

OBRADIVOST TANKOG LIMA IZVLAČENJEM
I MOGUĆNOSTI NJENOG OCENJIVANJA

Prof. Dr. Branislav Devedžić, dipl.ing.
Mašinski fakultet u Kragujevcu

1. U V O D

Problem industrijske obradivosti tankog lima bio je i ostaje osnovni ograničavajući faktor u tehnološkom smislu, a sledstveno tome i izvor manje - više svakodnevnih teškoća, čestih nesuglasica, dilema, pa i sporova između proizvođača lima i njegovog korisnika. Sve to postaje utoliko istaženije, ukoliko je u pitanju obimnija proizvodnja. Sa druge strane, porast tog obima, kao i neizbežna potreba da se neprekidno povećava produktivnost obrade delova od lima, uz istovremeno smanjenje proizvodnih troškova, karakteristika su složenih ekonomske-tehnoloških i drugih okolnosti savremenog sveta. Suvišno je isticati koliko u takvim uslovima mogu biti drastične posledice kraćih ili dužih zastoja u serijskoj i velikoserijskoj proizvod-

nji delova od lima prouzrokovani njegovom nedovoljnom obradivošću, ili pak drugim uzrocima koji se ne mogu uvek jasno sagledati, odnosno pouzdano podvesti pod nedovoljnu obradivost, ili dr.

Opšte je poznato da se čak i u vrlo savremeno opremljenim i organizovanim industrijskim sredinama ovi problemi još uvek rešavaju uglavnom iskustvenim intervencijama, zasnovanim na dužem ili kraćem iskustvu raspoloživog tehničkog osoblja, a nisu isključeni ni ozbiljni sporovi na relaciji: služba kontrole kvaliteta materijala - preradivač i - eventualno proizvođač lima. Nema sumnje da u ovakvim situacijama neminovno dolazi do izražaja određena pristrasnost svake strane u sporu, uz veoma često "dokazivanje" da pravi uzroci nastalih teškoća ne proizlaze iz sopstvenog delokruga. Korisno je pri ovome takodje podesiti da tehničko-tehnološki aparat i metodologija koja se normalno u industriji koristi za određivanje obradivosti lima još uvek ne pruža neke pouzdanije mogućnosti za suštinsko sagledavanje čitavog problema. Postupak se već decenijama zasniva na manje - više formalističkom i sasvim indirektnom pristupu, odnosno jednostavnom upoređenju osnovnih mehaničko - tehnoloških karakteristika lima sa vrednostima datim odgovarajućim standardima ili specijalnim tehničkim uslovima. U pitanju su najčešće: granica razvlačenja, zatezna čvrstoća, izduženje pri prekidu i dubina izvlačenja po Erichsen-u. Često se ovim karakteristikama dodaje još i hemijski sastav, kao i neki od metalografskih pokazatelja (obično krupnoća zrna), ali se to po pravilu u praksi čini uz nedovoljnu kritičnost, tj. korisnik lima u najvećem broju slučajeva i nije u situaciji da te karakteristike efikasno koristi, s obzirom na veoma složenu zavisnost između njih i stvarne obradivosti lima.

Sa druge strane, nije redak slučaj da se pri ovom, isključivo tehnološkom pristupu problemu kvaliteta

lima, zaboravi da on mora ispuniti i druge mehaničko-konstrukcione, eksploatacione i ostale uslove, tako da neophodan granični iznos pomenutih karakteristika može biti diktiran i novim zahtevima (na primer, granica razvlačenja karoserijskih limova ne bi smela sići ispod vrednosti koja se obično kreće oko 180 N/mm^2 jer bi krutost karoserijskih delova time bila dovedena u pitanje bez obzira na to što bi obradivost lima plastičnim deformisanjem mogla porasti - ukoliko bi zatezna čvrstoća zadržala svoju visoku vrednost).

U svakom slučaju, pripisivanje osnovnim mehaničkim karakteristikama sposobnosti da pojedinačno, direktno i po uzdanu ukažu na stvarnu obradivost lima, još uvek je relativno česta zabluda. Otuda dolazi i do niza nesporazuma u slučajevima kada rezultati laboratorijskih ispitivanja pokažu da se kvalitet lima može smatrati zadovoljavajućim, a on se ipak u pogonu ne može uspešno obradivati. Ponekad smo svedoci i obrnutih situacija. Ne ulazeći na ovom mestu u analizu svih mogućih uzroka ovakvih pojava, pomenuće se samo neki od njih:

- nereprezentativnost uzorka koji je laboratorijski ispitivan, s obzirom na nehomogenost kvaliteta lima (narочito kada je on isporučen u većim količinama);
- eventualna nepreciznost laboratorijskih ispitivanja, odnosno moguće subjektivne greške (neka u ovom smislu bude navedena relativna nepreciznost određivanja dubine po Erichsen-u, kao i procentualno izduženje pri prekidu, s obzirom na malu mogućnost da se mesto prekida nadje tačno na sredini merne dužine epruvete, kao i sveukupnost ravnomernog i neravnomernog izduženja koje ukupno izdužuje obuhvata, itd.);
- igranisanje kolebljivosti proizvodno - obradnih uslova.

