



PD 13587



003093257

COBISS •

**Građevinski fakultet
Univerziteta u Beogradu**

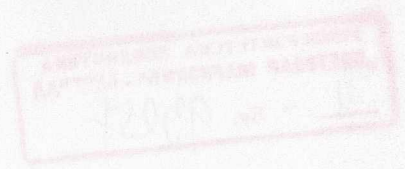
Dragan V. Buđevac

**PRILOG PRORACUNU I KONSTRUKCIJSKOM
OBLIKOVANJU HLADNO OBLIKOVANIH
PROFILA OTVORENOG POPREČNOG PRESEKA**

«Doktorska disertacija»

**Beograd
1990**

92 13587



UNIVERZITET U BEOGRADU
GRADJEVINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU

Memorandum
Nastala: Dr. Budjevac, 1990. godine, 1990. godine, 1990. godine
Gradjevinarski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Dragan V. Budjevac

Članovi Komisije:

**PRILOG PRORAČUNU I KONSTRUKCIJSKOM OBLIKOVANJU HLADNO
OBLIKOVANIH PROFILA OTVORENOG POPREČNOG PRESEKA**

- **Doktorska disertacija** -



Datum odbrane:

Datum promocije:

Doktorski naučni rad iz oblasti:

Beograd, 1990.

Mentor: Dr BRANKO ZARIĆ, dipl.inž.gradj. - redovni profesor
Gradjevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Članovi Komisije:

Ključne riječi:

- čelične konstrukcije

Datum odbrane:

Datum promocije:

Doktorat nauka: IZ TEHNIČKIH NAUKA -
OBLAST GRADJEVINARSTVO
(ČELIČNE KONSTRUKCIJE)

PRILOG PRORAČUNU I KONSTRUKCIJSKOM OBLIKOVANJU HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA OTVORENOG POPREČNOG PRESEKA

Pod nazivom hladno oblikovani profili (HOP) podrazumevaju se konstruktivni elementi proizvedeni hladnim oblikovanjem iz čeličnih limova i traka valjanjem ili presovanjem. Hladno oblikovani profili imaju veoma široko polje primene u građevinarstvu i poslednjih godina su u nekim područjima primene potpuno istisli vruće valjane profile zbog svojih nesumljivih prednosti. Rožnjače, kao element noseće konstrukcije zgrada, za koje se najčešće i primenjuju hladno oblikovani profili otvorenog poprečnog preseka, su bitan element u funkcionalnom, statičkom pa i u ekonomskom pogledu s obzirom da njihov udeo u ceni koštanja hala doseže i do 25%. Pristup analizi u projektovanju masovnih elemenata konstrukcije, kao što su rožnjače, je bitno različit od pristupa pri projektovanju unikatnih elemenata. Kod masovne, serijske, proizvodnje neophodno je sve parametre od uticaja uzeti u što preciznijem obliku, što je jedino moguće ostvariti eksperimentom. U okviru ove disertacije razmatrana su dva bitna parametra na nosivost rožnjača i to: 1) uticaj tehnologije proizvodnje na mehaničke karakteristike čelika i 2) određivanje optimalnog statičkog sistema (kontinualne rožnjače sa podvezicama i kontinualne rožnjače sa preklapanjem) i konstrukcijskog oblikovanja. U okviru ovih oblasti u tezi su date originalne podloge u obliku pojednostavljenih i za svakodnevnu inženjersku praksu lako prihvatljivih analitičkih izraza i dijagrama na osnovu kojih se mogu projektovati ovakvi savremeni sistemi rožnjača. Svi analitički izrazi su verifikovani sopstvenim eksperimentima sprovedenim uz primenu najsavremenije opreme i merenog instrumentarija. Takodje je sprovedena i detaljna tehno-ekonomska analiza više tipova rožnjača diferenciranih prema sistemima, oblicima i postupku proizvodnje koja je pokazala značajno preimućstvo u pogledu utroška čelika i koštanja predloženih Z preseka sistema rožnjača sa podvezicama i sa preklapanjem u odnosu na sve druge tipove primenjivane u dosadašnjoj praksi.

Ključne reči:

- čelične konstrukcije
- hladno oblikovani profili
- analiza konstrukcija
- efekti hladnog oblikovanja
- rožnjače
- sistem sa podvezicama
- sistem sa preklapanjem
- konstrukcijsko oblikovanje
- analiza koštanja

CONTRIBUTION TO CALCULATION AND CONSTRUCTION OF COLD-FORMED OPEN CROSS SECTIONS

The term cold-formed sections comprises structural elements produced by cold forming out of steel sheets and strips, by rolling or pressing. Cold-formed sections have a very wide range of application in civil engineering and in recent years they have, in some fields of application, completely pushed out hot rolled sections owing to their undoubtfull advantages. Purlins, as elements of load-bearing structure in buildings, for which cold-formed open cross sections are most commonly used, are important elements in functional, static and even in economic aspect, considering that their contribution to the cost of the buildings reaches up to 25%. Approach to analysis in design of mass production elements such as pulins is significantly different from the approach in design of single elements. In mass, serial production it is essential to take into account all the relevant parameters in a form as precise as possible, which can be achieved only by experiments. Within this thesis two parameters important for bearing capacity of purlins are considered: 1) the influence of production technology on mechanical characteristics of steel and 2) optimum structural system determining (continuous sleeved system and continuous overlap system) as well as the structural design. Within these ranges, original bases in a form of simplified and for every-day engineering practice acceptable analytical expressions and diagrams on basis of which such modern purlin systems can be designed are given. All analytical expressions are verified by their own experiments carried out using most modern equipment and measuring instruments. Detailed technological - economic analysis of several types of pulins, classified according to systems, shapes and production procedures, which showed significant advantage in view of steel consumption and cost of suggested Z-sections for sleeved and overlap system of purlins compared to all other types designed in previous practice is also carried out.

Key words:

- steel structures
- cold-formed sections
- structural analysis
- effect of cold work
- purlin
- sleeved system
- overlap system
- construction
- cost analysis

Izradom ove disertacije rukovodio je profesor dr BRANKO ZARIĆ. Ovim putem najtoplije mu se zahvaljujem na podršci u radu i dragocenim sugestijama i savetima.

Zahvaljujem se takodje profesoru E.R.BRYAN-u sa Univerziteta u Salford-u, kao i profesoru A.W.TOMA sa Instituta TNO u Delft-u na izuzetno korisnim sugestijama i preporukama pri realizaciji eksperimentalnog dela teze u poglavlju o primeni hladno oblikovanih profila za rošnjače.

Najtoplije se zahvaljujem radnoj organizaciji "METAL-SECCO" - Gornji Milanovac koja je uradila uzorke za ispitivanje i finansijski pomogla izradu ovog rada.

Veliku zahvalnost dugujem sledećim organizacijama koje su omogućile realizaciju eksperimentalnog dela teze: Vazduhoplovno-tehnički institut Beograd, Vojno-tehnički institut Beograd, Institut za ispitivanje materijala SR-Srbije Beograd, Institut "GOŠA - Organomatik" - Zavod za ispitivanje materijala Smederevska Palanka, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, "Palilula" Beograd, "Mostogradnja" Beograd i Saobraćajni institut CIP Beograd.

Takodje se zahvaljujem Mašinskom fakultetu Univerziteta "Svetozar Marković" u Kragujevcu na pomoći pri numeričkoj simulaciji ponašanja celih profila pri opitu zatezanjem programom PAK.

Zahvalnost dugujem i članovima KABINETA ZA METALNE KONSTRUKCIJE na savetima i pomoći u toku rada, kao i članovima INSTITUTA ZA MATERIJALE I KONSTRUKCIJE GRADJEVINSKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU na podršci, finansijskoj pomoći i tehničkoj obradi rukopisa.

Dragan BUDJEVAC

II OPTIMIZACIJA PROJEKCIJA I KONSTRUKCIJSKOG OBLIKOVANJA
 HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE
 PRI PRIMENI ZA 20

S A D R Ž A J

	Strana
UVOD	1
1. Opšte napomene	1
2. Materijal	2
3. Način proizvodnje	4
4. Vrste hladno oblikovanih proizvoda	7
5. Oblast primene hladno oblikovanih profila u gradjevinarstvu	8
6. Statičko ponašanje hladno oblikovanih profila opterećenih na savijanje	18
7. Naučno-istraživački rad i razvoj tehničke regulative	23
I UTICAJ TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA NA MEHANIČKE KARAKTERISTIKE ČELIKA	26
1. Opšti prikaz efekata hladnog oblikovanja na mehaničke karakteristike čelika	26
1.1. Uvod	26
1.2. Efekat hladnog istezanja na čelične limove	28
1.3. Teorijska osnova pojava konstatovanih eksperimentalnim ispitivanjem	33
1.4. Karakteristike uglova hladno oblikovanih profila	35
1.5. Efekat hladnog oblikovanja prema Lind-u i Schroff-u	44
1.6. Neki faktori od uticaja na povećanje granice razvlačenja celog profila	48
2. Program sopstvenih istraživanja efekata tehnologije proizvodnje na mehaničke karakteristike čelika	53
2.1. Definisaneje programa	53
2.2. Primenjena merna tehnika i postupak ispitivanja	58
2.2.1. Merenje površine poprečnih preseka ugaonih epruveta	58
2.2.2. Ispitivanje epruveta opitom zatezanja	60
2.2.3. Ispitivanje celih profila opitom zatezanja	70
2.3. Analiza dobijenih rezultata i zaključak	79
2.4. Primena efekata hladnog oblikovanja na elemente opterećene na savijanje	102

II OPTIMIZACIJA PRORAČUNA I KONSTRUKCIJSKOG OBLIKOVANJA HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE PRI PRIMENI ZA ROŽNJAČE	105
1. Uvod	105
2. Postupci proračuna rožnjača od HOP	108
3. Projektovanje na osnovu eksperimenta	109
3.1. Sistem kontinualnih rožnjača sa podvezicama(navlakama)	109
3.1.1. Uvod	109
3.1.2. Program eksperimentalnog dela teze	112
3.1.3. Primenjena merna tehnika, postupak ispitivanja i rezultati	117
3.1.4. Analiza dobijenih rezultata sa zaključkom	127
3.2. Sistem kontinualnih rožnjača sa preklapanjem	137
3.2.1. Uvod	137
3.2.2. Odredjivanje graničnog momenta savijanja sistema sa preklapanjem oslonačkim opitom	141
4. Uticaj konstrukcijskog oblikovanja i krovnog pokrivača na statičko ponašanje rožnjača	148
4.1. Uvod	148
4.2. Analitičko-eksperimentalni postupak obuhvatanja uticaja krovnog pokrivača na statičko ponašanje rožnjača	153
4.2.1. Postupak proračuna prema Peköz-u	153
4.2.2. Postupak proračuna prema Lindner-u	157
5. Tehno-ekonomska analiza rožnjača od hladno oblikovanih profila	159
ZAKLJUČAK	171
LITERATURA	172

UVOD

1. OPŠTE NAPOMENE

U čeličnim konstrukcijama koriste se uglavnom tri glavne familije konstruktivnih elemenata, a to su: vruće valjani profili, elementi oblikovani zavarivanjem od limova i hladno oblikovani profili. Pod nazivom hladno oblikovani profili (HOP) podrazumevaju se konstruktivni elementi proizvedeni hladnim oblikovanjem iz čeličnih limova i traka valjanjem ili presovanjem. Debljine čeličnih limova ili traka koji se koriste pri proizvodnji hladno oblikovanih proizvoda kreću se obično u opsegu od 0,4 mm do 6 mm.

Hladno oblikovani proizvodi imaju veoma široko polje primene u građevinarstvu, avio i autoindustriji, brodogradnji, proizvodnji železničkih vagona, poljoprivredi, elektroopremi itd. Proizvodnja hladno oblikovanih proizvoda u poslednjoj deceniji ima izuzetan rast, što se može ilustrovati na primeru Velike Britanije gde metaloprerađivačka industrija apsorbuje oko 300.000 tona ovih proizvoda godišnje. Od ove količine 60.000 tona su profilisani nosači, 120.000 tona profilisani limovi, 60.000 tona elementi za paletna i regalna skladišta, a 60.000 tona za sve ostale vrste proizvoda. Uočeno je takodje da proizvodnja stalno raste i to po stopi od 10% godišnje. Slična situacija je i u drugim zemljama Evrope (SR Nemačka, Švedska, ČSSR, Francuska, Holandija itd), kao i u vanevropskim zemljama (SAD, Kanada, Australija, Japan itd.).

Upotreba hladno oblikovanih profila u zgradarstvu datira još od 1850. godine u SAD i Velikoj Britaniji, ali se šire nisu primenjivali do završetka drugog svetskog rata. Od 1946. godine upotreba i razvoj HOP i konstrukcija od njih u SAD je znatno ubrzana pojavom "Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members", Američkog Instituta za čelik i gvoždje (AISI). Ovi propisi su zasnovani na obimnom istraživačkom radu pod pokroviteljstvom AISI na Cornell University pod rukovodstvom Georg Winter-a.

U poredjenju sa ostalim čeličnim proizvodima tankozidni hladno oblikovani profili imaju niz prednosti kao što su:

- mala težina, a stim u vezi manji utrošak čeličnog materijala po m² objekta u poredjenju sa vruće valjanim profilima (15-40%, a za neke elemente i preko 50%),
- širok dijapazon oblika i dimenzija, sa vrlo malim medjintervalima visina, širina i debljina što se lako omogućuje tehnolgijom proizvodnje;

- preciznost dimenzija je znatno veća u poredjenju sa vruće valjanim profilima, te je moguće pri proračunu i montaži koristiti veoma male proizvodne tolerancije;
- kvalitet površina HOP je neuporedivo bolji od onih kod vruće valjanih profila, pogotovu ako se dobijaju iz hladne valjanih limova, što doprinosi olakšanom nanošenju i povećanju trajnosti zaštite od korozije;
- mehaničke karakteristike čelika (granica razvlačenja i zatezna čvrstoća) značajno se povećavaju hladnim oblikovanjem, te se pogodnim oblicima preseka znatno povećava nosivost profila;
- lako se proizvode "gnezdasti" preseki pogodni za kompaktno pakovanje, manipulaciju i transport;
- adekvatnim izborom oblika mogu se postići značajni estetski i konstruktivni efekti;
- noseći paneli ne samo da primaju opterećenje upravno na svoju ravan, već mogu delovati kao krute dijafragme za prijem sila u svojoj ravni ako su pozdano medjusobno spojeni sa nosećim elementima;
- brza i laka montaža.

Kombinovanje navedenih prednosti omogućava znatnu uštedu u koštanju nosećih konstrukcija, te nije čudo što u velikom broju razvijenih zemalja izgradnja konstrukcija od hladno oblikovanih proizvoda pokazuje izuzetno brz trend razvoja.

U nedostatke hladno oblikovanih proizvoda spadaju:

- viša jedinična cena u odnosu na vruće valjane profile;
- manja otpornost u odnosu prema grubim postupcima pri transportu i montaži;
- izraženija opasnost od dejstva korozije u tom smislu, da isti korozioni efekat više slabi tankozidni presek HOP-a od debelozidnog preseka vruće valjanih profila;
- relativno teže spajanje.

2. MATERIJAL

Hladno oblikovani proizvodi dobijaju se u hladnom stanju od niskouglednih i legiranih čelika, umirenih ili neumirenih, sa granicom razvlačenja od 250 do 630 N/mm², a uobičajeno 280 do 350 N/mm². Jedini uslov koji se traži od materijala je dovoljna duktilnost, da bi osnovni materijal mogao primiti znatna poprečna savijanja, sa malim poluprečnicima (obično $r = t$) bez prslina i da omogući plastifikaciju u oblastima koncentracije napona, posebno u vezama.

Izduženje merne dužine od 50 mm u kombinaciji sa odnosom zatezne čvrstoće i granice razvlačenja σ_m / σ_v može se usvojiti kao mera duktilnosti čelika. Prema referenci /49/ zaključeno je da je dovoljna duktilnost koja odgovara odnosu σ_m / σ_v ne manjem do 1,08 sa izduženjem merne dužine od 50 mm ne manjem od 10%. Čelici koji ne ispunjavaju ovaj uslov mogu se upotrebiti za profile koji zahtevaju umereno hladno oblikovanje i koji nemaju visokonaponske veze.

Savremene tehnologije omogućavaju proizvodnju ovih elemenata presvučenih drugim metalima (cink, aluminijum), plastičnim masama ili lakovima, čime se postiže zadovoljavajući izgled i odlična zaštita od korozije još u toku proizvodnje.

Još jedna važna osobina o kojoj treba voditi računa kod hladno oblikovanih elemenata je zavarljivost. Limovi sa plastičnim prevlakama ne mogu se uopšte zavarivati. Zavarivanje limova presvučenih metalima je otežano i mora se prilagoditi vrsti metala. Kada se govori o najčešće primenjivanim toplo pocinkovanim limovima, oni se mogu zavarivati elektrolučno, stim da se elektroda mora češće čistiti od naslaga cinka. Za tačkasto zavarivanje pocinkovanih limova korisno je u vrh elektrode ubaciti umetak od volframa. Mora setakodje voditi računa da je u okolini vara cinčana prevlaka uklonjena. Pažnju zaslužuje i pitanje zavarivanja na mestu hladnog oblikovanja u uglovima. Ako je ova oblast pod dužim uticajem zagrevanja na temperaturi od 600°C materijal čija je struktura usled hladnog oblikovanja narušena, rekristalizira, dolazi do stvaranja krupnozrne strukture, te pri tom i do pogoršanja mehaničkih osobina, pa čak i do mogućnosti pojave prslina.

Vruće valjani limovi i trake su jeftiniji, ali se redje koriste pošto im je površina pokrivena kovarinom, koja haba skupe valjke na mašinama za profilaciju, čime im bitno umanjuje vek trajanja. Radi zaštite od ovoga trake se čiste potapanjem u rastvore kiselina, elektrolitskim potapanjem ili čišćenjem u mlazu abraziva. Nasuprot ovome dobra osobina im je lakša mogućnost oblikovanja u hladnom stanju u odnosu na hladno valjane trake. Hladno oblikovani limovi i trake su skuplji, ali imaju kvalitetnu glatku površinu i ravnomerniju debljinu od toplo valjanih. Konstantna debljina osnovnog materijala je važna osobina, naročito za proizvodnju preseka na liniji za profilisanje, gde sva neravnomerna odstupanja negativno deluju na kontinualnost proizvodnog procesa.

Današnji trend u proizvodnji HOP je u primeni čelika visoke čvrstoće koji medjutim imaju nižu duktilnost i granicu proporcionalnosti, pa je neophodno sprovesti obimna istraživanja da bi se ustanovili približni postupci proračuna za elemente proizvedene od ovih čelika. Efikasnost upotrebe visokovrednih čelika prvenstveno zavisi od tipa loma, ako element ima veliku vitkost ili neukručenu nožicu sa izuzetno velikim odnosom širina/debljina lom se javlja izvijanjem ili izbočavanjem, te je upotreba visokovrednih čelika u ovim slučajevima neopravdana.

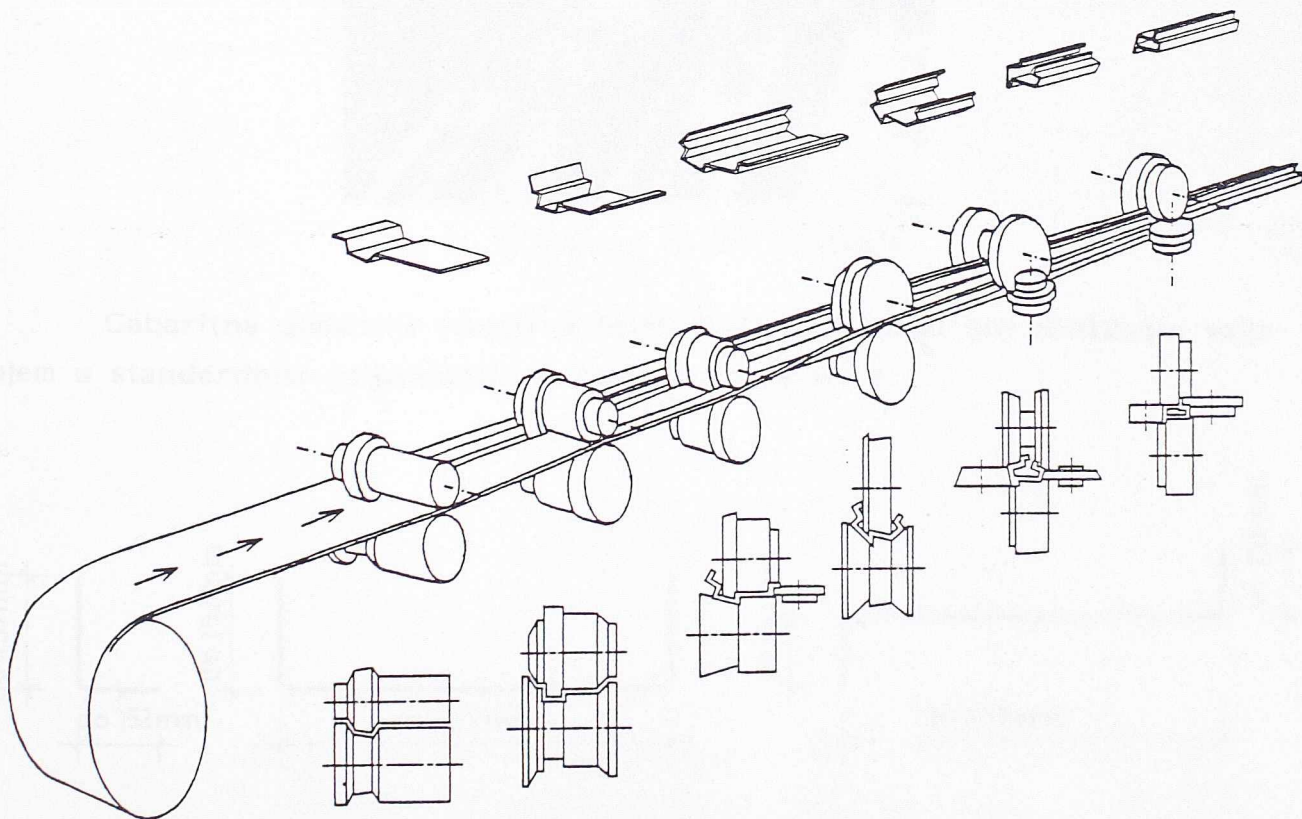
3. NAČIN PROIZVODNJE

Hladno oblikovani elementi proizvode se postepenim oblikovanjem iz osnovnog lima (ili trake) u hladnom postupku sve do željenog oblika. Ovo se može postići sledećim tehnološkim postupcima:

- valjanjem,
- presovanjem,
- savijanjem.

Valjanje u hladnom stanju široko se upotrebljava za proizvodnju profila i profilisanih limova i pogodno je za masovnu proizvodnju, te danas predstavlja osnovni postupak za proizvodnju hladno oblikovanih elemenata. Preseci se formiraju iz traka širine do 762 mm i dužine više od 915m namotanih na kaleme. Ovom tehnologijom proizvodnje ne mogu se dobiti preseci koji po dužini menjaju poprečni presek.

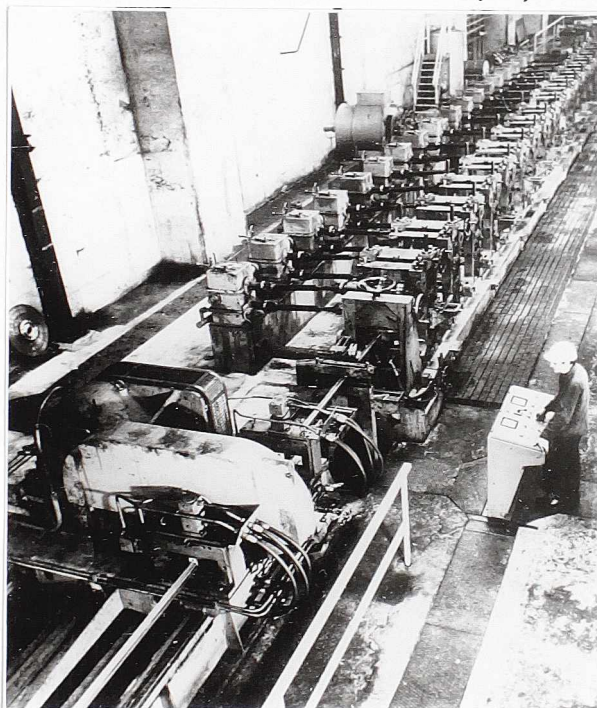
Mašina koja se koristi za hladno valjanje sastavljena je od više parova valjaka (sl. 1) koji kontinualno oblikuju traku u finalno zahtevani oblik. Jednostavni preseci mogu biti proizvedeni sa do 6 parova valjaka. Medjutim složeni preseci zahtevaju više od 15 kompleta valjaka. Ceo komplet valjaka za proizvodnju jednog tipa preseka može se demontirati i zameniti drugim za nekoliko dana.



Sl. 1 Proces oblikovanja hladnim valjanjem

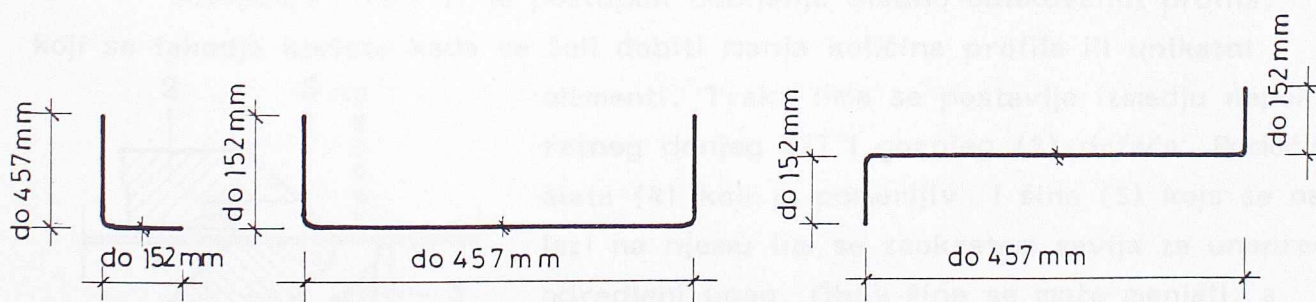
Brzina valjanja kreće se u opsegu od 6–92 m/min, a uobičajeno iznosi 23–46 m/min. Na završetku operacije oblikovanja kompletan presek se odseca na zahtevanu dužinu automatskim sečenjem bez zaustavljanja rada mašine. Maksimalna dužina sečenja je uobičajeno između 6 i 12 m. U savremenim fabrikama za proizvodnju hladno oblikovanih rožnjača i fasadnih rigli, bušenim karticama ubačenim u mašinu, elementi se seku automatski na zahtevanu dužinu, sa istovremenim bušenjem rupa u tačno projektovanom položaju. Granična debljina lima koji se mogu hladno valjati je za ugljenične čelike 19 mm, a za nerđajuće do 7,6 mm.

Na sl. 2 prikazana je mašina za hladno valjanje



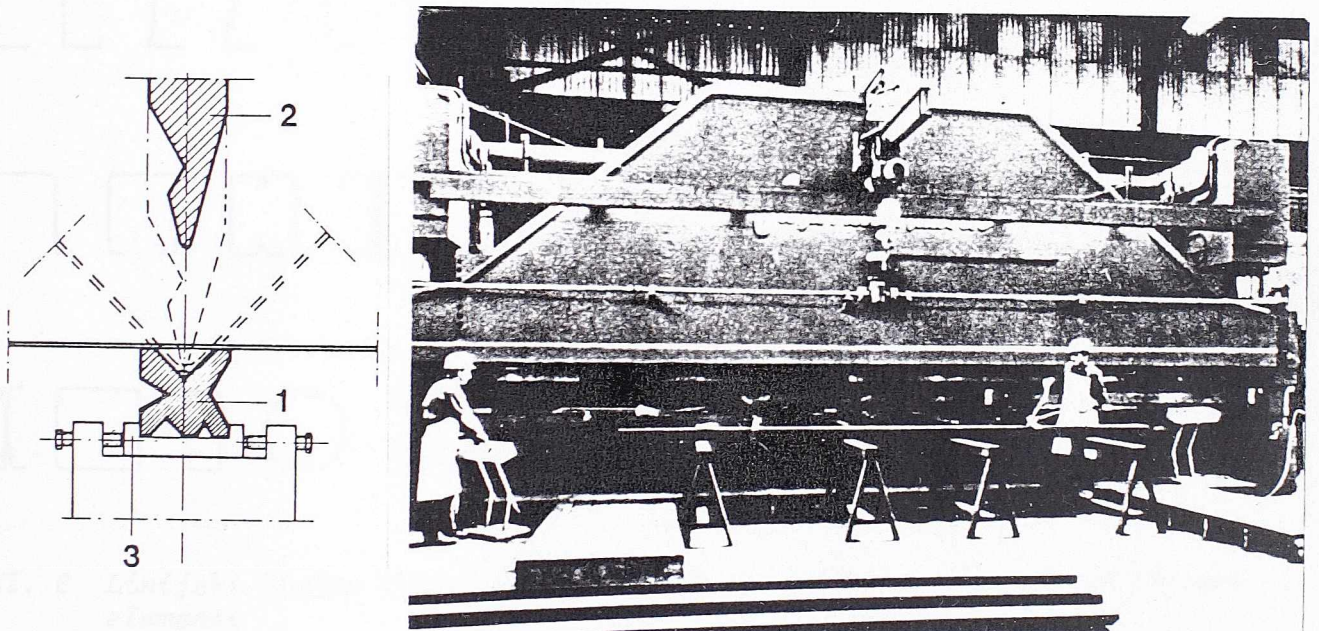
Sl. 2 Mašina za hladno valjanje

Gabaritne dimenzije konstruktivnih oblika koji mogu biti oblikovani valjanjem u standardnim valjaonicama prikazane su na sl. 3.



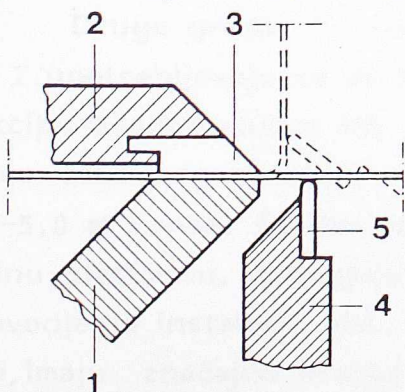
Sl. 3 Granične dimenzije HOP dobijenih valjanjem

Presovanje kao način oblikovanja HOP upotrebljava se u slučajevima kada je: poprečni presek jednostavne konfiguracije, potrebna količina profila manja, i dobijeni presek relativno širok. Profili koji menjaju poprečni presek po dužini mogu se proizvoditi samo na ovaj način. Mana ovog postupka proizvodnje je relativno mala dužina profila, ograničena dužinom prese. Postupak proizvodnje je dosta jednostavan, tj. presa se sastoji od pokretnog gornjeg dela ("čekić") i nepokretnog donjeg dela (matrica prese) koja ima potrebni oblik hladno oblikovanih profila (sl. 4). Prese mogu biti hidrauličke ili mehaničke i obično rade sa pritiscima do 12000 kN. Broj podizanja prese je od 2 do 50 u jednoj minuti. Profil se dobija tako što se po fiksiranju osnovne trake ona pritiska gornjim delom prese (2) u matricu V oblika (1). Matrica leži na centriran profilu (3) čiji se položaj reguliše vijcima. Oblik "čekića", njegova dubina ulaženja u matricu, konstrukcija matrice i kvalitet osnovnog materijala trake lima značajni su parametri koji određuju mašinski uslovljen tok rada.



Sl. 4 Postupak presovanja i izgled prese nosivosti 12000 kN

Savijanje (sl. 5) je postupak dobijanja hladno oblikovanih profila, koji se takodje koriste kada se želi dobiti manja količina profila ili unikatni elementi. Traka lima se postavlja izmedju nepokretnog donjeg (1) i gornjeg (2) držača. Pomoću alata (4) koji je pomerljiv i šine (5) koja se nalazi na njemu lim se zaokretom savija za unapred određeni ugao. Oblik šine se može menjati, a time i oblik dobijenog profila.



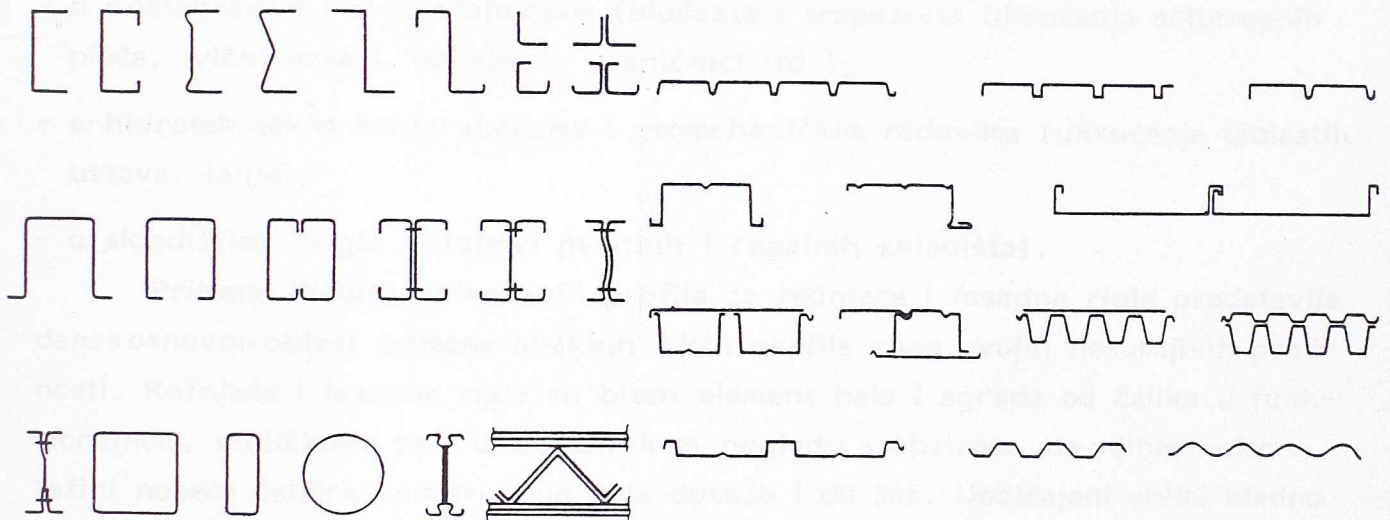
Sl. 5 Postupak savijanja

Treba naglasiti da koštanje proizvoda često zavisi od tehnološkog procesa proizvodnje.

Ref. /50/ pokazuje da pored zahteva nosivosti i dimenzija projektant treba takodje da razmotri i druge faktore od uticaja kao što su: oblikovnost, koštanje materijala, kapacitet i koštanje opreme za proizvodnju, fleksibilnost u obradi, manipulacija materijalom itd.

4. VRSTE HLADNO OBLIKOVANIH PROIZVODA

Hladno oblikovani čelični konstruktivni elementi mogu se klasifikovati u dve grupe: linijski i površinski. Na sl. 6 prikazan je izvestan broj linijskih profila. Uobičajeni oblici su U, C, Z, Σ , šesirasti, cevni (okrugli, kvadratni, pravougaoni), itd. Generalno, visina ovakvih profila kreće se u opsegu od 50 do 300 mm, sa debljinom zida od 1,2 do 6,4 mm. Primarna funkcija linijskih pro-



Sl. 6 Linijski hladno oblikovani elementi

Sl. 7 Površinski hladno oblikovani elementi

fila je prijem opterećenja, te su pri njihovoj analizi dominantne osobine nosivosti i krutost. Ovi oblici se uglavnom koriste za rožnjače, fasadne rigle, podne nosače, podvlake, štapove rešetkastih nosača itd.

Druga grupa, tj. površinski hladno oblikovani elementi, prikazani na sl. 7 upotrebljavaju se za krovne pokrivače, podne ploče medjuspratnih konstrukcija, fasadne obloge itd. Visine panela kreću se u oblasti 30-190 mm, sa debljinom osnovnog materijala od 0,5 do 1,9 mm i mogu da premoste raspone od 1,0-5,0 m i više. Čelični paneli ne samo da imaju statičku funkciju već obrazuju radnu platformu, zamenjuju oplatu kod medjuspratnih konstrukcija, omogućavaju provodjenje instalacija itd. Ovakvi paneli, adekvatno vezani za noseću konstrukciju, imaju značajnu krutost u svojoj ravni, te se mogu tretirati kao krute dijafragme. Stoga čelični paneli utiču kako na poprečnu krutost tako i na smanjenje



rotacije elemenata za koji su vezani. Ovakvo ponašanje može se pouzdano uvesti u proračun na osnovu "stressed skin design".

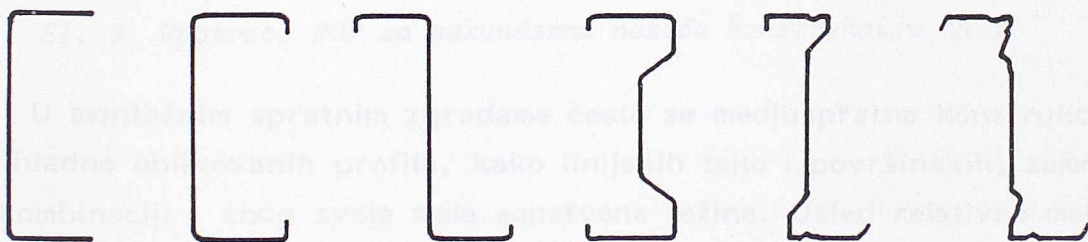
Iz gore navedenog vidi se da se linijski elementi optimiziraju tako da poseduju maksimalnu nosivost i krutost po jedinici težine, a površinske strukture uz statičke moraju da zadovolje i različite funkcionalne zahteve.

5. OBLASTI PRIMENE HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA U GRADJEVINARSTVU

Mogućnosti primene hladno oblikovanih proizvoda, u gradjevinarstvu su višestruke i to:

- u visokogradnji i industrijskoj izgradnji (rožnjače, fasadne rigle, podni nosači, rešetkasti nosači, fasadne i krovne obloge, paneli, oluci, metalna stolarija itd.);
- u mostogradnji i saobraćajnicama (olučasta i trapezasta ukrućenja ortotropnih ploča, ivični nosači, odbojnici, graničnici itd.);
- u hidrotehničkim konstrukcijama i geomehaničkim radovima (ukrućenja tablastih ustava, talpe);
- u skladištima (rigle i stubovi paletnih i regalnih skladišta).

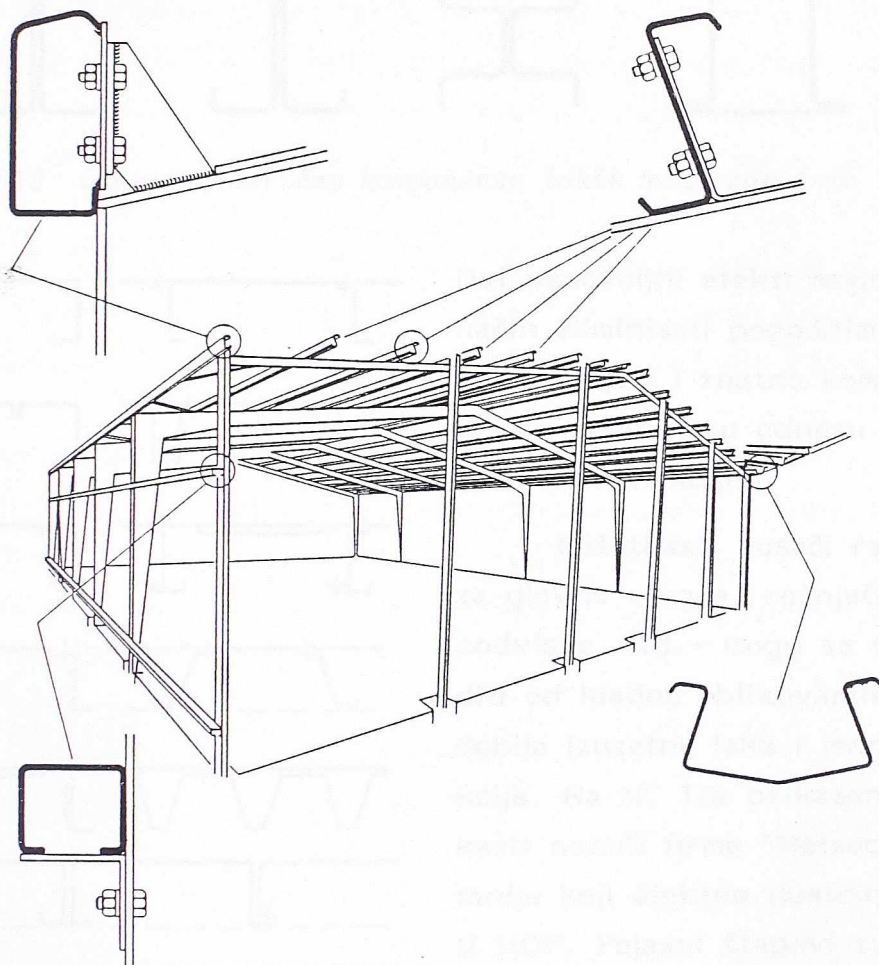
Primena hladno oblikovanih profila za rožnjače i fasadne rigle predstavlja danas osnovnu oblast primene ovakvih lakih profila zbog svojih nesumljivih prednosti. Rožnjače i fasadne rigle su bitan element hala i zgrada od čelika u funkcionalnom, statičkom, pa i u ekonomskom pogledu s obzirom da njihov udeo u težini noseće čelične konstrukcije hala doseže i do 30%. Uobičajeni oblici hladno oblikovanih profila otvorenog poprečnog preseka prikazani su na sl. 8. Ovi ob-



Sl. 8 Uobičajeni poprečni preseki rožnjača

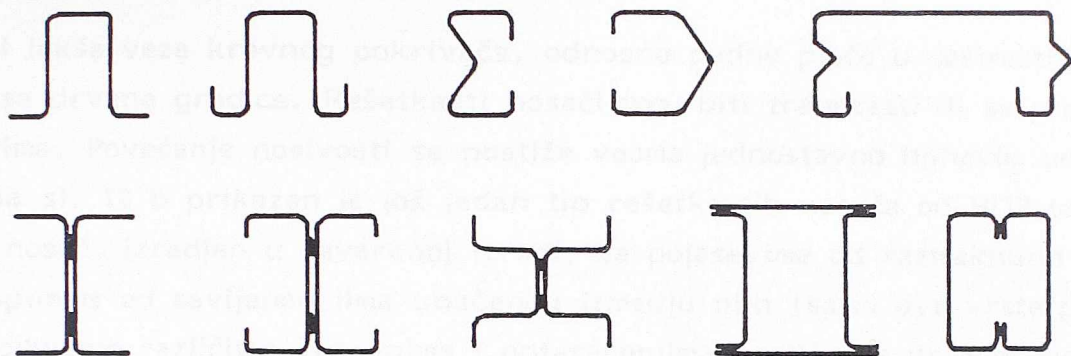
lici profila su rezultati brojnih istraživanja i svaki predstavlja efikasni konstruktivni element. Glavna tendencija u projektovanju rožnjača ogleda se u povećanju mehaničkih karakteristika materijala i smanjenju debljine materijala, iz čega je proistekao viši odnos napona prema masi, ali uz neophodnost pažljivog razmatranja efekata lokalne i globalne nestabilnosti. Najčešće primenjivani statički sistemi za rožnjače su prosta i kontinualna greda, a u slučaju kada treba stabilizovati donji pojas glavnih vezača koriste se i kosnici. Za fasadne rigle uglavnom

se koriste proste grede. Trenutno u svetu postoji veliki broj proizvođača koji ove elemente rade kao metalnu galanteriju koja se može primeniti za bilo koji glavni noseći sistem sa različitim materijalom glavne noseće konstrukcije. Jedna ovakva mogućnost prikazana je na sl. 9.

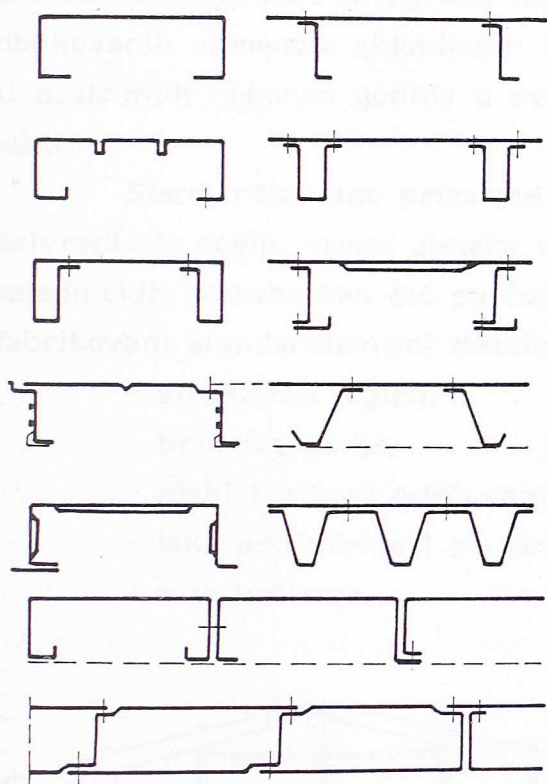


Sl. 9 Upotreba HOP za sekundarnu noseću konstrukciju hala

U montažnim spratnim zgradama često se međuspratna konstrukcija izvodi od hladno oblikovanih profila, kako linijskih tako i površinskih, samostalno ili u kombinaciji, zbog svoje male sopstvene težine. Usled relativno male težine ovakvih sistema posebnu pažnju treba obratiti na akustiku i termoizolaciju. Nosivost i krutost znatno se povećavaju pri spregnutom dejstvu čeličnih i pločastih elemenata. Pločasti elementi mogu se raditi od metala ili nemetala (lake betonske ploče, medijapan, panel, drvo, gips itd). Linearne čelične komponente međuspratnih konstrukcija prikazane su na sl. 10, a površinske na sl. 11. Poseban problem kod ovakvih sistema sa malom masom predstavlja deformabilnost kako povećanim ugibom tako i značajnim vibracijama što ima nepovoljan efekat ne samo na druge noseće nemetalne elemente (podna ploča, pregradni zidovi), već i na neprijatni osećaj podrhtavanja kod ljudi koji borave u takvoj zgradi.



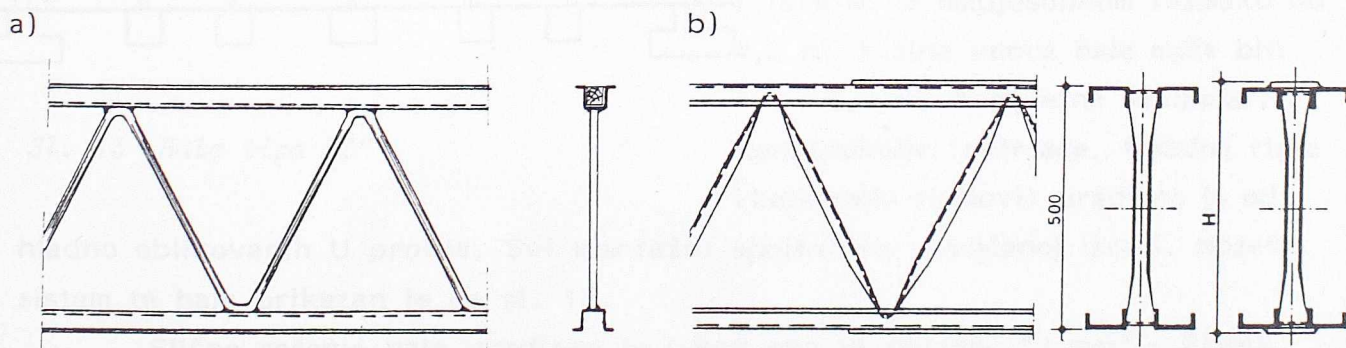
Sl. 10 Linearne čelične komponente lakih međuspratnih konstrukcija



Sl. 11 Površinske čelične komponente lakih međuspratnih konstrukcija

Ovi nepovoljni efekti mogu se na neki način eliminisati pogodnim konstrukcijskim oblikovanjem i znatno kompleksnijom statičkom analizom u odnosu na klasične čelične konstrukcije

Rešetkasti nosači različite namene - za glavne vezače, rožnjače, podne nosače, podvlake, itd.- mogu se takodje proizvoditi od hladno oblikovanih profila čime se dobija izuzetno laka i jednostavna konstrukcija. Na sl. 12a prikazani su tipski rešetkasti nosači firme "Metsec" iz Velike Britanije koji efektno ilustruju sve mogućnosti HOP. Pojasni štapovi su izvedeni kao šerširasti, dok se dijagonalna ispuna može uraditi bilo od cevastih profila ili od hladno oblikovanih ugaonika. Medjusobna veza ispune za pojaseve izvedena je direktnim zavarivanjem. Radi povećane stabilnosti gornjeg



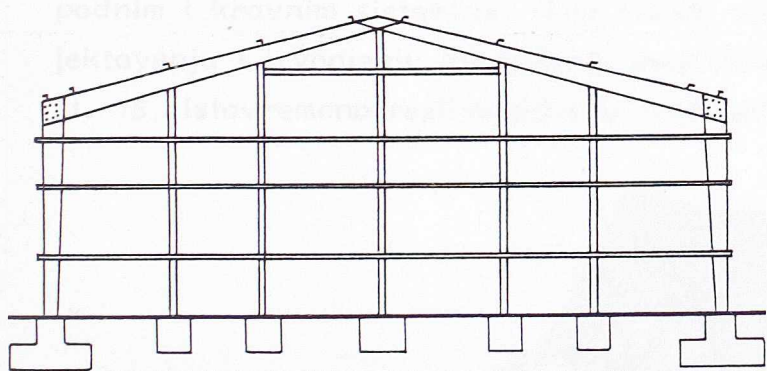
Sl. 12 Rešetkasti nosači od HOP a) tipa "Metsec"
b) tipa "X"

pojasa i lakše veze krovnog pokrivača, odnosno podne ploče u šesirasti profil umeću se drvene gredice. Rešetkasti nosači mogu biti trapezasti ili sa paralelnim pojasevima. Povećanje nosivosti se postiže veoma jednostavno njihovim udvajanjem. Na sl. 12 b prikazan je još jedan tip rešetkastih nosača od HOP takozvani "X" nosač, izradjen u zavarenoj izradi, sa pojasevima od razmaknutih U profila i ispunom od savijenog lima ubačenog izmedju njih (samo dve vrste profila). Prilagodjavanje različitim rasponima i opterećenjima postiže se uz kombinovanje sa limom za ojačanje i dupliranjem visine kao i uz promenu debljine materijala.

Kroz razvoj industrije HOP neprekidno se provlačila ideja o konceptu prefabrikovanih hala ili zgrada napravljenih pretežno ili isključivo od hladno oblikovanih elemenata sklopljenih u fabrici sa olakšanom i ukrupljenom montažom. U poslednjih nekoliko godina u ovoj oblasti su ostvareni brojni interesantni objekti.

Standardizovane prizemne hale imaju široku primenu u industriji i poljoprivredi. U novije vreme sistemi metalnih hala upotrebljavaju se i za zadovoljenje zajedničkih potreba kao što su hale za rekreaciju, sport, škole itd. Ovakvi prefabrikovani standardizovani metalni objekti imaju bitne prednosti kao što su:

- atraktivan izgled,
- brza izgradnja,
- niski troškovi održavanja,
- lako produženje i proširenje i
- niže koštanje.



Sl. 13 Hala tipa "Z"

Jedan od interesantnijih objekata ovoga tipa je hala tipa "Z" razvijena u Japanu. Statički sistem glavnog nosača je trozglobni okvir kod koga su i stub i rigla izvedeni od hladno oblikovanog Z profila. Glavni nosači se rade sa rasponima 8,4; 12,0 i 15,6 m na medjusobnom razmaku od 4,2 m. Visina venca hale može biti 3,0 i 5,0 m. Kompletna sekundarna konstrukcija (rožnjače, fasadne rigle i kalkanski stubovi) uradjena je od

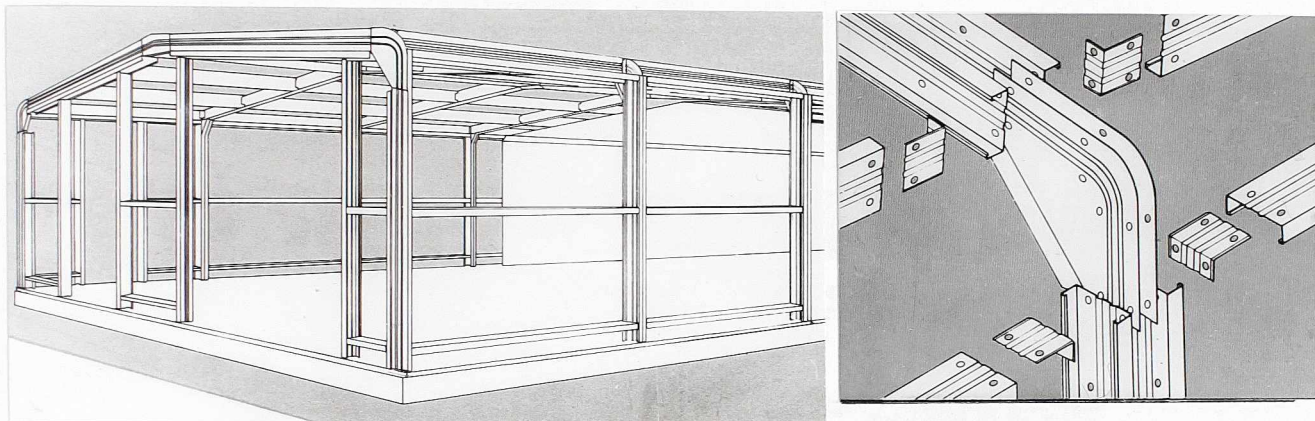
hladno oblikovanih U profila. Svi montažni spojevi su u vijčanoj izradi. Noseći sistem te hale prikazan je na sl. 13.

Slično rešenje hale uradjeno je i kod nas za potrebe "3 maj" - Rijeka.

Jedno od izuzetnih savremenih rešenja hala ovakvog tipa predstavlja SWAGE BEAM sistem, kod kojeg su kompletni glavni nosači okvirnog sistema



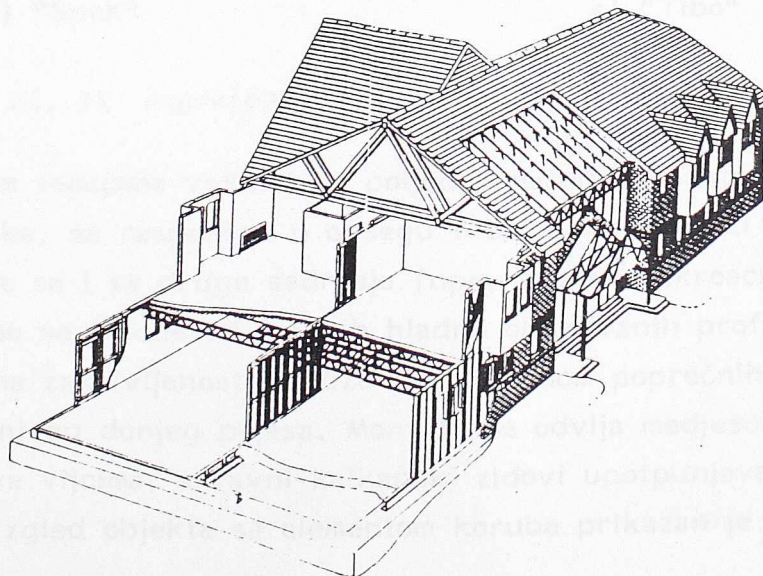
izvedeni od jednog jedinog hladno oblikovanog profila, koji se ujedno koristi i za rožnjače i fasadne rigle. Ovaj sistem prikazan je na sl. 14. Primenljiv je za raspone od 9 do 15 m sa razmacima vezača od 4,5 m, i visinom venca hale do 6,0 m.



Sl. 14 SWAGE BEAM sistem hala

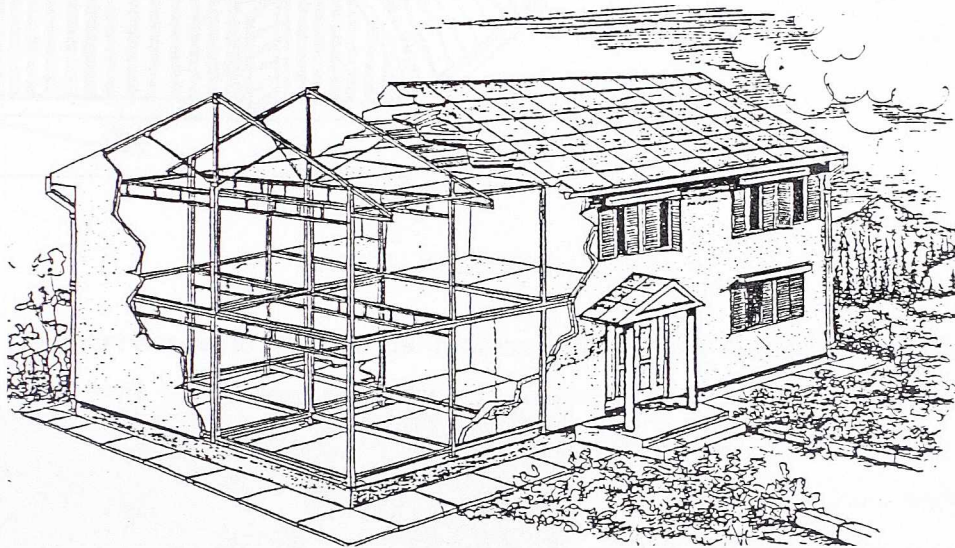
Industrijalizovana izgradnja montažnih zgrada različite namene predstavlja široko polje primene, a generalno se sprovodi u dva sistema: panelni i modularni. U panelnom sistemu pločasti zidni, podni i krovni elementi su prefabrikovani u radionici, transportovani na gradilište te montirani na predviđenom mestu, dok kod modularnog (čelijastog) sistema trodimenzionalna jedinica se proizvodi u radionici, transportuje na gradilište i tu postavlja na svoje mesto i pričvršćuje.

Jedno od značajnijih ostvarenja koje ovde treba pomenuti je METFRAME modularni konstruktivni sistem. On primenjuje prefabrikovane noseće panele sa čeličnom podkonstrukcijom od HOP i termoizolacijom u kombinaciji sa raznovrsnim podnim i krovnim sistemima. Ovaj sistem omogućava značajnu fleksibilnost u projektovanju i izvodjenju atraktivnih konstrukcija zgrada kao što je ilustrovano na sl. 15, istovremeno realizujući sve prednosti modularnog sistema.

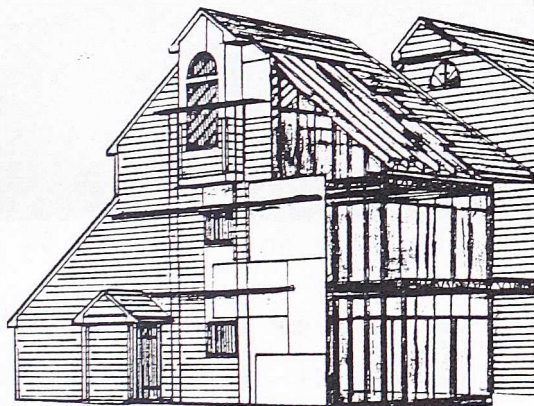


Sl. 15 METFRAME sistem zgrada od HOP

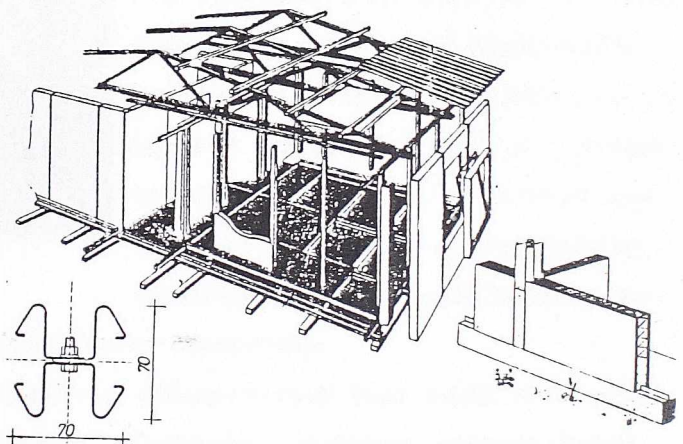
U Jugoslaviji ima takodje više primera projektovanja i izvodjenja montažnih zgrada od HOP, mada ni jedna nije doživela pravu afirmaciju. Na sl. 16 prikazani su najefektniji domaći sistemi: "Takovo"- "Graditelj" - Gornji Milanovac; "Spak" - "Energoprojekt" - Beograd i "Tibo" - "3 maj" - Rijeka



a) "Takovo"



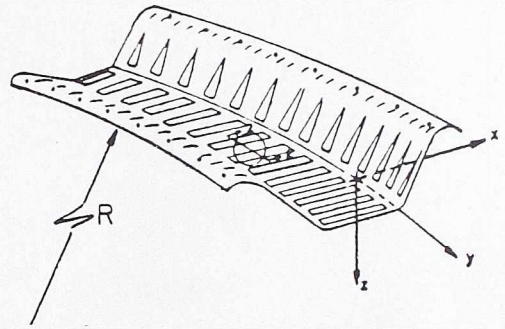
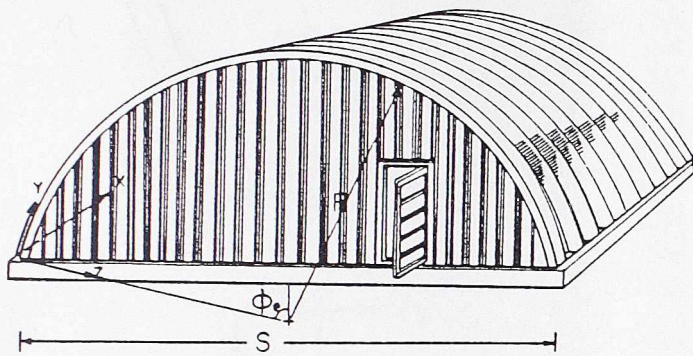
b) "Spak"



c) "Tibo"

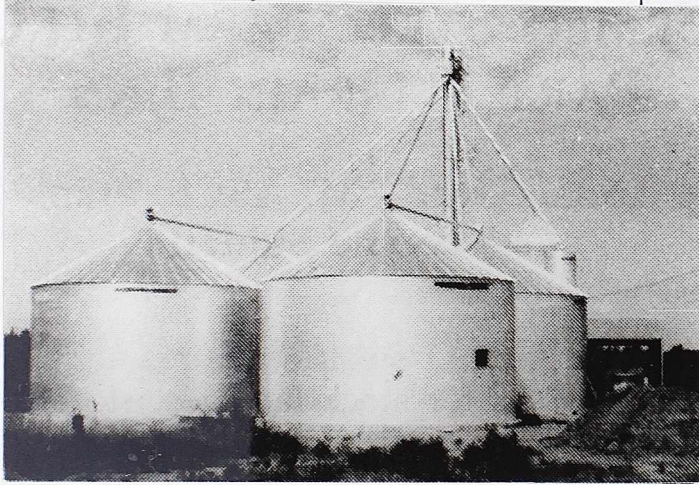
Sl. 16 Jugoslovenski sistemi zgrada od HOP

U mnogim zemljama veliki broj poljoprivrednih objekata rade se kao cilindrični, od čelika, sa rasponima u opsegu 7 do 35 m. Objekti ovog tipa većeg raspona koriste se i za druge sadržaje (npr. sport i rekreacija). Ovakve konstrukcije obično se izvode od visokih hladno oblikovanih profila olučastog preseka. Zahtevana zakrivljenost postiže se primenom poprečnih hladno oblikovanih koruba u nivou donjeg pojasa. Montaža se odvija međusobnim povezivanjem pojedinih limova vijcima, a ravni kalkanski zidovi upotpunjavaju prostornu krutost objekta. Izgled objekta sa elementom korube prikazan je na sl. 17.



Sl. 17 Olučaste ljuske

U poljoprivrednim objektima hladno oblikovani elementi koriste se i za silose, sl. 18, koji se obično rade kao uspravne cilindrične ljuske sa prečnicima



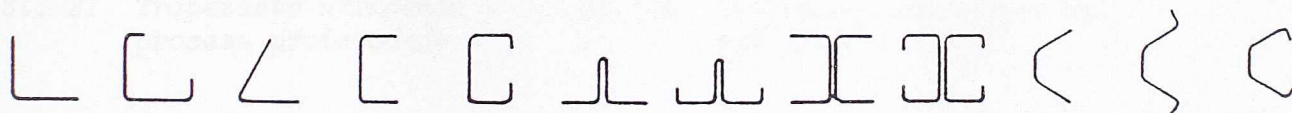
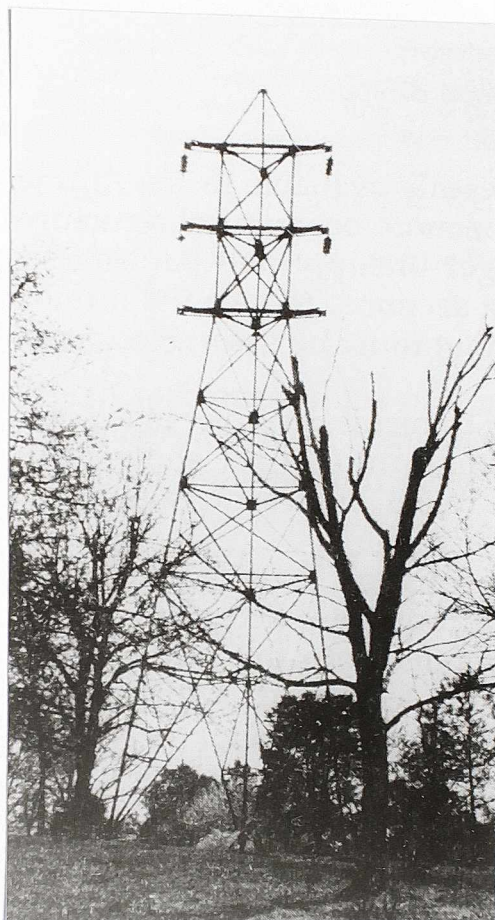
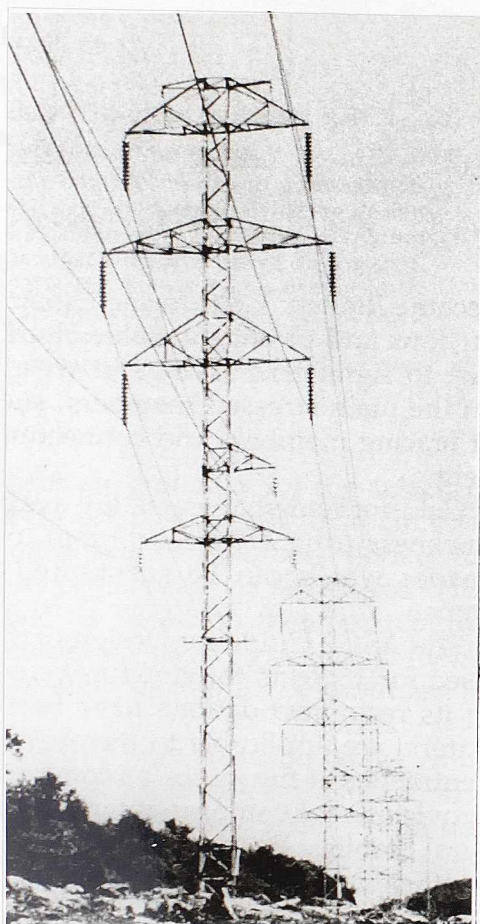
Sl. 18 Silosi od hladno oblikovanih elemenata

cilindara od 3 do 18 m, dok je odnos visina/prečnik obično do 1,5. Pošto potražnja za ovakvim silosima stalno raste kako u razvijenim tako i u zemljama u razvoju, to su trenutno u toku razvojno-istraživački projekti koji treba da ustanove pouzdane postupke analize i projektovanja zasnovane na dobrom poznavanju ponašanja uskladištenog materijala, kao i međusobnom zajedničkom dejstvu konstrukcije i uskladištenog materijala.

Staklenici, sl. 19, takodje su objekti u poljoprivredi kod kojih HOP predstavljaju dominantni konstruktivni element. Efektnim načinom rešenja krute veze stuba i rigle dobijaju se izuzetno lake noseće konstrukcije. Ova veza uglavnom i predstavlja ključ svakog od do sada razvijenih sistema.



Sl. 19 Staklenici od hladno oblikovanih U profila sa vezom rigle i stuba

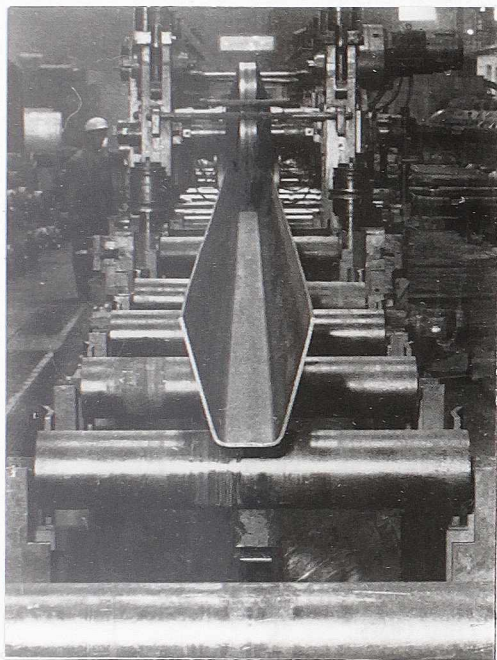


Sl. 20 Stubovi dalekovoda od HOP sa oblicima poprečnih preseka štapova

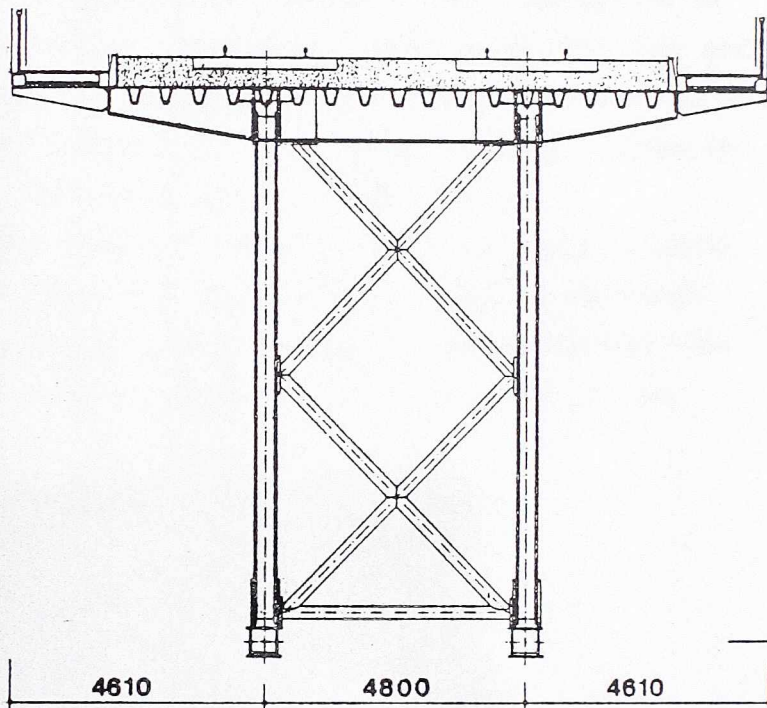
Stubovi dalekovoda su, po mnogo čemu, specifične građevinske konstrukcije. Te konstrukcije se u različitim tipovima, zavisno od uslova korišćenja, proizvode po pravilu u velikim serijama, što ima za posledicu utrošak izuzetno velikih finansijskih sredstava za njihovu izgradnju. Zbog toga su u mnogim zemljama izvršena obimna istraživanja na temu primene hladno oblikovanih profila u projektovanju i gradjenju stubova dalekovoda kako bi se eliminisali nedostaci klasičnih rešenja. Upotrebom specifičnih oblika HOP koji omogućavaju jednostavne veze i lako oblikovanje prostornih rešetkastih nosača (četvoropojasnih ili tropojasnih) osetno se smanjuje težina stubova što indirektno znatno olakšava i pojevtinjuje transport i montažu čelične konstrukcije, kao i fundiranje stubova. Prema nekim istraživanjima u SAD i Kanadi, usled navedenih razloga ostvarena je ušteda u ceni i do 50% u donosu na klasična rešenja sa vruće valjanim profilima. Na sl. 20 prikazana su dva tipa stubova dalekovoda

od HOP sa mogućim izborom profila za njihovu izgradnju.

Hladno oblikovani olučasti i trapezasti profili koriste se i u mostogradnji za izradu podužnih rebara ortotropnih ploča (sl. 21). Kod drumskih mostova

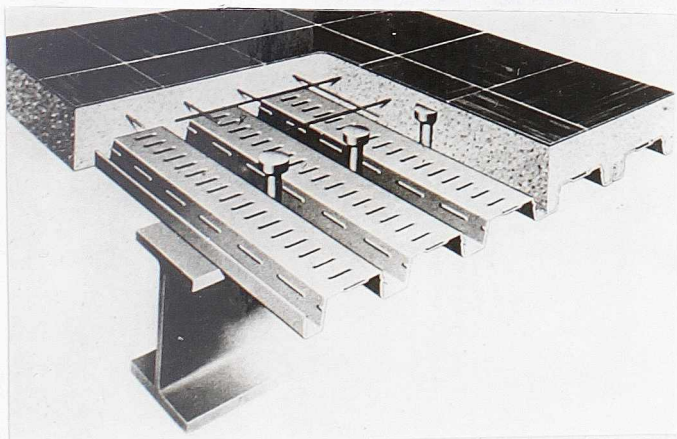


Sl. 21 Trapezasto ukrućenje u procesu proizvodnje

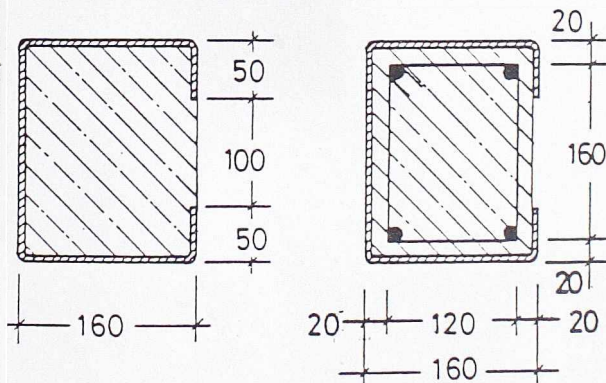


Sl. 22 Trapezasta ukrućenja kod železničkog mosta

ovo predstavlja dugogodišnju praksu, a trenutno su u toku i istraživanja koja će omogućiti primenu ovih profila i kod železničkih mostova. Na sl. 22 prikazano je jedno takvo rešenje kod dvokolosečnog železničkog mosta u SR Nemačkoj.



Sl. 23 Spregnute ploče sa profilisanim limovima



Sl. 24 Primena HOP kod spregnutih stubova

Proširenje primene spregnutih konstrukcija (čelik-beton), koje je poslednjih godina u izuzetnoj ekspanziji imalo je uticaj i na oblast hladno oblikovanih profila. Armirano-betonske podne ploče (sl. 23) kod kojih hladno oblikovani

profilisani lim služi kao oplata pri betoniranju i kao armatura, široko se primenjuju, posebno u višespratnim zgradama. Spregnuto dejstvo izmedju betonske ispune i profilisanog lima danas se uobičajeno ostvaruje dopunskim profilacijama (ispupčenja na rebrima i nožicama profilisanog lima) koje ujedno i znatno povećavaju nosivost profilisanog lima. Ovakve ploče takodje "rade" spregnuto sa čeličnom podkonstrukcijom (podni nosači i podvlake). Referenca /51/ daje način proračuna ovakvih sistema. Druge vrste spregnutih konstrukcija, kao što su profilisani limovi vezani sa raznim vrstama drvenih ploča bile su predmet istraživanja u Švedskoj. Rezime ovih radova dat je u Ref. /52/.

Pri primeni HOP u požarnim uslovima mogu se raditi spregnuti stubovi (armirani ili ne), čime se znatno povećava kako nosivost, tako i stabilnost. Ovim načinom konstrukcijskog oblikovanja može se dobiti vatrootpornost i do 90' bez ikakve posebne zaštite. Primer ovakvih stubova dat je na sl. 24.



Sl. 25 Regalna skladišta

Jedno široko polje primene HOP, koje direktno ne spada u gradjevinarstvo, ali predstavlja izuzetan izazov za svakog konstruktera, su paletna i regalna visoka skladišta. Koliko je ovo važna oblast primene govori i to da je ECCS osnovala posebnu komisiju koja tretira ovu problematiku, inače veoma složenu, jer se proračun sprovodi sa torziono osetljivim profilima i okvirima sa delimično krutim čvorovima. Za poprečne preseke štapova obično se upotrebljavaju U i C profili mada ima rešenja i sa cevima. Ovakvi profili su obično perforirani kako bi se omogućila fleksibilnost u položaju spojeva. U slučaju većih presečnih

sila koriste se dvostruki preseći vezani rebro uz rebro. Sve veze su u vijčanoj izradi. Način konstruisanja ovakvih visokih regalnih skladišta prikazan je na sl. 25. Ovakva skladišta se rade sa visinama i od nekoliko desetina metara.

6. STATIČKO PONAŠANJE HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA OPTEREĆENIH NA SAVIJANJE

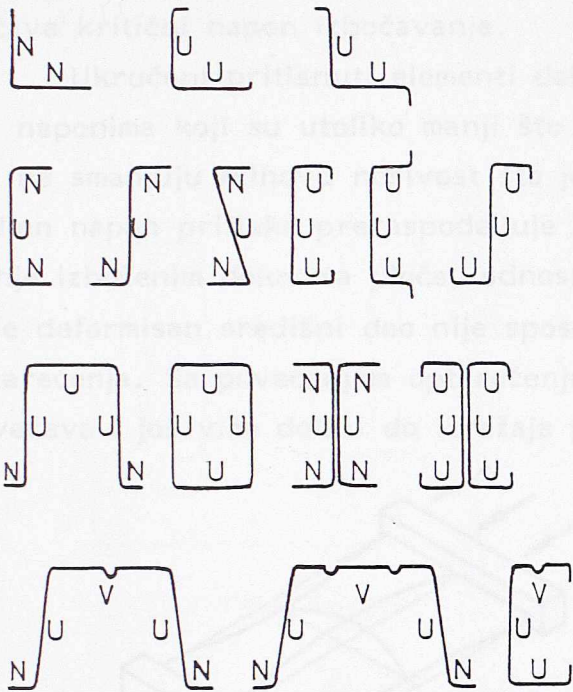
Mnogi postupci statičke analize i proračuna vruće valjanih profila ili profila dobijenih zavarivanjem od limova mogu se primeniti i pri proračunu konstrukcija od HOP. Medjutim, razlike u ponašanju pod opterećenjem izmedju ova dva tipa konstrukcija je prilično velika pa je neophodno izneti razlike u metodama proračuna. Računski postupci za vruće valjane i zavarene profile razvijeni su pretežno na osnovu nekoliko oblika karakterističnih za taj tip profila. Kod HOP, nastuprot tome, praktično je neograničena raznovrsnost oblika koji se mogu proizvesti, pa iz tog razloga analiza i proračun moraju biti toliko uopšteni da se mogu primeniti na bilo koji oblik, već proizveden, ili koji će se tek proizvesti.

