikako se ne mogu primati kao univerzalna merila obradivosti lima dubokim izvlačenjem (što se, inače, ponekad čini u praksi). Nešto više objašnjenja u ovom smislu daće se u poglavlju IV — 2.2. gde se razmatraju stohastički odnosi između pojedinih pokazatelja obradivosti.

Uprkos svih ovih okolnosti, Erichsen-ova metoda je, uopšte posmatrano, već više od pola veka najrasprostranjenija metoda ispitivanja limova za duboko izvlačenje. Ona je izvesno vreme bila jedina koja se u tu svrhu koristila, tako da je primenjivana kao univerzalna. Kasnije uvedene metode, međutim, nisu uspele da znatnije suze područje njene praktične primene. Razlozi za to su brojni, a među

njih spadaju, pre svega: jednostavnost i brzina postupka ispitivanja, kao i pripreme uzoraka, relativno niska cena uređaja, velika rasprostranjenost, odnosno duga tradicija koja vodi izvesnoj inertnosti u primeni, uključivanje metode u skoro sve standarde industrijskih zemalja, zadovoljavajuća relevantnost dobijenih rezultata u mnogim slučajevima, itd. Zato treba očekivati da će se ova metoda i u buduće zadržati u sadašnjem vidu, tj. da neće pretrpeti u dogledno vreme neke značajnije izmene.

2.2.1.1. Ostale varijante i neke uzgredne mogućnosti

Pored prikazanog i široko primenjenog Erichsen-ovog postupka, ponekad se on izvodi uz korišćenje izvlakača manjih dimenzija. To je slučaj kada se ispituju limovi, odnosno trake, čija je širina ispod 90 mm. Stoga noviji aparati za ispitivanje po Erichsen-u imaju garnituru promenljivih alata, kako bi se omogućilo ispitivanje sfernim razvlačenjem u svim varijantama. Skice tri takva promenljiva alata sa minijaturnim utiskivačima date su na sl. 60., a odnose se na aparat istočnonemačke firme Feinmechanik-Optik (Typ 05).



Sl. 60. Promenljivi alati za ispitivanje po Erichsen-u sa izvlakačem čiji su prečnici manji od normalnih

Izvlakač prečnika $\varnothing 14$ mm odnosi se na najmanju širinu ploče — epruvete ili trake 45 mm, a primenjuje se za debljine lima od 0,2—1,5 mm.

Podaci za druga dva izvlakača su sledeći:

$\varnothing 8$ mm — najmanja širina epruvete 30 mm, debljina lima 0,2—1,5 mm.

$\varnothing 3$ mm — najmanja širina epruvete 13 mm, debljina lima 0,2—1 mm.

Na sličan način firme Amsler, Erichsen i dr. uz svoje aparate isporučuju, pored elemenata za normalno izvlačenje (izvlakačem prečnika $\varnothing 20$ mm), takođe i promenljive elemente za ispitivanje uskih traka (sl. 61.) sa sledećim osnovnim podacima (prema standardu DIN 50102):

a) prečnik izvlakača $\varnothing 3$ mm, prečnik otvora prstena za izvlačenje $\varnothing 5$ mm, širina traka 13—30 mm, debljina lima 0,1—0,75 mm;

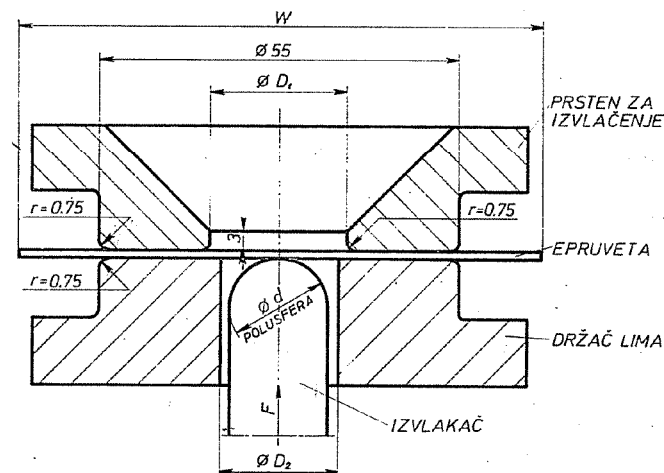
b) prečnik izvlakača 8 mm, prečnik otvora prstena za izvlačenje $\varnothing 11$ mm, širina traka 30—55 mm, debljina lima 0,2—1,0 mm;

c) prečnik izvlakača 15 mm, prečnik otvora prstena za izvlačenje $\varnothing 21$ mm, širina trake 55—90 mm, debljina lima 0,2—2,0 mm.

Kao što je napomenuto, novijim standardima predviđeno je ispitivanje Erichsen-ovim postupkom i limova čija je debljina veća od 2 mm.

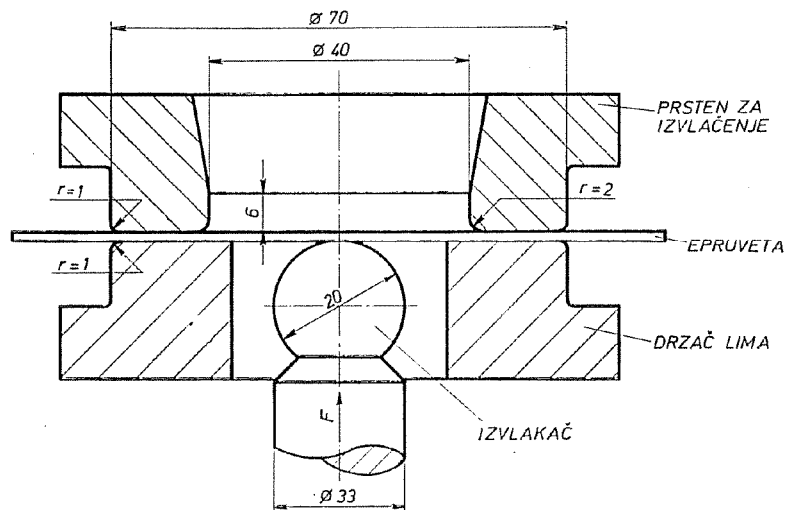
Normalno, pri ovome dolaze u obzir debljine između 2 i 3 mm, ali izuzetno, prema posebnoj potrebi i eventualnom dogovoru mogu se ispitivati još deblji limovi (do 6 mm).

Dimenzije prstena za izvlačenje i držača lima su pri tome unekoliko izmenjene u odnosu na normalan Erichsen-ov uređaj (sl. 62). Širina trake, odnosno kvadratnog uzorka, treba da bude između 90 mm i 100 mm.



ŠIRINE LIMA W I DEBLJINE t	DIMENZIJE ALATA		
	d	D ₁	D ₂
55 ≤ W < 90 0,2 ≤ t ≤ 2	15	21	18
30 ≤ W < 55 0,2 ≤ t ≤ 1	8	11	10

Sl. 61. Osnovne dimenzije uređaja za ispitivanje po Erichsen-u limova čija je širina manja od 90 mm (prema standardu DIN-50102)



Sl. 62. Osnovne dimenzije uređaja za ispitivanje po Erichsen-u limova čija je širina veća od 90 mm, a debljina od 2 mm do 3 mm

Napominje se da je, ne menjajući Erichsen-ov princip opita, uvedeno više specijalnih verzija koje se od Erichsen-ove razlikuju, uglavnom, po izvesnim odstupanjima prečnika izvlačka i prstena za izvlačenje. Najpoznatije među njima su Guillery i Persoz u Francuskoj, Amsler u Švajcarskoj, Avery u Engleskoj i Olsen u SAD (u ova dva zadnja slučaja mere su u inčima).

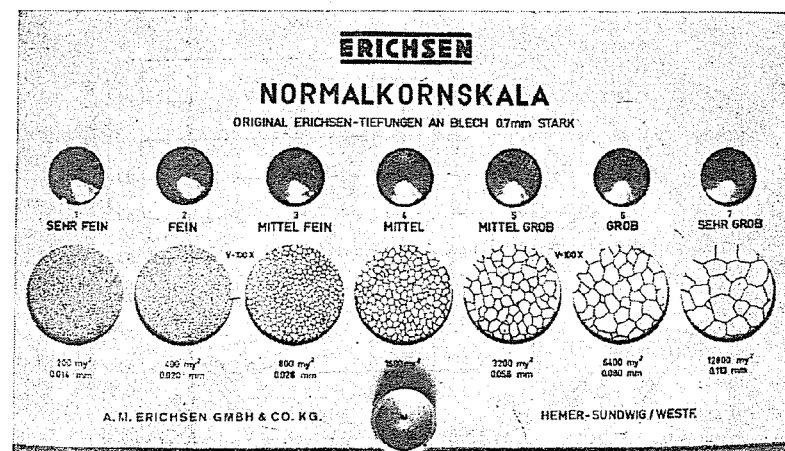
Najzad, pri Erichsen-ovom opitu mogu se dobiti i neki propratni rezultati.

Tako se na osnovu veće ili manje površinske hrapavosti izvučenog dela može izvesti određen zaključak o prosečnoj veličini strukturnog zrna u materijalu, odnosno o očekivanom izgledu površine delova koji će se od lima izrađivati.

Firma »Erichsen«, na primer, izrađuje specijalnu skalu (sl. 63) koja treba da olakša ovakvo ispitivanje. Ona se sastoji od 7 različitih uzoraka izvučenih normalnim Erichsen-ovim postupkom i odgovarajućih metalografskih fotografija mikrostrukture (sa uvećanjem 100 puta). Svakom uzroku, odnosno fotografiji, odgovara po jedna od sledećih krupnoća zrna: 0,014; 0,020; 0,028; 0,040; 0,056; 0,080 i 0,113 mm (što odgovara površinama od: 200; 400; 800; 1600; 3200; 6400 i 12800 μ^2). Na taj način se sravnjivanjem izvučenog dela sa najslabijim na skali može sa nje direktno očitati veličina zrna, bez razaranja materijala, nagrizanja i mikroskopskog posmatranja.

Dalje, oblik i položaj prskotine mogu ukazati na eventualnu anizotropiju u ravni lima. Međutim, kvantitativni podatci o njoj se na taj način ne mogu dobiti, već samo izvesne komparativne indikacije. Uopšteno posmatrano, kada je lim ravnomernog kvaliteta treba očekivati da će se prskotina formirati pravilno, u kruž-

noj formi, u oblasti prelaska sfernog oblika izvučenog udubljenja ka njegovom konusnom delu. Nasuprot tome, prskotina koja nije kružna (a često je i izlomljena) i koja se obično prostire u pravcu valjanja lima, ukazuje na njegov niži kvalitet. Takođe se smatra nepovoljnim i grubo zrno u oblasti prskotine.



Sl. 63. Uporedna skala izgleda površine izvučenih delova i odgovarajuće krupnoće zrna

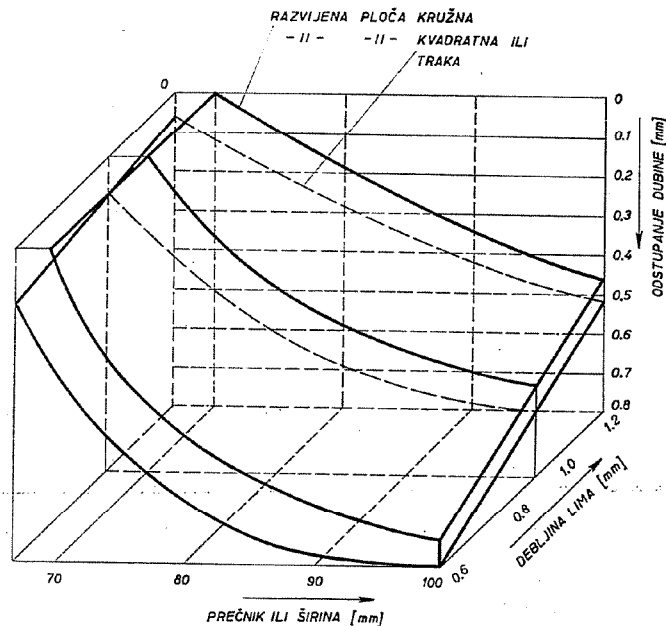
2.2.1.2. Tačnost i uporedivost rezultata ispitivanja po Erichsen-u

Na osnovu iznetih podataka i opisa Erichsen-ovog postupka ispitivanja može se izvesti zaključak da na iznos dobijenih rezultata utiče više faktora, kao što su: dimenzije ravnog uzorka (širina ploče ili trake), debljina lima, eventualna deformisanost uzoraka, pritisak držača na obodu, dimenzije i površinska hrapavost alata, način i vrsta podmazivanja, brzina izvlačenja, usvojen kriterijum razaranja (vizuelna ocena momenta nastajanja pukotine, početak opadanja sile izvlačenja i dr.), vrsta mašine (s obzirom na način rada, tačnost, osetljivost, ...), kao i subjektivni uticaj lica koje vrši ispitivanje.

Međutim, korišćenjem odgovarajućih standarda uticaj najvećeg broja ovih faktora može se neutralisati ili svesti na iznos koji je sa praktičnog stanovišta zanemarljiv.

Mada standardi predviđaju, pored ostalog, oblik i početne dimenzije uzorka za ispitivanje (odnosno trake) neće biti suviše ako se napomene da sa porastom ovih dimenzija opada uticaj početnog oblika na rezultat. Istraživanja su pokazala [16] da se za isti materijal dobijaju nešto veće dubine izvlačenja kada se upotrebe uzorci u vidu kružnih ploča, nego kada su te ploče kvadratne (sa stranama kvadrata jednakim prečnicima kružnih ploča) ili kada se ispituje materijal u vidu traka. Ove razlike su dobijane u sve većim iznosima kada su dimenzije uzoraka smanjivane (sl. 64).

Nezavisno od toga što se kružni uzorci uopšte ne primenjuju, ovi podatci ukazuju na značaj dimenzija uzoraka, odnosno objašnjavaju potrebu da se za trake uže od 90 mm ispitivanja vrše sa manjim izvlakačima.