U svakom slučaju, najčešće ostaje uglavnom nepoznato šta i u kojoj meri dobijeni podaci o mehaničkim svojstvima

u konkretnom slučaju zaista znače u smislu obradivosti, zbog čega oni na neki način postaju formalistički u tehnološkom smislu.

Istina, još je pre više decenija engleski prof. Swift rekao da svako ispitivanje lima treba da bude malo istraživanje, ali je iskustvo pokazalo da je u industrijskim okolnostima veoma teško ovako kompleksan zadatak dovesti do takvog stručnog i istraživačkog nivoa koji bi obezbedio u najširoj praktičnoj primeni pouzdano sagledavanje problema obradivosti na osnovu klasičnih mehaničko - tehnoloških, ili metalografskih i hemijskih karakteristika materijala.

Treba posebno ukazati da ovakvi zaključci nikako ne znače osporavanje potrebe da se i dalje ove karakteristike veoma obazrivo ispituju, kako od strane proizvođača lima, tako i od strane njegovog korisnika, jer one, povezane sa standardima i drugim propisima zapravo na relativno jednostavan način definišu osnovni kvalitet lima u globalnom smislu, bez čega bi ma kakva osnovna kategorizacija kvaliteta materijala bila nemoguća.

Problem je u tome što takve neophodne opšte podele ipak postaju suviše grube i nedovoljne kada je u pitanju obradivost u užem smislu, zbog čega se nameće potreba za sasvim drugačijim pristupom pri sagledavanju obradivosti lima.

Iz izloženog nije teško zaključiti da je za postizanje uspešnih rešenja u ovom smislu neophodna sistematska saradnja između naučno-istraživačke organizacije, korisnika lima i njegovog proizvođača. Iskustvo do kojeg se došlo u najrazvijenijim zemljama pokazuje da se složeniji problemi mogu racionalno rešiti tek u takvoj sprezi. Na primer, u praksi često nije dovoljno samo konstatovati da neka od relevantnih karakteristika materijala, kao što je n - faktor, treba da bude u odredjenom iznosu, jer proizvođač lima neće uvek biti u stanju da taj

iznos obezbedi usled mnoštva proizvodnih varijabli. Iznalaženje zajedničkog kompromisa, uz istovremeno pravljanje postojećeg stanja, tada postaje neuporedivo korisnije, nego jednostrano formalističko insistiranje svake strane na rešenjima koja su isključivo u njenom interesu.

2. Kratak kritički osvrt na klasične i neke novije metode ispitivanja obradivosti limova

Sve metode ispitivanja obradivosti limova (sa izuzetkom ispitivanja hemijskog sastava i metalografskih svojstava) mogle bi se najopštije kategorisati u:

- metode zasnovane na ispitivanju osnovnih mehaničkih svojstava materijala;
- simulativne (tehnološke) metode;
- korelativne metode;
- ispitivanja korišćenjem dijagrama granične deformabilnosti.

2.1. Ispitivanja zasnovana na određivanju osnovnih mehaničkih svojstava

Već je napomenuto da se u ovu kategoriju uglavnom svrstavaju laboratorijska određivanja sledećih karakteristika: granice razvlačenja ili tečenja (σ_T) zatezne čvrstoće (σ_M) i procentualnog izduženja posle prekida (δ). Medjutim, u novije vreme sve više se praktikuje i određivanje pokazatelja deformacionog očvršćavanja materijala preko eksponenta tog očvršćavanja popularnog "n - faktor"), ili odnosa $R = \sigma_T/\sigma_M$, kao i tzv. normalne anizotropije preko koeficijenta te anizotropije (popularno nazvanog "r - faktora").

Opšte je poznato da je za dobru obradivost značajno da granica razvlačenja ima relativno malu vrednost, odnosno da razlika između nje i zatezne čvrstoće bude što veća. Stoga iznose obe ove karakteristike treba uvek po-

smatrati u međusobnom odnosu, kako bi eventualni zaključak, s obzirom na obradivost, mogao da bude upotpunjen. Metodologija njihovog određivanja takodje je najšire poznata i propisana odgovarajućim standardima.