Karakteristični odnos dimenzija preseka b/t (ravni deo širine/debljina elementa preseka) za bilo koji ravan deo od koga je obrazovan profil, najčešće je mnogo veći kod HOP nego kod vruće valjanih profila. Za takve tankozidne elemente neophodno je uvesti uz uobičajene i nove analize i proračune, kako zbog osiguranja od izbočavanja elemenata izloženih pritisku, savijanju ili smicanju tako i zbog iskorišćenja post-kritične nosivosti ovakvih elemenata. Uz to, relativno mala debljina zidova odražava se na torzionu krutost, koja je značajno manja od one za debelozidne konstrukcije. Ovo je važno i u pogledu izvijanja, izbočavanja i bočnog izvijanja nosača i stubova.

Postupci proizvodnje svojstveni izradi ova dva različita tipa konstrukcija uzrokuju znatne razlike u mehaničkim karakteristikama samog materijala (npr. povećanje granice razvlačenja i zatezne čvrstoće pri hladnom oblikovanju), kao i različiti raspored i intenzitet zaostalih napona, što igra značajnu ulogu, pogotovo u dokazu lokalne i globalne stabilnosti.

Jedna od najvažnijih karakteristika HOP je odnos b/t pojedinih ravnih elemenata poprečnog preseka štapa. Što je ovaj odnos veći to je niži kritični napon izbočavanja. U zavisnosti od odnosa b/t i odnosa napona na granici razvlačenja i kritičnog napona izbočavanja, HOP mogu imati značajnu nosivost i posle izbočavanja. Tankozidne konstrukcije mogu biti ekonomične samo ako se potpuno iskoristi ova nosivost u post-kritičnoj oblasti, jer je ona nekoliko puta veća od nosivosti određene prema kritičnom naponu izbočavanja. Zbog ovoga studije post-kritičnog ponašanja su bile, a i sada su važna oblast istraživanja.

Pre upoznavanja drugih specifičnih problema projektovanja, neophodno je upoznati se sa opštim terminima koji se koriste pri projektovanju HOP kao što su:

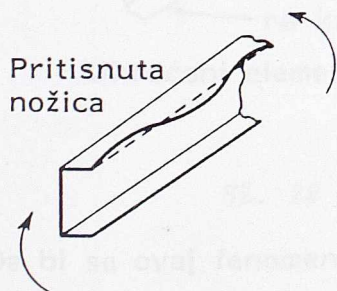


Sl. 26 Definisanje elemenata profila

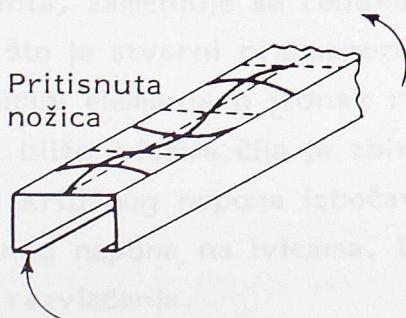
koji je ukrućen između rebara, ili između rebra i ivičnog ukrućenja, pomoću jednog ili više umetnutih ukrućenja paralelnih pravcu napona. Deo između susjednih umetnutih ukrućenja, ili između rebra i umetnutog ukrućenja, zove se "sub element". Na sl. 26 to su elementi označeni sa V.

Ivično ukrućenje (prevoj) mora da ima odgovarajuću dužinu i odgovarajući moment inercije, da bi kao element za ukrućenje, mogao jednu stranu ravnog elementa činiti ukrućenom. Ove vrednosti su definisane propisima.

a)



b)



Sl. 27 Izbočavanje

- a) neukrućene pritisnute nožice
b) ukrućene pritisnute nožice

a) *Neukrućeni pritisnuti element* je ravan pritisnuti element koji je ukrućen samo po jednoj ivici paralelnoj pravcu napona. Kako je prikazano na sl. 26 ovakav element je krak ugaonika, nožica U profila i nožica šesirastog profila, obeleženi sa N.

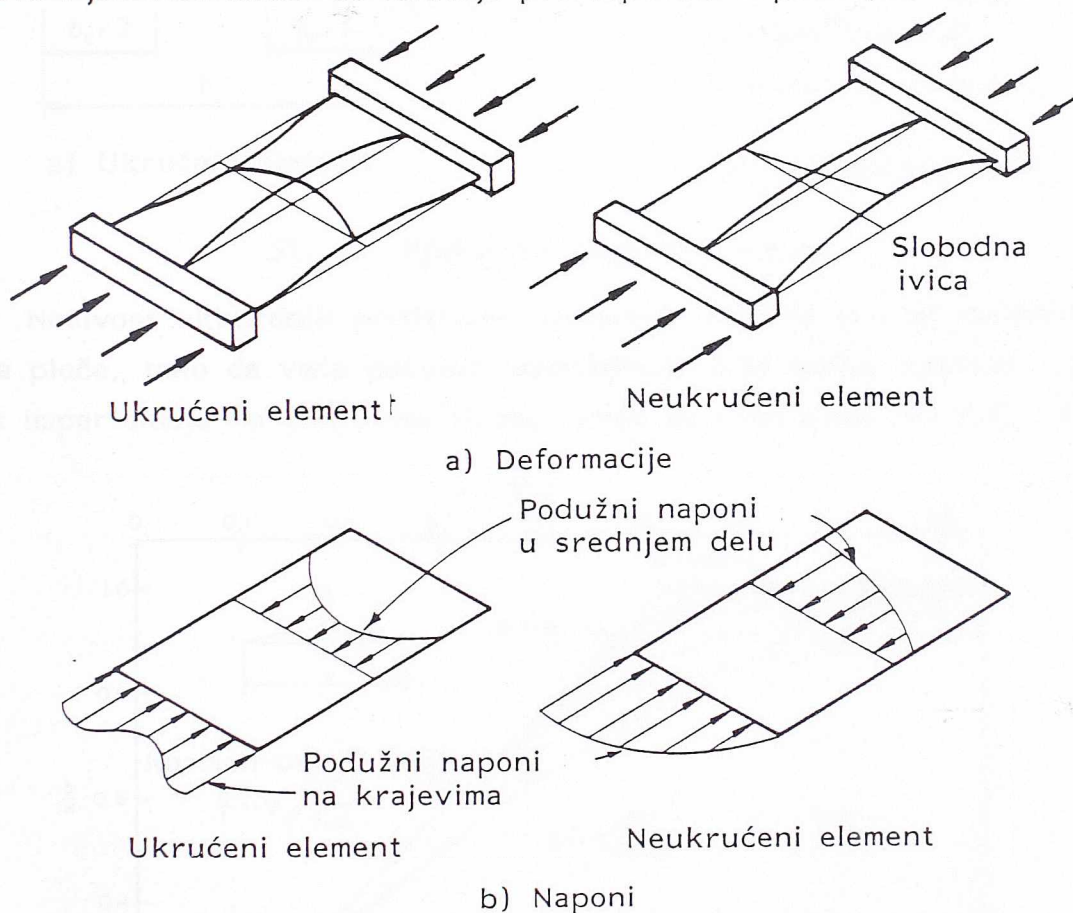
b) *Ukrućeni pritisnuti element* je ravan pritisnuti element kod koga su obe ivice, paralelne pravcu napona, ukrućene pomoću ukrućenja kao što su: rebra, nožice ili ivična ukrućenja koja moraju ispuniti specifične zahteve. Na sl. 26 to su elementi označeni sa U.

c) *Višestruko ukrućeni pritisnuti element* je ravan pritisnuti element

Izbočavanje i post-kritično ponašanje dominantno zavisi od načina oslanjanja elemenata u podužnom pravcu i od položaja medjuukrućenja. Razlika u ponašanju neukrućenih i ukrućenih pritisnutih elemenata ilustrovana je na sl. 27. Pritisnuti element profila opterećenog na savijanje sl. 27a ostaje prav samo duž ivice kojom je vezan za rebro, a izbočava se pri relativno niskom naponu, pri tom pokazuje veću deformisanost (zatalasanost) od elemenata sa istim odnosom b/t ,

ali obostrano oslonjenog kao na sl. 27b. Ovo obostrano ukrućivanje znatno povećava kritični napon izbočavanja.

Ukrućeni pritisnuti elementi dobijaju mala, skoro neprimetna izbočavanja pri naponima koji su utoliko manji što je veći odnos b/t . Ovakva mala izbočavanja ne smanjuju njihovu nosivost što je posledica toga da se ravnomerno raspoređen napon pritiska preraspodeljuje po poprečnom preseku i koncentriše se u manje izbočenim delovima ploče, odnosno u dve zone bliže ukrućenim ivicama. Više deformisan središnji deo nije sposoban da primi dodatni napon od povećanja opterećenja. Sa povećanjem opterećenja maksimalni napon pritiska pri ivicama se povećava i još više dolazi do izražaja preraspodela napona (sl. 28b).

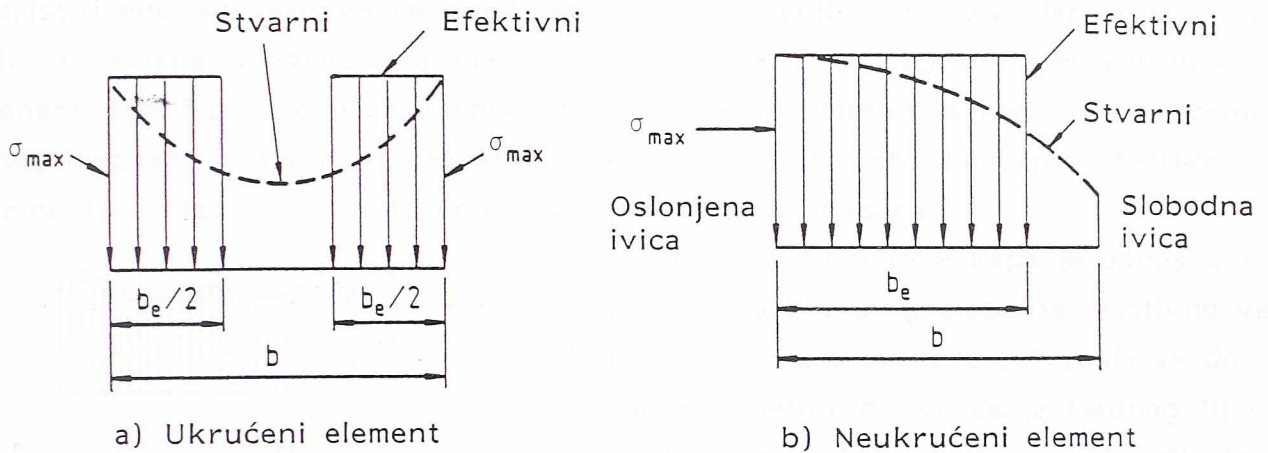


Sl. 28 Post-kritično ponašanje ploča

Da bi se ovaj fenomen obuhvatio proračunom, stvarna širina b ukrućenog elementa, zamenjuje se redukovanom, efektivnom širinom b_e , koja se određuje tako što je stvarni preraspoređeni napon sa krivolinijskom raspodelom po stvarnoj širini elementa b jednak ravnomerno podeljenom maksimalnom naponu na dva dela bliža ivicama čija je zbirna širina b_e (sl. 29a). Ova efektivna širina zavisi od kritičnog napona izbočavanja koji opet zavisi od odnosa b/t kao i od maksimalnog napona na ivicama. Do loma dolazi kada napon na ivicama dostigne granicu razvlačenja.

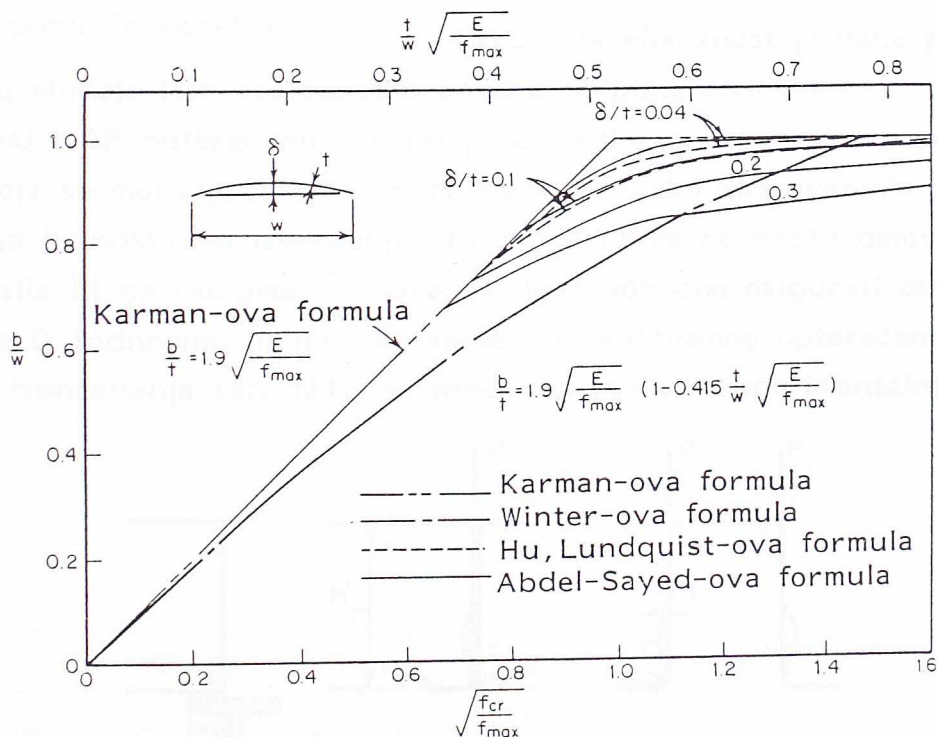
U SAD kao i u nekoliko drugih zemalja pojam efektivne širine zasniva se

na radovima G. Winter-a /53/. Medjutim danas ima više od deset različitih izraza za sračunavanje efektivne širine koji se preporučuju ili su u primeni, pri čemu svi daju slične rezultate.



Sl. 29 Efektivna raspodela napona

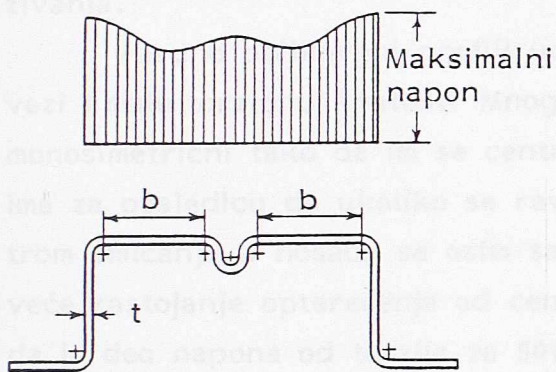
Nosivost ukrućenih pritisnutih elemenata zavisna je i od početnih imperfekcija ploče, tako da veće početne imperfekcije daju manju nosivost. Uticaj početnih imperfekcija na efektivnu širinu ranije su proučavali Hu P.C., E.E.



Sl. 30 Uticaj početnih imperfekcija na računsku efektivnu širinu

Lundquist, S.B. Batdorf /55/ i Abdel-Sayed /67/. Slika 30 pokazuje da odnos efektivne širine prema stvarnoj širini b_e/b zavisi od različitih vrednosti početnih imperfekcija. Problematiku imperfekcija limova intenzivno su proučavali Dawson i Walker /56/, Sherbourne i Korol /57/ i Hancock /58/.

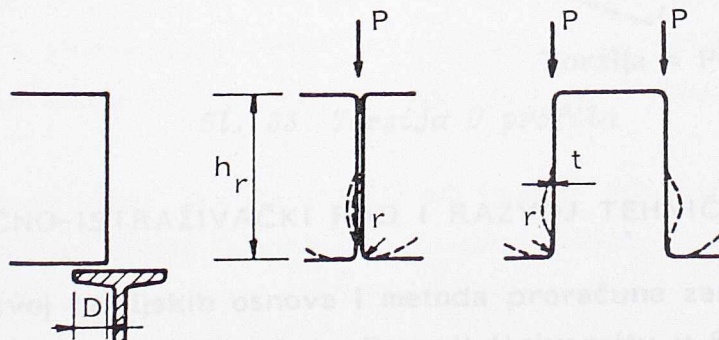
Neukrućeni pritisnuti elementi, pri istoj vitkosti, izbočavaju se pri mnogo manjem opterećenju od ukrućenih elemenata. Ovakvi elementi, također imaju postkritičnu rezervu nosivosti, koja se može koristiti. Obzirom na znatne deformacije slobodne ivice (sl. 28a) kod prekoračenja kritičnog naprezanja, ne mogu se koristiti onolike rezerve nosivosti kao kod ukrućenih elemenata, jer je upotrebljivost zavisna u određenoj meri i od izgleda. Kod neukrućenih pritisnutih elemenata dolazi pri povećanju opterećenja do neravnomerne raspodele opterećenja. Ovaj fenomen se uvodi u proračun preko dve mogućnosti: koncepta efektivne širine (sl. 29b) i koncepta reduciranog računskog napona.



Sl. 31 Raspodela napona kod umetnutih ukrućenja

Pri proračunu HOP kada je odnos b/t ukrućenog pritisnutog elementa relativno veliki ekonomičnost preseka ostvaruje se dodavanjem umetnutih ukrućenja (jednog ili više). Na primer ako ukrućeni pritisnuti element ima odnos $b/t = 200$ efikasnost pritisnutog elementa tj. odnos b_e/b je samo 27%. Medjutim, ako se primeni jedno umetnuto ukrućenje u sredini (sl. 31), efikasnost se povećava na 52%. Dodavanjem novih umetnutih ukrućenja efikasnost je dalje povećana do graničnog slučaja kad ceo element postaje potpuno efektivan.

Kod HOP opterećenih na savijanje veliku pažnju treba posvetiti rebru profila koje se mora proveriti na izbočavanje. Kako kod ovakvih profila nije konstruktivno jednostavno izvodjenje ukrućenja rebra na mestu delovanja koncentrisanih sila ili na mestima oslonaca, to je neophodno osigurati dovoljnu dužinu oslanjanja D (odnosno dužinu delovanja koncentrisanog opterećenja), da ne bi došlo do izbočavanja (sl. 32). Na osnovu brojnih eksperimentalnih ispitivanja



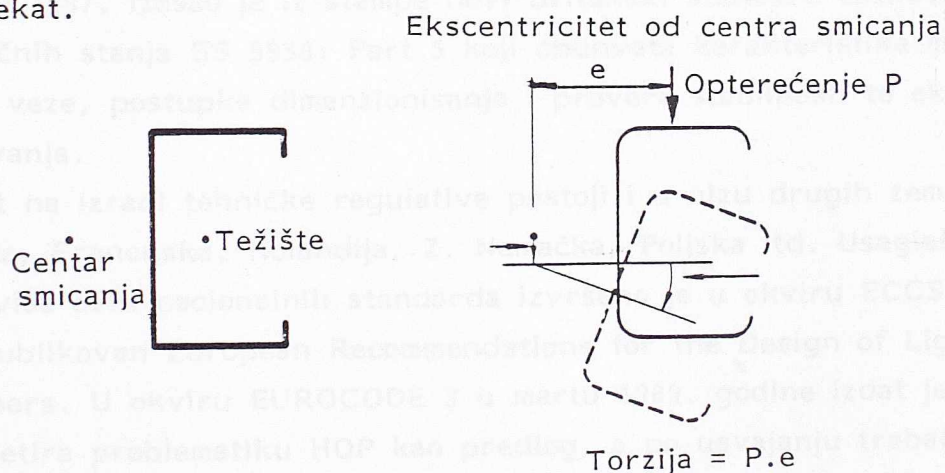
Sl. 32 Izbočavanje rebra HOP

proučena je zavisnost izmedju normalne dozvoljene koncentrisane sile, kvaliteta materijala, dimenzije rebra, radijusa previjanja i dužine oslanjanja. Rezultati ovih istraživanja objavljeni su u brojnim radovima /62/ do /66/. Na osnovu ovih

istraživanja projektantima stoje na raspolaganje različiti izrazi za maksimalnu koncentrisanu silu za preseke sa jednim ili duplim rebrom.

Jedna od osnovnih pretpostavki u tehničkoj teoriji elastičnosti je nedeformabilnost poprečnog preseka bilo pri savijanju, torziji ili kontroli stabilnosti. Kako ova pretpostavka kod tankozidnih hladno oblikovanih profila uglavnom nije ispunjena, to postupci proračuna zasnovani na pogrešnim postavkama tada ne odgovaraju stvarnom ponašanju konstrukcija. Iz ovog razloga kod proračuna HOP treba primeniti preciznije postupke proračuna sa uvođenjem metoda koje obuhvataju uticaj deformabilnosti poprečnog preseka uz obimna eksperimentalna istraživanja.

Hladno oblikovani profili uobičajeno imaju veoma tanke zidove, a stim u vezi i malu torzionu krutost. Mnogi preseki proizvedeni hladnim oblikovanjem su monosimetrični tako da im se centar smicanja nalazi izvan težišta (sl. 33) što ima za posledicu da ukoliko se ravan spoljašnjeg opterećenja ne poklapa sa centrom smicanja u nosaču se osim savijanja javlja i torzija, i to utoliko veća što je veće rastojanje opterećenja od centra smicanja. Prema ref. /79/ može se videti da je deo napona od torzije za 50% veći od dela normalnog napona od savijanja nosača pa iz ovog razloga pri projektovanju konstrukcija od HOP posebnim konstruktivnim merama treba sprečiti uticaj torzije kako bi ovi elementi imali puni ekonomski efekat.



Sl. 33 Torzija U profila

7. NAUČNO-ISTRAŽIVAČKI RAD I RAZVOJ TEHNIČKE REGULATIVE

Rani razvoj teorijskih osnova i metoda proračuna zasnovan je na pionirskom radu profesora G. Winter-a na Cornell University u SAD. Iz ovih brojnih istraživanja proistekao je 1946. godine standard Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Ovaj propis je kasnije redovno revidiran 1956, 1960, 1962, 1968 i 1980. kao rezultat tehničkog razvoja i kontinuiranih istraživanja sprovedenih na više univerziteta i u više kompanija za proizvodnju

HOP. Ovako brz razvoj u SAD proistekao je uglavnom na osnovu istraživanja profesora G. Winter-a, T. Pekoz-a i W.W.Yu-a. Ovaj standard je ujedno bio i osnova za donošenje propisa iz ove oblasti i u drugim zemljama, bilo da je direktno preveden ili uz manje korekcije (npr. Australija, Čehoslovačka). Godine 1986. u SAD izašao je potpuno novi standard koji reguliše ovu problematiku koncipiran na savremen način i uz uvodjenje teorije graničnih stanja umesto dotadašnjeg koncepta dopuštenih napona.

Prvi standard za proračun HOP štampan je u Kanadi 1963. godine sledeći koncepciju američkih propisa. Ovaj standard kansi je revidovan 1974. i 1984. godine. Koncepcija novog kanadskog standarda izložena je u ref. /72/ od strane Fox-a, Schuster-a i Tarlton-a.

Što se tiče Evrope prva istraživanja su počela 1944. godine u Velikoj Britaniji kada je i obrazovana Cold Rolled Sections Association. Ova organizacija učinila je veoma mnogo u organizovanju i finansiranju istraživanja. I ovde je istraživanje bilo inspirisano radom G.Winter-a pa su u ranim 1950.-tim godinama brojni istraživači uključujući Chilver-a, Moir-a, Kenedi-a i Harvey-a dali izuzetno važne podloge za proračun HOP. Shearer Smith je 1951. godine dao smernice za prvi britanski standard Addendum N^o 1 BS 449: Part 2 iz 1969. godine. Novi BS publikovan je 1975. godine, a u isto vreme i knjiga A.C.Walker-a u kojoj su opisana posebna računska i konstruktivna pravila za projektovanje konstrukcija od HOP. Godine 1987. izašao je iz štampe novi britanski standard zasnovan na konceptu graničnih stanja BS 5950: Part 5 koji obuhvata karakteristike materijala i preseka, veze, postupke dimenzionisanja i provere stabilnosti te eksperimentalna ispitivanja.

Aktivnost na izradi tehničke regulative postoji i u nizu drugih zemalja kao što su: Švedska, Francuska, Holandija, Z. Nemačka, Poljska itd. Usaglašavanje što je moguće više ovih nacionalnih standarda izvršeno je u okviru ECCS, te je 1987. godine publikovan European Recommendations for the Design of Light Gauge Steel Members. U okviru EUROCODE 3 u martu 1989. godine izdat je APPE-NDIX A koji tretira problematiku HOP kao predlog, a po usvajanju trebalo bi da predstavlja osnovni dokument za usaglašavanje propisa iz ove oblasti u nizu evropskih zemalja.

U poslednjih dvadeset godina u SAD održano je devet međunarodnih konferencija sa isključivom temom istraživanje i razvoj konstrukcija od HOP pod rukovodstvom University of Missouri - Rolla. Isti univerzitet svake godine organizuje kratke kurseve za inženjere iz prakse sa ovom tematikom. Takodje su održani uspešni naučni skupovi 1979. godine u Glazgovu i 1986. godine u Štokholmu posvećeni isključivo konstrukcijama od hladno oblikovanih profila. Pored ovih konferencija i naučnih skupova, radovi iz ove oblasti predstavljaju se na skoro svim skupovima građevinskih inženjera - konstruktera širom sveta.

Iako u Jugoslaviji postoji veliki broj proizvođača hladno oblikovanih profila sa značajnim instalisanim kapacitetima to nedostatak tehničke regulative koja pokriva ovu oblast onemogućava njihovu širu primenu. Takodje i odredjeni strah koji je prisutan kod velikog broja projekatanta i investitora, zbog izuzetno male dubljine hladno oblikovanih profila, treba razbiti dopunskim obrazovanjem inženjera-konstruktera bilo pisanim saopštenjima na naučnim skupovima ili specijalizovanim simpozijumima i kursevima koji tretiraju ovu problematiku. Iz ovog razloga, čelične konstrukcije koje se projektuju i izvode u našoj zemlji najmanje su 20% teže od odgovarajućih inostranih, te ukoliko se želi opstati na inostranom tržištu neophodno je šire korišćenje hladno oblikovanih profila u gradjevinarstvu. U poslednjih nekoliko godina na naučnim skupovima i u stručnim časopisima u našoj zemlji publikovan je jedan broj radova koji tretira ovu problematiku - reference /8/, /12/, /13/, /14/, /15/, /43/, /44/, /45/, /73/, /79/ i /111/, a Savezni zavod za standardizaciju doneo je odluku da se donese naš standard za proračun i konstruisanje objekata od hladno oblikovanih profila što predstavlja prvi znak da će hladno oblikovani profili i kod nas dobiti ono mesto koje u inostranstvu imaju već decenijama.

I UTICAJ TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA NA MEHANIČKE KARAKTERISTIKE ČELIKA

1. OPŠTI PRIKAZ EFEKATA HLADNOG OBLIKOVANJA NA MEHANIČKE KARAKTERISTIKE ČELIKA

1.1. Uvod

Kako karakteristike materijala igraju značajnu ulogu u izvodjenju i projektovanju nosećih konstrukcija, to je izuzetno važno dobro poznavanje mehaničkih karakteristika čeličnih limova i traka koji se koriste u konstrukcijama od HOP-hladno oblikovanih profila. Sa konstrukcijske tačke gledišta najvažnije karakteristike čelika su: granica razvlačenja, zatezna čvrstoća, dijagram napon-dilatacija, modul elastičnosti, tangenti modul, duktilnost, zavarljivost, jačina zamora, žilavost i oblikovnost.

Nosivost HOP prevashodno zavisi od granice razvlačenja, koja se kreće u opsegu od 170 do 480 N/mm² za čelike koji se koriste pri hladnom oblikovanju. Zatezna čvrstoća čelika u maloj meri utiče na projektovanje takvih elemenata. Nosivost HOP opterećenih na savijanje i pritisak obično je ograničena granicom razvlačenja ili kritičnim naponom izvijanja, koji je manji od granice razvlačenja, naročito za one pritisnute elemente koji imaju veliku vitkost ili odnos dimenzija preseka b/t. Izuzetak su zavareni i vijčani spojevi čija nosivost ne zavisi samo od granice razvlačenja već i od zatezne čvrstoće materijala. Iz tog razloga problematika zavarenih i vijčanih spojeva, u kojima se mogu javiti znatne koncentracije napona, predstavlja izuzetno bitan segment u projektovanju. Gotovo svi tehnički propisi obuhvataju specijalne projektne mere kako bi se postigla adekvatna sigurnost za graničnu nosivost spojeva. Zatezne čvrstoće limova i traka osnovnog čeličnog materijala kreću se u opsegu od 280 do 580 N/mm². Odnos zatezne čvrstoće i granice razvlačenja σ_m / σ_v uobičajeno se kreće u granicama od 1,17 do 2,22 i sve do sada uradjene studije pokazuju da taj odnos predstavlja bitan faktor od uticaja po efekte hladnog oblikovanja.

Generalno postoje dva tipa krive napon-dilatacija, jedan sa jasno izraženom, a drugi sa neizraženom granicom razvlačenja. Čelici proizvedeni vrućim valjanjem imaju jasno izraženu granicu razvlačenja. Za ovaj tip čelika granica razvlačenja je definisana nivoom na kome kriva napon-dilatacija prelazi u horizontalu. Čelici koji su hladno valjani pokazuju neizraženu granicu razvlačenja. Kod

ovakvih čelika kriva napon-dilatacija je zaobljena celom dužinom, te se granica razvlačenja određuje naponom koji odgovara preseku krive napon-dilatacija i linije koja je paralelna početnom pravolinijskom delu, a na udaljenju odgovarajuće dilatacije. Ta odgovarajuća dilatacija određena je za 0,2%, što predstavlja tzv. konvencionalnu granicu razvlačenja.

Nosivost elemenata koji se lome pri izvijanju zavisi ne samo od granice razvlačenja već takodje i od modula elastičnosti E i tangentsnog modula E_t . Modul elastičnosti definisan je nagibom početnog dela krive napon-dilatacija. Vrednosti E merene standardnim metodama obično se kreću u opsegu od 200000 do 210000 N/mm^2 . Tangentni modul je definisan nagibom krive napon-dilatacija u ma kojoj tački. Za izraženu granicu razvlačenja $E_t = E$ do granice razvlačenja, ali za neizraženu granicu razvlačenja $E_t = E$ samo do granice proporcionalnosti. Po prekoračenju napona na granici proporcionalnosti, tangentsni modul postaje progresivno manji od modula elastičnosti. Iz tog razloga, za srednje vitkosti, čelici sa izraženom granicom razvlačenja imaju veću nosivost pri izvijanju od čelika sa neizraženom granicom.

Vrednost modula klizanja je $G = 79\ 000\ N/mm^2$, a Poasonovog koeficijenta $\nu = 0,3$ tako da je među-veza $E = 2G(1+\nu)$ numerički tačna.

Duktilnost je osobina čelika definisana kao sposobnost materijala da pretrpi značajnu plastičnu deformaciju bez pukotina. Time se redukuju štetni efekti koncentracije napona, omogućujući plastičnu redistribuciju, a takodje i hladno oblikovanje konstruktivnih elemenata bez pogoršanja njihovog statičkog ponašanja. Duktilnost može biti izmerena: (1) opitom zatezanja, (2) opitom savijanja i (3) opitom zarezavanja. Najšire korišćena metoda je opitom zatezanja, pri čemu limovi i trake koji se koriste za proizvodnju HOP imaju minimalno izduženje na 50 mm merne dužine od 12 do 30%.

Odavno je poznato da se svako hladno oblikovanje (previjanje, olučenje itd.) odražava na osobine čelika ili bilo kog drugog metala na kome je primenjeno. U opštem slučaju ovo znači očvršćavanje materijala, odnosno znatno povećanje granice razvlačenja i u manjoj meri zatezne čvrstoće uz smanjenje duktilnosti. Prema inostranim istraživanjima povećanje granice razvlačenja je do 102%, zatezne čvrstoće do 47%, a smanjenje duktilnosti i do 90%. Dugo godina ovaj fenomen, iako dobro poznat, nije bio analitički merljiv, pa nije ni obuhvatan propisima, mada ima izuzetan uticaj na ekonomičnost hladno oblikovanih profila. Tek poslednja generacija propisa uvodi ovaj fenomen u proračun, ali još kao neobavezujući član.

1.2. Efekat hladnog istezanja na čelične limove

Pionirska ispitivanja uticaja hladnog oblikovanja sprovedena od strane A.Chajesa, S.J.Britveca i G.Wintera /80/, bavila su se promenama karakteristika čeličnog materijala posle jednoosnog zatezanja. Ovaj najjednostavniji način hladnog oblikovanja poslužio je kao osnova za upoznavanje prirode promena koje se odvijaju u čeliku. Uzorci za ispitivanje uzeti su od limova pet različitih vrsta čelika. Njihov hemijski sastav i mehaničke karakteristike dati su u Tabeli I-1.

Ispitivanja su sprovedena na uzorcima koji su pretrpeli četiri različita stepena plastične deformacije ($\epsilon = 1\%$; $2,5\%$; 5% ; 10%). Epruvete za ispitivanje uzimane su iz osnovnog deformisanog lima i to u pravcu deformacije i upravno na taj pravac (sl. I-1). Na taj način utvrđene su promene usled hladnog oblikovanja paralelno i upravno na pravac deformacije. Izduženja od 1% odgovarala su naponima bliskim granici razvlačenja, izduženja $2,5\%$ i 5% oblasti deformacijskog ojačanja, a izduženja od 10% oblasti gde $\sigma - \epsilon$ kriva počinje da opada.

Tabela I-1

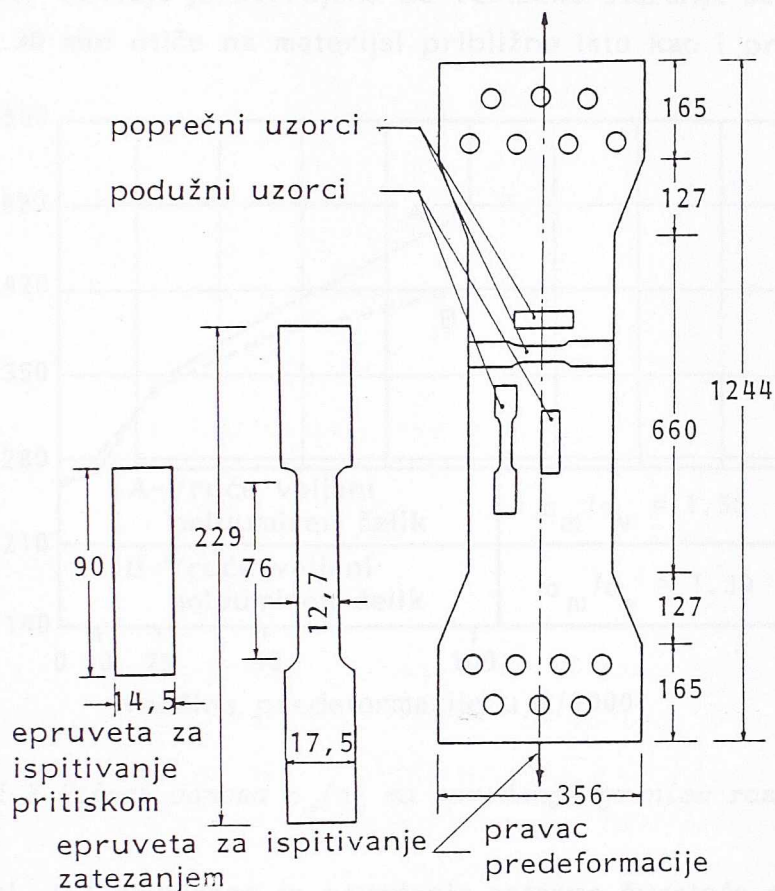
Materijal	Debljina /mm/	Hemijski sastav (%)				Mehaničke karakteristike		
		C	Mn	S	P	Granica razvlačenja σ_v (N/mm ²)	Zatezna čvrstoća σ_m (N/mm ²)	Izduženje na 50 mm δ (%)
1 Hladno valjani lim žaren, umiren	1,5	0,15	0,40	0,024	0,008	264	352	40
2 Hladno valjani lim žaren, neumiren	1,5	0,09	0,39	0,028	0,008	251	350	35
3 Vruće valjani lim poluumiren	1,5	0,04	0,32	0,025	0,008	259	338	37
4 Vruće valjani lim neumiren	1,5	0,08	0,32	0,045	0,008	279	350	35
5 Vruće valjani lim poluumiren	3,4	0,18	0,50	0,029	0,008	255	397	36

U cilju utvrđivanja efekata starenja materijala posle plastične deformacije, određeni broj uzoraka podvrgnut je veštačkom starenju (30 min na 100°C), dok je kod drugog broja uzoraka praćen efekat starenja na sobnoj temperaturi posle određenog vremena.

Ispitivanjem su utvrđene granica razvlačenja, granica proporcionalnosti i zatezna čvrstoća pri ispitivanju zatezanjem i pritiskom (sa sprečenim izvijanjem). Opšti zaključak je bio da, bez obzira na pravac uzimanja uzoraka, odnosno vrstu naprezanja, ove karakteristike materijala se povećavaju u zavisnosti od veličine

predeformacije. Analizom dobijenih rezultata ispitivanja uočeno je sledeće:

1. povećanje granice razvlačenja srazmerno je veličini predeformacije,
2. povećanje granice razvlačenja usko je povezano sa pravcem predeformacije i vrstom napreznja.



Sl. I-1 Osnovni element i uzorci

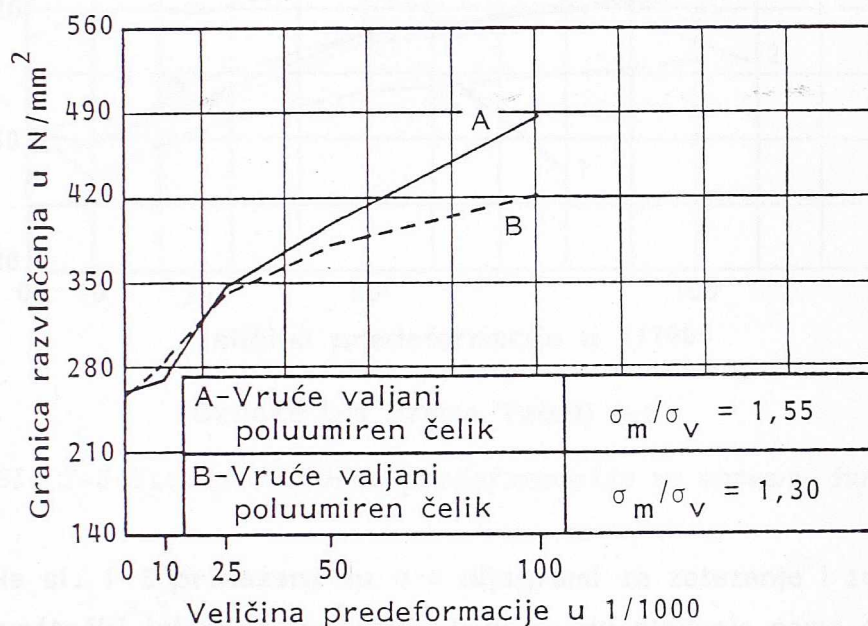
Faktori koji utiču na povećanje mehaničkih karakteristika čelika su hemijski sastav materijala i tehnologija proizvodnje. Jasno je uočeno da je povećanje predeformacije imalo mnogo veći uticaj na neumiren nego na umiren čelik, mada su oba materijala imala iste osnovne karakteristike.

Poredjenjem rezultata u podužnom pravcu za zatezanje i pritisak uočeno je veće povećanje granice razvlačenja pri zatezanju nego granice gnječenja pri pritisku i obrnuto, u poprečnom pravcu veće je povećanje za pritisak nego za zatezanje. Ovakav efekat je, uočen kod svih vrsta čelika bez obzira na to da li su vruće ili hladno valjani, umireni ili neumireni. Ta pojava je poznata kao Baušingerov efekat za podužni pravac, odnosno inverzni Baušingerov efekat za poprečni pravac.

Odnos zatezne čvrstoće i granice razvlačenja je važna karakteristika osnovnog materijala koja bitno utiče na povećanje granice razvlačenja posle predeformacije. Na sl. I-2 prikazane su krive zavisnosti granice razvlačenja od predeformacije za dva materijala koja imaju različiti odnos σ_m/σ_v , gde se može uočiti da

veći odnos σ_m/σ_v daje značajnije povećanje granice razvlačenja.

Uticao starenja na povećanje granice razvlačenja i granice proporcionalnosti takodje je istraživao i to za prirodno i veštačko starene uzorke. Uočeno je da je proces prirodnog starenja veoma brz u prvoj nedelji, a da kasnije ima mnogo blaži prirast. Takodje je utvrđeno da veštačko starenje sa režimom od 100°C u trajanju od 30 min utiče na materijal približno isto kao i prirodno starenje.

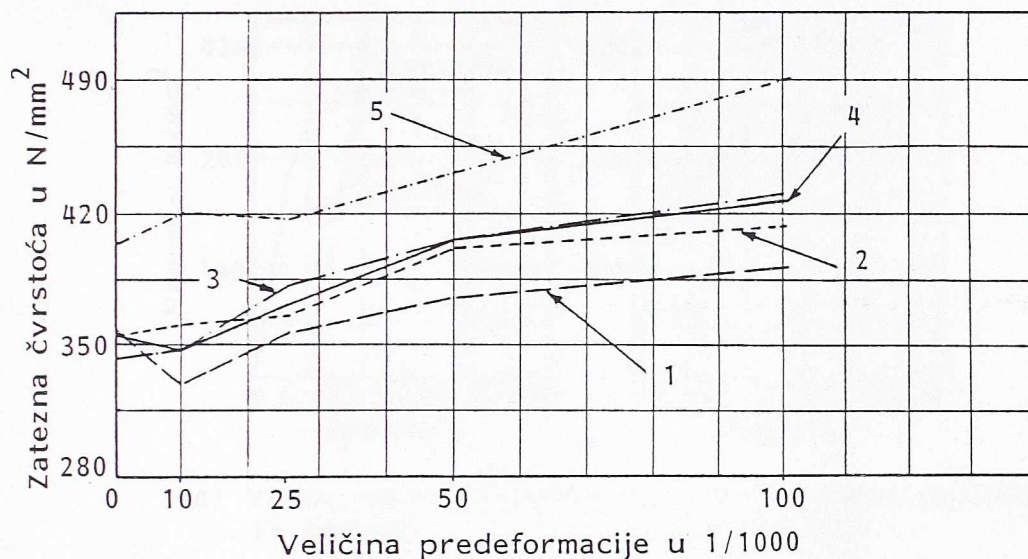


Sl. I-2 Uticaj odnosa σ_m/σ_v na povećanje granice razvlačenja

Na sl. I-3 prikazano je povećanje zatezne čvrstoće za sve ispitivane materijale u zavisnosti od veličine predeformacije. Povećanje zatezne čvrstoće sastoji se iz dva dela: prvi je povećanje čvrstoće po jedinici mase, a drugi je povećanje usled smanjenja poprečnog preseka uzorka posle predeformacije. Ovaj drugi deo se izostavlja tako što se vrednosti napona pomnože sa korekcionim koeficijentom, koji zavisi od procentualnog smanjenja poprečnog preseka, a kreće se od 0,99 za predeformaciju od 1% do 0,91 za predeformaciju od 10%. Primenom ovog koncepta dolazi se do zaključka da je povećanje zatezne čvrstoće posledica isključivo starenja uzorka, a ne i trenutnog efekta hladnog oblikovanja - deformacijskog ojačanja. Zbog toga kod čelika koji nemaju izraženu osobinu starenja nema povećanja zatezne čvrstoće usled hladnog oblikovanja.

Procentualno izduženje hladno oblikovanih uzoraka pri kidanju osetno je smanjena u odnosu na osnovni materijal (sl. I-4). Jedini čelik koji nije pokazao značajnije smanjenje duktilnosti je hladno valjani umireni čelik. Smanjenje duktilnosti bitno zavisi od veličine predeformacije, pa tako kod materijala sa 10% predeformacijom, smanjenje izduženja je sa 35% na oko 12%. Veruje se da je deo smanjenja duktilnosti koji ne može da se pripíše predeformaciji, posledica starenja. Ova pretpostavka je važna za ponašanje hladno valjanog umirenog čelika koji je

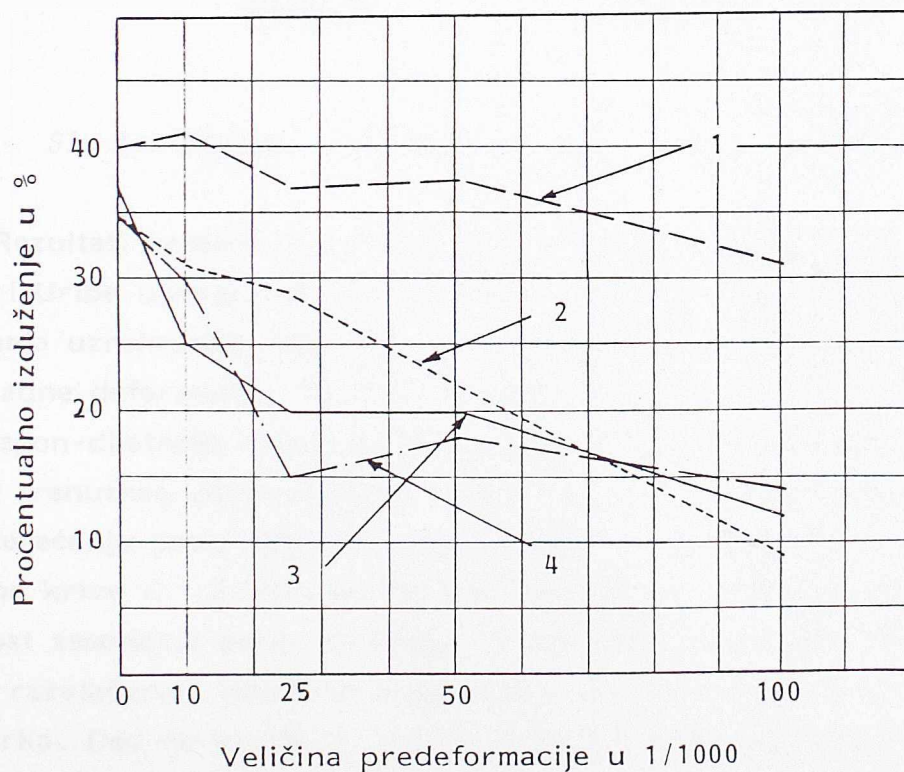
neosetljiv na starenje. Smanjenje duktilnosti kod njega je približno jednako predeformaciji.



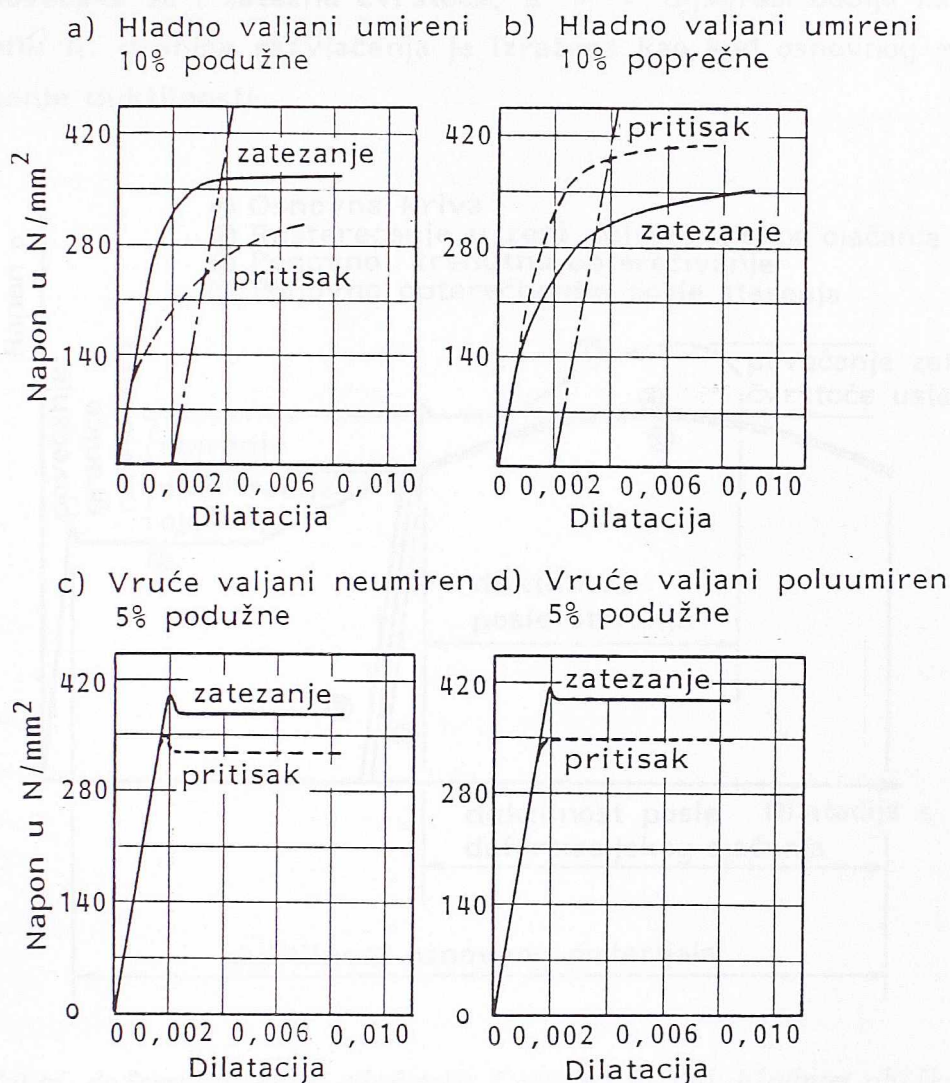
*Oznake 1-5 prema Tabeli I-1

Sl. I-3 Uticaj veličine predeformacije na zateznu čvrstoću

Na sl. I-5 prikazani su σ - ϵ dijagrami za zatezanje i za pritisak uzoraka koji su veštački izloženi starenju. Vidi se da starenje nema efekta na hladno valjani umireni čelik, jer se nije oformila granica velikih izduženja. Takodje kod svih uzoraka vidi se prisustvo Baušingerovog i inverznog Baušingerovog efekta.



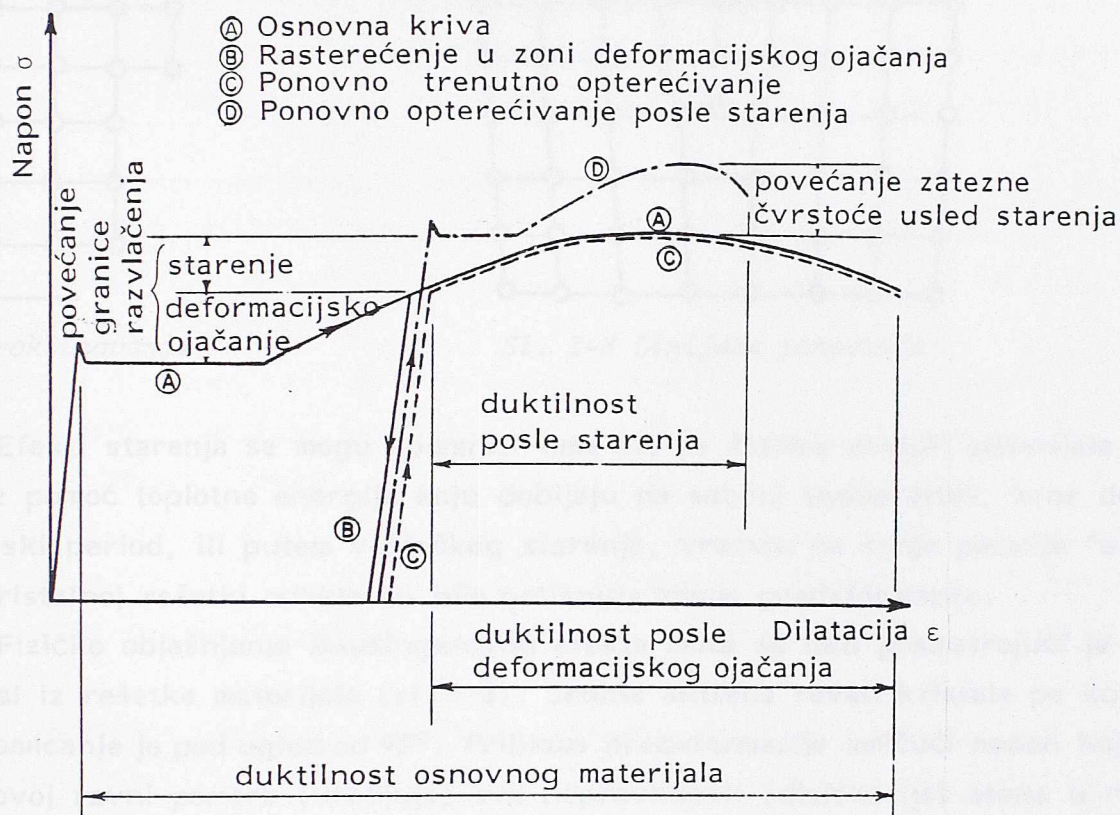
Sl. I-4 Uticaj veličine predeformacije na procentualna izduženja



Sl. I-5 Tipične krive $\sigma - \epsilon$ za ispitivane vrste čelika

Rezultati brojnih istraživanja koja su sprovedeli Winter, Karren, Chajes, Britvec i Uribe ukazuju da su promene mehaničkih karakteristika usled hladnog oblikovanja uzrokovane uglavnom od ojačanja usled hladne deformacije i starenja posle hladne deformacije. To je prikazano na sl. I-6 na kojoj kriva A predstavlja krivu napon-dilatacija osnovnog materijala, B krivu rasterećenja u oblasti ojačanja, C krivu trenutnog ponovnog opterećenja, a D krivu napon-dilatacija pri ponovnom opterećenju posle starenja. Interesantno je napomenuti da je granica razvlačenja obe krive C i D veća od granice razvlačenja osnovnog materijala, a da je duktilnost smanjena posle ojačavanja i starenja. Ako je uzorak napregnut preko granice razvlačenja, potreban je povećani napon da bi se izazvala nova deformacija uzorka. Deo na krivoj $\sigma - \epsilon$ koji se nalazi između granice razvlačenja i zatezne čvrstoće, a reprezentuje ovu pojavu naziva se deformacijsko ojačanje (sl. I-6). Kriva D pokazuje da uzorci izloženi starenju, dobijaju novi kvalitet, tj. dolazi do novog povećanja granice razvlačenja, i što nije slučaj kod deformacijskog

ojačanja, povećava se i zatezna čvrstoća, a $\sigma - \epsilon$ dijagram dobija karakterističan oblik za čelik tj. granica razvlačenja je izražena kao kod osnovnog materijala, uz novo smanjenje duktilnosti.

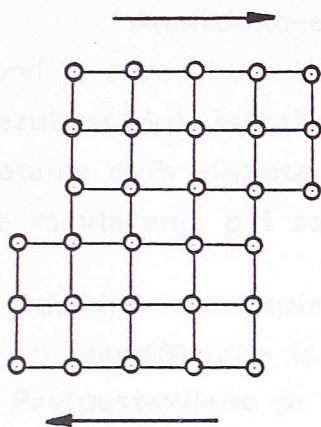


Sl. I-6 Efekti deformacijskog ojačanja i starenja pri hladnom oblikovanju

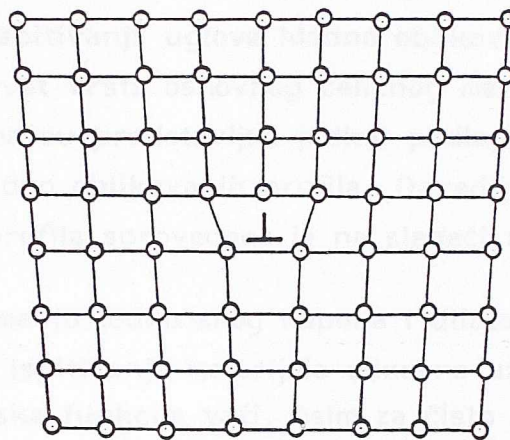
1.3. Teorijska osnova pojava konstatovanih eksperimentalnim ispitivanjem

Tečenje u materijalima koji imaju kristalnu rešetku je rezultat proklizavanja između dve ravni atoma u kristalnoj rešetki (sl. I-7). Ovo pomeranje u rešetki izazvano je smičućim naponima. Zbog postojećih nepravilnosti u kristalnoj rešetki, napon potreban da izazove ovo pomeranje je nekoliko puta manji od onog koji bi bio potreban da je u pitanju savršeni kristal. Na mestu nepravilnosti nekoliko atoma je potisnuto i formira novu ravan u rešetki (sl. I-8). Nepravilnosti omogućavaju da se međuatomske veze savladaju jedna po jedna (umesto sve odjednom, što je slučaj, kod savršenog kristala) za šta je potreban manji smičući napon. Stvarni proces tečenja je zbir pomeranja u velikom broju nepravilnosti u materijalu. Kod određenih materijala, od kojih je čelik najvažniji, proces tečenja se odvija tako što do relativno visokog napona nema tečenja da bi se ono zatim dosta naglo propagiralo u materijalu. Ova pojava se objašnjava prisustvom atoma drugih materijala kao što su azot, kiseonik ili ugljenik. Mesta u rešetki koja sadrže atome drugih materijala, ili su prazna, ili postoji određena nepravil-

nost (dislokacija), imaju veću energiju koju je potrebno savladati spoljnim naponom da bi se ostvarilo proklizavanje, samim tim i tečenje čelika.



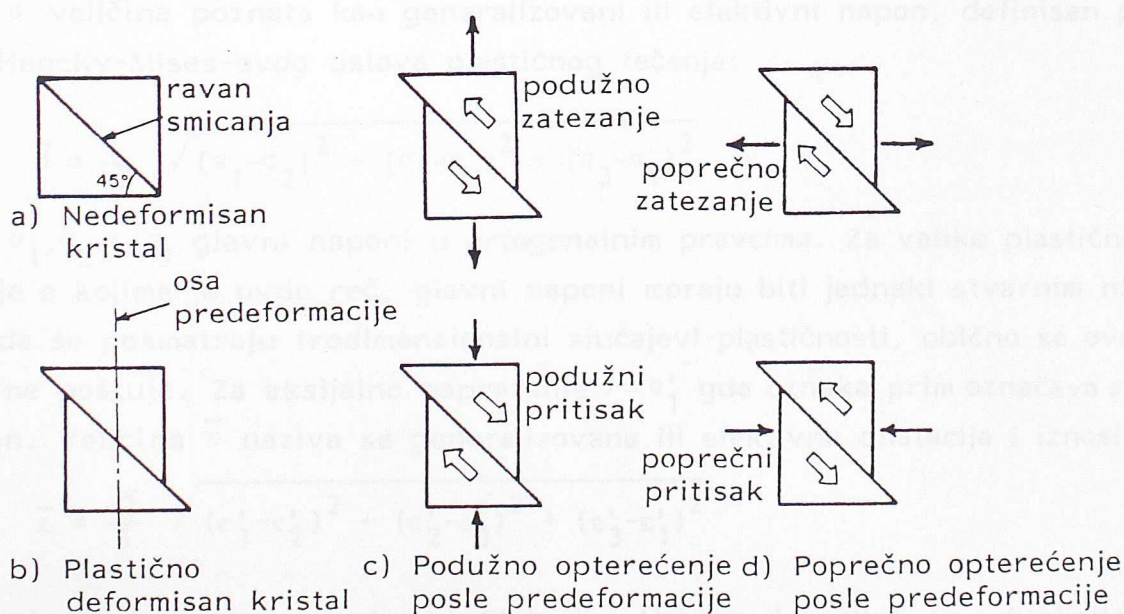
Sl. I-7 Proklizavanje



Sl. I-8 Linijska pomeranja

Efekti starenja se mogu objasniti time što se čestice drugih materijala u čeliku, uz pomoć toplotne energije koju dobijaju na sobnoj temperaturi, kroz duži vremenski period, ili putem veštačkog starenja, vraćaju na svoje pozicije "orbite" u kristalnoj rešetki odakle su bile potisnute tokom predeformacije.

Fizičko objašnjenje Baušingerovog efekta može se dati posmatrajući jedan kristal iz rešetke materijala (sl. I-9). Jedina aktivna ravan kristala po kojoj se odvija smicanje je pod uglom od 45° . Prilikom predeformacije smičući napon koji deluje u ovoj ravni pomera (uredjuje) sve nepravilnosti (dislokacije) atoma u rešetki, do određene granice. Za savladjivanje te granice potreban je veći napon od apliciranog, i to je ojačanje u smeru predeformacije. Za vraćanje dislokacija u suprotnom smeru potreban je respektivno manji napon i to je pad vrednosti, koje se javljaju pri Baušingerovom efektu. Pošto je ravan smicanja pod 45° u poprečnom pravcu efekat je suprotan.



Sl. I-9 Baušingerov efekat u jednom kristalu

1.4. Karakteristike uglova hladno oblikovanih profila

Analitičko-eksperimentalna ispitivanja uglova hladno oblikovanih profila prvi je obradivao Karren /81/ na devet vrsta osnovnog čeličnog materijala, a rezultati ovih istraživanja dugo godina su predstavljali jedinu podlogu za obuhvatanje ovih efekata u proračunu hladno oblikovanih profila. Određivanje granice razvlačenja pri zatezanju uglova profila sprovedena je na sledeći način:

- Određena je empirijska funkcija između jednoosnog napona i dilatacije u oblasti plastifikacije iz $\sigma - \epsilon$ dijagrama ispitivanja materijala odnosno uzoraka.
- Pretpostavljeno je da takva empirijska funkcija važi, osim za čisto zatezanje, i za druge vrste naprezanja.
- Model ugla je pretpostavljen sa konstantnim poluprečnikom krivine ugla.
- Jednačina je postavljena za tangentnu deformaciju u proizvoljnoj tački ugla, u zavisnosti od položaja tačke i odnosa unutrašnjeg poluprečnika krivine ugla prema debljini lima u uglu. U uglovima vlada ravno stanje napona tako da je podužna dilatacija $\epsilon_z = 0$. Prema konceptu konstantne zapremine iz teorije plastičnosti proizilazi da je radijalna dilatacija ϵ_r jednaka tangentnoj ali suprotnog smera.
- Koristeći paralelne koncepte efektivnog napona i efektivne dilatacije naponsko-deformacijska funkcija je integraljena po čitavom preseku ugla da bi se sračunao prosečan napon na granici razvlačenja ugla posle hladnog oblikovanja.

Teorija deformacijskog ojačanja može se prikazati jednačinom:

$$\bar{\sigma} = F(\bar{\epsilon}) \quad (1)$$

gde je $\bar{\sigma}$ veličina poznata kao generalizovani ili efektivni napon, definisan preko Huber-Hencky-Mises-ovog uslova plastičnog tečenja:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

gde su σ_1, σ_2 i σ_3 glavni naponi u ortogonalnim pravcima. Za velike plastične deformacije o kojima je ovde reč, glavni naponi moraju biti jednaki stvarnim naponima. Kada se posmatraju trodimenzionalni slučajevi plastičnosti, obično se ovaj zahtev ne poštuje. Za aksijalno naprezanje $\bar{\sigma} = \sigma_1'$ gde oznaka prim označava stvarni napon. Veličina $\bar{\epsilon}$ naziva se generalizovana ili efektivna dilatacija i iznosi:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1' - \epsilon_2')^2 + (\epsilon_2' - \epsilon_3')^2 + (\epsilon_3' - \epsilon_1')^2} \quad (3)$$

gde su ϵ_1', ϵ_2' i ϵ_3' stvarne glavne dilatacije. Veza sa logaritamskom funkcijom je:

$$\epsilon' = \ln(1 + \epsilon) \quad (4)$$

Za aksijalno naprezanje u plastičnoj oblasti $\varepsilon_2' = \varepsilon_3' = -\frac{1}{2} \varepsilon_1'$. Koristeći ove vrednosti određen je koeficijent u (3) iz uslova da se unošenjem ovih vrednosti dobija $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1'$. Funkcija F iz (1) zavisi od vrste materijala i može se odrediti iz $\sigma - \varepsilon$ dijagrama za uzorak opterećen zatezanjem.

Pri formiranju jednačine (1) korišćene su sledeće pretpostavke:

- materijal je izotropan u plastičnoj oblasti;
- elastične dilatacije su zanemarljive u odnosu na plastične;
- smičući napon izaziva tečenje, a normalni ne;
- odnosi između glavnih dilatacija ostaju konstantni pri tečenju;
- ose glavnih dilatacija ne rotiraju u odnosu na element pri tečenju;
- $\sigma - \varepsilon$ dijagrami se poklapaju za pritisak i zatezanje izraženi preko stvarnog napona i stvarne dilatacije;
- u pravcu upravnom na pravac hladnog oblikovanja ne javlja se Baušingerov efekat;
- nema promena zapremine kao rezultata plastične deformacije.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja potvrdila su da je ukupna greška ovih pretpostavki zanemarljivo mala.

Za neke metale funkcija F iz (1) može biti predstavljena u plastičnoj oblasti sa izrazom:

$$\bar{\sigma} = k (\bar{\varepsilon})^n \quad (5)$$

gde je k - koeficijent čvrstoće, a n - eksponent deformacijskog ojačanja. Ako se ovaj izraz predstavi u logaritamskom dijagramu, dobija se prava linija za plastičnu oblast $\sigma - \varepsilon$ dijagrama što je slučaj za veliki broj čelika. Za aksijalno naprezanje jednačina (5) postaje:

$$\sigma' = k (\varepsilon')^n \quad (6)$$

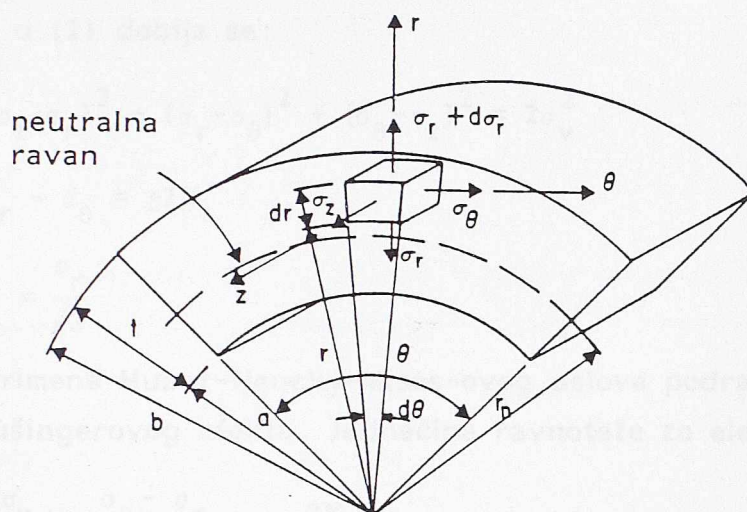
Da bi se ova jednačina primenila potrebno je eksperimentalno odrediti k i n. Ispitivanje je izvršeno za devet vrsta čelika i dobijene vrednosti za k varirale su od 483 do 787 N/mm², a vrednosti za n od 0,13 do 0,28, pa su sledeći analitički izrazi dobro aproksimirali eksperimentalne rezultate.

$$k = 2,80 \sigma_m - 1,55 \sigma_v \quad (7)$$

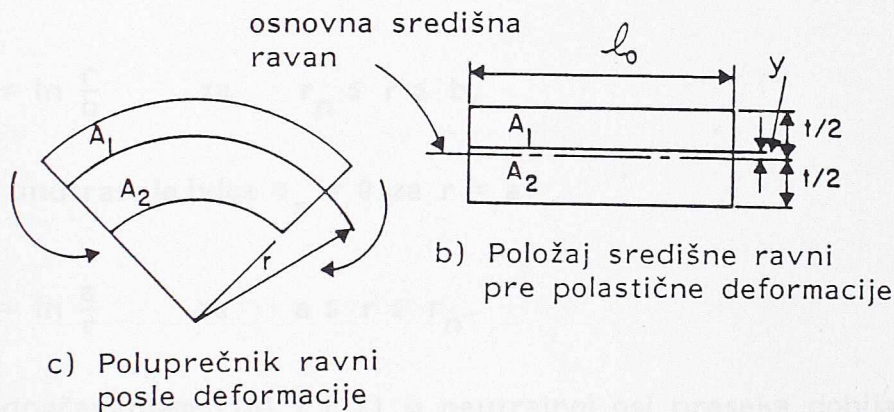
$$n = 0,225 \frac{\sigma_m}{\sigma_v} - 0,12 \quad (8)$$

Tangencijalne deformacije u bilo kojoj tački ugla sračunate su za uprošćeni teorijski model i upoređene sa eksperimentalnim dokazima dobijenim "foto-grid" metodom. Uprošćen teorijski model koji prikazuje obrazovanje ugla kao

rezultat dejstva momenata prikazan je na sl. I-10.



a) Napon na plastično deformisanom zapreminskom elementu



b) Položaj središne ravni pre polastične deformacije

c) Poluprečnik ravni posle deformacije

Sl. I-10 Oblikovanje ugla iz ravnog lima čistim savijanjem

Glavni pravci za napon i dilatacije su: radijalni (r), tangencijalni (θ) i podužni (z). Levy-Mises-ova teorija plastičnog tečenja, u kojoj su elastične dilatacije zanemarljive u odnosu na plastične, uspostavlja vezu izmedju devijatorskog tenzora napona i tenzora povećanja dilatacije.

$$S' d\lambda = dE \quad (9)$$

gde je S' devijatorski tenzor napona, dE tenzor povećanja dilatacije, a $d\lambda$ skalarni faktor proporcionalnosti. Primera radi, prva jednačina iz ove matrice bi bila:

$$\frac{d\lambda}{3} (2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\theta) = d\epsilon_z \quad (10)$$

u kojoj su σ_z , σ_r i σ_θ glavni naponi, a ϵ_z podužna dilatacija. Pošto je $\epsilon_z = 0$ i $d\epsilon_z = 0$ onda je:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \quad (11)$$

a zamenom u (2) dobija se:

$$(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 = 2\sigma_v^2 \quad (12)$$

$$\sigma_r - \sigma_\theta = \pm 2K \quad (13)$$

$$K = \frac{\sigma_r}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

Primena Huber-Hencky-Mises-ovog uslova podrazumeva izotropiju i odsustvo Baušingerovog efekta. Jednačina ravnoteže za element sa sl. I-10 je:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = \pm \frac{2K}{r}, \quad (15)$$

a integracijom pomoću uslova spoljne ivice $\sigma_r = 0$ za $r = b$ dobija se:

$$\frac{\sigma_r}{2K} = \ln \frac{r}{b} \quad \text{za} \quad r_n \leq r \leq b, \quad (16)$$

a sa uslovom unutrašnje ivice $\sigma_r = 0$ za $r = a$:

$$\frac{\sigma_r}{2K} = \ln \frac{a}{r} \quad \text{za} \quad a \leq r \leq r_n. \quad (17)$$

Izjednačavanjem (16) i (17) u neutralnoj osi preseka dobija se poluprečnik neutralne ose:

$$r_n = \sqrt{a \cdot b} \quad (18)$$

Tangencijalni napon σ_θ je pritiskujući na unutrašnjoj, a zatežujući na spoljašnjoj ivici. Radijalni napon σ_r je maksimalan u neutralnoj površini. Moguće je dokazati da se debljina modela ne menja za vreme plastične deformacije, tj. da se prosečna debljina $t = b - a$ ne menja. Dokazano je da se neutralna linija preseka (gde σ_θ menja znak) ne poklapa sa linijom koja je nedeformisana. Neutralna linija u osnovnom materijalu je u sredini preseka, dok je usled savijanja materijala kod hladno oblikovanih uglova bliža unutrašnjoj ivici ugla. To pomeranje prouzrokuje da je odredjeni deo preseka prvo bio pritisnut, a sa povećanjem momenta postao zategnut.

Odnos izmedju originalne dužine l_0 osnovnog materijala i spoljašnjeg i unutrašnjeg poluprečnika može se sračunati preko površine ugla.

$$l_0 = (a + b) \frac{\theta}{2} \quad (19)$$

Poluprečnik vlakna sa nultim izduženjem je

$$r_o = \frac{l_o}{\theta} = \frac{a+b}{2} \quad (20)$$

Tangencijalna deformacija ε_θ linearno je zavisna od r

$$\varepsilon_\theta = \frac{l - l_o}{l_o} = \frac{r - r_o}{r_o} = \frac{r}{r_o} - 1 \quad (21)$$

gde je $r = 1/\theta$. Na spoljašnjoj ($r = b = a+t$) i unutrašnjoj ($r = a$) ivici je:

$$\varepsilon_a = -\varepsilon_b = \frac{1}{2 \cdot \frac{a}{t} + 1} \quad (22)$$

Zapreminska dilatacija Δ je:

$$\Delta = (1+\varepsilon_1) (1+\varepsilon_2) (1+\varepsilon_3) - 1, \quad (23)$$

a logaritamska zapreminska dilatacija je:

$$\Delta' = \ln (1+\Delta) = \varepsilon_1' + \varepsilon_2' + \varepsilon_3' \quad (24)$$

Pošto je $\Delta = 0$ za konstantnu zapreminu

$$\Delta' = \varepsilon_1' + \varepsilon_2' + \varepsilon_3' = 0 \quad (25)$$

Kako je u pitanju čisto savijanje, što je ravanski problem $\varepsilon_z' = 0$, pa je:

$$\varepsilon_r' = -\varepsilon_\theta' \quad (26)$$

Ako se izraz (26) unese u (3) dobija se:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} (\varepsilon_\theta') = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln (1+\varepsilon_\theta) = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{r}{r_o} \right) \quad (27)$$

Napon na granici razvlačenja uglova σ_{VC} potrebno je izraziti u funkciji karakteristika materijala k i n . Veze su izvedene za dva modela ugla:

- 1) model ugla pri čistom savijanju
- 2) model ugla pri čistom savijanju i radijalnom pritisku.

Prvi model ugla je utvrdio da se Baušingerov efekat ne javlja jer je prisetno ravno stanje dilatacija. Zapreminski element ugla koji se nalazi sa spoljne strane ravni koja nema izduženje, imaće tangencijalnu dilataciju zatezanja i radijalnu pritiska, jednake po veličini. Za element sa unutrašnje strane nedeformisane ravni važi suprotno. U oba elementa ose dilatacija ε_r i ε_θ su upravne na pravac ispitivanja z . Takođe, u podužnom z pravcu ne javlja se uticaj suprotnog Baušingerovog efekta. Jedan mogući način određivanja σ_{VC} je taj da se ugao iseče u više elemenata od kojih se svaki posebno ispituje pa se σ_{VC} nadje kao srednja vred-

nost pojedinačnih ispitivanja. Ovaj način je nepotreban i komplikovan. Integraljenjem jednačine (5) po celoj površini ugla definiše se σ_{VC} :

$$I_0 t \sigma_{VC} = k \int_A |\bar{\varepsilon}|^n dA = k \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} |\bar{\varepsilon}|^n \cdot I_0 dy \quad (28)$$

$$\sigma_{VC} = \frac{k}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} |\bar{\varepsilon}|^n dy \quad (29)$$

Iz odnosa konstantne zapremine može se zaključiti da je površina poprečnog preseka pre i posle hladnog oblikovanja ista, ako je

$$dA = I_0 dy = \theta r_0 dy = \theta r dr \quad \text{pa je}$$

$$dy = \frac{r}{r_0} dr \quad (30)$$

Zamenom izraza za dy (30) i $\bar{\varepsilon}$ (27) u (29) dobija se:

$$\frac{\sigma_{VC}}{k} = \frac{1}{t} \int_a^b \left| \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{r_0} \right|^n \frac{r}{r_0} dr \quad (31)$$

Podelom intervala integracije na dva dela (spoljni i unutrašnji u odnosu na nedeformisanu ravan) i uvodeći smenu $x = r/r_0$ dobija se:

$$\frac{\sigma_{VC}}{k} = \frac{r_0}{t} \left[\int_1^{b/r_0} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln x \right)^n x dx + \int_{a/r_0}^1 \left| \frac{2}{\sqrt{3}} \ln x \right|^n x dx \right] \quad (32)$$

Koristeći izraz (20) za r_0 , integral (32) može se sračunati numerički koristeći Simpsonovo pravilo, pri $n = \text{const.}$ (sl. I-11).

Uočeno je da se za vrednost $a/t < 10$ jednačina (32) može dobro aproksimirati izrazom:

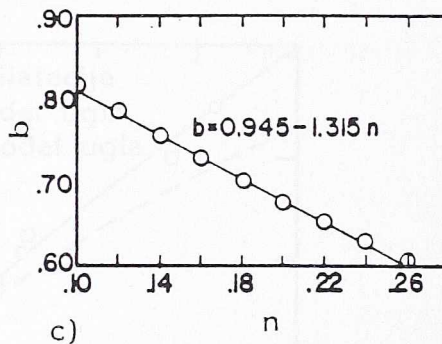
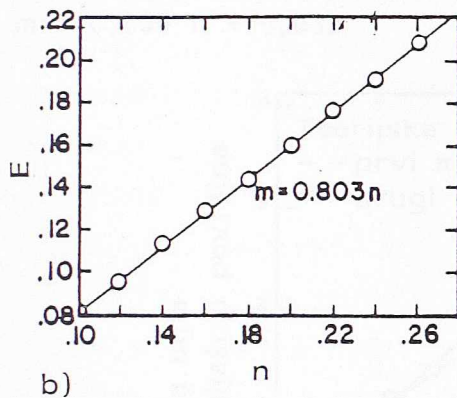
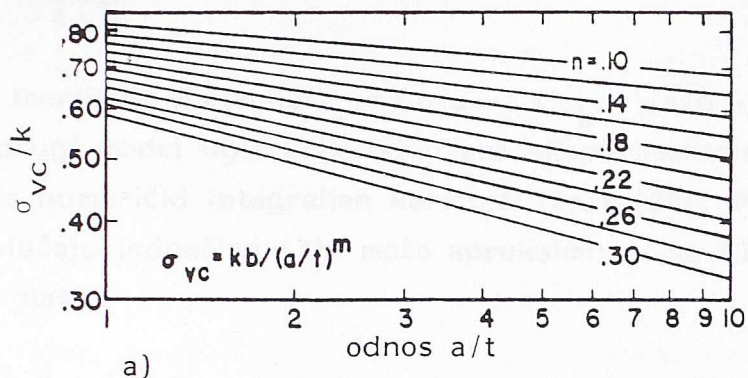
$$\sigma_{VC} = \frac{k b}{\left(\frac{a}{t}\right)^m} \quad (33)$$

Ovo je tačno jer krive na sl. I-11a moguće je dobro aproksimirati pravom. Koristeći izraz (33) utvrđeno je da su veze između b i n , odnosno m i n linearne (sl. I-11b,c):

$$b = 0,945 - 1,315 n \quad (34)$$

$$m = 0,803 n \quad (35)$$

Sa vrednostima k i m osnovnog materijala koristeći izraze (33), (34) i (35) može se sračunati granica razvlačenja ugla σ_{VC} .



Sl. I-11 Granica razvlačenja za prvi model ugla:

- (a) Granica razvlačenja ugla u funkciji b , k , m i a/t ;
 (b) Konstanta m u funkciji eksponenta deformacijskog ojačanja n ;
 (c) Konstanta b u funkciji eksponenta deformacijskog ojačanja n .