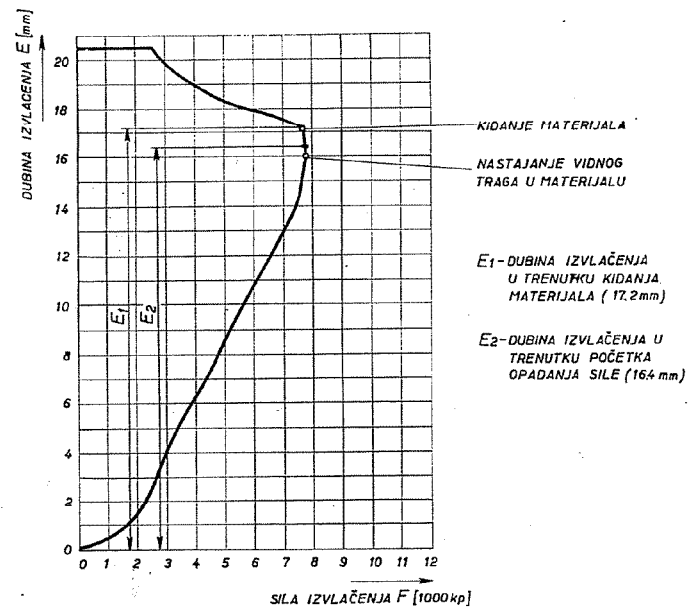


Sl. 64. Uticaj oblika i dimenzija razvijenih ploča na dubinu izvlačenja pri Erichsen-ovom opitu (prema Jentet-u)

Sistematskim istraživanjima ustanovljeno je, dalje, da na neujednačenost rezultata ispitivanja jednog određenog lima, pod propisanim uslovima ali na različitim mašinama, uglavnom utiče vrsta mašine. Ilustracije radi, navodi se da je u okviru jednog takvog istraživanja konstatovano da se pri ispitivanju na različitim mašinama (slučajno odabranim) 95% rezultata nalazi u pojasu širine $\pm 0,6$ mm, dok je za slučaj ispitivanja na istoj mašini taj pojas bio $\pm 0,1$ mm, što nedvosmisleno govori o stepenu uticaja primenjene mašine u odnosu na ostale uticaje.

Noviji istraživački naporu idu uopšte za tim da se što bolje ovlada svim faktorima koji se odražavaju na tačnost i mogućnost merenja značajnijih veličina i njihovih odnosa. To je dovelo do toga da se danas izrađuju mašine koje automatski vrše grafičko registrovanje odnosa između sile izvlačenja i dubine prodiranja izvlakača. Pored oblika ove krive, od posebnog je značaja što ona pokazuje da se momenat početka pada sile i momenat pojave pukotine mogu primetno razlikovati (i za nekoliko desetih delova mm). To takođe ukazuje na jedan od izvora razlika u rezultatima koji se dobijaju na različitim mestima i korišćenjem različitih kriterijuma (sl. 65).

Vizuelno uočavanje nastajanja pukotine skopčano je sa dosta nesigurnosti, ne samo zbog prirodne neujednačenosti subjektivnih kriterijuma, već i objektivnih teškoća s obzirom da veličina, oblik i postepenost nastajanja pukotine mogu jako varirati u zavisnosti od vrste materijala.



Sl. 65. Grafički odnos između sile i dubine izvlačenja, automatski registrovan pri ispitivanju toplo valjanog čeličnog lima debljine 5 mm (prema Michaelis-u)

2.2.1.3. Standardi

S obzirom na veliku rasprostranjenost Erichsen-ovog opita (nem. — Erichsen — Tiefungsversuch, engl. — The Erichsen Test, rus. — Метод выдавливания по Эрихсену, itd.) navode se oznake različitih nacionalnih i međunarodnih standarda kojima su propisani njegovo izvođenje i ostali značajni podatci.

- JUS C.A4.021. (jugoslovenski)
- DIN 50101 (nemački)
- DIN 50102 (nemački)
- ISO/R 149-60 (internacionalni)
- EURONORM 14-58 (internacionalni)
- EURONORM 14-67 (internacionalni)
- GOST 10510 (sovjetski)
- UNI 3037 (italijanski)
- UNE 7080 (španski)
- NFA 03602 (francuski)

BS 3855 : 1965 (britanski)
 JIS Z 2247 (japanski)
 MSZ 5704-67 (mađarski)

2.2.2. Postupci slični Erichsen-ovom

Postoji više primenjenih postupaka koji se u principu ne razlikuju od Erichsen-ovog, već samo u iznosima nekih dimenzija uređaja za ispitivanje. U daljem se kratko navode samo osnovne informacije za neke od njih.

2.2.2.1. Avery — postupak

Primenjuje se sličan alat kao i za Erichsen-ov opit, samo je širina uzorka 2 inča. Prsten za izvlačenje i prstenasti držač su reversibilni i imaju jednu stranu glatku, a drugu hrapavu. Opit se najpre vrši prema klasičnom Erichsen-ovom principu (sa glatkim stranama i izvesnim uvlačenjem perifernih delova), a zatim se izvlačenje vrši na istom limu sa primenom hrapavih strana (čvrsto stezanje). U ovom slučaju postiže se nešto manja dubina nego u prvom. Za rezultat ispitivanja uzima se razlika između ove dve dubine.

2.2.2.2. Olsen-ov opit

Prečnik sfernog utiskivača je $\frac{7}{8}$ " , a unutrašnji prečnik prstena može biti različit i to:

$$1'' \text{ za debljine limova do } \frac{1''}{16};$$

$$1\frac{1''}{16} \text{ za debljine limova do } \frac{1''}{16} - \frac{1''}{8};$$

$$1\frac{1''}{4} \text{ za debljine limova do } \frac{1''}{8} - \frac{3''}{16};$$

$$1\frac{1''}{2} \text{ za debljine limova do } \frac{3''}{16} - \frac{1''}{4}.$$

Rezultat predstavlja postignutu dubinu utiskivanja (pri razaranju materijala) izraženu u hiljaditim delovima inča.

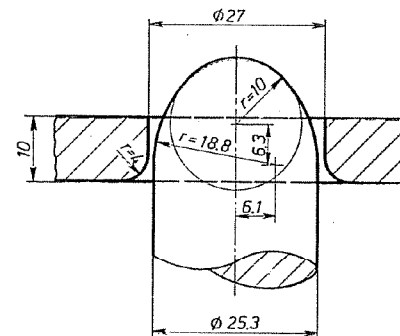
Slično kao i kod Erichsen-a, rezultati su zavisni od debljine lima.

2.2.2.3. Erichsen-ov opit sa elipsoidnim izvlačenjem

Ovaj opit se relativno malo primenjuje. Izvodi se na uređaju koji se inače koristi za uobičajen Erichsen-ov opit (sa sfernim ili polusfernim izvlačaćem), samo što se upotrebljava izvlačač čije je čelo izrađeno u obliku elipsoida. Držač dozvoljava da u toku opita dođe do izvesnog manjeg pomeranja lima na obodu (slično kao kod prvobitnog Erichsen-ovog opita).

Na uvođenju i proučavanju ovog opita radili su, pored ostalih, Pome-y, Royez i Dhez (Firma »Renault«), koji su primenjivali izvlačač prema sl. 66.

Međutim, dobijeni rezultati nisu pokazali prednost u odnosu na Erichsen-ov opit sa sfernim izvlačaćem, tako da ovaj postupak nije našao širu primenu.



Sl. 66. Izvlačač sa elipsoidnim čelom prema Pomey-u, Royez-u i Dhez-u

2.2.2.4. Guillery opit

Upotrebljava se kvadratni uzorak lima dimenzije 90x90 mm koji se čvrsto steže u alat i izvlači sfernim izvlačaćem prečnika 20 mm. Unutrašnji prečnik prstena za izvlačenje je $\varnothing 50$ mm. Izvlačač se pokreće hidrauličnim pogonom.

2.2.3. Postupak K.W.I.* (ili postupak Siebel-a i Pomp-a)

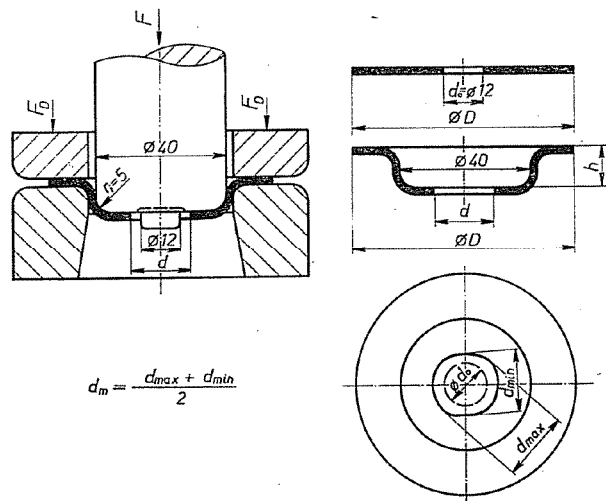
Ovo ispitivanje se vrši (prema preporuči Siebel-a i Pomp-a od 1947. godine) pomoću specijalnog alata za čisto duboko izvlačenje. Epruveta od ispitivanog materijala se izrađuje u vidu kvadratne ili kružne ploče u čijoj je sredini prosečen kružni otvor prečnika $\varnothing 12$ mm (sl. 67). Ivice ovog otvora moraju biti kvalitetno obrađene. Kvadratni početni oblici uzorka su pogodniji sa stanovišta izrade, dok kružni oblici daju pouzdanije rezultate. Prečnik izvlačača je oko tri puta veći od prečnika otvora.

Obod ploče se najpre čvrsto steže prstenastim držaćem lima tako da je njegovo povlačenje u prsten za izvlačenje sprečeno. Posle toga, odgovarajućim izvlačaćem vrši se izvlačenje (tačnije, razvlačenje) epruvete sve do momenta pojave prvih radijalnih pukotina na ivici njenog unutrašnjeg otvora. Dno epruvete je, zapravo, izloženo jakom razvlačenju (pojavljuju se zatežuća radijalna i tangencijalna naprezanja), usled čega se povećava prvobitni prečnik prosečenog otvora d_0 sve dok se ne pojave prvi znaci razaranja, pri čemu prečnik dostiže veličinu d_m . Istina, o prečniku d_m odnosno zadržavanju kružnog oblika otvora može se govoriti jedino u slučaju izotropnog materijala. U protivnom, ukoliko je u materijalu izražena anizotropija osobina u ravni, ovaj oblik se deformiše (v. sl. 67). Tada se do merodavne vrednosti d_m dolazi preko aritmetičke sredine najvećeg i najmanjeg izmenenog prečnika otvora posle opita, tj.

$$d_m = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2}$$

Kriterijum za ocenu kvaliteta lima ispitivanog po ovom postupku može, uglavnom, biti dvojak:

*) K.W.I. — Kaiser Wilhelm Institut für Eisenforschung.



$$d_m = \frac{d_{max} + d_{min}}{2}$$

Sl. 67. Izvođenje K.W.I. — opita i dimenzije epruvete pre i posle opita

a) Dubina izvlačenja h, izražena u mm;

b) Odnos promene prečnika razvučenog otvora i njegovog početnog iznosa

$$\frac{d_m - d_0}{d_0} \cdot 100\% \text{ ili još jednostavnije } d_m / d_0.$$

Pored toga, opitom se može ustanoviti stepen neujednačenosti osobina lima u različitim pravcima (anizotropija u ravni) kao:

$$\frac{d_{max} - d_{min}}{d_m}$$

Ovaj stepen na izvestan način takođe ukazuje na pogodnost materijala za ovakvo oblikovanje i to tako što treba očekivati da će ta pogodnost rasti sa opadanjem stepena neujednačenosti.

Stoga se prema nekim predlozima [16, 18], radi brojčanog izražavanja rezultata opita, sva tri kriterijuma mogu kombinovati u karakteristiku

$$g = h \cdot \frac{d_m}{d_0} \cdot \frac{d_m}{d_{max} - d_{min}} = \frac{h (d_{max} + d_{min})^2}{4d_0 (d_{max} - d_{min})}$$

Međutim, ovakav pokazatelj bi se morao vrlo obazrivo koristiti, s obzirom da gornji izrazi mogu poprimiti izuzetno velike iznose, a za slučaj izotropnog materijala ($d_{max} = d_{min}$) ne bi imali ni realnog smisla. To istovremeno znači da je stepen neujednačenosti, koji eventualno može samo indikativno ukazati na sposobnost materijala da se duboko izvlači, u ovakvom izrazu čak favorizovan. Osim toga, pri korišćenju ovakvog kriterijuma mora se voditi računa da početni oblik probnog

uzorka bude kružni. Najme, u slučaju kvadratnog uzorka ovalnost otvora ($d_{max} \neq d_{min}$) može izazvati baš ovakav njegov oblik, nezavisno od stanja anizotropije materijala, što se ne može uzeti kao kriterijum obradivosti.

Sièbel i Pomp su takođe predložili da se ovaj opit koristi i radi određivanja zatezne čvrstoće (što je posebno pogodno kada su u pitanju vrlo tanki limovi, koje je teško ispitivati uobičajenim opitom zatezanjem), pri čemu su pošli od relacije

$$\sigma_m = \frac{F_m}{d_0 \pi t_0}$$

gde je σ_m zatezna čvrstoća, a F_m maksimalna sila izvlačenja koja se pojavljuje na izvlačkaču.

Osnovna teškoća pri praktičnom izvođenju ovog opita jeste uočavanje momenta pojave prve pukotine, pogotovo onda kada se ona pojavljuje postepeno. Time se dovodi u sumnju i vrednost rezultata ispitivanja.

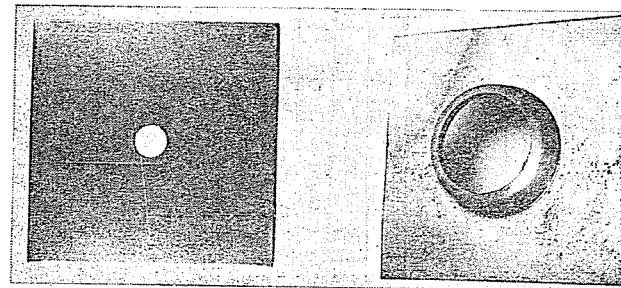
U novije vreme vrše se ispitivanja sa epruvetama na kojima su prethodno bušenjem izrađeni otvori koji ne moraju uvek biti prečnika 12 mm.

U primeni su sledeće dimenzije:

- Prečnik otvora 7,5 mm
 - za limove debljine 0,2—1,0 mm
 - za širine uzorka od 45—70 mm
- Prečnik otvora 12 mm
 - za limove debljine 0,2—2,0 mm
 - za širine uzorka 70—100 mm
- Prečnik otvora 14 mm
 - za limove debljine 1,0—4 mm
 - za širine uzorka preko 100 mm.

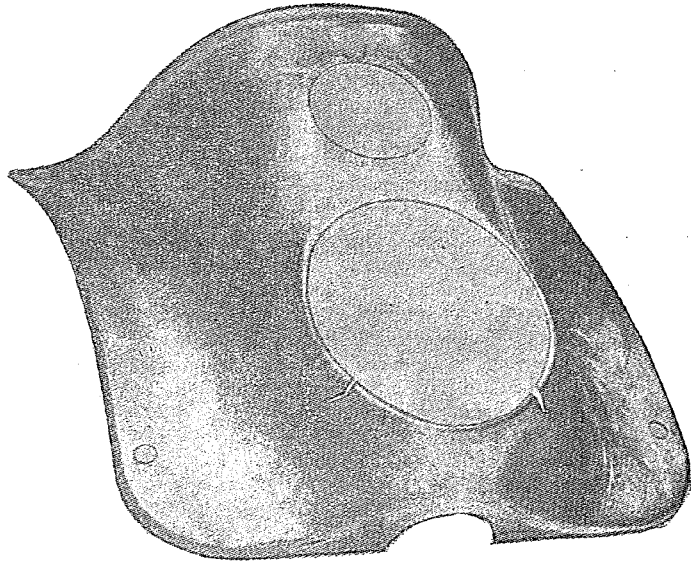
Osim toga, oblik epruvete pre izvlačenja nije uvek kružni, već može biti i kvadratni, što znatno pojednostavljuje čitav postupak.