Nešto je problematičnija situacija sa određivanjem pokazatelja izduženja. Naime, treba razlikovati ravnomerno (homogeno) izduženje koje nastane u epruveti do momenta dostizanja maksimalne sile zatezanja, od neravnomernog izduženja koje nastaje posle ovog trenutka, jer se ono odvija kao lokalizovano deformisanje oko mesta budućeg prekida. Ukupno izduženje posle prekida uključuje, dakle, i ovu zonu lokalizovanog deformisanja i zonu koja je samo ravnomerno izdužena, pa stoga njegov iznos zavisi, pored ostalog, i od položaja te zone na mernoj dužini. Korekcija te merne dužine na način na koji se ona normalno vrši pri standardnom ispitivanju materijala pomoću cilindričnih epruveta ovde nije moguća, s obzirom na relativno malu mernu dužinu, kao i specifičan oblik prekida. Interesantno je da se ova okolnost u praksi često ignoriše i izduženje određuje bez ikakve korekcije, tj. bez obzira na položaj mesta prekida. Štaviše, u slučajevima relativno male merne dužine skoro i da ne postoje zone koje su samo ravnomerno izdužene, što dobijene rezultate čini krajnje diskutabilnim. Otuda podatak o izduženju posle prekida treba primiti sa izvesnom rezervom, tj. dovoljno kritički.

Nesumnjivo da bi usled ovoga bilo poželjnije koristiti kao pokazatelj plastičnosti materijala samo iznos ravnomernog izduženja, ali to za sada još nije šire prihvaćeno.

EkspONENT deformacionog očvršćavanja (n - faktor) definisan je kao eksponent u poznatoj analitičkoj vezi između stvarnih napona (σ) i stvarnih deformacija (φ):

$$\sigma = C \varphi^n$$

gde je C - konstanta zavisna od vrste materijala.

Ovaj izraz ujedno predstavlja jednačinu odgovarajuće krive očvršćavanja, pa stepen n na odredjen način ilustruje oblik te krive, odnosno njen veći ili manji uspon do kojeg dolazi usled deformacionog očvršćavanja.

Sa stanovišta obradivosti lima treba težiti što većem očvršćavanju, odnosno što većem iznosu n - faktora (ovo stoga što bi u takvim slučajevima u proces oblikovanja bila uključena šira zona lima nego u slučajevima kada je n - faktor mali, pa bi željeni oblik nastao kao posledica zbira relativno malog deformisanja većeg broja pojedinih elemenata materijala). Osim toga, ako bi se u toku izvlačenja pojavila relativno oslabljena mesta koja bi u nekom trenutku počela, jako da se deformišu, pri jačem očvršćavanju ta situacija bi bila brzo prevaziđjena i na taj način sprečeno eventualno razaranje materijala na tom mestu.

Nažalost, ova karakteristika materijala još nije standardizovana, ali je poslednjih godina sve veći broj korisnika koji od proizvođača lima zahtevaju i podatak n - faktoru, kao veoma značajnom pokazatelju potencijalnih mogućnosti lima s obzirom na obradivost. Treba, međjutim, reći da se on ipak može koristiti samo kao indirektan, tj. opšti, pokazatelj, slično kao i druge mehaničke karakteristike, pa se samo obradivost u konkretnim slučajevima pomoću njega ne može izraziti u kvantitativnom smislu.

Na kraju, neka bude ukazano na veoma interesantnu okolnost da je teorijski iznos n - faktora jednak iznosu stvarnog (logaritamskog) ravnomernog izduženja (φ_M) u trenutku početka lokalizacije deformisanja:

$$n = \varphi_M = \ln \frac{L_M}{L_0}$$

gde se indeks M odnosi na taj trenutak, a l je merna dužina epruvete.

Ne ulazeći ovde u različite mogućnosti eksperimentalnog određivanja n - faktora, kao i teškoće koje se u tom smislu javljaju, napomenuće se samo da stepen deformaci-

onog očvršćavanja takodje uspešno može ilustrovati odnos granice razvlačenja i zatezne čvrstoće ($R = \sigma_T / \sigma_M$), pa je vrlo prihvatljiv u industrijskim sredinama kao pokazatelj do kojeg se može doći jednostavnim ispitivanjem σ_T / σ_M .

Koeficijent normalne anizotropije (r-faktor) predstavlja, po definiciji, odnos stvarne deformacije epruvete po širini (\mathcal{V}_b) i debljini (\mathcal{V}_s):

$$r = \frac{\mathcal{V}_b}{\mathcal{V}_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{s}{s_0}} = \frac{\log \frac{b}{b_0}}{\log \frac{s}{s_0}}$$

Jasno je da će u slučaju izotropnog materijala iznos ovog koeficijenta biti 1. Veće vrednosti on će imati onda kada se epruveta više deformiše po širini nego po debljini, što praktično znači u slučaju kada materijal ima povećanu otpornost prema stanjenju. Već i ova, sasvim opisna, konstatacija ukazuje na pogodnost limova sa većim r - faktorom, s obzirom da usled otežanog stanjenja na kritičnim mestima otpreska materijal duže može prenositi veće sile, čime se u mnogo slučajeva izbegava razaranje materijala. Važi, naravno, i obrnuto, jer ponekad limovi imaju vrednost ovog faktora i ispod 1, što je sa stanovišta obradivosti nepovoljno.