Drugi model ugla uvodi radijalni pritisak koji se javlja kod svih postupaka hladnog oblikovanja. Analitički je utvrđen efekat spoljašnjeg radijalnog pritiska p na unutrašnju površinu ugla prilikom plastičnog savijanja. Integraljenjem jednačine (15) pri graničnim uslovima $\sigma_r = -p$ za $r = a$ i $\sigma_r = 0$ za $r = b$ radijalni napon je:

$$\sigma_r = -2k \ln \frac{b}{r} \quad \text{za} \quad r_n \leq r \leq b \quad (36)$$

$$\sigma_r = -p - k \ln \frac{r}{a} \quad \text{za} \quad a \leq r \leq r_n \quad (37)$$

Izjednačavajući (36) i (37) za neutralnu površinu dobija se poluprečnik neutralne površine:

$$r_n = \sqrt{a \cdot b \cdot e^{-P/2k}} \quad (38)$$

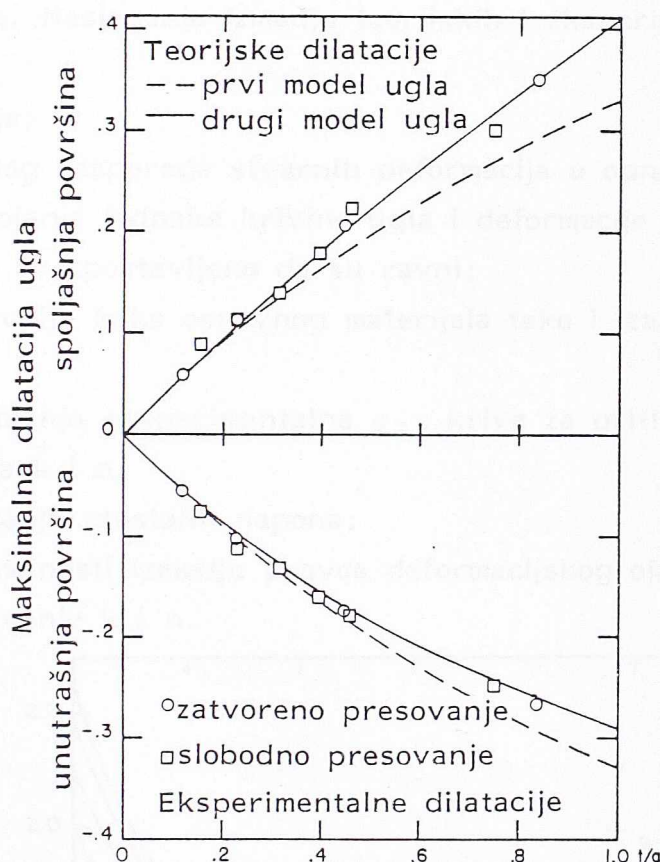
U poredjenju sa izrazom (18) vidi se da je neutralna površina bliža unutrašnjoj ivici ugla kod drugog modela. Isto važi i za nedeformisanu ravan. Kako nije poznat intenzitet pritiska pretpostavljeno je da se neznatno smanjenje debljine ugla zanemaruje i da je raspored deformacije linearan. Tada je:

$$r_o = \sqrt{a \cdot b} \quad (39)$$

a rezultujuće teorijske dilatacije $\epsilon_a = \sqrt{b/a} - 1$ i $\epsilon_b = \sqrt{a/b} - 1$ prikazane na sl. I-12, pokazuju da drugi model ugla bolje odgovara eksperimentalnim rezultatima. Izraz (32) ponovo je numerički integraljen koristeći izraz (39). Rezultati pokazuju da se i u ovom slučaju jednačina (32) može aproksimirati sa (33) uz korekciju izraza za b i m koji glase:

$$b = 1,0 - 1,3 n \quad (40)$$

$$m = 0,855 n + 0,035 \quad (41)$$



Sl. I-12 Maksimalne dilatacije ugla dobijene foto-grid metodom

Izraz (33) može se napisati u sledećem obliku:

$$\frac{\sigma_{VC}}{\sigma_V} = \frac{(kb/\sigma_V)}{(a/t)^m} \quad (42)$$

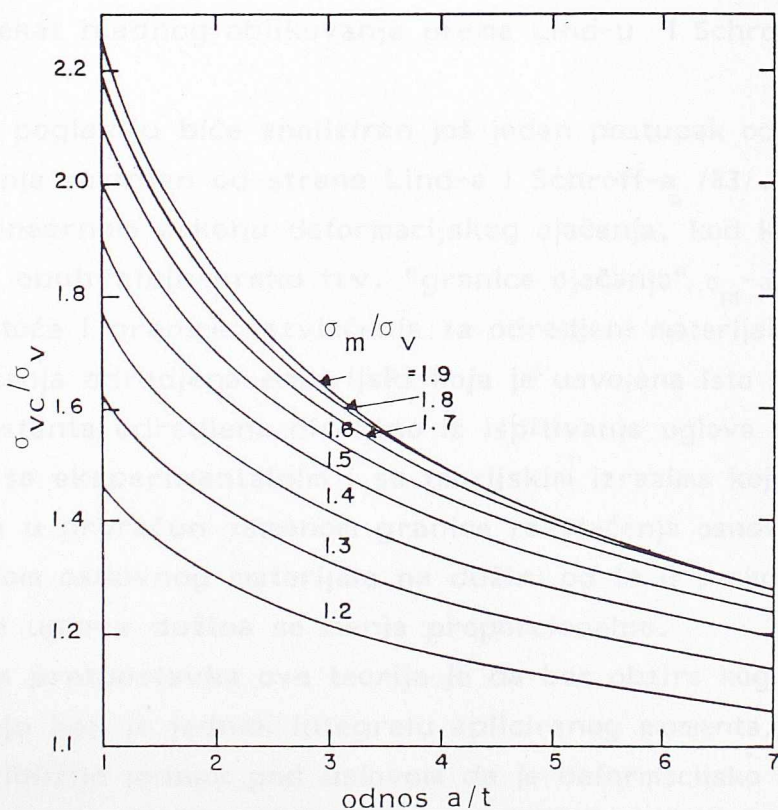
Analizom izraza (7), (8), (40) i (41) može se utvrditi da desna strana jednačine (33) zavisi samo od dva parametra: odnosa σ_m/σ_V i odnosa a/t . Ova činjenica je omogućila obrazovanje dijagrama na sl. I-13 za praktičnu upotrebu. Sa njega se u zavisnosti od odnosa a/t i σ_m/σ_V direktno očitava σ_{VC}/σ_V . Odnos σ_m/σ_V je mera kapaciteta deformacijskog ojačanja osnovnog materijala, a odnos

a/t mera hladnog oblikovanja. Sl. I-13 pokazuje da sa povećanjem odnosa σ_m/σ_v materijal ima veću sposobnost ojačanja. Materijali sa malim odnosom σ_m/σ_v dobiće malo deformacijsko ojačanje pre loma. Step en hladnog oblikovanja je veći što je odnos a/t manji.

Eksperimentalno dobijene vrednosti σ_{VC} za zatezanje i pritisak malo su se razlikovale kod materijala koji nisu podložni starenju. Kod ostalih materijala σ_{VC} za pritisak je 5-15% veći nego za zatezanje.

Povezanost izmedju teorijske krive i eksperimentalnih rezultata bolja je za drugi model ugla skoro kod svih materijala. Teorijske vrednosti σ_{VC} su na strani sigurnosti (tj. nešto manje od eksperimentalnih), i to više za pritisak, a manje za zatezanje. Neslaganja izmedju teorijskih i eksperimentalnih rezultata mogu biti posledica:

- starenja;
- različitog rasporeda stvarnih deformacija u odnosu na pretpostavljene;
- nepostojanja jednake krivine ugla i deformacije poprečnih preseka za koje je pretpostavljeno da su ravni;
- anizotropije kako osnovnog materijala tako i izazvane hladnim oblikovanjem;
- nepostojanja eksperimentalne $\sigma-\epsilon$ krive za pritisnut uzorak radi određivanja k i n;
- ignorisanja zaostalih napona;
- ortogonalnosti izmedju pravca deformacijskog ojačanja i ispitivanja za određivanje k i n.



Sl. I-13 Odredjivanje relacije σ_{VC}/σ_v u zavisnosti od odnosa σ_m/σ_v i a/t

Izraz koji je izveo Karren za povećanje granice razvlačenja u uglu ušao je u mnoge propise (npr. AISI) u sledećem obliku:

$$\sigma_{vc} = \frac{B_c \sigma_v}{(a/t)^m} \quad \text{gde je:} \quad (43)$$

$$B_c = 3,69 \frac{\sigma_m}{\sigma_v} - 0,819 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_v} \right)^2 - 1,79 \quad (44)$$

$$m = 0,192 \frac{\sigma_m}{\sigma_v} - 0,068 \quad (45)$$

gde su B i m konstante za bilo koji čelični materijal koje pokazuju zavisnost povećane granice razvlačenja od odnosa (σ_m/σ_v) i (a/t) . Prosečan napon razvlačenja za ceo profil je tada:

$$\sigma_{vpr} = C\sigma_{vc} + (1-C)\sigma_{vr} \quad (46)$$

gde je C odnos ukupne površine uglova i ukupne površine poprečnog preseka, a σ_{vr} je prosečna granica razvlačenja materijala ravnih delova preseka, ako se opitom dokaže da je veća od σ_v .

Oblast važnosti ovog izraza ograničen je oblašću važnosti Karren-ovih opita a to je:

$$\sigma_m/\sigma_v > 1,2, \quad r/t < 7 \quad \text{i za ugao previjanja } \theta < 120^\circ.$$

1.5. Efekat hladnog oblikovanja prema Lind-u i Schroff-u

U ovom poglavlju biće analiziran još jedan postupak odredjivanja uticaja hladnog oblikovanja razvijen od strane Lind-a i Schroff-a /83/. Ovaj postupak zasnovan je na linearnom zakonu deformacijskog ojačanja, kod koga se karakteristike materijala obuhvataju preko tzv. "granice ojačanja" $\sigma_m - \sigma_v$ tj. razlike između zatezne čvrstoće i granice razvlačenja za određeni materijal. Drugi parametar je konstanta ojačanja određena empirijski koja je usvojena isto za sve vrste čelika. Pošto je konstanta određena direktno iz ispitivanja uglova HOP, to se rezultati dobro slažu sa eksperimentalnim i sa teorijskim izrazima koje je dao Karren. Ojačanje se uzima u proračun zamenom granice razvlačenja osnovnog materijala zateznom čvrstoćom osnovnog materijala na dužini od $5t$ u svakom uglu od 90° . Za ostale veličine uglova dužina se menja proporcionalno.

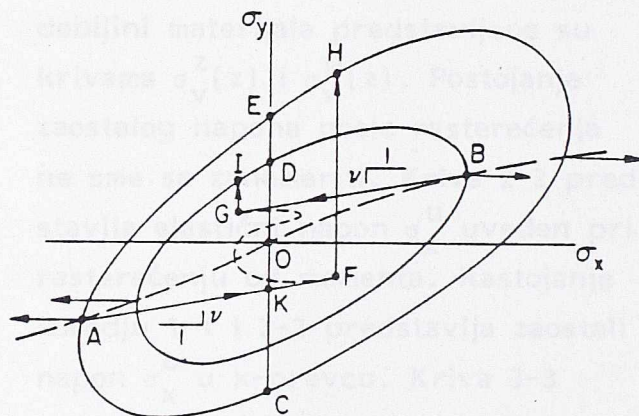
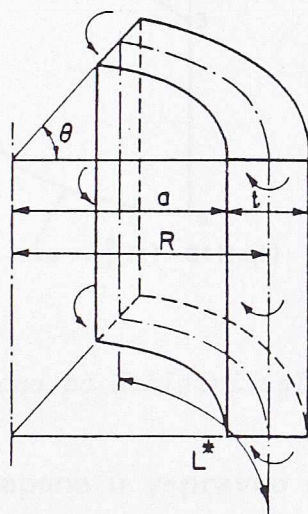
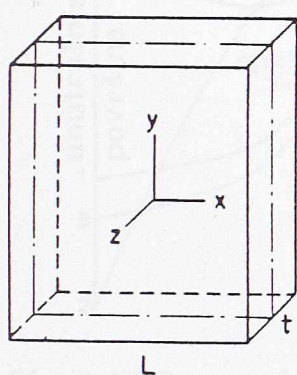
Osnovna pretpostavka ove teorije je da bez obzira kog prečnika je ugao, rad na oblikovanju koji je jednak integralu apliciranog momenta, respektivno veličini ugla, je približno jednak pod uslovom da je deformacijsko ojačanje linearno. To znači da se isti rad koncentriše na manju zapreminu materijala kod uglova sa

manjim poluprečnicima. Ako se materijal ojača linearno rad je nezavisan od poluprečnika ugla uz zanemarenje elastične oblasti.

Pretpostavke učinjene za ovu analizu su da je materijal elasto-plastičan, i da su elastične deformacije zanemarljive u odnosu na plastične. Na sl. I-14 prikazan je element osnovnog materijala širine L , debljine t , savijen jednakopodeljenim momentom u cilindrični oblik poluprečnika R (unutrašnji poluprečnik a). Zahvaljujući simetriji koordinatni sistem označava pravce glavnih dilatacija. Pošto element nema podužne dilatacije ravan x - y je deformisana biaksijalno. Prilikom formiranja ugla spoljašnja i unutrašnja ravan su napregnute po putanji OA ili OB (sl. I-15) koje su naponske tačke u kojima ne postoji dilatacija u y -pravcu. Napon i dilatacija su povezani preko zakona deformacijskog ojačanja:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon)$$

(47)



Sl. I-14 Ugao poprečnog preseka pre i posle hladnog oblikovanja

Sl. I-15 Prostor napona

U eksploataciji ugao je izložen jednoosnom naprežanju u y -pravcu, predstavljenim pravcem COD . Efekat plastične deformacije je da podiže granicu razvlačenja u y -pravcu. Na primer sloj pritisnut do tačke A imaće napone za y -pravac u tački E zatezanje, a u C pritisak. Kada se ukloni momenat koji je izazvao plastičnu deformaciju dolazi do elastičnog rasterećenja po pravcima AF i BG . Kriva FG predstavlja zaostale napone za ceo presek. Pri radnom opterećenju ugao se jednoaksijalno opterećuje i prelazi veličinu elastičnih napona, dok prosečni napon nije toliko veliki da izazove prekoračenje granice razvlačenja za slojeve po čitavom poprečnom preseku. Taj prosečni napon zove se napon na granici razvlačenja ugla, i potrebno ga je sračunati.

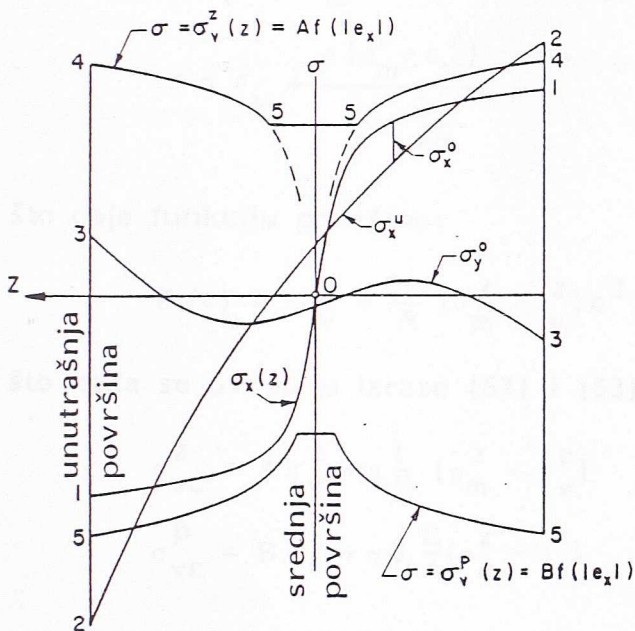
Pretpostavlja se da postoji funkcija efektivnog napona i efektivne dilatacije tako da se mogu opisati stanja napona i dilatacija posle ojačanja u drugom

pravcu i to za pritisak i za zatezanje $\sigma_V^Z = f_V^Z(\epsilon_X)$, $\sigma_V^P = f_V^P(\epsilon_X)$, preko linearnih veza:

$$\sigma_V^Z = A f(\epsilon_X) \quad (48)$$

$$\sigma_V^P = B f(\epsilon_X) \quad (49)$$

gde su A i B konstante.



Sl. I-16 Raspored napona po debljini ugla

predstavlja zaostale napone u x-pravcu sastavljene od plastičnog i elastičnog dela vezanog za rasterećenje i povezanih sa σ_X^U Poasonovim efektom. Očigledno je:

$$\int \sigma_Y^0(z) dz = 0 \quad (50)$$

$$\int \sigma_X^0(z) dz = 0 \quad (51)$$

Kada ne bi bilo zaostalih napona u x-pravcu zatežuća aksijalna sila po jedinici dužine poprečnog preseka, koja bi izazvala tečenje, bila bi jednaka površini izmedju krivih 3-3 i 4-4. Granica razvlačenja ugla pri zatezanju može se sračunati pomoću (48), (50), (51) kao

$$\begin{aligned} \sigma_{vc}^Z &= \frac{1}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} (\sigma_Y - \sigma_Y^0) dz \approx \frac{1}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \{ \sigma_V^Z[\epsilon_X(z)] + (\sigma_V^Z)' \sigma_X^0 - \sigma_Y^0 \} dz \\ &= \frac{A}{t} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} f[\epsilon_X(z)] dz = \frac{2AR}{t} \int_0^{\frac{t/2R}{}} f(\epsilon_X) d\epsilon_X = \frac{2R}{t} AF\left(\frac{t}{2R}\right) \end{aligned} \quad (52)$$

Na sl. I-16 kriva 1-1, koja predstavlja $\sigma = \sigma_X(z) = f[\epsilon_X(z)]$ je varijacija napona u x-pravcu po debljini ugla neposredno posle nanošenja poslednjeg povećanja rada na plastičnom oblikovanju. Napon je simetričan u odnosu na srednju površinu. Odgovarajuće varijacije granice tečenja po debljini materijala predstavljene su krivama $\sigma_V^Z(z)$ i $\sigma_V^P(z)$. Postojanje zaostalog napona posle rasterećenja ne sme se zanemariti. Kriva 2-2 predstavlja elastični napon σ_X^U uveden pri rasterećenju od momenta. Rastojanje izmedju 1-1 i 2-2 predstavlja zaostali napon σ_X^0 u x-pravcu. Kriva 3-3

Slično ovome napon tečenja ugla pri pritisku nalazi se kao:

$$\sigma_{VC}^P = \frac{2R}{t} BF \left(\frac{t}{2R} \right) \quad (53)$$

Devet različitih čelika koje je Karren ispitivao pokazali su da je dilatacija pri kidanju σ_m za sve materijale oko 1/3 (od 0,31 do 0,4 mereno na epruvetama od 50 mm). Ovo ukazuje da se svi materijali mogu predstaviti idealnim za ojačanje od σ_V^Z do σ_m^Z . Za kruto-plastičan materijal sa linearnim ojačanjem je:

$$\sigma = \sigma_V + \frac{\varepsilon (\sigma_m^Z - \sigma_V^Z)}{\frac{1}{3} \cdot \frac{3A}{4\alpha}} \quad (54)$$

što daje funkciju površine:

$$F(\varepsilon) = \varepsilon \sigma_V + \frac{2\alpha}{A} (\sigma_m^Z - \sigma_V^Z) \varepsilon^2 \quad (55)$$

što kada se uvrsti u izraze (52) i (53) daje

$$\sigma_{VC}^Z = A \sigma_V^Z + \alpha \frac{t}{R} (\sigma_m^Z - \sigma_V^Z) \quad (56)$$

$$\sigma_{VC}^P = B \sigma_V^Z + \alpha \frac{t}{R} \frac{B}{A} (\sigma_m^Z - \sigma_V^Z) \quad (57)$$

Iz (56) i (57) proizilazi $B/A = \sigma_V^P / \sigma_V^Z$ pa je:

$$\sigma_{VC}^Z = \sigma_V^Z + \alpha \frac{t}{R} (\sigma_m^Z - \sigma_V^Z) = \sigma_V^Z \left[1 + \alpha \frac{t}{R} \left(\frac{\sigma_m^Z}{\sigma_V^Z} - 1 \right) \right] \quad (58)$$

$$\sigma_{VC}^P = \sigma_V^P + \alpha \frac{t}{R} \left(\frac{\sigma_V^P}{\sigma_V^Z} \sigma_m^Z - \sigma_V^P \right) = \sigma_V^P \left[1 + \alpha \frac{t}{R} \left(\frac{\sigma_m^Z}{\sigma_V^Z} - 1 \right) \right] \quad (59)$$

U kojima je α jedina nepoznata veličina. Rešenjem ovih jednačina sa Karren-ovim eksperimentalnim rezultatima dobija se za zatezanje $\alpha = 2,10$ do $5,03$, a za pritisak $\alpha = 2,02$ do $7,51$. Dalje se koriste prosečne vrednosti i to $\alpha = 3,34$ za zatezanje i $\alpha = 4,29$ za pritisak.

Dodatno opterećenje koje može nositi ugao savijenog dela (θ), poluprečnika srednje ravni R (površina je $= \theta Rt$) je:

$$\Delta P = \theta Rt (\sigma_{VC} - \sigma_V) \quad (60)$$

Ako se vrednost za σ_{VC} iz izraza (58) zameni u (60) dobja se:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \theta Rt \left[\sigma_V + \alpha \left(\frac{t}{R} \right) (\sigma_m - \sigma_V) - \sigma_V \right] = \theta \alpha t^2 (\sigma_m - \sigma_V) = \\ &= \left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta^0}{90^0} \right) \cdot 3,34 \cdot t^2 (\sigma_m - \sigma_V) = 5t^2 (\sigma_m - \sigma_V) \frac{\theta^0}{90^0} \end{aligned} \quad (61)$$

Za profil ukupne površine A koji ima N prevoja opterećenje pri lomu je:

$$F = A \cdot \sigma_v + N \cdot \Delta P \quad (62)$$

pod uslovom da je lom usled plastifikacije, a ne usled gubitka stabilnosti. Prosečni napon razvlačenja u profilu je tada:

$$\sigma_{vp} = \frac{F}{A} = \sigma_v + N \cdot \frac{5t^2}{A} (\sigma_m - \sigma_v) \frac{\theta}{90} \quad (63)$$

kao što je i dato u novom BS 5950/Part 5-1987. Sličan izraz koriste i novi Kanadski standard kao i preporuke ECCS. Ograničenja koja zahteva ovaj postupak su:

- 1) $\theta < 135^\circ$
- 2) $r \leq 5 t$
- 3) Vrednost σ_{vp} ne sme da prekorači $1,25 \sigma_v$ ili σ_m osnovnog materijala.

1.6. Neki faktori od uticaja na povećanje granice razvlačenja celog profila

U Francuskoj je od strane CTICM-a i IRSID-a organizovan obiman program istraživanja koji je imao za cilj određivanje nivoa ojačanja materijala pri hladnom oblikovanju u zavisnosti od različitih parametara kao što su: kvalitet i vrsta čelika, broj previjenih ivica i intenzitet predoblikovanja.

Tretirane su tri vrste čelika sa hemijskim sastavom prema Tabeli I-2.

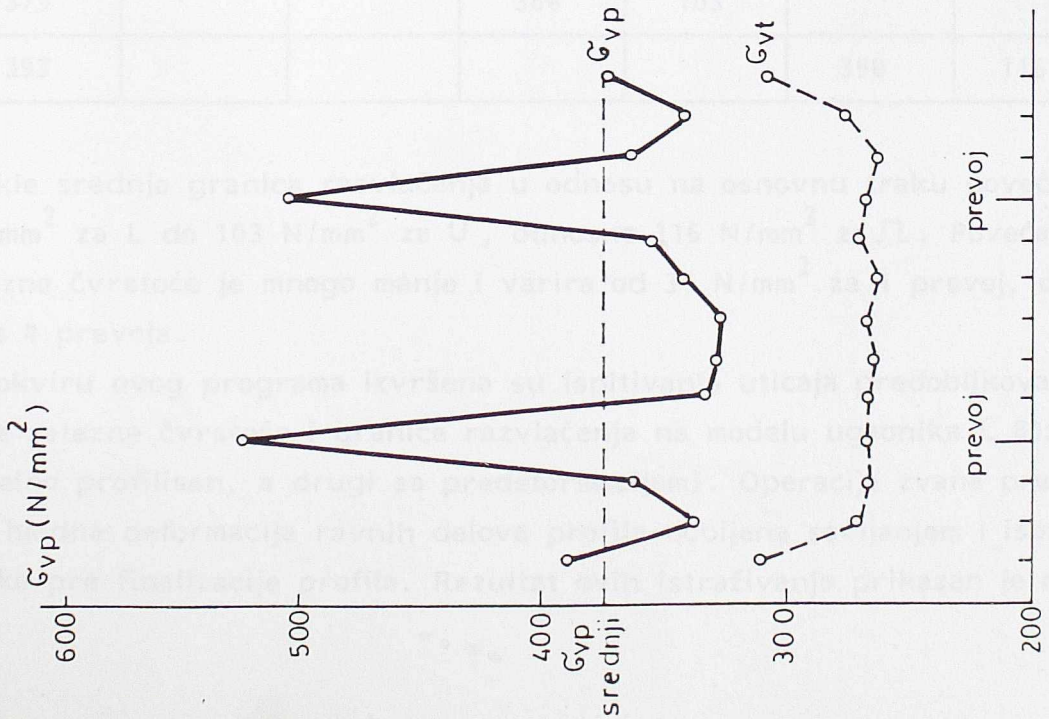
Tabela I-2

Vrsta čelika	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	N %
1	0,07	0,010	0,48	0,031	0,022	<0,005	0,004
2	0,06	0,09	0,51	0,033	0,014	<0,005	0,009
3	0,10	0,10	0,50	0,022	0,018	0,052	0,003

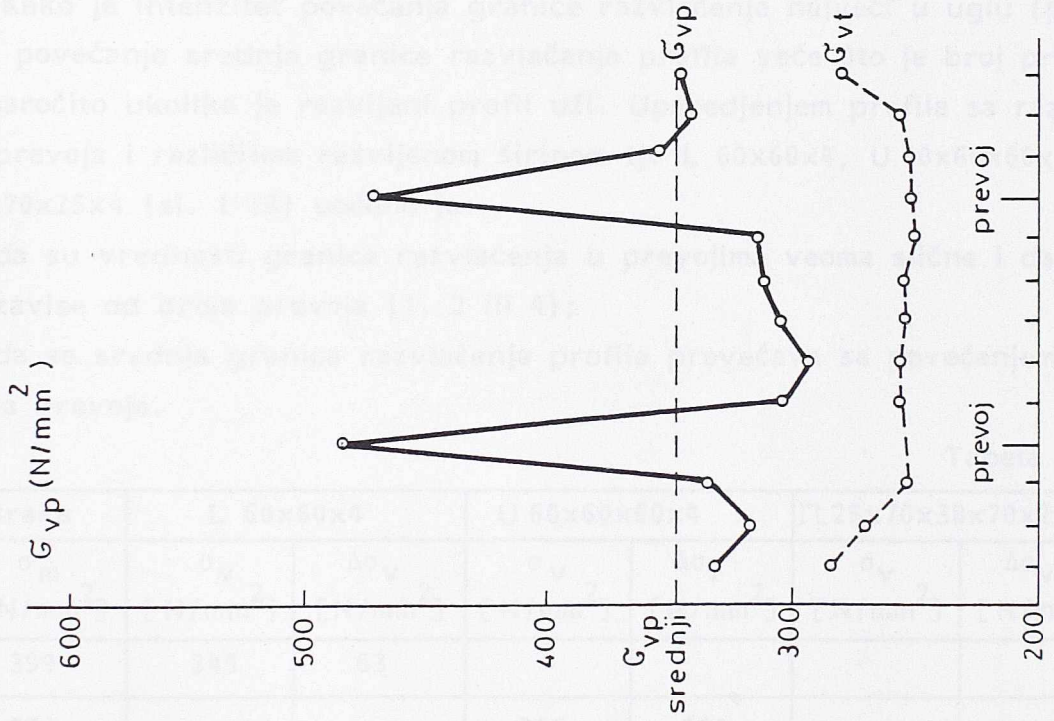
Utvrđena je bitna zavisnost ojačanja čelika usled hladnog oblikovanja od hemijskog sastava čelika, što lepo ilustruje primer sa sl. I-17.

Između tri vrste čelika označene sa 1, 2 i 3, dve prve su neumireni čelici (jedan sa više, a drugi sa manje azota), dok je treći umiren Si-Al. Od ovih čelika napravljeni su profili U 50x100x50x3 i ispitani opitom zatezanja. Srednje granice razvlačenja ovih profila prikazane su na sl. I-17, a stepen povećanja $\Delta\sigma_v$ u odnosu na osnovnu traku dat je u Tabeli I-3. Povećanje granice razvlačenja čelika 1 i 2 približno su istog reda veličine, dok je kod umirenog čelika 3, znatno manje.

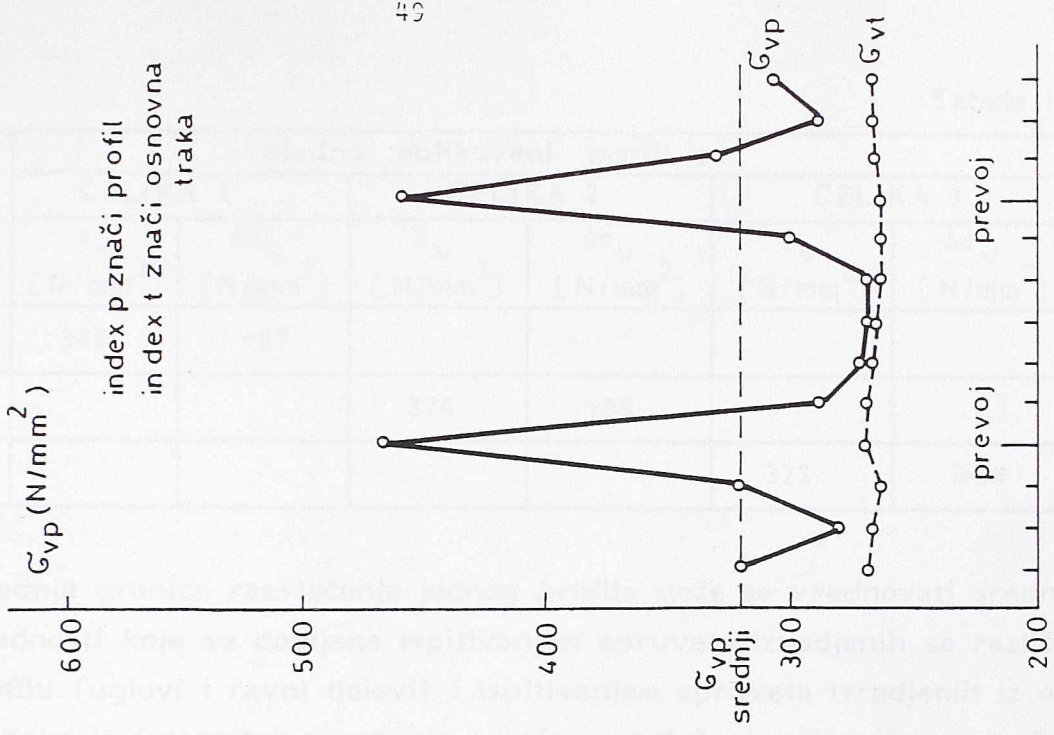
50 x 100 x 50 x 3
čelik 2



50 x 100 x 50 x 3
čelik 1



50 x 100 x 50 x 3
čelik 3



index p znači profil
index t znači osnovna
traka

Sl. I-17 Uticaj vrste čelika na intenzitet srednjeg napona razvlačenja celog profila

Tabela I-3

Osnovna traka	Hladno oblikovani profil iz					
	ČELIKA 1		ČELIKA 2		ČELIKA 3	
σ_v [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]	$\Delta\sigma_v$ [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]	$\Delta\sigma_v$ [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]	$\Delta\sigma_v$ [N/mm ²]
261	348	+87				
275			374	+99		
268					322	+54

Srednja granica razvlačenja jednog profila može se vrednovati srednjom razlikom vrednosti koje su dobijene ispitivanjem epruveta izvadjenih sa različitih mesta u profilu (uglovi i ravni delovi) i ispitivanjem epruveta izradjenih iz osnovne trake. Kako je intenzitet povećanja granice razvlačenja najveći u uglu (prevoju), to je povećanje srednje granice razvlačenja profila veće što je broj prevoja veći, a naročito ukoliko je razvijen profil uži. Upoređenjem profila sa različitim brojem prevoja i različitom razvijenom širinom tj. L 60x60x4, U 60x60x60x4 i \sqsupset 25x70x38x70x25x4 (sl. I-18) uočeno je:

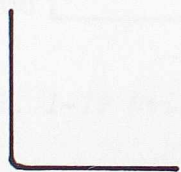
- da su vrednosti granice razvlačenja u prevojima veoma slične i da ne zavise od broja prevoja (1, 2 ili 4);
- da se srednja granica razvlačenja profila povećava sa povećanjem broja prevoja.

Tabela I-4

Osnovna traka		L 60x60x4		U 60x60x60x4		\sqsupset 25x70x38x70x25x4	
σ_v [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]	$\Delta\sigma_v$ [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]	$\Delta\sigma_v$ [N/mm ²]	σ_v [N/mm ²]	$\Delta\sigma_v$ [N/mm ²]
282	399	345	63				
263	379			366	103		
274	393					390	116

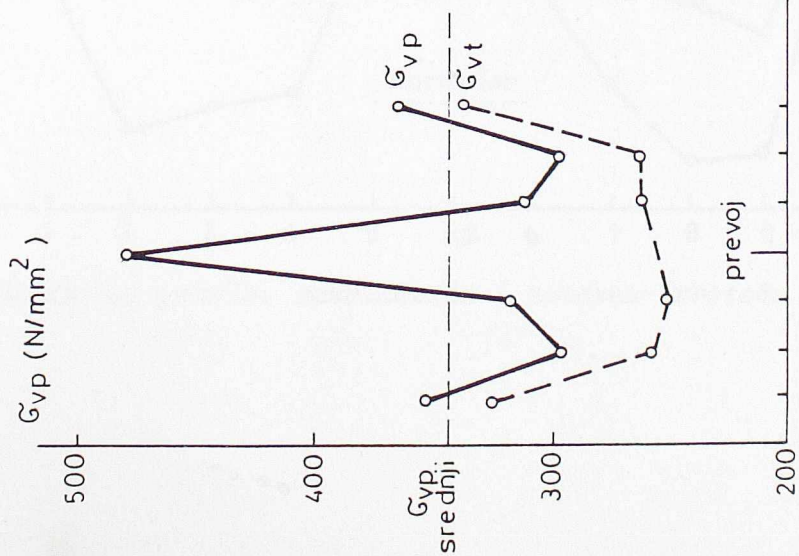
Dakle srednja granica razvlačenja u odnosu na osnovnu traku povećava se od 63 N/mm² za L do 103 N/mm² za U, odnosno 116 N/mm² za \sqsupset . Povećanje srednje zatezne čvrstoće je mnogo manje i varira od 34 N/mm² za 1 prevoj, do 74 N/mm² za 4 prevoja.

U okviru ovog programa izvršena su ispitivanja uticaja predoblikovanja na povećanje zatezne čvrstoće i granice razvlačenja na modelu ugaonika L 80x80x3 (jedan normalno profilisan, a drugi sa predeformacijom). Operacija zvana predeformacija je hladna deformacija ravnih delova profila dobijena savijanjem i ispravljanjem traka pre finalizacije profila. Rezultat ovih istraživanja prikazan je na



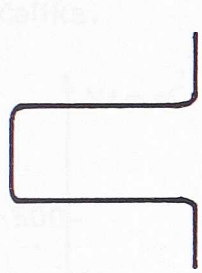
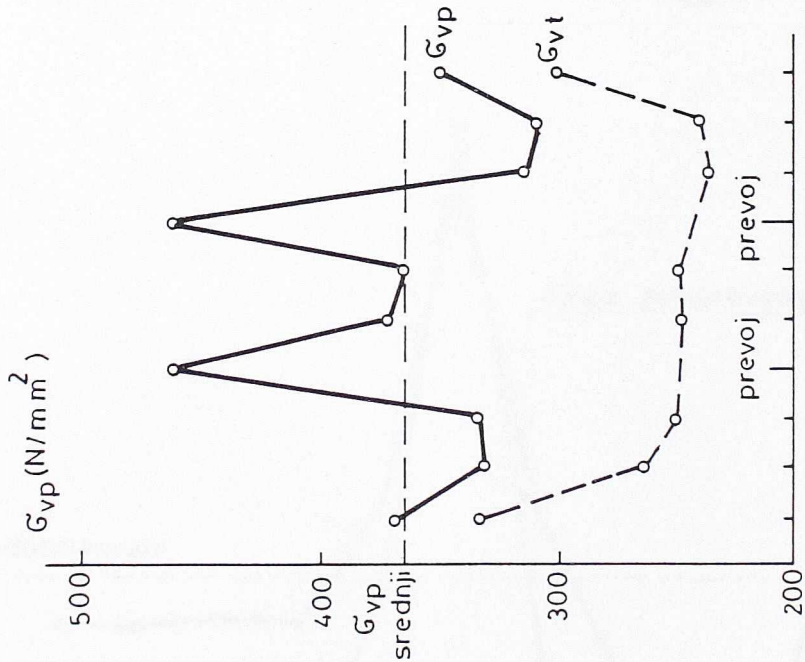
60x60x4
ugaonik

1 prevoj



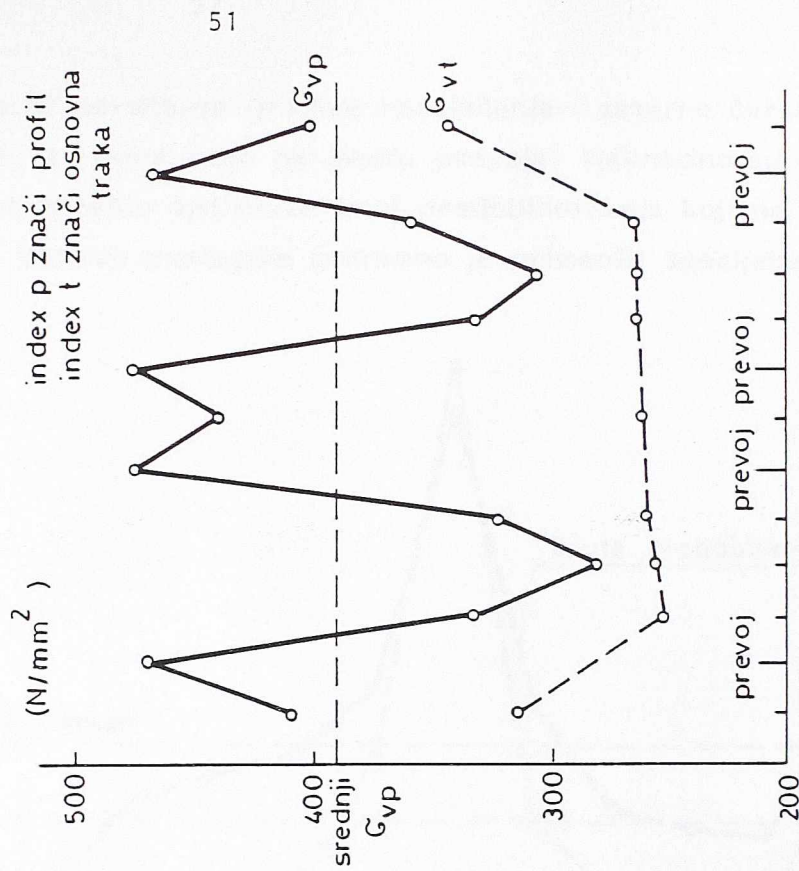
60x 60x60x4
C profil

2 prevoja



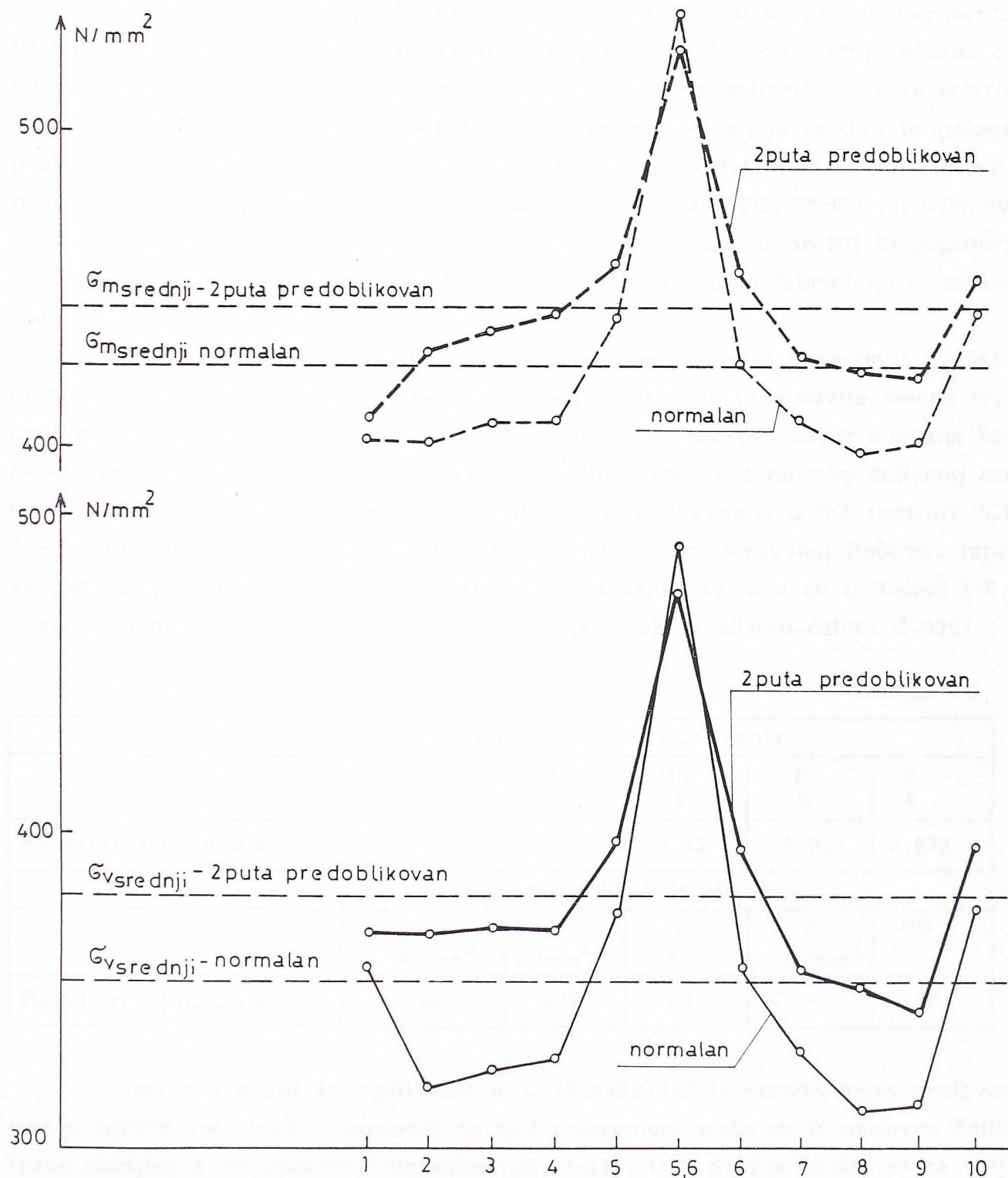
25x 70x 38 x 70 x 25 x 4
I profil

4 prevoja



Sl. I-18 Uticaj broja prevoja na intenzitet srednjeg napona razvlačenja celog profila

sl. I-19 iz koje se vodi da je povećanje granice razvlačenja i zatezne čvrstoće znatno na ravnim delovima, a veoma malo na mestu prevoja. Naknadno su sprovedena ispitivanja kako bi se odredio optimalan broj predoblikovanja koji ne ugrožava duktilnost preseka. Za ovakve postupke potrebno je primeniti specijalne vrste čelika.



Sl. I-19 Uticaj predoblikovanja na granicu razvlačenja i zateznu čvrstoću kod HOP

2. PROGRAM SOPSTVENIH ISTRAŽIVANJA EFEKATA TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE NA MEHANIČKE KARAKTERISTIKE ČELIKA

2.1. Definisane programa

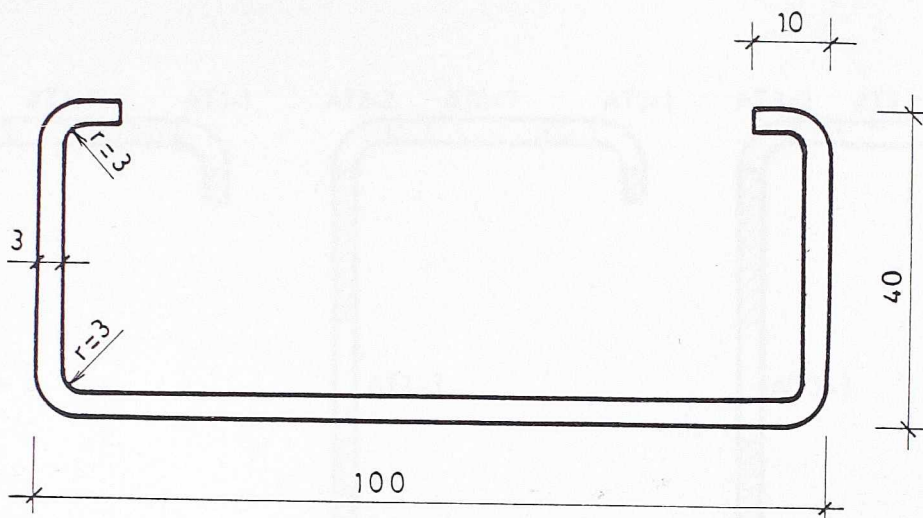
U okviru ovog poglavlja disertacije sprovedena su brojna eksperimentalna ispitivanja koja su trebala da istraže uticaj tehnologije proizvodnje hladno oblikovanih profila u našim fabrikama i od naših čelika na mehaničke karakteristike osnovnog čeličnog materijala. Kompletan program sproveden je za dve tehnologije proizvodnje (valjanje i presovanje) koje se isključivo koriste kod naših proizvođača. Valjani profili proizvedeni su u fabrici MP "Metal-SECCO"-Gornji Milanovac na mašini za valjanje prema italijanskoj tehnologiji. Presovani profili ili popularnije u inženjerskoj praksi abkantovani, proizvedeni su u istoj fabrici na presi od 1000 kN.

Sva ispitivanja sprovedena su na osnovnom čeličnom materijalu Č.0361 prema JUS C.BO.500/1988. godine. Pre uzimanja uzoraka iz osnovne limene trake debljine 3 mm, namotane u kalem, izvadjene su tri epruvete i zatim ispitane kako bi se proverile mehaničke karakteristike i hemijski sastav osnovnog čeličnog materijala navedene u atestu valjaonice. Ispitivanje je sprovedeno u RO Institut "GOŠA-Organomatik" - Zavod za ispitivanje materijala u Smederevskoj Palanci. Ispitivanjem dobijen hemijski sastav i mehaničke karakteristike date su u Tabeli I-5. Rezultati ispitivanja su pokazali da uzorci odgovaraju kvalitetu čelika Č.0361.

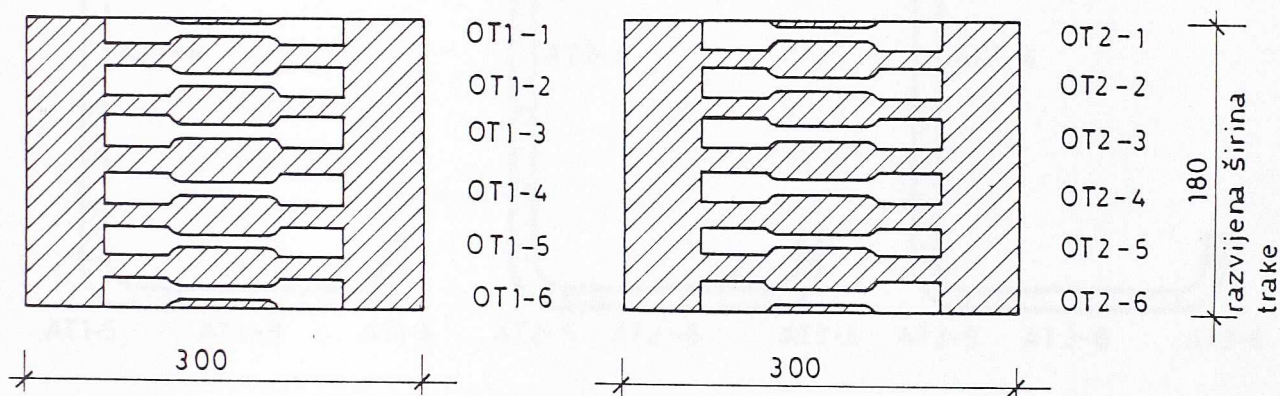
Tabela I-5

	Rezultati hemijskih ispitivanja				
	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Rezultati ispitivanja	0,10	0,12	0,43	0,011	0,039
	Rezultat mehaničkih ispitivanja				
	σ_v N/mm ²	σ_m N/mm ²	δ_5 %	E N/mm ²	HB
Rezultati ispitivanja	300	431	29	-	137

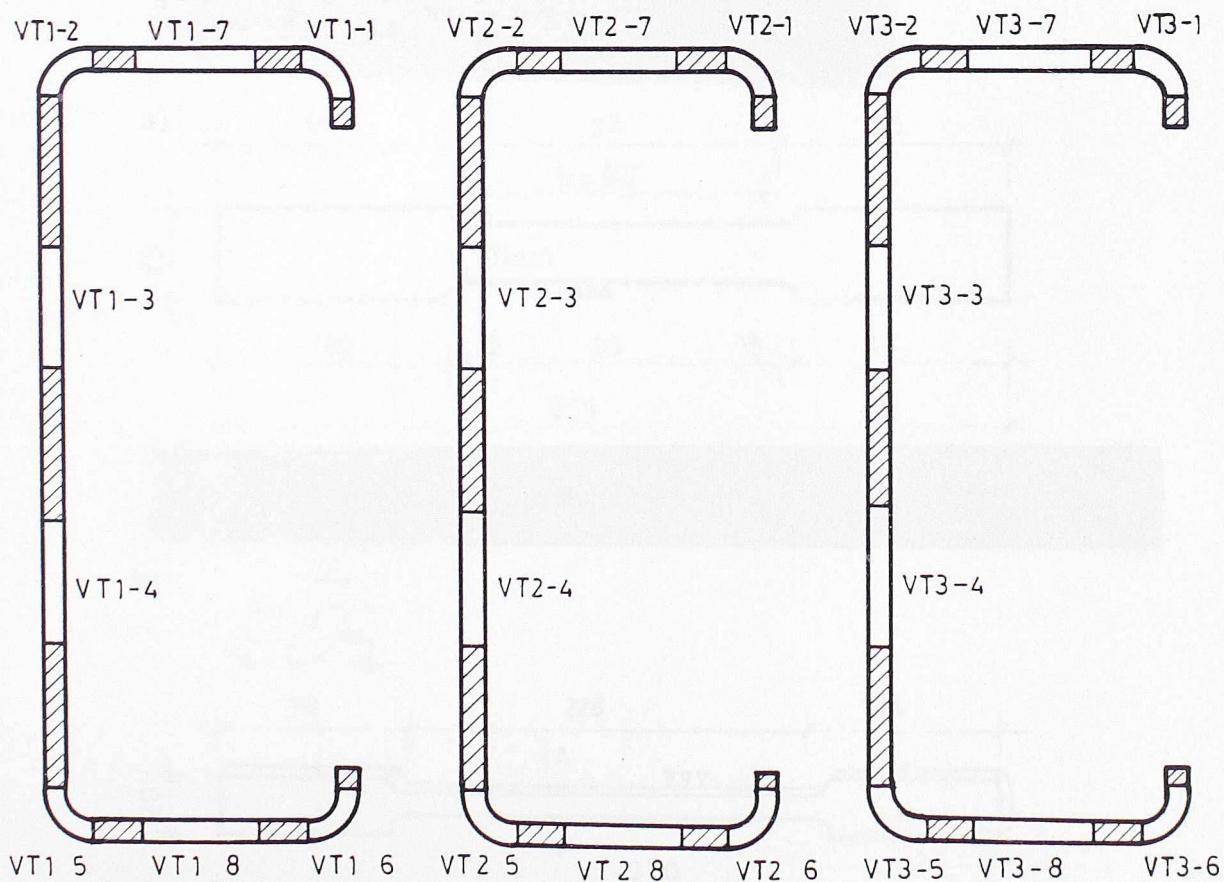
Izabrani profil za ispitivanje je C 100x40x10x3 iz standardnog proizvodnog programa (sl. I-20). Epruvete za opit zatezanjem uzete su iz osnovne čelične trake debljine 3 mm namotane na kalem (sl. I-21), iz 3 profila proizvedena valjanjem (sl. I-22) i iz 3 profila proizvedena presovanjem-abkantovanjem (sl. I-23). Na navedenim slikama date su i oznake svih izvadjenih epruveta.



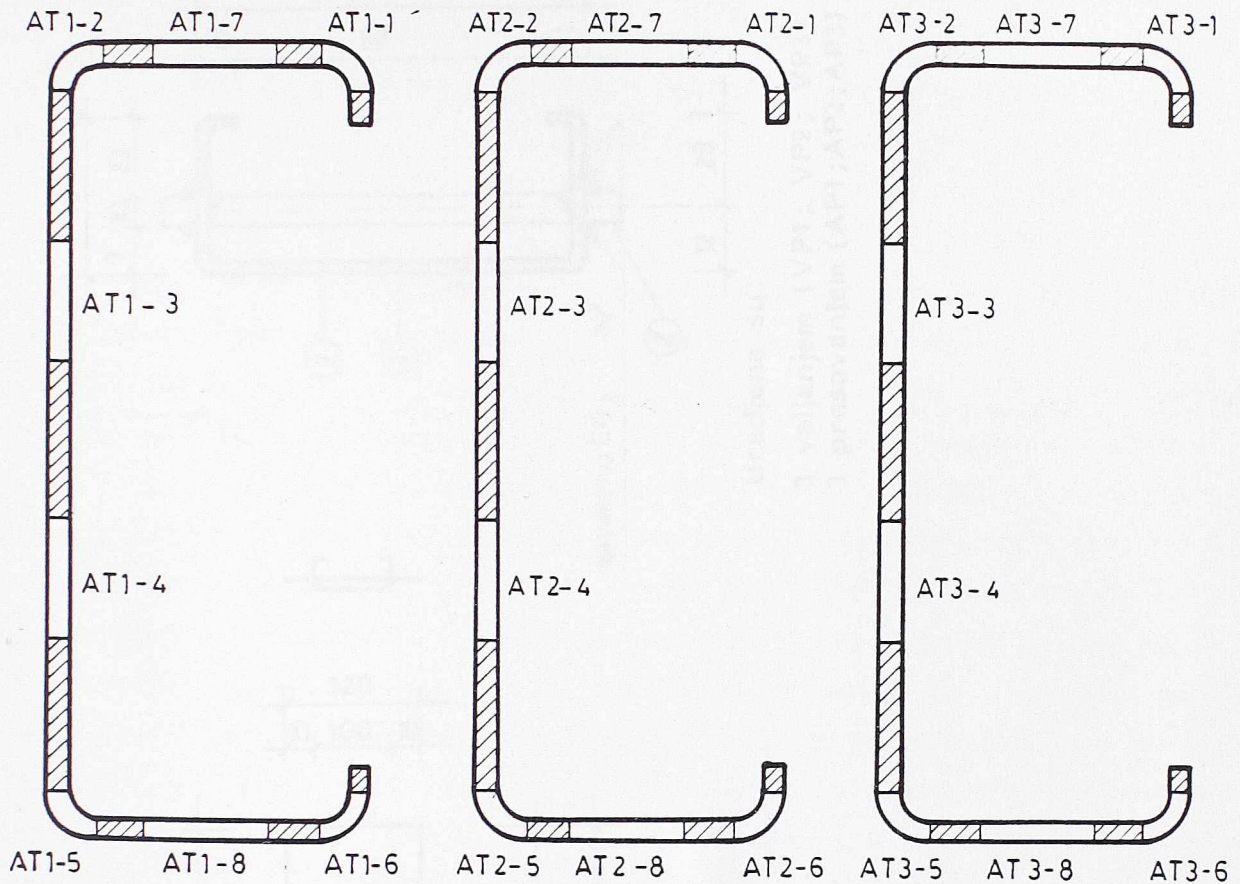
Sl. I-20 Hladno oblikovani profil C-100x40x10x3 korišćen u ispitivanju



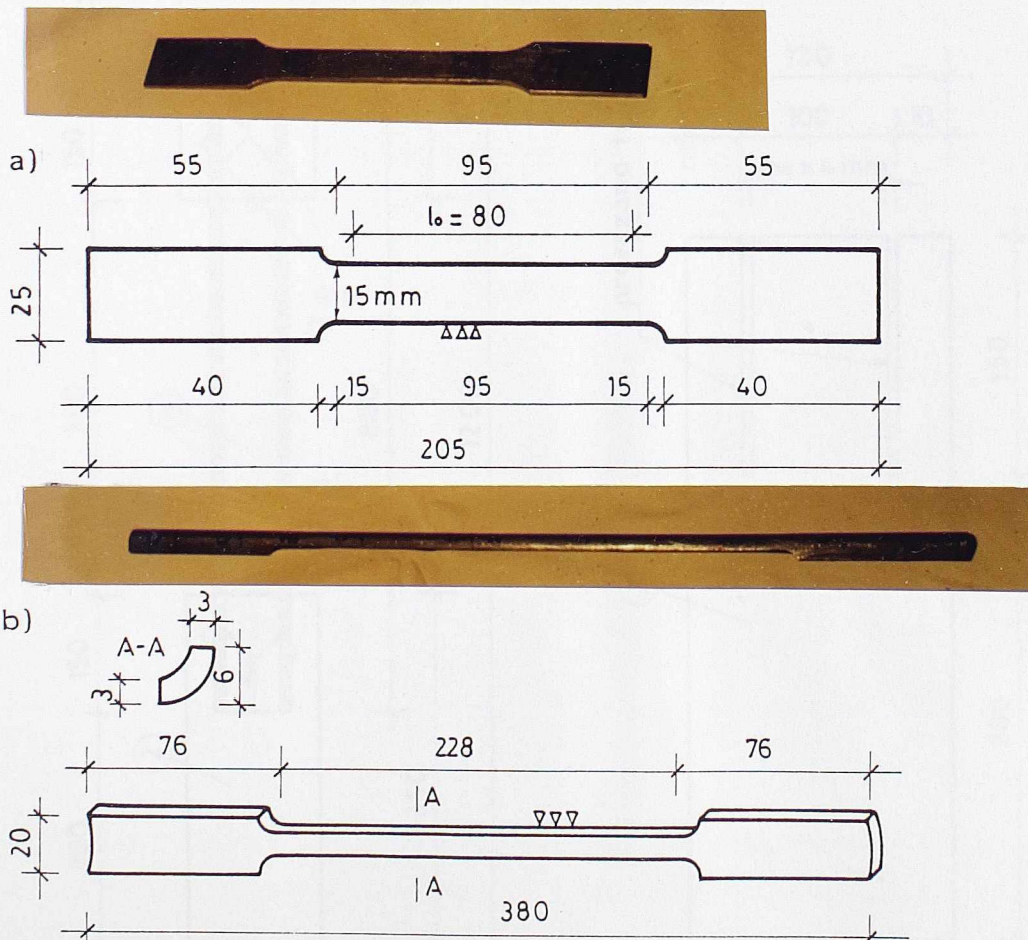
Sl. I-21 Epruvete isečene iz ravne trake pre hladnog oblikovanja



Sl. I-22 Epruvete isečene iz profila proizvedenog valjanjem



Sl. I-23 Epruvete isečene iz profila proizvedenog presovanjem-abkantovanjem



Sl. I-24 Oblik i dimenzije epruveta isečenih iz ravne trake pre hladnog oblikovanja iz valjanih i presovanih C profila
 a) Ravna epruveta b) Ugaona epruveta

Iz ravne trake pre hladnog oblikovanja i iz C profila proizvedenih valjanjem i presovanjem izvadjene su dve vrste epruveta: ravne epruvete iz osnovne trake i iz ravnih delova profila (nožice i rebro) i ugaone epruvete iz uglova profila. Ravne epruvete (sl. I-24a) imaju oblik i dimenzije saglasno JUS-u C.A4.001/1986. i JUS-u C.A4.002/1985. Kako ugaone epruvete nisu određene našim standardom, to su one izradjene saglasno sa američkim AISI (sl. I-24b).

Pošto se bilo kakvim unošenjem veće količine toplote u hladno oblikovane profile poništavaju pozitivni efekti povećanja granice razvlačenja i zatezne čvrstoće, to su sve epruvete sa velikom pažnjom isecane iz trake i iz profila. Rezanje je vršeno glodalicom pri maloj brzini obrtaja sistematskim hladjenjem uljem.

Osim ispitivanja epruveta izvadjenih iz osnovne trake i profila, u cilju dobijanja promene mehaničkih osobina po razvijenoj širini osnovne trake, odnosno po profilu, predviđeno je i ispitivanje kompletnih C profila na zatezanje čime je moguće ustanoviti osrednjene vrednosti mehaničkih karakteristika za ceo profil. Ovaj deo je uradjen na po tri valjana i tri presovana-abkantovana C-profila. Da bi se krajevi profila mogli prihvatiti čeljuštima kidalice, to su na krajevima zavareni prihvatni limovi (sl. I-25). Veza prihvatnih limova za C-profil izvedena je sa izuzetnom pažnjom, tako da su prihvatni limovi prorezivani, navučeni na profil i zavarivani, spolja sa ugaonim šavovima, a iznutra sa 1/2 V šava.

Ispitivanja su sprovedena i na drugoj vrsti osnovnog čeličnog materijala koji je kasnije upotrebljavan za izradu uzoraka rožnjača, Č.0148 prema JUS - u C.B4.016/1978. godine. Ispitivanje hemijskih i mehaničkih karakteristika materijala sprovedeno je u RO Institut "GOŠA-Organomatik" - Zavod za ispitivanje materijala u Smederevskoj Palanci. Ispitivanjem dobijen hemijski sastav i mehaničke karakteristike date su u Tabeli I-6. Rezultati ispitivanja su pokazali da uzorci odgovaraju kvalitetu čelika Č.0148.

Tabela I-6

Rezultati hemijskih ispitivanja					
	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Rezultati ispitivanja	0,07	0,08	0,32	0,015	0,013
Rezultat mehaničkih ispitivanja					
	σ_v N/mm ²	σ_m N/mm ²	δ_5 %	E N/mm ²	HB
Rezultati ispitivanja	209	331	42	-	-

Iz osnovne trake ovog čelika, debljine 2,0 mm, izvadjene su u podužnom pravcu devet ravnih epruveta (oznake R) i devet epruveta kasnije previjenih(abkantovanih) pod 90° (oznaka U). Na ovaj način omogućeno je dobijanje mehanič-

kih karakteristika ravnih delova i uglova profila upotrebljenog za rožnjače.

2.2. Primenjena merna tehnika i postupak ispitivanja

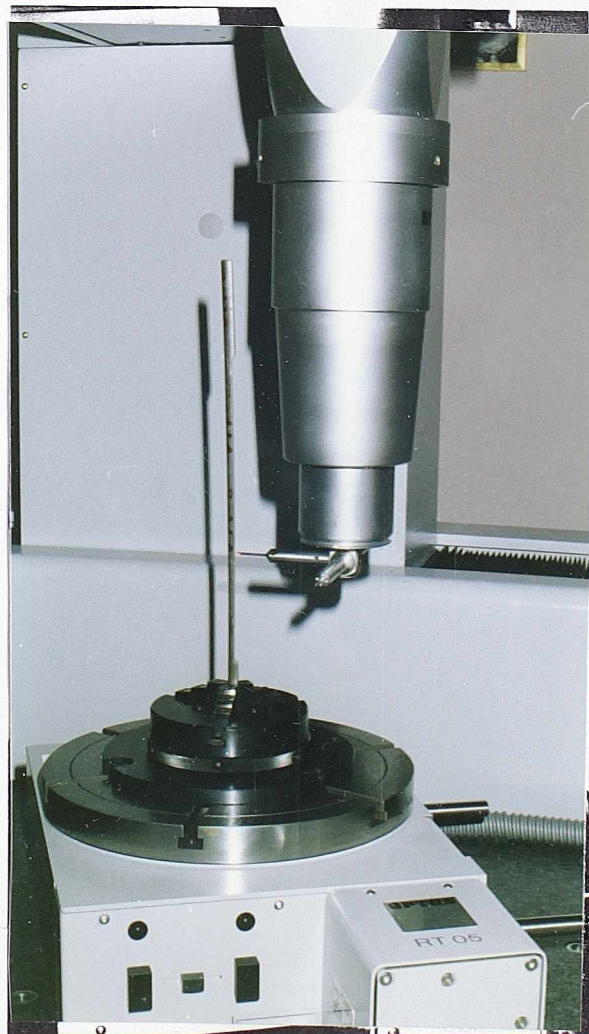
2.2.1. Merenje površine poprečnih preseka ugaonih epruveta

Zbog nepravilnog oblika ugaonih epruveta bilo je nemoguće uobičajenim metodama merenja odrediti, sa zadovoljavajućom tačnošću, površinu poprečnog preseka vrata epruvete, čija precizno određena vrednost bitno utiče na vrednosti granice razvlačenja i zatezne čvrstoće. Ova merenja površina poprečnih preseka ugaonih epruveta izvršena su u metrološkoj laboratoriji Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Merni uređaj je univerzalni multi-koordinatni merni sistem UMS 850 (sl. I-26), sa izuzetnim mogućnostima za precizno određivanje oblika poprečnih preseka. Sam merni instrument je sa foto-električnim sistemom (sl. I-27), koji registruje promenu rastojanja mernih tačaka u odnosu na globalni koordinatni sistem. Greška pri merenju rastojanja između dve tačke je $(1,9 + \frac{L}{300}) \mu\text{m}$ (L je u mm), pri čemu



Sl. I-26 Izgled mernog uređaja UMS 850



Sl. I-27 Glava uređaja sa foto-električnim sistemom pri postupku skeniranja

su maksimalne dimenzije uzoraka $X = 850$, $Y = 1200$ i $Z = 600$ mm. Merni sistem je potpuno automatizovan upotrebom programskog paketa UMESS, koji predstavlja standardni program za automatska merenja elemenata sa ravnim, cilindričnim sfernim ili koničnim površinama. Korišćenjem ove softverske biblioteke moguće je dobijanje grafičkog prikaza površine, sa maksimalno 1000 tačaka, i njeno aproksimiranje odgovarajućom geometrijskom površi.

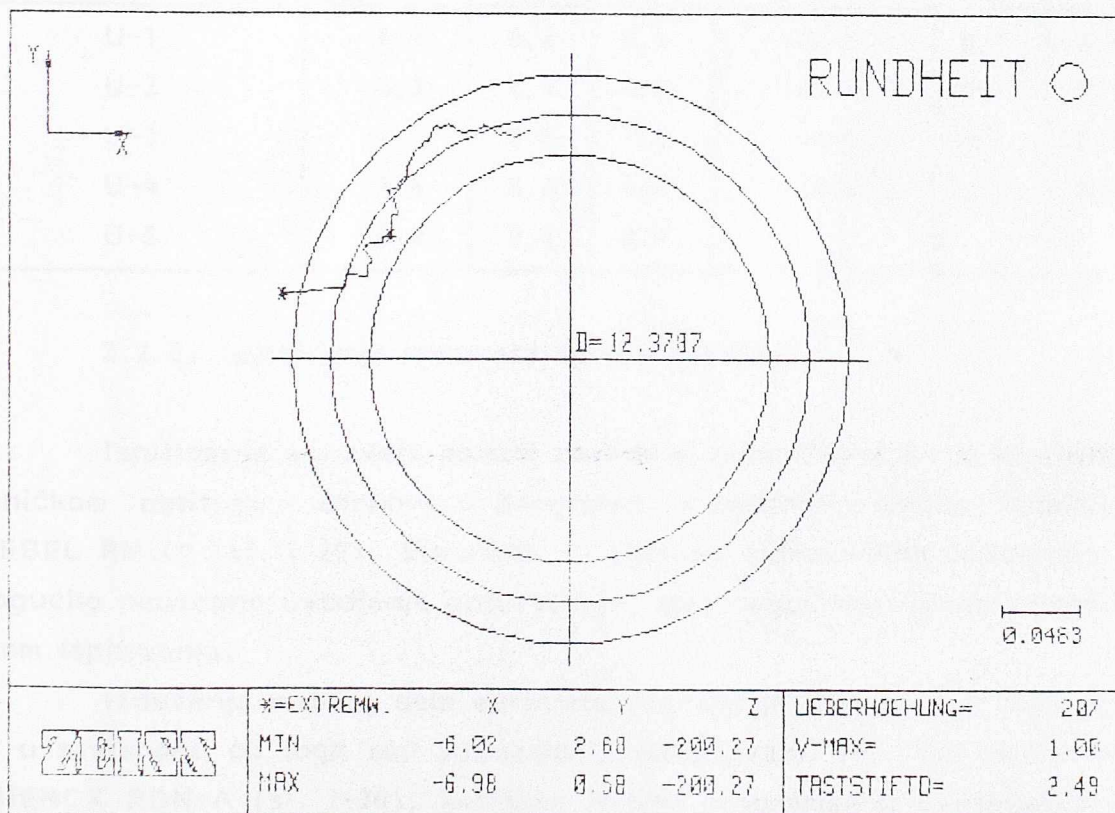
Merenje površine poprečnog preseka vrata ugaonih epruveta izvršeno je postupkom skeniranja (sl. I.27), a unutrašnja i spoljna površina epruvete aproksimirane su krugom. Merenja su izvršena u tri poprečna peseka na svakoj epruveti (na krajevima i u sredini) uz obeležavanje svakog mernog mesta, da bi se kasnije pri proračunu granice razvlačenja i zatezne čvrstoće uzela površina poprečnog preseka bliska mestu prekida. Primer izlaznog rezultata na računaru jednog spoljašnjeg prečnika epruvete, na kome se vidi izuzetna preciznost ove merne tehnike, ilustrovan je na sl. I-28, a svi izmereni rezultati sredjeni su u Tabeli I-7 (za čelik Č.0361) i Tabeli I-8 (za čelik Č.0148).

```

=====
DATUM:                W-NAME:                TEIL-NR:
ADRIRKF 1AUFGABE1 BEZ 1SY1  ISTMASSI  NENNMASSI  O.TOL  I  U.TOL
=====

```

FORM- UND LAGEPRUEFUNG ISO 1101



Sl. I-28 Izlazni rezultat sa računara merenja spoljašnjeg prečnika vrata ugaone epruvete

Tabela I-7

OZNAKA EPRUVETE	A^I mm ²	A^{II} mm ²	A^{III} mm ²	OZNAKA EPRUVETE	A^I mm ²	A^{II} mm ²	A^{III} mm ²
VT1-1	25,8	25,9	26,2	AT1-1	26,2	26,4	26,1
VT1-2	26,2	27,1	25,5	AT1-2	26,1	27,1	26,1
VT1-5	22,0	21,9	21,9	AT1-5	22,0	23,8	23,2
VT1-6	22,9	23,2	23,1	AT1-6	24,6	25,2	24,9
VT2-1	22,5	22,3	22,9	AT2-1	25,5	25,6	25,5
VT2-2	22,6	23,7	22,6	AT2-2	22,3	22,8	21,9
VT2-5	23,8	24,9	23,4	AT2-5	23,8	24,6	23,7
VT2-6	23,7	23,3	23,4	AT2-6	25,8	27,0	27,1
VT3-1	24,4	25,0	24,9	AT3-1	25,8	26,4	25,8
VT3-2	18,3	18,3	21,7	AT3-2	19,0	20,2	20,2
VT3-5	21,9	21,6	21,7	AT3-5	20,7	20,7	20,8
VT3-6	23,1	23,2	23,7	AT3-6	21,4	24,4	22,3

Tabela I-8

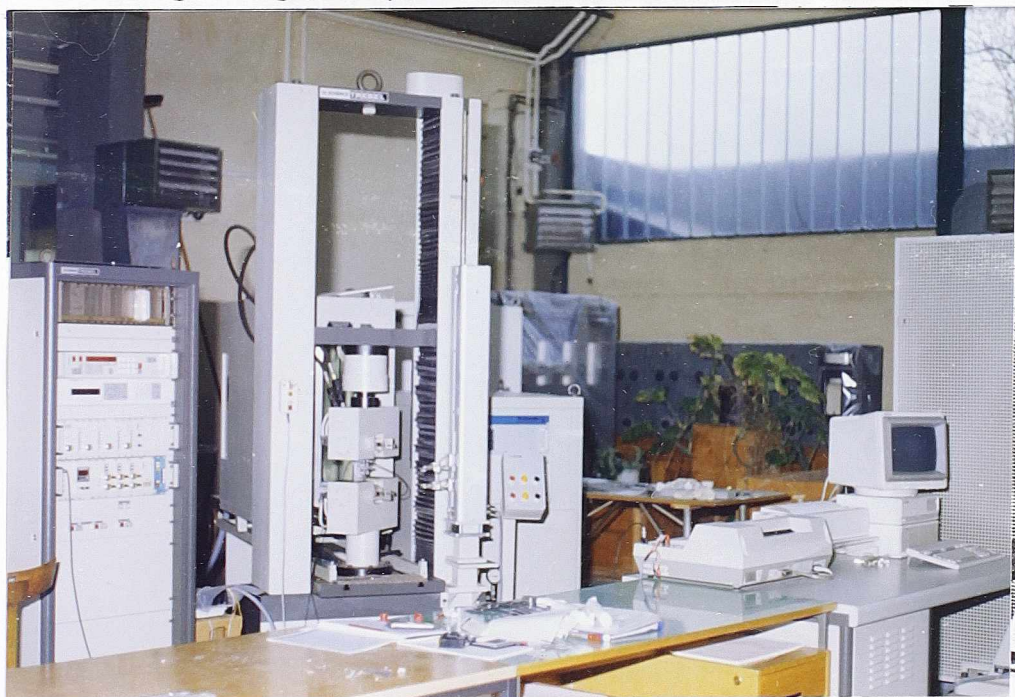
OZNAKA EPRUVETE	A^I mm ²	A^{II} mm ²	A^{III} mm ²	OZNAKA EPRUVETE	A^I mm ²	A^{II} mm ²	A^{III} mm ²
U-1	8,4	8,8	8,4	U-6	8,4	8,8	8,4
U-2	8,3	8,4	8,3	U-7	8,1	8,6	8,0
U-3	7,9	8,8	7,8	U-8	8,1	8,4	8,0
U-4	7,8	8,3	7,7	U-9	8,1	8,5	8,1
U-5	8,4	9,0	8,4				

2.2.2. Ispitivanje epruveta opitom zatezanja

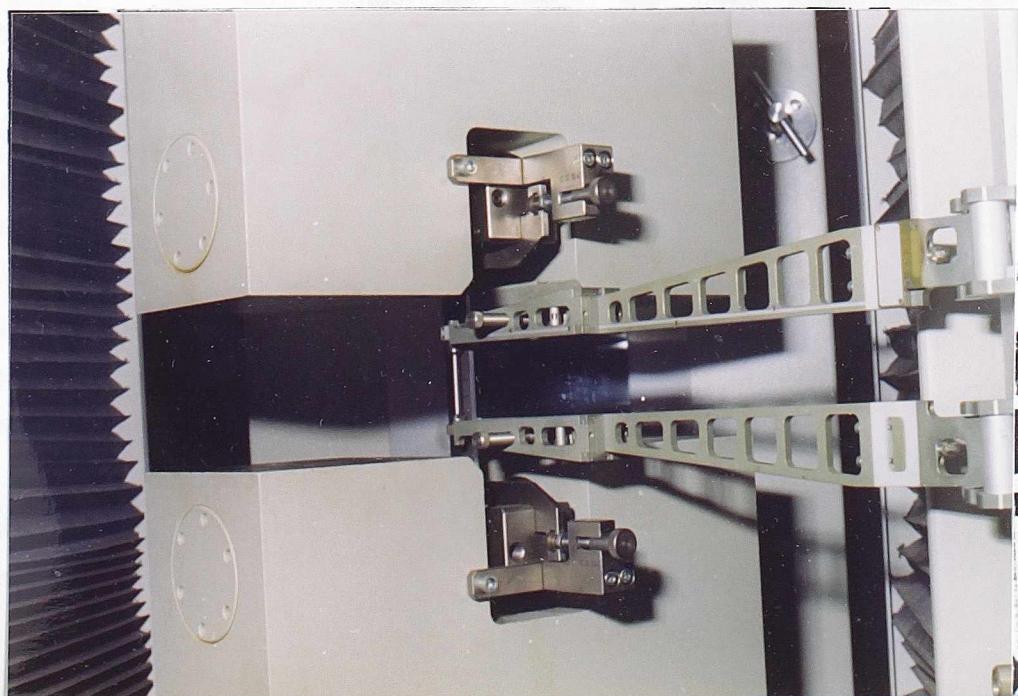
Ispitivanja epruveta opitom zatezanja sprovedena su u Vazduhoplovno tehničkom Institutu - Žarkovo u Beogradu na elektromehaničkoj kidalici SCHENCK-TREBEL RM100 (sl. I-29). Epruvete su stezane hidrauličkim čeljustima, što je omogućilo pouzdano uvođenje opterećenja, bez mogućnosti proklizavanja epruveta tokom ispitivanja.

Izduženje radnog dela epruvete praćeno je pomoću dva tipa ekstenzometara, u zavisnosti od toga koji su parametri određivani. Prvi tip ekstenzometra, SCHENCK RDN-A (sl. I-30), korišćen je kod programskog upravljanja ispitivanjem. Ovaj ekstenzometar radi na principu mernih traka do izduženja od 2 mm, a za izduženja do 50 mm radi na ultrazvučnom principu. Drugi tip ekstenzometra HOTTINGER DD1 (sl. I-31), sastoji se iz dva ekstenzometra, paralelno vezana, gde

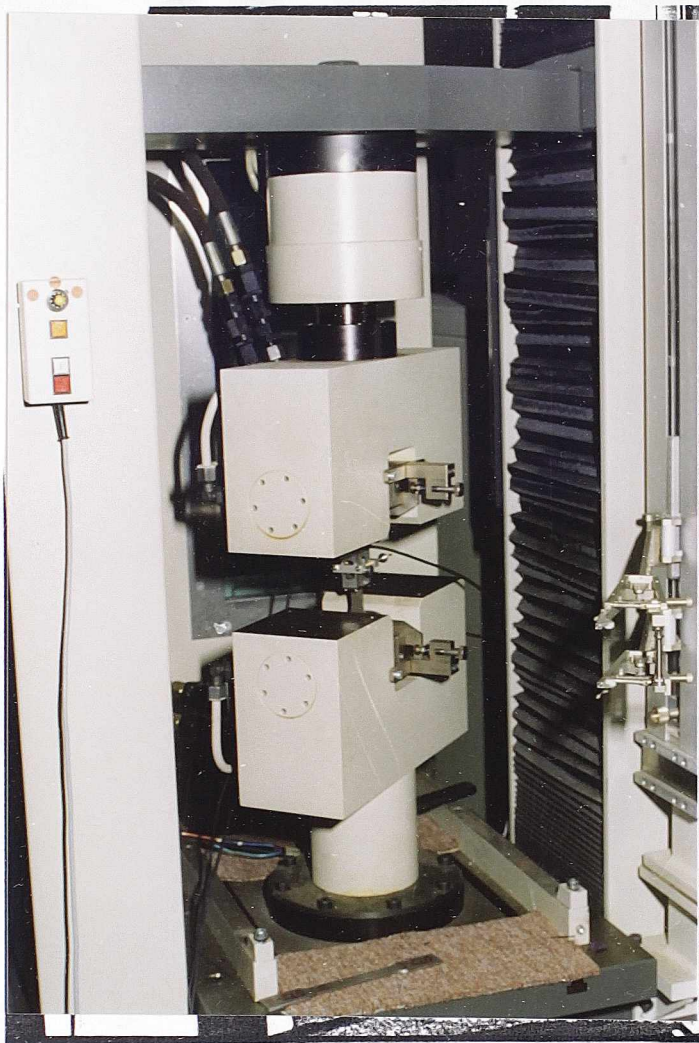
jedan meri izduženje radnog dela epruvete u zoni ledja epruvete, a drugi u zoni lica epruvete. Opseg merenja ovih ekstenzometara je $\pm 2,5$ mm i rade na principu merenja mernim trakama vezanim u Vitstonov most. Ovaj način merenja je od izuzetne važnosti za određivanje modula elastičnosti, jer često izduženja lica i ledja epruvete nisu ista, što kod primene jednostranog ekstenzometra dovodi do povijanja proporcionalnog dela krive napon-dilatacija. Ova nepravilnost se izbegava na taj način što se paralelnim vezivanjem ekstenzometara vrednosti proporcionalnih izduženja sabiraju i kao srednja vrednost unose na apscisu dijagrama sila - proporcionalno izduženje. Dijagrami se dobijaju uvodjenjem analognih signala opterećenja i izduženja na analogno digitalni писаč HAWLETT PACKARD HP 7090A.