Na sl. 68 je prikazan izgled izbušenog uzorka, pripremljenog za izvlačenje, kao i izvučen deo posle pojave prskotine.



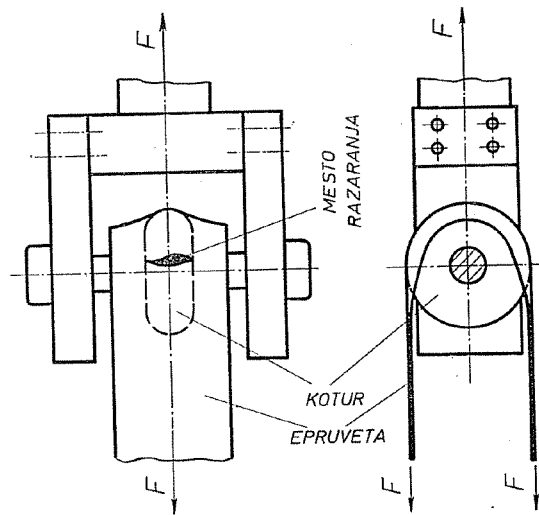
Sl. 68. Izgled kvadratne epruvete pre i posle izvlačenja po K.W.I. — postupku

inače, sam postupak nije našao naročito široku primenu. On bi svakako bio od znatne koristi u slučajevima ispitivanja limova namenjenih izradi delova sličnih primenjenoj epruveti (izvučenoj), tj. onih kod kojih granični stepen izvlačenja određuju, prvenstveno, naponski uslovi na ivici prosečnog otvora (sl. 69).



Sl. 69. Deo čiju obradivost ograničavaju naponski uslovi na ivici prosečnog otvora

2.2.4. Güth-ov opit



Sl. 70. Šema uređaja za ispitivanje po Güth-u

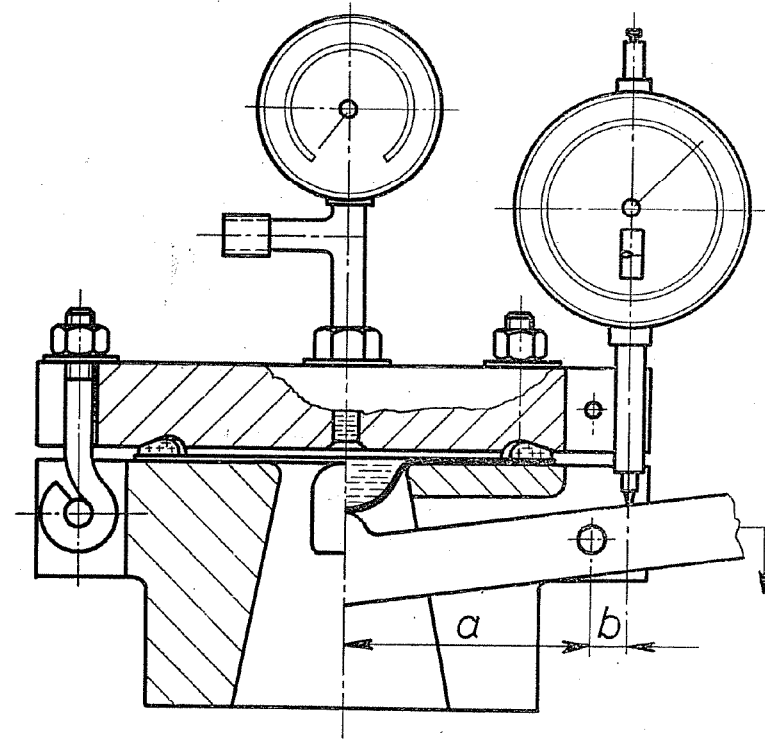
Güth je predložio postupak za ispitivanje limova koji se obrađuju klasičnim načinom razvlačenja.

Ispituje se traka dužine 500 mm i širine 90 mm na uređaju postavljenom na mašinu za ispitivanje materijala zatezanjem (sl. 70).

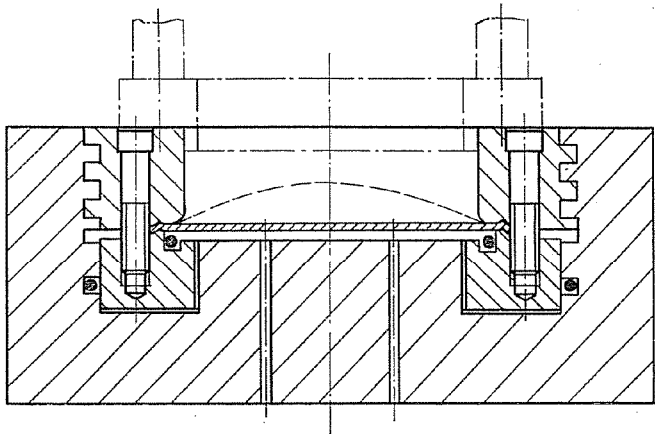
Dva kraja epruvete učvršćuju se za jedan kraj mašine, a na njen srednji deo se dejstvuje izvlakačem uređaja, koji je izrađen u obliku profilisanog točkiča. On se po potrebi može menjati, tj. mogu se primenjivati izvlakači različitih profila. Ovaj deo se pomera u toku opita vršeći razvlačenje materijala sve do pojave prve pukotine na njemu. Kao rezultat opita uzima se postignuta širina ispučenja na limu ili njegova visina. Na ovaj način se prvenstveno može dobiti podatak o obradivosti materijala na presama za razvlačenje.

2.2.5. Opit hidrauličnim razvlačenjem (prema Olsen-u, Jovignot-u i dr.)

U ovom slučaju se ne radi o napred opisanom Olsen-ovom opitu sa čvrstim sfernim izvlakačem, već se biaksijalno razvlačenje lima postiže delovanjem hidrauličnog medijuma (ulja) pod pritiskom.



Sl. 71. Uređaj za hidraulično razvlačenje (prema Pankin-u)



Sl. 72. Šema uređaja za ispitivanje hidrostatičkim razvlačenjem

Međutim, ovaj opit nije rasprostranjen, a njegova primena se pretežno odnosi na istraživačku delatnost. U tom smislu, on je posebno pogodan za iznalaženje krivih tečenja materijala (zavisnosti između stvarnih naprezanja i stvarnih deformacija) pri dvoosnom razvlačenju, jer je primenom hidrauličnog medijuma izbegnut uticaj trenja između izvlakača, prstena i lima. Treba primetiti da se na taj način dobijaju uopštene zavisnosti između efektivnih naprezanja i deformacija $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ koje su teorijski invarijantne u odnosu na naponsko-deformaciono stanje.

Osim toga, hidrauličnim izvlačenjem mogu se dobiti i podatci o: »figurama razvlačenja«, uključcima, poroznosti i drugim greškama u građi metala.

U toku opita se kružna ploča (epruveta) čvrsto steže koncentričnim prstenastim držačem, a onda se sa jedne strane izlaže dejstvu tečnosti pod pritiskom.

Slobodan prečnik epruvete može biti različit u zavisnosti od toga sa kojim ciljem se ispitivanje vrši. Naime, bez obzira na izvorni naziv postupka, različiti autori su u njega unosili povremeno svoje verzije.

Tako, na primer, Mellor i Loxley [19] preporučuju prečnik 10".

Prethodno se na ploču može naneti podeona mreža u vidu malih krugova ili kvadrata (prečnik ovih krugova prema nekim autorima može biti 0,2") radi praćenja deformacija pojedinih zona u toku oblikovanja.

Najveća plastična deformacija se događa u srednjoj zoni ploče, a zatim ona opada idući ka periferiji. Lokalizovanje deformacije se pojavljuje posle znatno veće deformacije nego što je to slučaj pri ispitivanju istog materijala zatezanjem.

Pri ispitivanju se određuje maksimalni hidrostatički pritisak koji može podneti ispitivani materijal, kao i dubina izvlačenja u momentu postizanja tog maksimuma. Osim toga, može se pritisak registrovati u nizu faza izvlačenja, a takođe i deformacije na nanešenoj mreži, pa tako dobiti i grafički predstaviti njihova međusobna zavisnost.

Ako se izmere debljina lima i radijus zaobljenja kupole koji je formirao materijal pri deformisanju, onda se lako može izračunati zatežuće naprezanje u tangencijalnom pravcu na vrhu kupole. Naime, postoji jednačina ravnoteže:

$$p \cdot \frac{\rho^2 \pi}{2} = \sigma \rho \pi t$$

gde je p hidrostatički pritisak, ρ poluprečnik krivine kupole, a t stvarna debljina lima.

Iz ove jednačine sledi da je zatežuće naprezanje

$$\sigma = \frac{p \rho}{2 t}$$

S obzirom da je epruveta sa slobodnim prečnikom od 10" relativno velika, našlo je primenu i minijaturno ispitivanje prema Jovignot-u. Ono se izvodi hidrauličnim razvlačenjem u prstenastom alatu sa otvorom prečnika $\varnothing 50$ mm, ali se primenjuju i drugi prečnici.

Materijal se razvlači do pojave razaranja, a zatim se određuje Jovignot-ov koeficijent kao odnos

$$C = \frac{h^2}{r^2}$$

gde je h visina izvučenog dela, a r unutrašnji poluprečnik alata.

Firma »Erichsen« izrađuje dodatni uređaj za hidraulično izvlačenje koji se može koristiti u univerzalnoj opitnoj mašini. Najveći prečnik koji se pri tome može postići, u do sada izvedenim mašinama, je 100 mm.

Poznata su takođe i izvođenja (tzv. poluindustrijska) sa prečnikom od 200 mm [14] i dr.

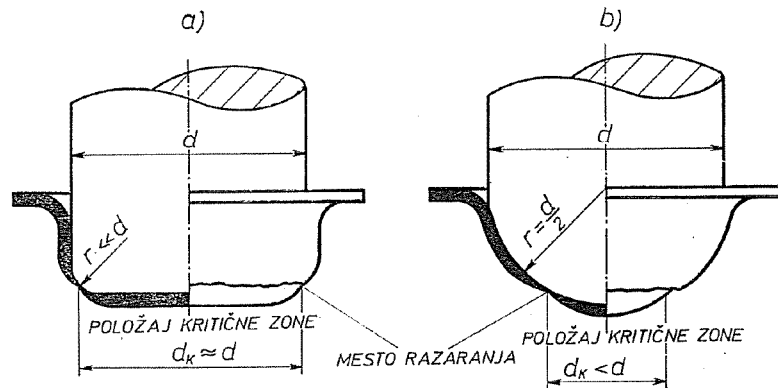
2.3. Uticaj trenja na položaj mesta razaranja pri razvlačenju i čistom dubokom izvlačenju

Položaj mesta razaranja materijala (prskotine) pri prekoračenju njegove čvrstoće u nekom određenom slučaju (ispitivanja ili stvarne obrade) zavisice, prvenstveno, od uslova trenja između lima i izvlakača. Ako se trenje smanjuje (usled boljeg podmazivanja, smanjenja hrapavosti, ili promene oblika čela izvlakača) položaj prskotine se pomera više ka sredini izvlakača, a deformacija (razvlačenje) se u znatnom iznosu vrši po čitavom njegovom čelu (dakle, nelokalizovano). Sa porastom trenja, međutim, on se pomera dalje od sredine i razvlačenje se vrši u sve manjoj meri, jer je otežano klizanje metala preko čela izvlakača i prskotina je više lokalizovana.

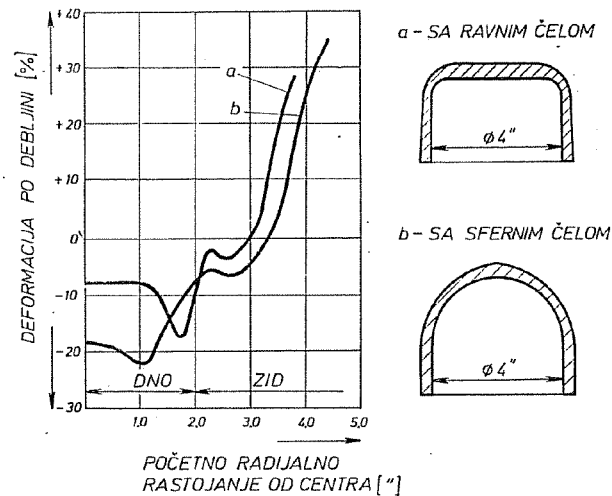
Na primer, pri čistom razvlačenju, kakvo se događa u toku Erichsen-ovog opita, položaj prskotine će zavisiti direktno od trenja (sl. 73). Sa smanjenjem zaobljenja čela izvlakača rašće uopšte i trenje na njemu, tako da se u slučaju ravnog čela prskotina pomera sasvim ka periferiji, kao što je to slučaj kod čistog dubokog izvlačenja. Pri tome se materijal najvećim delom lokalno deformiše u toj zoni, a neznatno na čelu izvlakača, gde je smanjenje debljine relativno malo (sl. 74).

Otuda i proizlazi kasnije izveden zaključak da materijal za čisto duboko izvlačenje (sa ravnim čelom izvlakača) treba da ima što veći otpor stanjenju (veliki koeficijent normalne anizotropije r), kako bi se suprotstavio koncentrisanoj deformaciji u kritičnom regionu. U slučaju povećanog razvlačenja (sa porastom zaob-

ljenja čela izvlačka), međutim, lokalno stanjenje nije izraženo i materijal treba da poseduje sposobnost razvlačenja po čitavom čelu izvlačka (veliki stepen deformacionog ojačanja n).



Sl. 73. Položaj mesta razaranja u zavisnosti od oblika čela izvlačka (odnosno trenja)



Sl. 74. Dijagram promena debljine lima na pojedinim mestima pri izvlačenju u zavisnosti od oblika izvlačka, odnosno veličine razvlačenja na njegovom čelu

2.4. Kombinovani i specijalni simulativni postupci

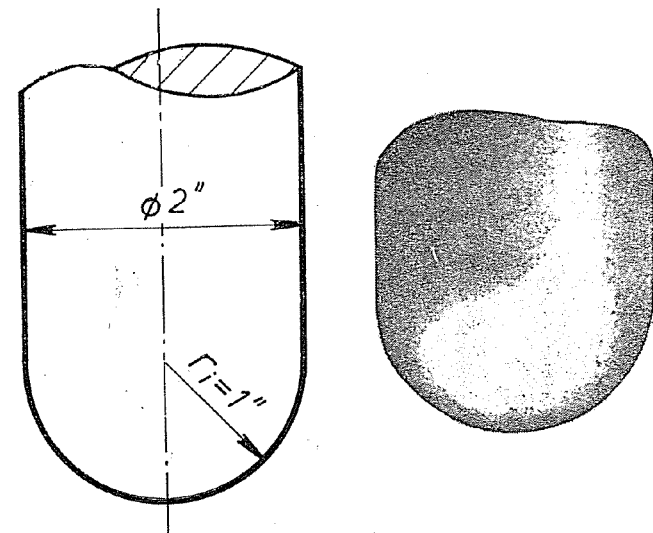
S obzirom da jednostavni simulativni opiti uključuju samo izvesne tipične i elementarne vidove deformacije, oni daju dosta jednostranu sliku deformabilnosti

materijala. Za sticanje šireg uvida u njegovu obradivost bilo bi potrebno izvršiti više ovakvih, međusobnih različitih, opita. Ta okolnost dovela je do ideje da se uvedu kombinovani postupci ispitivanja u toku kojih bi se jednovremeno ostvarivali različiti elementarni vidovi deformisanja. Kod svih ovih postupaka su zastupljeni, sa jedne strane, deformacioni procesi karakteristični za čisto duboko izvlačenje, a sa druge, procesi razvlačenja.