Kako su obe pomenute deformacije (\mathcal{V}_b i \mathcal{V}_s) negativne, njihov zbir sa suprotnim znakom mora odgovarati deformaciji izduženja (\mathcal{V}_l) - što sledi iz uslova o nepromenljivosti zapremine pri plastičnom deformisanju - pa se ta okolnost koristi za jednostavnu transformaciju prednjeg izraza, tj. eliminisanje iz njega deformacije u pravcu debljine materijala, jer se ona praktično teško može odrediti sa dovoljnom tačnošću - zbog relativno male debljine:

$$r = \frac{\log \frac{b}{b_0}}{\log \frac{s}{s_0} \frac{b_0}{lb}}$$

jer je zapremina $v = I_0 b_0 s_0 = I b s = \text{const.}$, pa sledi da je $s/s_0 = I_0 b_0 / I b$.

Ni ova karakteristika nije standardizovana i prednji opšti zaključak o pogodnosti i relativnim teškoćama u odredjivanju i široj primeni dat za n - faktor, važi uglavnom i za nju.

S obzirom da se često kod limova može govoriti i o anizotropiji u ravni lima, tj. zavisnosti različitih svojstava od pravca u odnosu na pravac valjanja lima, uobičajeno je da se vrši pogodno osrednjavanje, kako ove, tako i drugih karakteristika koje se dobijaju opitom zatezanjem, i to na sledeći način:

$$\bar{r} = \frac{1}{4} (r_0 + 2r_{45} + r_{90})$$

$$\bar{n} = \frac{1}{4} (n_0 + 2n_{45} + n_{90})$$

itd.

pri čemu se indeksi odnose na uglove isecanja epruvete u odnosu na pravac valjanja lima.

2.2. Simulativne (tehnološke) metode

U toku nekoliko proteklih decenija razvijen je veći broj različitih postupaka tehnološkog ispitivanja limova, ali je medju njima najširu primenu našao upravo najstariji postupak - Erichsen - ov. Razlog za to treba tražiti u njegovoj relativnoj jednostavnosti, kao i u činjenici da se on zasniva na dvoosnom razvlačenju lima, što u većoj ili manjoj meri odgovara modelu deformisanja pri izvlačenju, naročito većih, delova od lima, kao što su karoserijski i sl. Istina, retki su slučajevi kada je simulativnost postupka potpuno ostvarena, s obzirom da se u praksi znatno češće izvlače delovi koji nemaju oblik kalote kakva nastaje pri ispitivanju po Erichsen-u. Ali kako je razvlačenje ipak, na odredjen način, dominantan vid deformisanja i u tim slučajevima, i kako Erichsen-ov postupak uključuje i veoma značajan uticaj trenja, to je lako zaključiti gde leže koreni tako široke primenljivosti metode već preko 60 god.

Iz ovoga svakako ne treba zaključiti da je Erichsen-ova metoda konačno rešila problem ispitivanja obradivosti. Naprotiv, i njoj se mogu pripisati različiti nedostaci, a pre svega pomenuta neidentičnost naponsko-deformacionog sistema sa onim koji postoji pri izvlačenju konkretnih delova u praksi.

Otuda i potiču mnogi nesporazumi, odnosno činjenica da se ponekad lim pri ispitivanju po Erichsen-u u laboratoriji pokazuje kao sasvim zadovoljavajući, a da to pri obradi u pogonu nije slučaj (ili obrnuto). Svakako da na ovo mogu uticati i drugi proizvodni uslovi, ali su takve pojave moguće čak i pri nepromenjenim uslovima.

Napominje se da sve ove konstatacije, kako u vezi sa Erichsen-ovim, tako i drugim napred pomenutim metodama, kao i onim o kojima će kasnije biti reči, nemaju za cilj ni da opovrgnu njihov odredjen značaj, ni da ih prikažu kao izuzetno povoljne, već da se one kritički i što objektivnije ocene i ujedno istaknu, kako njihove prednosti, tako i nedostaci, odnosno sagledaju njihove realne mogućnosti.

Pored Erichsen-ove kao najpoznatije simulativne metode, izvesnu primenu nalazi i veći broj drugih, ali je njihova industrijska primena ipak ograničena i zato se ovde one neće analizirati, a zainteresovani se upućuju na specijalnu literaturu.