Sl. I-29 Elektromehanička kidalica SCHENCK TREBEL RM100 sa pratećom računarskom opremom



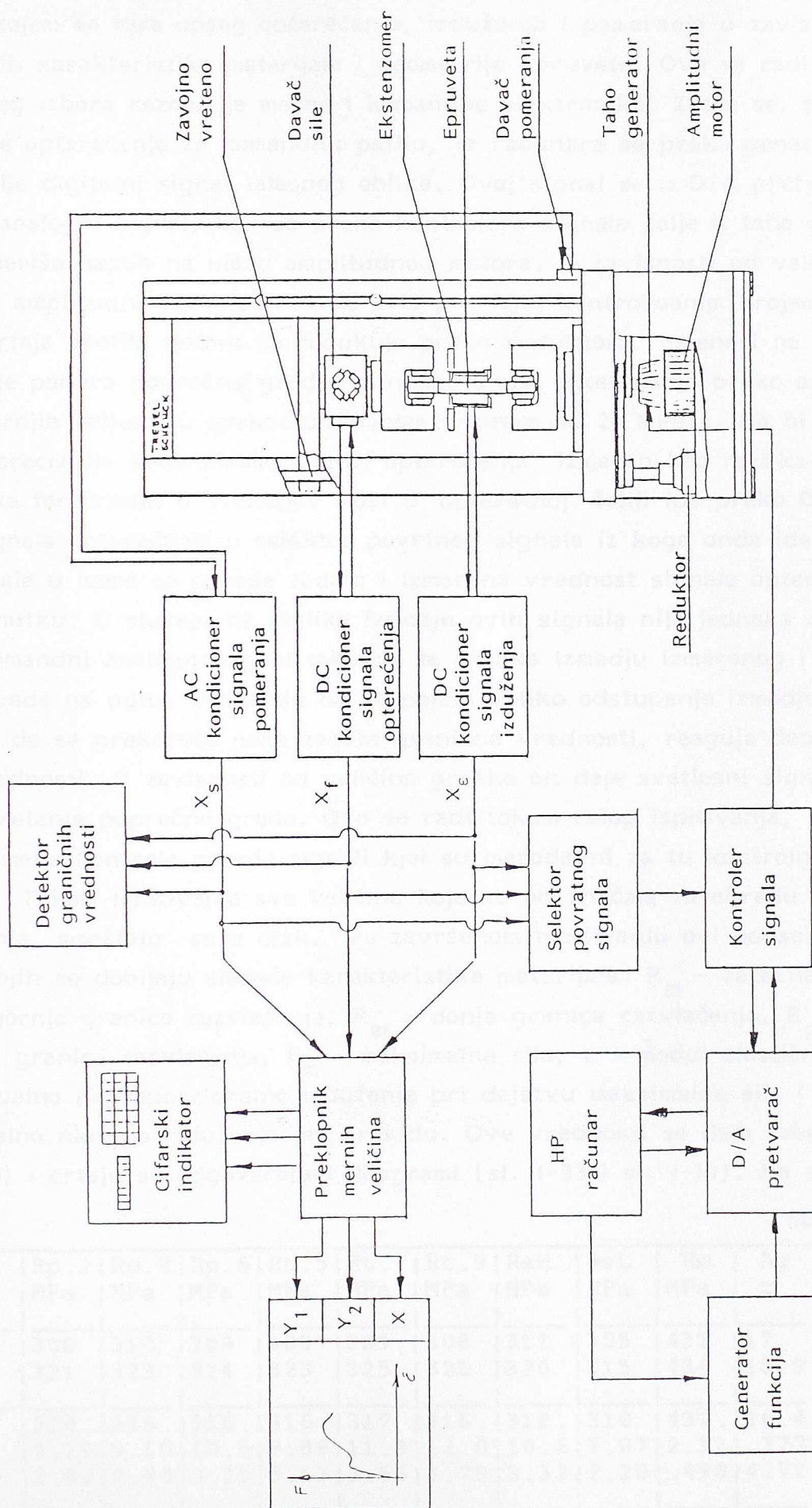
Sl. I-30 Ekstenzometar SCHENCK RDN-A



Sl. I-31 Ekstenzometar HOTTINGER DD1

Kod programirano vodjenog ispitivanja korišćen je program radjen prema standardu DIN 50145, koji odgovara našem standardu JUS C.A4.002/1985. (Mehanička ispitivanja metala - Statička ispitivanja - Ispitivanje zatezanjem). Ovaj program predvidja rad uređaja u kontroli opterećenja, izduženja i pomeranja. Opis principa rada prikazan je na blok šemi uređaja (sl. I-32). Za upravljanje uređajem korišćen je računar HAWLETT PACKARD HP 310.

Postupak je takav da se na početku ispitivanja unesu pretpostavljene karakteristike materijala, geometrijske mere epruvete i željena brzina ispitivanja. U ovom slučaju za proporcionalni deo krive, izabrana je brzina $V1 = 20 \text{ MPa/sec}$ (u kontroli je opterećenje). Za izduženje do 2 mm, što odgovara 2% za $l = 100 \text{ mm}$, odnosno 4% za $l = 50 \text{ mm}$, izabrana je brzina $V2 = 10\%$ u minuti (u kontroli je izduženje). Za veća izduženja od 2 mm pa do loma izabrana je brzina $V3 = 40\%$ u minuti, gde je za radnu dužinu uzet razmak izmedju čeljusti na početku ispitivanja (u kontroli je brzina pomeranja poprečne grede uređaja).



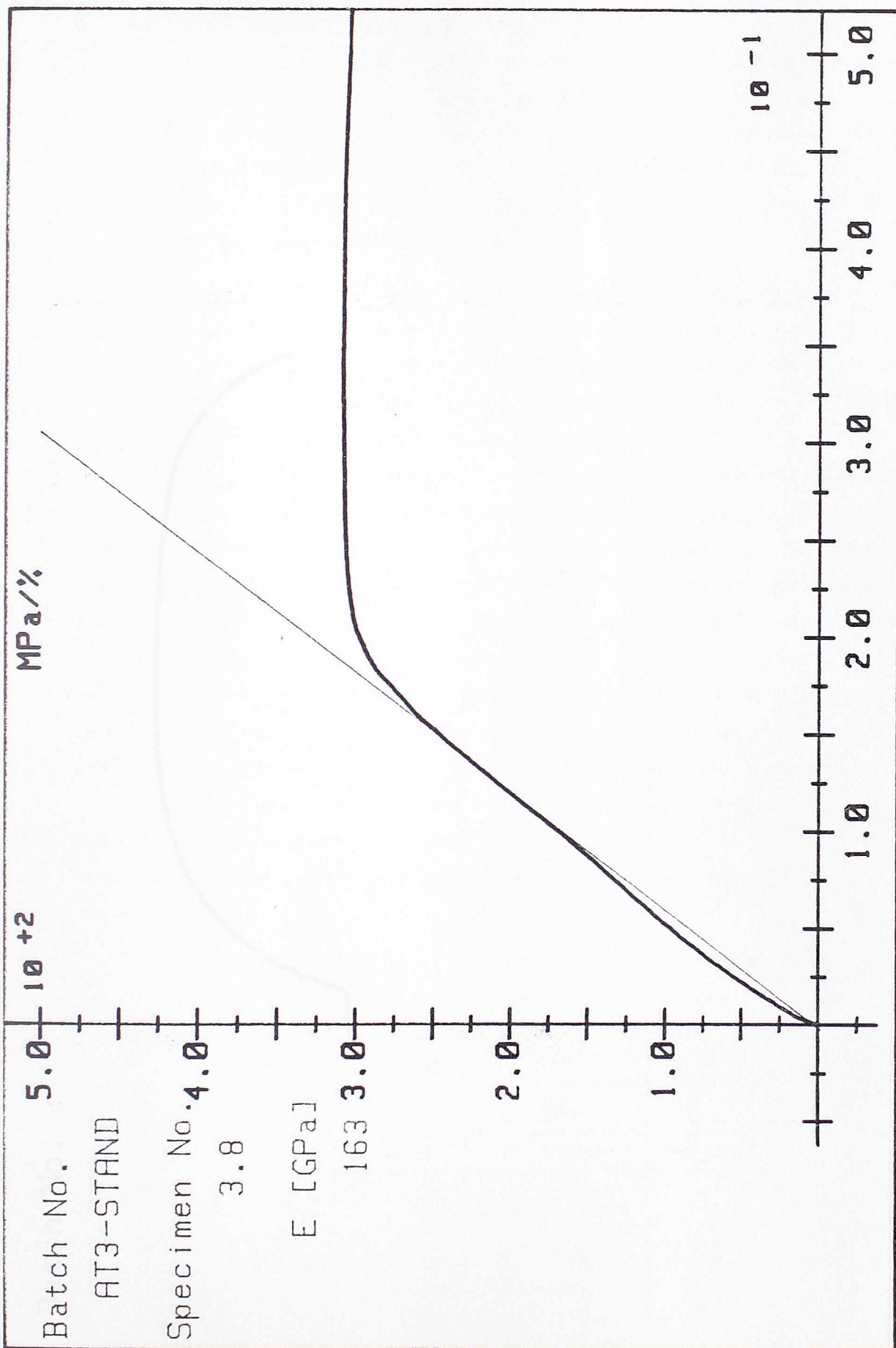
Sl. I-32 Blok šema rada uredjaja

Princip rada uređaja je takav da se na početku programski izdaje komanda kojom se bira opseg opterećenja, izduženja i pomeranja u zavisnosti od ranije datih karakteristika materijala i geometrije epruvete. Ovo se radi iz razloga što boljeg izbora rezolucije merne i komandne elektronike. Zatim se, programski, selektuje opterećenje za komandnu petlju, Iz računara se preko generatora funkcije šalje digitalni signal talasnog oblika. Ovaj signal se u D/A pretvaraču pretvara u analogni signal, koji se preko kontrolera signala šalje u taho generator koji generiše napon na ulazu amplitudnog motora. U zavisnosti od veličine ovog napona, amplitudni motor se okreće vrlo precizno kontrolisanim brojem obrtaja. Broj obrtaja profila motora se redukuje preko reduktora i prenosi na zavojno vreteno koje pomera poprečnu gredu, odnosno unosi opterećenje preko opteretne ćelije i gornjih čeljusti u epruvetu zadanom brzinom od 20 MPa/s. Da bi se ova brzina što preciznije kontrolisala, signal opterećenja, izmeren kao razlika napona mer-nih traka formiranih u Vitstonov most u opteretnoj ćeliji ide preko DC kondicionera signala opterećenja u selektor povrtnog signala iz koga onda ide u kontroler signala u kome se porede zadata i izmerena vrednost signala opterećenja u tom trenutku. U slučaju da razlika između ovih signala nije jednaka nuli, koriguje se komandni analogni signal tako da se razlika između izmerenog i zadanog signala svede na nulu. U slučaju da se pojavi veliko odstupanje između ovih vrednosti ili da se prekorače neke zadate granične vrednosti, reaguje detektor graničnih vrednosti. U zavisnosti od veličine greške on daje svetlosni signal ili zaustavlja kretanje poprečne grede. Ovo se radi tokom celog ispitivanja, s tim što se kod promene kontrole porede signali koji su merodavni za tu kontrolnu petlju.

Tokom ispitivanja sve veličine koje su od značaja za obradu rezultata ispitivanja, smeštaju se u disk. Po završenom ispitivanju ovi podaci se obraduju i iz njih se dobijaju sledeće karakteristike materijala: R_m - zatezna čvrstoća, R_{eH} - gornja granica razvlačenja, R_{eL} - donja granica razvlačenja, R_p - konvencionalna granica razvlačenja, F_m - maksimalna sila, E - modul elastičnosti, A_g - procentualno neproporcionalno izduženje pri dejstvu maksimalne sile i A - procentualno ukupno izduženje pri prekidu. Ove vrednosti se daju tabelarno (Tabela I-9) i crtaju se odgovarajući dijagrami (sl. I-33 i sl. I-34). Na sl. I-33 pri-

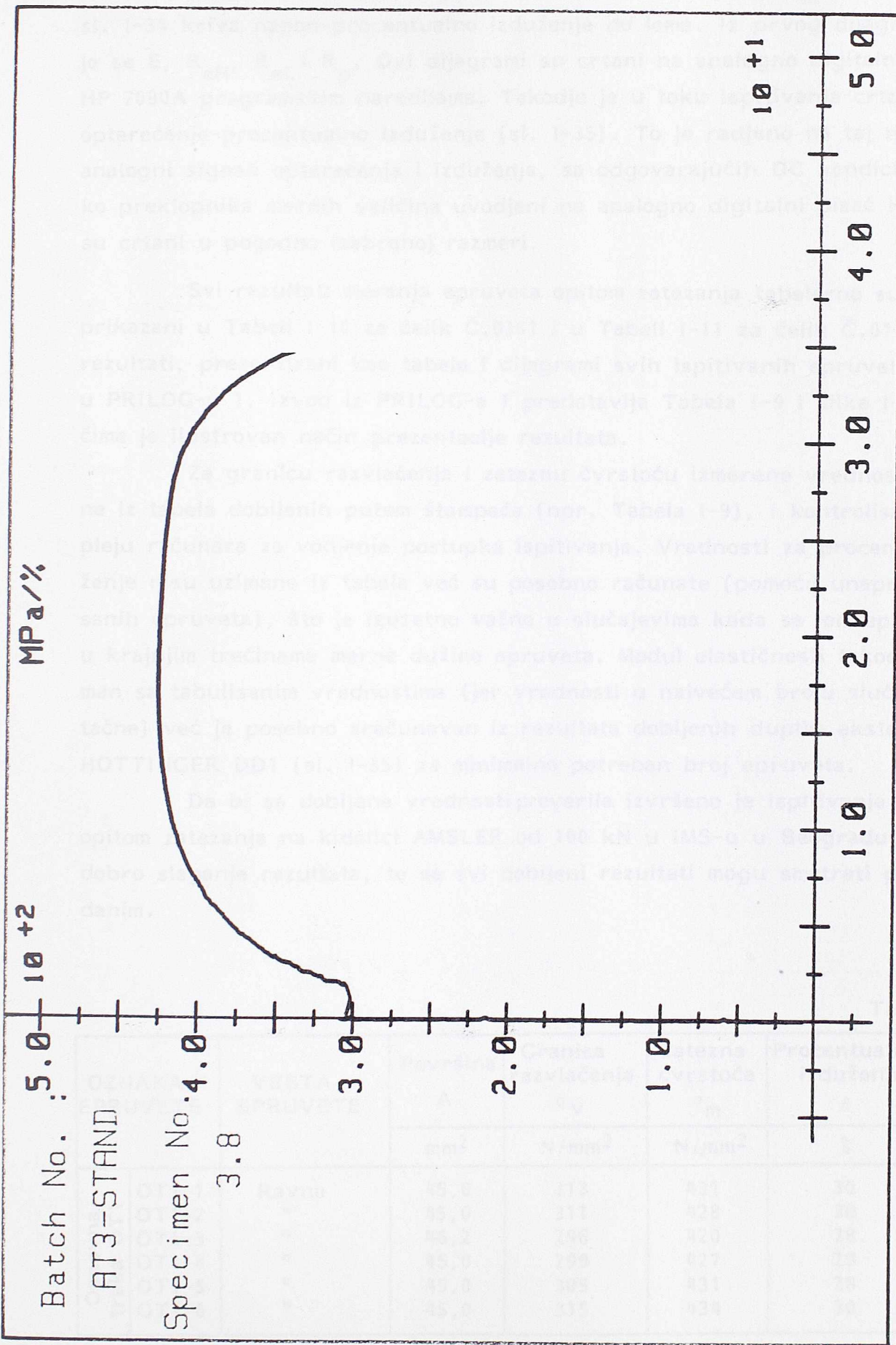
Tabela I-9

No.	Q mm ²	R _{p.2} MPa	R _{p.4} MPa	R _{p.6} MPa	R _{t.5} MPa	R _{t.7} MPa	R _{t.9} MPa	ReH MPa	ReL MPa	R _m MPa	A _g %	A %	E GPa
1.5	45	308	310	309	309	309	308	311	305	431	17	21.9	164
1.6	45	321	323	324	323	325	325	326	315	434	15.9	35.8	196
X	45	314	316	316	316	317	316	318	310	432	16.4	28.8	180
s	0	9.19	9.19	10.6	9.89	11.3	12.0	10.6	7.07	2.12	0.777	9.82	22.62
v	0	2.92	2.90	3.35	3.13	3.56	3.79	3.33	2.28	0.490	4.72	34.0	12.57



10:59:51 22 NOV 89

Sl. 1-33 Kriva napon-dilatacija u zoni granice razvlačenja



11:02:58 22 NOV 89

Sl. I-34 Kriva napon-dilatacija u zoni do loma

kazana je kriva napon-procentualno izduženje u zoni granice razvlačenja, a na sl. I-34 kriva napon-procentualno izduženje do loma. Iz prvog dijagrama određuje se E , R_{eH} , R_{eL} i R_p . Ovi dijagrami su crtani na analogno digitalnom pisaču HP 7090A programskim naredbama. Takodje je u toku ispitivanja crtan dijagram opterećenje-procentualno izduženje (sl. I-35). To je radjeno na taj način što su analogni signali opterećenja i izduženja, sa odgovarajućih DC kondicionera, preko preklopnika mernih veličina uvedeni na analogno digitalni pisač HP 7090A gde su crtani u pogodno izabranoj razmeri.

Svi rezultati merenja epruveta opitom zatezanja tabelarno su sredjeni i prikazani u Tabeli I-10 za čelik Č.0361 i u Tabeli I-11 za čelik Č.0148. Izlazni rezultati, prezentirani kao tabele i dijagrami svih ispitivanih epruveta dati su u PRILOG-u 1. Izvod iz PRILOG-a 1 predstavlja Tabela I-9 i slike I-33 do I-35, čime je ilustrovan način prezentacije rezultata.

Za granicu razvlačenja i zateznu čvrstoću izmerene vrednosti su uzimane iz tabela dobijenih putem štampača (npr. Tabela I-9), i kontrolisane na displeju računara za vodjenje postupka ispitivanja. Vrednosti za procentualno izduženje nisu uzimane iz tabela već su posebno računane (pomoću unapred izreperisanih epruveta), što je izuzetno važno u slučajevima kada se lom epruvete javlja u krajnjim trećinama merne dužine epruveta. Modul elastičnosti takodje nije uziman sa tabulisanim vrednostima (jer vrednosti u najvećem broju slučajeva nisu tačne) već je posebno sračunavan iz rezultata dobijenih duplim ekstenzometrom HOTTINGER DD1 (sl. I-35) za minimalno potreban broj epruveta.

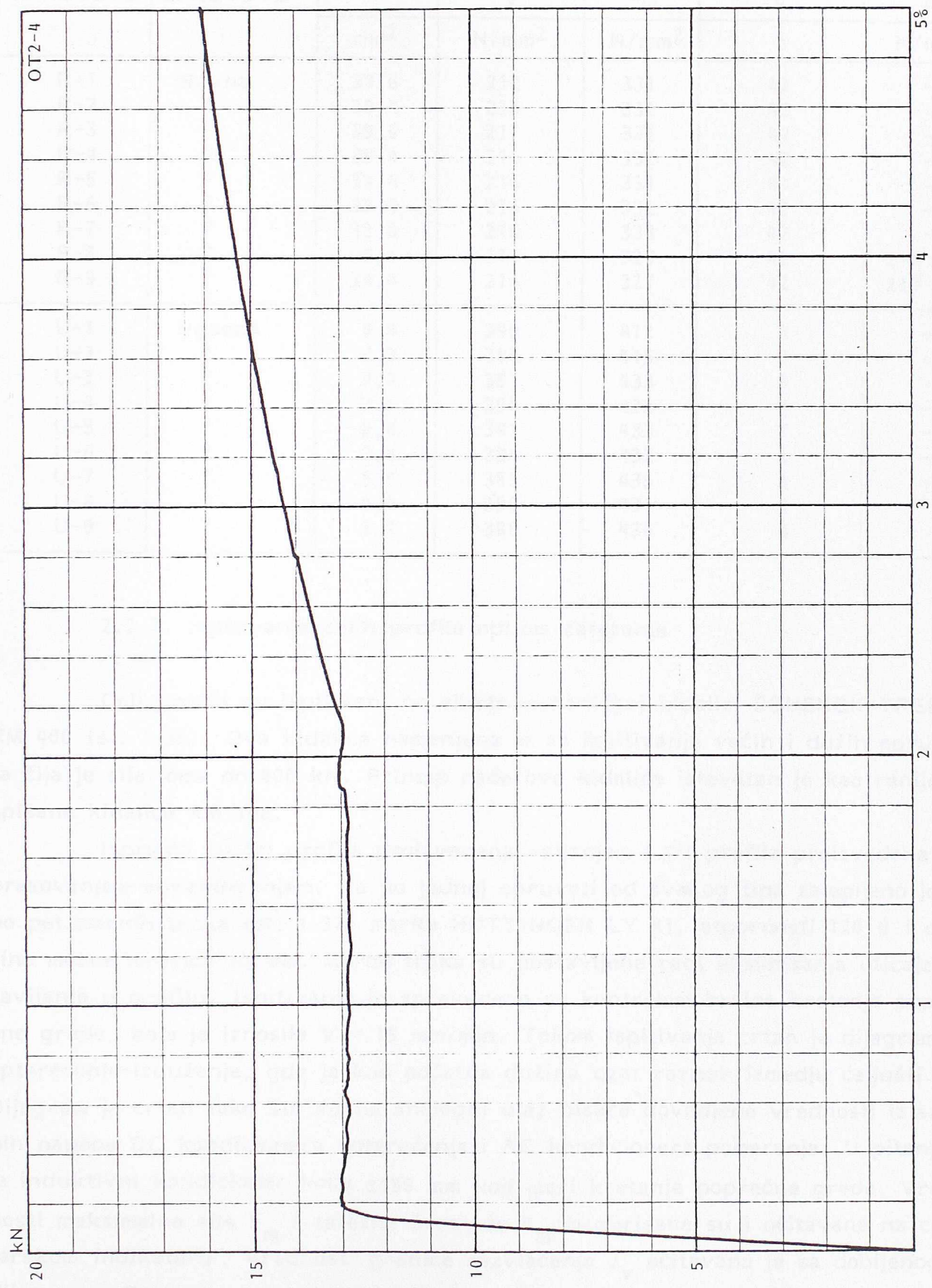
Da bi se dobijene vrednosti proverile izvršeno je ispitivanje i 8 epruveta opitom zatezanja na kidalici AMSLER od 100 kN u IMS-u u Beogradu uz izuzetno dobro slaganje rezultata, te se svi dobijeni rezultati mogu smatrati potpuno pouzdanim.

Tabela I-10

OZNAKA EPRUVETE		VRSTA EPRUVETE	Površina	Granica razvlačenja	Zatezna čvrstoća	Procentualno izduženje	Modul elastičnosti
			A	σ_v	σ_m	δ	
			mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²
Osnovna traka OT1	OT1-1	Ravna	45,0	313	431	30	-
	OT1-2	"	45,0	311	428	30	-
	OT1-3	"	46,2	296	420	28	-
	OT1-4	"	45,0	299	427	28	-
	OT1-5	"	45,0	305	431	28	-
	OT1-6	"	45,0	315	434	30	-

Nastavak Tabele I-10

Osnovna traka OT2	OT2-1	Ravna	45,0	306	431	30	205 800
	OT2-2	"	45,0	298	427	30	-
	OT2-3	"	45,0	289	424	31	206 000
	OT2-4	"	45,0	289	424	31	206 000
	OT2-5	"	45,0	292	432	29	-
	OT2-6	"	44,1	315	435	31	-
Valjani profil VT1	VT1-1	Ugaona	25,8	500	550	10	213 000
	VT1-2	Ugaona	25,5	505	537	9	-
	VT1-3	Ravna-rebro	45,0	311	433	30	-
	VT1-4	Ravna-rebro	45,0	308	433	30	-
	VT1-5	Ugaona	21,9	525	561	9	-
	VT1-6	Ugaona	22,9	517	577	9	-
	VT1-7	Ravna-nožice	45,0	340	443	28	209 000
	VT1-8	Ravna-nožice	45,0	353	459	28	-
Valjani profil VT2	VT2-1	Ugaona	22,3	504	558	9	213 000
	VT2-2	Ugaona	22,6	524	557	9	-
	VT2-3	Ravna-rebro	45,0	298	433	31	206 600
	VT2-4	Ravna-rebro	45,0	300	437	30	-
	VT2-5	Ugaona	23,4	532	582	10	-
	VT2-6	Ugaona	23,3	537	575	9	-
	VT2-7	Ravna-nožice	46,5	342	442	27	-
	VT2-8	Ravna-nožice	45,0	353	460	27	-
Valjani profil VT3	VT3-1	Ugaona	24,4	520	567	8	-
	VT3-2	Ugaona	18,3	499	569	8	-
	VT3-3	Ravna-rebro	44,7	306	435	29	-
	VT3-4	Ravna-rebro	45,0	308	436	30	-
	VT3-5	Ugaona	21,6	494	554	9	-
	VT3-6	Ugaona	23,1	518	575	10	-
	VT3-7	Ravna-nožice	45,3	351	453	28	-
	VT3-8	Ravna-nožice	45,0	354	455	27	-
Abkantovani profil AT1	AT1-1	Ugaona	26,1	498	554	8	212 800
	AT1-2	Ugaona	26,1	493	554	10	-
	AT1-3	Ravna-rebro	45,0	315	433	31	-
	AT1-4	Ravna-rebro	45,0	311	433	31	-
	AT1-5	Ugaona	22,0	483	553	9	-
	AT1-6	Ugaona	24,6	502	571	10	-
	AT1-7	Ravna-nožice	45,0	304	427	29	207 000
	AT1-8	Ravna-nožice	45,0	309	436	30	-
Abkantovani profil AT2	AT2-1	Ugaona	25,5	510	559	8	214 000
	AT2-2	Ugaona	21,9	515	577	9	-
	AT2-3	Ravna-rebro	45,0	293	429	31	206 600
	AT2-4	Ravna-rebro	45,0	297	436	31	-
	AT2-5	Ugaona	23,7	505	569	10	-
	AT2-6	Ugaona	25,8	509	573	10	-
	AT2-7	Ravna-nožice	45,0	317	436	29	-
	AT2-8	Ravna-nožice	45,0	321	443	29	-
Abkantovani profil AT3	AT3-1	Ugaona	25,8	510	570	8	-
	AT3-2	Ugaona	22,6	495	573	9	-
	AT3-3	Ravna-rebro	45,0	300	435	31	-
	AT3-4	Ravna-rebro	45,0	306	434	31	-
	AT3-5	Ugaona	20,7	491	574	10	-
	AT3-6	Ugaona	21,4	508	559	9	-
	AT3-7	Ravna-nožice	45,0	300	434	30	-
	AT3-8	Ravna-nožice	45,0	301	426	30	-



Sl. I-35 Kriva opterećenje-procentualno izduženje

Tabela I-11

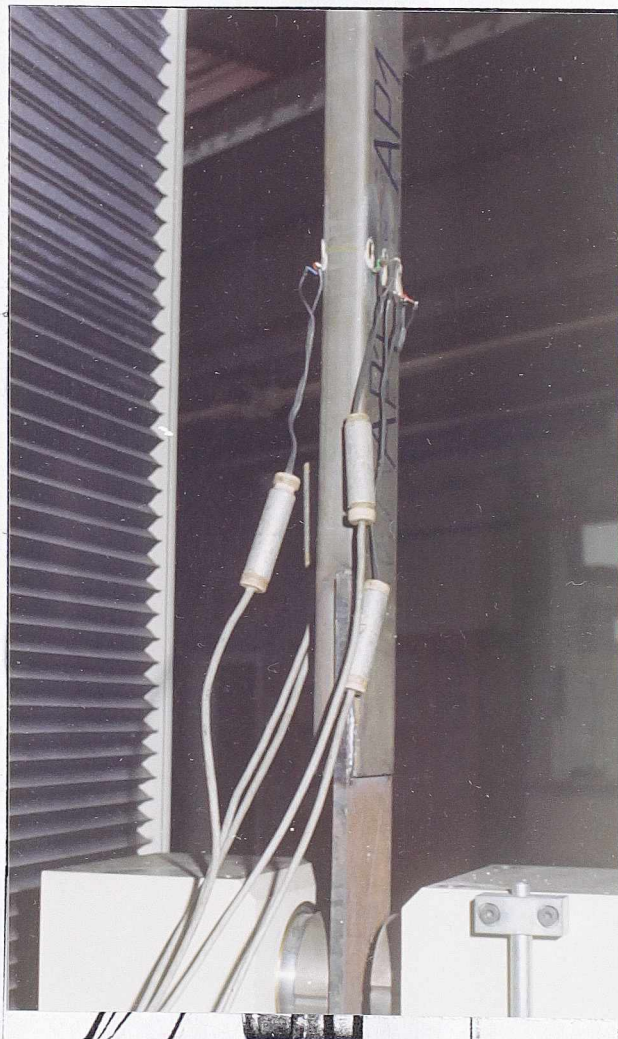
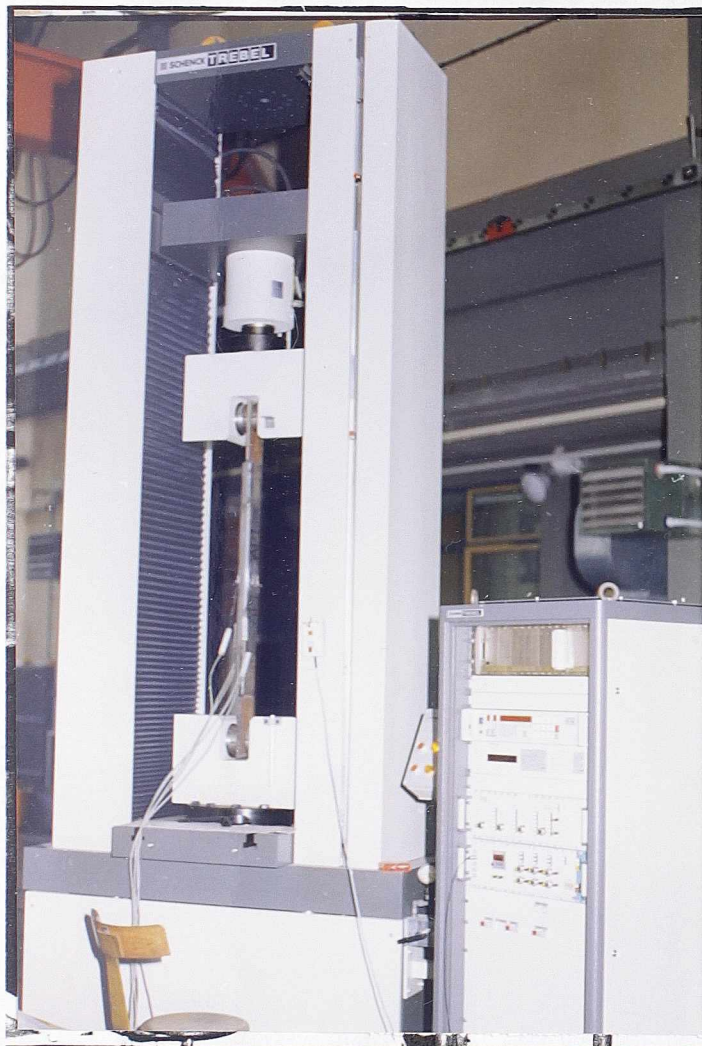
OZNAKA EPRUVETE	VRSTA EPRUVETE	Površina	Granica razvlačenja	Zatezna čvrstoća	Procentualno izduženje	Modul elastičnosti E
		A	σ_v	σ_m	δ	
		mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	N/mm ²
R-1	Ravna	39,6	212	331	42	-
R-2	"	39,4	212	331	42	-
R-3	"	39,6	212	331	42	-
R-4	"	39,4	216	332	42	-
R-5	"	39,4	216	331	41	-
R-6	"	39,6	216	332	42	-
R-7	"	39,6	216	333	42	-
R-8	"	39,6	217	329	42	210 400
R-9	"	39,4	216	327	42	210 000
U-1	Ugaona	8,4	390	412	8	-
U-2	"	8,3	388	415	8	-
U-3	"	7,8	391	433	8	-
U-4	"	7,8	390	422	8	-
U-5	"	8,4	391	433	7	-
U-6	"	8,4	394	432	8	-
U-7	"	8,0	389	435	8	-
U-8	"	8,0	390	431	8	-
U-9	"	8,1	386	436	8	-

2.2.3. Ispitivanje celih profila opitom zatezanja

Celi profili su ispitivani na elektromehaničkoj kidalici SCHENCK TREBEL RM 400 (sl. I-36). Ova kidalica namenjena je za ispitivanje većih i dužih epruveta čija je sila loma do 400 kN. Princip rada ove kidalice istovetan je kao ranije opisane kidalice RM 100.

Ispitana su tri profila proizvedena valjanjem i tri profila proizvedena presovanjem-abkantovanjem. Na po jednoj epruveti od svakog tipa zalepljeno je po pet mernih traka (sl. I-37) marke HOTTINGER LY 41, otpornosti 120 Ω i dužine merne mrežice 10 mm. Merne trake su postavljene radi eliminisanja uticaja savijanja u profilu. Ispitivanje je sprovedeno sa kontrolom brzine kretanja poprečne grede, koja je iznosila $V = 15$ mm/min. Tokom ispitivanja crtan je dijagram opterećenje-izduženje, gde je kao početna dužina uzet razmak između čeljusti. Dijagram je crtan tako što su na analogni ulaz pisača dovodjene vrednosti izlaznih napona DC kondicionera opterećenja i AC kondicionera pomeranja. U pitanju je induktivni kondicioner hoda ± 150 mm koji meri kretanje poprečne grede. Vrednosti maksimalne sile F_m i zatezne čvrstoće σ_m memorisane su i očitavane na cifarskom indikatoru. Vrednost granice razvlačenja σ_v očitavana je sa dobijenog dijagrama. Procentualno izduženje dobijeno je merenjem rastojanja krajnjih mernih znački posle loma, odnosno postupkom propisanim našim standardom. Izgled loma

ispitanih profila prikazan je na sl. I-38 i I-39, a dobijene vrednosti su sredjene u Tabeli I-12. Dijagrami opterećenje-izduženje svih ispitanih profila dati su na slikama I-40 do I-45.



Sl. I-36 Kidalica SCHENCK TREBEL RM 400 sa postavljenim uzorkom za ispitivanje

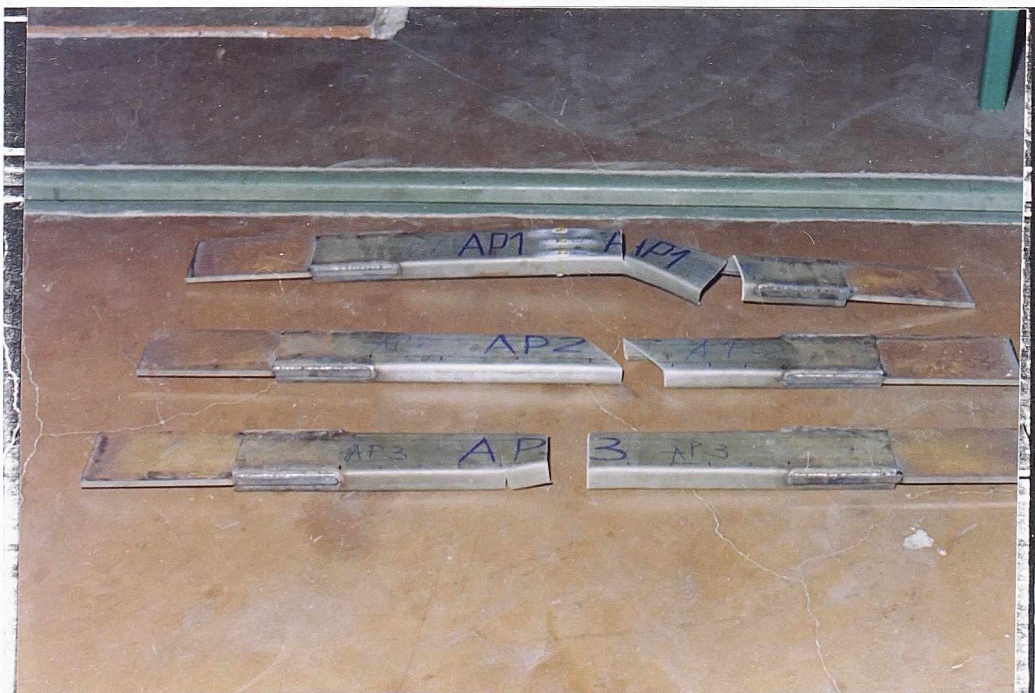
Sl. I-37 Uzorak celog profila za opit zatezanja sa postavljenim mernim trakama

Tabela I-12

Oznaka profila	Površina A	Granica razvlačenja σ_v	Zatezna čvrstoća σ_m	Procentualno izduženje δ
	mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
VP1	540	372	449	15
VP2	540	370	448	14
VP3	540	370	448	15
AP1	540	345	432	15
AP2	540	345	432	14
AP3	540	348	435	14



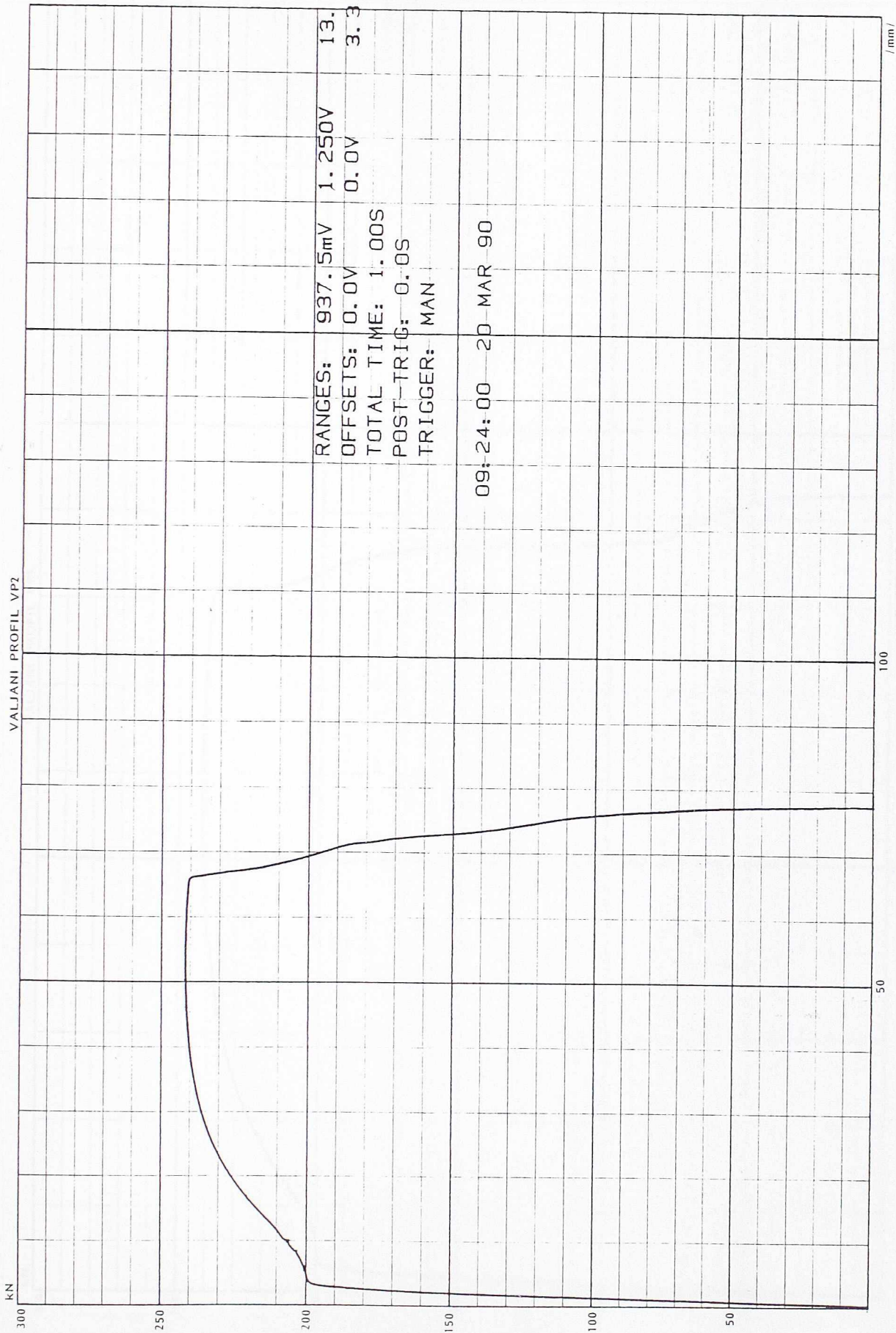
Sl. I-38 Izgled loma valjanih profila posle opita zatezanjem



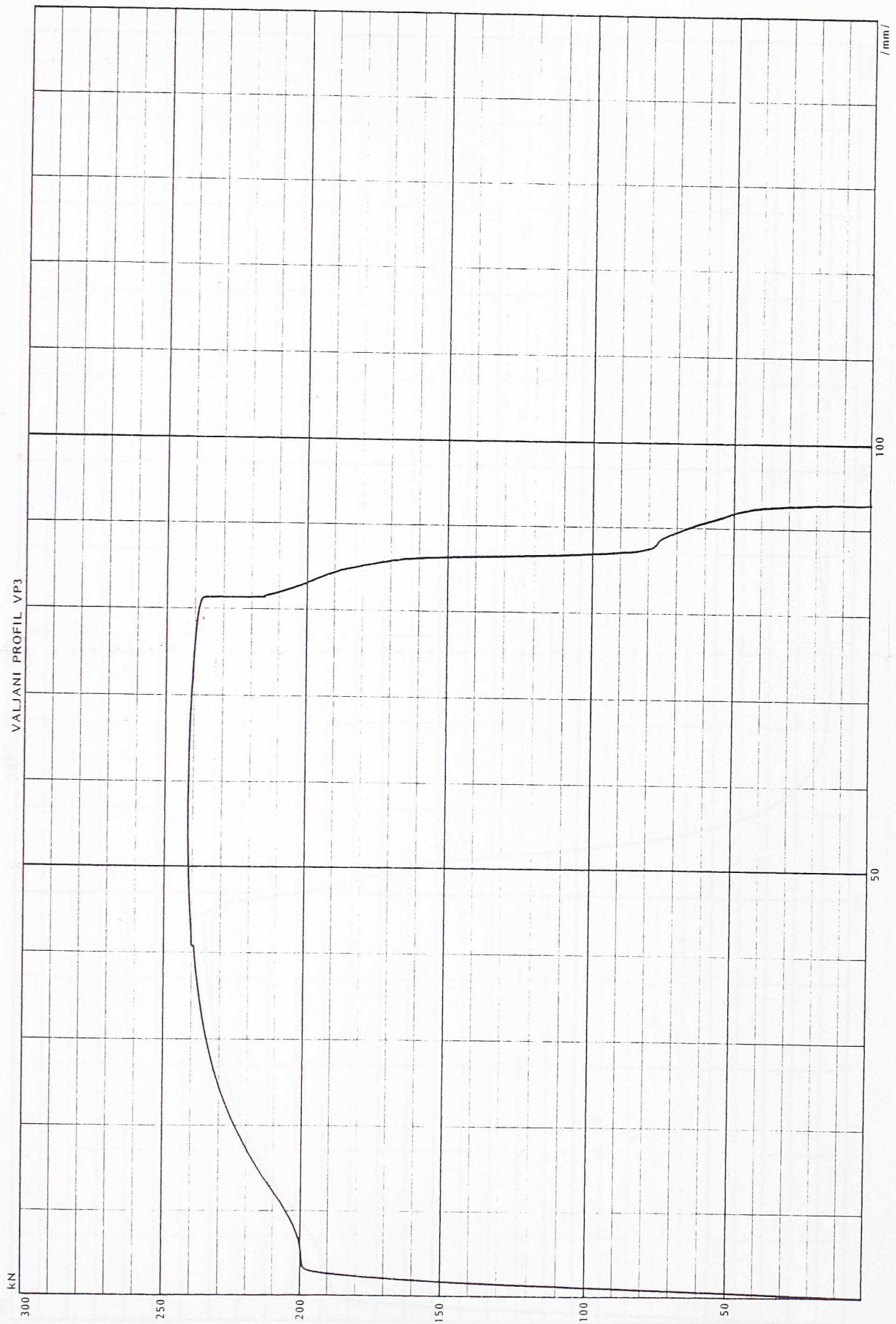
Sl. I-39 Izgled loma abkantovanih profila posle opita zatezanjem



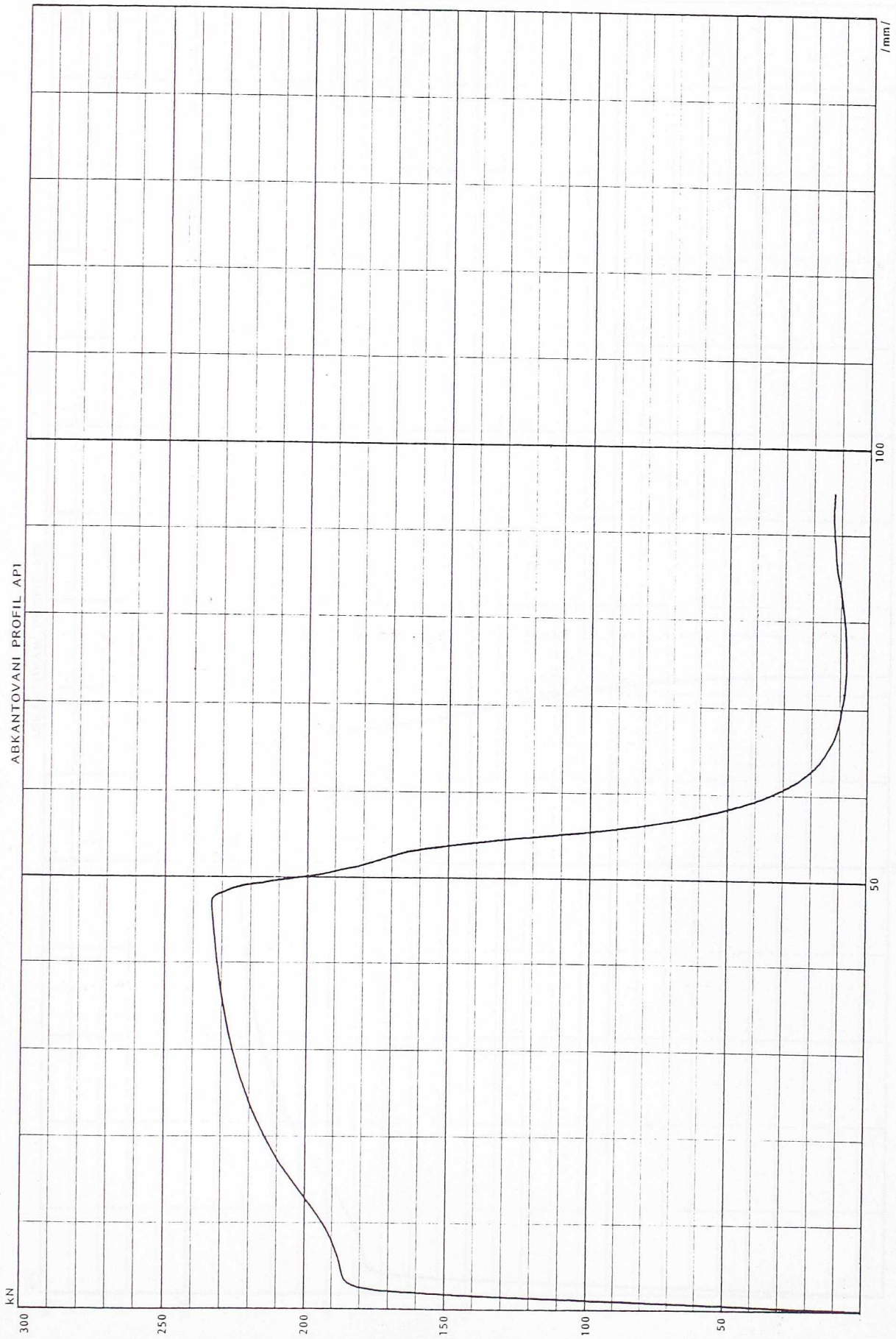
Sl. I-40 Kriva opterećenje-izduženja za profil VPI



Sl. I-41 Kriva opterećenje-izduženje za profil VP2



Sl. I-42 Kriva opterećenje-izduženje za profil VP3

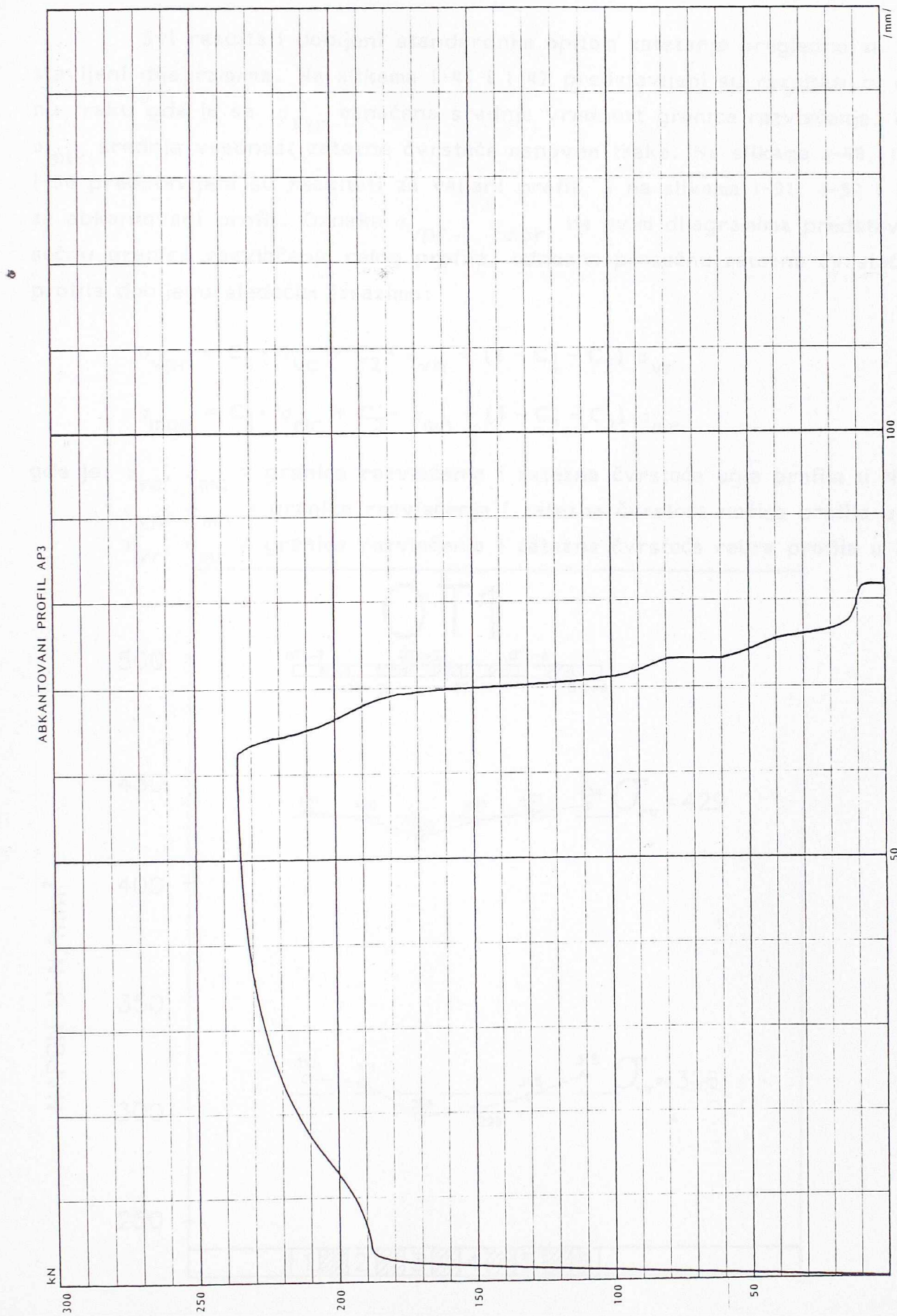


Sl. 1-16 Kriva opterećenje-ladženje za profil API



Sl. I-44 Kriva opterećenje-izduženje za profil AP2

2.3. Analiza dobijenih rezultata i zaključak



Sl. I-45 Kriva opterećenje-izduženje sa profil AP3

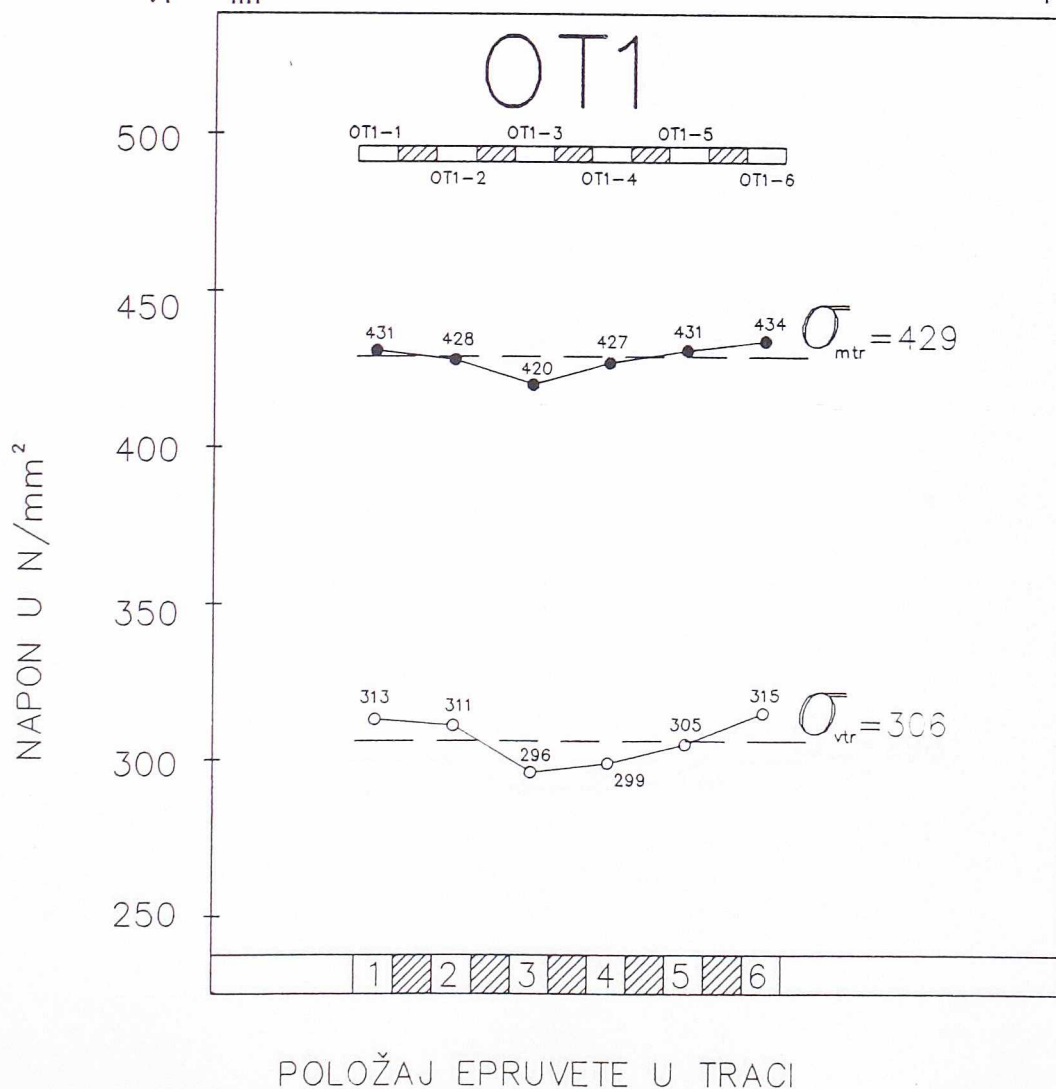
2.3. Analiza dobijenih rezultata i zaključak

Svi rezultati dobijeni standardnim opitom zatezanja pregledno su predstavljeni dijagramima. Na slikama I-46 i I-47 predstavljeni su rezultati za osnovnu traku gde je sa σ_{vtr} označena srednja vrednost granice razvlačenja, a sa σ_{mtr} srednja vrednost zatezne čvrstoće osnovne trake. Na slikama I-48, I-49 i I-50 predstavljeni su rezultati za valjani profil, a na slikama I-51, I-52 i I-53 za abkantovani profil. Oznaka σ_{vpr} i σ_{mpr} na ovim dijagramima predstavlja prosečnu granicu razvlačenja celog profila, odnosno prosečnu zateznu čvrstoću celog profila dobijenu sledećim izrazima:

$$\sigma_{vpr} = C_1 \cdot \sigma_{vc} + C_2 \cdot \sigma_{vn} + (1 - C_1 - C_2) \sigma_{vr} \quad (64)$$

$$\sigma_{mpr} = C_1 \cdot \sigma_{mc} + C_2 \cdot \sigma_{mn} + (1 - C_1 - C_2) \sigma_{mr} \quad (65)$$

gde je: σ_{vc} , σ_{mc} = granica razvlačenja i zatezna čvrstoća ugla profila u N/mm^2
 σ_{vn} , σ_{mn} = granica razvlačenja i zatezna čvrstoća nožica profila u N/mm^2
 σ_{vr} , σ_{mr} = granica razvlačenja i zatezna čvrstoća rebra profila u N/mm^2



Sl. I-46 Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća osnovne trake OT1

$C_1 = A_c/A$ odnos površine uglova prema ukupnoj površini profila

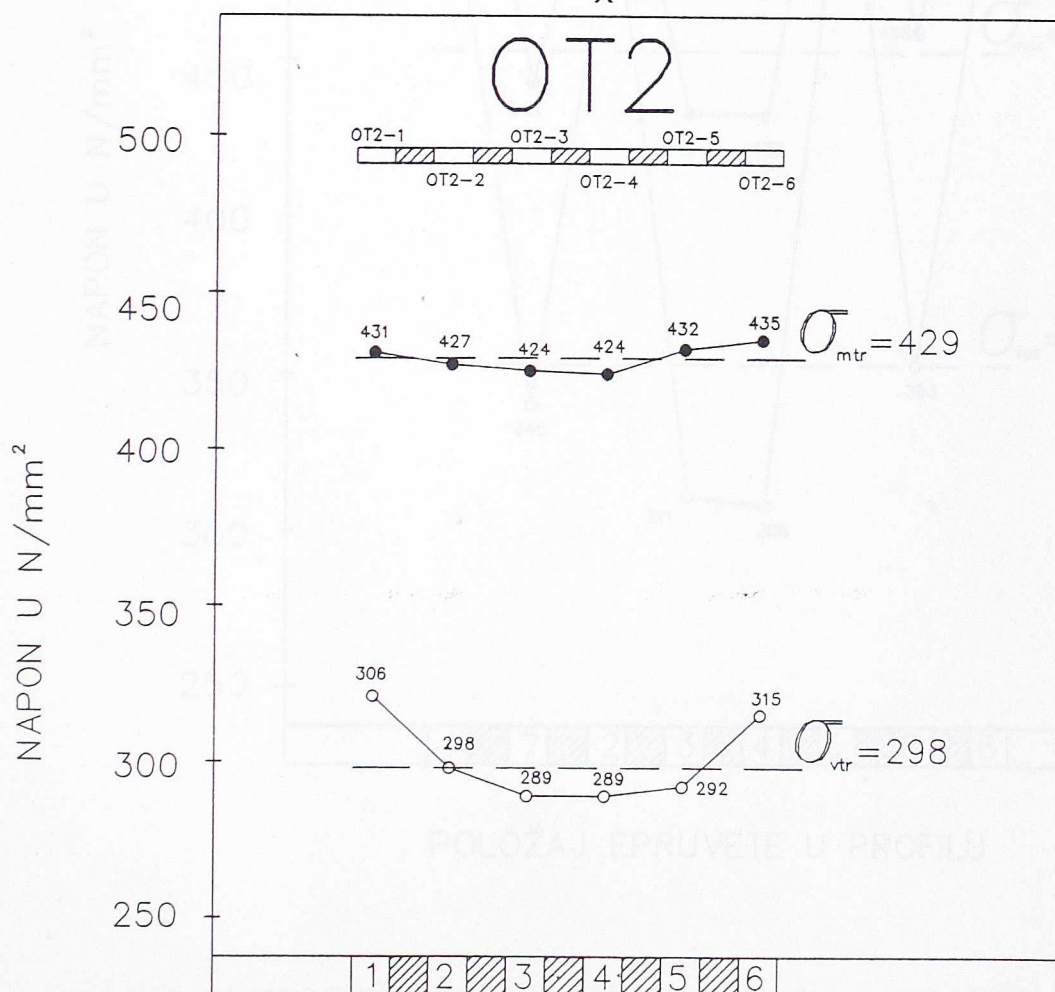
$C_2 = A_n/A$ odnos površine nožica prema ukupnoj površini profila.

Pri obradi rezultata dobijenih ispitivanjem karakteristična vrednost za dalju analizu i zaključivanje dobijena je kao aritmetička sredina (srednja vrednost) svih rezultata merenja za svaki tip epruveta ($n = 6$). Ovakav postupak obrade je bilo moguće primeniti, jer je dobijen homogen skup rezultata, pa njihova srednja vrednost najbolje odslikava njihove stvarne karakteristike. Na primeru rezultata dobijenih za granicu razvlačenja osnovne trake OT1 biće ilustrovana razlika između srednje vrednosti i karakteristične vrednosti dobijene Studentovom raspodelom za fraktilu 95%.

$$\text{Srednja vrednost } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = 306 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Standardna devijacija } S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = 7,79 \text{ N/mm}^2$$

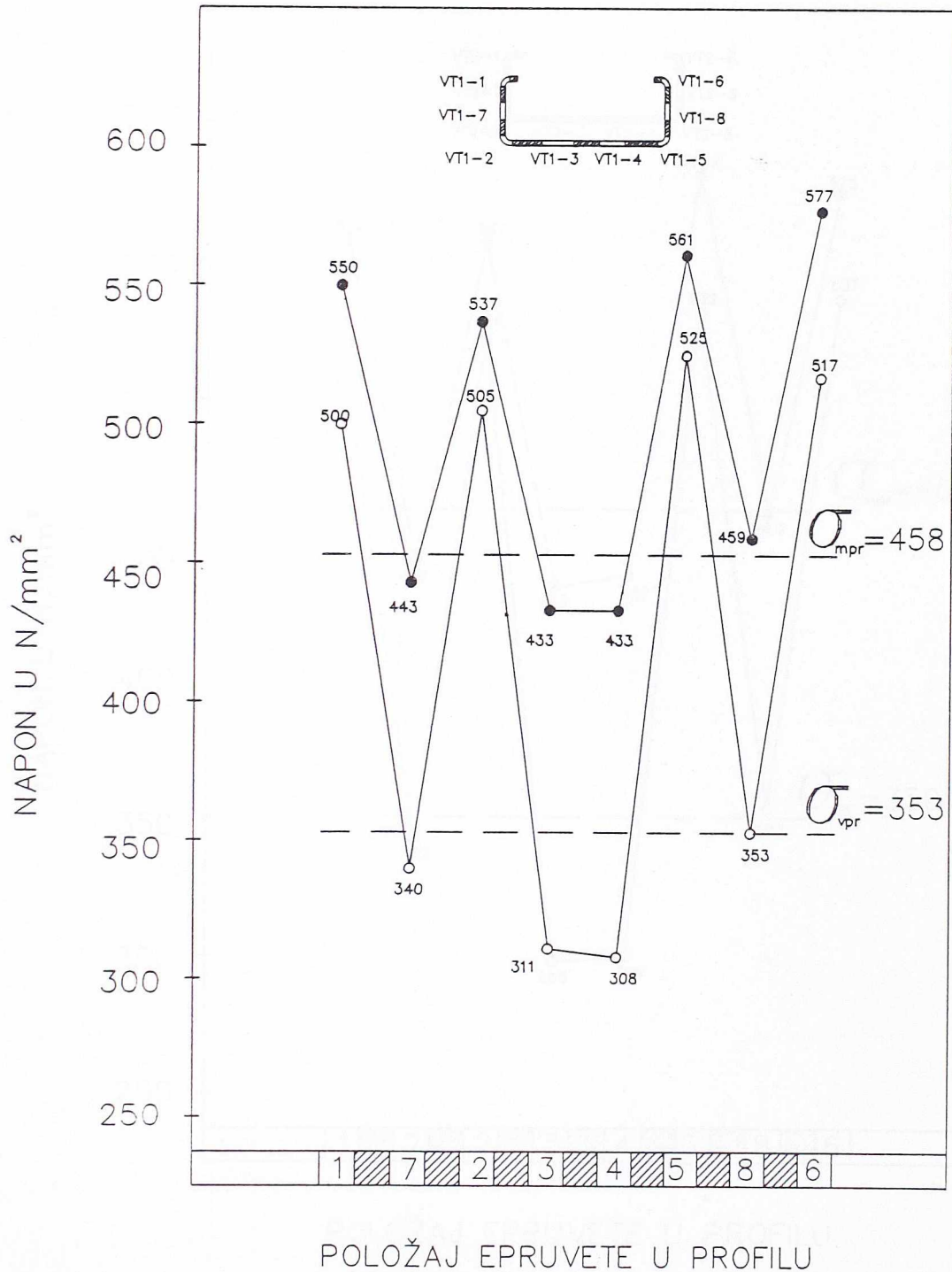
$$\text{Koeficijent varijacije } \vartheta = \frac{S_n}{\bar{X}} \cdot 100 = \frac{7,79}{306} \cdot 100 = 2,54\%$$



POLOŽAJ EPRUVETE U TRACI

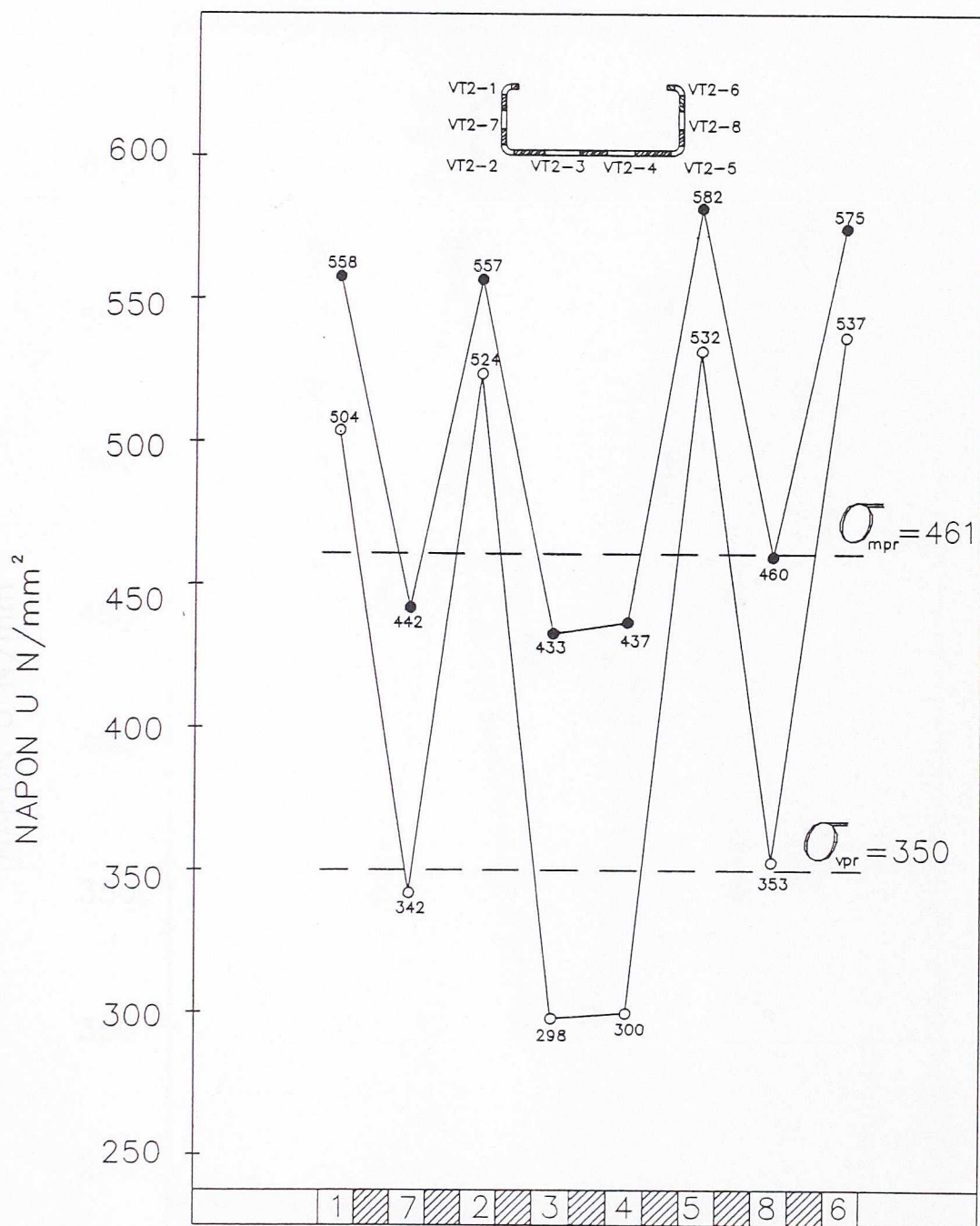
Sl. I-47 Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća osnovne trake OT2

VT1



Sl. I-48 Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća valjanog profila VT1 isečenog u trake

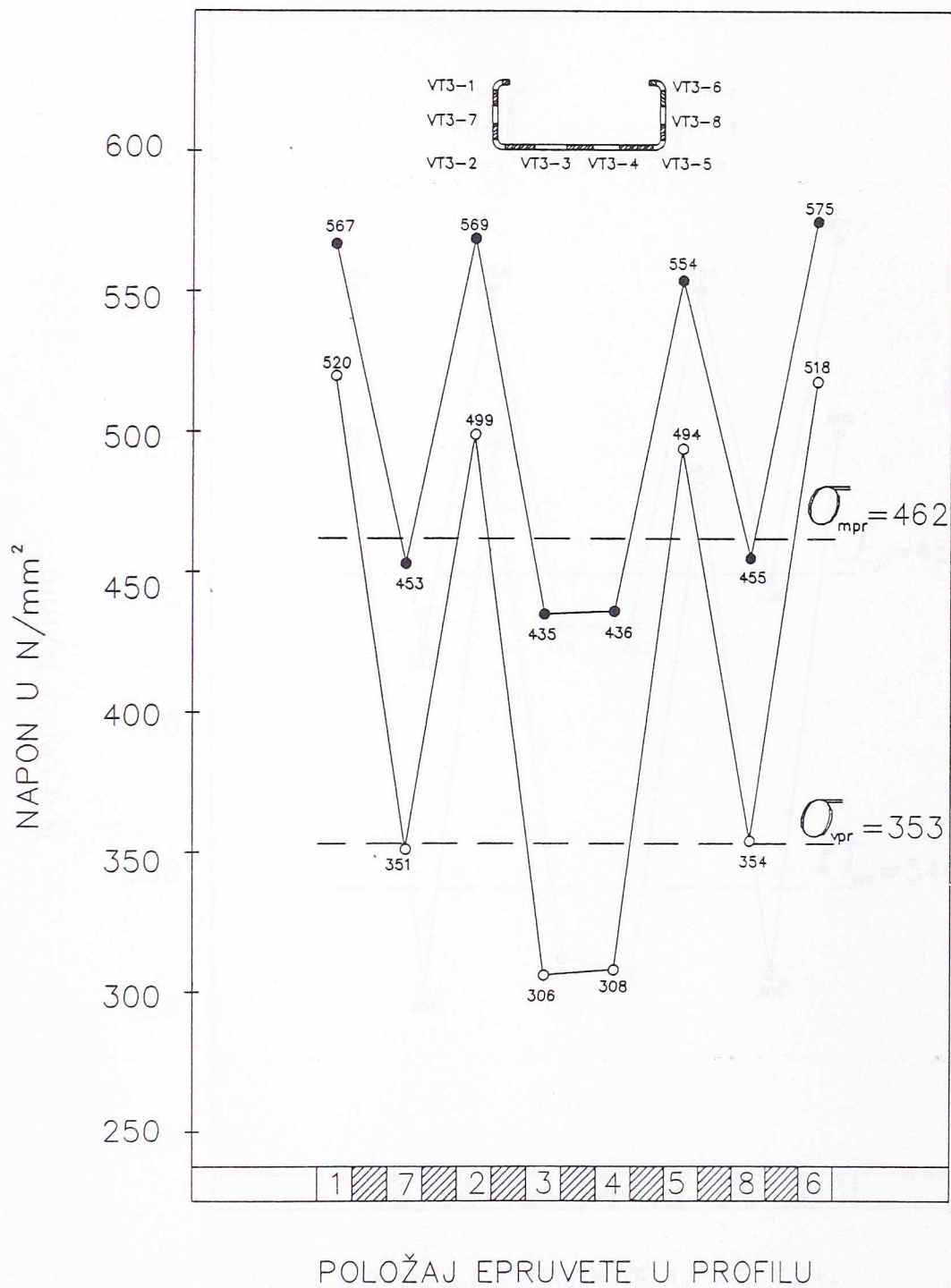
VT2



POLOŽAJ EPRUVETE U PROFILU

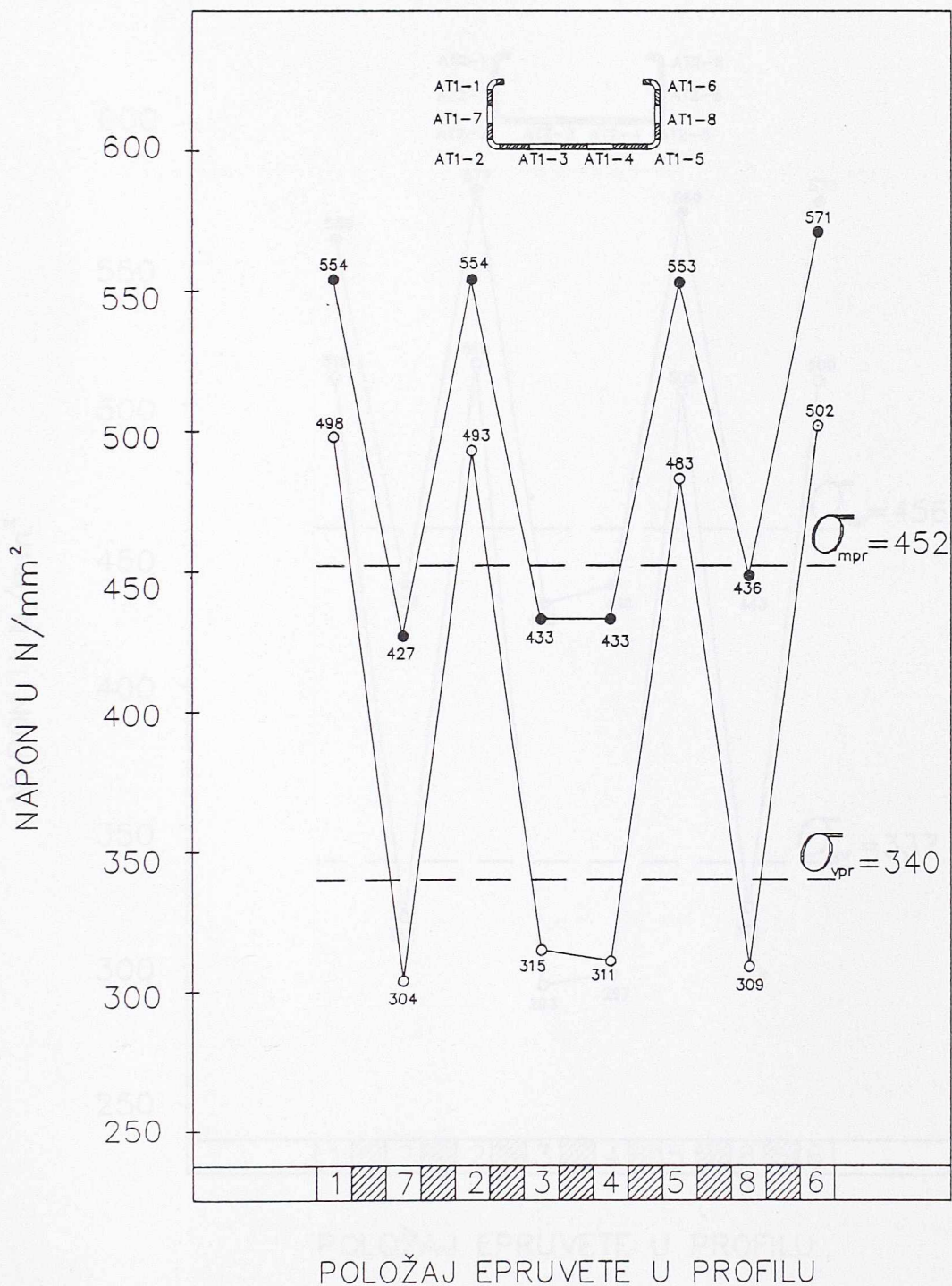
Sl. I-49 Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća valjanog profila VT2 isečenog u trake