2.4.1. Swift-ov opit sa polusfernim izvlačakom

Pošto se Swift-ov opit (a i drugi) sa izvlačakom koji ima ravno čelo svodi na čisto duboko izvlačenje, Swift je došao na ideju da oblikovanjem tog čela u vidu polulopte uključi u deformacioni proces i znatno dvoosno razvlačenje. Ono je, inače, dosta manje kod izvlačka sa ravnim čelom, koje uslovljava jake sile trenja i sprečava materijal da se jače razvlači.

Ostale pojedinosti u vezi sa ovom metodom ne razlikuju se od onih koje se odnose na Swift-ov opit sa ravnim čelom izvlačka (sl. 75).

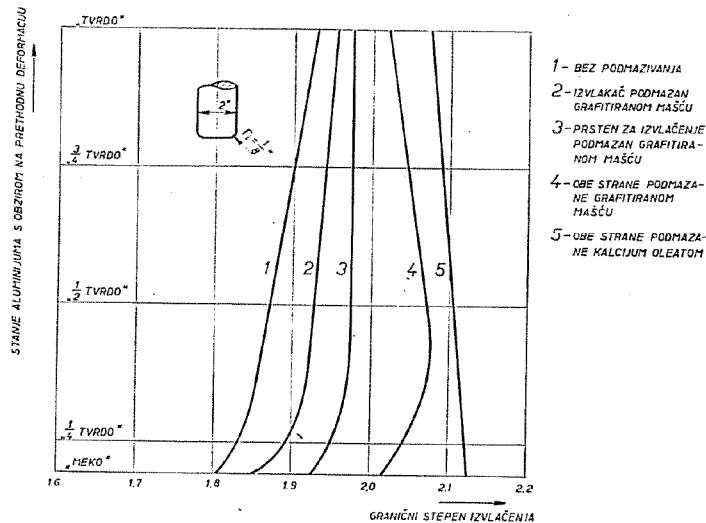


Sl. 75. Izvlačak i epruveta sa polusfernim dnom izvučena po Swift-ovoj metodi

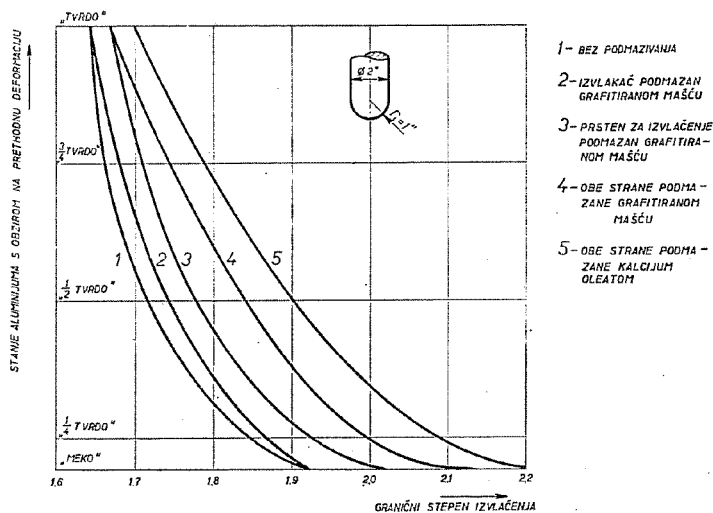
Zbog izmenjenog oblika izvlačka, granični odnosi (stepeni) izvlačenja koji se mogu postići ispitivanjem nekog materijala po ovom postupku, razlikovaće se u opštem slučaju od onih koji se postižu pomoću izvlačka sa ravnim čelom.

Na sl. 76 i 77 navedeni su ilustrativno rezultati ispitivanja koje je Swift vršio na aluminijumu pomoću različitih izvlačka. Zaključci do kojih je pri tome došao mogu se svesti, uglavnom, na sledeće:

— materijal u relativno ojačanom — tvrdom stanju pokazao je veću sposobnost izvlačenja pomoću izvlačka sa ravnim čelom;



Sl. 76. Granični stepen izvlačenja aluminijuma u zavisnosti od njegovog stanja, dobijen Swift-ovim opitom pomoću izvlakača sa ravnim čelom



Sl. 77. Granični stepen izvlačenja aluminijuma u zavisnosti od njegovog početnog stanja, dobijen Swift-ovim opitom sa polusfernim izvlakačem

— mekši materijal, međutim, bolje se izvlačio sa polusfernim izvlakačem;
 — rezultati koji se dobijaju sa polusfernim izvlakačem pokazuju veće razlike između pojedinih limova i time olakšavaju njihovu selekciju.

Brojna ispitivanja koja su vršena sa ciljem da se ustanovi veza između rezultata Swift-ovih i Erichsen-ovih opita pokazala su da su u znatno većoj korelaciji sa Erichsen-ovim oni rezultati koji se dobijaju Swift-ovim opitom sa polusfernim izvlakačem.

Napomena: Poznata je takođe i varijanta sa elipsoidnim izvlakačem, ali se ona znatno manje primenjuje i ograničena je pretežno na istraživačku delatnost.

2.4.2. Engelhardt-ova metoda

Metoda je šire poznata pod gornjim nazivom a razvijena je od strane istočnonemačkih istraživača W. Engelhardt-a i H. Gross-a.

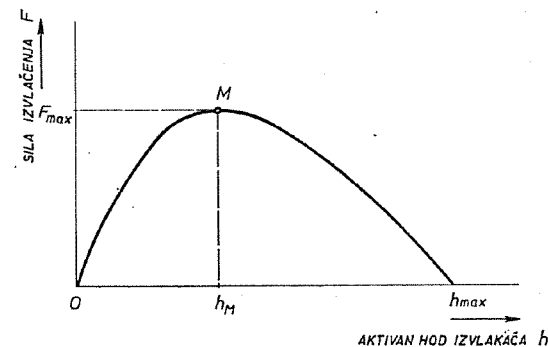
Ovaj način ispitivanja tankog lima (debljine do 2 mm) je u odnosu na ostale originalan, a svodi se na određivanje tzv. potencijalga (sposobnosti) dubokog izvlačenja (nemački: Tiefziehfähigkeit, engleski: deep-drawing potential, ruski: потенция глубокой вытяжки). Za dobijanje ove karakteristike potrebno je najpre odrediti razliku između najveće sile koju bi materijal uopšte mogao podneti pri čistom dubokom izvlačenju standardne epruvete (F_M) i najveće sile izvlačenja koja se stvarno pojavljuje na izvlakaču (F_{max}). Povećanje razlike $F_M - F_{max}$ predstavlja ujedno i veću sigurnost (rezervu sposobnosti materijala da se duboko izvlači). Ako bi ona bila jednaka nuli, to bi značilo da je ta sposobnost materijala maksimalno iskorišćena, tj. sila potrebna za izvlačenje bila bi jednaka najvećoj sili koju materijal može preneti.

Na osnovu dobijene razlike se, zatim, određuje pogodnija forma pokazatelja, odnosno traženi potencijal dubokog izvlačenja, kao

$$T = \frac{F_M - F_{max}}{F_M} \cdot 100 [\%]$$

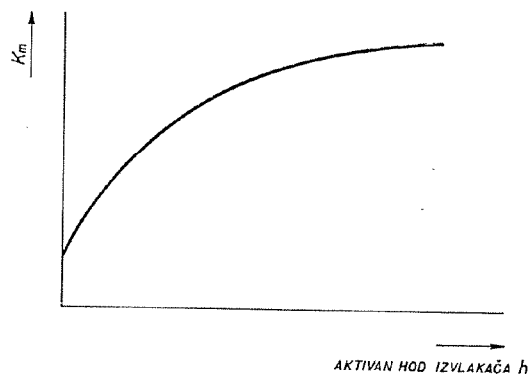
Često se vrednost ovog pokazatelja naziva Engelhardt-ov broj.

Poznato je da se pri čistom dubokom izvlačenju maksimum sile izvlačenja ne postiže na samom početku procesa, već tek posle izvesnog hoda izvlakača (ta-



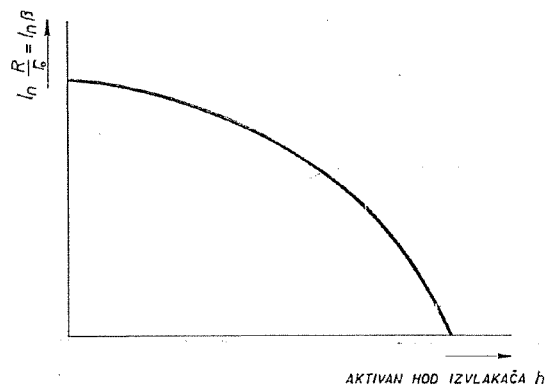
Sl. 78. Promena sile na izvlakaču u toku izvlačenja

čan položaj zavisi od osobina materijala, geometrijskih odnosa i uslova izvlačenja). Šematski prikaz promena sile izvlačenja u zavisnosti od hoda izvlakača dat je na sl. 78.



Sl. 79. Promena srednjeg deformacionog otpora u toku izvlačenja

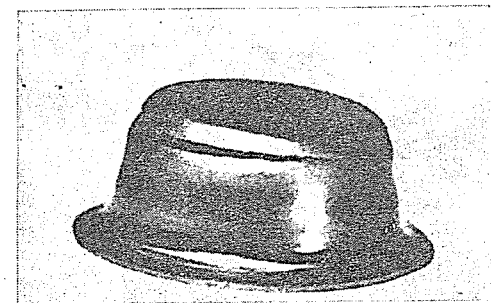
Za načelno razumevanje ovakvih položaja maksimuma sile izvlačenja dovoljno je analizirati faktore koji uslovljavaju naprezanje σ_r (v. poglavlje II — 2.3.1.), koje je dominantna komponenta ukupnog naprezanja σ_r , odnosno sile izvlačenja F . Treba primetiti da srednji deformacioni otpor K_m (prema Siebel-u) predstavlja samo pogodnu aproksimaciju stvarnog deformacionog otpora koji je promenljiv i zavisi od veličine ostvarene deformacije. Na sl. 79 je principijelno prikazan tok krive srednjeg specifičnog otpora deformacije K_m u zavisnosti od aktivnog hoda izvlakača (kojim se ovde uslovno i indirektno, može predstaviti veličina postignute deformacije).



Sl. 80. Promena vrednosti $\ln \beta$ u toku izvlačenja

Količina materijala na obodu takođe se menja smanjujući se od maksimalnog iznosa do nule. To znači da će se smanjivati i odnos $\frac{R}{r_0}$ (sl. 80).

Kako je sila za ovo deformisanje, odnosno naprezanje σ_r , proizvod između srednjeg deformacionog otpora K_m i parametra $\ln R/r_0$ (koji se odnosi na preostalu količinu materijala za deformisanje), jasno je da ona neće imati maksimum ni na početku izvlačenja (jer tada K_m ima minimalnu vrednost), ni na kraju, već pri nekom međupoložaju izvlakača (sl. 78).



Sl. 81. Izgled epruvete posle ispitivanja po Engelhardt-u

Detaljnije razmatranje položaja maksimuma sile pri dubokom izvlačenju može se naći, pored ostalog, i u jednom od ranije objavljenih radova autora [41].

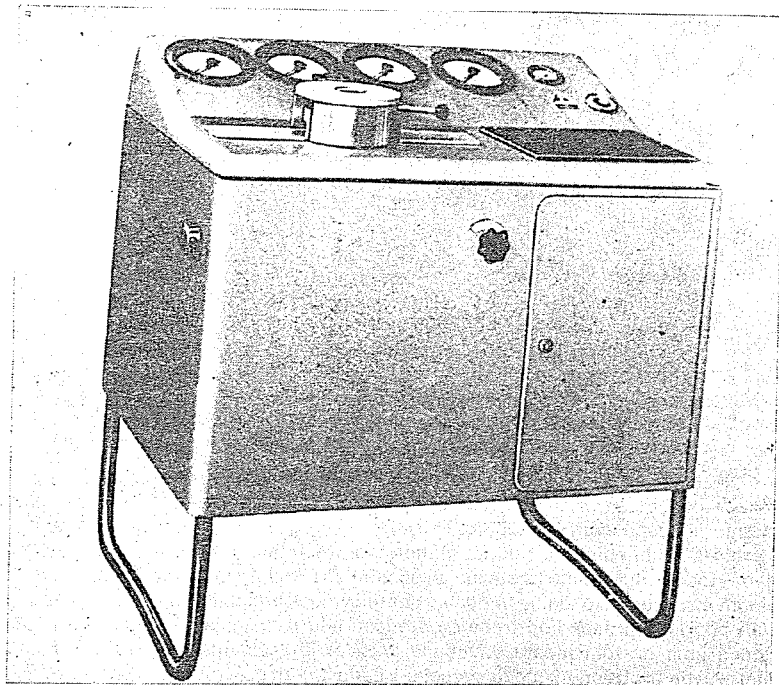
Svakako da se ova maksimalna sila mora preneti preko materijala od čela izvlakača do oboda, pri čemu naprezanje na kritičnom mestu ne sme dovesti do razaranja pri uspešnom izvlačenju. U protivnom, materijal se razara obično na mestu prelaza zaobljena dna tela ka cilindričnom omotaču. Materijal se na ovom zaobljenu, inače, deformiše pretežno dvoosnim razvlačenjem u radialnom i tangencijalnom pravcu, tako da je njegova debljina na kritičnom mestu umanjena (što znači i poprečni presek koji treba da prenese silu izvlačenja). Takođe je pri ovome čvrstoća lima na tom mestu umanjena, a kako je maksimalna sila koja se može preneti ravna proizvodu između preseka i odgovarajuće čvrstoće, jasno je da će se pri prekoračenju njene maksimalne vrednosti pojaviti razaranja upravo na tom mestu (sl. 81).

Sila izvlačenja pri kojoj, u određenim uslovima ispitivanja, dolazi do razaranja nekog materijala (tj. maksimalna sila koju materijal može preneti) nije zavisna od hoda izvlakača, već isključivo od svojstava materijala i zato se ona grafički može predstaviti horizontalnom linijom u dijagramu sila izvlačenja — hod izvlakača (sl. 83).