2.3. Korelacione metode

Zbog brojnosti pomenutih, kao i navedenih mehaničko - tehnoloških postupaka ispitivanja limova, odnosno karakteristika (pokazatelja) koji se u okviru njihovog odredjuju, prirodno se nametnula potreba upoznavanja njihove međusobne zavisnosti, odnosno korelativnosti, i time utvrđivanja karaktera uticaja svake od njih. Različiti istraživači vršili su, naročito u toku zadnjih 10 - 15 godina, brojna ispitivanja u tom smislu i dobijene rezul-

tate prezentirali u stručnim časopisima i drugim publikacijama - preko odgovarajućih regresionih linija, odnosno koeficijenata korelacije.

Ti rezultati su nesumnjivo potvrdili da, na primer, postoji upadljivo visoka korelacija izmedju n - faktora i Erichsen-ovog broja, kao i pomenutog odnosa $R = G_T/G_M$; r - faktora i graničnog stepena izvlačenja šupljeg cilindričnog tela, itd. Slična opsežna ispitivanja vršena su i na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu i ovde će se, samo radi ilustracije, navesti nekoliko dobijenih koeficijenata korelacije (r^{**}):

- izmedju $R = G_T/G_M$ i n : $r^{**} = 0,806$
- " n i r : $r^{**} = 0,363$
- " n i h_E (dub. po Eichs.): $r^{**} = 0,658$
- " r i h_E : $r^{**} = 0,381$

itd.

Bez obzira na nesumnjiv značaj ovakvih rezultata za sagledavanje stepena i prirode značaja pojedinih karakteristika, kao i njihovog međusobnog odnosa, problem ocenjivanja obradivosti time nije rešen, već je samo uneto nešto više svetla u stvarnu potrebu ispitivanja određenog broja karakteristika, odnosno odabiranje onih koje će se ispitivati (na primer, zbog izrazito visoke korelacije izmedju odnosa R i n-faktora, svakako da nema opravdanja pri normalnim ispitivanjima odrediti oba pokazatelja, itd.).

2.3.1. Kompleksni korelacioni pokazatelj

Da bi se rezultati pojedinih laboratorijskih ispitivanja mogli zajednički uzeti u obzir i zatim povezati sa stvarnim odnosno očekivanim, proizvodnim rezultatima, na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu razvijen je model tzv. kompleksnog korelacionog pokazatelja, pri

^{**}) Uobičajeno je da se koeficijent korelacije obeležava oznakom r, koja se takodje koristi i za koeficijent normalne anizotropije.

čemu su proizvodni rezultati iskazani kroz procenat neispravnih otpresaka ("škarta")-P. Kako u odredjenim slučajevima obrade za obradivost nemaju isti značaj sve pomenute mehaničko-tehnološke, ili druge (na pr. metalografske) karakteristike, pretpostavljena je linearna zavisnost između procenata neispravnih otpresaka P i njih u vidu polinoma:

$$P \approx a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + C$$

gde su: X_1, X_2, \dots, X_n pojedine laboratorijske karakteristike, a a_1, a_2, \dots, a_n , odgovarajući koeficijenti se određuju koristeći principe višestruke korelacije i to tako da procenat P bude odredjen sa najvećom mogućom verovatnoćom;

C - konstanta, koja takodje proizilazi iz rezultata opita.

Za konkretno iznalaženje ovakve zavisnosti neophodno je raspolagati relativno velikim brojem statističkih podataka i to takvih kod kojih se, sa jedne strane, registruje procenat P u proizvodnji, a sa druge, za istu partiju lima laboratorijske karakteristike. U ovoj činjenici i leži osnovna otežavajuća okolnost za širu primenu postupka.

Da bi se ona, ipak, donekle ublažila, izvršena je detaljna analiza strane potrebe za uključivanje u prednji izraz većeg broja laboratorijskih karakteristika i izveden zaključak da je za praktične potrebe sasvim dovoljno ako se u tom smislu zadrži samo na pokazatelju deformacionog očvršćavanja i koeficijentu normalne anizotropije, jer su to karakteristike koje ilustruju znatno različita svojstva materijala.

Radi daljeg pojednostavljenja, tj. prilagodjavanja praktičnim potrebama, i mogućnostima ispitivanja predloženo je da se kao pokazatelj očvršćavanja koristi odnos $\sigma_T/\sigma_M = R$, umesto n. Za jedan odredjen slučaj na

ovaj način je dobijen sledeći izraz uprošćenog korelacionog pokazatelja:

$$P \approx 253R - 30r - 140$$

Svakako da će se u drugim slučajevima ovi koeficijenti razlikovati od prikazanog, ali će model pokazatelja ostati isti.

U okviru ovog istraživačkog projekta izvršena su i pripreme za prikupljanje podataka i formiranje karte svakog otpreska (tzv. kenn-karte). Naime, predviđeno je da se najpre izvrši prikupljanje podataka preko jednog statističkog lista (sl.1.) i da se posle dovoljnog broja uzoraka formira karta otpreska (sl.2).