VT3



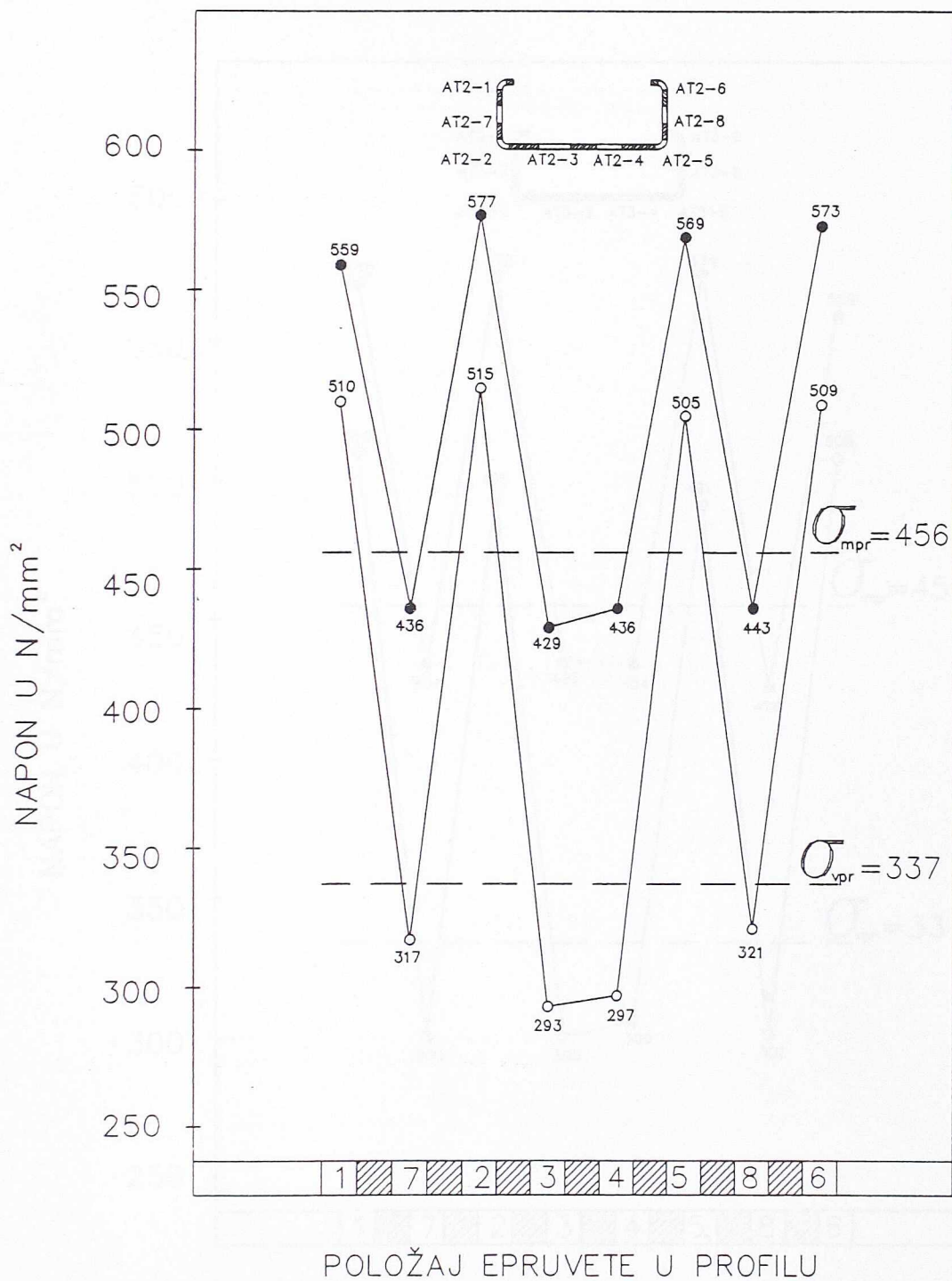
Sl. I-50 Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća valjanog profila VT3 isečenog u trake

AT1



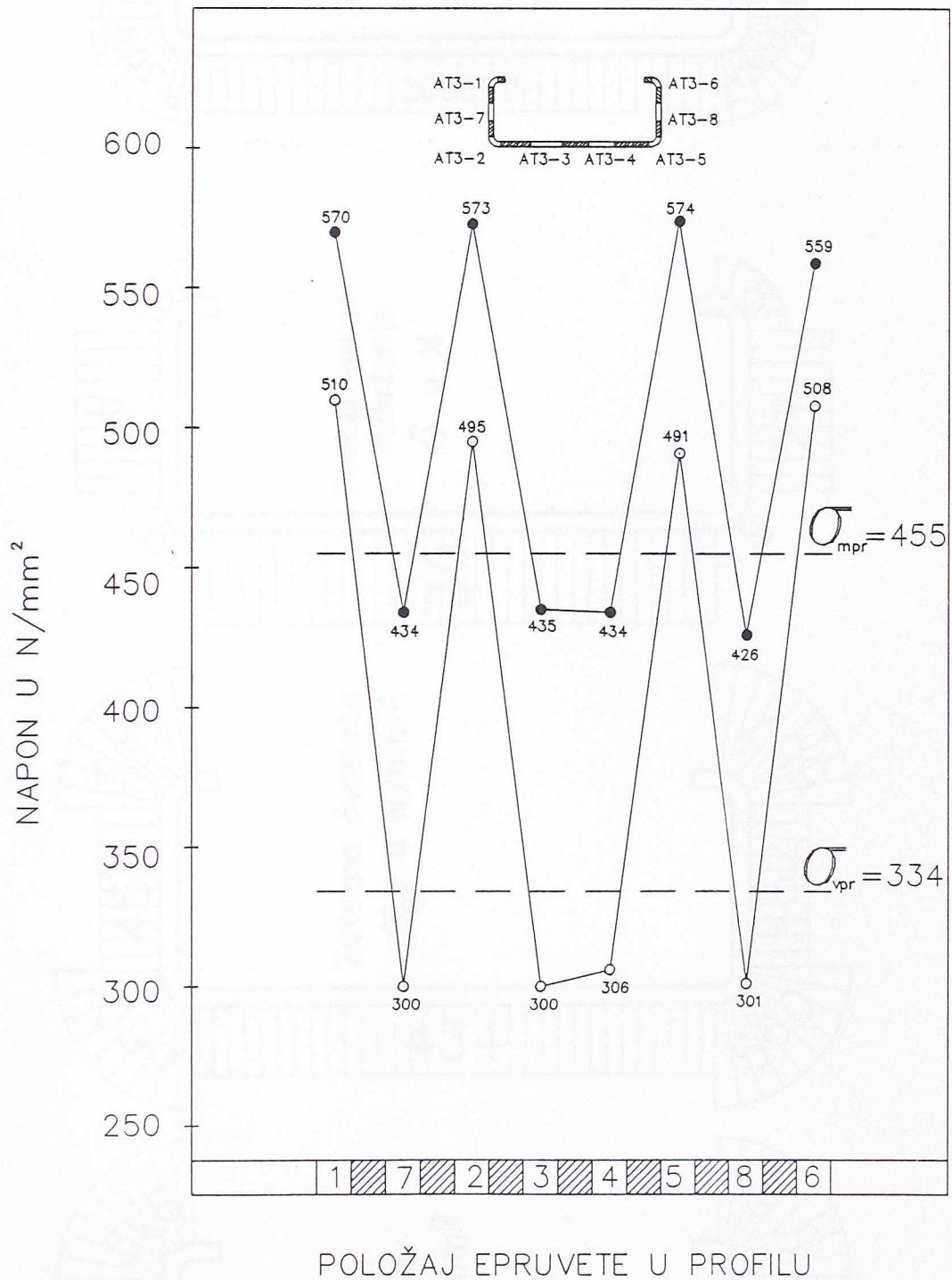
Sl. I-51 Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća abkantovanog profila AT1 isečenog u trake

AT2



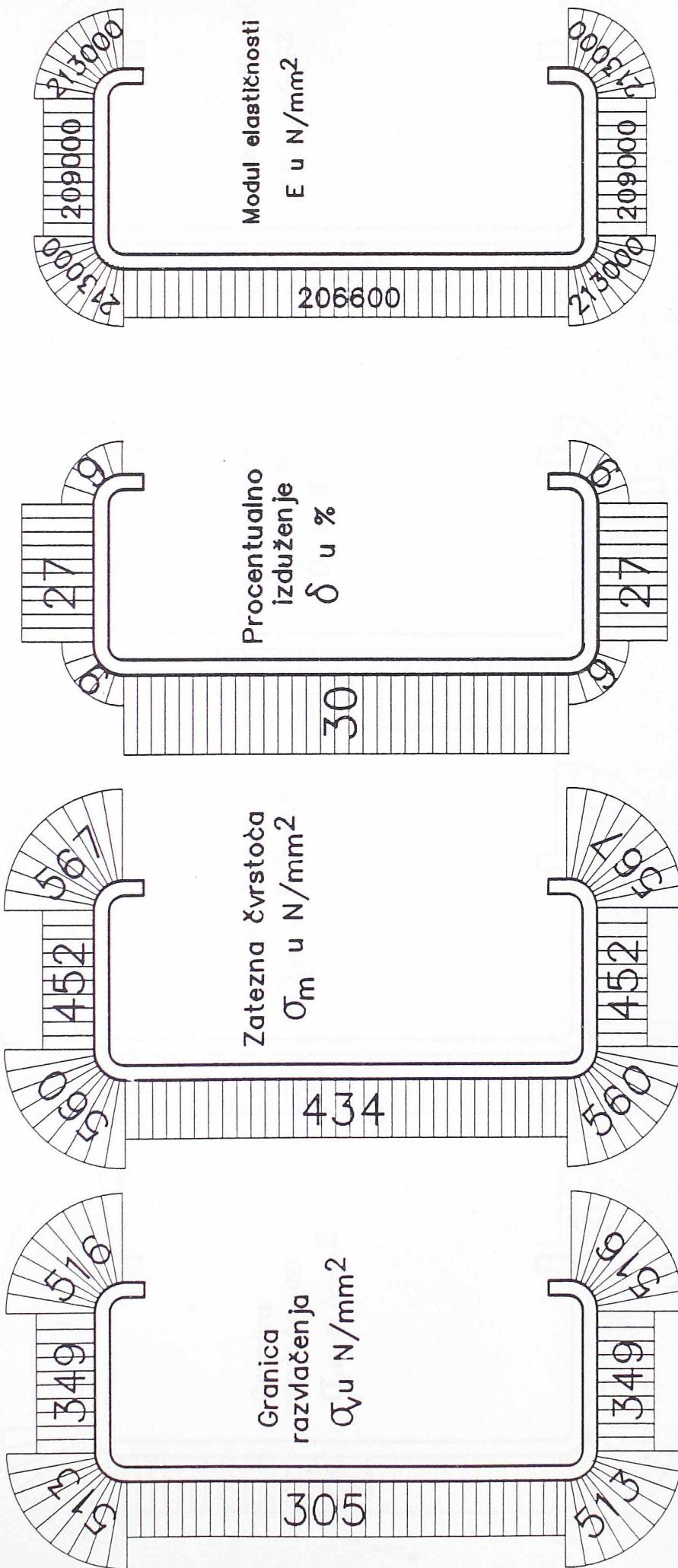
Sl. I-52 Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća abkantovanog profila AT2 isečenog u trake

AT3



Sl. I-53 Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća abkantovanog profila AT3 isečenog u trake

VALJANI PROFIL



Osnovna traka $\sigma_v = 302$ N/mm²

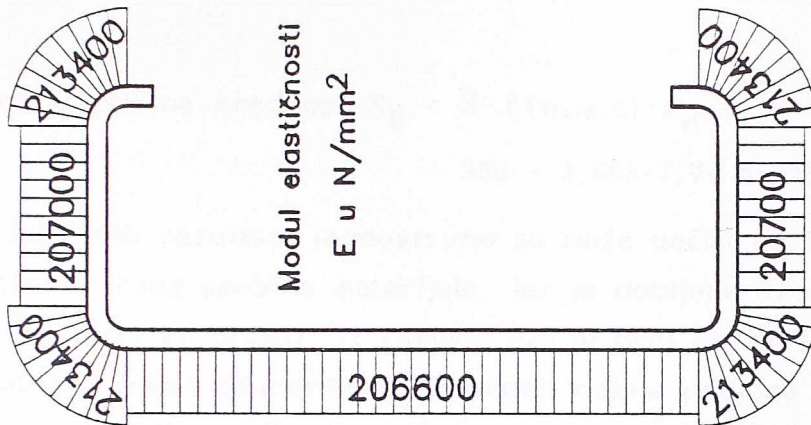
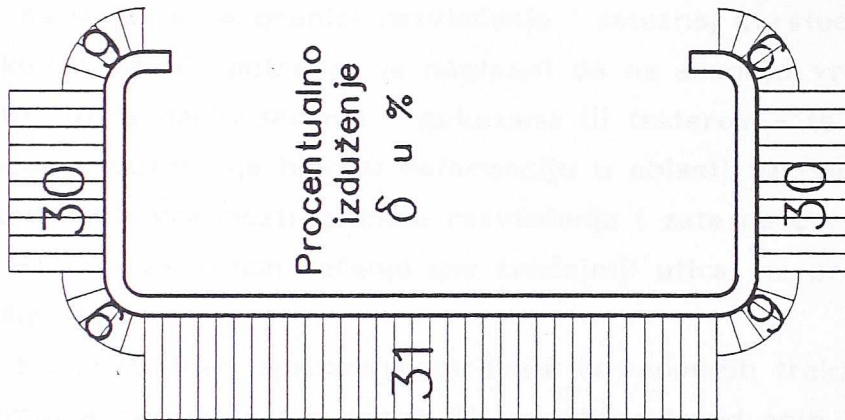
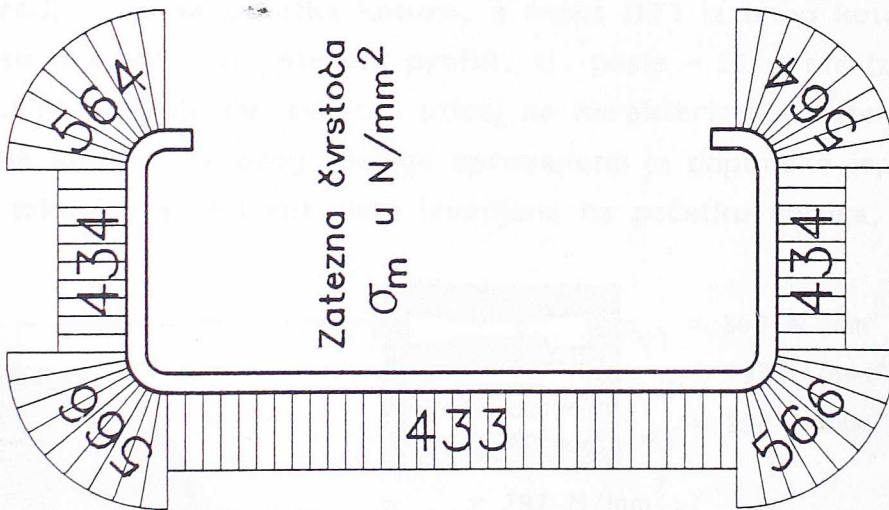
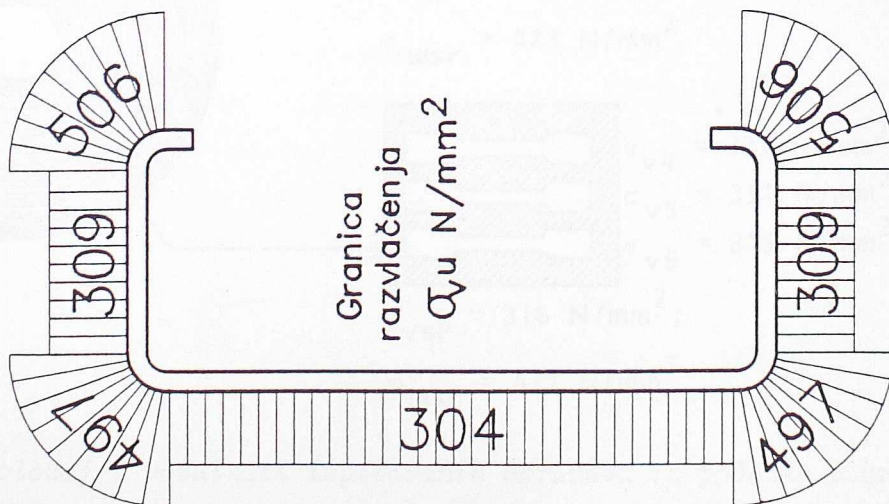
$\sigma_m = 429$ N/mm²

$\delta = 30\%$

E = 206000 N/mm²

S1. I-54 Mehaničke karakteristike valjanog profila dobijene eksperimentima

ABKANTOVANI PROFIL



Osnovna traka $\sigma_y = 302$ N/mm²

$\sigma_m = 429$ N/mm²

$\delta = 30\%$

E = 206000 N/mm²

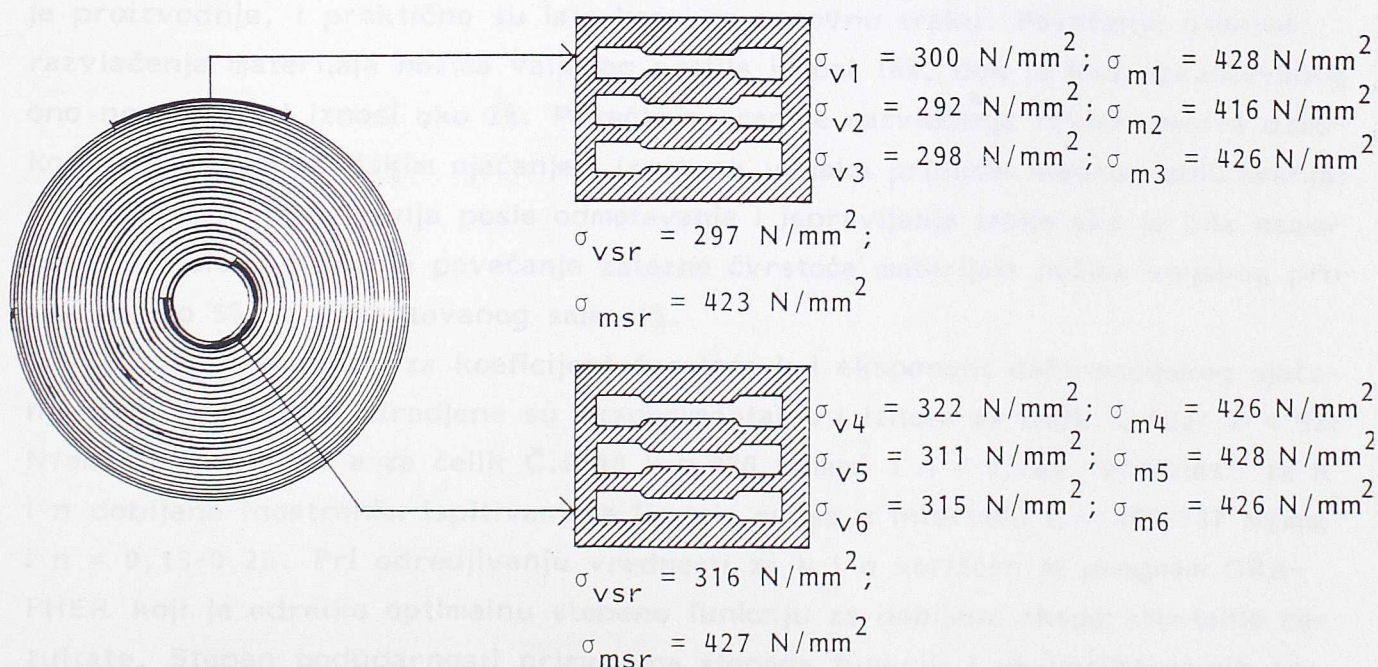
S1. I-55 Mehaničke karakteristike abkantovanog profila dobijene eksperimentom

$$\begin{aligned} \text{Karakteristična vrednost } X_k &= \bar{X} - f(n, p, s) \cdot S_n = \\ &= 306 - 3,668 \cdot 7,79 = 277 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Iz dobijenih rezultata jednostavno se može uočiti da karakteristična vrednost ne odražava prave osobine materijala, jer je dobijena vrednost znatno niža od najmanje izmerene vrednosti, iz razloga što je broj uzoraka relativno mali (6) pa se parametar f prema Studentovoj raspodeli dobija prilično veliki tj. 3,668. Iz ovog razloga za dalju analizu i zaključivanje koriste se srednje vrednosti izmerenih mehaničkih karakteristika prezentiranih na sl. I-54 i I-55. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je sledeće:

1. Kada je reč o granici razvlačenja i zateznoj čvrstoći osnovne trake iz koje je oblikovan profil, potrebno je naglasiti da na srednju vrednost ovih karakteristika bitno utiče način sečenja - makazama ili testerom - te trake. Ova mehanička operacija prouzrokuje hladnu deformaciju u oblasti uz ivicu trake zbog čega dolazi do povećanih vrednosti granice razvlačenja i zatezne čvrstoće ovih zona (sl. I-46 i I-47). Ovaj uticaj sečenja ima značajniji uticaj na profile sa manjom razvijenom širinom.

2. Kod rezultata ispitivanja epruveta iz osnovnih traka uočeno je da su vrednosti granice razvlačenja iz trake OT1 nešto veće od onih iz trake OT2. Traka OT2 izradjena je sa početka kotura, a traka OT1 iz istog kotura nešto kasnije, pošto su uradjeni svi potrebni profili, tj. posle ≈ 20 m što iznosi 5 namotaja na koturu. To ukazuje da izvestan uticaj na karakteristike materijala ima i položaj trake na koturu. Iz ovog razloga sprovedeno je dopunsko ispitivanje na 6 epruveta, tako što su tri epruvete izvadjene na početku kotura, a tri pri samom



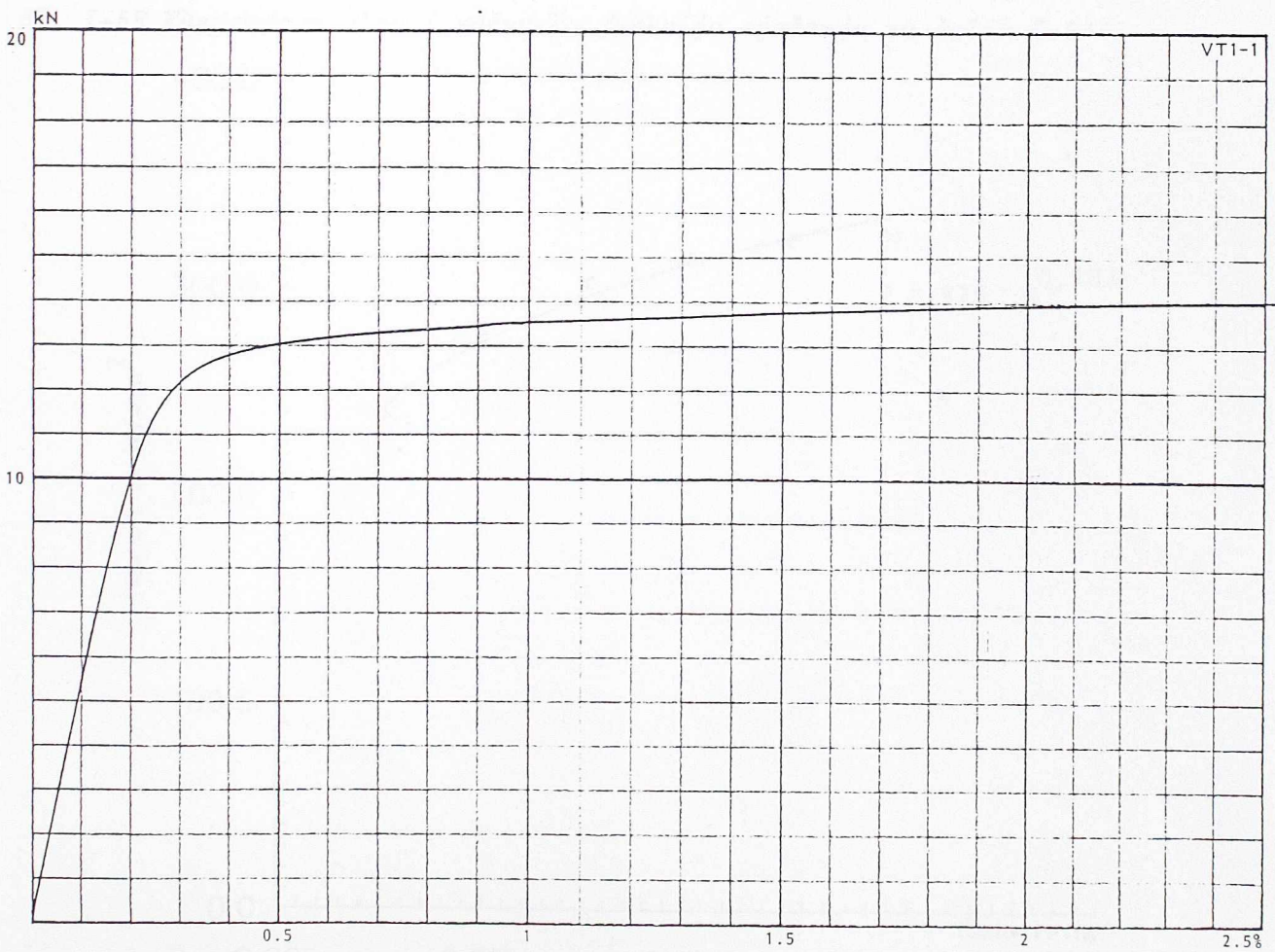
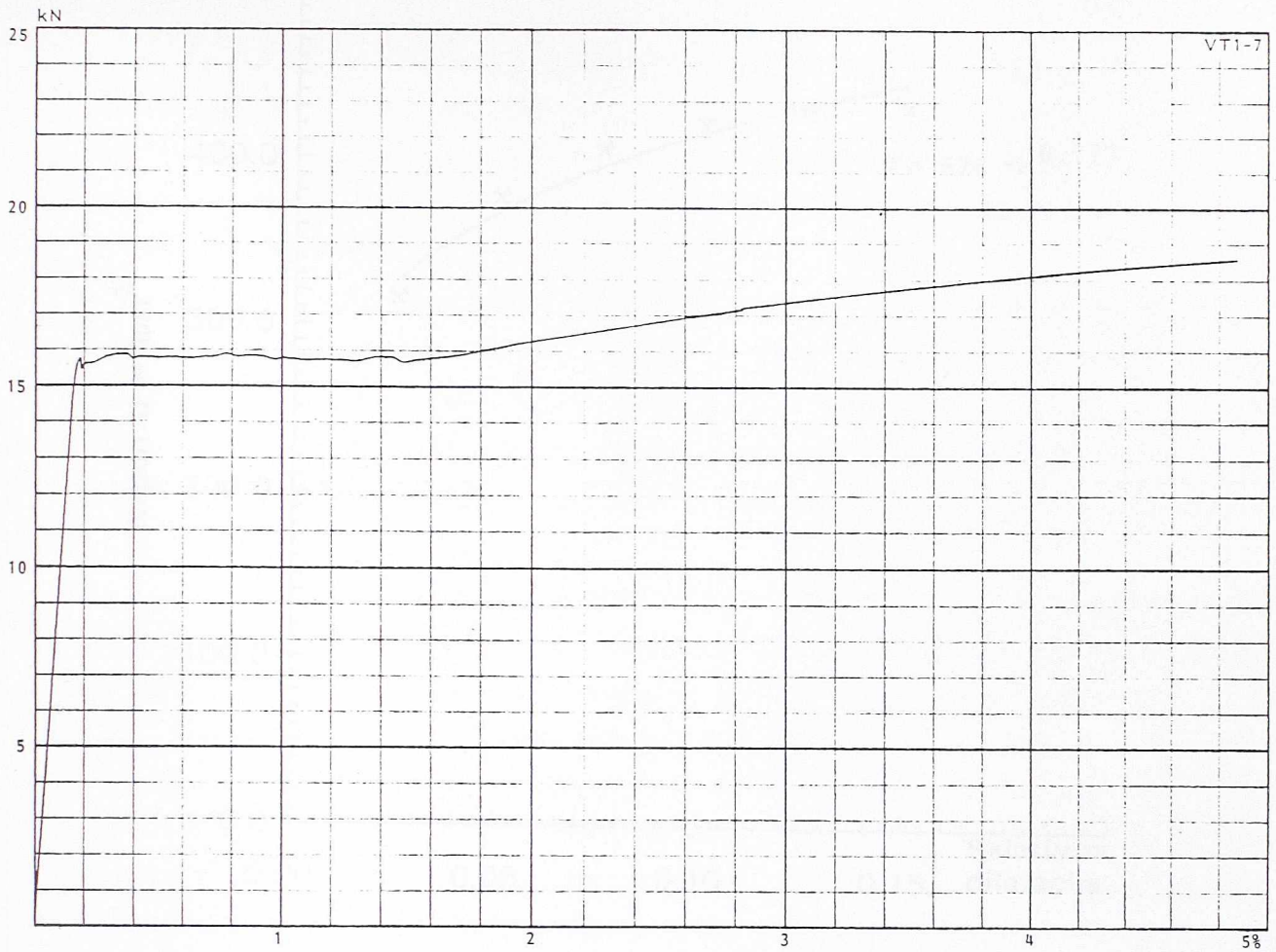
Sl. I-56 Položaj i rezultati ispitivanih epruveta iz početka i kraja kotura

kraju. Epruvete su ispitane zatezanjem na kidalici AMSLER nosivosti 100 kN u IMS-u Beograd, a rezultati prikazani na sl. I-56. Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da osnovni materijal sa dna (kraja) kalema trake ima granicu razvlačenja 6 do 7% veću od one sa početka kalema, dok je za zateznu čvrstoću ta razlika mnogo manja i iznosi oko 1%. Ovaj fenomen je posledica veće hladne deformacije dna kalema tj. manjeg poluprečnika krivine namotaja.

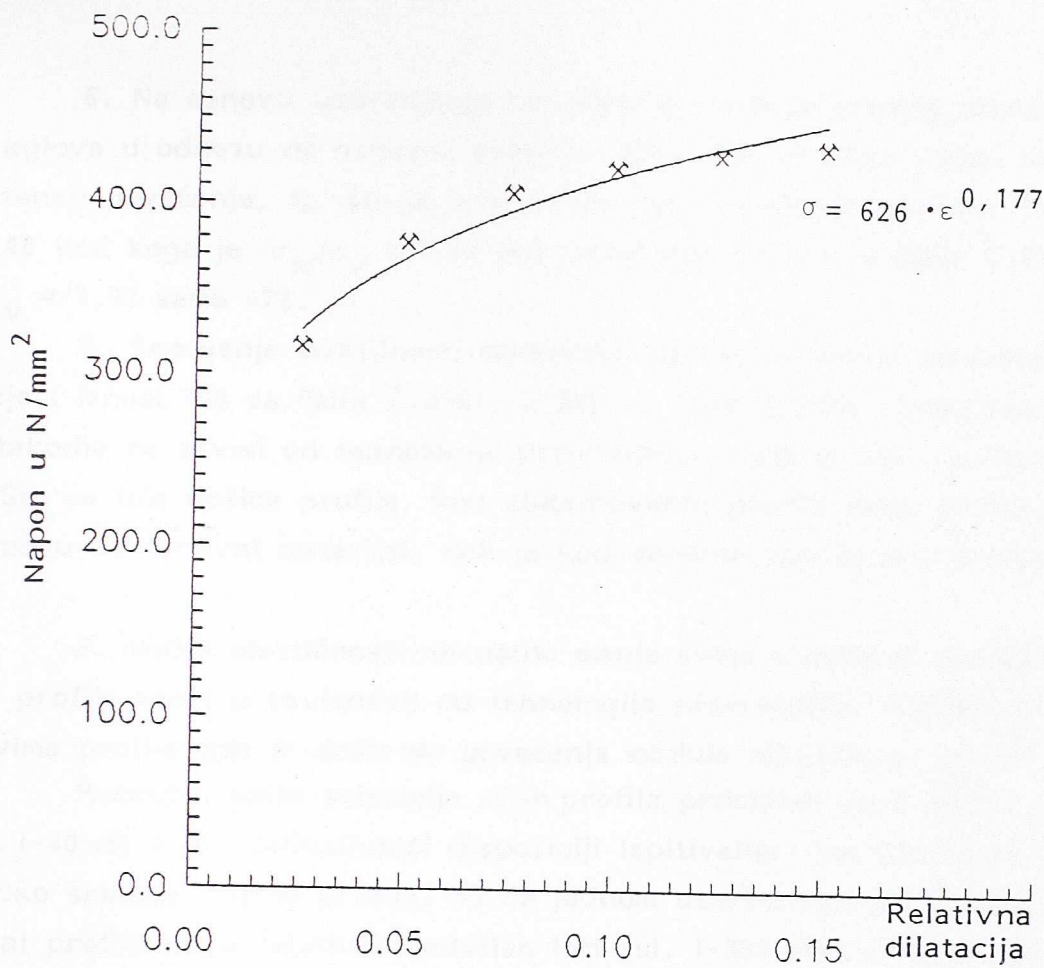
3. Primećeno je da sa povećanjem hladnog oblikovanja (uglovi profila) čelici koji su imali oštro izraženu granicu razvlačenja (osnovna traka) gube tu karakteristiku i $\sigma - \epsilon$ kriva postaje zaobljena bez oštro izražene granice razvlačenja. Primer za ovo dat je na sl. I-57 gde se uočava da epruveta izvadjena iz ravnog dela nožica (VT1-7) ima izraženu granicu razvlačenja kao materijal osnovne trake, dok epruveta izradjena iz ugla profila (VT1-1) ima neizraženu granicu razvlačenja. Čak ni posle starenja materijal ugla nije povratio tu osobinu $\sigma - \epsilon$ krive. Objašnjenje za ovu pojavu je ta da vlakna u uglu trpe različite plastične deformacije, tako da počinju tečenje pri različitim naponima, što kao rezultat ima zaobljen $\sigma - \epsilon$ dijagram.

4. Metoda hladnog oblikovanja (valjanje ili abkantovanje) ima mali uticaj na granicu razvlačenja uglova σ_{VC} , dok je od značaja za ravne delove profila (za primenjenu tehnologiju valjanja samo za nožice). Za čelik Č.0361 povećanje granice razvlačenja uglova valjanih profila je 71%, a abkantovanih 67%, dok za čelik Č.0148 (abkantovan) 81%. Granica razvlačenja materijala ugla uz prevoj je nešto veći od one uz rebro, što je posledica ranije napomenutog postupka sečenja osnovne trake. Takodje, povećanje zatezne čvrstoće uglova profila ne zavisi bitno od tehnologije proizvodnje i iznosi za čelik Č.0361 oko 32%, a za čelik Č.0148 oko 30%. Granica razvlačenja i zatezna čvrstoća rebra profila, ne zavise od tehnologije proizvodnje, i praktično su iste kao i za osnovnu traku. Povećanje granice razvlačenja materijala nožica valjanog profila iznosi 16%, dok je kod abkantovanog ono neznatno i iznosi oko 2%. Povećanje granice razvlačenja ravnih delova uzrokovano je deformacijskim ojačanjem (pritisak valjaka prilikom hladnog oblikovanja) i starenjem koje se javlja posle odmotavanja i ispravljanja trake ako je bila namotana na kalem. Takodje povećanje zatezne čvrstoće materijala nožice valjanog profila je oko 5%, a abkantovanog samo 1%.

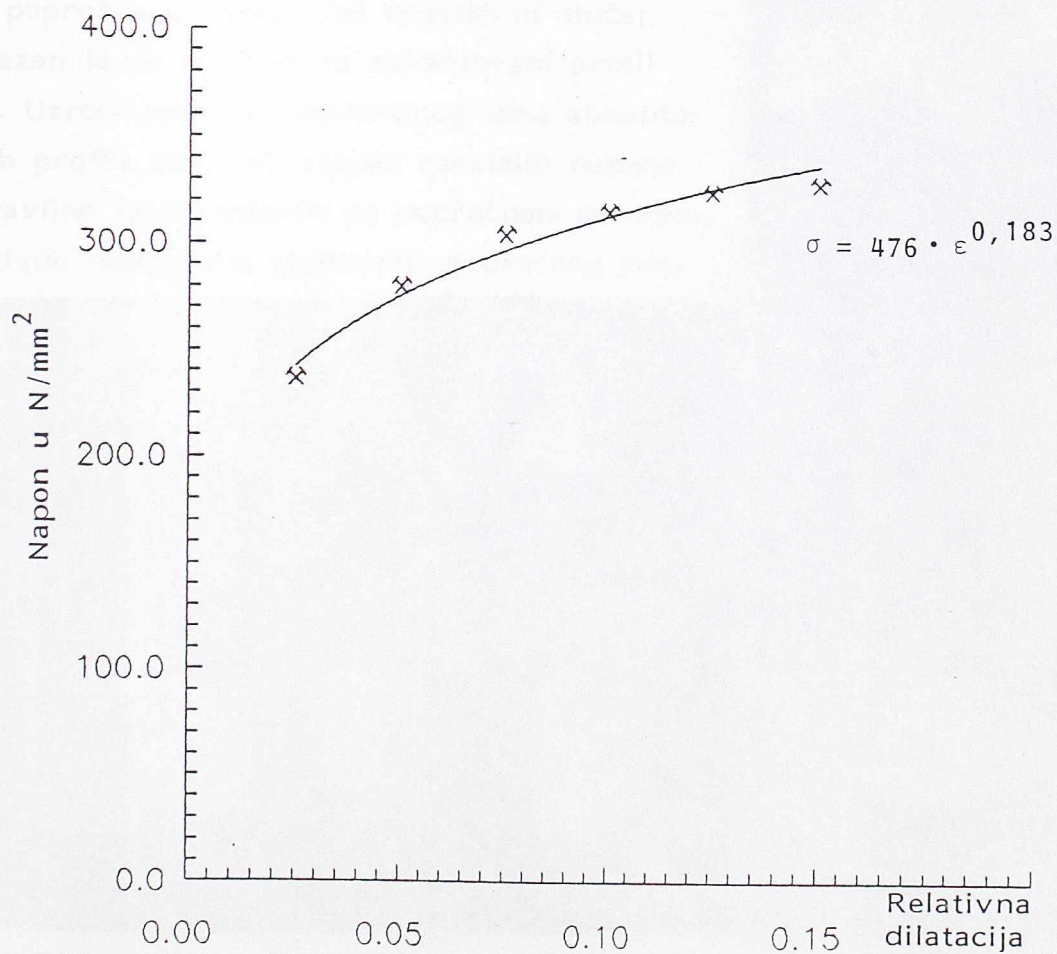
5. Vrednosti za koeficijent čvrstoće k i eksponent deformacijskog ojačanja n iz izraza (6) određene su eksperimentalno i iznose za čelik Č.0361 $k = 626 \text{ N/mm}^2$ i $n = 0,177$ a za čelik Č.0148 $k = 476 \text{ N/mm}^2$ i $n = 0,183$. Vrednosti za k i n dobijene inostranim ispitivanjima kretale su se u intervalu $k = 483-787 \text{ N/mm}^2$ i $n = 0,13-0,28$. Pri određivanju vrednosti za k i n korišćen je program GRAPHER koji je odredio optimalnu stepenu funkciju za dobijene eksperimentalne rezultate. Stepenu podudarnosti primenjene stepene funkcije i eksperimentalnih rezultata (oznaka krst) vidi se na sl. I-58 i sl. I-59.



Sl. I-57 Oblici dijagrama $\sigma - \epsilon$ iz ravnog dela i iz ugla profila



Sl. I-58 Eksperimentalna i računska funkcija ojačanja za čelik Č.0361



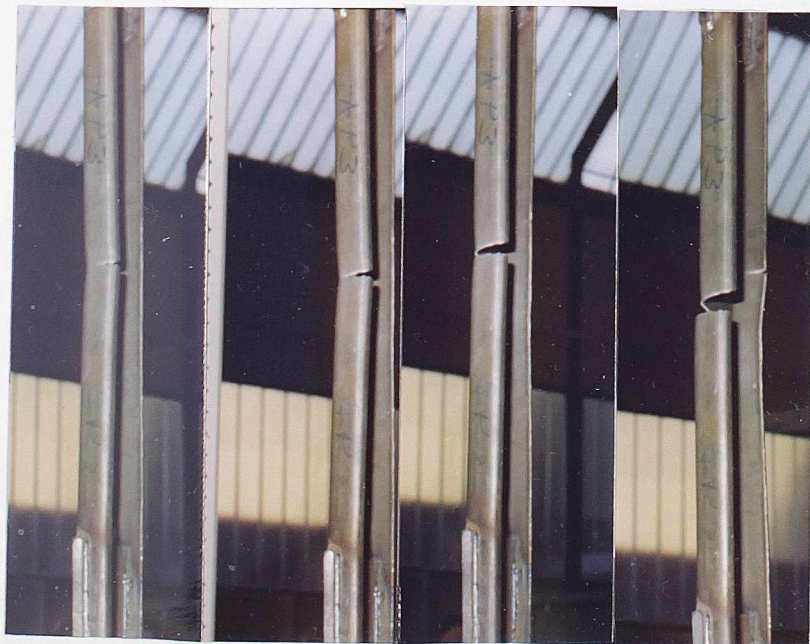
Sl. I-59 Eksperimentalna i računska funkcija ojačanja za čelik Č.0148

6. Na osnovu uporedjenja rezultata povećanja granice razvlačenja materijala uglova u odnosu na osnovni materijal potvrđen je bitan uticaj odnosa σ_m/σ_v na stepen povećanja, tj. što je ovaj odnos veći i ojačanje je veće. Tako čelik Č.0148 kod koga je $\sigma_m/\sigma_v = 1,54$ ima povećanje od 81%, a čelik Č.0361 gde je $\sigma_m/\sigma_v = 1,42$ samo 67%.

7. Smanjenje duktilnosti materijala uglova ne zavisi od tehnologije proizvodnje i iznosi 70% za čelik Č.0361, a 80% za čelik Č.0148. Duktilnost rebra profila takodje ne zavisi od tehnologije proizvodnje i ista je kao i za osnovni materijal. Što se tiče nožice profila, kod abkantovanih profila nema promene duktilnosti u odnosu na osnovni materijal, dok je kod valjanih profila ona smanjena za oko 10%.

8. Modul elastičnosti neznatno menja svoje vrednosti po poprečnom preseku profila kao i u zavisnosti od tehnologije proizvodnje. Najveća promena je u uglovima profila gde je došlo do povećanja modula elastičnosti za oko 3%.

Rezultati opita zatezanja celih profila prikazani su u Tabeli I-12 i na slikama I-40 do I-45. Zahvaljujući dispoziciji ispitivanja, lom profila se uglavnom javlja oko sredine dužine profila. Ni na jednom uzorku nije došlo do loma po šavu. Valjani profili imaju relativno pravilan lom (sl. I-38) dok se abkantovani profili dosta nepravilno lome (sl. I-39). Na sl. I-60 prikazane su faze loma abkantovanog profila AP3, na kojoj se vidi da se lom događa u dva poprečna preseka. Još drastičniji slučaj prikazan je na sl. I-61 za abkantovani profil AP1. Uzroci ovakvog nepravilnog loma abkantovanih profila su: veći stepen zaostalih napona nepravilno raspoređenih po poprečnom preseku, relativno neprecizna geometrija poprečnog pre-



Sl. I-60 Faze loma abkantovanog profila

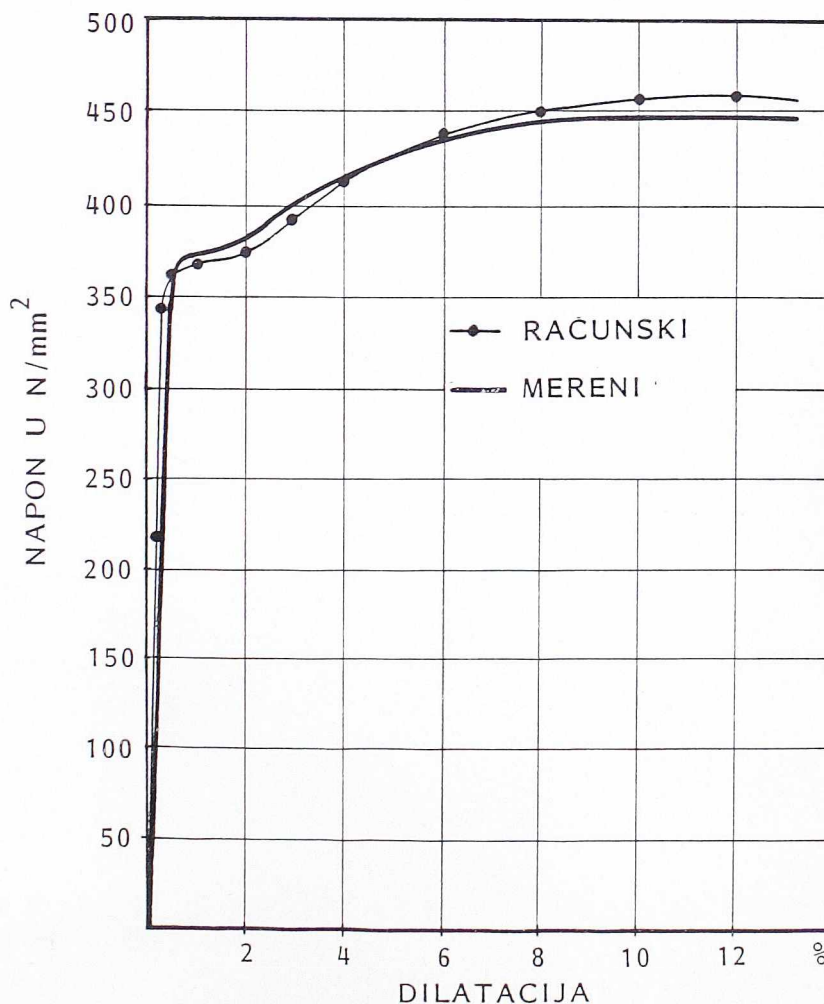


Sl. I-61 Lom abkantovanog profila AP1

seka profila, izraženije deformacije od procesa proizvodnje po dužini štapa, eventualno veće nagnječenje pojedinih delova u toku proizvodnje usled nepreciznog podešavanja gornjeg ili donjeg dela prese. Kod profila proizvedenih hladnim valjanjem precizna tehnologija proizvodnje (eliminisanje faktora čovek) svodi na najmanju moguću meru pomenute nepreciznosti i manjkavosti.

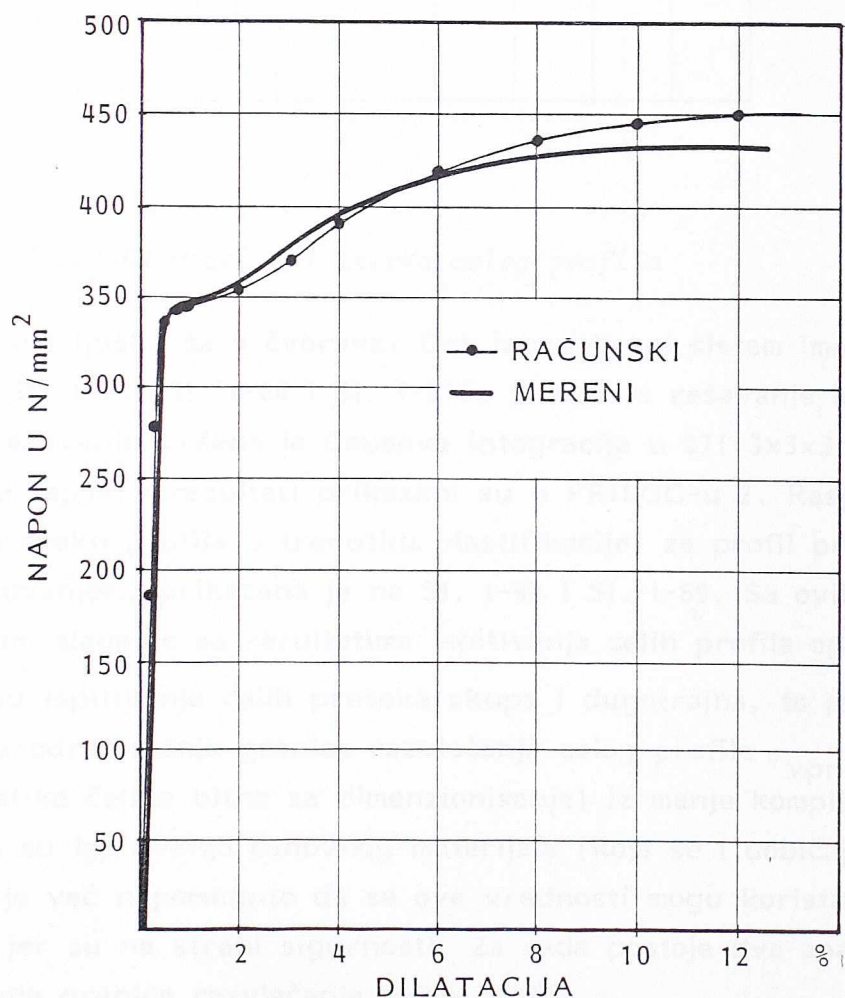
Na sl. I-62 i sl. I-63 izvršeno je uporedjenje $\sigma - \epsilon$ krivih pri ispitivanju celih profila na zatezanje i računskih $\sigma - \epsilon$ krivih za valjane i abkantovane profile. Računske $\sigma - \epsilon$ krive dobijene su analitički iz $\sigma - \epsilon$ krivih za svaki deo preseka (uglovi, rebro i nožice) na sledeći način:

- poprečni presek se izdela na nekoliko delova od kojih svaki ima približno isti oblik $\sigma - \epsilon$ krive po celoj širini,
- utvrdi se prosečna $\sigma - \epsilon$ kriva za svaki deo,
- napon koji odgovara određenoj deformaciji svakog dela množi se sa odnosom površine tog dela i celog preseka,
- suma svih ovako dobijenih napona je merodavan napon za ceo presek pri oredjenom izduženju,
- postupak se ponavlja za više vrednosti izduženja i obrazuje se $\sigma - \epsilon$ kriva celog preseka.



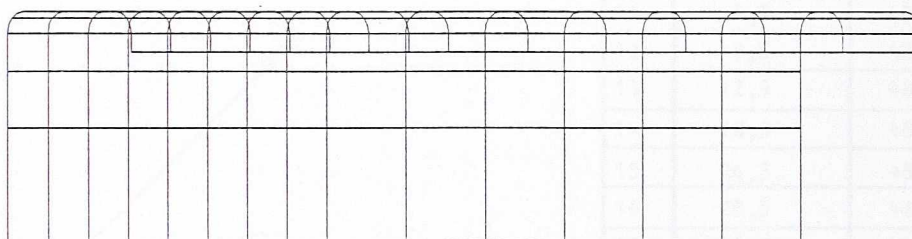
Sl. I-62 Kriva $\sigma - \epsilon$ dobijena ispitivanjem celog profila i analitički za profil proizveden valjanjem

Ovaj postupak je nepraktičan i monoton posao, ali je poslužio kao najtačnija kontrola predviđanja $\sigma - \epsilon$ krive celog preseka. Tačnost ovih rezultata u poredjenju sa rezultatima ispitivanja celih profila lako je uočljiva sa sl. I-62 i I-63. Eksperimentalne krive se dobro slažu sa računskim tako da je kod valjanih profila izmerena granica razvlačenja veća za 5%, a zatezna čvrstoća manja 3%, dok je kod abkantovanog profila izmerena granica razvlačenja veća 3%, a zatezna čvrstoća manja 5%. Objašnjenje za veću izmerenu granicu razvlačenja leži u tome da se ojačanje postiže na većoj zoni od površine ugla (ova razlika je stoga i veća kod valjanih profila), a manje vrednosti izmerenih zateznih čvrstoća su usled lokalnog savijanja uzorka pri većim silama. Procentualno izduženje celog profila ne zavisi od tehnologije proizvodnje, i za ispitivani profil iznosi 14-15%, što pokazuje da hladno oblikovanje ostavlja dovoljnu duktilnost preseku u celini, mada duktilnost opada povećanjem procentualnog učešća delova preseka koji su pretrpeli hladno oblikovanje.



Sl. I-63 Kriva $\sigma - \epsilon$ dobijena ispitivanjem celog profila i analitički za profil proizveden abkantovanjem

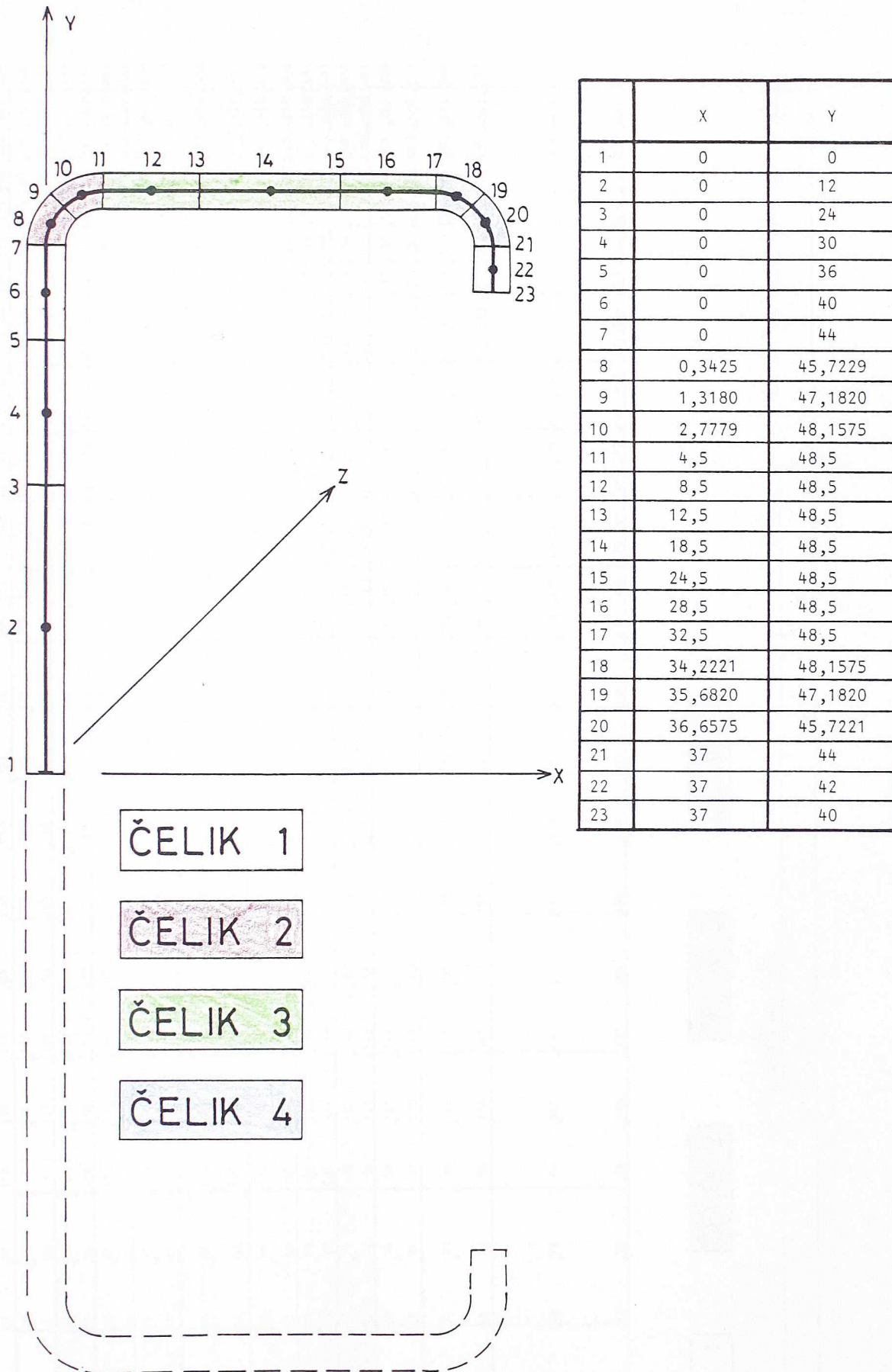
Da bi se izvršila numerička simulacija ponašanja celog profila pri opitu zatezanjem, imajući rezultate ispitivanja epruveta izvadjenih iz pojedinih delova poprečnog preseka profila (rebro, nožice i uglovi), upotrebljena je metoda konačnih elemenata. Analiza je sprovedena programom PAK koji je razvijen na Mašinskom fakultetu Univerziteta "Svetozar Marković" u Kragujevcu. Program PAK služi za nelinearnu statičku i dinamičku analizu konstrukcija. U ovom primeru upotrebljena je materijalna nelinearnost, tj. svakom elementu su pripisane osobine dobijene ispitivanjem epruveta. Za analizu je iskorišćena 1/4 modela celog profila jer je uzorak dvoravanski simetričan(Sl. I-64). Modeliranje je izvršeno sa elementi-



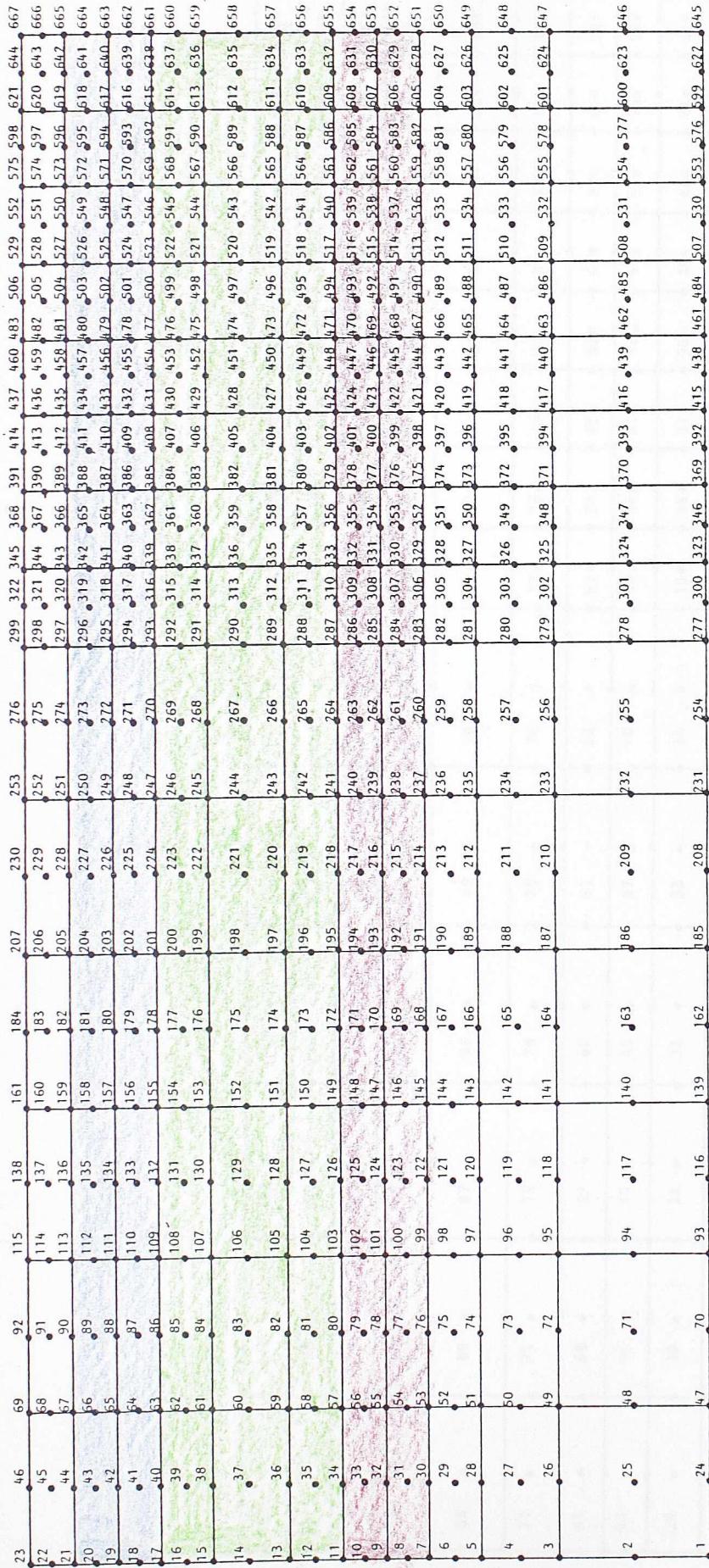
Sl. I-64 Model 1/4 uzorka celog profila

ma izoparametarske ljuske sa 9 čvorova. Ceo izmodelirani sistem ima 667 čvorova i 154 elementa(Sl. I-65, Sl. I-66 i Sl. I-67). Sistem za rešavanje imao je 3229 jednačina. Pri rešavanju vršena je Gausova integracija u 27(3x3x3) tačaka po elementu. Ulazni fajlovi i rezultati prikazani su u PRILOG-u 2. Raspodela napona po poprečnom preseku profila u trenutku plastifikacije, za profil proizveden valjanjem i abkantovanjem, prikazana je na Sl. I-68 i Sl. I-69. Sa ovih slika lako je uočljivo idealno slaganje sa rezultatima ispitivanja celih profila opitom zatezanja.

Kako su ispitivanja celih preseka skupa i dugotrajna, to je celishodnije pronaći način za odredjivanje granice razvlačenja celog profila σ_{vpr} (što je mehanička karakteristika čelika bitna za dimenzionisanje) iz manje komplikovanih ispitivanja, kao što su ispitivanja osnovnog materijala (koja se i uobičajeno rade zbog atesta). Ranije je već napomenuto da se ove vrednosti mogu koristiti i za opterećenje pritiskom jer su na strani sigurnosti. Za sada postoje dva analitička postupka za odredjivanje granice razvlačenja celog profila σ_{vpr} .



Sl. I-65 Prvi režanj izmodeliranog poprečnog preseka sa koordinatama čvorova



ČELIK 1

ČELIK 2

ČELIK 3

ČELIK 4

12 x 12 = 144

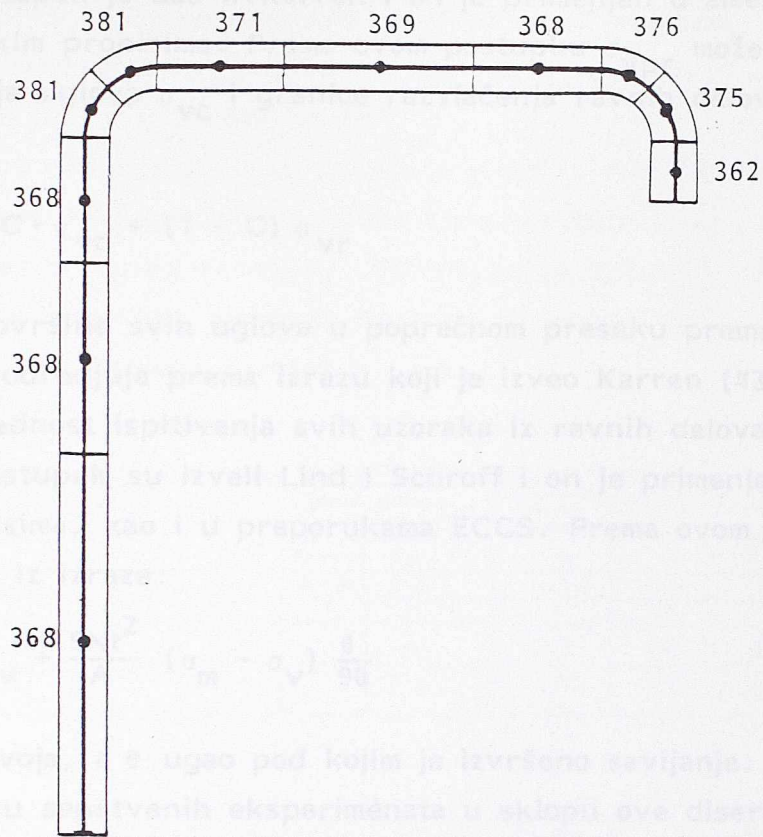
240

16 x 6 = 96

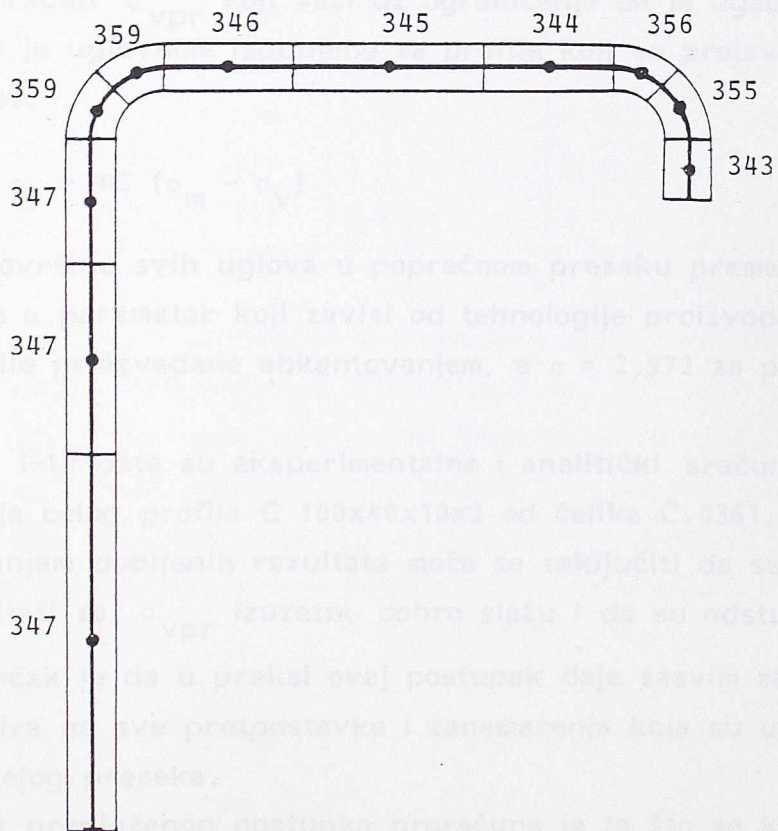
Sl. I-66 Obeležavanje čvorova

141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Sl. I-67 Obeležavanje elemenata



Sl. I-68 Raspodela napona pri plastifikaciji u poprečnom preseku profila proizvedenog valjanjem



Sl. I-69 Raspodela napona pri plastifikaciji u poprečnom preseku profila proizvedenog abkantovanjem

Prvi postupak je dao W. Karren i on je primenjen u američkim, australijskim i čehoslovačkim propisima. Prema ovom postupku σ_{vpr} može se odrediti iz granice razvlačenja uglova σ_{vc} i granice razvlačenja ravnih delova preseka σ_{vr} na osnovu izraza:

$$\sigma_{vpr} = C \cdot \sigma_{vc} + (1 - C) \sigma_{vr} \quad (66)$$

gde je C odnos površine svih uglova u poprečnom preseku prema površini celog preseka. σ_{vc} se određuje prema izrazu koji je izveo Karren (43), a σ_{vr} se dobija kao srednja vrednost ispitivanja svih uzoraka iz ravnih delova.

Drugi postupak su izveli Lind i Schroff i on je primenjen u kanadskim i britanskim propisima, kao i u preporukama ECCS. Prema ovom postupku σ_{vpr} može se sračunati iz izraza:

$$\sigma_{vpr} = \sigma_v + \frac{5Nt^2}{A} (\sigma_m - \sigma_v) \frac{\theta}{90} \quad (67)$$

gde je N broj prevoja, a θ ugao pod kojim je izvršeno savijanje.

Na osnovu sopstvenih eksperimenata u sklopu ove disertacije uz obuhvatanje dve tehnologije proizvodnje, a uzimajući u obzir teorijsku osnovu linearnog ojačanja baziranu na istraživanjima Lind-a i Schroff-a, predlaže se sledeći originalni izraz za proračun σ_{vpr} koji važi uz ograničenja da je ugao savijanja $\theta = 90^\circ$ i da je $R = t$, što je uglavnom ispunjeno za profile koji se proizvode u Jugoslaviji. Ovaj izraz glasi:

$$\sigma_{vpr} = \sigma_v + \alpha C (\sigma_m - \sigma_v) \quad (68)$$

gde je C odnos površine svih uglova u poprečnom preseku prema površini celog preseka profila, a α parametar koji zavisi od tehnologije proizvodnje i iznosi $\alpha = 2,123$ za profile proizvedene abkantovanjem, a $\alpha = 2,972$ za profile proizvedene valjanjem.

U Tabeli I-13 date su eksperimentalne i analitički sračunate vrednosti granice razvlačenja celog profila C 100x40x10x3 od čelika Č.0361.

Analiziranjem dobijenih rezultata može se zaključiti da se računski i eksperimentalni rezultati za σ_{vpr} izuzetno dobro slažu i da su odstupanja na strani sigurnosti. Zaključak je da u praksi ovaj postupak daje sasvim zadovoljavajuće rezultate bez obzira na sve pretpostavke i zanemarenja koja su učinjena pri određivanju σ_{vpr} celog preseka.

Prednost predloženog postupka proračuna je ta što se koeficijentom α uvodi u proračun granice razvlačenja celog profila i tehnologija proizvodnje, što nije slučaj sa izrazom Lind-a i Schroff-a, a postupak je jednostavniji od onog predloženog od strane Karren-a jer je dovoljno raspolagati samo podacima o karakteristikama osnovnog materijala (bez ispitivanja ravnih delova profila).

U Tabeli I-14 uporedjene su dobijene vrednosti za σ_{vpr} različitih oblika poprečnih preseka (U i L) prema navedenim izrazima. Pretpostavlja se da su profili proizvedeni abkantovanjem od čelika Č.0361 sa karakteristikama osnovnog materijala $\sigma_v = 240 \text{ N/mm}^2$ i $\sigma_m = 360 \text{ N/mm}^2$.

Takodje, treba naglasiti da povećana granica razvlačenja celog profila σ_{vpr} ne sme da prekorači vrednost zatezne čvrstoće osnovnog materijala ili 1,2 granice razvlačenja osnovnog materijala. Od velike je važnosti reći da se ovo povećanje ne može uzeti u obzir kada se elementi zavaruju, galvanizuju, ili su podvrgnuti bilo kakvom termičkom tretmanu.

Tabela I-13

UZORAK	Osnovni materijal			Odnos površine uglova C	Analički dobijene vrednosti granice razvlačenja profila σ_{vpr}			Ispitivanje celih profila		Odnosi za upoređenje			Povećanje $\frac{\sigma}{\sigma_0}$	
	Granica razvlačenja σ_v	Zatezna čvrstoća σ_m	Odnos $\frac{\sigma_m}{\sigma_v}$		Karren	Lind i Schroff	Predloženi izraz (68)	Granica razvlačenja σ_{vpr}	Zatezna čvrstoća σ_{mpr}	Odnos $\frac{\sigma}{\sigma_0}$	Odnos $\frac{\sigma}{\sigma_1}$	Odnos $\frac{\sigma}{\sigma_2}$		
														N/mm ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
C100x40 x10x3	VALJANI ABKANTOVAN	302	429	1,42	0,16	362	344	362	371	448	1,02	1,08	1,02	19,86
						344		345	346	433	1,01	1,01	1,00	14,24

Tabela I-14

PROFIL	Osnovni materijal			Karren		Lind i Schroff		Predloženi izraz (68)	
	σ_m	σ_v	$\frac{\sigma_m}{\sigma_v}$	σ_{vpr}	Δ	σ_{vpr}	Δ	σ_{vpr}	Δ
	N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²	%	N/mm ²	%	N/mm ²	%
U 100x50x3	360	240	1,5	251	4,53	259	7,99	258	7,43
U 60 x60x4	360	240	1,5	256	6,87	269	12,12	268	11,67
U 73x40x2	360	240	1,5	249	3,8	256	6,82	256	6,82
L 60x60x4	360	240	1,5	252	4,99	261	8,81	261	8,81

Na osnovu iznetih zaključaka o efektima primenjene tehnologije hladnog oblikovanja na dobijanju HOP može se, uz već rečeno, zaključiti da se hladnim valjanjem postiže viši stepen povećanja mehaničkih karakteristika HOP nego postupkom abkantovanja (19,86% prema 14,24% kolona 14 u Tabeli I-13), kao i da se pritom osigurava veća preciznost oblika i po poprečnom preseku i po dužini, što ima pozitivan uticaj na ponašanje ovih profila pod opterećenjem u nosećim konstrukcijama.

2.4. Primena efekta hladnog oblikovanja na elemente opterećenje na savijanje

Imajući u vidu sve ranije analizirane efekte hladnog oblikovanja koji se javljaju kod hladno oblikovanih profila, ovde će biti prikazan način primene efekata ojačanja pri projektovanju elemenata opterećenih na savijanje.

Elementi opterećeni na savijanje moraju zadovoljiti sledeće uslove:

$$\int_A \sigma dA = 0 \quad (69)$$

$$\int_A \sigma \cdot y \cdot dA = M \quad (70)$$

Kada su definisane geometrijske karakteristike profila i kriva $\sigma - \varepsilon$ moguće je iz (69) odrediti položaj neutralne ose preseka, a iz (70) se može odrediti otporni momenat.

Kod velikog broja hladno oblikovanih profila opterećenih na savijanje u pritisnutim delovima peseka dolazi do izbočavanja, npr. pritisnute nožice. Obuhvatanje ovog efekta ostvaruje se konceptom efektivne širine, bilo za neukružene ili ukružene nožice, što se može odrediti na osnovu nacionalnih standarda kao što su:

- Za ukružene nožice prema AISI:

$$\text{Ako je } b/t \leq 449/\sqrt{\sigma} \text{ cela nožica je efektivna } b_e = b \quad (71)$$

$$\text{Ako je } b/t > 449/\sqrt{\sigma} \text{ onda je } b_e = \frac{664,5}{\sqrt{\sigma}} \cdot t \cdot \left[1 - \frac{145}{(b/t)\sqrt{\sigma}} \right] \quad (72)$$

gde je: b/t = odnos širine ravnog dela nožice i debljine

b_e = efektivna širina

σ = stvarni napon u pritisnutom elementu sračunat na osnovu proračuna efektivne širine.

- Za ukružene ili neukružene nožice prema kanadskim propisima:

$$\text{Ako je } b/t \leq 290\sqrt{k/\sigma} \text{ cela nožica je efektivna } b_e = b \quad (73)$$

$$\text{Ako je } b/t > 290\sqrt{k/\sigma} \text{ onda je } b_e = 428\sqrt{\frac{k}{\sigma}} \left[1 - \frac{93,5}{(b/t)}\sqrt{\frac{k}{\sigma}} \right] - R \quad (74)$$

gde je: $k = 4,0$ za ukružene pritisnute elemente

$k = 0,5$ za neukružene pritisnute elemente

$R = 0$ kada je $b/t < 60$

$R = 0,1 (b/t) - 6$ kada je $b/t \geq 60$

Ponašanje hladno oblikovanih profila, kod kojih je došlo do izbočavanja pritisnutih delova, je takvo da se pritisnuti deo preseka smanjuje, prema navedenim izrazima, što izaziva pomeranje neutralne ose. Pretpostavka o ravnim presecima pre i za vreme savijanja važi. U ovim uslovlima rešavanje izraza (69) i (70) zahteva postupak koji se sastoji u sledećem:

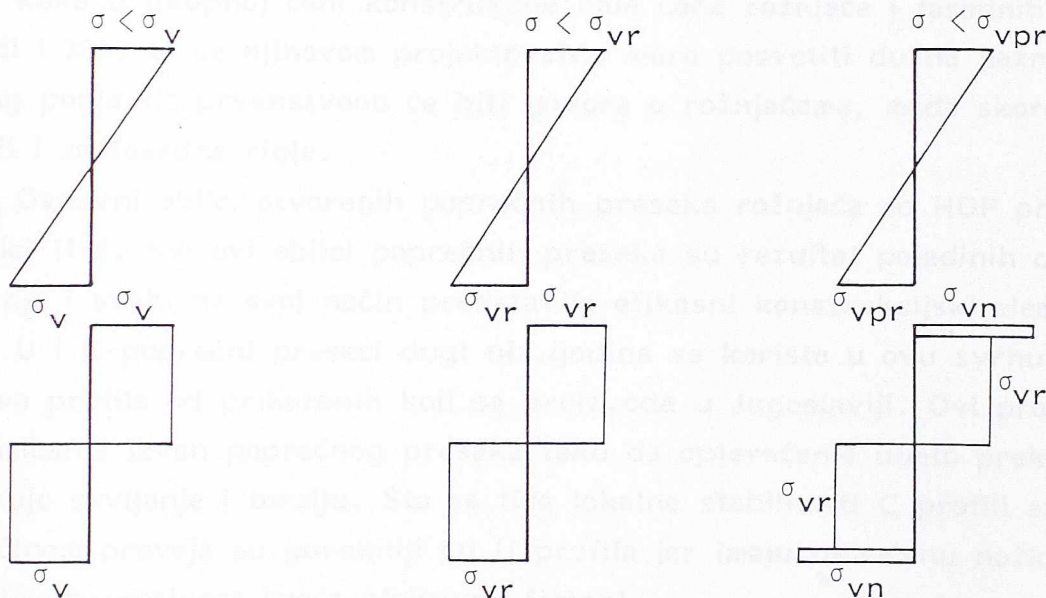
1. Presek se izdeli na više delova, položaj neutralne ose i dilatacije u krajnjim vlaknima se pretpostavlja, pa se sračunavaju dilatacije u svim delovima,
2. Iz odgovarajuće veze $\sigma - \varepsilon$ za materijal u različitim delovima preseka (uglovi, ravni delovi, itd.) računaju se naponi koji odgovaraju sračunatim dilatacijama;

3. Integral (69) sračuna se sumiranjem proizvoda napona i površina odgovarajućih delova. Kod pritisnutih delova koristi se efektivna širina. Uslov $\sum \sigma \Delta A = 0$ zadovoljava se iterativno, a zatim se računa $\sum \sigma y \Delta A$, gde je y rastojanje težišta svakog elementa od neutralne ose.

Ovaj postupak može biti veoma dug, tako da je potrebno uraditi program za računar, uz mogućnost unošenja različitih $\sigma - \epsilon$ krivih za pojedine delove.

Za proračun granične nosivosti mogu se primeniti dva postupka. Prvi se zasniva na teoriji elastičnosti, čime se podrazumeva da je presek otkazao kada napon u krajnjem vlaknu dostigne granicu razvlačenja. Drugi počiva na teoriji plastičnosti i podrazumeva se da se presek pre loma ceo plastifikovao. Prva metoda ima tri moguće alternative:

1. Zanemarivanjem ojačanja pri hladnom oblikovanju primenom granice razvlačenja osnovnog materijala.
2. Uzimajući u obzir ojačanja samo u ravnim delovima, a ograničavajući ojačanje u uglovima prema ravnim delovima.
3. Koristeći prosečne izmerene vrednosti za ravne delove i uglove.



Sl. I-70 Raspored napona za proračun elemenata opterećenih na savijanje
 a) prema teoriji elastičnosti
 b) prema teoriji plastičnosti

Metoda po teoriji plastičnosti takodje podrazumeva tri mogućnosti od kojih su prve dve iste kao u prethodnom, a u trećoj se koriste stvarne izmerene vrednosti posebno za ravne delove rebra, a posebno srednja vrednost izmerenih vrednosti uglova i ravnog dela nožice.

Raspored napona po preseku za proračun elemenata opterećenih na savijanje prikazan je na sl. I-70 za obe metode proračuna. Oznake primenjene na slici su sledeće: σ_v - granica razvlačenja osnovnog materijala, σ_{vr} - granica razvlačenja ravnih delova, σ_{vpr} - prosečna granica razvlačenja celog profila i σ_{vn} - srednja vrednost izmerenih granica razvlačenja uglova i ravnog dela nožice. Prosečna granica razvlačenja celog profila σ_{vpr} može se sračunati na osnovu izraza (66).