Za izvođenje Engelhardt-ovog opita koristi se specijalna mašina (sl. 82). Ona omogućuje da se normalno vrši čisto duboko izvlačenja tela sve do momenta kada sila izvlačenja, prošavši kroz maksimum, ne opadne ispod njega za neki iznos. Taj iznos, odnosno položaj tačke A (sl. 83) principijelno bi mogao biti ma gde u oblasti opadajućeg dela krive, ali se iz praktičnih razloga bira tako da, s jedne strane, bude dovoljno udaljen od maksimuma (tačka M), kako bi se on sa sigurnošću uočilo,

a sa druge, od krajnje tačke (K), da bi se što manje odrazio na rezultat uticaj veličine zazora u cilindričnom delu prstena pri dubokom prodiranju izvlakača u njega.

U momentu dostizanja tačke A u mašini se automatski i trenutno pojačava sila na držaču lima i to toliko da se spreči svako dalje povlačenje oboda dela ka prstenu za izvlačenje (on, dakle, ostaje čvrsto pritegnut između držača i prstena). Kako se pri tome kretanje izvlakača ne zaustavlja, jasno je da će doći najpre do odgovarajućeg porasta sile na izvlakaču, a onda i do prisilnog kidanja materijala.



Sl. 82. Mašina za ispitivanje po Engelhardt-u

Pomoću specijalnog uređaja na mašini registruju se u svakom trenutku iznosi sile na izvlakaču, pa i u kritičnim momentima — kada se dostigne maksimalna sila izvlačenja F_{max} , odnosno kada dođe do razaranja (F_M). Time se dobijaju elementi za izračunavanje Engelhardt-ovog broja. Šematski prikaz promene sile izvlačenja u toku čitavog opita dat je na sl. 83. a pojedine faze izvlačenja vide se na sl. 84. Pri tome se položaj a) odnosi na uvođenje i stezanje trake lima, b) na prosecanje epruvete i njeno izvlačenje, c) na čvrsto stezanje, a d) na trenutak razaranja.

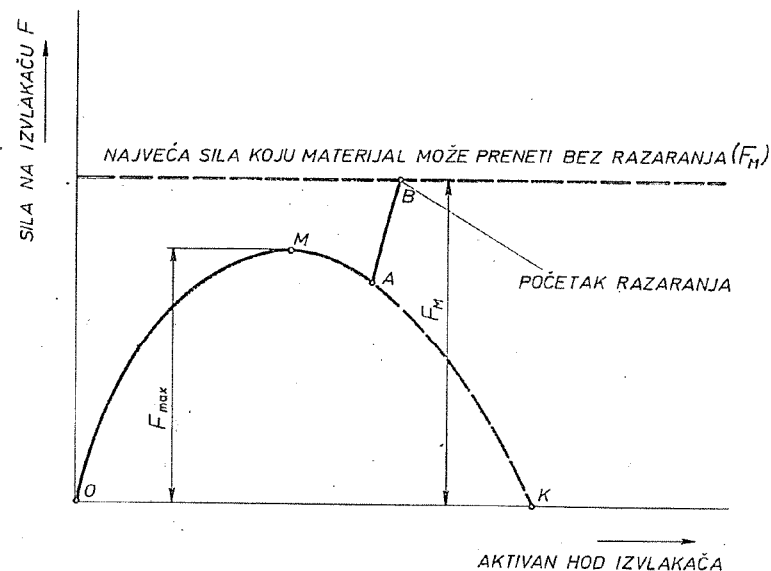
U početku opita vrši se u istom alatu (koji služi za izvlačenje) prosecanje razvijene kružne ploče prečnika $\varnothing 52$ mm (sl. 84). Ova ploča se odmah zatim auto-

matski izvlači bez zaustavljanja mašine ili ma kakve naknadne manipulacije. Normalno se vrši po nekoliko uzastopnih izvlačenja, pa je zato pogodno koristiti uzorak lima u obliku trake (sl. 85).

Prečnik izvlakača iznosi 30 mm, tj. odnos izvlačenja $\beta_0 = D_0/d_0 = 1,73$. Poluprečnik zaobljenja ivice čela izvlakača je $r_1 = 4$ mm. Isto toliko zaobljenje izrađuje se i na ivici prstena za izvlačenje ($r_p = 4$ mm).

Sila na držaču se može podešavati promenom pritiska u hidrauličnom sistemu mašine. Upotrebljavaju se sledeći pritisci na držaču za različite materijale:

- a) za čelične, mesingane i bakarne limove $p = 24$ kp/cm²;
- b) za limove od aluminijuma i njegovi: legura $p = 12$ kp/cm².



Sl. 83. Sila na izvlakaču u pojedinim fazama opita

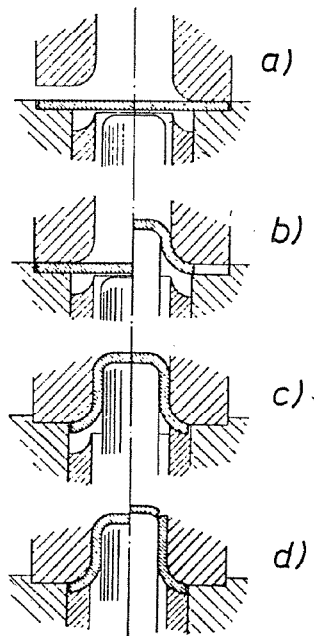
Lim i alat se podmazuju hidrauličnim uljem određenog kvaliteta (Hydro 45 ili sl.).

Da bi rezultati ovih ispitivanja mogli da posluže za rutinsku ocenu obradivosti lima dubokim izvlačenjem, potrebno je za pojedine materijale izvršiti niz eksperimenata i dobiti podatke o zahtevanim (minimalnim) iznosima Engelhardt-ovog broja, kako bi se rezultati kasnijih redovnih ispitivanja mogli sa njima uporediti. Pogodno je kada se ove minimalne vrednosti daju grafički, kao što je to učinjeno na sl. 86—88 za nekoliko slučajeva [18].

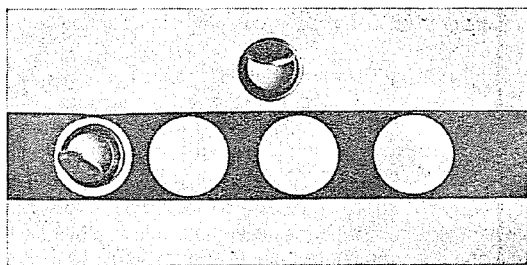
Pošto su ovi dijagrami dobijeni pod standardnim uslovima, oni pokazuju da je u tom slučaju veća sposobnost izvlačenja tanjih limova u odnosu na deblje. Međutim, pri ostvarenju optimalnih uslova izvlačenja tanji limovi bi zahtevali

veću silu na držaču, što bi indirektno dovelo do pogoršanja sposobnosti izvlačenja. Stoga podatke sa sl. 86—88 treba primiti samo uslovno, uzimajući u obzir ovu napomenu.

Engelhardt-ov opit je, kao i mnogi drugi, veoma specifičan s obzirom da se u okviru njega izvlači šuplje cilindrično telo određenog oblika i dimenzija. Zato se, prirodno, ne može govoriti o njegovoj univerzalnosti pri ispitivanju obradivosti lima, odnosno podjednakom značaju u svim slučajevima. Očigledno je da znatniju pouzdanost ovog kriterijuma treba očekivati onda kada su procesi u toku ispitivanja i obrade materijala slični.

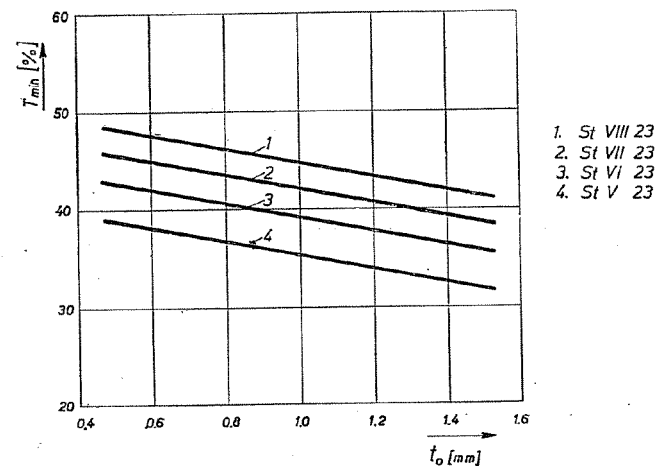


Sl. 84. Karakteristične faze Engelhardt-ovog opita

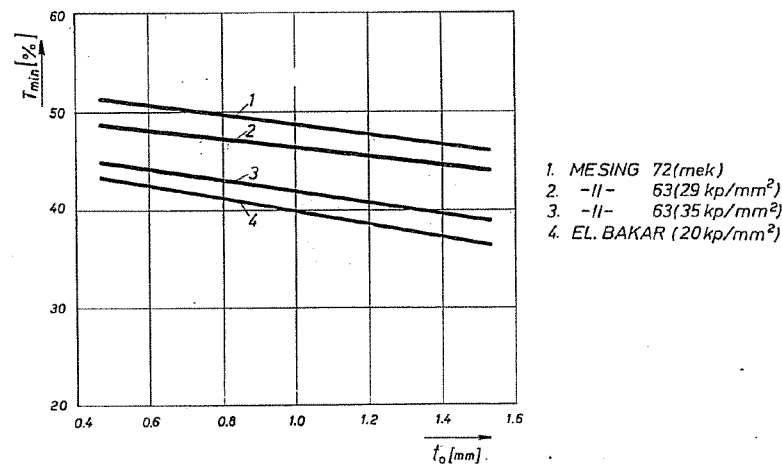


Sl. 85. Uzorak lima u obliku trake posle Engelhardt-ovog opita

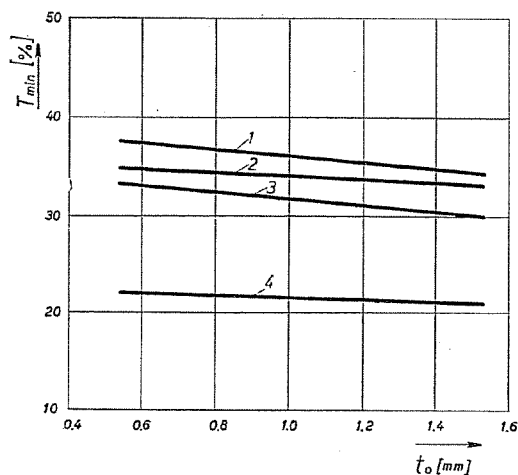
Treba istaći i to da je postupak novijeg datuma i da su u toku opsežna istraživanja koja će nesumnjivo pružiti više podataka o njegovim mogućnostima, a posebno o stepenu usaglašenosti rezultata ispitivanja sa proizvodno-industrijskom obradivošću pri obradi lima pod presama.



Sl. 86. Minimalne vrednosti Engelhardt-ovog broja za neke vrste čeličnih limova



Sl. 87. Minimalne vrednosti Engelhardt-ovog broja za neke vrste mesinga i bakra



1. Al Cu (DIN 1725 - 1/2 tvrd)
2. Al 99.5 (10 kp/mm²)
3. Al Cu Mg (DIN 1725 - mek)
4. Al 99.5 (7 kp/mm²)

Sl. 88. Minimalne vrednosti Englehardt-ovog broja za aluminijum i njegove legure

Uopšte, za korektnu ocenu značaja Englehardt-ove metode, u poređenju sa ostalim, treba prednosti i nedostatke svestrano analizirati. Nesumnjivo je da je ona, pored toga što je principijelno različita od drugih, veoma pogodna i kao metoda koja neposredno daje brojčano izraženu meru sigurnosti. Iako je ta mera praktično samo globalan indikator stvarne sigurnosti, ona bi se uz nešto više eksperimentalnih i drugih podataka mogla, u odgovarajućim slučajevima, koristiti relativno pouzdano za procenu mogućnosti lima da podnese posledice kolebljivih uslova izvlačenja u industrijskim okolnostima.

2.4.2.1. Određivanje graničnog odnosa izvlačenja pomoću Englehardt-ovog postupka

Koristeći relacije koje je ustanovio Schmidt (III — 2.1.2.) može se pomoću Englehardt-ovog opita takođe odrediti i granični odnos izvlačenja.

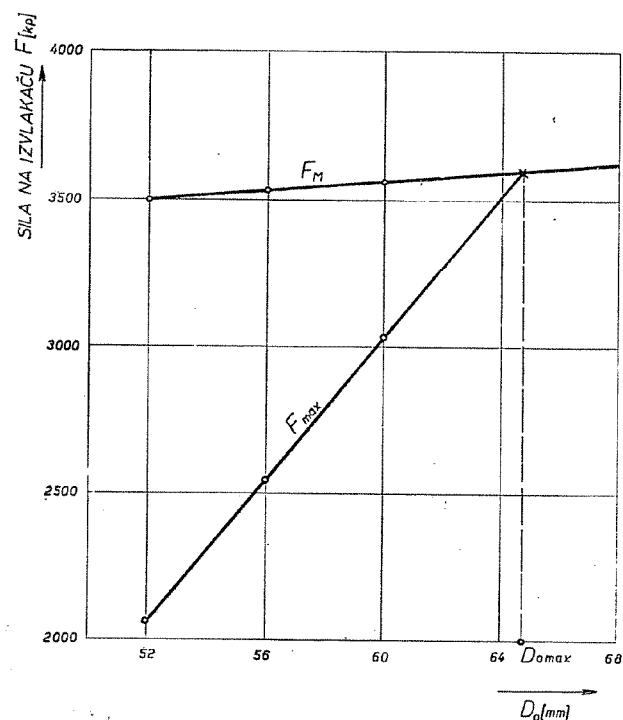
Postupak će biti objašnjen na jednom primeru, koji se odnosi na ispitivanje lima debljine 1 mm [71].

Najpre je izvršeno više opita (3) na uobičajen način, korišćenjem razvijene ploče prečnika 52 mm. Zatim je ispitivanje nastavljeno izvlačenjem epruvete sa većim prečnicima razvijene ploče: 56 i 60 mm. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 5.

Tabela 5

D_0 [mm]	β_0	F_M [kp]	F_{max} [kp]	T [%]
52	1,566	3526	2075	41,2
56	1,685	3555	2567	27,8
60	1,807	3585	3050	14,9

Na osnovu ovih podataka može se formirati grafička zavisnost $F_{max} - D_0$ odnosno $F_M - D_0$ (sl. 89).