Ovakve karte otpresaka mogu imati opravdanje samo za veće karoserijske ili druge delove, s obzirom na obimnost prethodnog prikupljanja podataka, skupu obradu i relativno velike količine lima koje se troše za takve delove.

Smisao dobijenih potrebnih iznosa za pojedine karakteristike uglavnom je u tome što se oni mogu prezentirati proizvođaču lima i zahtevati kao poseban kvalitativni uslov - van uobičajenih standardnih uslova. Korišćenje takvih karata u svetu (sa verovatno nešto drukčijim načinom dolaženja do potrebnih podataka) sve je šire i predstavlja prvi korak na zajedničkoj bližoj saradnji između proizvođača lima i potrošača na postizanju istog cilja - realnom sagledavanju problema obradivosti u konkretnim slučajevima.

Osnovna prednost kompleksnog pokazatelja je u tome što on kvantificira stvarnu očekivanu (tj. verovatnu) obradivost - preko procenta neispravnih otpresaka ("škarta") koji se u datim uslovima može očekivati sa najvećom mogućom verovatnoćom. Štaviše, taj procenat može biti i

PODACI O LIMU (registrirane vrednosti)					
Karakteristike partije lima		Karakteristike koje se mogu eventualno ispitati			
Uzorak broj	1	2	3	4	
Proizvođač lima					Uzorak broj
Šifra partije lima					Ravnomerno δ_w [%]
Datum proizvodnje lima					Tvrdoća (HRB)
Datum isporuke lima					Skala 100 [kp]
Datum presovanja					Skala 30 T
Broj otpresaka na koji se isp. uzorak odnosi					Odnos σ_w/σ_M
					"n" - Faktor
					"r" - Faktor
					Anizotropija u ravni Δn
					Hrapavost površine R_a [μ]
					Broj po ASTM-skali
					Srednji prečnik d [μ]
					Srednja površina a [mm^2]
					C [%]
					Si [%]
					M [%]
					P [%]
					S [%]
					Hemijski sastav

Mehaničko-tehničke karakteristike				
Uzorak broj	1	2	3	4
Zatezna čvrstoća σ_w [N/mm^2]				
Granica razvlačenja $\sigma_{r, \sigma_{0.2}}$ [$\frac{N}{mm^2}$]				
Izduženje pri prekidu δ [%]				
Dubina po ERICHSEN-U h_E [mm]				

Uslovi ispitivanja definišani:

KARTA OTPRESKA (2)

Podaci o otpresku

PROIZVODNI USLOVI

Uzorak broj		1	2	3	4
Alat	Nov				
	Srednje pohaban				
	Jako pohaban				
Mašina	Normalno podešena - dobro vođenje				
	Poremećena podešenost - loše vođenje				
Podmaziva- nje	Bez podmazivanja				
	Normalno podmazivanje				
	Posebno dobro podmazivanje				
MC-KAY	Da				
	Ne				

Naziv dela	
Za vozilo	
Broj crteža	
Stand.ozn.mat.	
Dimenzije lima	
Tolerancije	
Težina po delu	
Položaj dela u karoseriji	spoljni
	vidljiv unutraš.
	nevidljiv unutr.
Stepen deformacije na kritičnom mestu	vrlo veliki
	veliki
	srednji
	mali

NEISPRAVNOSTI NA OTPRESKU

Uzorak broj		1	2	3	4
Bez neispravnosti					
Vrsta neispravn.	Dorada				
	Škart				
Procenat neispravnosti					

Podaci o limu (optimalne vrednosti)

Mehan-tehnoške karakteristike

Zatezna δ_w [N/mm^2]	
Granica razvlačenja $\delta_1, \delta_{0.2}$ [$\frac{N}{mm^2}$]	
Izduženje pri prekidu δ_k [%]	
Dubina po ERICHSEN-U h_E [mm]	

Uslovi ispitivanja definisani:

✱

Karakteristike površine lima

Izgled površine	Glatka	
	Mat	
	Hrapava	
	Sa dozv mrlj.	
	Sa nezozv -i-	
Hrapavost R_a [μ]		
Vrsta prevlake	Galvanska	
	Lakiranje	
Figure razvlačenja	Ne dozvoljene	
	Dozvoljene	

Karakteristike koje se mogu eventualno ispit.