II OPTIMIZACIJA PRORAČUNA I KONSTRUKCIJSKOG OBLIKOVANJA HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA OPTERECENIH NA SAVIJANJE PRI PRIMENI ZA ROŽNJACE

1. UVOD

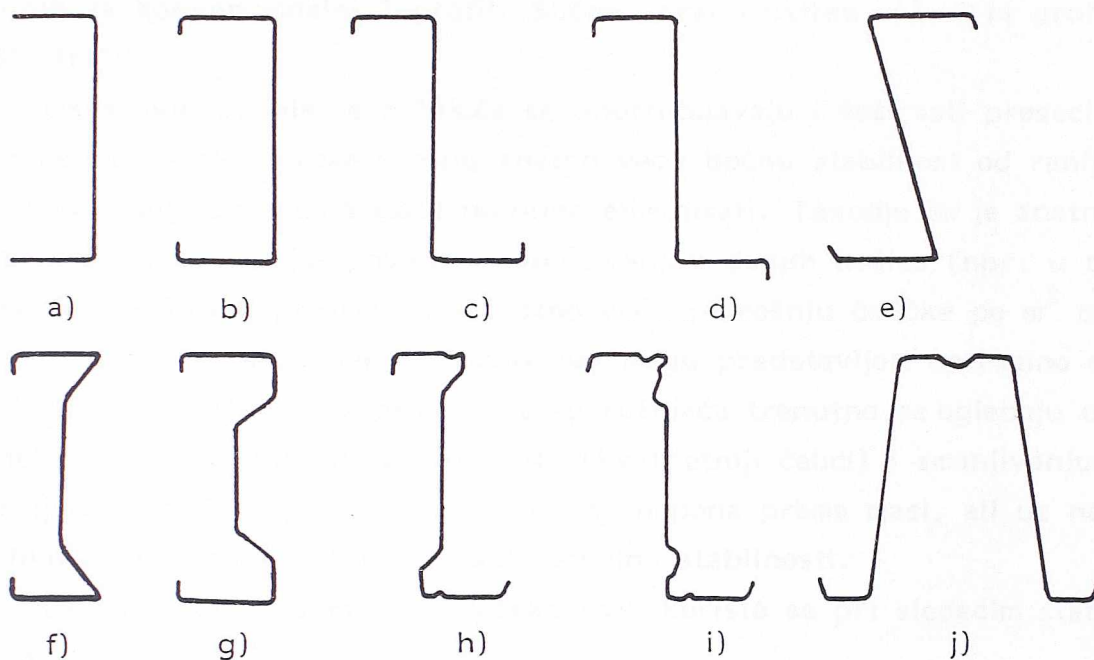
Hladno oblikovani profili upotrebljavaju se kao konstrukcijski element za nošenje krovnog pokrivača i fasadne obloge kod hala više od 30 godina. Danas su oni, u razvijenim zemljama u velikoj meri zamenili vruće valjane profile u ovoj oblasti primene zbog svojih nesumnjivih prednosti. Za ovu namenu koriste se preseći sa visinama od 100 mm do 250 mm, mada postoje rešenja i sa visinama do 350 mm. Kako u ukupnoj ceni konstrukcije hale cena rožnjača i fasadnih rigli može dostići i 30%, to se njihovom projektovanju mora posvetiti dužna pažnja. U okviru ovog poglavlja prvenstveno će biti govora o rožnjačama, mada skoro sve rečeno važi i za fasadne rigle.

Osnovni oblici otvorenih poprečnih preseka rožnjača od HOP prikazani su na slici II-1. Svi ovi oblici poprečnih preseka su rezultat pojedinih ciklusa istraživanja i svaki na svoj način predstavlja efikasni konstrukcijski element.

U i C-poprečni preseći dugi niz godina se koriste u ovu svrhu i to su jedina dva profila od prikazanih koji se proizvode u Jugoslaviji. Ovi profili imaju centar smicanja izvan poprečnog preseka tako da opterećenje uneto preko nožice prouzrokuje savijanje i torziju. Što se tiče lokalne stabilnosti C profili sa adekvatnom veličinom prevoja su povoljniji od U profila jer imaju ukrućenu nožicu, a samim tim i veću nosivost (veća efektivna širina).

Z-nosači, kada opterećenje deluje u ravni rebra, nemaju tendenciju ka uvijanju za razliku od U i C-profila zbog toga što se, centar smicanja poklapa sa težištem preseka. Kako Z-preseći imaju kose glavne ose inercije ($\sim 17^\circ$ u odnosu na rebro), javlja se značajno biaksijalno savijanje pa takav presëk vertikalno opterećen ima vertikalna i horizontalna pomeranja. Pošto se presëk pomera u horizontalnom pravcu, to se i aplicirano opterećenje takodje pomera sa nosačem i više nije u istoj ravni sa reakcijama na oba kraja. Ovo prouzrokuje uvijanje, što daje dopunski napon čime se znatno umanjuje kapacitet nosivosti. U realnoj konstrukciji rožnjače, gde se opterećenje unosi preko nožica, ovo uvijanje je još značajnije. Medjutim, i pored ovoga Z-preseći različitog oblika, su najviše primenjivani oblik za rožnjače jer se adekvatno primenjenim konstrukcijskim merama uticaj torzije

može svesti na minimalnu meru.



Sl. 11-1 Oblici poprečnih preseka rožnjača od HOP

U nekim industrijskim pogonima C i Z-preseci sa ukrućenim nožicama su nepoželjni zbog mogućnosti taloženja produkata proizvodnje, koji mogu biti opasni iz razloga požara, korozije, zdravlja ili nekog drugog razloga (npr. mlinovi za žito, ugalj, drvna industrija, itd.). Da bi se zadovoljili zahtevi ovih industrija uvedeni su Z profili sa ukrućenom donjom nožicom (Sl. 11-1d) gde je ukrućenje (prevoj) okrenuto na dole.

Kao što je ranije rečeno kod konvencionalnih Z-profila javljaju se mnoge teškoće zbog toga što se glavna osa inercije ne poklapa sa pravcem delovanja vertikalnog opterećenja. Ova mana konvencionalnih Z-rožnjača može se otkloniti time što se nagib rebra izabere tako da glavna osa inercije bude uvek vertikalna (Sl. 11-1e). Na ovaj način se eliminiše komponenta opterećenja od sopstvene težine i snega u pravcu horizontalne glavne ose inercije. Horizontalna komponenta od vetra (pritisak i sisanje) je pri nagibima krovova $\alpha \leq 10^\circ$ veličina nižeg reda u odnosu na druge sile, te se može zanemariti, a rožnjaču tretirati kao nosač izložen savijanju samo oko horizontalne glavne ose.

Sigma preseci (Sl. 11-1f,g) imaju znatno povoljniji položaj centra smicanja, koji se nalazi unutar preseka, te su samim tim manje podložni uvijanju, a prevoji na rebro bitno povećavaju njihovu stabilnost.

Zeta presek (Sl. 11-1h) smanjuje nagib glavnih osa inercije sa $\sim 17^\circ$ kod konvencionalnih na oko 7° , tako da za uobičajene krovne nagibe glavna osa inercije je skoro vertikalna. Dodatna ukrućenja (lokalna profilacija) znatno poboljšavaju lokalnu stabilnost delova preseka uz značajno povećanje srednje granice razvla-

čenja profila (veći broj prevoja). Sve ovo omogućava znatno manje debljine limova od onih za konvencionalni Z-profil. Slične karakteristike važe i za profil ultrazeta (Sl. II-1i).

Osim ovih profila za rožnjače se upotrebljavaju i šeširasti preseci sa ili bez ukrućenja. Ovakvi preseci imaju znatno veću bočnu stabilnost od ranije pomenutih, te se upotreba zatega može potpuno eliminisati. Takođe im je znatno većá torziona krutost koja se još povećava povezivanjem donjih nožica (npr. u trećinama raspona). Šeširasti preseci daju znatno veću potrošnju čelička po m^2 osnove jer imaju dva rebra, ali u nekim slučajevima mogu predstavljati optimalno rešenje.

Glavne tendencije u projektovanju rožnjača trenutno se ogledaju u povećanju mehaničkih karakteristika materijala (kvalitetniji čelici) i smanjivanju debljine materijala iz čega je proistekao viši odnos napona prema masi, ali uz neophodno pažljivo proučavanje složenih efekata lokalne stabilnosti.

Opisani oblici poprečnih preseka HOP koriste se pri sledećim statičkim sistemima:

- sistem proste grede;
- sistem kontinualnog nosača preko dva polja;
- sistem kontinualnog nosača sa podvezicama (navlakama);
- sistem kontinualnog nosača sa preklapanjem.

Sistem proste grede dosta se retko upotrebljava, osim za C i U-preseke. U slučajevima kada je za proračun merodavan ugib, i ako su pri tome dimenzije preseka dovoljne, mogu se upotrebiti kontinualni nosači preko dva polja. Kako je kod ovakvog sistema srednja reakcija značajna to da bi se svi glavni vezači ravnomerno opteretili neophodno je rožnjače naizmenično postavljati što zahteva u svakom drugom redu rožnjaču sistema proste grede u krajnjem rasponu. Kod sistema sa podvezicama (navlakama) susedne rožnjače su povezane podvezicom (navlakom), najčešće istog preseka kao i rožnjača samo obrnuto okrenutom, čime se obezbedjuje polu-kontinuitet, a time i približno izjednačavanje momenta u polju i iznad oslonaca. Sistem sa preklapanjem obezbedjuje udvajanje rožnjača iznad srednjih oslonaca ostvarujući pun kontinuitet kao i ojačanje u oblastima sa maksimalnim momentima savijanja (dupli presek iznad oslonaca). Na mestima gde su potrebna dodatna ojačanja, npr. u krajnjim poljima ili na mestu povećanih lokalnih opterećenja, mogu se primeniti preseci veće debljine (ili duplirani). U i C-preseci mogu se preklapati alternativno postavljanjem ledja u ledja iznad oslonaca, a u krajnjim poljima udvajanjem. Ovakvo rešenje kod U i C- preseka je dosta ekonomično, ali može da uspori postavljanje krovnog pokrivača jer se sredstva za vezu ne mogu postavljati u pravoj liniji.

Veliki problem u projektovanju rožnjača od hladno oblikovanih profila je njihovo ponašanje pri sišućem dejstvu vetra. Pod ovim okolnostima nepridržane

nožice se nalaze u oblasti pritiska pa se javlja mogućnost pojave bočnog izvijanja. Analiza nosivosti rožnjača pod ovim uslovima je kompleksna i zavisi od geometrije rožnjača, uslova oslanjanja, poprečnih ukrućenja, tipa krovnog pokrivača kao i veze sa krovnom pokrivačem. Do danas je urađjen veliki broj postupaka proračuna koji obuhvataju ovu problematiku, od kojih se većina zasniva na eksperimentalnim ispitivanjima, ali ni jedan nije univerzalno prihvatljiv. Ovo je oblast koja zahteva dalja istraživanja, a na sadašnjem stepenu znanja još uvek je neophodno eksperimentalno potvrđivanje projektnih rezultata.

2. POSTUPCI PRORACUNA ROŽNJAČA OD HOP

Pristup analizi u projektovanju masovnih konstrukcija kao što su uobičajene konstrukcije zgrada i hala, bitno se razlikuje od pristupa pri projektovanju konstrukcija pojedinačnih (unikatnih) objekata. U tom pogledu može biti različit pristup analizi pojedinih komponenata konstrukcije, posebno rožnjača. Kod masovnih konstrukcija (velika serija) potrebno je osnovne postavke kao što su stvarno bočno ukrućenje pojedinih elemenata, raspored konstrukcijskih elemenata, detalji veza, stvarno ponašanje čvorova pa i statički proračun, prilagoditi tom pristupu. Cilj ovoga je dobijanje što ekonomičnije konstrukcije, jednostavne proizvodnje u većim serijama sa što manje pojedinačnog rada, male težine i lake i jednostavne montaže. Hladno oblikovani profili, kao element konstrukcije u vidu rožnjača, fasadnih rigli i profilisanih limova, pravilno upotrebljeni, zadovoljavaju navedene zahteve. Iako rožnjače sa značajnim procentom učestvuju u ceni konstrukcije projektanti najmanje vremena utroše na njihov proračun i eventualnu optimizaciju. U okviru rada na ovoj tezi pažnja će biti usmerena na projektovanje kontinualnih sistema rožnjača sa podvezicama (navlakama) i sa preklapanjem.

Statički proračun ovakvih rožnjača treba da obuhvati sledeće faktore od uticaja:

- uobičajenu problematiku nesimetričnih tankozidnih preseka (torzija, dvoosno savijanje, bočno torziono izvijanje, sprečena torzija);
- ukrućenost krovnom pokrivačem imajući u vidu tri osnovna tipa (profilisani čelični ili aluminijumski lim i azbest cementni pokrivač) od kojih svaki zahteva drugačiji tretman, kao i to da na ponašanje istih utiče i debljina i vrsta primenjene termoizolacije, uz diferenciranje gravitacionog od sišućeg opterećenja;
- uticaj zatega ili drugih ukrućenja duž raspona;
- preraspodelu momenata nakon plastifikacije iznad srednjih oslonaca;
- karakteristike podvezice (navlake) moment - rotacija moraju se odrediti eksperimentalno.

Postoje četiri moguća pristupa projektovanju rožnjača od HOP:

- 1) Projektovanje korišćenjem uobičajenih propisa za praktičnu upotrebu neukrućenih nosača od HOP, što podrazumeva elastičnu analizu i zanemarivanje uticaja krovnog pokrivača na stabilnost nosača. U našoj zemlji ne postoje ovakvi propisi dok se u mnogim zemljama Evrope koriste već niz godina
- 2) Empirijsko projektovanje korišćenjem približnih formula koje su na strani sigurnosti (npr. za Z-profile u mnogim propisima). Ovakvo projektovanje daje prilično neekonomična rešenja
- 3) Projektovanje na bazi upotrebe posebno izvedenih metoda proračuna koji uzimaju u obzir uticaj stabilizirajućeg dejstva krovnog pokrivača na rožnjače, što je u značajnom razvoju poslednjih godina u svetu, ali gde još nisu razjašnjeni svi problemi i usaglašeni stavovi po tim pitanjima
- 4) Projektovanje na osnovu eksperimenata što omogućava da se uzmu u obzir svi faktori od uticaja

Autor ove disertacije se opredelio za eksperiment jer on obezbedjuje maksimalnu ekonomičnost pri zadatom nivou sigurnosti. Ovo je relativno skup postupak, ali je isplativ, ako se računa sa primenom za veće količine rožnjača. Osim toga, putem opita mogu se razviti ekonomični sistemi za koje teorijske metode nisu primenljive.

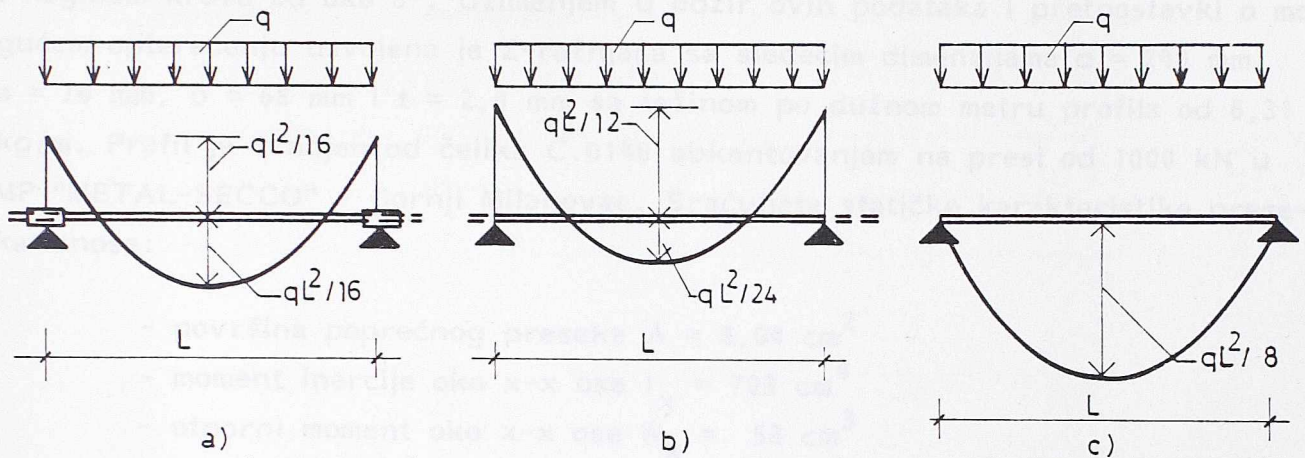
3. PROJEKTOVANJE NA OSNOVU EKSPERIMENTA

3.1. Sistem kontinualnih rožnjača sa podvezicama (navlakama)

3.1.1. Uvod

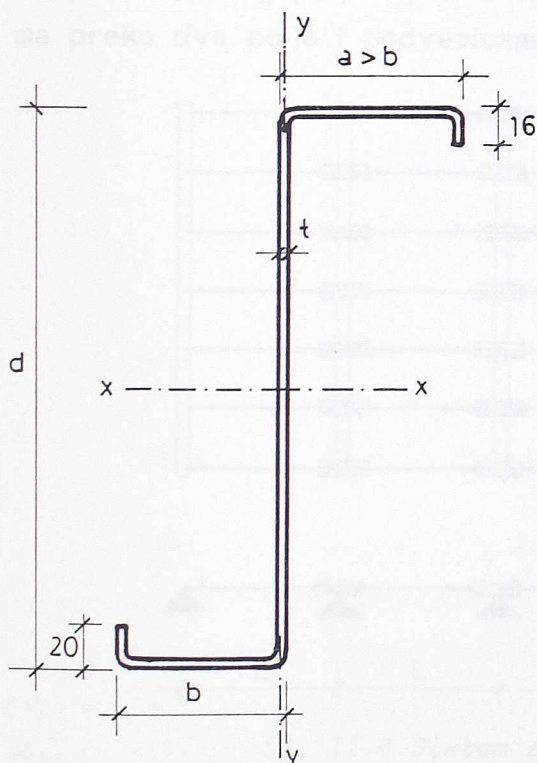
Statički sistem kontinualnih rožnjača sa podvezicama (navlakama) je novijeg datuma i nastao je kao težnja konstruktera za dobijanjem optimalnog statičkog i konstrukcijskog sistema. Suština sistema je da se rožnjače u vidu prostih greda delimično kontinuiraju iznad oslonaca pomoću podvezica određene dužine. Putem delimičnog kontinuiranja u ovom sistemu kontinualnih rožnjača dobijaju se određene povoljnosti u vidu smanjenja momenata savijanja u polju nosača, u odnosu na sistem odgovarajuće proste grede, i iznad oslonaca u odnosu na odgovarajući sistem klasičnog kontinualnog nosača (Sl. II-2). Ako je podvezica (navlaka) dobro projektovana onda ova veza omogućava početak tečenja iznad oslonaca pre nego

što se izvrši plastična deformacija, što u osnovi predstavlja plastičnu preraspodelu čime se postiže izjednačavanje oslonačkih momenata sa onima u polju (Sl. II-2a).



Sl. II-2 Dijagrami momenata savijanja kod rožnjača
 a) Sistem sa podvezicama
 b) Klasičan kontinualni nosač
 c) Prosta greda

Prvi problem koji je trebalo rešiti pri izradi ove teze je izbor optimalnog oblika poprečnog preseka. Nakon detaljne analize usvojen je Z-presek sa različitim širinama nožice (Sl. II-3), kod koga je gornja nožica 6 mm šira od donje čime je



Sl. II-3 Izabrani poprečni presek

omogućeno uvlačenje jednog profila u drugi.

Na ovaj način je ostvareno da i osnovna rožnjača i podvezica (navlaka) budu istog poprečnog preseka, samo suprotno okrenuta. Takođe je vodjeno računa da presek bude tehnološki, tj. da se može proizvoditi valjanjem u našim proizvodnim pogonima u velikim količinama. Ukrućenja nožica (prevoji) tako su projektovani da presek bude izbalansiran tj. da neutralna osa prolazi praktično kroz težište rebra, te su na ovaj način dobijene najveće moguće vrednosti otpornog momenta.

Pre određivanja samih dimenzija profila bilo je potrebno odrediti parametre koji na to utiču. Zbog toga je izvršeno slanje pisma sa pitanjima velikom broju firmi koje se bave projektovanjem i izvođenjem metalnih konstrukcija.

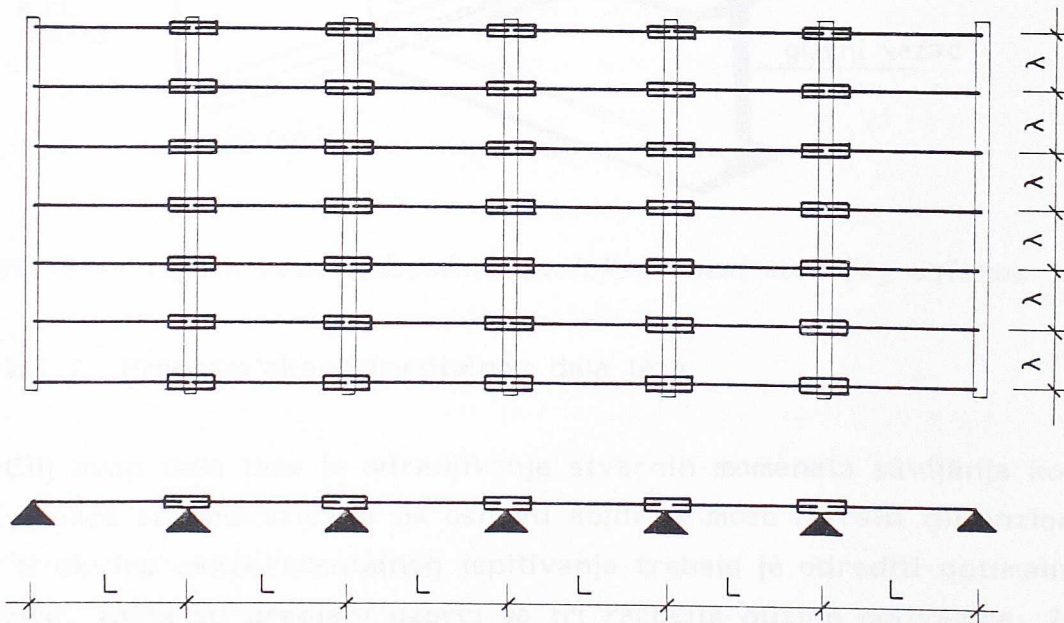
Ova pitanja su tražila odgovor na sledeće informacije o čeličnim halama izgradjenim poslednjih godina: razmak glavnih vezača, nagib krova, razmak rožnjača i tip primenjenog krovnog pokrivača. Posle dobijanja odgovora i sprovedene analize uočeno je

da je najčešći razmak glavnih nosača 6,0 m, a razmak rožnjača 2,0 do 3,0 m. Najveći broj objekata je uradjen sa čeličnim ili aluminijumskim profilisanim limovima i nagibom krova od oko 8° . Uzimanjem u obzir ovih podataka i pretpostavki o mogućem opterećenju usvojena je Z-rožnjača sa sledećim dimenzijama $d = 240$ mm, $a = 76$ mm, $b = 68$ mm i $t = 2,0$ mm sa težinom po dužnom metru profila od 6,31 kg/m. Profil je uradjen od čelika C.0148 abkantovanjem na presi od 1000 kN u MP "METAL-SECCO" - Gornji Milanovac. Sračunate statičke karakteristike preseka iznose:

- površina poprečnog preseka $A = 8,04 \text{ cm}^2$
- moment inercije oko x-x ose $I_x = 703 \text{ cm}^4$
- otporni moment oko x-x ose $W_x = 58 \text{ cm}^3$
- moment inercije oko y-y ose $I_y = 78 \text{ cm}^4$.

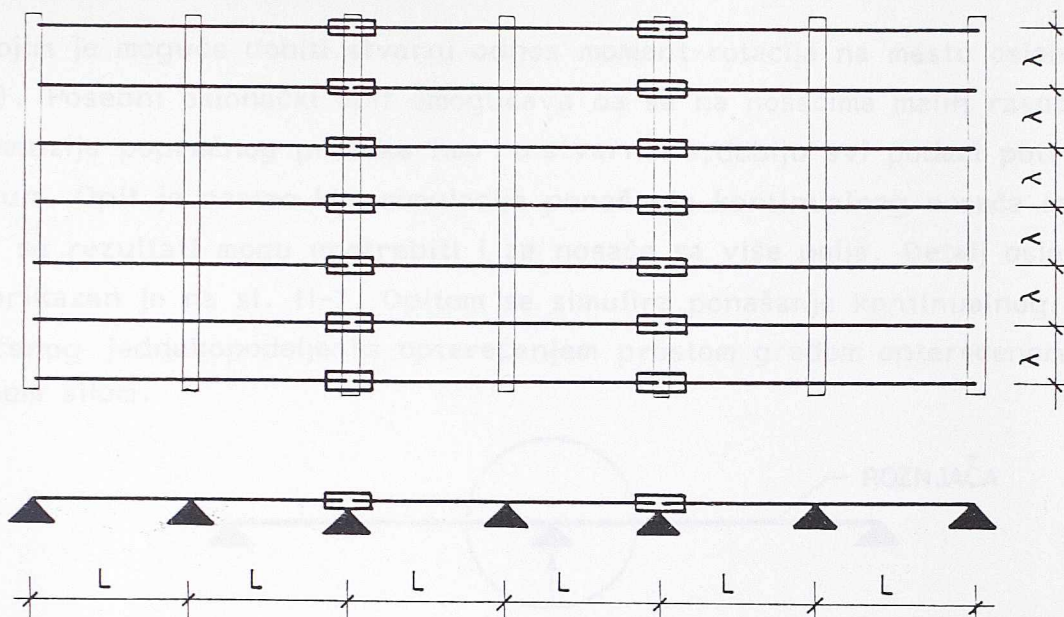
Maksimalna dužina profila dobijenih na ovaj način (abkantovanjem) zavisi od dimenzije prese i u ovom slučaju je iznosila 3000 mm, što je kasnije bio ograničavajući faktor u eksperimentalnom delu teze.

S obzirom na uslove montaže, kod kontinualnih nosača sa podvezicama (navlakama) izvedena su dva sistema prikazana na sl. II-4 i II-5 i to sa rožnjačama preko jednog polja i podvezicama iznad svakog srednjeg oslonca i sa rožnjačama preko dva polja i podvezicama iznad svakog drugog srednjeg oslonca.

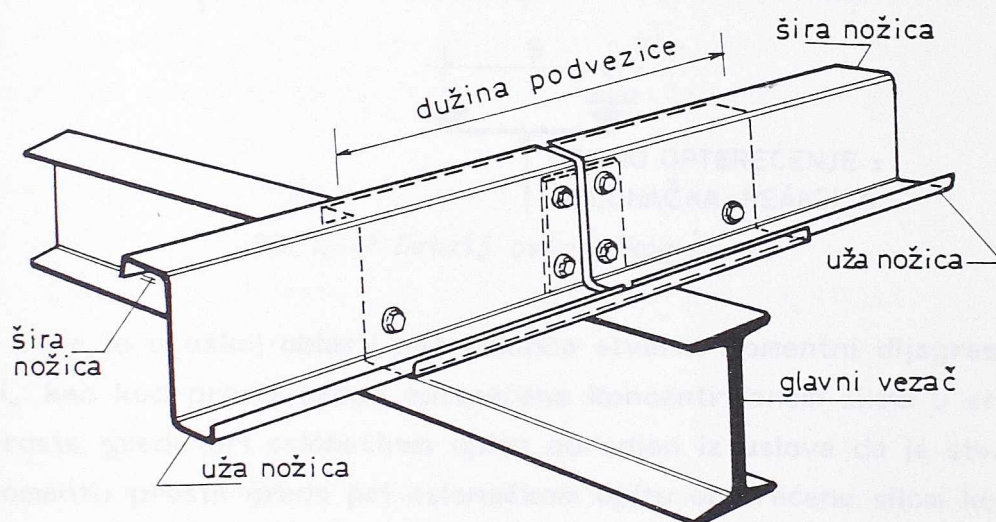


Sl. II-4 Sistem sa rožnjačama preko jednog polja

Veza podvezice (navlake) iznad oslonca ostvaruje se sa 6 M16 kvaliteta 5.6. Zbog tolerancije na montaži sve rupe su 2 mm većeg prečnika od prečnika vrata vijka tj. iznose 18 mm. Izgled predviđjene tipske veze prikazan je na sl. II-6.



Sl. II-5 Sistem sa rožnjačama preko dva polja



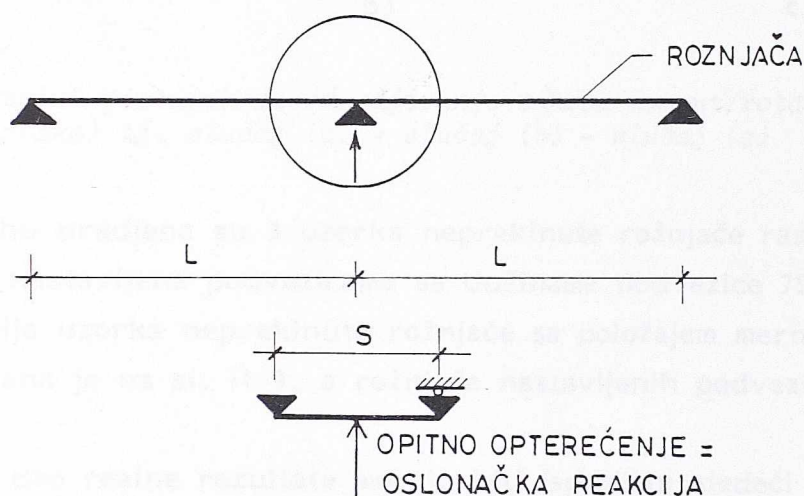
Sl. II-6 Tipaska veza podvezice (navlake) iznad srednjeg oslonca

3.1.2. Program eksperimentalnog dela teze

Cilj ovog dela teze je određivanje stvarnih momenata savijanja kod kontinualnog nosača sa podvezicama na osnovu kojih se može izvršiti dimenzionisanje rožnjače. U okviru eksperimentalnog ispitivanja trebalo je odrediti optimalnu dužinu podvezice, za šta su uradjeni uzorci sa tri različite dužine podvezica: 750 mm, 950 mm i 1150 mm, pa onda za usvojenu optimalnu dužinu odrediti projektne momente savijanja, odnosno uslove za dimenzionisanje.

Zbog uslova proizvodnje uzoraka (dimenzije prese) nije bilo moguće izraditi pravi kontinualni nosač raspona $L = 6,0$ m sa podvezicama, pa njegovim ispitivanjem doći do projektnih momenata savijanja, već je sproveden tzv. oslonački

opit kojim je moguće dobiti stvarni odnos moment-rotacija na mestu oslonca (podvezice). Posebni oslonački opit omogućava da se na nosačima malih raspona, a istih dimenzija poprečnog preseka kao i u stvarnosti, dobiju svi podaci potrebni za proračun. Opit je nastao kao simulacija ponašanja kontinualnog nosača sa dva polja, ali se rezultati mogu upotrebiti i za nosače sa više polja. Detalj oslonačkog opita prikazan je na sl. II-7. Opitom se simulira ponašanje kontinualnog nosača opterećenog jednakopodeljenim opterećenjem prostom gredom opterećenom koncentrisanom silom.



Sl. II-7 Detalj oslonačkog opita

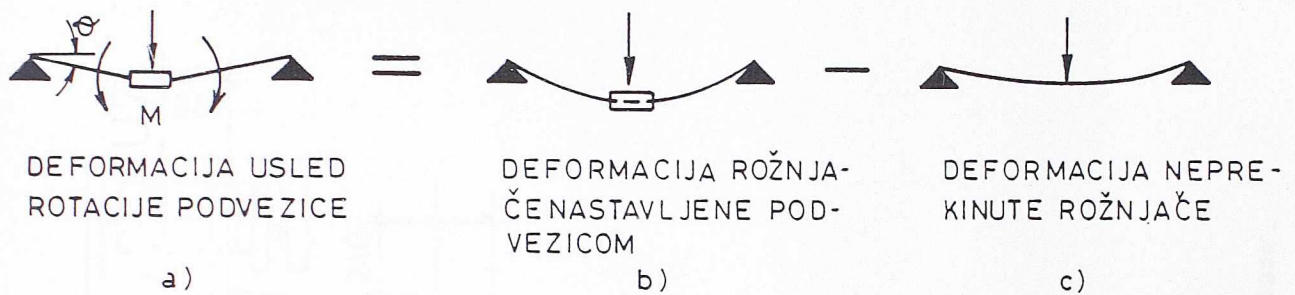
Kako je u uskoj oblasti oko oslonca stvarni momentni dijagram približno trougaoni, kao kod proste grede opterećene koncentrisanom silom u sredini, to je raspon proste grede pri oslonačkom opitu određen iz uslova da je stvarni moment jednak momentu proste grede pri oslonačkom opitu opterećene silom koja je jednaka reakciji srednjeg oslonca stvarnog nosača. To u ovom slučaju daje $s \approx 0,4 L$ odnosno $s = 0,4 \cdot 6,00 = 2,40$ m. Na osnovu oslonačkog opita mogu se odrediti:

- granična kombinacija momenta i reakcije iznad oslonca i
- ponašanje moment-rotacija na srednjem osloncu.

Ovi podaci mogu se dobiti merenjem ugiba pod statičkim opterećenjem i sračunavanjem rotacije poprečnog preseka ili njenim direktnim merenjem.

Kod rožnjača sa podvezicama (navlakama) cilj oslonačkog opita je određivanje krutosti dela rožnjače sa podvezicom i određivanje veze između rotacije podvezice i momenta savijanja koji deluje u datom oslonačkom preseku. Ovo se može dobiti direktnim merenjem rotacije podvezice i sile kojom se opterećuje uzorak, a sračunavanjem izazvanog momenta ili direktnim merenjem ugiba i sila, a sračunavanjem rotacije i momenta. Kako se ugib uzorka sa podvezicom pri opitu sastoji od ugiba usled savijanja i ugiba usled rotacije podvezice (sl. II-8) to se u oslonačkom opitu moraju izvršiti ispitivanja na uzorcima sa i bez podvezice tj. neprekinute i podvezicom nastavljene rožnjače. Za analizu je neophodno znati kolika je

deformacija samo usled rotacije podvezice (navlake).



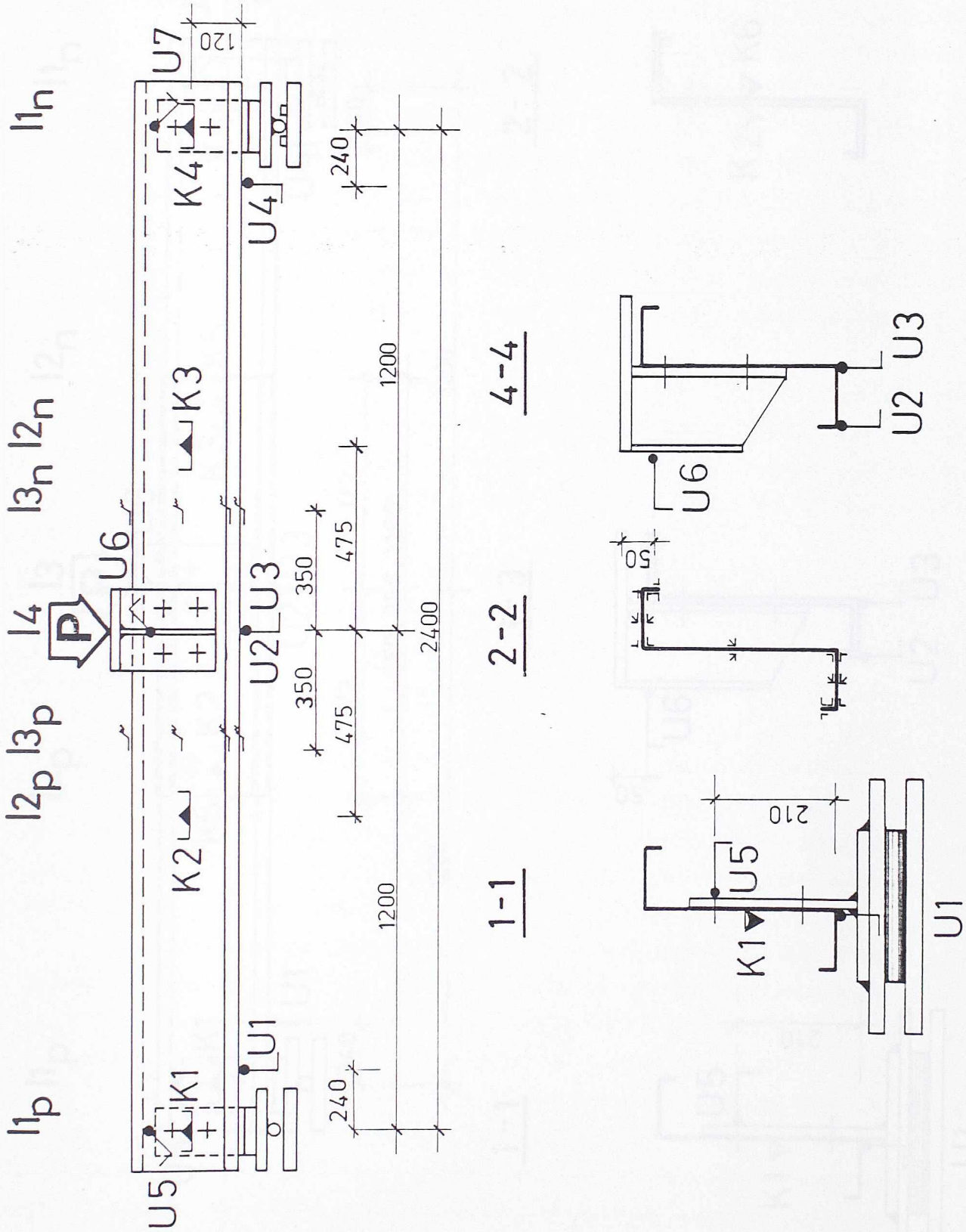
Sl. II-8 Eksperimentalni postupak za određivanje odnosa moment/rotacija podvezice (navlake) tj. slučaj (a) = slučaj (b) - slučaj (c)

U ovu svrhu uradjena su 3 uzorka neprekinute rožnjače raspona 2400 mm i po jedna rožnjača nastavljena podvezicama sa dužinama podvezice 750 mm, 950 mm i 1150 mm. Dispozicija uzorka neprekinute rožnjače sa položajem mernih mesta i instrumenata prikazana je na sl. II-9, a rožnjača nastavljenih podvezicom na sl. II-10.

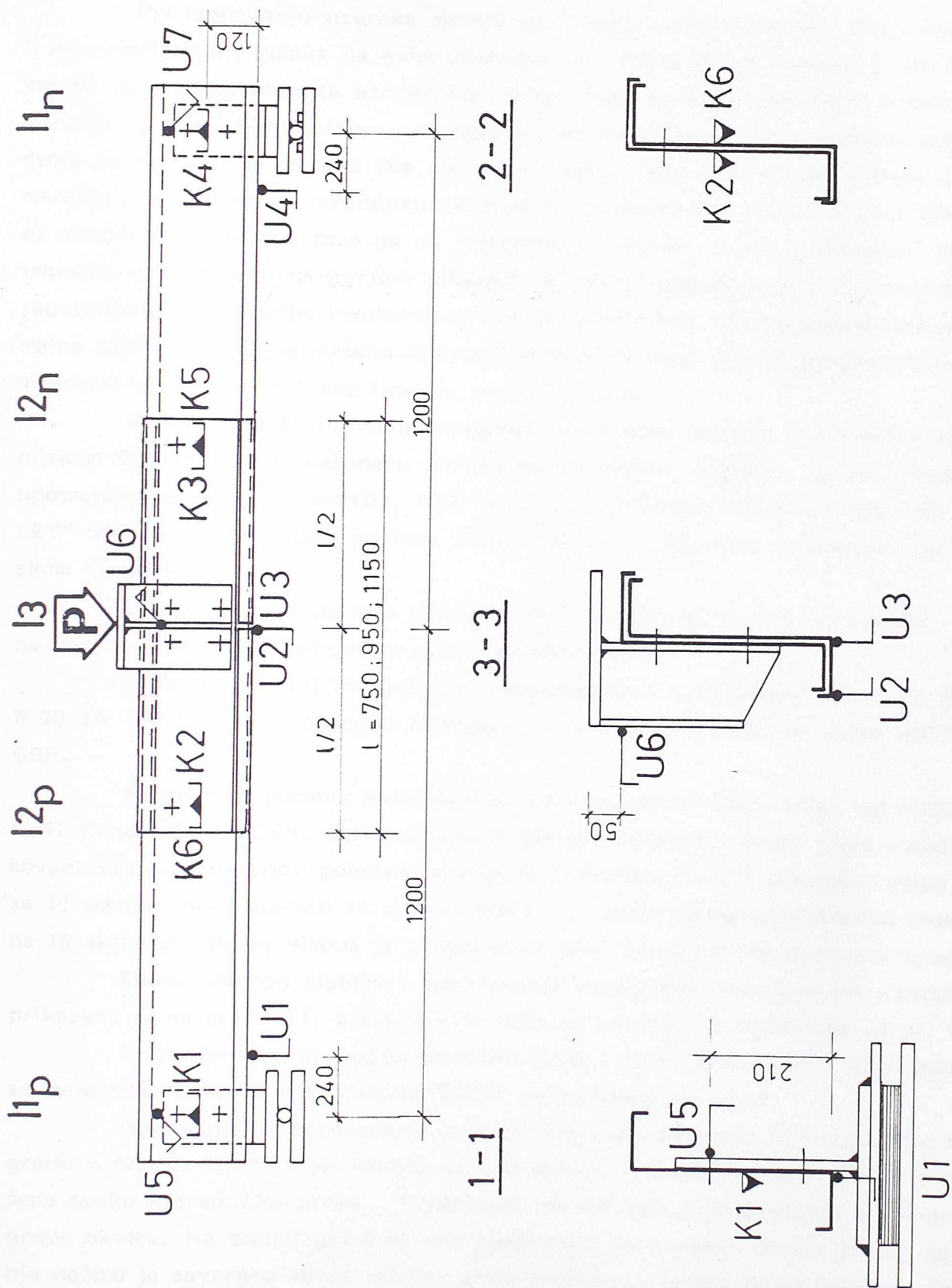
Da bi opit dao realne rezultate moraju biti ispunjeni sledeći uslovi koji postoje na realnoj konstrukciji rožnjača ovoga tipa:

- Jedan oslonac mora biti pokretan, a drugi nepokretan. Pri izvršenju ovog opita to je uradjeno tako da je pokretan oslonac izveden kao pokretno ležište na dva valjka, a nepokretan kao nepokretno tangencijalno ležište.
- Rotacija oko podužne ose rožnjače mora biti sprečena. Ovo je postignuto pomoću oslonačkih stolica i elementa za uvođenje sile u rožnjaču. Pošto se sila unosi preko rebra rožnjače i prima iznad oslonaca preko rebra to je uvijanje sprečeno.
- Uvođenje opterećenja u sredini raspona mora biti takvo da potpuno odgovara realnom slučaju na mestu veze rožnjače za glavni vezač. U opitu je ovo postignuto elementom za uvođenje sile koji je putem kugličnih ležajeva bočno oslonjen te mu je sprečeno bočno pomeranje i rotacija.

U toku opita merena su vertikalna pomeranja u sredini raspona i na rastojanju $e = 240$ mm od oslonaca. Ovo je neophodno da bi se eliminisala eventualna pomeranja oslonaca. Takodje su postavljani klinometri kojima je moguće kontrolisati rad induktivnih (elektronskih) ugibomera.



Sl. II-9 Uzorak za ispitivanje neprekinute rošnjače sa rasporedom mernih mesta.
 Oznake: U-ugibomer, K-klinometar



Sl. II-10 Uzorak za ispitivanje rožnjače nastavljene podvezicom dužine $l = 750; 950$ i 1150 mm sa rasporedom mernih mesta. Oznake: U-ugibomer, K-klinometar

3.1.3. Primenjena merna tehnika, postupak ispitivanja i rezultati

Pri ispitivanju uzoraka mereni su i registrovani aplicirana sila i ugibi u 7 karakterističnih tačaka na svim uzorcima, te naponi u dva preseka (2x20 mernih mesta) na tri neprekinuta uzorka (sl. II-9). Radi kontrole ugibomera vršeno je merenje nagiba i klinometrima, ali samo u zoni elastičnosti. Pri nanošenju opterećenja kontinualno je merena sila, te je pri zadatoj sili (jedan merni ciklus) vršeno merenje i registrovanje vrednosti navedenih parametra sve dok su uzorci bili u zoni elastičnosti. Od ove faze pa do plastifikacije uzorka vršeno je merenje i registrovanje u kontinualnom mernom ciklusu, tj. sila je kontinualno povećavana bez zaustavljanja na zadatim vrednostima sve do pojave loma uzorka (dostizanja maksimalne sile) pri čemu je vršeno automatsko registrovanje mernih parametara u vremenskom intervalu od 1 sec između mernih ciklusa.

Registrovanje izmerenih vrednosti ispitivanih uzoraka obavljeno je na linijskom štampaču i PC računaru povezanom sa mernim sistemom. Za ovu svrhu upotrebljen je program GRADJ. WFB pisan u WAVEFORM BASIC-u firme "MILOLET"-SAD kojim su podaci merenja slani u memoriju računara te štampani na linijskom štampaču.

Sila je merena doznom U2 firme HOTTINGER od 50 kN. Instrument radi na bazi mernih traka vezanih u puni Vitstonov most.

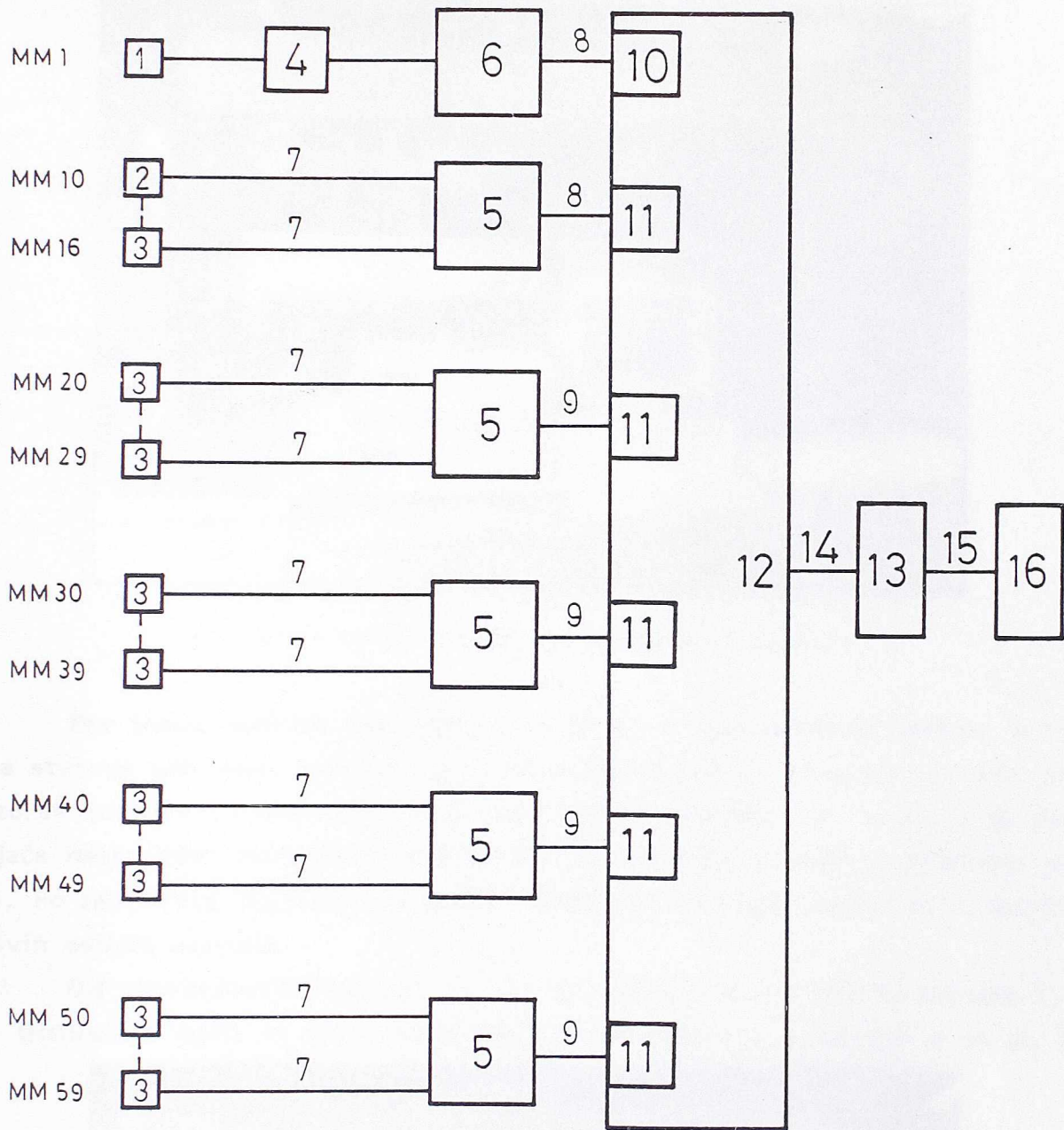
Ugibi su mereni induktivnim (elektronskim) ugibomerima tipa W 10 TK, W 20 TK i W 50 TK sa opsegom merenja ± 10 mm, ± 20 mm i ± 50 mm firme HOTTINGER.

Za merenje napona korišćene su elektrootporne merne trake tip 10/120 LY41 firme HOTTINGER. Upotrebljena je metoda vezivanja mernih traka u modifikovanu vezu u Vitstonov polumost razvijena u Sektoru 06 VTI-Beograd, kojom se za 10 mernih mesta koristi 11 mernih traka, tj. jednakompenzaciona merna traka na 10 aktivnih. Merni sistem je programiran tako da registruje napone u N/mm^2 .

Shema mernog sistema i specifikacija primenjenih instrumenata i pribora prikazana je na sl. II-11, a fotografija istih sa uzorkom za ispitivanje na sl. II-12.

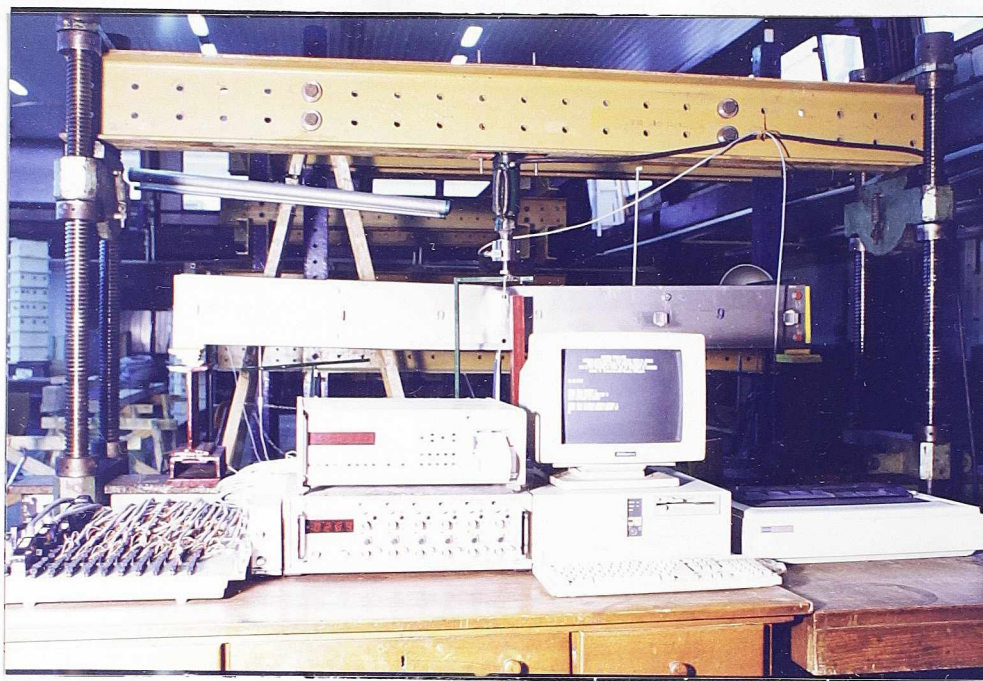
Za registrovanje nagiba elastične linije, u zoni elastičnosti, upotrebljeni su mehanički klinometri HUGGENBERGER sa podatkom od 1,06".

Ispitivanje je sprovedeno na Gradjevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu u hali za ispitivanje. Uzorci su postavljeni u zatvoren okvir, a sila je nanošena preko hidrauličke prese kapaciteta 100 kN koja je pričvršćena o gornju gredu okvira. Na donjoj gredi okvira postavljeni su I valjani profili za čiju gornju nožicu je zavarena donja ležišna ploča ležišta u projektovanom položaju. Ovo podizanje uzoraka je bilo neophodno kako bi se mogli postaviti ugibomeri ispod uzorka.



Sl. II-11 Shema primenjenog mernog sistema sa specifikacijom instrumenta i pribora

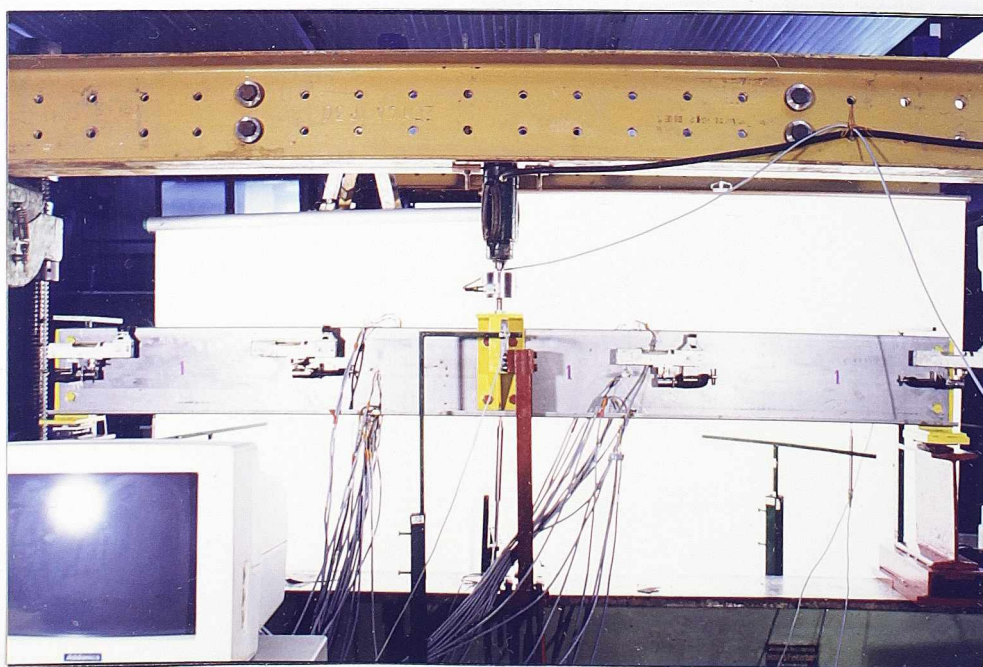
- 1 - Dozna za merenje sile;
- 2 - Induktivni ugibomeri;
- 3 - Elektrootporne merne trake;
- 4 - Merni pojačivač KWS 673 D8-HOTTINGER;
- 5 - Priključna kutija VT10 - HOTTINGER;
- 6 - Priključna kutija VT10 - HOTTINGER;
- 7 - Merni kabl PT 2233 od 10 m - PHILIPS;
- 8 - Spojni kabl 0231-3 - HOTTINGER;
- 9 - Spojni kabl 0233-3 - HOTTINGER;
- 10 - Priključna jedinica 3203 - HOTTINGER;
- 11 - Priključna jedinica 3202 - HOTTINGER;
- 12 - Višenamenski uređaj UPM 60 - HOTTINGER;
- 13 - Računar PC AT;
- 14 - Kabl RS 232;
- 15 - CETRONIX kabl;
- 16 - Printer



Sl. II-12 Merni sistem za akviziciju podataka

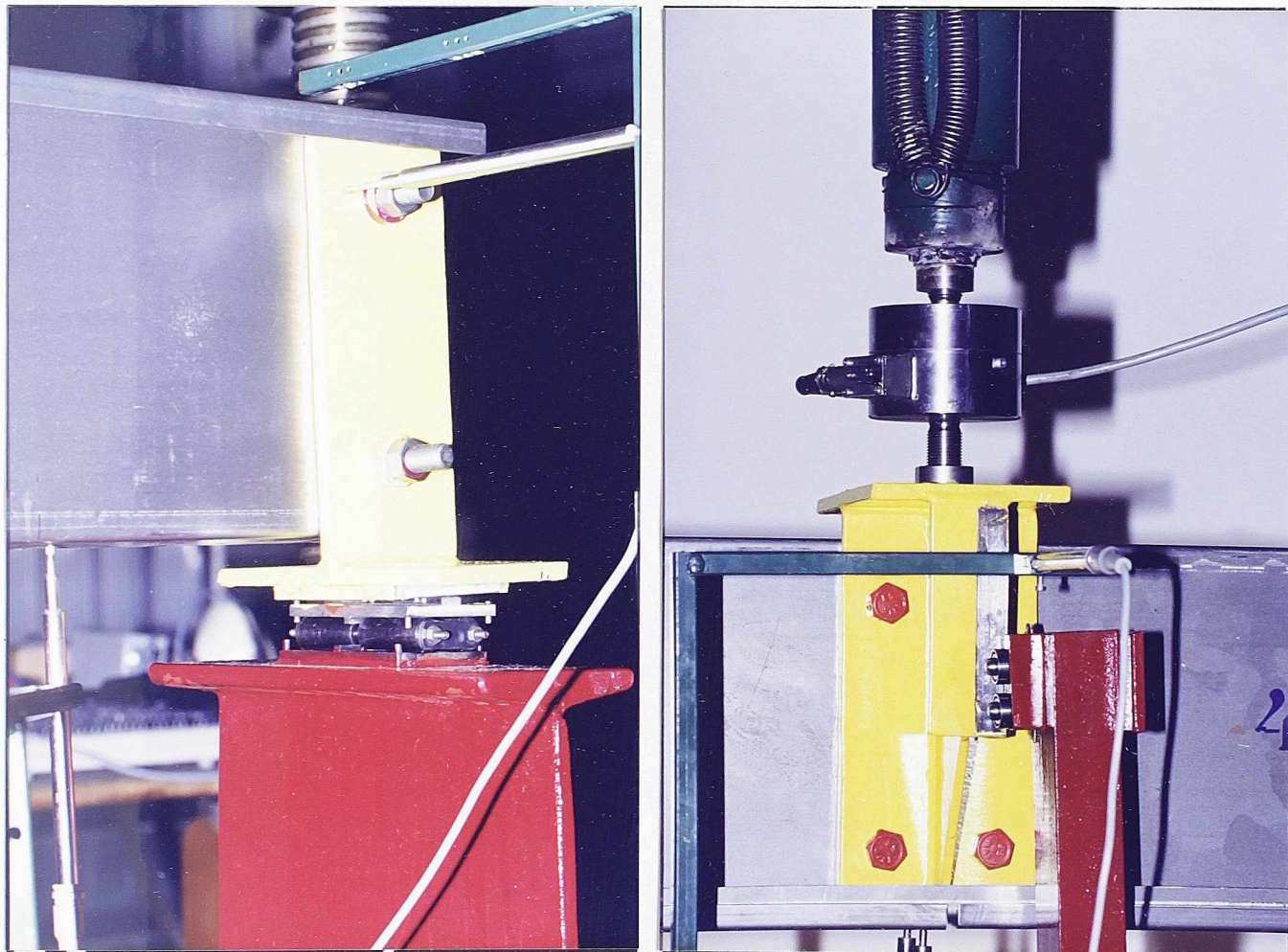
Pre samog početka ispitivanja, da bi se proverila merna tehnika, a i odredila stvarna sila loma, izvršeno je probno ispitivanje dva uzorka. Za prvi probni uzorak (oznaka 0) upotrebljena je neprekinuta rožnjača (sl. II-9), a za drugi rožnjača nastavljena podvezicom dužine 950 mm (oznaka 5) koja je prikazana na sl. II-10. Po završenom ispitivanju i analizi dobijenih rezultata prešlo se na ispitivanje svih ostalih uzoraka.

Od neprekinutih rožnjača (sl. II-9) ispitana su tri uzorka (oznake 1, 2 i 3). Dispozicija opita sa rasporedom mernih instrumenata prikazana je na sl. II-13.

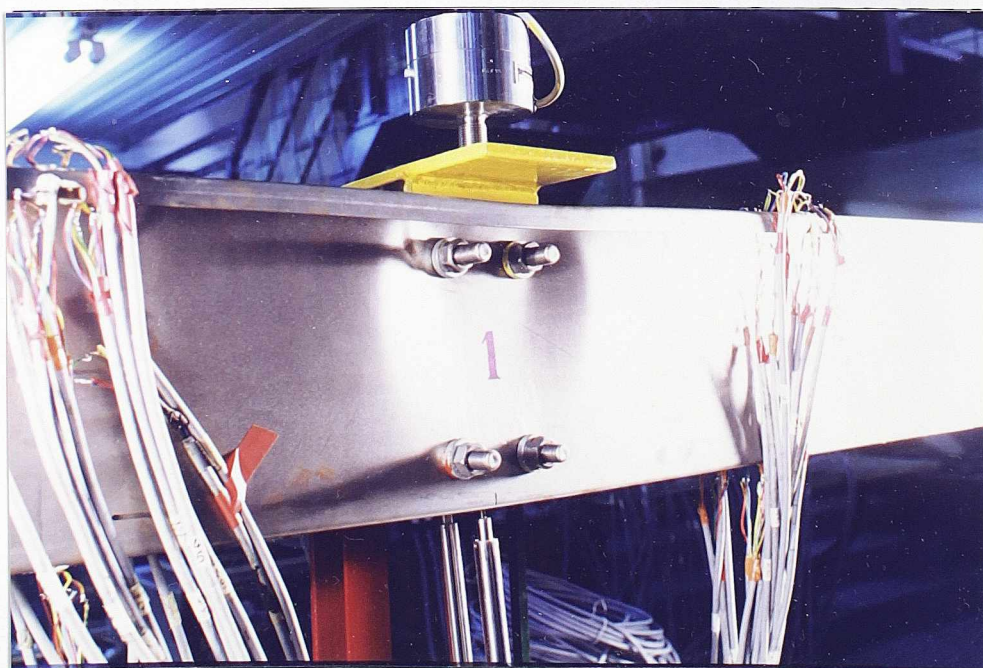


Sl. II-13 Raspored mernih instrumenata kod neprekinutih rožnjača

Način oslanjanja rožnjače na mestu pokretnog ležišta sa valjcima preko ležišne stolice prikazan je na sl. II-14, a element za unošenje sile sa klizačem od kugličnih ležajeva na sl. II-15. Na ovoj slici vidi se i hidraulička presa sa doznom za merenje aplicirane sile. Izgled loma neprekinute rožnjače prikazan je na sl. II-16.

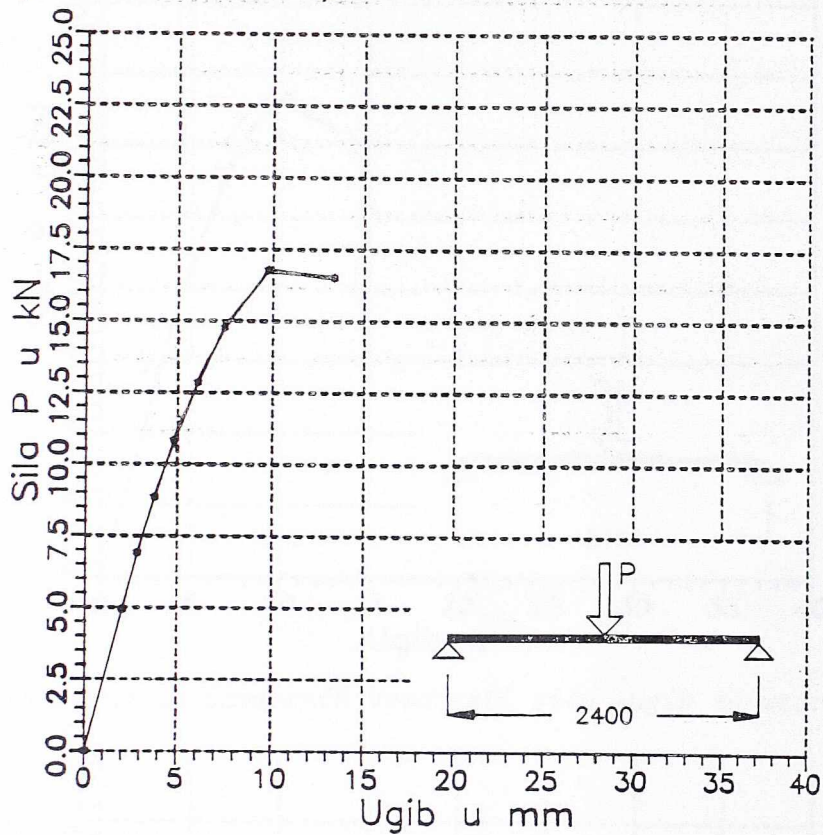


Sl. II-14 Pokretni oslonac sa stolicom Sl. II-15 Element za unošenje sile sa klizačem

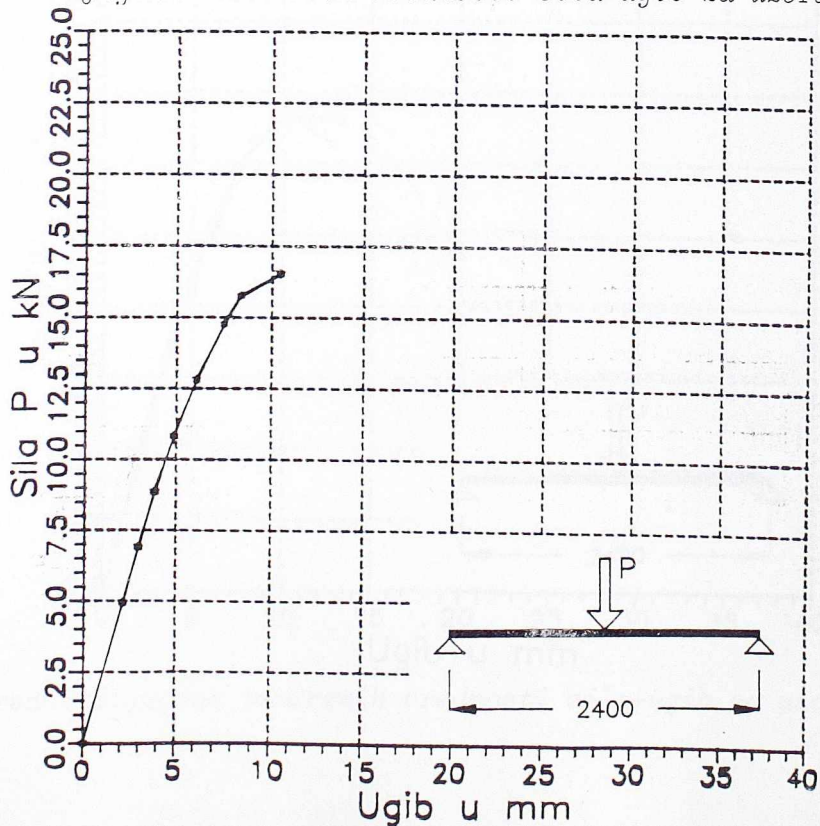


Sl. II-16 Izgled loma neprekinute rožnjače

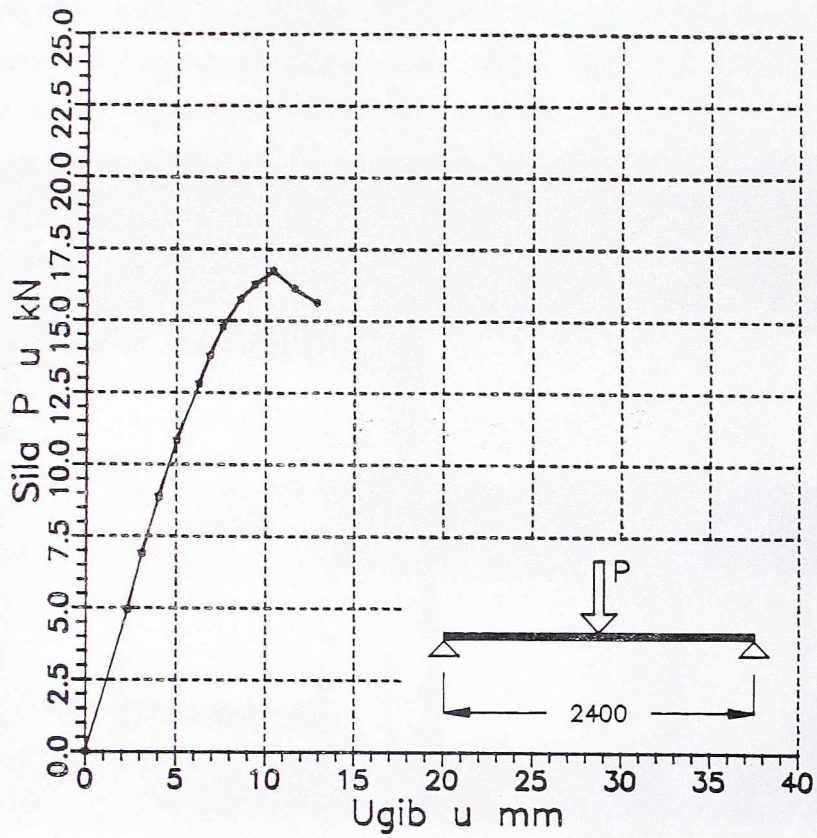
Izmerene vrednosti ugiba u sredini raspona i aplicirane sile za neprekinute rožnjače prikazane su graficima na slikama II-17, II-18 i II-19, a uporedjenje izmerenih vrednosti za sva tri uzorka na sl. II-20 sa koje se lako može uočiti idealno poklapanje rezultata merenja za sva tri uzorka.



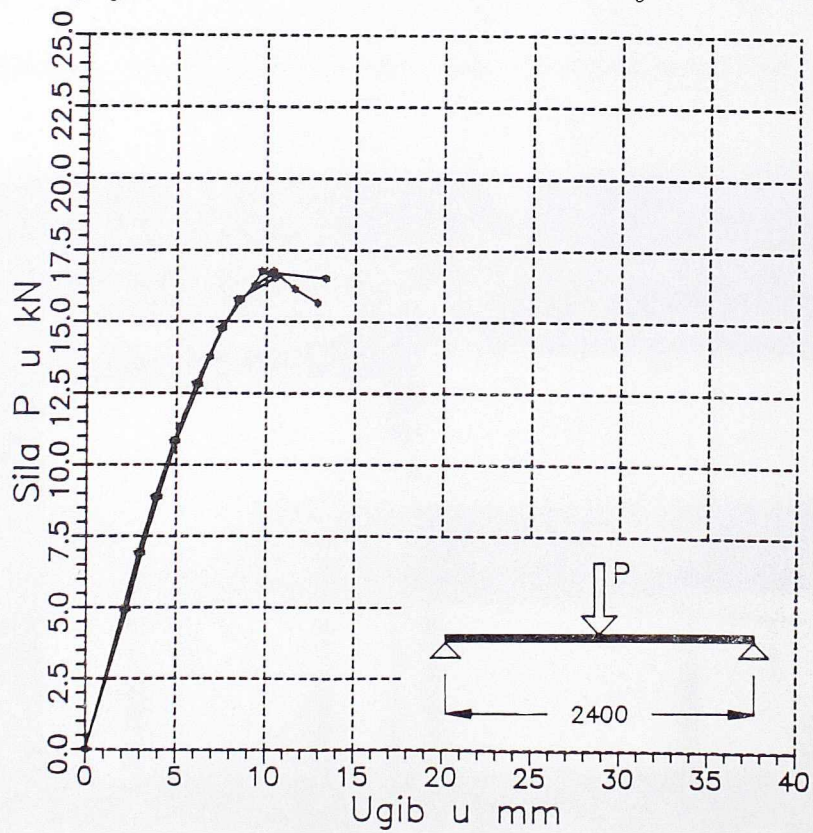
Sl. II-17 Dijagram izmerenih vrednosti sila-ugib za uzorak br. 1



Sl. II-18 Dijagram izmerenih vrednosti sila-ugib za uzorak br. 2

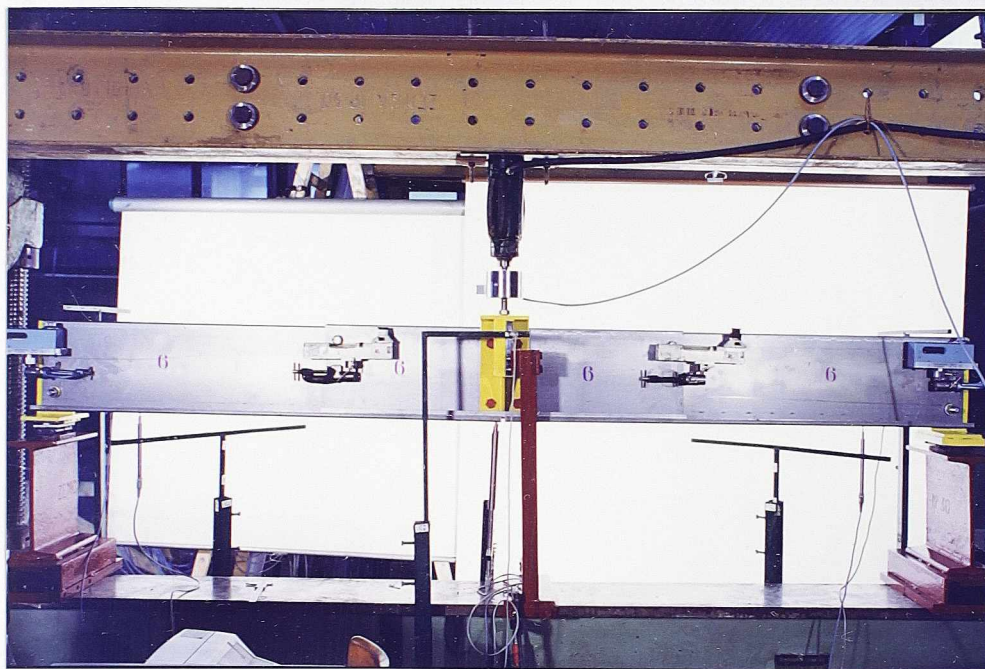


Sl. II-19 Dijagram izmerenih vrednosti sila -ugib za uzorak br. 3



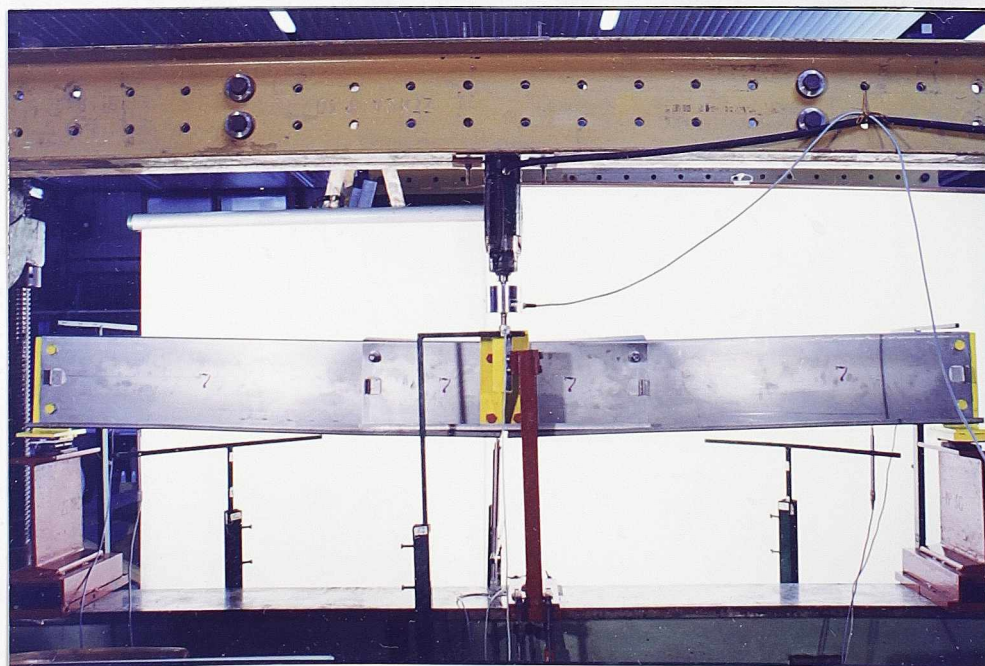
Sl. II-20 Uporedni dijagram izmerenih vrednosti sila-ugib za uzorke br. 1, 2 i 3

Od rožnjača nastavljenih podvezicama (navlakama) ispitana su tri uzorka, svaki sa različitom dužinom podvezice (750, 950 i 1150 mm). Dispozicija opita sa rasporedom mernih instrumenata prikazana je na sl. II-21.

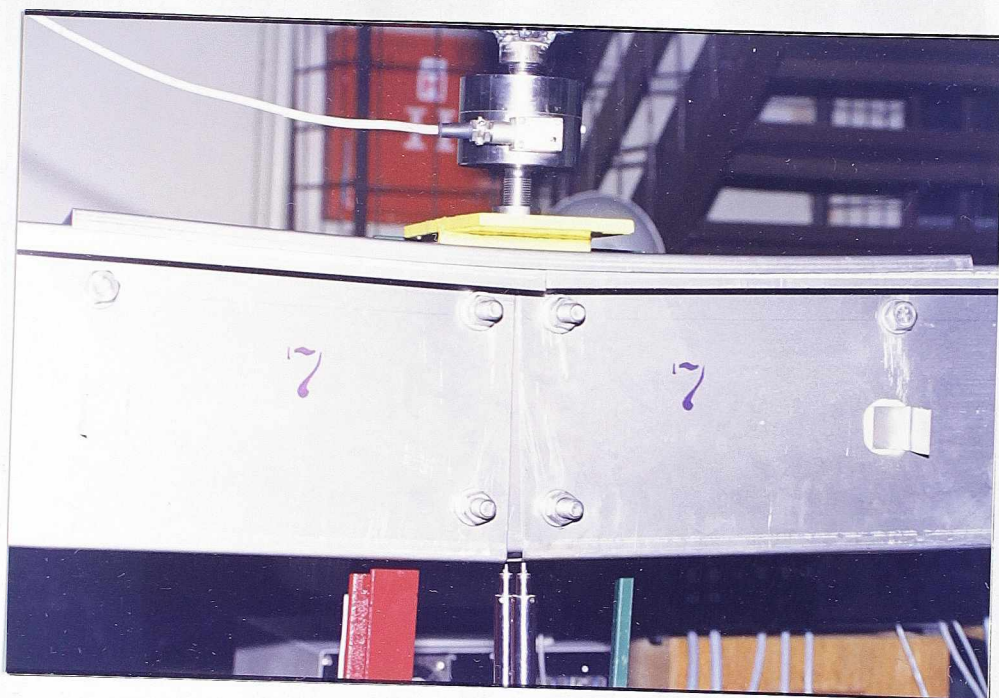


Sl. II-21 Raspored mernih uređaja kod rožnjača nastavljenih podvezicama

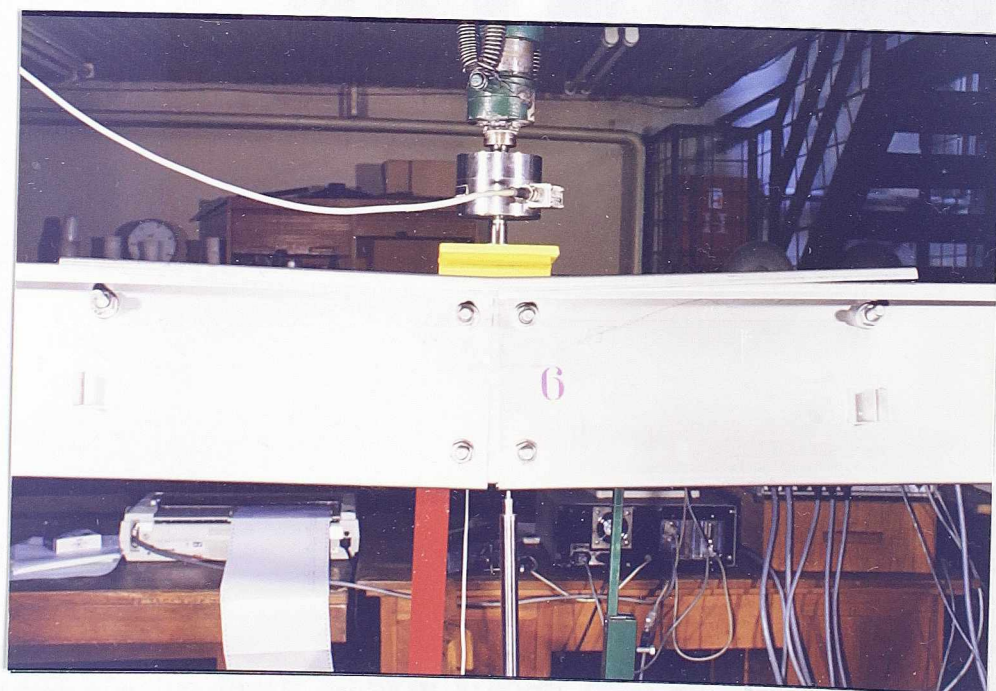
Deformaciono stanje ovih rožnjača sa izgledom loma vidi se na slikama II-22 do II-26.