Sl. 89. Određivanje graničnog odnosa izvlačenja Englehardt-ovim postupkom

Za primer o kome je reč te linije se seku pri $D_0 = 64,7$ mm. Ova vrednost bi očigledno odgovarala maksimalnom (graničnom) prečniku razvijene ploče sa kojim bi se deo još mogao uspešno izvući pri nepromenjenim ostalim uslovima. To znači da je dobijen granični stepen dubokog izvlačenja ispitivanog materijala u iznosu

$$\beta_{0 \max} = \frac{D_{0 \max}}{d_0} = \frac{64,7}{33,2} = 1,94$$

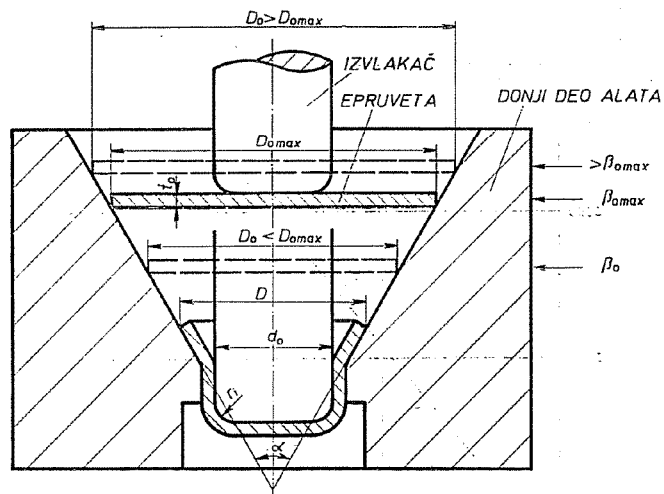
Svakako da je za ispitivanje ovog odnosa potrebno menjati deo alata koji služi za prosecanje razvijene ploče, kako bi se dobili različiti prečnici D_0 (na primer: 52, 56 i 60 mm).

2.4.3. Fukui — opit

2.4.3.1. Varijanta sa ravnim čelom izvlakača

Za razliku od napred navedenih opita pri kojima se izvlačenje vrši kroz cilindrične prstenove (matrice), japanski profesor Fukui je predložio (1938. godine)

postupak izvlačenja u konusnom alatu (sa uglom konusa 60°). Dalja specifičnost je u tome što se ovde izvlačenje vrši bez držača lima (sl. 90.), čime se eliminiše uticaj savijanja i ispravljanja lima u odnosu na čisto duboko izvlačenje. Izvlačenje se vrši, normalno, sve do pojave prvog znaka razaranja materijala.



Sl. 90. Alat za Fukui-opit sa ravnim čelom izvlakača

Prečnik razvijene ploče (epruvete) kreće se, orijentaciono, u opsegu između 50 · t i 70 · t (gde je t debljina lima) jer se u tom opsegu može izvršiti izvlačenje bez držača, tj. bez većeg nabiranja oboda. Poluprečnik zaobljenja ivice izvlakača je 5 mm, a ostale dimenzije alata su date u tabeli 6.

Ispitivanjem se može, kao i kod čistog dubokog izvlačenja, ustanoviti granični stepen izvlačenja $\beta_{0max} = D_{0max}/d_0$ ili se koristi tzv. »dijametarski« postupak.

Da bi se eksperimentalno došlo do vrednosti D_{0max} pogodno je koristiti pomoćni postupak (sličan Schmidt-ovom pri čistom dubokom izvlačenju) koji se zasniva na približno linearnom odnosu između maksimalne sile na izvlakaču i prečnika razvijene ploče. Time se izbegava dugotrajno ispitivanje radi postupnog iznalaženja graničnog prečnika D_{0max} .

»Dijametarskim« postupkom se ispituje stepen deformacije koji se može postići do momenta razaranja materijala ako se izvlačenje vrši sa prečnikom razvijene ploče $D_0 > D_{max}$.

Polazeći od pretpostavke da se veza između stvarnog napreznja (σ_s) i stvarne, logaritamski izražene, deformacije (ϵ) može aproksimirati funkcijom

$$\sigma_s = B e^n$$

(gde je B — konstanta materijala, a n — stepen njegovog deformacionog ojačanja) Fukui je došao do sledećeg izraza za uzdužno napreznje u cilindričnom delu epruvete koja se izvlači

$$\sigma_l = e^{\mu\alpha} \cdot \frac{1+c}{c} B \left[1 - \left(\frac{\xi}{\eta} \right)^c \right] (\ln \eta)^n$$

Oznake u ovom izrazu imaju sledeća značenja:

α — polovina ugla konusa (ne odgovara oznaci na sl. 90);

$$c = \mu \cot \alpha;$$

μ — koeficijent trenja između lima i alata;

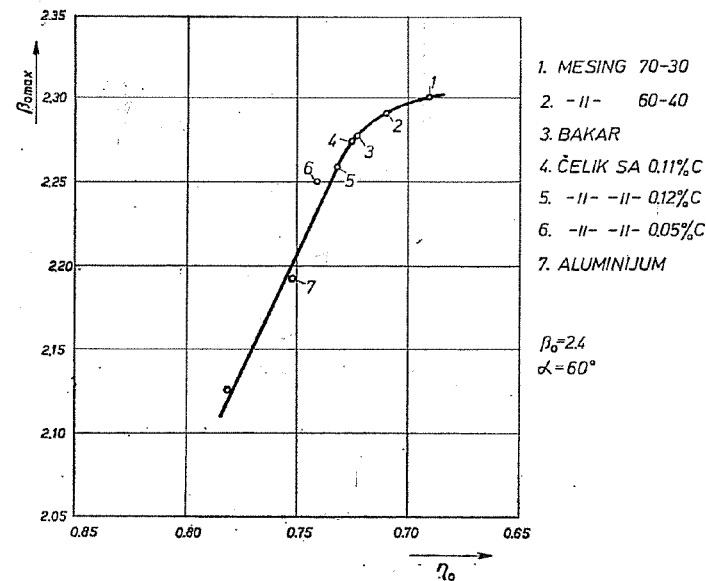
$$\xi = \frac{d_0}{D_0} = \frac{1}{\beta_0}$$

$$\eta = \frac{D}{D_0} = \frac{\beta}{\beta_0}$$

Dalje, on je ustanovio da se materijal razara kada uzdužno napreznje dostigne kritičnu vrednost

$$(\sigma_l)_k = R \sigma_M = RB \left(\frac{n}{e} \right)^n$$

gde je σ_M čvrstoća, odnosno napreznje u materijalu pri kidanju, a R koeficijent koji uzima u obzir uslove razaranja.



Sl. 91. Veza između Fukui-evog graničnog stepena izvlačenja i dijametarskog odnosa

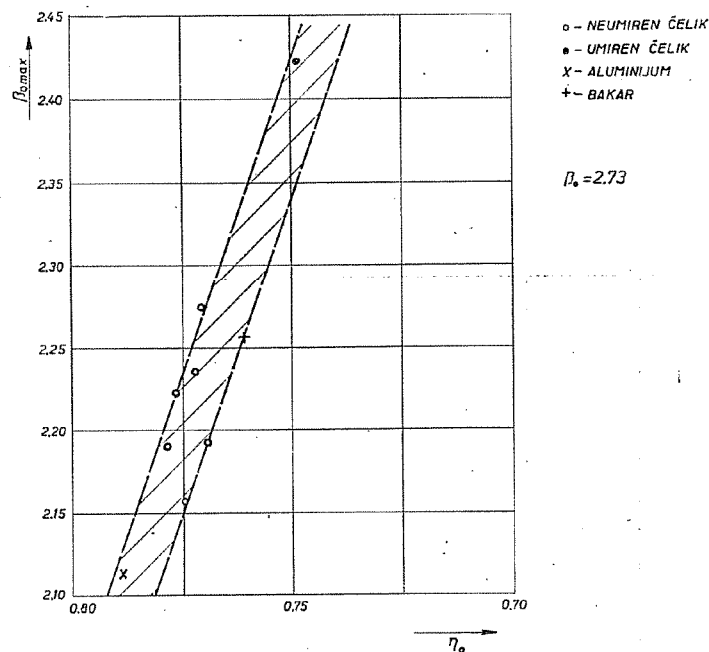
Uvođenjem ove vrednosti u prednju jednačinu dolazi se do uslova koji odgovaraju kritičnom momentu razaranja epruvete

$$\xi^c - \eta_0^c \left[1 - \frac{A}{(\ln \eta_0)^n} \right] = 0$$

pri čemu je $A = R \left(\frac{n}{e} \right)^n \frac{c}{1+c} \frac{1}{e^{n\alpha}}$

Simbolom η_0 označen je traženi dijametarski odnos D/D_0 pri prekidu, tj. merilo obradivosti materijala ovakvim izvlačenjem.

Na sl. 91. prikazana je veza (za neke materijale) između graničnog stepena izvlačenja β_{0max} i dijametarskog odnosa η_0 . Pri tome je korišćen odnos izvlačenja $\beta_0 = 2,4$, odnosno $\xi = 0,416$ [18]



Sl. 92. Odnos rezultata ispitivanja nekih materijala po Swift-u i Fukui-u (sa ravnim čelom izvlakača)

Očigledno je da između β_{0max} i η_0 postoji veoma dobra korelacija, pa je zato praktičnije koristiti pri ispitivanju dijametarsku metodu. Ona je jednostavnija, tj. zahteva kraće vreme i manji broj ispitivanja (samo jedan polazni prečnik za slične materijale).

Analiza prednje jednačine pokazuje da η_0 , pri ustaljenim uslovima ispitivanja, zavisi prvenstveno od stepena deformacionog ojačanja n . Postupak za nje-

govo eksperimentalno određivanje, kao i ostale pojedinosti, date su u posebnom poglavlju koje se odnosi na ocenu obradivosti pomoću mehaničkih karakteristika.

Bez obzira na zadovoljavajuću usaglašenost rezultata dobijenih na osnovu ova dva kriterijuma Fukui-opita, treba reći da ne postoji nikakva bliža povezanost između njih i rezultata opita čistim dubokim izvlačenjem. Na primer, prema jednom ispitivanju [18] vršenom na šest različitih uzoraka lima, pokazalo se da su rezultati dobijeni prema Swift-ovoj metodi (β_{0max}) upadljivo različiti za svaki uzorak, dok prema metodi Fukui nije dobijena skoro nikakva razlika (sl. 92).

Slična neusaglašenost dobija se i pri upoređenju sa rezultatima ispitivanja po Erichsen-u.

2.4.3.2. Varijanta sa polusfernim čelom izvlakača

Pored prikazanog načina izvođenja Fukui-opita, on se, po istom principu, takođe može vršiti i sa polusfernim izvlakačem (sl. 93 i 94). Na taj način ostvaruje se znatno razvlačenje materijala na dnu izvučenog tela. Zahvaljujući tome, metoda postaje pogodnija za ispitivanje materijala koji su namenjeni kombinovanoj obradi čistim dubokim izvlačenjem i razvlačenjem, što je, inače, često slučaj.

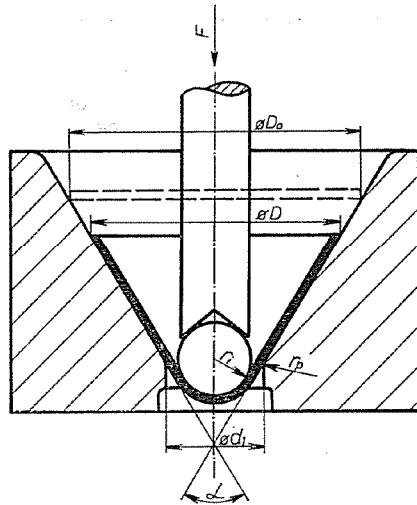
Vrednosti za dimenzije alata i razvijene ploče odgovaraju japanskom standardu JIS Z 2249 i date su u tabeli 6.

Tabela 6

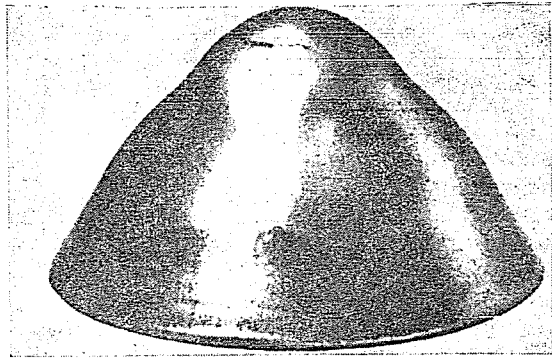
Tip	13	17	21	27
Nominalna debljina lima [mm]	0,5 do ispod 0,8	0,8 do ispod 1,0	1,0 do ispod 1,3	1,3 do 1,6
Ugao konusnog dela	60°	60°	60°	60°
Prečnik otvora d_1 [mm]	14,60	19,95	24,40	32,00
Poluprečnik zaobljenja r_p [mm]	3,0	4,0	6,0	8,0
Prečnik izvlakača d_0 [mm]	12,70	17,46	20,64	26,99
Poluprečnik zaobljenja čela izvlakača r_i [mm]	$d_0/2$	$d_0/2$	$d_0/2$	$d_0/2$
Prečnik razvijene ploče D_0 [mm] za dijametarski postupak	36	50	60	76 78

S obzirom da sa smanjenjem odnosa D/D_0 raste sposobnost materijala da se ovako izvlači, to će i oblici, odnosno dimenzije epruveta u momentu razaranja materijala biti različiti u zavisnosti od kvaliteta materijala. Šta više, u slučaju izuzetno kvalitetnog materijala može se dogoditi da do razaranja epruvete uopšte i ne dođe (sl. 95).

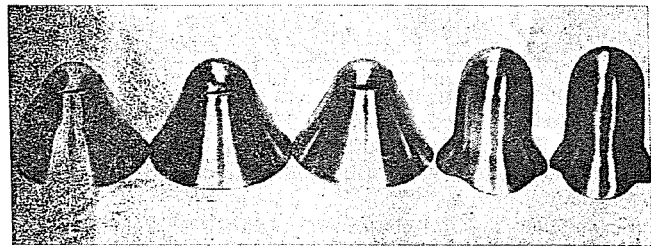
Zanimljivo je da se korelacija između rezultata ovog opita i Swift-ovog (sa polusfernim izvlakačem) unekoliko povećava u odnosu na rezultate opita sa ravnim čelom izvlakača, što se može zaključiti upoređenjem dijagrama na sl. 92. i 96.