Ravnomerno izduženje δ_w [%]		
Tvrdća (HRB)	Skala 100 Kp	
	Skala 30 T	
Odnos δ_1/δ_w		
„n” - Faktor		
„r” - Faktor		
Anizotropija u ravni $\frac{\Delta n}{\Delta r}$		
Krupnoća zrna	Broj po ASTM - skali	
	Srednji d [μ]	
Hemijski sastav	Srednja a [mm^2 površina]	
	C [%]	
	Si [%]	
	Mn [%]	
	P [%]	
	S [%]	

Pakovanje i zaštita lima

Uljani premaz	
Zaštita paketa	
Broj uzdužnih	
Broj poprečnih	
Bez podmet.	

negativan, što bi značilo da je lim boljeg kvaliteta nego što je neophodno i da stoga poseduje oredjenu rezervnu obradivost. Ukoliko je, međutim, ta rezerva prevelika, onda je u pitanju lim neopravdano visokog kvaliteta, koji je skuplji, pa se može preći na lim nižeg tehnološkog kvaliteta i time proizvodnju učiniti ekonomičnijom.

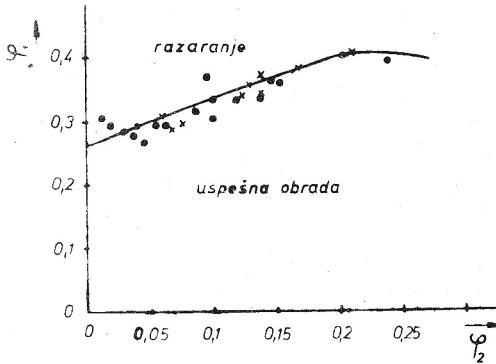
Ovakav pristup, ipak, krije u sebi nepovoljnost u tome što u slučajevima veće kolebljivosti proizvodnih uslova može doći do većih grešaka u iznosima za P, s obzirom na relativne teškoće pri tačnom odredjivanju konstante C (mada je na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu za to razradjena metodologija). Međutim, u mnogo slučajeva i nije od primarnog interesa da se vrednost za P sasvim tačno odredi, već da se izvrši, na primer, samo komparacija između obradivosti dve vrste ili dve isporuke limova. Tada konstanta C iz izraza može potpuno izostati i kompleksan pokazatelj postaje veoma pogodna komparativna karakteristika.

Najzad, neće biti na odmet ako se ukaže na činjenici da i pri pogoršanim obradnim uslovima bolji materijal uspešnije podnosi nastale promene naponsko-deformacionih stanja, pa su zato nekorektna mišljenja prema kojima se u slučaju kolebljivosti ovih uslova kvalitet lima smatra irelevantnim faktorom. Drugim rečima, ekstremna shvatanja u tom smislu nikako ne mogu biti odraz realnosti, niti voditi optimalnim rešenjima.

2.4. Ispitivanja korišćenjem dijagrama granične deformabilnosti (DGD)

Kvalitativno nov pristup ocenjivanju obradivosti lima uz istovremeno respektovanje, kako svojstava materijala, tako i obradnih uslova, započelo je 1965.g.

definisanjem DGD od strane S. Keeler-a u SAD. Ovaj dijagram, koji je u svojoj prvobitnoj verziji bio isključivo empirijskog karaktera, prikazan je na sl.3.



Sl. 3. Provobitni Keeler-ov DGD

Radi njegovog dobijanja na lim se pre obrade nanosi mreža malih krugova prečnika obično 2,5 - 5 mm, a zatim se on izvlači, pri čemu se prvobitni kružići deformišu u elipse odgovarajuće orijentacije i dimenzija koje zavise od stepena deformisanja na tom mestu. Pretpostavljajući ravansko naponsko stanje (što je u slučaju izvlačenja većih delova od lima manje - više realna pretpostavka), može se merenjem duže i kraće ose elipse doći i do deformacionog stanja na mestima ovih elemenata mreže. Ako je deformacija u pravcu duže ose elipse φ_1 , a u poprečnom pravcu φ_2 , biće:

$$\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d_0} \quad \varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}$$

pri čemu su d_1 i d_2 dužine duže i kraće ose elipse, a d_0 prečnik prvobitnog kruga.

Jasno je da će biti i $\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2)$

Ako se deo deformiše do nastanka prve pukotine na kritičnom mestu, odnosno bolje do početka lokalizacije deformisanja, onda će deformaciji φ_1 u tom trenutku odgovarati deformacija φ_2 u poprečnom pravcu.

Menjajući smišljeno odnose φ_1 i φ_2 (promenom odgovarajućeg naponskog odnosa σ_2/σ_1) dobiće se niz tačaka granične deformacije φ_{1M} , čijim se spajanjem (odnosno kontinualnom aproksimacijom njihovog rasporeda) dobija DGD.

Očigledno je da će posmatrani materijal koji u toku procesa izvlačenja u kritičnoj zoni dostigne deformaciju

$\varphi_1 < \varphi_{1M}$ (dakle, ispod DGD) moći da se uspešno obradjuje.

Važi svakako i obrnuto, tj. za $\varphi_1 > \varphi_{1M}$ doći će do razaranja materijala.