Sl. II-22 Deformisano stanje rožnjače nastavljene podvezicom dužine 750 mm



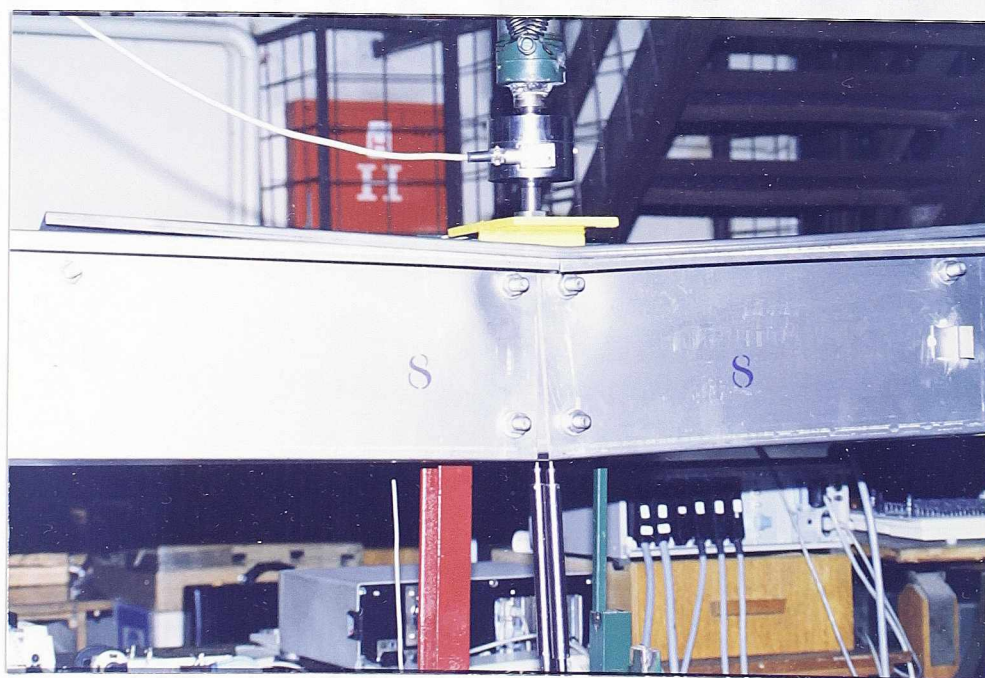
Sl. II-23 Detalj deformisanog stanja rožnjače na mestu podvezice za uzorak sa dužinom podvezice od 750 mm



Sl. II-24 Detalj deformisanog stanja rožnjače na mestu podvezice za uzorak sa dužinom podvezice od 950 mm

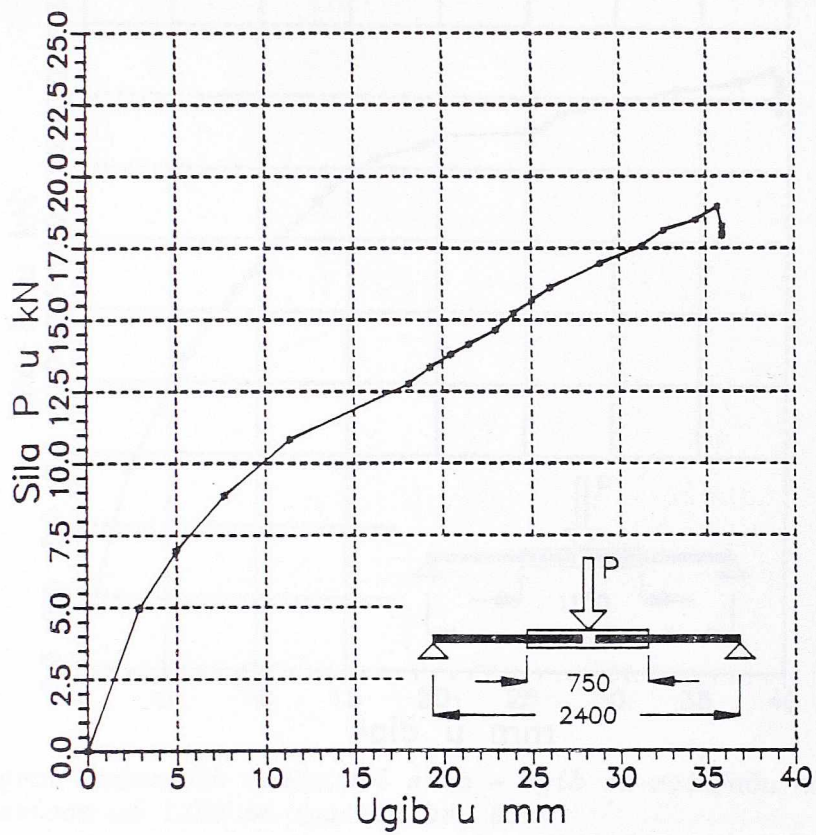


Sl. II-25 Deformisano stanje rožnjače nastavljene podvezicom dužine 1150 mm

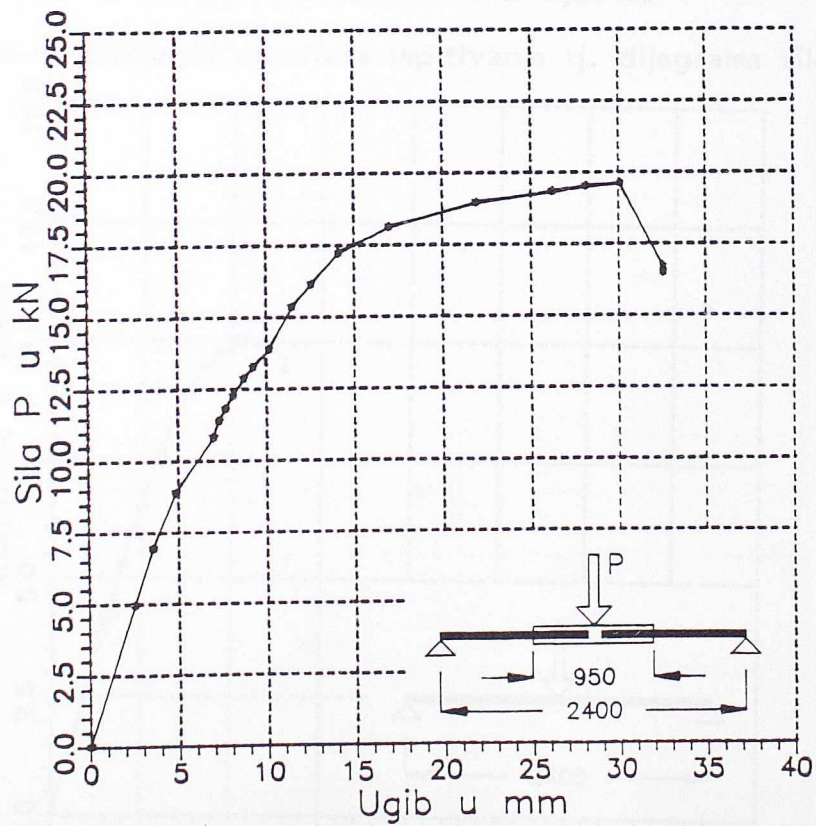


Sl. II-26 Detalj deformisanog stanja rožnjače na mestu podvezice za uzorak sa dužinom podvezice od 1150 mm.

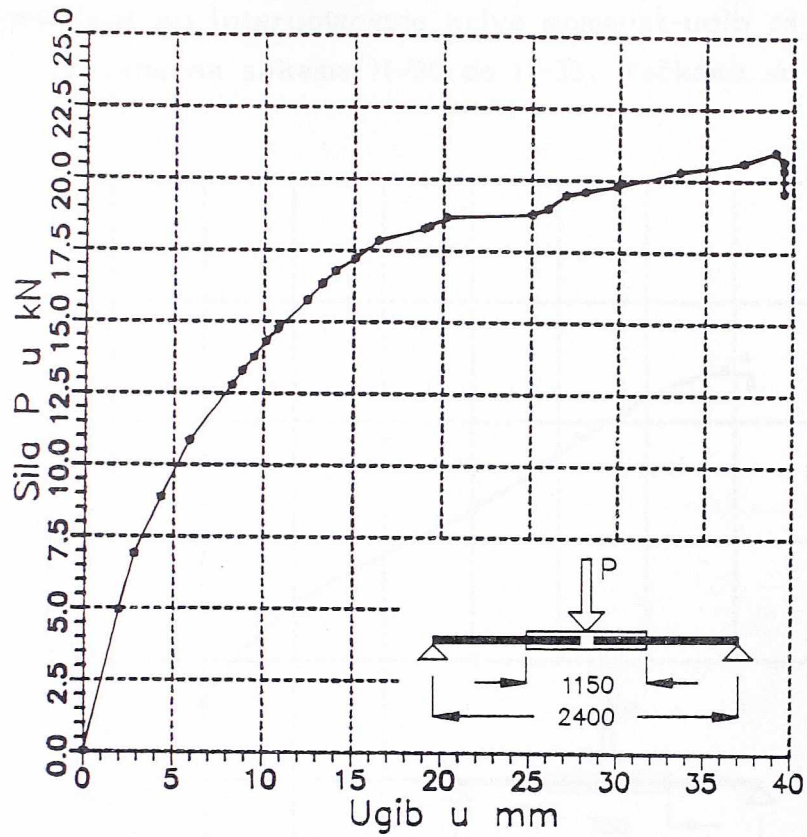
Izmerene vrednosti ugiba u sredini raspona i aplicirane sile za rožnjače nastavljene podvezicama (navlakama) prikazane su graficima na slikama II-27, II-28 i II-29.



Sl. II-27 Dijagram izmerenih vrednosti sila - ugib za rožnjaču nastavljenu podvezicom od 750 mm (uzorak br. 7)



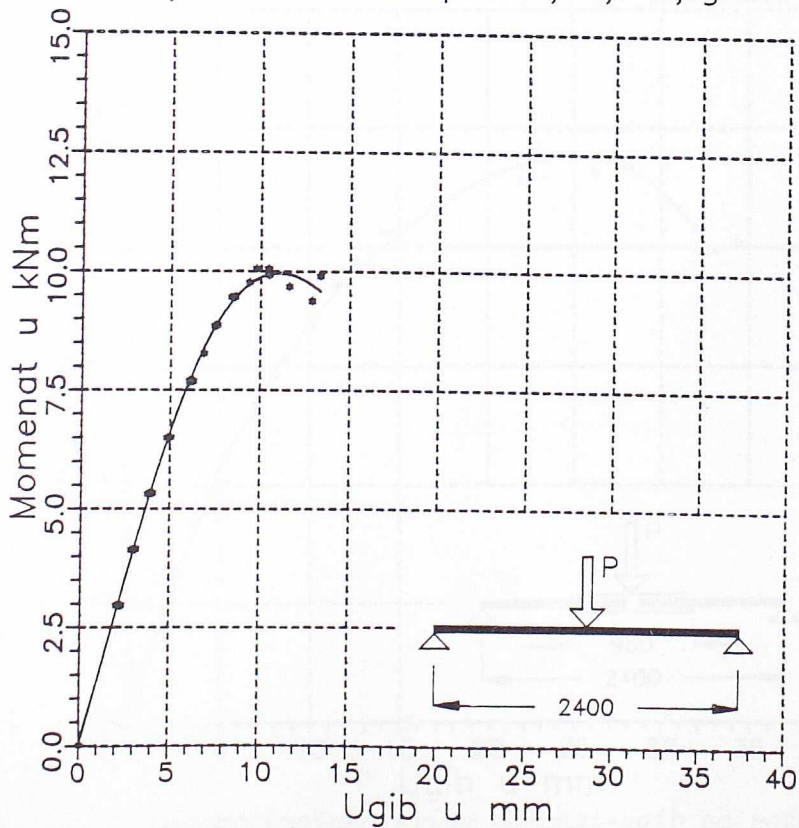
Sl. II-28 Dijagram izmerenih vrednosti sila - ugib za rožnjaču nastavljenu podvezicom od 950 mm (uzorak br. 6)



Sl. II-29 Dijagram izmerenih vrednosti sila - ugib za rošnjaču nastavljenu podvezicom od 1150 mm (uzorak br. 8)

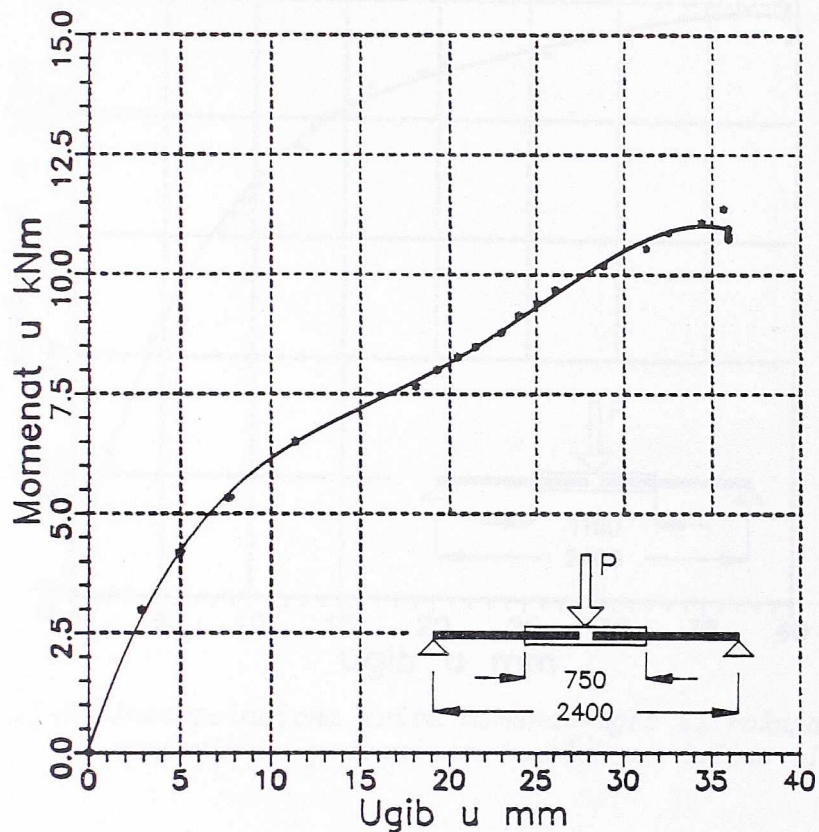
3.1.4. Analiza dobijenih rezultata sa zaključkom

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja tj. dijagrama sila-ugib, progra-

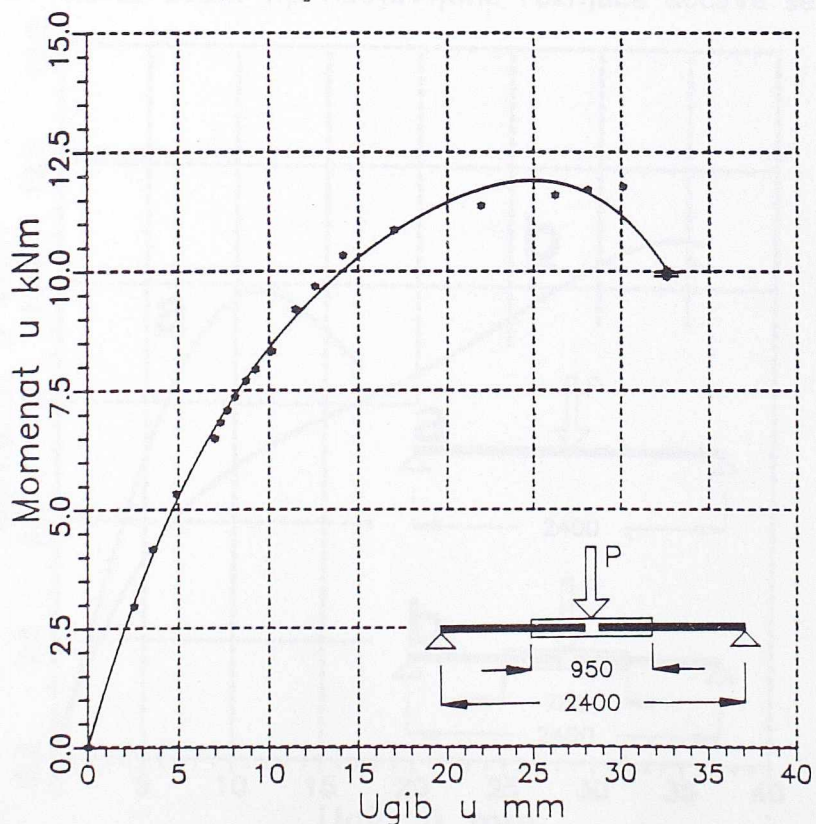


Sl. II-30 Interpolaciona kriva momenat-ugib za neprekinutu rošnjaču

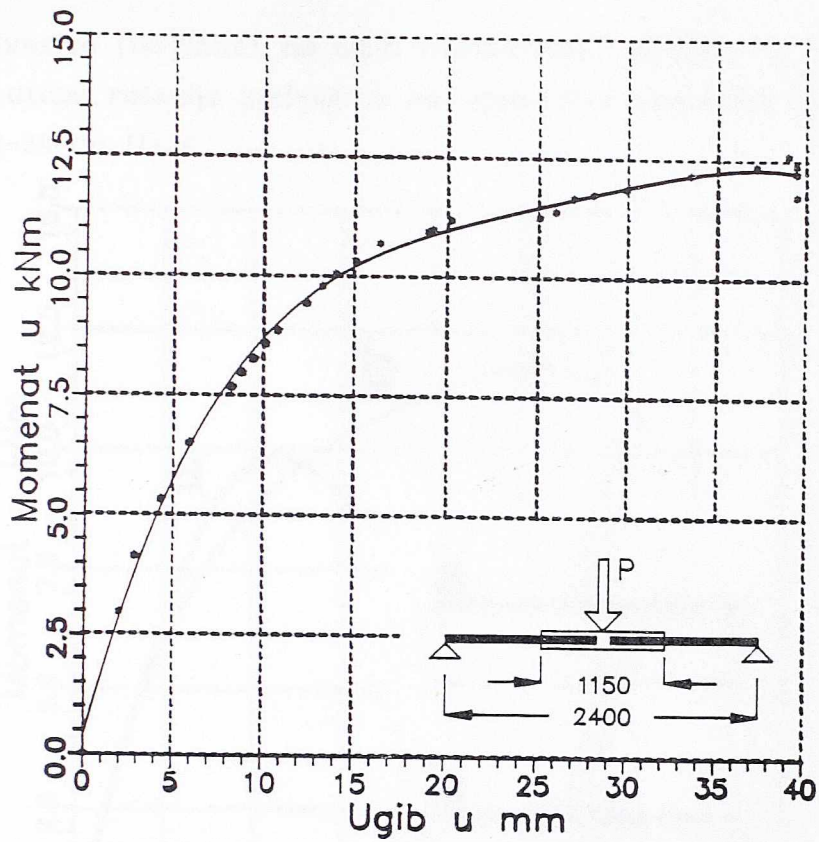
mom GRAPHER dobijene su interpolacione krive momentat-ugib za svaki tip ispitivanog uzorka i prikazane na slikama II-30 do II-33. Tačkama su prikazane izmerene vrednosti.



S1. II-31 Interpolaciona kriva momentat-ugib za rožnjaču nastavljenu podvezicom (navlakom) dužine 750 mm

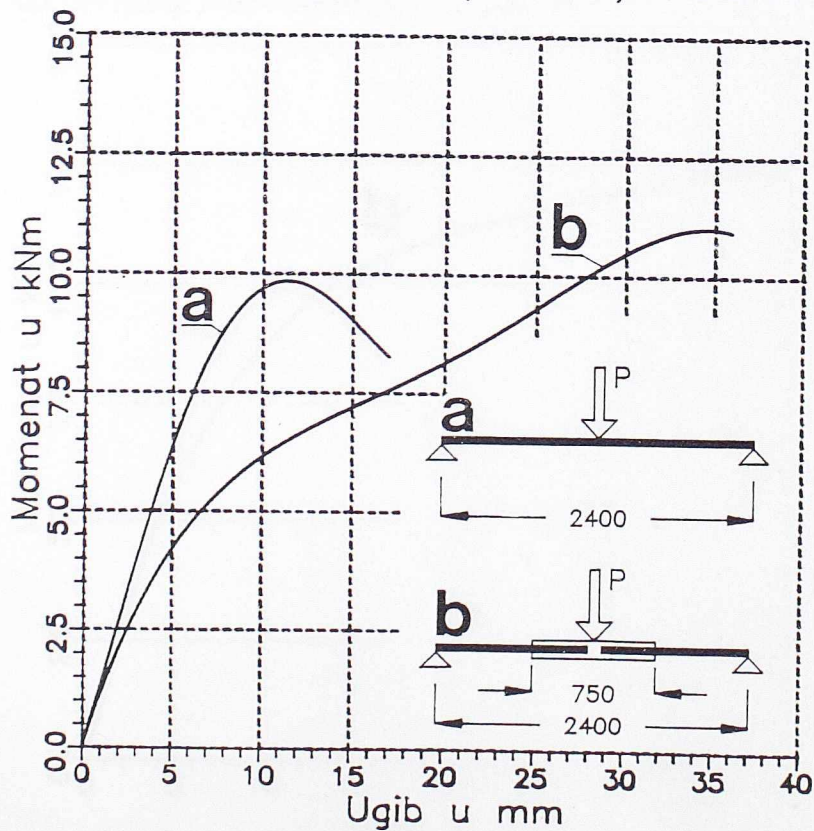


S1. II-32 Interpolaciona kriva momentat-ugib za rožnjaču nastavljenu podvezicom (navlakom) dužine 950 mm



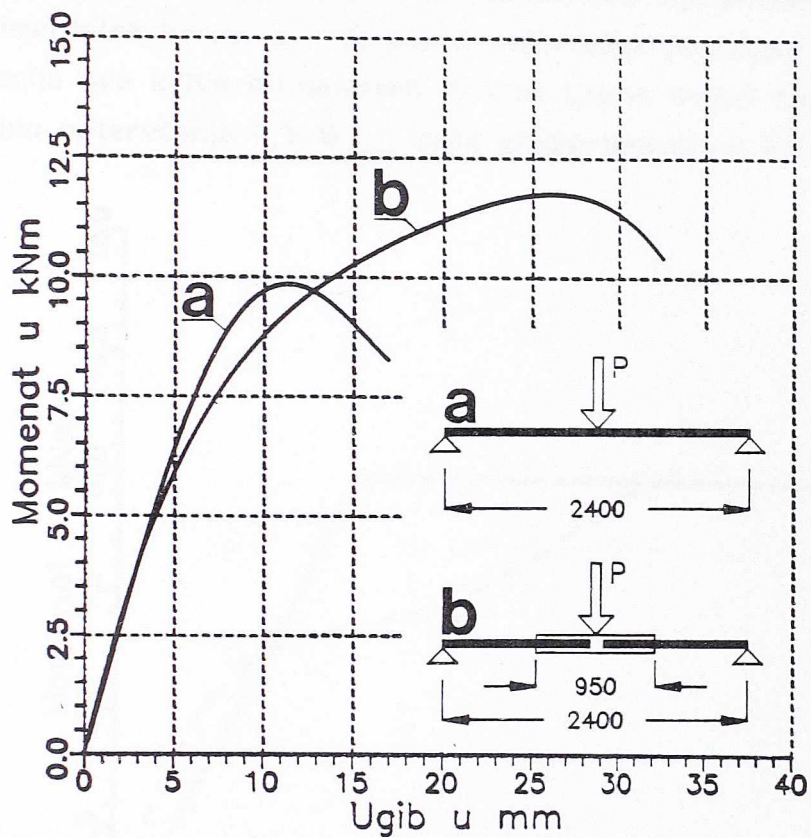
Sl. II-33 Interpolaciona kriva momenat-ugib za rožnjaču nastavljenu podvezicom (navlakom) dužine 1150 mm

Uporedjenjem interpolacione krive neprekinute rožnjače, sa odgovarajućom interpolacionom krivom za svaki tip nastavljene rožnjače uočava se koliki je dopri-

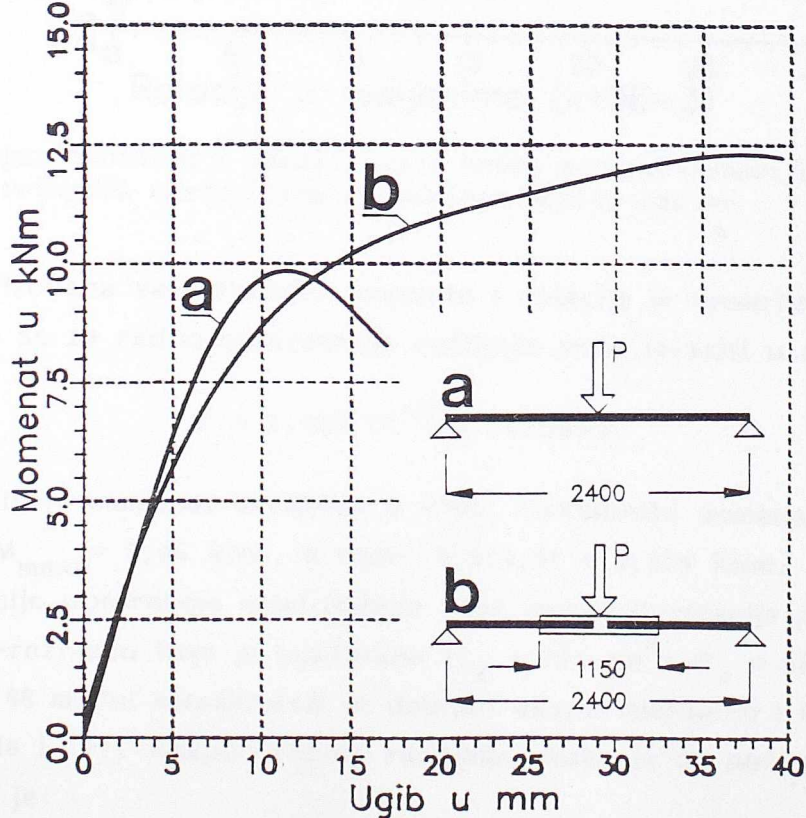


Sl. II-34 Uporedjenje interpolacionih krivih neprekinutih i rožnjače nastavljene podvezicom dužine 750 mm

nos rotacije podvezice (navlake) na ugib nastavljene rožnjače, tj. razlika između te dve krive je uticaj rotacije podvezice na ugib. Ove uporedne krive prikazane su na slikama II-34 do II-36.

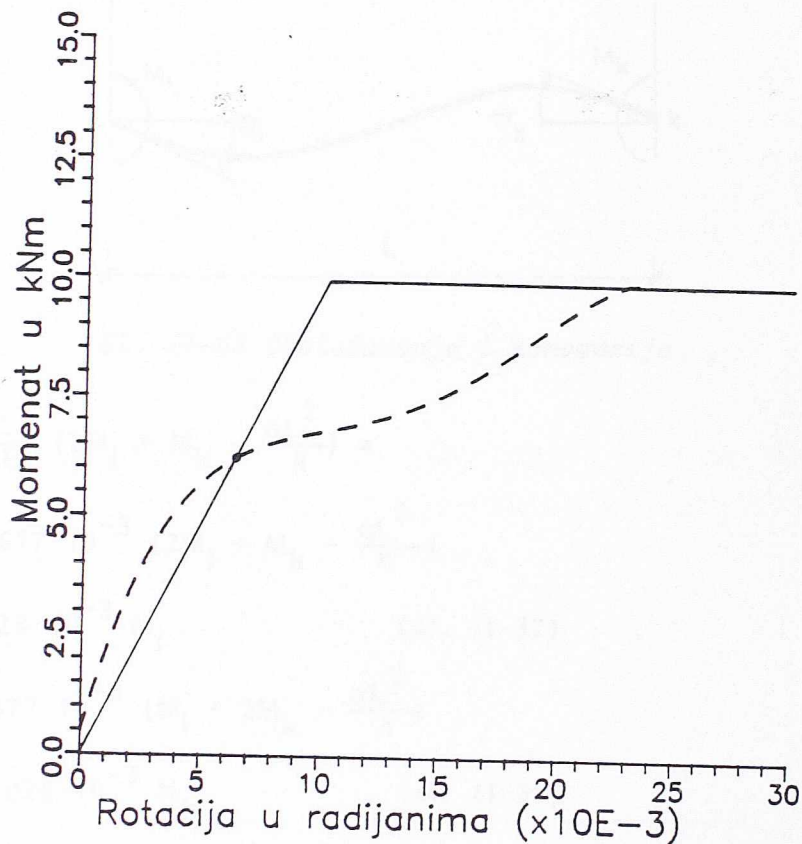


Sl. II-35 Uporedjenje interpolacionih krivih neprekinutih i rožnjače nastavljene podvezicom dužine 950 mm



Sl. II-36 Uporedjenje interpolacionih krivih neprekinute i rožnjače nastavljene podvezicom dužine 1150 mm.

Iz krivih sa sl. II-34 dobijena je oduzimanjem i pretvaranjem ugiba u rotaciju eksperimentalna kriva moment-rotacija podvezice (navlake) dužine 750 mm. Ova eksperimentalna kriva je na sl. II-37 prikazana isprekidanom linijom. Na osnovu eksperimentalne krive, a radi pojednostavljenja postupka proračuna, izvršena je idealizacija ove krive bilinearnom krivom (puna linija) koja je određena tako da za radno opterećenje $0,6 \cdot M_{\max}$ seče eksperimentalnu krivu.



Sl. II-37 Eksperimentalna i idealizovana kriva moment-rotacija $\theta = 1,028 \cdot 10^{-3} M$ za rožnjaču nastavljenu podvezicom dužine 750 mm

Idealizovana veza između momenta i rotacije je linearna do dostizanja momenta loma pa se za radno opterećenje rožnjače može izraziti u obliku:

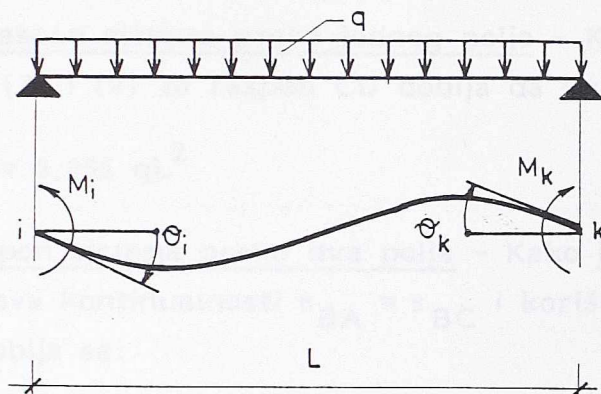
$$\theta = 1,028 \cdot 10^{-3} M \text{ radijalna} \quad (1)$$

gde je M aplicirani moment savijanja u kNm. Maksimalni moment za ispitivanu rožnjaču iznosi $M_{\max} = 9,96$ kNm, a radni $0,6 \cdot 9,96 = 5,976$ kNm. Analiza rožnjače se sprovodi dalje upotrebom idealizovane veze moment-rotacija podvezice (navlake).

Za Z-rožnjaču koja je ispitivana ($I_x = 703 \text{ cm}^4$; $W_x = 58 \text{ cm}^2$) uradjenu od čelika Č.0148 modul elastičnosti je dobijen eksperimentalno i iznosi $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ (Tabela I-11). Raspon realne rožnjače, kako je na početku rečeno, iznosi $L = 6,0$ m, pa je:

$$\frac{L}{6EI} = 0,677 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{kNm}} \quad (2)$$

Za jednako podeljeno opterećenje q po rasponu L (sl. II-38), momenti i rotacije na krajevima štapa dati su sledećim izrazima:



Sl. II-38 Obeležavanje i konvencija

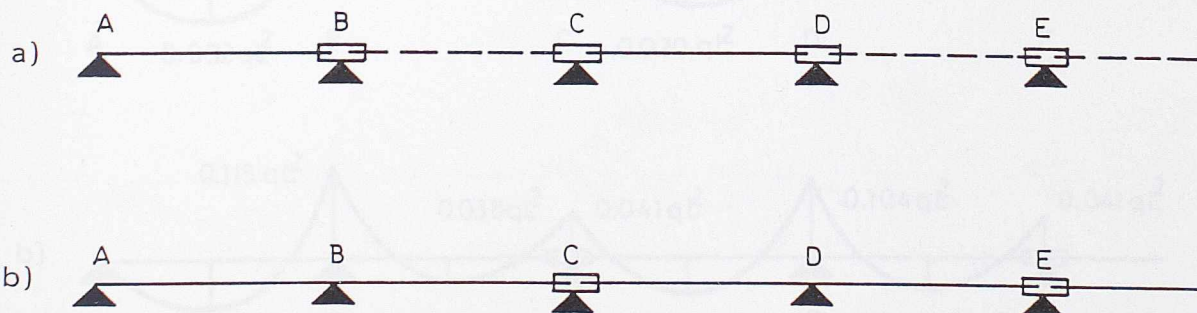
$$\begin{aligned} \theta_i &= -\frac{L}{6EI} \left(2M_i + M_k - \frac{qL^2}{4} \right) = \\ &= -0,677 \cdot 10^{-3} \left(2M_i + M_k - \frac{qL^2}{4} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\theta_i = 1,028 \cdot 10^{-3} M_i \quad (\text{sl. II-37}) \quad (4)$$

$$\theta_k = 0,677 \cdot 10^{-3} \left(M_i + 2M_k - \frac{qL^2}{4} \right) \quad (5)$$

$$\theta_k = -1,028 \cdot 10^{-3} M_k \quad (\text{sl. II-37}) \quad (6)$$

Ovde izvedeni izrazi se koriste za određivanje maksimalnih momenata kod sistema sa podvezicama (navlakama) za sistem preko jednog polja (sl. II-39a) i za sistem preko dva polja (sl. II-39b).



Sl. II-39 Shematski prikaz kontinualnih nosača sa podvezicama (navlakama)

a) sistem preko jednog polja

b) sistem preko dva polja

- Krajnji raspon sistema preko jednog polja - Kako je $M_{AB} = 0$ to se izraz (4) ne koristi, pa se iz izraza (5) i (6) dobija da je:

$$M_{BA} = 0,071 qL^2$$

- Središnji raspon sistema preko jednog polja - Kako je $M_{CD} = M_{DC}$ to se korišćenjem izraza (3) i (4) za raspon CD dobija da je:

$$M_{CD} = M_{DC} = 0,055 qL^2$$

- Krajnji raspon sistema preko dva polja - Kako je $M_{AB} = 0$ to se izraz (4) ne koristi. Iz uslova kontinualnosti $\theta_{BA} = \theta_{BC}$ i korišćenjem izraza (3), (5) i (6) za raspon BC dobija se:

$$M_{BC} = 0,115 qL^2$$

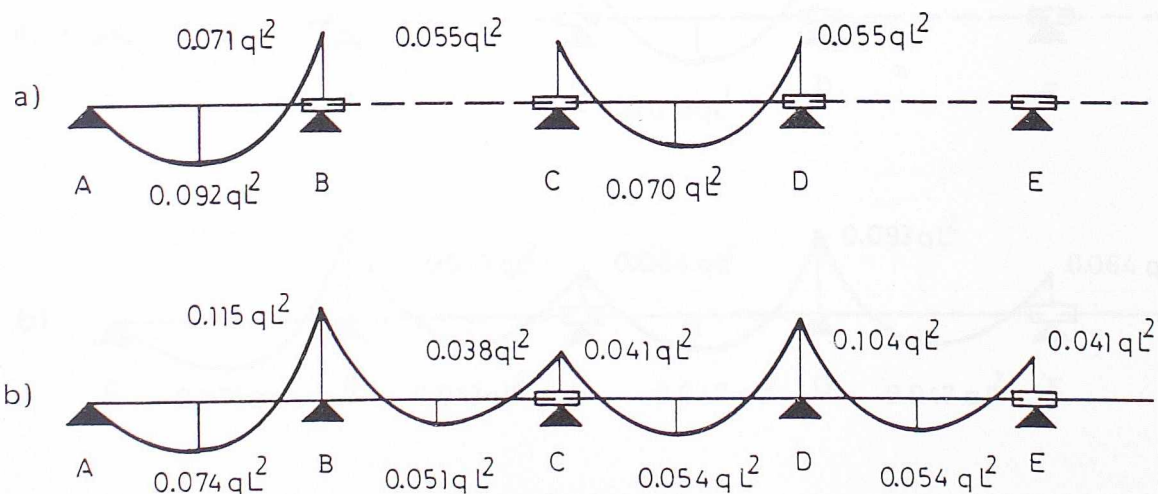
$$M_{CB} = 0,038 qL^2$$

- Središnji raspon sistema preko dva polja - Iz uslova simetrije se dobija da je $M_{CD} = M_{ED}$ i $\theta_{DC} = \theta_{DE} = 0$, a izraz (6) se ne koristi. Tako se upotrebom izraza (3), (4) i (5) za raspon CD dobija:

$$M_{CD} = 0,041 qL^2$$

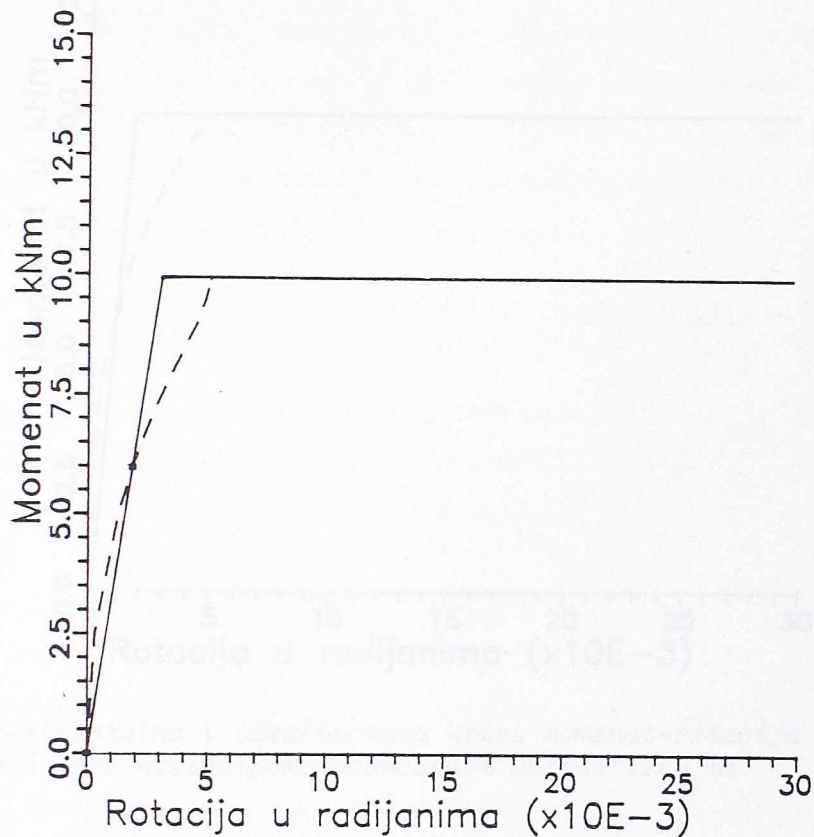
$$M_{DC} = 0,104 qL^2$$

Na osnovu ove analize uradjeni su definitivni dijagrami momenata savijanja za sistem rožnjača sa podvezicama dužine 750 mm i prikazani na sl. II-40.

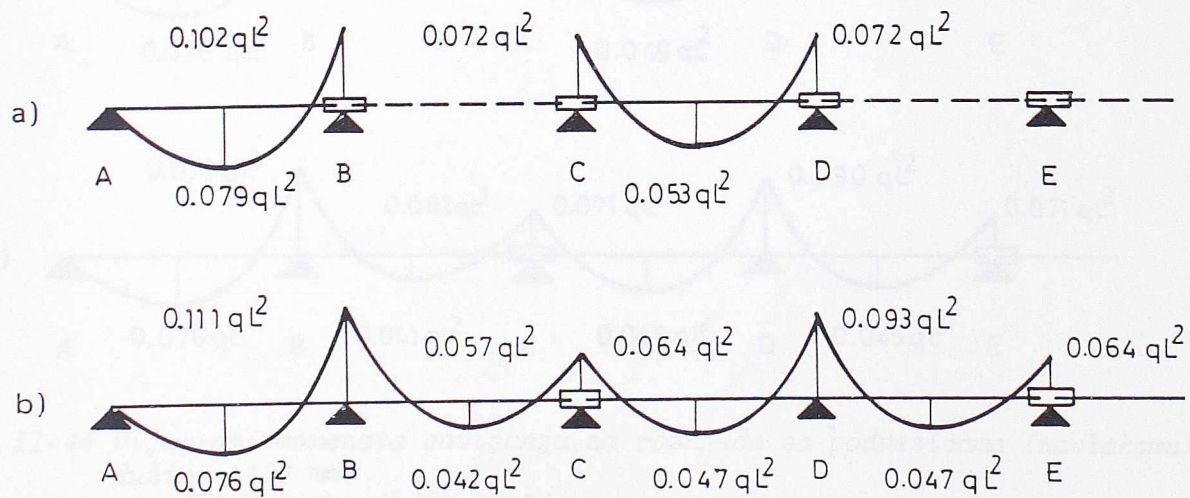


Sl. II-40. Dijagrami momenata savijanja za rožnjače sa podvezicama (navlakama) dužine 750 mm
 a) sistem preko jednog polja
 b) sistem preko dva polja

Na isti način dobijena je idealizovana kriva moment-rotacija i za rožnjače nastavljene podvezicom dužine 950 mm (sl. II-41), odnosno podvezicom dužine 1150 mm (sl. II-43) i odgovarajući dijagrami momenata savijanja sl. II-42 i II-44.

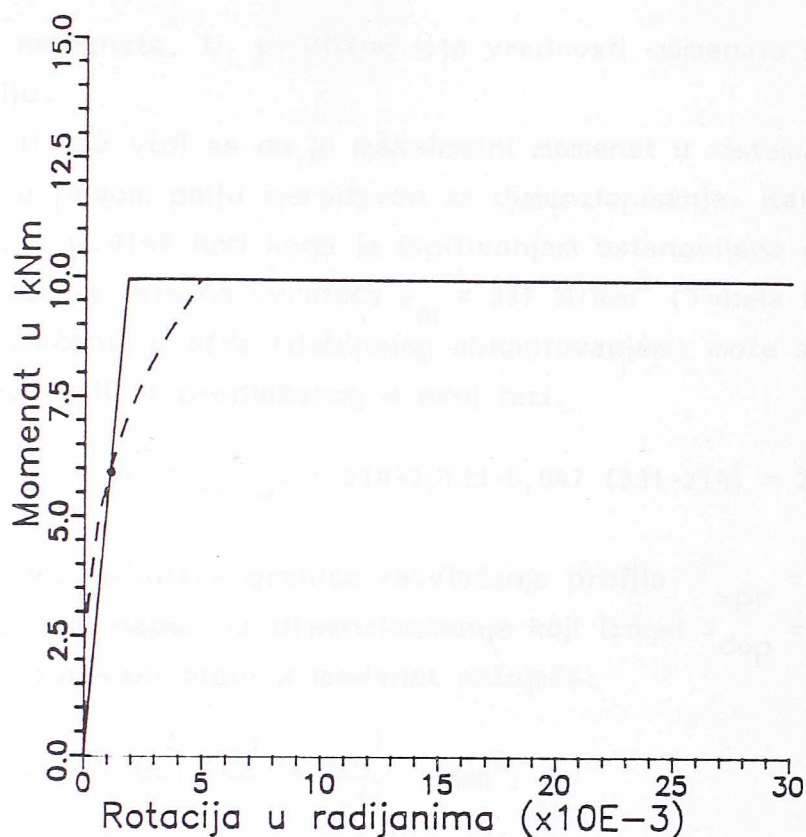


Sl. II-41 Eksperimentalna i idealizovana kriva moment-rotacija $\theta = 0,307 \cdot 10^{-3} M$ za rožnjaču nastavljenu podvezicom dužine 950 mm

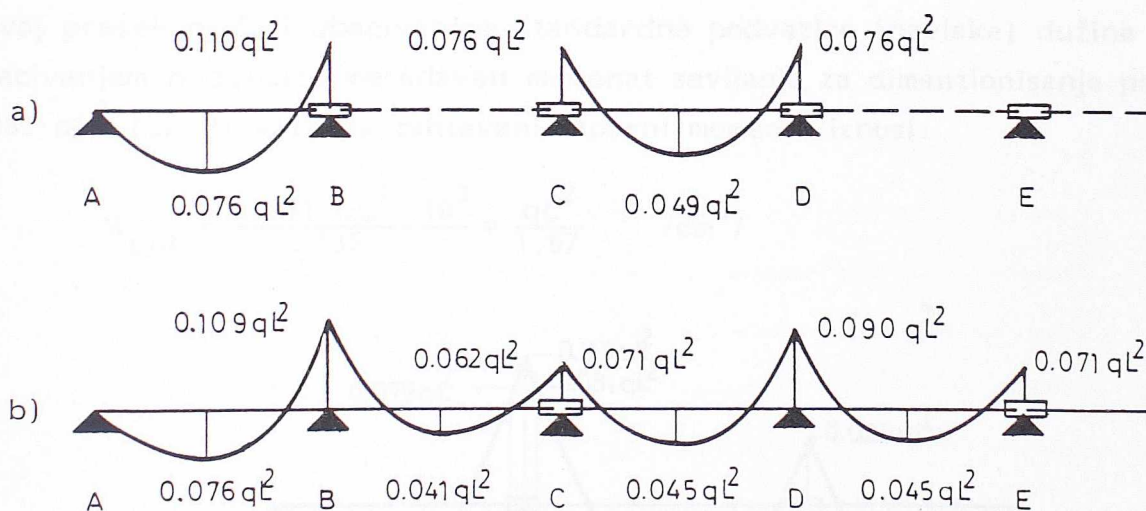


Sl. II-42 Dijagrami momenata savijanja za rožnjače sa podvezicama (navlakama) dužine 950 mm

- a) sistem preko jednog polja
b) sistem preko dva polja



Sl. II-43 Eksperimentalna i idealizovana kriva moment-rotacija $\theta = 0,182 \cdot 10^{-3} M$ za rožnjaču nastavljenu podvezicom dužine 1150 mm



Sl. II-44 Dijagrami momenata savijanja za rožnjače sa podvezicama (navlakama) dužine 1150 mm

- a) sistem preko jednog polja
b) sistem preko dva polja

Upoređenjem dijagrama momenata za sisteme rožnjača sa podvezicama lako se uočava da sistem sa podvezicama dužine 750 mm daje najbolje izbalansiran dijagram momenata, mada je verovatno da bi podvezica od 850 mm dužine dala još

povoljniju sliku momenata, tj. približno iste vrednosti momenata savijanja iznad oslonaca i u polju.

Sa sl. II-28a vidi se da je maksimalni momenat u sistemu preko jednog polja $0,092 qL^2$ u prvom polju merodavan za dimenzionisanje. Kako je rožnjača uradjena od čelika C.0148 kod koga je ispitivanjem ustanovljena granica razvlačenja $\sigma_v = 214 \text{ N/mm}^2$ i zatezna čvrstoća $\sigma_m = 331 \text{ N/mm}^2$ (Tabela I-11) to se račun-ska granica razvlačenja profila (dobijenog abkantovanjem) može sračunati putem izraza (68) iz Poglavlja I predloženog u ovoj tezi.

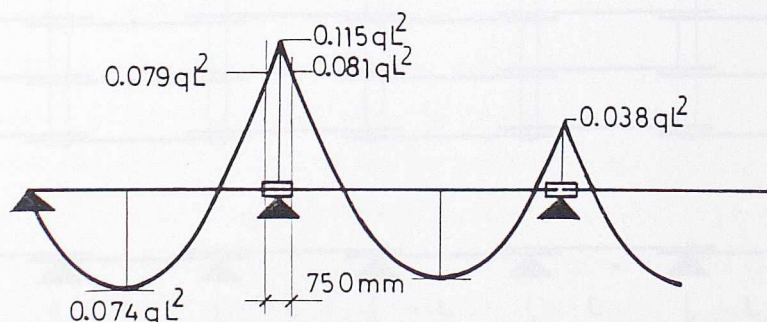
$$\sigma_{vpr} = \sigma_v + \alpha C (\sigma_m - \sigma_v) = 214 + 2,123 \cdot 0,047 (331 - 214) = 225 \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

Na osnovu račun-ske granice razvlačenja profila $\sigma_{vpr} = 225 \text{ N/mm}^2$ može se odrediti dopušteni napon za dimenzionisanje koji iznosi $\sigma_{dop} = 0,6 \cdot 225 = 135 \text{ N/mm}^2$ odnosno zahtevani otporni momenat rožnjače:

$$W_{pot} = \frac{0,092 qL^2 \cdot 10^3}{135} \doteq \frac{qL^2}{1,47} \quad / \text{cm}^3 / \quad (8)$$

Kod sistema preko dva polja, svi momenti savijanja u polju daju napone manje od nominalnog račun-skog napona, tako da momenti u polju nisu merodavni. Najveći momenat savijanja je iznad oslonca B i iznosi $0,115 qL^2$, pa je neophodno i ovaj presek ojačati ubacivanjem standardne podvezice (navlake) dužine 750 mm. Ubacivanjem podvezice merodavan momenat savijanja za dimenzionisanje postaje $0,081 qL^2$ (sl. II-45), pa zahtevani otporni momenat iznosi:

$$W_{pot} = \frac{0,081 qL^2 \cdot 10^3}{135} = \frac{qL^2}{1,67} \quad / \text{cm}^3 / \quad (9)$$



Sl. II-45 Merodavni momenti savijanja kod sistema preko dva polja za podvezicu dužine 750 mm

Preporuka za projektovanje ovakvog tipa rožnjače je da otporni momenat W mora biti veći od $qL^2/1,47$ za sistem preko jednog polja odnosno $qL^2/1,67$ za

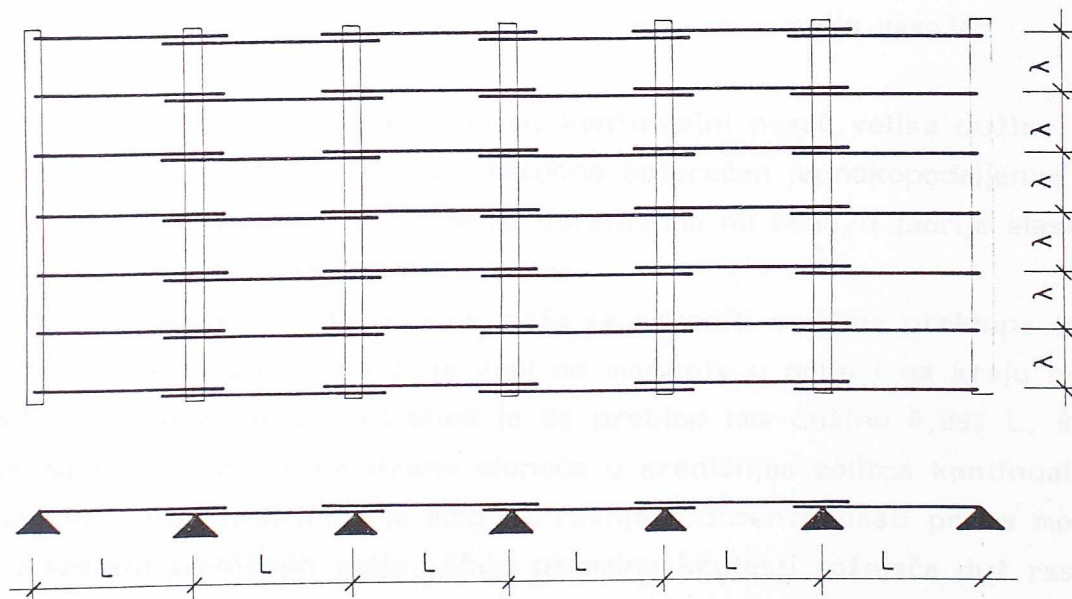
sistem preko dva polja. Kod rožnjača preko dva polja neophodno je postavljanje podvezica (navlaka) i iznad oslonaca gde rožnjača nije prekinuta. Pri proračunu otpornog momenta potrebno je uzeti u račun efektivne širine delova preseka koji su izloženi naponima pritiska.

Efikasnost ovog sistema bitno se povećava upotrebom kvalitetnijih čelika, tj. čelika sa višom granicom razvlačenja.

3.2. Sistem kontinualnih rožnjača sa preklapanjem

3.2.1. Uvod

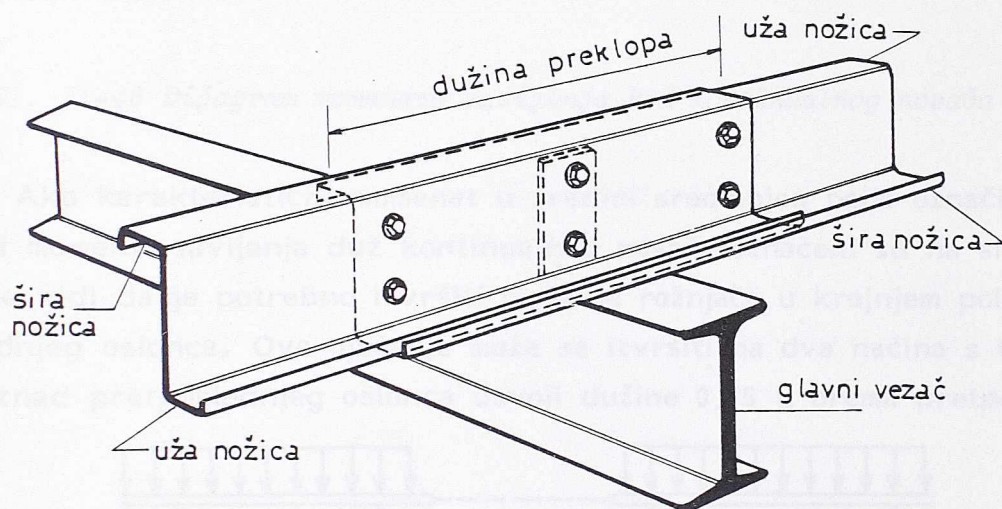
Sistem kontinualnih rožnjača sa preklapanjem je duže vremena u upotrebi, i uglavnom se koristio uz upotrebu klasičnih valjanih U profila ili hladno oblikovanih U i C profila. Suština kontinuiranja sastoji se u preklapanju rožnjača postavljanjem U ili C - profila tako da im se rebra priljube i njihovim prepuštanjem sa obe strane oslonaca, čime je omogućen prijem velikih, oslonačkih momenata dvostrukim poprečnim presekom (sl. II-46). Ovakav sistem rožnjača je ušao i u propise (npr. TGL 13450/03) i u DR. Nemačkoj je u širokoj upotrebi. Izvesnu manu ovog sistema predstavlja to da sve rožnjače nisu u istoj osi, već su postavljene naizmenično sa jedne odnosno druge strane ose, čime se dobija naizmenično postavljanje spojnih sredstava za vezu krovnog pokrivača.



Sl. II-46 Sistem rožnjača sa preklapanjem

Upotrebom posebno oblikovanog hladno oblikovanog Z profila prikazanog na sl. II-3 (kao za sistem sa podvezicama) problem veze krovnog pokrivača je prevaziđen, a sa ovim oblikom poprečnog preseka dobijaju se rožnjače mnogo

manje težine od odgovarajućih U ili C-preseka. Kod ovog sistema rožnjače se u naizmeničnim poljima okreću i iznad oslonaca preklapaju tako što uža nožica leže u širu prethodne rožnjače i obrnuto, pa se iznad oslonca dobija udvojen presek, a sve rožnjače ostaju u istoj osi. Preklop rožnjača se pruža sa svake strane oslonca do mesta gde su momenti približno jednaki maksimalnim momentima u polju. Rožnjače u krajnjim poljima, zbog većih momenata savijanja moraju se ojačavati. Medjusobna veza rožnjača na mestu preklopa (iznad oslonca) kao i veza sa glavnim nosačem ostvarena je običnim vijcima M16 kvaliteta 5.6 (sl. II-47). Iz razloga olakšane montaže sve rupe su probušene 2 mm većeg prečnika od prečnika stabla vijka tj. 18 mm.

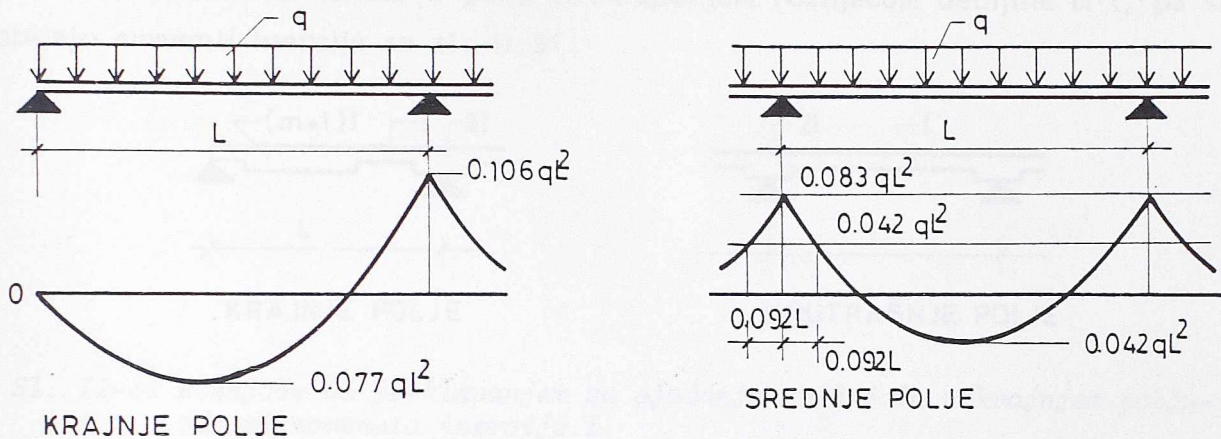


Sl. II-47 Veza rožnjača na mestu preklopa i sa glavnim vezačem

Na sl. II-48 prikazan je klasičan kontinualni nosač velike dužine, konstantnog poprečnog preseka, jednakih raspona opterećen jednakopodeljenim opterećenjem sa dijagramom momenta savijanja određenim na osnovu teorije elastičnosti u krajnjem i karakterističnom srednjem polju.

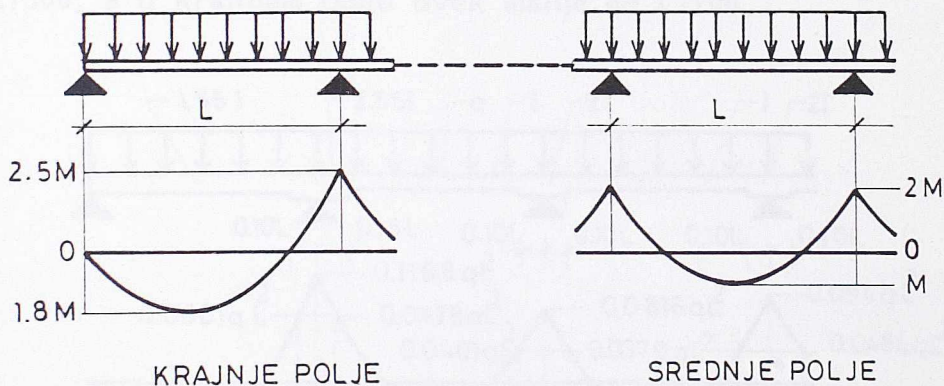
Posmatranjem srednjeg polja može se odrediti veličina preklopa tako da moment iznad oslonca bude dva puta veći od momenta u polju i na kraju preklopa. Da bi ovaj uslov bio ispunjen potrebno je da preklop ima dužinu $0,092 L$, što se zaokružuje na $0,10 L$ sa svake strane oslonca u središnjim poljima kontinualnog nosača. Na ovaj način praktično je moguće rožnjače dimenzionisati prema momentu savijanja u sredini središnjih polja. Zbog promene krutosti rožnjača duž raspona stvarni momenti savijanju nisu potpuno isti onima sa sl. II-48 ali se može pokazati da su razlike male.

Posmatranjem krajnjeg polja vidi se da su momenti savijanja približno 2,5 i 1,8 puta veći od momenata u sredini karakterističnog središnjeg polja.



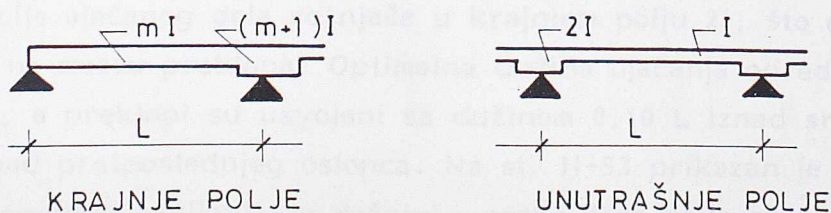
Sl. II-48 Dijagram momenata savijanja kod kontinualnog nosača

Ako karakteristični momenat u sredini središnjeg polja označimo sa M , merodavni momenti savijanja duž kontinualnog nosača označeni su na sl. II-49. Na slici se vidi da je potrebno izvršiti ojačanje rožnjača u krajnjem polju i iznad pretposlednjeg oslonca. Ovo ojačanje može se izvršiti na dva načina s tim da se preklop iznad pretposlednjeg oslonca usvoji dužine $0,15 L$ prema pretposlednjem polju.



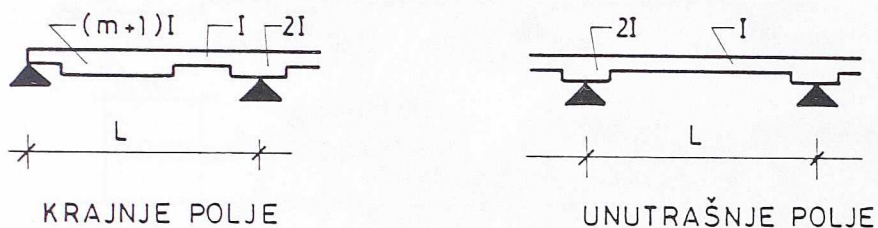
Sl. II-49 Raspored merodavnih momenata savijanja duž nosača

Sistem I Zahteva da rožnjača u krajnjem polju bude veće debljine tj. $m \cdot t$, gde je t debljina standardnog preseka u središnjim poljima sa momentom inercije I , a znajući da je za ovakve tankozidne preseke momenat inercije skoro direktno proporcionalan debljini t , dobijaju se momenti inercije sa sl. II-50.



Sl. II-50 Rožnjače sa preklapanjem sa krućom rožnjačom u krajnjem polju - odnosi momenata inercije I

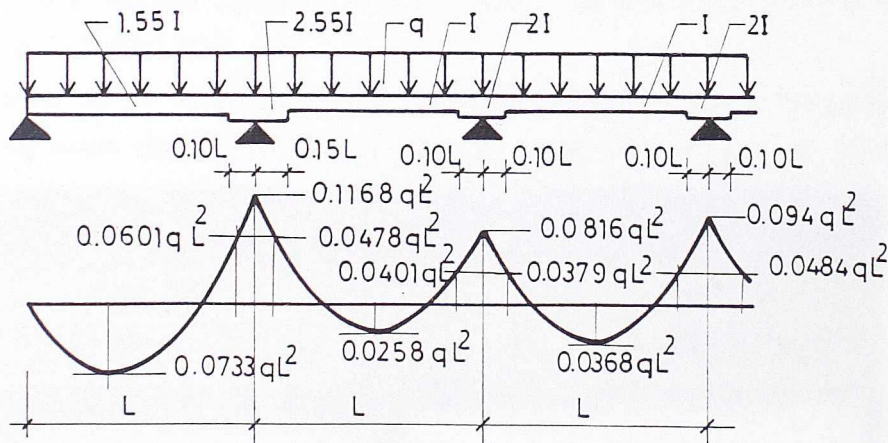
Sistem II zadržava sve rožnjače iste debljine t , a krajnje polje se ojačava u zoni velikih momenata u polju preklapanjem rožnjačom debljine $m \cdot t$, pa se dobijaju momenti inercije sa sl. II-51.



Sl. II-51 Rožnjače sa preklapanjem sa ojačanjem rožnjače u krajnjem polju - odnosi momenata inercije I

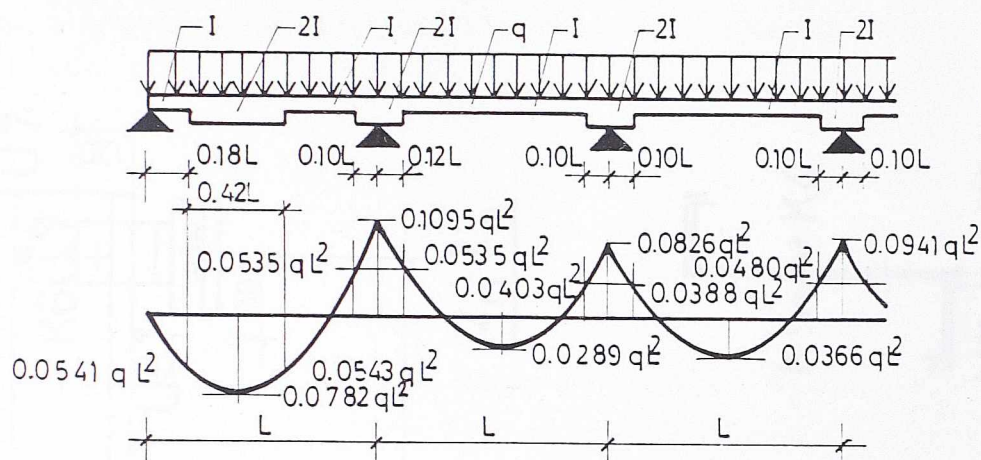
Na osnovu ranije rečenog uradjena je analiza ovih kontinualnih sistema preko šest polja na računaru.

U sistemu I variran je odnos momenata savijanja krajnjeg i središnjih polja u odnosu $m = 1,3$ do $1,8$. Najefikasnije su se pokazale rožnjače sa odnosom momenata inercije $m = 1,5$ do $1,6$. Na sl. II-52 prikazan je računski dobijen dijagram momenata savijanja za rožnjaču preko šest polja sa krajnjim poljima veće krutosti. Prema ovim analizama, pod projektnim opterećenjem, ugib u središnjim poljima je oko $L/300$, a u krajnjem polju uvek manje od $L/200$.



Sl. II-52 Dijagram momenata savijanja dobijen na računaru za sistem I

Kompjuterska analiza sistema II pokazala je da je optimalno rešenje sa momentom inercije ojačanog dela rožnjače u krajnjem polju $2I$, što odgovara i momentu inercije na mestu preklopa. Optimalna dužina ojačanja određena je probama i iznosi $0,42 L$, a preklopi su usvojeni sa dužinom $0,10 L$ iznad središnjih oslonaca i $0,12 L$ iznad preposlednjeg oslonca. Na sl. II-53 prikazan je računski dobijen dijagram momenata savijanja za rožnjaču preko šest polja sa ojačnim krajnjim poljem.

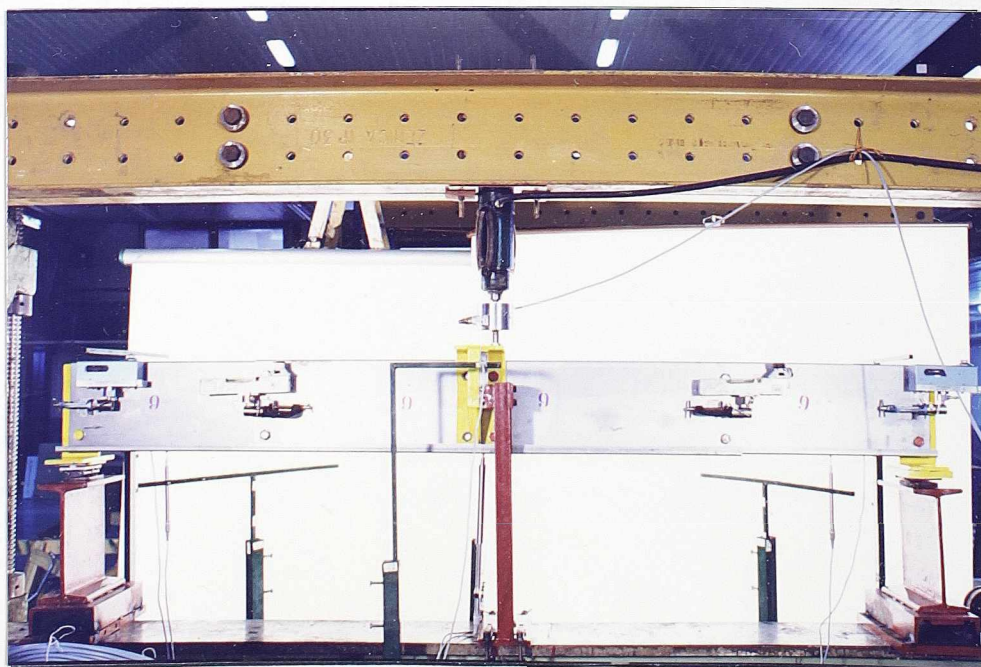


Sl. II-53 Dijagram momenata savijanja dobijen na računaru za sistem II

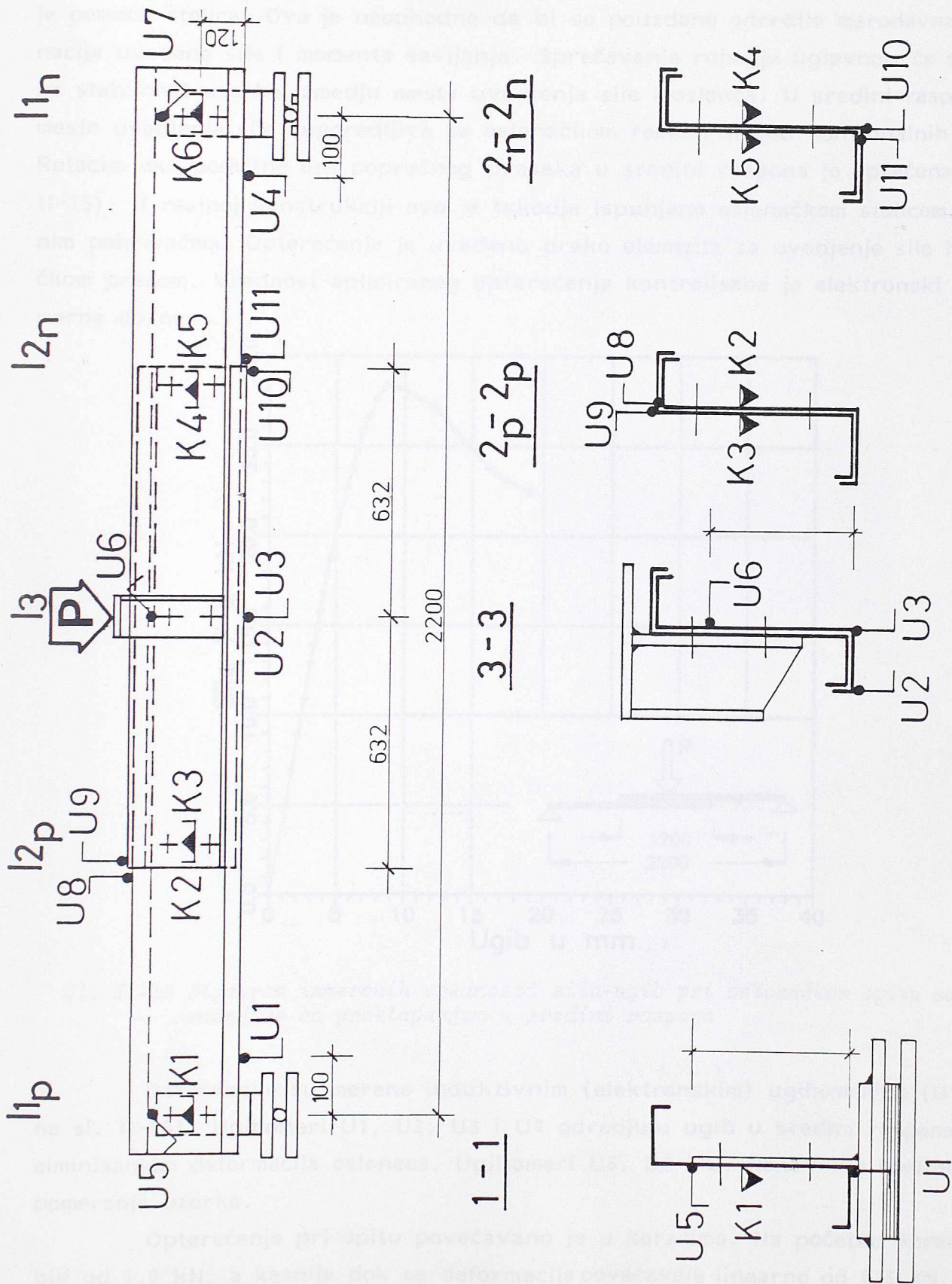
3.2.2. Određivanje graničnog momenta sistema sa preklapanjem oslon- čkim opitom

Ispitivanje uzoraka sa preklapanjem izvršeno je na Gradjevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, sa istom primenjenom mernom tehnikom i opremom kao i za ispitivanje rožnjača sa podvezicama. Dužina uzorka za ispitivanje određena je analizom nosača na računaru za kontinualni nosač preko šest polja. Kao metodavan usvojen je središnji oslonac pa je dužina uzorka za oslončki opit dobijena kao $0,3667 \cdot L = 0,3667 \cdot 6000 = 2200$ mm.

Dispozicija opita sa rasporedom mernih instrumenata prikazana je na sl. II-54, a shema sa svim dimenzijama i oznakama instrumenata na sl. II-55.

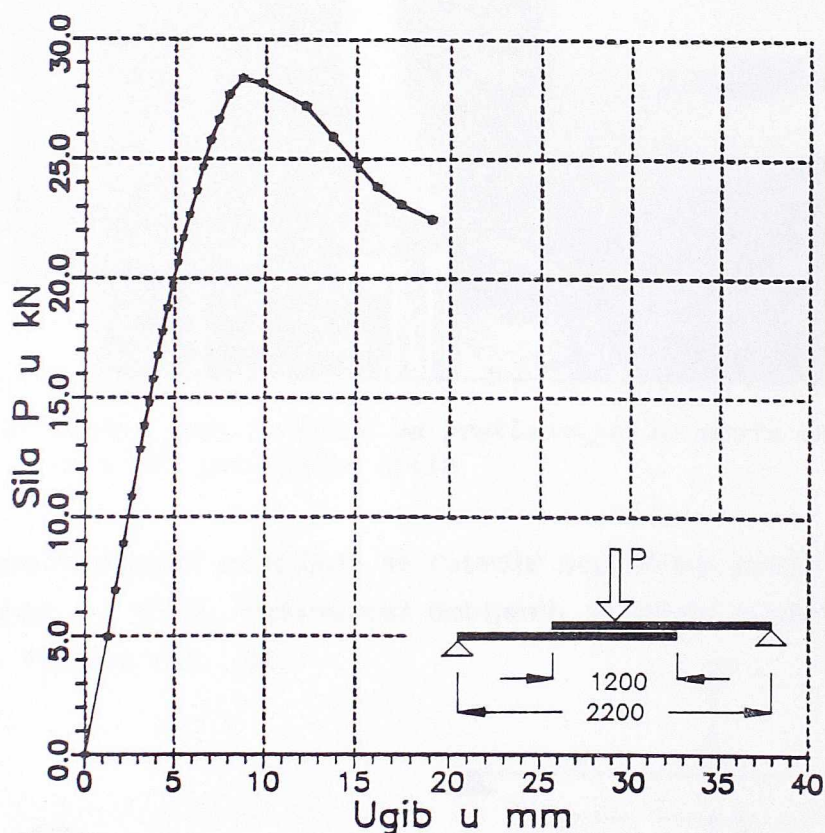


Sl. II-54 Raspored mernih instrumenata kod uzorka rožnjače sa preklapanjem pri oslončkom opitu



S1. II-55 Uzorak za ispitivanje rožnjače sa preklapanjem i raspored mernih mesta pri oslonačkom opitu.
 Oznake: U - ugibomer, K - klinometer

Uzorak za ispitivanje je Z-profil sa sl. II-3 uradjen od čelika Č.0148 kao i za rožnjače sa podvezicama. Uzorak je oslonjen na pokretno ležište sa dva valjka i nepokretno tangencijalno ležište. Rotacija oslonaca oko podužne ose sprečena je pomoću stolica. Ovo je neophodno da bi se pouzdano odredila merodavna kombinacija uvedene sile i momenta savijanja. Sprečavanje rotacije uglavnom će uticati na stabilnost uzorka između mesta uvođenja sile i oslonca. U sredini raspona je mesto uvođenja sile (upoređljiva sa oslonačkom reakcijom kod kontinualnih nosača). Rotacija oko podužne ose poprečnog preseka u sredini raspona je sprečena (sl. II-15). U realnoj konstrukciji ovo je takodje ispunjeno oslonačkom stolicom i krov-nim pokrivačem. Opterećenje je uvedeno preko elementa za uvođenje sile hidrauličkom presom. Vrednost apliciranog opterećenja kontrolisana je elektronski putem merne dozne.

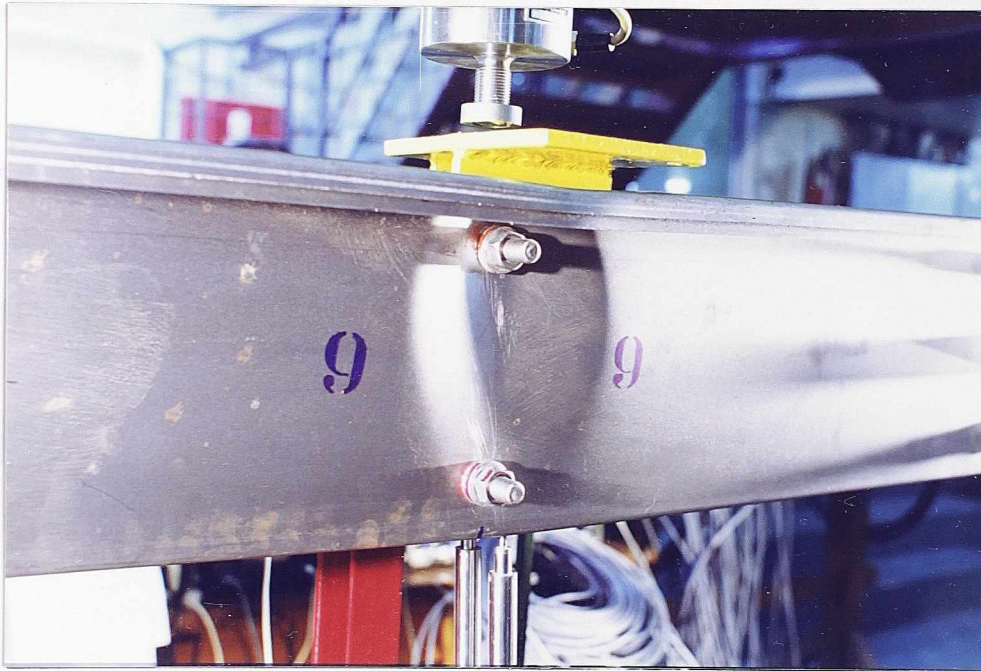


Sl. II-56 Dijagram izmerenih vrednosti sila-ugib pri oslonačkom opitu za rožnjače sa preklapanjem u sredini raspona

Deformacije su merene induktivnim (elektronskim) ugibomerima (U1-U7 na sl. II-55). Ugibomeri U1, U2, U3 i U4 određuju ugib u sredini raspona sa elminisanjem deformacija oslonaca. Ugibomeri U5, U6 i U7 kontrolišu horizontalno pomeranje uzorka.