Sl. 93. Fukui-opit sa polusfernim čelom izvlačkača

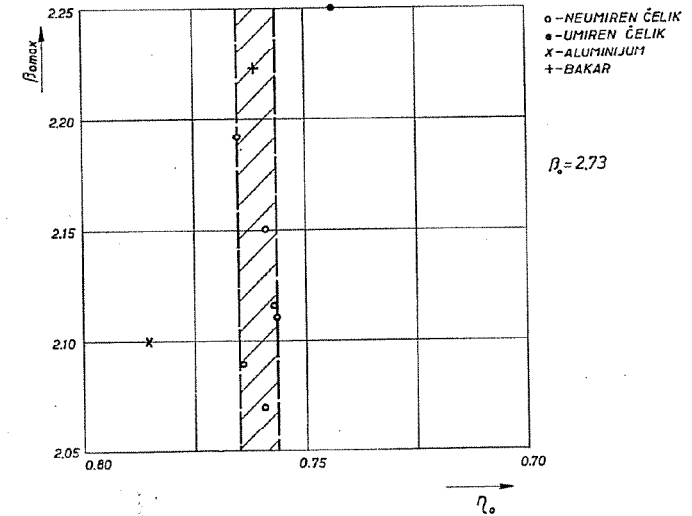


Sl. 94. Izgled epruvete posle izvlačenja po Fukui-u (sa zaobljenim čelom izvlačkača)

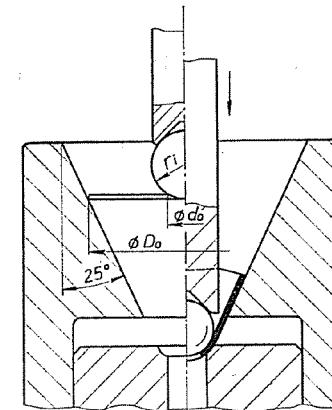


Sl. 95. Izgled epruveta od različitih materijala posle izvođenja Fukui-opita sa polusfernim čelom izvlačkača

Postoji još jedna verzija ovog opita [16], koja se od prikazane razlikuje po tome što se na sredini razvijene ploče prethodno izbuši kružni otvor (slično kao kod K.W.I.-postupka), tako da u toku ispitivanja dolazi do njegovog razvlačenja — sve do pojave ivičnih radijalnih naprslina (sl. 97). Odnos prečnika ovog otvora d_0 prema prečniku razvijene ploče D_0 iznosi oko 1:6. Prečnik sfernog dela izvlačkača približno je za dva puta veći od prečnika otvora d_0 .



Sl. 96. Odnos rezultata ispitivanja nekih materijala po Swift-u i Fukui-u (sa polusfernim čelom izvlačkača)



Sl. 97. Verzija Fukui-opita sa prethodno izbušenim otvorom na epruveti

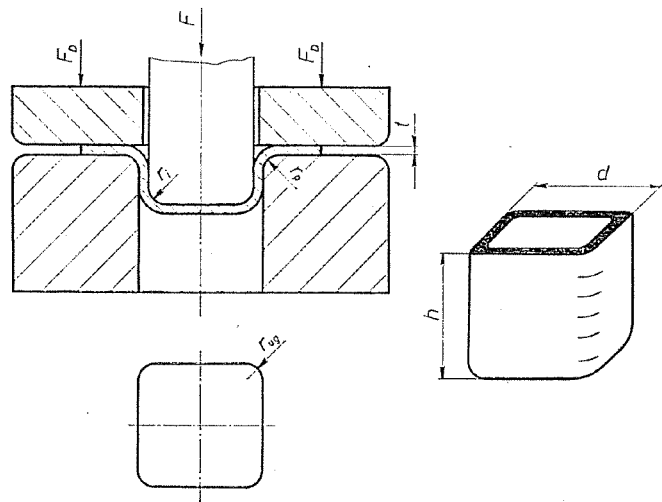
2.4.4. Izvlačenje tela četvorougaoanog poprečnog preseka

U simulativne postupke spada i izvlačenje tela kvadratnog ili pravougaonog poprečnog preseka. Način izvlačenja je u osnovi sličan onom kojim se izvlače cilindrična tela. Međutim, ovi postupci, za razliku od ranijih, imaju poluindustrijski karakter. Naime, dimenzije i oblici alata, odnosno epruvete, nisu ustaljeni i prilagođavaju se odgovarajućem delu koji se od ispitivanog lima industrijski proizvodi. To znači da se ova ispitivanja direktnije vezuju za određene slučajeve iz prakse, dok je cilj ostalih proba na duboko izvlačenje bio da se ustanove opšti pokazatelji obradivosti materijala dubokim izvlačenjem.

Na primer, u jednom slučaju [23] korišćen je alat za izvlačenje tela kvadratnog poprečnog preseka, sa stranicama kvadrata 3" i zaobljenjem ivice čela izvlačača $r_1 = 6t = 3/8"$ (t — debljina lima, koja je u ovom slučaju bila 0,063"). Isto toliko iznosio je i poluprečnik zaobljenja ivice prstena za izvlačenje r_p dok je poluprečnik zaobljenja ugla kvadrata bio izveden trojako (kako bi se dobio što širi uvid u uticaj ovog zaobljenja na obradivost): $r_{ug} = 2t$ (1/8"), $6t$ (3/8") i $12t$ (3/4").

Kao kriterijum obradivosti koristi se odnos

$$\frac{h_{max}}{d}$$



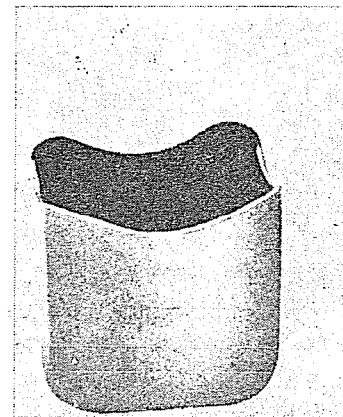
Sl. 98. Najznačajniji geometrijski parametri pri izvlačenju tela četvorougaoanog poprečnog preseka

gde je h_{max} najveća visina potpuno izvučenog tela koja se uopšte može postići pri uspešnom izvlačenju (podrazumeva se visina posle odsecanja eventualno nastalih ivičnih neravnina — »ušiju«), a d širina izvučene epruvete (sl. 98.).

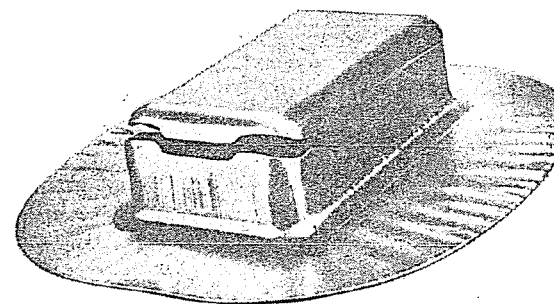
Jasno je da se u navedenom primeru moraju uzeti u obzir i uticaji različitih zaobljenja uglova kvadratnog preseka r_{ug} pa se rezultati h_{max}/d izražavaju u zavisnosti od njih.

Napominje se da razvijena ploča u ovom slučaju nije uvek kružna ili kvadratna, već se često uzima kao prvo približenje optimalnom obliku (osmougaoni oblik), koji se dobija ravnim zasecanjem uglova kvadratne ploče. Veličina tog zasecanja, zavisi od ostalih dimenzija i vrste materijala. Međutim, načelno nema smetnje ni za primenu drugih, još povoljnijih, oblika razvijene ploče.

Firma »Ericksen« izrađuje u sklopu svoje univerzalne opitne mašine, uređaj za izvlačenje proba kvadratnog poprečnog preseka 40x40 mm (sl. 99.), dok se ostale dimenzije (na primer zaobljenja uglova kvadrata) podešavaju prema potrebi (želji naručioca).



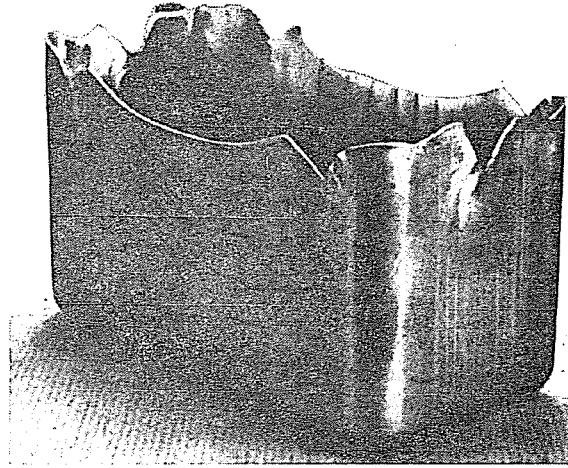
Sl. 99. Izvučena epruveta kvadratnog poprečnog preseka



Sl. 100. Izgled tela pravougaonog poprečnog preseka posle izvlačenja do razaranja materijala

Kao sledeći primer [14] navodi se izvlačenje tela pravougaonog preseka 70x135 mm (sl. 100) iz okrugle razvijene ploče određenih dimenzija, pri čemu se kao kriterijum koristi visina izvučenog tela koja se postiže u momentu razaranja materijala. U zavisnosti od stepena izvlačenja, geometrijskih odnosa, vrste i debljine materijala, oblika razvijene ploče i drugih uticajnih činilaca, ivica izvučenog tela može biti manje ili više neravna, odnosno oštećena.

Dimenzije pravougaonih preseka koji se sreću u primeni obično se razlikuju za manje ili veće iznose. Tako se, prema nekim izvorima [47], izvlače pravougaone epruvete, koje se samo neznatno razlikuju od napred navedenih, tj. 75x130 mm, itd.



Sl. 101. Izgled tela pravougaonog poprečnog preseka posle potpunog izvlačenja i znatnog oštećenja ivica

2.4.5. Izvlačenje epruveta u obliku klina

2.4.5.1. Sachs-ov opit

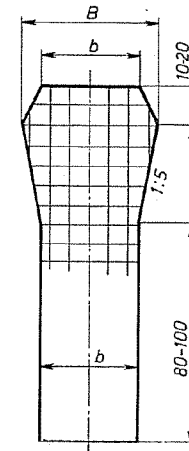
Ispitivanje se vrši na običnoj mašini za ispitivanje materijala zatezanjem. Epruveta se izrađuje tako da je jedan njen kraj oblikovan u vidu klina (sl. 102.). Na sličan način oblikovan je alat, tako da se u toku ispitivanja zakošeni deo epruvete provlači pod dejstvom zatežuće sile kroz alat i time izlaže bočnom sabijanju. Na taj način ovim opitom se simulira naponsko stanje karakteristično za obod tela koje se oblikuje čistim dubokim izvlačenjem (sl. 33.).

Epruveta se izvlači u alatu sve dok ne nastupi razaranje materijala. Tako se opitnim putem (postupnim povećanjem širine B pri istom uglu zakošenja) može ustanoviti najveća širina B_{max} sa kojom se epruveta još može uspešno izvući (bez kidanja). Odnos maksimalne početne širine prema konačnoj

$$\frac{B_{max}}{b}$$

uzima se kao pokazatelj obradivosti materijala dubokim izvlačenjem, a takođe se naziva i »kapacitet izvlačenja«.

Pomenuta simulativnost naponskog stanja pri ovom ispitivanju i stanja na obodu tela pri čistom dubokom izvlačenju samo je približna. Potpuna podudarnost ne može se postići zato što je epruveta pri ovom opitu izložena, kako radijalnim naprezanjima istežanja i tangencijalnim naprezanjima sabijanja, tako i jakom trenju pri klizanju njenih zakošenih površina po odgovarajućim površinama alata. Zato na rezultate ispitivanja znatno utiču, pored ostalog, uslovi podmazivanja.



Sl. 102. Epruveta za ispitivanje po Sachs-u

Predmet istraživačkih analiza u vezi sa ovim opitom bile su, pre svega, razlike između deformacija koje nastaju oko ivice klina i onih u centralnim zonama epruvete. Kayseler je ustanovio da su deformacije oko ivice veće od centralnih za manje od 5%, tako da se promenom dimenzija epruvete ove razlike mogu praktično eliminisati, tj. postići uglavnom ravnomerna deformacija.

Dalje, Kayseler je, koristeći analogiju sa čistim dubokim izvlačenjem i u vezi sa njim odgovarajuće Siebel-ove postavke, predložio analitički izraz za određivanje sile izvlačenja epruvete. Naime, usvojio je sledeće relacije:

- radijalno naprezanje $\sigma_r = K_m \ln \frac{B}{b}$
- idealna sila izvlačenja $F'_{iz} = b \cdot t \cdot K_m \cdot \ln \frac{B}{b}$
- stvarna sila izvlačenja $F_{iz} = \left(b \cdot t \cdot K_m \cdot \ln \frac{B}{b} \right) \cdot \eta$

gde je K_m srednji deformacioni otpor, t debljina materijala, a η koeficijent koji je Kayseler uzimao u iznosu od 0,65.

Treba pomenuti da se ovo ispitivanje može koristiti i za dobijanje uzgrednih orijentacionih podataka o strukturnim svojstvima, kao što je krupnoća zrna i dr. (na osnovu izgleda površine epruvete i mesta prekida), kao i sklonost llima ka formiranju »figura razvlačenja«.

Pored toga, opit je pogodan za određivanje kritičnog stepena deformacije koji u toku naknadne rekristalizacije može dovesti do jakog povećanja krupnoće

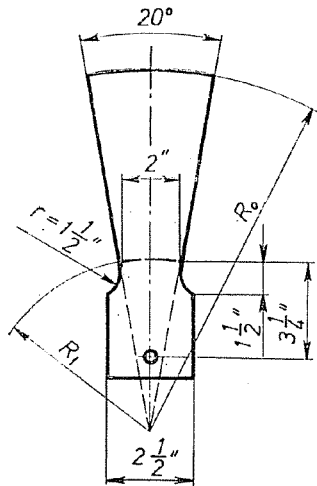
zrna. Naime, opitom se lako mogu postići različiti stepeni deformacije i time pojednostaviti eksperimentalni postupak za iznalaženje kritične deformacije.

Na osnovu svega može se izvući zaključak da opit epruvetom u obliku klina ima izražen nedostatak u tome što na rezultate znatno utiče veoma jako trenje na ivici klina. Osim toga, ukoliko je u materijalu izražena anizotropija u ravni, rezultati dobijeni pomoću epruveta isečenih u različitim pravcima biće međusobno različiti, pa nastaje problem reprezentativnosti dobijenih rezultata.

2.4.5.2. Swift-ov opit sa epruvetom u obliku klina

Izvlačenje epruveta u obliku klina takođe je svestrano analizirano i od strane H. W. Swift-a.

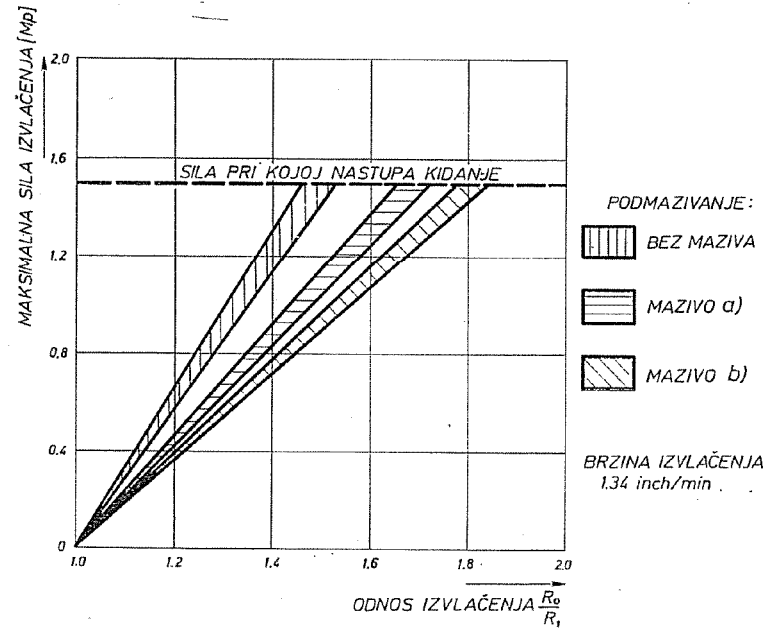
On je koristio alat sa izuzetno kvalitetno obrađenim površinama, a oblik i dimenzije epruvete je standardizovao (prema sl. 103). Opit je vršio bez primene sredstava za podmazivanje ili uz primenu potpuno određenih maziva, kako bi se dobili što manje kolebljivi rezultati.