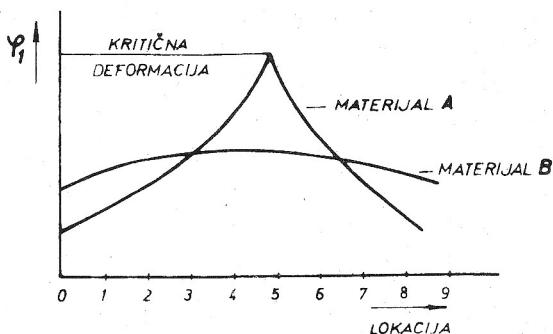
Da li će nastupiti jedan ili drugi slučaj zavisi, kako od svojstava materijala (položaj i oblik DGD), tako i od obradnih uslova, tj. naponskodeformacionog stanja na kritičnom mestu (položaj tačke stvarnih deformacija

$\varphi_1 - \varphi_2$ u dijagramu), tako da su oba uticaja uzeta u obzir (što nije bio slučaj kod klasičnih pokazatelja).

Osim toga, izražavajući na pogodan način rastojanje ove tačke od krive granične deformabilnosti može se kvantificirati postojeća rezerva obradivosti i time steći uvid u stvarne mogućnosti s obzirom na obradivost, odnosno u efekte eventualnih mera za njeno poboljšanje. Naime, položaj tačke zavisi od obradnih uslova, a ove sačinjavaju uticaji kao što su: sile i način držanja lima (uključujući oblik, raspored i veličinu zateznih rebara), oblik i veličina razvijenog stanja, podmazivanje, geometrija alata, itd., tako da se smišljenom pro-

menom ovih faktora može uticati na pogodno pomerenje tačke u dijagramu.

Brojna ispitivanja zadnjih godina pokazala su da su, pored navedenog, za obradivost od posebnog značaja još i distribucija deformacija u kritičnoj zoni dela, odnosno defirmacioni gradijent u toj zoni (sl.4). Ukoliko su deformacije skoncentrisane oko kritičnog mesta, to dovodi do većeg deformacionog gradijenta i situacija postaje nepovoljnija nego što je to slučaj pri blažem gradijentu, tj. ravnomernijem rasporedu deformacija po posmatranoj zoni. Ova nepovoljnost se ogleda u činjenici da oštiri gradijent dovodi do povećanja maksimalnih deformacija, kao i mogućnosti da one veoma lako u proizvodnim okolnostima dostignu kritičan iznos. Obrnuto, pri ravnomernijem rasporedu maksimalna deformacija će biti manja, a istovremeno će se smanjiti mogućnost da ona prebrzo poraste. Istovremeno se željeni oblik postiže uz učešće deformacija šire zone materijala - što je povoljnije.



Sl. 4. Različite distribucije deformacija u kritičnoj zoni otpreska

Da bi se ostvario ovaj povoljniji slučaj, postoje dva puta. Jedan je primena materijala sa većim deformacionim očvršćavanjem (o čemu je ranije bilo reči), što je nesumnjivo manje ekonomičan put, i drugi - primena povoljnijeg podmazivanja (koje omogućuje da se u deformisanje uključi šira zona materijala), promena geometrije alata, zateznih rebara, itd.

3. Zaključak

Trenutno stanje naučno - istraživačkih i tehnoloških saznanja u oblasti obradivosti lima nesumnjivo se odlikuje sasvim novim kvalitetom u odnosu na stanje od samo pre desetak godina. Jedan od problema koji se javlja u takvim okolnostima jeste i mogućnost praćenja tih promena i njihovog prihvatanja od strane stručnog kadra u industriji.

Pri tome treba posebno insistirati na već pomenutoj neophodnosti da se u rešavanje budućih problema ove vrste više nego dosad uključuju predstavnici sve tri osnovne grupacije: proizvođača lima, njegovog preradivača i naučno ? istraživačkih institucija. U najrazvijenijim zemljama sveta sve više preovladava ovakav stav i on biva, naročito zadnjih godina, sve šire prihvaćen u zajedničkom interesu. Svakako da se pri ovome ne misli na kontakte komercijalne ili slične prirode, kojih je bilo u dovoljnoj meri i ranije, već na stručno - tehnološku medjusobnu saradnju pri rešavanju kompleksnog problema obradivosti materijala.

DEVEDŽIĆ B.

DÜNNBLECHUMFORMBARKEIT DURCH TIEFZIEHEN UND
MÖGLICHKEITEN DESSEN BEWERTUNG

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird kritische Rückschau auf das klassische und die neueren Verfahren zur Prüfung der Blechumformbarkeit gegeben. Endlich wird es festgestellt, dass es zur erfolgreichen Lösung von Problem der Blechumformbarkeit Verbindung zwischen Blechhersteller, Blechbearbeiter und Wissenschaftler erforderlich ist.