Sl. 103. Epruveta u obliku klina po Swift-u

Pri ovome Swift je ustanovio približno linearan odnos između maksimalne sile izvlačenja i odnosa izvlačenja R_0/R_1 (gde su R_0 i R_1 poluprečnici prema sl. 103). Njegova grafička ilustracija je data na sl. 104.

Kada se uporede maksimalni (granični) stepeni izvlačenja koji se dobijaju na ovaj način sa onima koji odgovaraju čistom dubokom izvlačenju za iste materijale, onda se može zaključiti da se u prvom slučaju dobijaju, uopšte, manje brojčane vrednosti. Na prvi pogled, moglo bi se možda očekivati suprotno, s obzirom da pri izvlačenju klina nema uticaja savijanja i ispravljanja lima, kao ni trenja na ivici prstena za izvlačenje. Međutim, veoma jako trenje koje se javlja pri izvlačenju klina ima toliko veliki uticaj da se dobijaju, ipak, manji granični stepeni izvlačenja.



Sl. 104. Rezultati ispitivanja čelika za duboko izvlačenje pomoću Swift-ove epruvete u obliku klina

2.4.6. Ostali specijalni i retko primenjivani postupci

2.4.6.1. Petrasch-ov opit

Prema ovom postupku najpre se kružna ploča prečnika 75 mm izvlači u cilindrično telo pod udarcem čekića — izvlakača. Prečnik ovog izvlakača je 37 mm, tako da se stepen izvlačenja ne menja i približno iznosi $\beta_0 \approx 2$. Čekić pada sa visine od 2 m (donji deo alata se stavlja pod čekić), čime se ostvaruje brzina izvlačenja oko 6 m/sec.

Pri ovome je potrebno da se dobije iznos energije koja se troši na duboko izvlačenje. Ona se iznalazi tako što je poznata ukupna energija čekića (koji slobodno pada sa poznate visine) i preostala energija posle izvršenog izvlačenja — nju apsorbuje opruga na koju je oslonjen alat za ispitivanje (karakteristike opruge su poznate, pa je lako odrediti i preostalu energiju koju ona apsorbuje). Razlika ove dve energije predstavlja traženu energiju deformacije koja je utrošena na izvlačenje. Ona se zatim svodi na zapreminu lima i dobija se »specifičan rad dubokog izvlačenja« u kpm/cm^3 .

Prema tome, ovim opitom se ne određuju granični kvantitativni pokazatelji, već se veća sposobnost materijala da se duboko izvlači karakteriše uopšte manjim iznosom specifičnog rada izvlačenja i obratno.

Ispitivanje se eventualno može i dalje nastaviti ukoliko se želi dobijanje podataka o uticaju starenja (posle prethodne deformacije) na dalju deformabilnost. Naime, šuplje cilindrično telo oformljeno u prvoj fazi ispitivanja podvrgava se daljem proširenju pomoću konusnog vretena (koje se pri radu okreće). Ovo proširenje se vrši sve dok se ne pojavi prskotina na ivici tela. Treba primetiti da se pri tome na ovom mestu materijal isteže, dok je pri izvlačenju tela on na istom mestu bio sabijen. Kao kriterijum za ovu drugu fazu opita koristi se odnos povećanja prečnika proširenog tela prema početnom prečniku (izvučenog, ali neproširenog tela).

Ukoliko je ivica tela posle izvlačenja neravna usled efekta anizotropije materijala, potrebno je da se ona pre proširenja obradi, tj. poravna.

Jasno je da za ovo ispitivanje treba raspolagati specijalnim uređajem, a sam postupak nije sasvim jednostavan. Osim toga, podaci o obradivosti koji se na ovaj način dobijaju vrlo su dubiozni, tako da Petrasch-ov opit nije našao neku širu primenu.

2.4.6.2. Beisswänger-ov opit

Beisswänger je ovaj postupak razvio tako što je pošao od ideje da se obradivost može oceniti preko pokazatelja do kojih se dolazi višestrukim izvlačenjem probnog uzorka. Zato je ovaj opit naročito pogodan za ispitivanje limova od kojih će se izradivati delovi pomoću više uzastopnih operacija dubokog izvlačenja.

Pri ispitivanju se najpre vrši čisto duboko izvlačenje šupljeg cilindričnog tela. Za tu svrhu treba odrediti maksimalni prečnik razvijene ploče koji će moći da se uspešno izvuče pomoću izvlakača prečnika 32 mm ili 45,7 mm. Potom se primenom više izvlakača različitih prečnika izvodi druga operacija izvlačenja i određuje maksimalni stepen izvlačenja koji se u toku nje može postići.

Zazor između izvlakača i zida prstena (matrice) zadržava se istim u obe operacije.

Beilsswänger je došao do zaključka da se karakter (vid) razaranja, do koga dolazi u materijalu pri prekoračenju graničnog stepena izvlačenja u toku druge operacije, može razlikovati od onog koji se javlja kada se izvlačenje vrši samo kroz jednu operaciju. Naime, osim tipičnog razaranja na dnu izvučenog tela, mogu za vreme druge operacije da nastanu i dodatni oblici razaranja kao:

- radijalna prskotina na obodu dela,
- uzdužna prskotina nastala usled zaostalih unutrašnjih naprezanja,
- transverzalna prskotina prouzrokovana savijanjem na zaobljenju ivice alata.

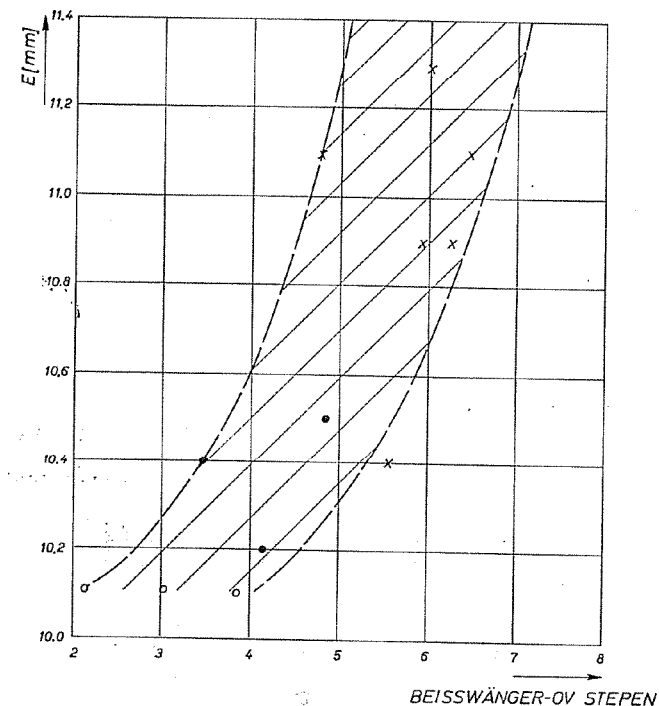
Napominje se da se granični stepen izvlačenja određuje bez obzira na vrstu početnog razaranja.

Po izvršenom opitu može se odrediti stepen kombinovanog izvlačenja kao odnos između maksimalnog prečnika razvijene ploče i najmanjeg prečnika izvlakača kojim se još može izvršiti uspešno naknadno izvlačenje.

Da bi ustanovio eventualnu korelaciju između ovog stepena kombinovanog izvlačenja i ostalih pokazatelja obradivosti materijala, Beisswänger je vršio odgovarajuća uporedna ispitivanja. Na sl. 105. su prikazani stepeni kombinovanog izvlačenja i Erichsen-ovog broja za dvanaest različitih slučajeva. Vidi se da određuje

nija povezanost ovih rezultata ne postoji, mada se može zapaziti opšta tendencija da sa porastom jedne karakteristike raste i druga.

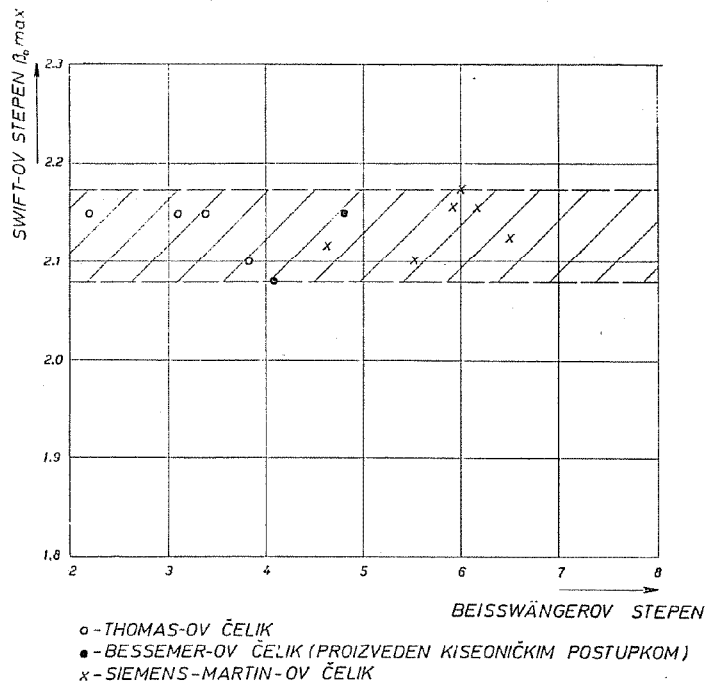
Interesantno je da takode nije ustanovljena nikakva korelacija između Beisswänger-ovog stepena i Swift-ovog graničnog stepena izvlačenja (koji se za posmatrani materijal odnosi na samo jedno izvlačenje), što je grafički ilustrovano na sl. 106.



- - THOMAS-OV ČELIK
- - BESSEMER-OV ČELIK (PROIZVEDEN KISEONIČKIM POSTUPKOM)
- x - SIEMENS-MARTIN-OV ČELIK

Sl. 105. Odnos između rezultata ispitivanja nekih čelika po Erichsen-u i Beisswänger-u

Pored nedovoljne usklađenosti rezultata ovog opita sa ostalim pokazateljima, on se odlikuje i drugim nepovoljnostima, kao što su: relativno dugotrajan postupak, veći broj izvlakača i prstena (alata), znatan utrošak materijala, zavisnost dobijenih rezultata od velikog broja uticajnih faktora itd. Zato ovaj opit nije ni mogao naći širu primenu (naročito u industriji).



Sl. 106. Odnos između rezultata ispitivanja nekih čelika po Swift-u i Beisswanger-u

2.4.6.3. Kayseler-ov opit

Ovaj opit se zasniva na kombinovanom izvlačenju klina i razvlačenju. U stvari, ispitivanje je dvostupno i sastoji se u tome što se najpre epruveta isečena u obliku klina izvlači do određene dužine. Zatim se pojedina mesta ovako deformisane epruvete razvlače pomoću minijaturnih Erichsen-ovih proba. Ova mesta su tako raspoređena duž epruvete da svakom od njih odgovara drugi stepen deformacije ostvarene u prvom stupnju opita.

Kayseler je zatim formirao pokazatelj obradivosti kao odnos između dubine minijaturnog lokalnog izvlačenja (razvlačenja) i prosečne deformacije na tom mestu koju je imao klin u toku prvog stupnja (izvlačenja klina).

Na taj naćin se, dalje, može odrediti preostali kapacitet dubokog izvlačenja, nakon prethodno ostvarene deformacije.

Metoda, inaće, nije našla znatniju primenu.

2.4.6.4. Eisenkolb-ov opit

Principijelno je slićan Kayseler-ovom opitu. Razlika je u tome što je Eisenkolb predložio da se najpre izvuće cilindrićno telo putem čistog dubokog izvla-

ćenja i da se onda njegov cilindrićni omotać dalje ispituje razvlaćenjem pomoću kuglice. Na taj naćin se određuje preostali kapacitet deformacije, koji se dovodi u odnos sa onim kapacitetom koji je lim imao pre čistog dubokog izvlaćenja, odnosno izražava se u procentima od njega.

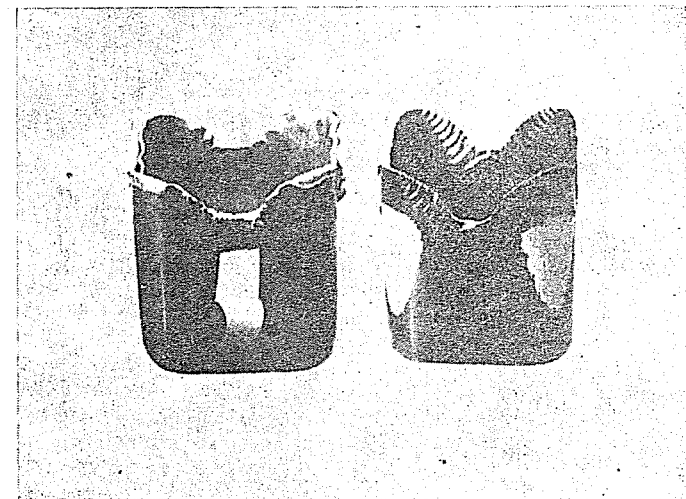
2.4.7. Ostale mogućnosti

Na osnovu izloženih metoda koristi se još mnoštvo slićnih postupaka koje su pojedine laboratorije razvile za svoje specifićne potrebe. Razlike su, uglavnom, u dimenzijama alata, odnosno probnih uzoraka.

Tako se, na primer, koristi poluindustrijski C.N.R.M*) postupak [14, 44] izvlaćenja šupljeg cilindrićnog tela prećnika 80 mm, kako sa ravnim čelom izvlaćaća, tako i sa polusfernim, radi određivanja granićnog stepena izvlaćenja $(D_0/d_0)_{\text{max}}$ itd.

Takođe treba napomenuti da se u novije vreme opiti izvlaćenjem ponekad obavljaju na povišenim temperaturama. To se čini i onda kada su u pitanju materijali koji nisu dovoljno deformabilni na normalnim temperaturama, pa se izvlaće u toplom stanju. Zato savremene mašine često imaju dodatne grejne uređaje, koji omogućuju zarevanje razlićitih proba (cilindrićnih, Erichsen-ovih i drugih).

Poseban problem u vezi sa približavanjem uslova ispitivanja uslovima obrade predstavlja eventualna razlika u brzinama izvlaćenja u jednom i drugom slućaju. Pri normalnim ispitivanjima dubokim izvlaćenjem ova brzina obićno ne ide preko 750 mm/min, što je često znatno ispod stvarnih radnih brzina. Zato neke novije opitne mašine imaju dodatne uređaje koji omogućuju postizanje znatno većih brzina izvlaćenja do 30 (a nekada i 60) m/min.



Sl. 107. Izgled epruvete od prevućenog lima posle opita izvlaćenjem

*) »Centre National de Reserches Metallurgiques« (Belgium).