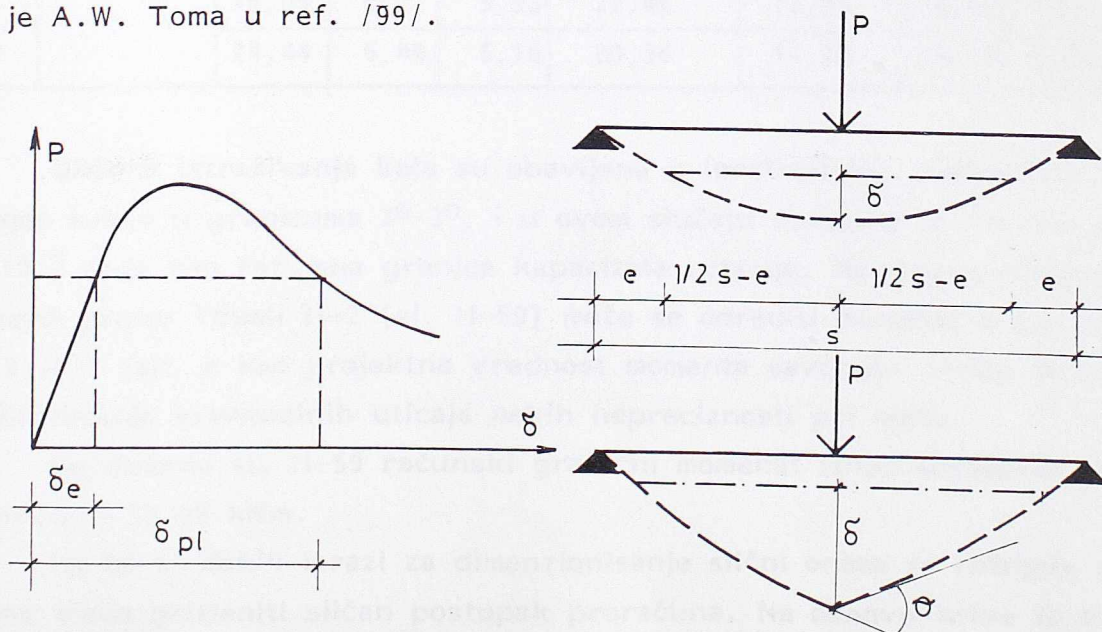
Opterećenje pri opitu povećavano je u koracima. Na početku koraci su bili od 1,0 kN, a kasnije dok se deformacija povećavala linearno od 0,5 kN. Posle linearnog ponašanje deformacije opiti su vršeni sa kontrolisanom deformacijom. Po

dostizanju maksimalnog opterećenja opit je tekao kontinuirano da bi se odredilo ponášenje opterećenje - ugib u post-maksimalnoj fazi. Registrovanje je vršeno dok maksimalna sila ne padne za 10%-15% uz istovremeno povećanje deformacije. Posle svakog koraka opterećenje i deformacije su registrovane. Dijagram opterećenje - ugib registrovan opitom u sredini raspona prikazan je na sl. II-56, a izgled loma na sl. II-57.



Sl. II-57 Izgled loma rožnjače sa preklapanjem na mestu unošenja sile pri oslonačkom opitu

Iz rezultata opita određuje se rotacija poprečnog preseka u post-maksimalnoj fazi prema sl. II-58. Pouzdanost dobijenih rezultata ovakvim postupkom dokazao je A.W. Toma u ref. /99/.



Sl. II-58 Rotacija poprečnog preseka pod opterećenjem u post-maksimalnoj fazi

Rotacija θ sa sl. II-58 može se sračunati prema izrazu (10):

$$\theta = \frac{2 (\delta_{pl} - \delta_e)}{\frac{1}{2} s - e} \quad (10)$$

gde je: θ - rotacija

δ_{pl} - ugib u post-maksimalnoj fazi (opadajući deo krive),

δ_e - ugib u pre-maksimalnoj fazi (rastući deo krive),

s - raspon uzorka,

e - položaj ugibomera za eliminisanje oslonačkih deformacija.

$$\text{Ugib } \delta \text{ određuje se izrazom } \delta = U_3 - \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (11)$$

U Tabeli II-2 vrednosti θ su sračunate na osnovu izraza (10) i (11) za različite nivoe opterećenja u post-maksimalnoj fazi.

Tabela II-2

Raspon s	Rastojanje e	Ugib U_3	Ugib U_1	Ugib U_4	Opterećenje F	Momenat M	Ugib		Rotacija $\theta \times 10^{-3}$
							δ_{pl}	δ_e	
mm	mm	mm	mm	mm	kN	kNm	mm	mm	rad
2200	240	8,69	3,30	3,07	28,36	15,60	5,51	5,51	0
		9,78	3,64	3,41	28,15	15,48	6,25	5,25	2,32
		12,20	4,32	4,06	27,20	15,00	8,01	4,83	7,39
		13,69	4,74	4,45	25,91	14,25	9,10	4,36	11,02
		15,02	5,10	4,83	24,78	13,63	10,05	4,08	13,88
		16,08	5,41	5,13	23,82	13,10	10,81	3,86	16,16
		17,36	5,78	5,50	23,09	12,70	11,72	3,65	18,77
		19,00	6,27	5,93	22,46	12,35	12,90	3,51	21,84
		24,44	6,44	6,16	20,36	11,20	18,14	3,05	35,09

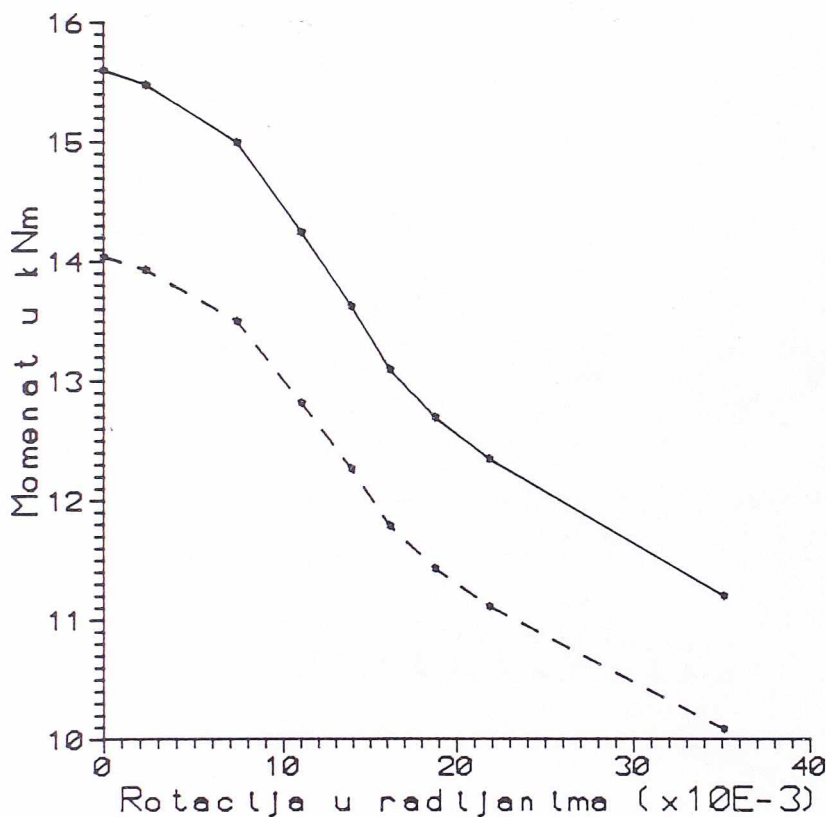
Obimna istraživanja koja su obavljena u inostranstvu pokazala su da se ovaj ugao kreće u granicama 2^0 - 3^0 , i u ovom slučaju usvojena je rotacija od 2^0 ($34,9 \cdot 10^{-3}$ rad) kao razumna granica kapaciteta rotacije. Na osnovu dijagramu $M-\theta$ sračunatih prema Tabeli II-2 (sl. II-59) može se odrediti momenat M pri rotaciji od $34,9 \cdot 10^{-3}$ rad, a kao projektna vrednost momenta savijanja usvaja se $0,9 M$ radi eliminisanja eventualnih uticaja nekih nepreciznosti pri opitu.

Na osnovu sl. II-59 računski granični momenat iznad središnjih oslonaca iznosi $M = 10,09$ kNm.

Da bi se dobili izrazi za dimenzionisanje slični onima za rožnjače sa podvezicama treba primeniti sličan postupak proračuna. Na osnovu krive sa sl. II-56 sila-ugib računskim putem dobijena je eksperimentalna kriva momenat-rotacija sis-

tema sa preklapanjem. Ova eksperimentalna kriva je na sl. II-60 prikazana isprekidanom linijom. Na osnovu eksperimentalne krive, a radi pojednostavljenja postupka proračuna, izvršena je idealizacija ove krive bilinearnom krivom (puna linija) koja je određena tako da za radno opterećenje $0,6 M_{\max}$ seče eksperimentalnu krivu. Kod sistema za preklapanjem početni deo eksperimentalne krive je potpuno linearan ($\sim 70\%$ od M_{\max}) te se najvećim delom eksperimentalna i idealizovana kriva poklapaju. Idealizovana veza izmedju momenta i rotacije izražava se u obliku:

$$\theta = 0,400 \cdot 10^{-3} \cdot M \text{ radijalna} \quad (12)$$



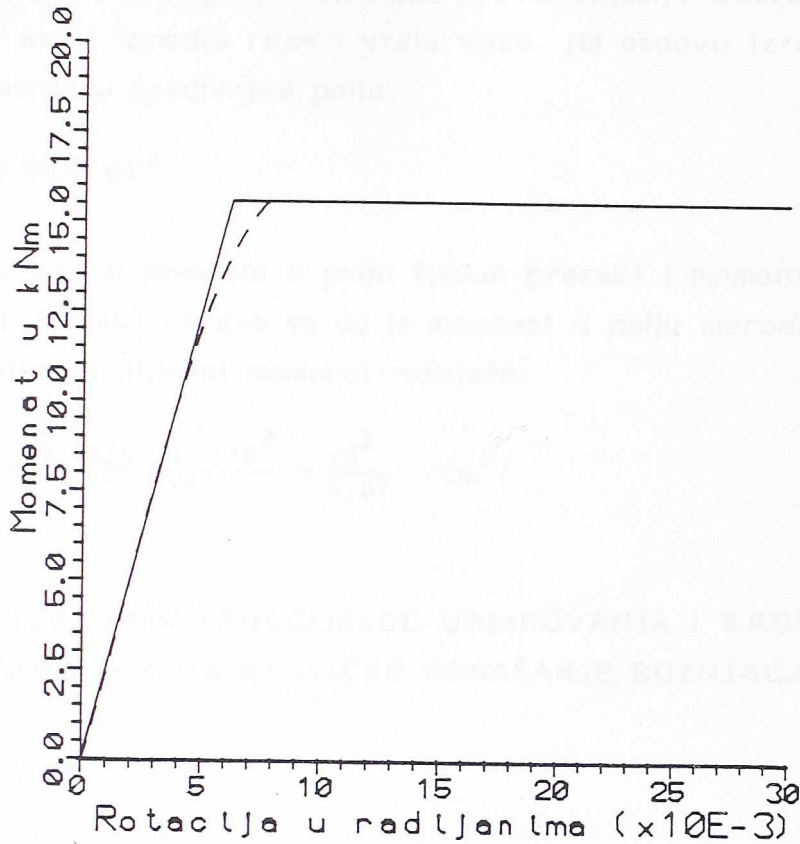
Sl. II-59 Projektna vrednost za relaciju $M - \theta$

Za jednakopodeljeno opterećenje q po središnjem rasponu L (sl. II-61) veza momenta i rotacije na kraju štapa data je izrazom (13) vodeći računa da je rožnjača uradjena od čelika C.0148 sa $\sigma_{vpr} = 22,5 \text{ kN/cm}^2$ i modulom elastičnosti od $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$. Statičke karakteristike ispitivane Z rožnjače su $I_x = 703 \text{ cm}^4$ i $W_x = 58 \text{ cm}^3$. Raspon realne rožnjače, kako je na početku rečeno, iznosi $L=6,0 \text{ m}$. Na osnovu ovih podataka i sl. II-61 dobija se:

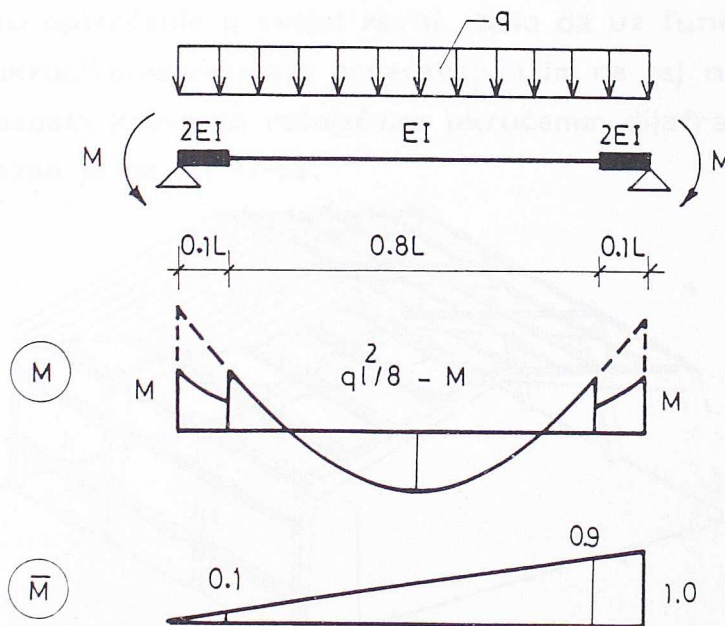
$$EI\theta = \int_L M\bar{m}dL \approx 40,417 \cdot 10^{-3} q \cdot L^3 - 400,0 \cdot 10^{-3} ML \quad (13)$$

Ubacivanjem idealizovane relacije (12) u (13) dobija se

$$M = 0,0811 qL^2 \quad (14)$$



Sl. II-60 Eksperimentalna i idealizovana kriva moment-rotacija
 $\theta = 0,400 \cdot 10^{-3} M$ za sistem rožnjača sa preklapanjem



Sl. II-61 Dobijanje računске relacije M , q i θ

Uporedjenjem izraza za momenat iznad središnjih oslonaca iz izraza (14) $0,0811 qL^2$ sa onim dobijenim računskim putem od $0,0947 qL^2$ (sl. II-52) uočava se da je momenat dobijen eksperimentom manji od računskog za $\sim 16\%$ što je posled-

dica proklizavanja ovakvog tipa veze (sa preklapanjem). Uzorak ovome je zazor izmedju profila kao i izmedju rupe i vrata vijka. Na osnovu izraza (14) dobija se i vrednost momenta u središnjem polju:

$$M = 0,0439 \text{ qL}^2 \quad (15)$$

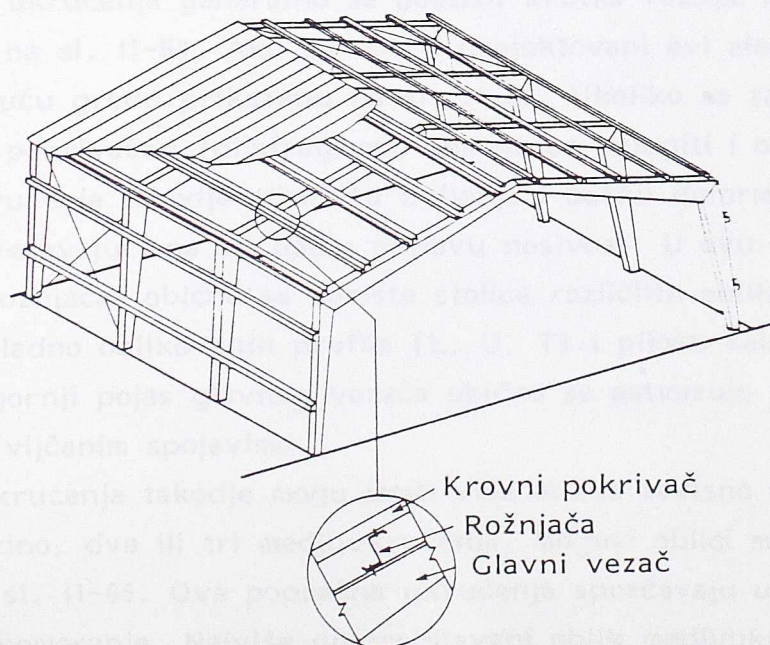
Uporedjenjem momenta u polju (jedan presek) i momenta iznad središnjih oslonaca (dupli presek) uočava se da je momenat u polju merodavan za dimenzionisanje te je zahtevani otporni momenat rožnjače:

$$W_{\text{pot}} = \frac{0,0439 \text{ qL}^2 \cdot 10^3}{135} = \frac{\text{ql}^2}{3,07} \text{ /cm}^3 \quad (16)$$

4. UTICAJ KONSTRUKCIJSKOG OBLIKOVANJA I KROVNOG POKRIVACA NA STATIČKO PONAŠANJE ROŽNJAČA

4.1. Uvod

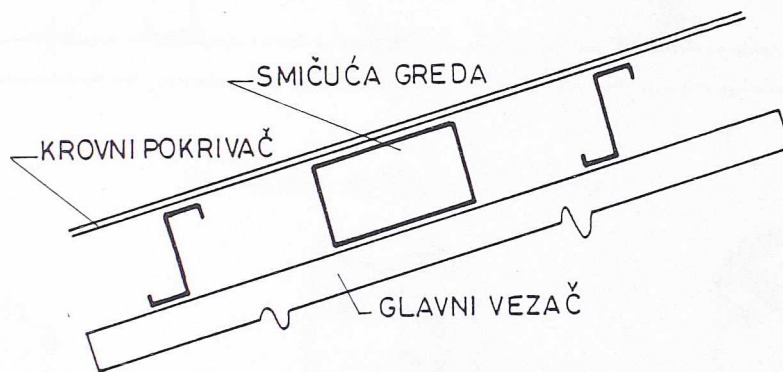
Hladno oblikovani čelični i aluminijumski paneli ili krovni pokrivači često se upotrebljavaju za pokrivanje i oblaganje industrijskih objekata. Ovakvi paneli i pokrivači mogu se iskoristiti i kao dijafragma, ako se isprojektuju tako da mogu da prime i prenesu opterećenja u svojoj ravni, tako da uz funkciju zatvaranja objekta obezbedjuju ukrućivanje rožnjača povećavajući im na taj način nosivost. Tipičan raspored elemenata krova sa rožnjačama ukrućenim dijafragmama (krovnim pokrivačem) prikazan je na sl. II-62.



Sl. II-62 Elementi krovne konstrukcije hač

Pravilno ukrućenje rožnjača krovnim pokrivačem mora da ispuni sledeće uslove:

1. pravilno vezivanje krovnog pokrivača za glavne vezače (sl. II-63) i kruće kalkanske zidove;
2. specijalno se moraju proučiti uslovi oslanjanja uz venac krova da bi se obezbedio pouzdan oslonac krovnom pokrivaču pri prenošenju smičućih sila;
3. pravilno vezivanje krovnih panela sa rožnjačama (veza sa po dva samorezna vijka u svakoj ili svakoj drugoj uvali) jer nepravilno izvedena veza može prouzrokovati neefikasno dejstvo dijafragme;
4. pravilno medjusobno povezivanje panela na preklopima.

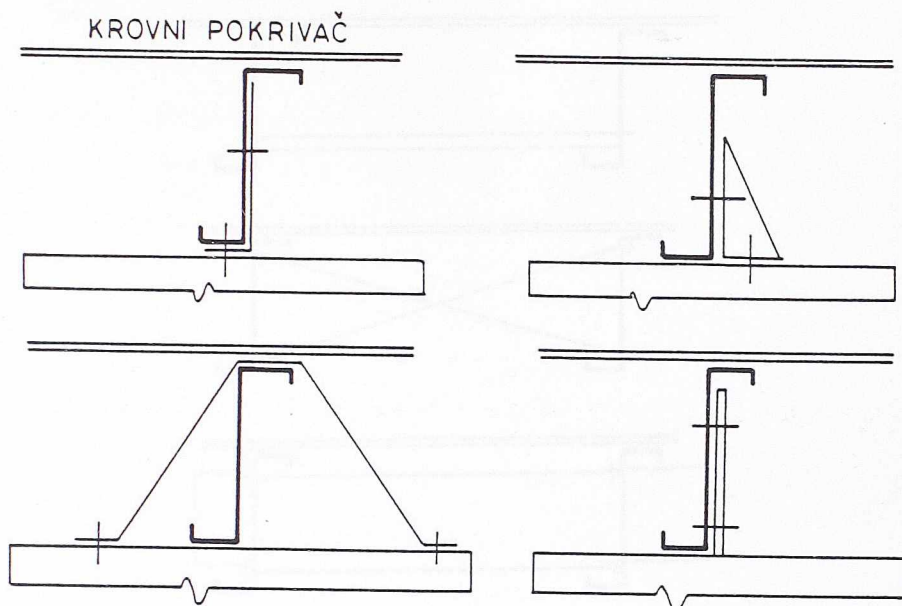


Sl. II-63 Smičuća greda

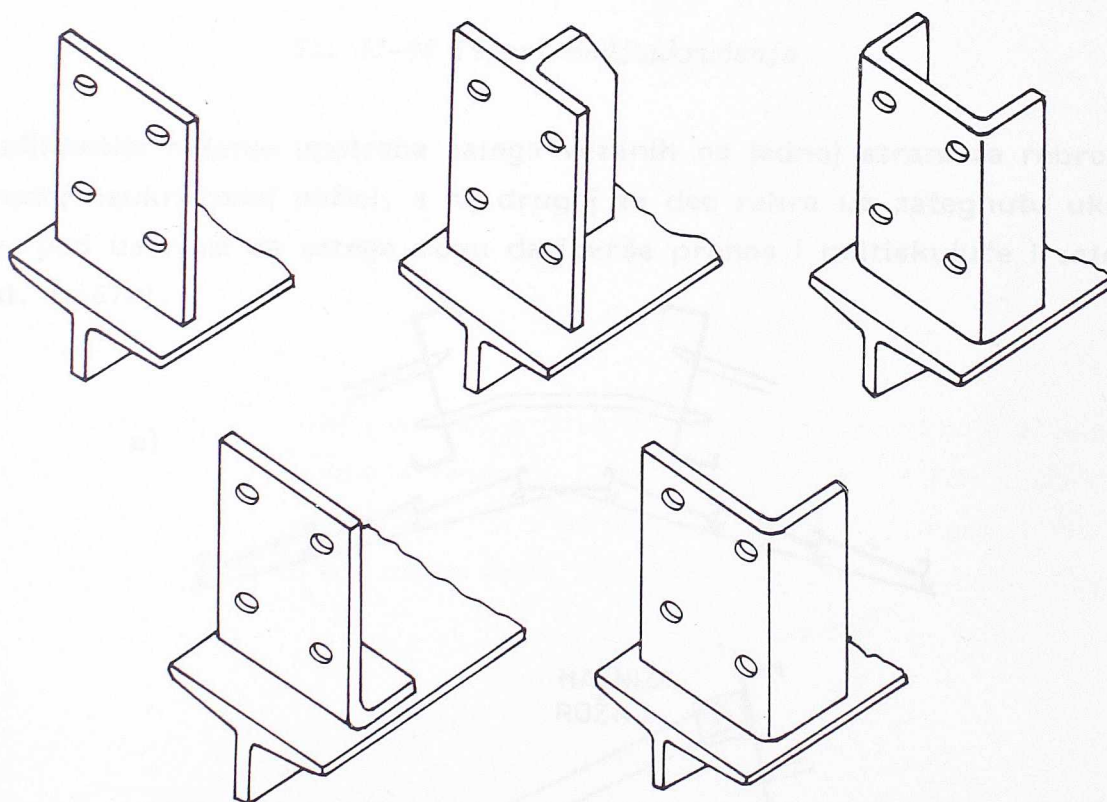
Ukoliko ukrućivanje krovnim pokrivačem nije dovoljno, što je slučaj ako nije ispunjen jedan od gore navedenih uslova, onda je upotreba krajnjih i/ili medjuukrućenja jedan od načina da se bolje iskoristi nosivost rožnjača.

Krajnja ukrućenja generalno se postižu krutim vezama na krajevima kao što je prikazano na sl. II-64. Ako su dobro projektovani ovi elementi mogu zameniti i krutu smičuću gredu prikazanu na sl. II-63. Ukoliko se zahteva puna saradnja sa krovnim pokrivačem (diјаfragmom) moraju se ispuniti i ostali propisani uslovi. Krajnja ukrućenja takodje eliminišu uvijanje i bočnu deformaciju rožnjača iznad oslonaca povećavajući na taj način njihovu nosivost. U ovu svrhu na realnim konstrukcijama rožnjača, obično se koriste stolice različitih oblika izvedene od toplo valjanih ili hladno oblikovanih profila (L, U, T) i pljošti čelik (sl. II-65). Veza stolice za gornji pojas glavnog vezača obično se ostvaruje zavarivanjem mada ima rešenja i sa vijčanim spojevima.

Medjuukrućenja takodje mogu imati više oblika zavisno od raspona upotrebljavaju se jedno, dva ili tri medjuukrućenja. Mogući oblici medjuukrućenja prikazani su na sl. II-65. Ova poprečna ukrućenja sprečavaju uvijanje rožnjača i njihovo bočno pomeranje. Najviše upotrebljavani oblik medjuukrućenja je zatega koja može biti kruta (L, U, cev) ili meka (\emptyset čelik sa zateznim navrtkama). Na

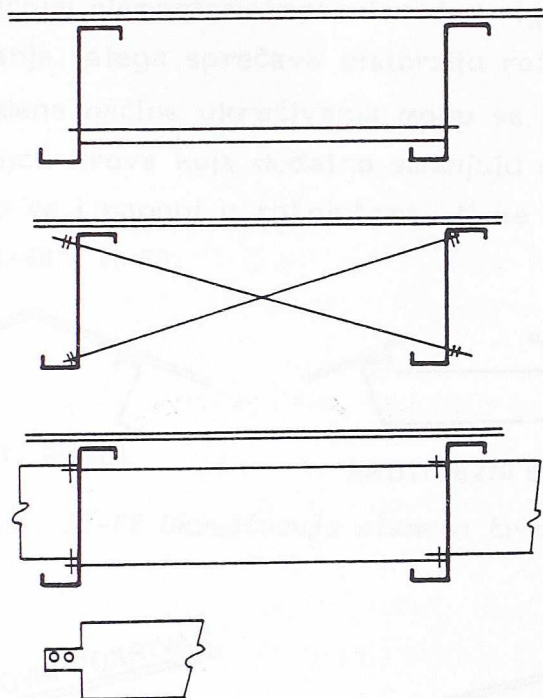


Sl. II-64 Krajnja ukrućenja



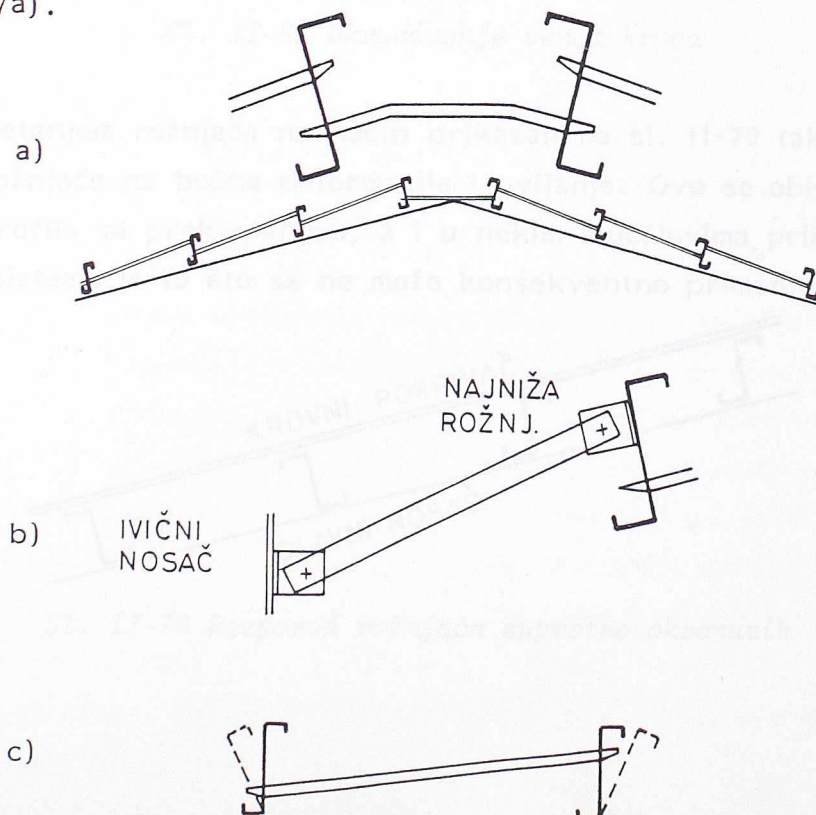
Sl. II-65 Oblici stolica koje se primenjuju za vezu rožnjača za glavni nosač

osnovu velikog broja eksperimenata dokazano je da je krovni pokrivač dovoljan da obezbedi bočnu stabilnost rožnjače za gravitaciono opterećenje. Međutim, problem se javlja pri sišućem dejstvu vetra kada je nepridržana nožica pritisnuta. U svrhu obezbedjenja bočne stabilnosti rožnjača na sišuće dejstvo vetra pokazalo



Sl. II-66 Tipovi medjuukrućenja

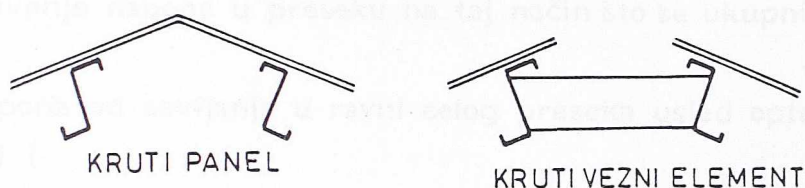
se najefikasnije rešenje upotreba zatega vezanih na jednoj strani za rebro pri pritisnutoj neukrućenoj nožici, a na drugoj za deo rebra uz zategnutu ukrućenu nožicu, pod uslovom da zatege mogu da izvrše prenos i pritiskujuće i zatežuće sile (sl. II-67a).



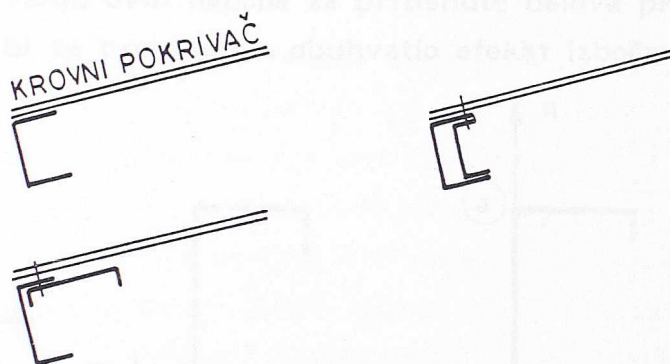
Sl. II-67 Primena zatega pri sišućem dejstvu vetra

U fazi dok ne dodje krovni pokrivač neophodno je najnižu rožnjaču čvrsto vezati sa nekim ivičnim elementom (npr. fasadna rigla-poklapača) sl. II-67b. Ovakav način postavljanja zatega sprečava distorziju rožnjače (sl. II-67c).

Uz već navedene načine ukrućivanja mogu se primeniti i određena ukrućenja na slemenu i vencu krova koja dodatno smanjuju deformacije u ravni krova, a stim u vezi smanjuju se i naponi u rožnjačama. Neke karakteristične mogućnosti prikazane su na sl. II-68 i II-69.

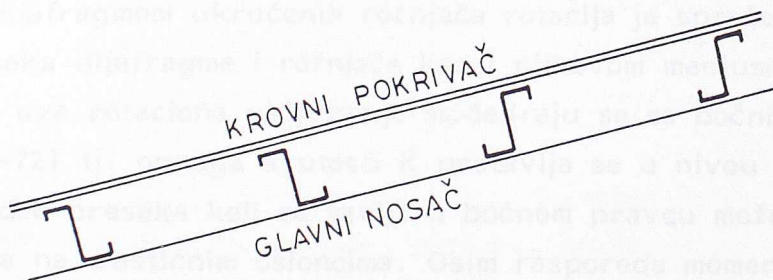


Sl. II-68 Ukrućivanje slemena krova



Sl. II-69 Ukrućivanje venca krova

Okretanjem rožnjača na način prikazan na sl. II-70 takodje se poboljšava krutost rožnjače na bočne deformacije i uvijanje. Ovo se obično koristi kod rožnjača C-profila sa preklapanjem, a i u nekim slučajevima primene Z-rožnjača. Mana ovoga sistema je to što se ne može konsekventno primeniti modulacija.



Sl. II-70 Raspored rožnjača suprotno okrenutih

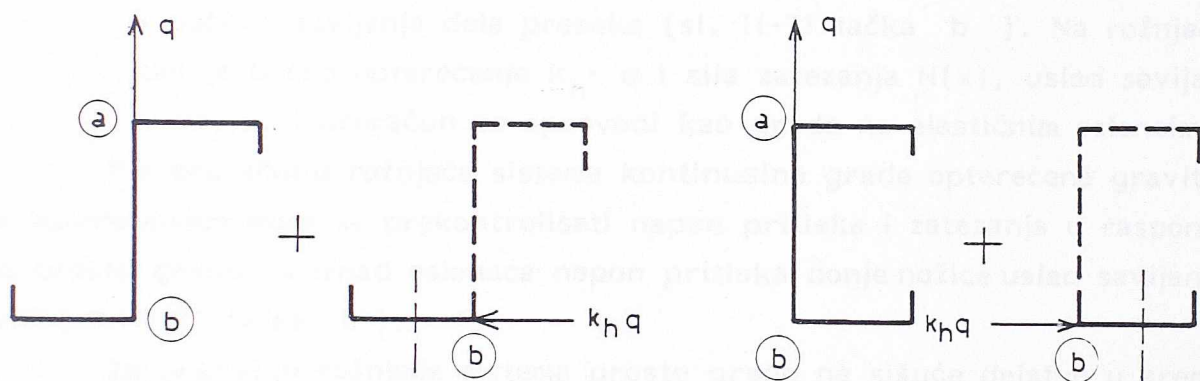
4.2. Analitičko - eksperimentalni postupak obuhvatanja uticaja krovnog pokrivača na statičko ponašanje rožnjača

4.2.1. Postupak proračuna prema Peköz-u

Umesto primene relativno komplikovane teorije za određivanje napona usled savijanja i torzije rožnjača, ovde je prikazan jedan jednostavan uprošćen metod za određivanje napona u preseku na taj način što se ukupni naponi dobijaju sabiranjem:

- napona od savijanja u ravni celog preseka usled opterećenja q (sl. II-71) i
- napona od savijanja dela preseka usled bočnog opterećenja $k_h \cdot q$ (sl. II-71).

Pri određivanju ovih napona za pritisnute delove preseka treba primeniti efektivne širine da bi se proračunom obuhvatio efekat izbočavanja.

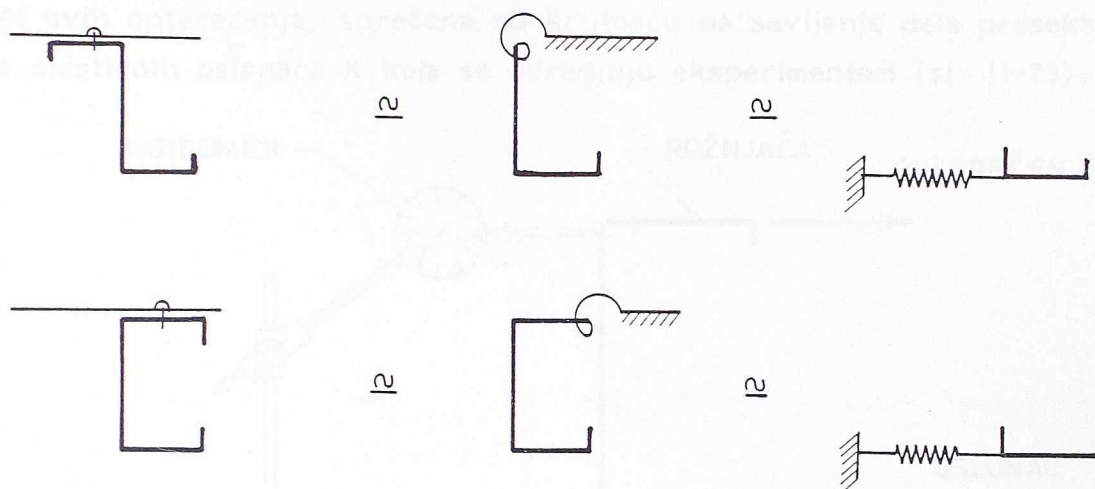


Sl. II-71 Opis modela savijanje + torzija tako što je izvršeno pojednostavljenje te je sistem pretvoren u savijanje u ravni + bočno savijanje dela preseka. Na slici je prikazan slučaj sišućeg opterećenja. Za gravitaciono opterećenje bočno savijanje se javlja u suprotnom pravcu

Kod dijafragmom ukrućenih rožnjača rotacija je sprečena karakteristikama poprečnih preseka dijafragme i rožnjače kao i njihovom međusobnom vezom. U ovom postupku ova rotaciona uklještenja modeliraju se sa bočnim rotacionim uklještenjem (sl. II-72) tj. opruga krutosti K postavlja se u nivou slobodne nožice. Na ovaj način deo preseka koji se savija u bočnom pravcu može se analitički tretirati kao greda na elastičnim osloncima. Osim rasporeda momenta duž grede moraju se i uslovi na osloncima uzeti u račun. Ove pretpostavke znatno pojednostavljaju postupak proračuna.

Pri proračunu rožnjače sistema proste grede opterećene gravitacionim opterećenjem mora se prekontrolisati:

- Napon pritiska u gornjoj nožici usled savijanja u ravni (sl. II-71 tačka a);



Sl. II-72 Idealizacija rotacionog uklještenja

- Napon zatezanja u donjoj nožici usled savijanja u ravni celog preseka i bočnog savijanja dela preseka (sl. II-71 tačka b). Na rožnjaču deluje bočno opterećenje $k_h \cdot q$ i sila zatezanja $N(x)$, usled savijanja u ravni, i proračun se sprovodi kao greda na elastičnim osloncima.

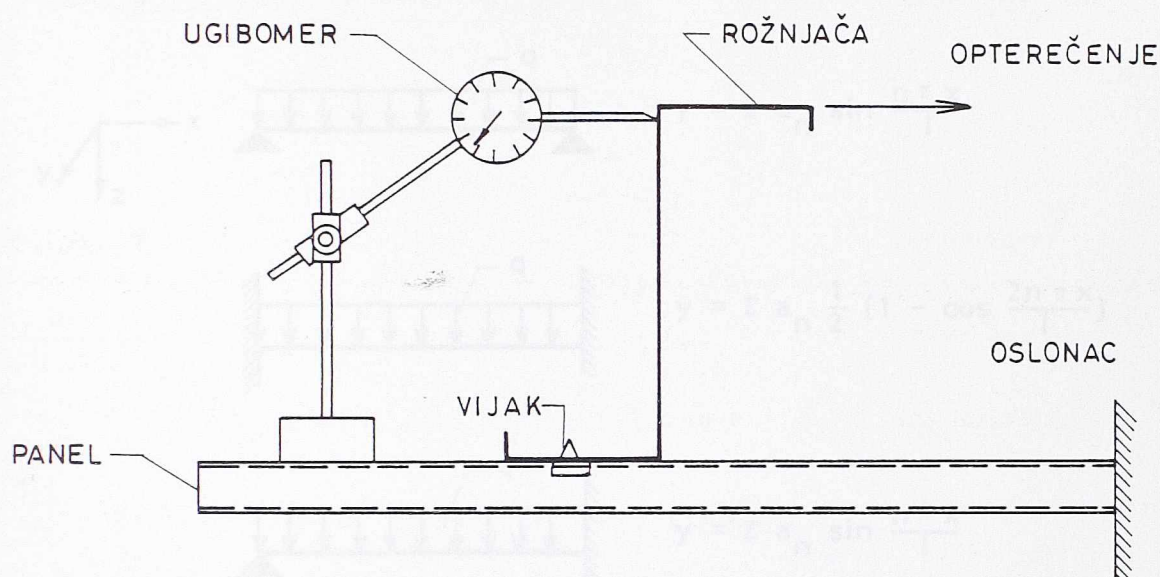
Pri proračunu rožnjače sistema kontinualne grede opterećene gravitacionim opterećenjem mora se prekontrolisati napon pritiska i zatezanja u rasponu kao i za prostu gredu, a iznad oslonaca napon pritiska donje nožice usled savijanja u ravni (sl. II-71 tačka b).

Za proračun rožnjače sistema proste grede na sišuće dejstvo u sredini raspona treba proveriti napon pritiska donje nožice usled savijanja u ravni i bočnog savijanja dela preseka (sl. II-71 tačka b). Na rožnjaču deluje bočno opterećenje $k_h \cdot q$ i sila pritiska $N(x)$, usled savijanja u ravni, i proračun se sprovodi kao greda na elastičnim osloncima.

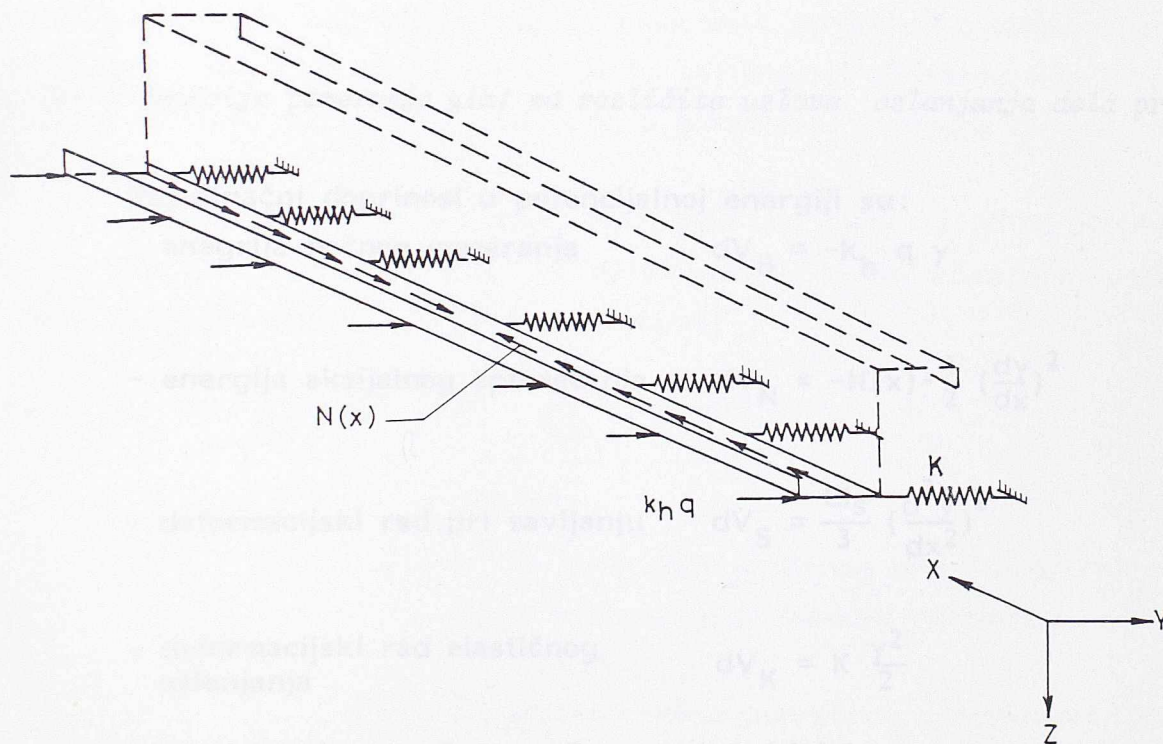
Kod rožnjače sistema kontinualne grede opterećene sišućim opterećenjem treba proveriti u polju napon pritiska kao za prostu gredu. Napon pritiska u gornjoj nožici iznad oslonca treba proveriti usled savijanja u ravni (sl. II-71 tačka a).

Sa ranije opisanim pojednostavljenjem dovoljno je da se proračunom odrede naponi usled savijanja u ravni celog preseka na mestima oslonaca, a u rasponu se ovim naponima dodaju i naponi usled bočnog savijanja dela preseka. Pri određivanju napona usled savijanja u ravni celog preseka primenjuje se koncept efektivne širine za pritisnute delove preseka. Ovde će biti opisan samo postupak određivanja napona usled bočnog savijanja dela preseka. Najopštiji slučaj u kome je deo preseka opterećen prikazan je na sl. II-74. Aksijalno opterećenje $N(x)$ varira duž raspona usled savijanja u ravni momentom $M(x)$. Pri sišućem optereće-

nju $N(x)$ je sila pritiska, a pri gravitacionom sila zatezanja. Pomeranja, koja su rezultat ovih opterećenja, sprečena su krutošću na savijanje dela preseka i krutostima elastičnih oslonaca K koja se određuju eksperimentom (sl. II-73).



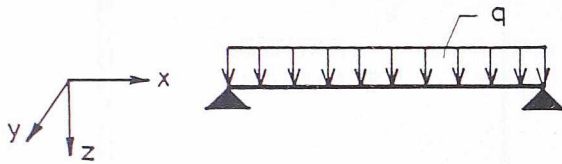
Sl. II-73 Odredjivanje konstante opruge K pomoću eksperimenta



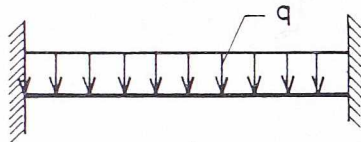
Sl. II-74 Deo preseka opterećen bočnim savijanjem

Pri odredjivanju napona može se primeniti energetska metoda. Ukupna potencijalna energija elastičnog sistema formulisana je kao funkcija pomeranja i njihovih izvoda. Primenjen je princip minimuma potencijalne energije, gde su amplitude a_n funkcije pomeranja i mogu biti određene, a potom i bočni momenat savijanja $M(y)$, te naponi usled njega. Funkcije pomeranja obično su predstavljene tri-

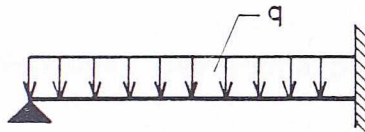
gönometrijskim nizovima koji se razlikuju s obzirom na uslove oslanjanja grede (sl. II-75).



$$y = \sum a_n \sin \frac{n \pi x}{l}$$



$$y = \sum a_n \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2n \pi x}{l} \right)$$



$$y = -\sum a_n \sin \frac{n \pi x}{l}$$

Sl. II-75 Funkcije pomeranja $y(x)$ za različite uslove oslanjanja dela preseka

Pojedinačni doprinosi u potencijalnoj energiji su:

- energija bočnog pomeranja $dV_B = -k_h q y$ (17)

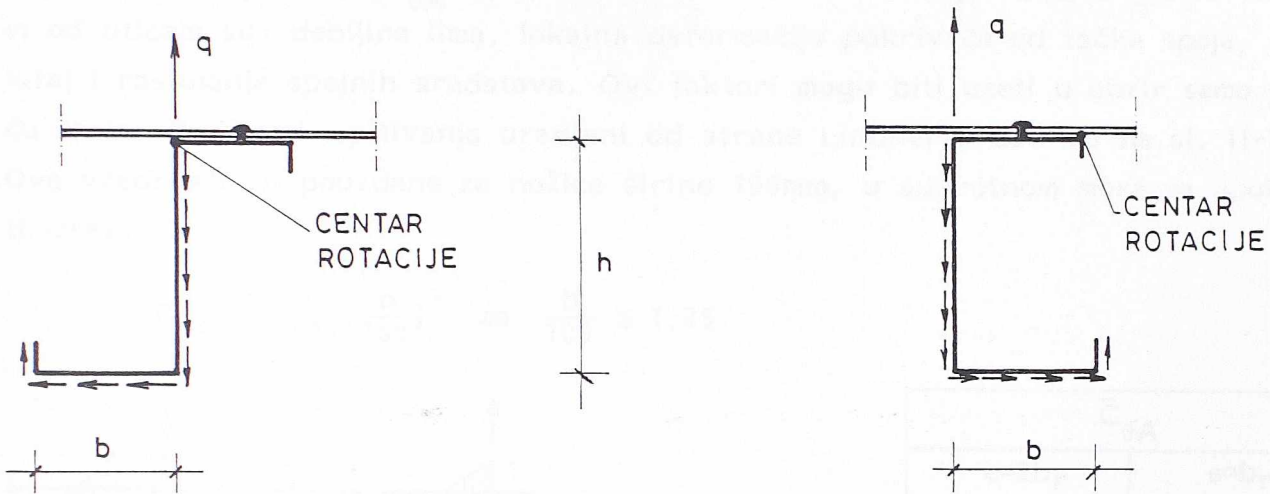
- energija aksijalnog opterećenja $dV_N = -N(x) \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2$ (18)

- deformacijski rad pri savijanju $dV_S = \frac{E I_s}{3} \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2$ (19)

- deformacijski rad elastičnog oslanjanja $dV_K = K \frac{y^2}{2}$ (20)

Isti postupak proračuna može se primeniti i za gravitaciono i za sišuće opterećenje pri određivanju napona usled bočnog savijanja, s tim da:

- aksijalno opterećenje menja znak;
- konstanta opruge K može imati različite vrednosti;
- deformacijski rad pri savijanju je različit pošto I_s nije redukovano za opterećenje zatezanjem;
- bočno opterećenje $k_h q$ je različito pošto je i centar rotacije različit (sl. II-76)



Sl. II-76 Položaj centra rotacije kod Z i C-preseka rožnjača

4.2.2. Postupak proračuna prema Lindner-u

Elastično uvijanje rožnjače, kao rezultat torzionog opterećenja sastoji se uglavnom od deformacije poprečnog preseka same rožnjače i lokalne deformacije spoja. Osim toga javlja se i deformacija od savijanja profilisanog lima u pravcu njegovog raspona, ali je ovaj uticaj mali u poredjenju sa druga dva pa se može zanemariti.

Matematički model za određivanje krutosti spoja dat je od strane Lindner-a i Gregull-a (1986). Krutost se može predstaviti kao višestruki sistem interakcijom torzionih opruga (sl. II-77) i izrazom:

$$\frac{1}{C_{\theta}} = \frac{1}{C_{\theta A}} + \frac{1}{C_{\theta P}} \quad (21)$$

gde je:

C_{θ} = koeficijent torzionog uklještenja

$C_{\theta A}$ = krutost spoja između rožnjače i profilisanog lima

$C_{\theta P}$ = deformacija poprečnog preseka rožnjače

Sl. II-77 Model opruga

Deformacija poprečnog preseka $C_{\theta P}$ sračunava se na osnovu momentnog dijagrama sa sl. II-78 pa se dobija:

- za gravitaciono opterećenje

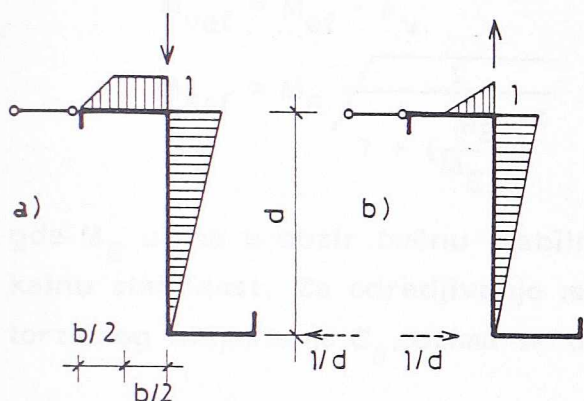
$$C_{\theta P} = E \cdot t^3 / (4d + 8b) \quad (22)$$

- za sišuće opterećenje

$$C_{\theta P} = E \cdot t^3 / (4d + 2b) \quad (23)$$

Krutost spoja $C_{\vartheta A}$ zavisi od konstruktivnih detalja veze, a glavni faktori od uticaja su: debljina lima, lokalna deformacija pokrivača od tačke spoja, položaj i rastojanje spojnih sredstava. Ovi faktori mogu biti uzeti u obzir samo pomoću opita. Rezultati ispitivanja uradjeni od strane Lindner-a dati su na sl. II-79. Ove vrednosti su pouzdane za nožice širine 100mm, u suprotnom mora se upotrebiti izraz:

$$C_{\vartheta A} = \bar{C}_{\vartheta A} \left(\frac{b}{100}\right)^2 \quad \text{za} \quad \frac{b}{100} \leq 1,25 \quad (24)$$

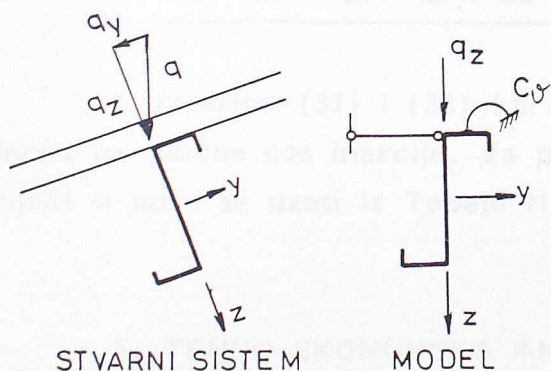


	$\bar{C}_{\vartheta A}$	
	$e=2b_r$	$e=b_r$
Gravitaciono opterećenje	3,1	5,2
Sišuće opterećenje	1,7	2,6

Sl. II-78 Raspored momenata pri računu deformacije poprečnog preseka
a) gravitaciono opterećenje
b) sišuće opterećenje

Sl. II-79 Krutost spoja $\bar{C}_{\vartheta A}$ (kNm/m)

U aproksimativnom rešenju uzimaju se u obzir samo momenti savijanja oko y-ose (paralelno krovnoj ravni) usled faktorisanog opterećenja q_z (sl. II-80). Ovi naponi ne smeju da prekorače napon razvlačenja σ_v . Opterećenje q_z koje pripada ovoj fazi označava se sa q_n . Pri korišćenju ovog aproksimativnog rešenja mora se prekontrolisati da li bočno torziono izvijanje može da se javi ili ne. Granično opterećenje q_u se sračunava prema izrazu:



$$q_u = q_n \cdot \kappa_M / k_d \quad (25)$$

gde je:

$$q_n = \alpha \cdot W_{ef} \cdot \sigma_v / L^2$$

α = faktor momentne raspodele (za prostu gredu = 8)

κ_M = redukциони faktor za bočno torziono izvijanje

k_d = faktor koji uzima u obzir torzione efekte

W_{ef} = efektivni otporni momenat

Sl. II-80 Rožnjača sa gornjom nožicom ukrućenom profilisanim limom

Redukcioni faktor za bočno torziono izvijanje može se odrediti iz izraza:

$$k_M = \left(\frac{1}{1 + \bar{\lambda}_{Mef}^5} \right)^{0,4} \quad (27)$$

gde je:

$$\bar{\lambda}_{Mef} = \sqrt{\frac{M_{vef}}{M_{Eef}}} \quad (28)$$

$$M_{vef} = M_{ef} \cdot \sigma_v \quad (29)$$


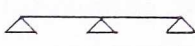
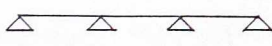
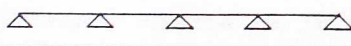
$$M_{Eef} = M_E \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{M_E}{M_{E,l}} \right)^2}} \quad (30)$$

gde M_E uzima u obzir bočnu stabilnost, $M_{E,l}$ izbočavanje, a M_{Eef} globalnu i lokalnu stabilnost. Za određivanje momenta bočnog torzionog izvijanja M_E koeficijent torzionog uklještenja C_ϑ , uzima se u račun kao:

$$M_E = \frac{k}{L} \sqrt{G \cdot I^* \cdot E \cdot I_z} \quad (31)$$

$$I^* = I + \frac{C_\vartheta \cdot L^2}{\pi^2 \cdot G} \quad (32)$$

Tabela II-3

SISTEM	TIP OPTEREĆENJA	
	gravitaciono	sišuće
	∞	10,3
	17,7	27,7
	12,2	18,3
	14,6	20,5

U izrazima (31) i (32) karakteristike poprečnog preseka računaju se u odnosu na glavne ose inercije. Za pojednostavljeni proračun bočnog izvijanja koeficijent k može se uzeti iz Tabele II-3.

5. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA ROŽNJAČA OD HLADNO OBLIKOVANIH PROFILA

U okviru ovog dela teze uradjena je tehno-ekonomska analiza rožnjača sa akcentom na sisteme rožnjača od hladno oblikovanih profila opisanih ranije (sistem

sa podvezicama i sa preklapanjem. Prvi pokazatelj optimalnosti nekog rešenja je utrošak materijala po m^2 osnove objekta ili po m' rožnjače. Kao što je rečeno u tački 3.1.1. analizom objekata izgradjenih u Jugoslaviji poslednjih godina uočeno je da je najveći broj rožnjača izveden sa rasponom $L = 6,0$ m, na medjusobnom rastojanju $\lambda = 2,0$ do $3,0$ m i sa nagibom krova od oko 8° . Za pokrivanje krova obično se koristi čelični ili aluminijumski profilisani limovi, što je i trend u svetu, a u direktnoj je vezi sa nagibom krova.

Na osnovu ovih podataka izabrana su dva raspona za analizu: $L = 6,0$ m i $L = 8,0$ m sa sledećim statičkim sistemima i izborom profila:

1. sistem proste grede od vruće valjanih I profila;
2. sistem kontinualnog nosača od vruće valjanih I profila;
3. sistem proste grede od hladno oblikovanih šupljih pravougaonih profila;
4. sistem proste grede od hladno oblikovanih C profila;
5. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa podvezicama (navlakama);
6. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa preklapanjem.

Prva tri sistema sa ove liste, do sada su u Jugoslaviji, najviše u upotrebi. Sistem proste grede od hladno oblikovanih C profila analiziran je kao reprezentativan za klasičan sistem upotrebe hladno oblikovanih profila za rožnjače. Poslednja dva, tj. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa podvezicama i sa preklapanjem, razvijenih u okviru ove teze, reprezentuju savremeni pristup projektovanju i konstruisanju rožnjača od HOP.

Valjani I profili koji su ovde analizirani uzeti su iz kataloga jedinog našeg proizvođača RMK Zenica. Izbor hladno oblikovanih profila, takodje je izvršen na osnovu proizvodnog programa jugoslovenskih proizvođača i to za šuplje pravougaone profile: "FAHOP"-Aleksinac i "11. oktombri"-Kumanovo, a za C profile: "FAHOP"-Aleksinac, "UTVA"-Pančevo i "Železarna Jasenice". Kako se Z profili sa različitim širinama nožica ne proizvode u Jugoslaviji to su za ovu analizu usvojene četiri različite dimenzije (visine) sa variranjem debljine lima prema Tabeli II-4.

Tabela II-4

Oznaka	Z 140		Z 170			Z 200				Z 240		
Debljina zida /mm/	1,6	1,8	1,6	1,8	2,5	1,6	1,8	2,0	2,5	2,0	2,5	3,2*
Masa g (kg/m)	3,15	3,36	3,73	4,19	5,82	4,21	4,74	5,27	6,58	6,31	7,89	10,10
Momenat inercije I_x (cm ⁴)	126	134	210	235	323	323	363	402	499	703	874	1108
Otporni momenat W_x (cm ³)	17,8	18,9	24,4	27,4	37,5	32	36	40	49	58	72	91
Poluprečnik momenata inercije i_y (cm)	2,54	2,54	2,39	2,39	2,38	2,52	2,52	2,52	2,51	3,09	3,09	3,08

* Granična debljina pri kojoj se čelična pocinkovana traka može hladno oblikovati

Veza rožnjača za glavne vezače, svih tipova, ostvarena je putem stolice od lima debljine 10 mm sa visinom koja zavisi od visine profila. Svi vijci za vezu su M16 ili M20 kvaliteta 5.6. Kod sistema kontinualnog nosača od valjanog I profila, da bi se omogućilo nesmetano postavljanje krovnog pokrivača, montažni nastavci su uradjeni od kratkih čeonih ploča sa vezom visokovrednim vijcima sa punom silom pritezanja M16 ili M20 kvaliteta 10.9.

Da bi se obezbedila bočna stabilnost rožnjača, za sišuće dejstvo vetra kod prva četiri sistema primenjena je zatega od okruglog čelika $\varnothing 12$ sa zateznom navrtkama na krajevima, a kod novoprojektovanih sistema Z profila sa podvezicama i preklapanjem specijalni oblik krute zatege od hladno oblikovanog U profila.

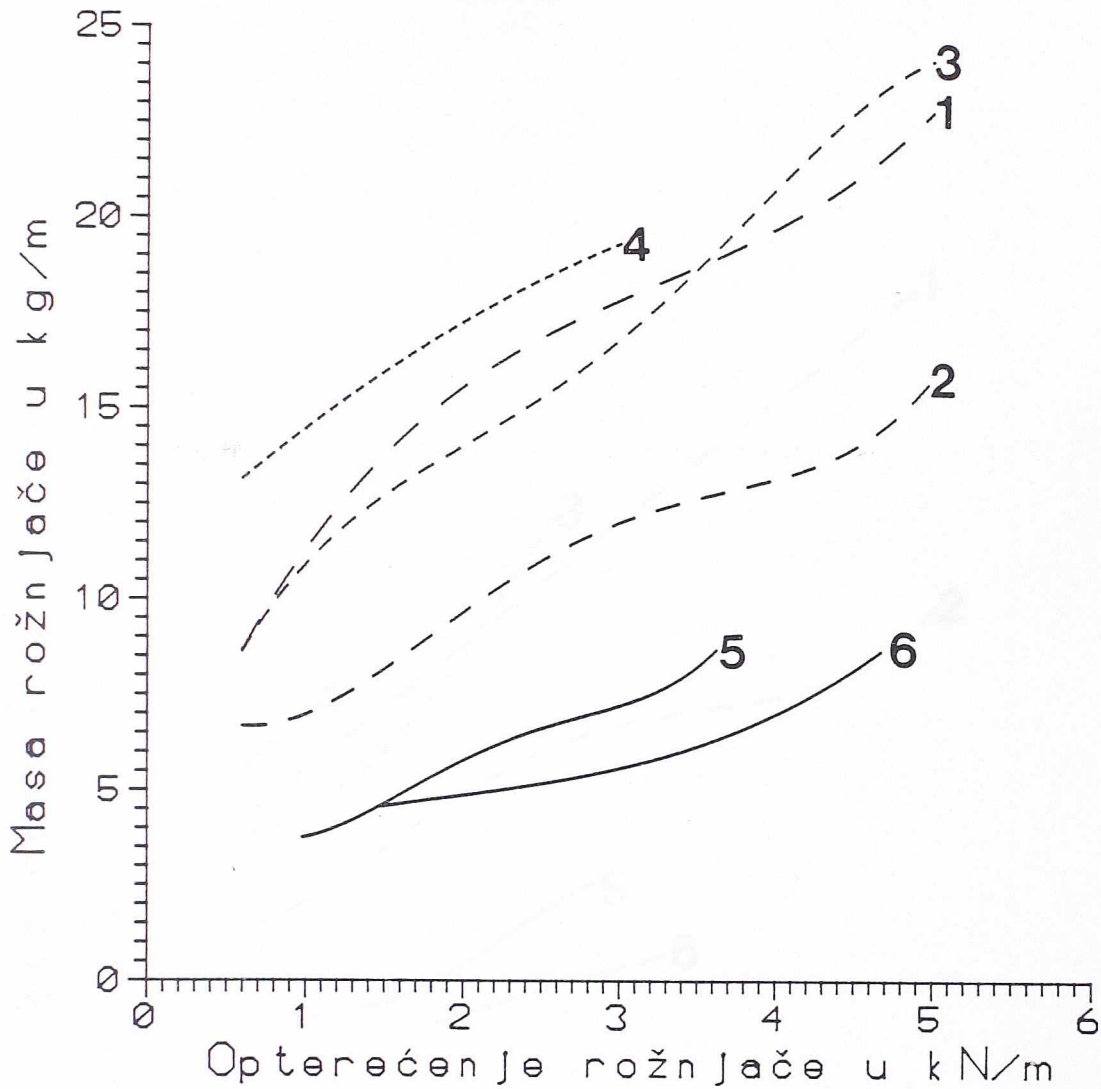
Kod svih tipova rožnjača za krovni pokrivač je upotrebljen čelični profilisani lim, jednostruki ili kao sendvič. Kako je ovakav krovni pokrivač krut u svojoj ravni (dejstvo dijafragme), to je pri proračunu rožnjača uvek računata medju-rožnjača koja je opterećena samo vertikalnim opterećenjem.

Da bi se dijagramima mogao pratiti utrošak čelika u zavisnosti od opterećenja, to je opterećenje rožnjače svedeno na m' . Ovom analizom obuhvaćeno je opterećenje rožnjače od $0,6 \text{ kN/m}'$ do $5,0 \text{ kN/m}'$, stim da za svaki od tipova analiziranih rožnjača nije potpuno pokriven ovaj opseg, jer se ne proizvode takvi preseki koji pokrivaju te zone. Kompletna analiza je sprovedena za 12 polja (raspona).

Na sl. II-81 prikazan je utrošak čelika po m' rožnjače u zavisnosti od opterećenja za raspon $L = 6,0 \text{ m}$, a na sl. II-82 za raspon $L = 8,0$ za sve analizirane sisteme rožnjača.

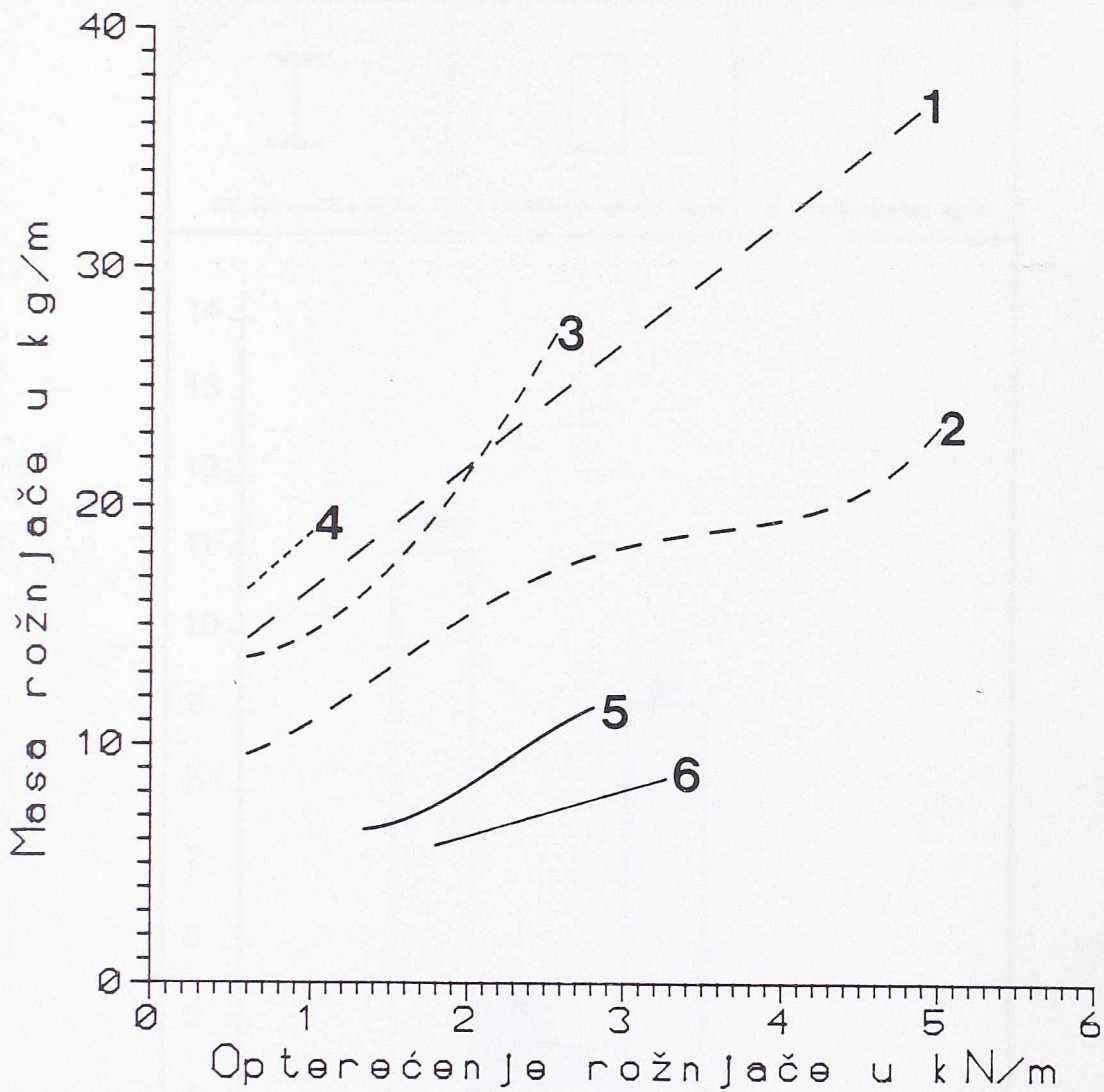
Na osnovu dijagrama sa slika II-81 i II-82 lako je uočljivo da novoprojektovani sistemi Z profila od HOP sa podvezicama i sa preklapanjem imaju znatno niži utrošak čelika i od toplo valjanih I profila i od hladno oblikovanih šupljih pravougaonih i C profila zahvaljujući svom optimalnom obliku poprečnog preseka i statičkom sistemu. Dokaz optimalnosti primenjenog oblika Z preseka može se videti na sl. II-83 i sl. II-84.

Optimalnost statičkih sistema kontinualnih nosača sa podvezicama i sa preklapanjem je očigledna sa sl. II-81 i II-82. Sa ovih dijagrama može se videti da sistem sa preklapanjem daje nešto niži utrošak čelika po m' pogotovu za veća opterećenja. Obrazloženje za ovo može se videti analiziranjem ranije izvedenih izraza za dimenzionisanje ovih sistema. Izraz (16) pokazuje osnovnu prednost sistema sa preklapanjem u odnosu na sisteme rožnjača sa podvezicama /izrazi (8) i (9)/. Pri ovome treba imati u vidu da je sistem sa preklapanjem ekonomičan samo u slučajevima značajnog broja polja, u suprotnom, za manji broj polja ekonomičniji je sistem sa podvezicama. Ovo se može pokazati dijagramima na sl. II-85.



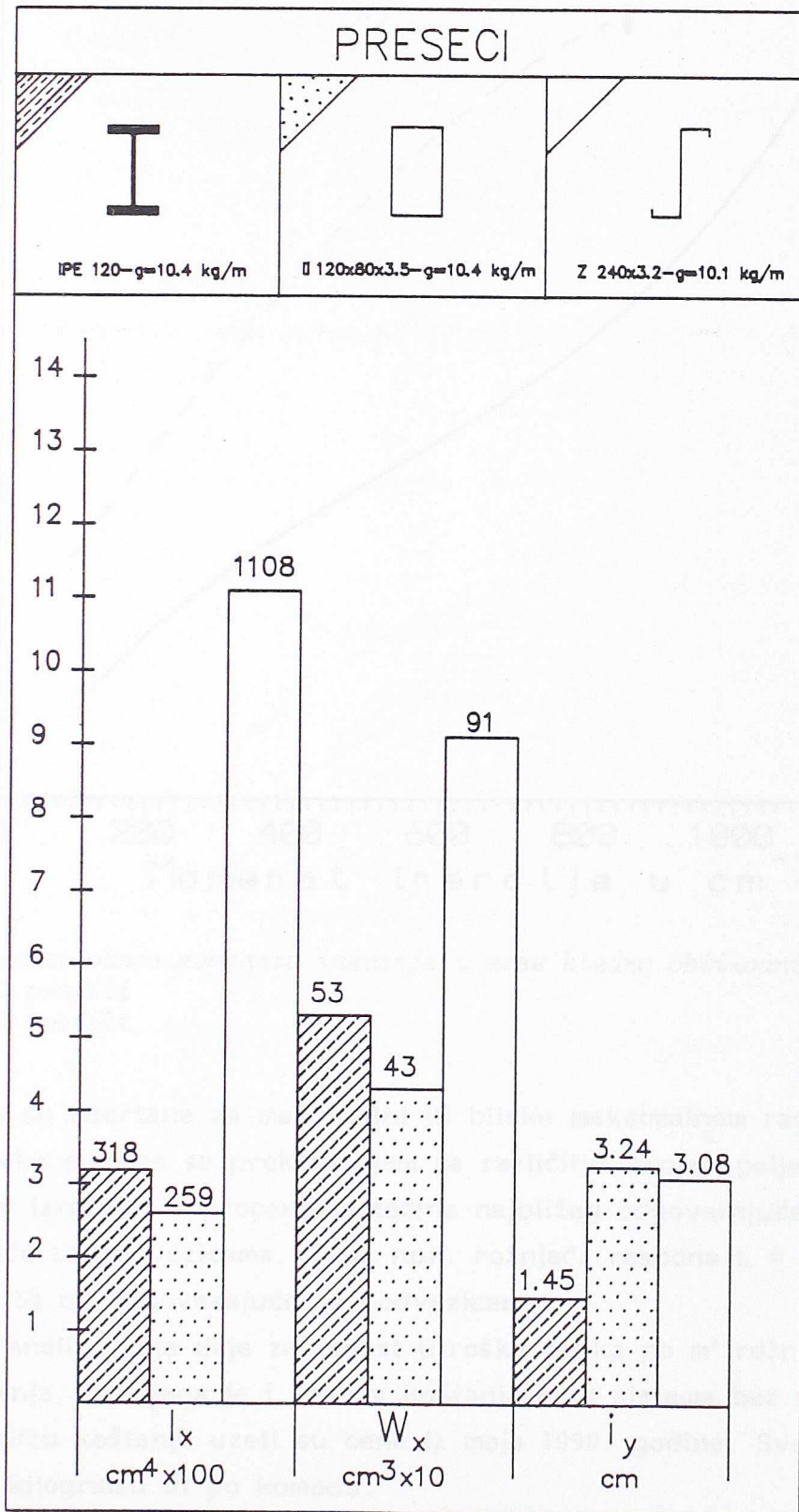
Sl. II-81 Zavisnost utroška čelika po m' rožnjače od opterećenja za raspon $L = 6,0$ m

1. sistem proste grede od vruće valjanih I profila
2. sistem kontinualnog nosača od vruće valjanih I profila
3. sistem proste grede od hladno oblikovanih šupljih pravougaonih profila
4. sistem proste gredě od hladno oblikovanih C profila
5. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa podvezicama
6. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa preklapanjem

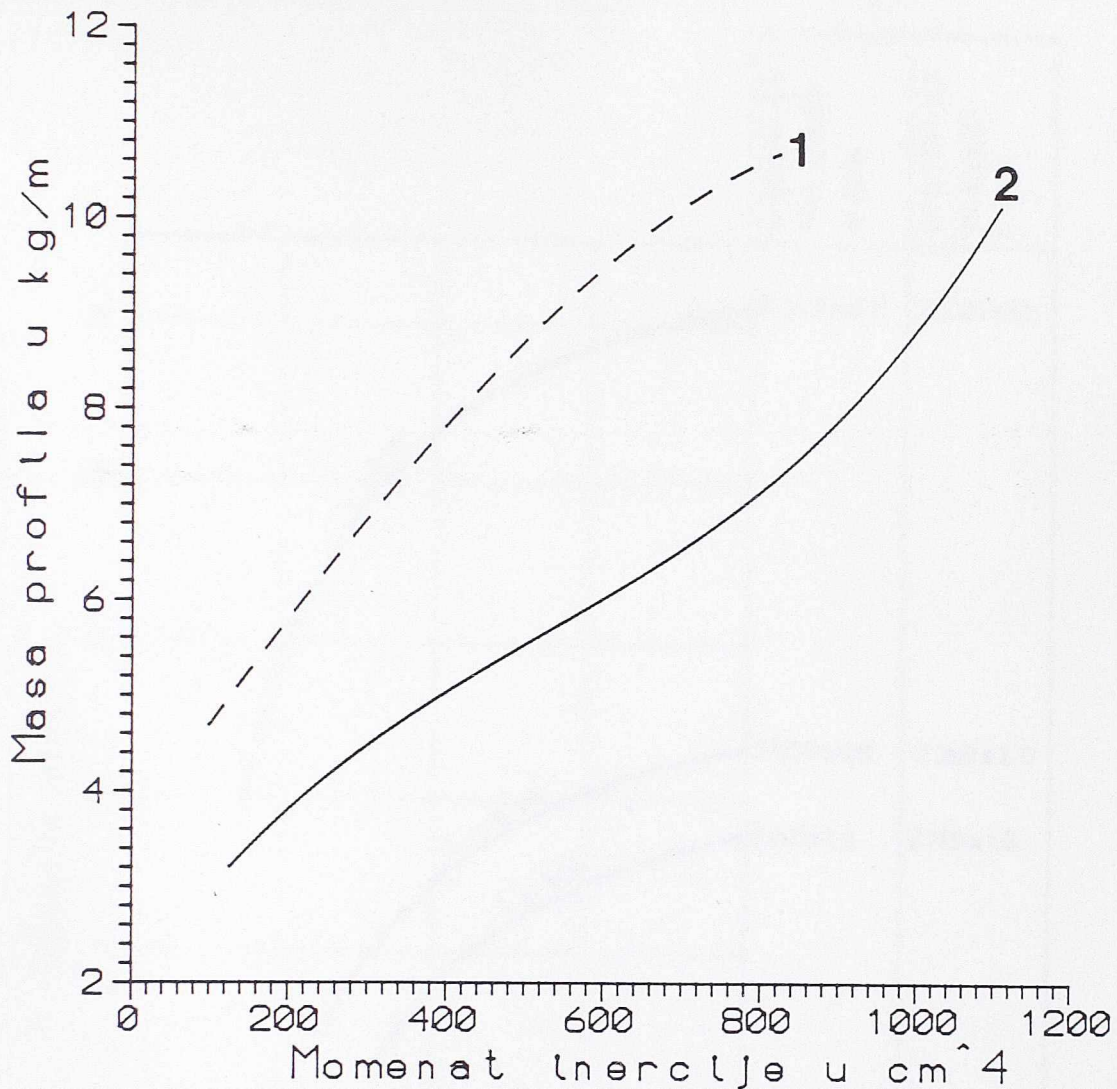


Sl. II-82 Zavisnost utroška čelika po m' rožnjače od opterećenja za raspon $L = 8,0$ m

1. sistem proste grede od vruće valjanih I profila
2. sistem kontinualnog nosača od vruće valjanih I profila
3. sistem proste grede od hladno oblikovanih šupljih pravougaonih profila
4. sistem proste grede od hladno oblikovanih C profila
5. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa podvezicama
6. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa preklapanjem



Sl. II-83 Uporedni odnos glavnih mehaničkih karakteristika valjanih I profila, hladno oblikovanih šupljih pravougaonih profila i novoprojektovanog Z profila pri istoj masi

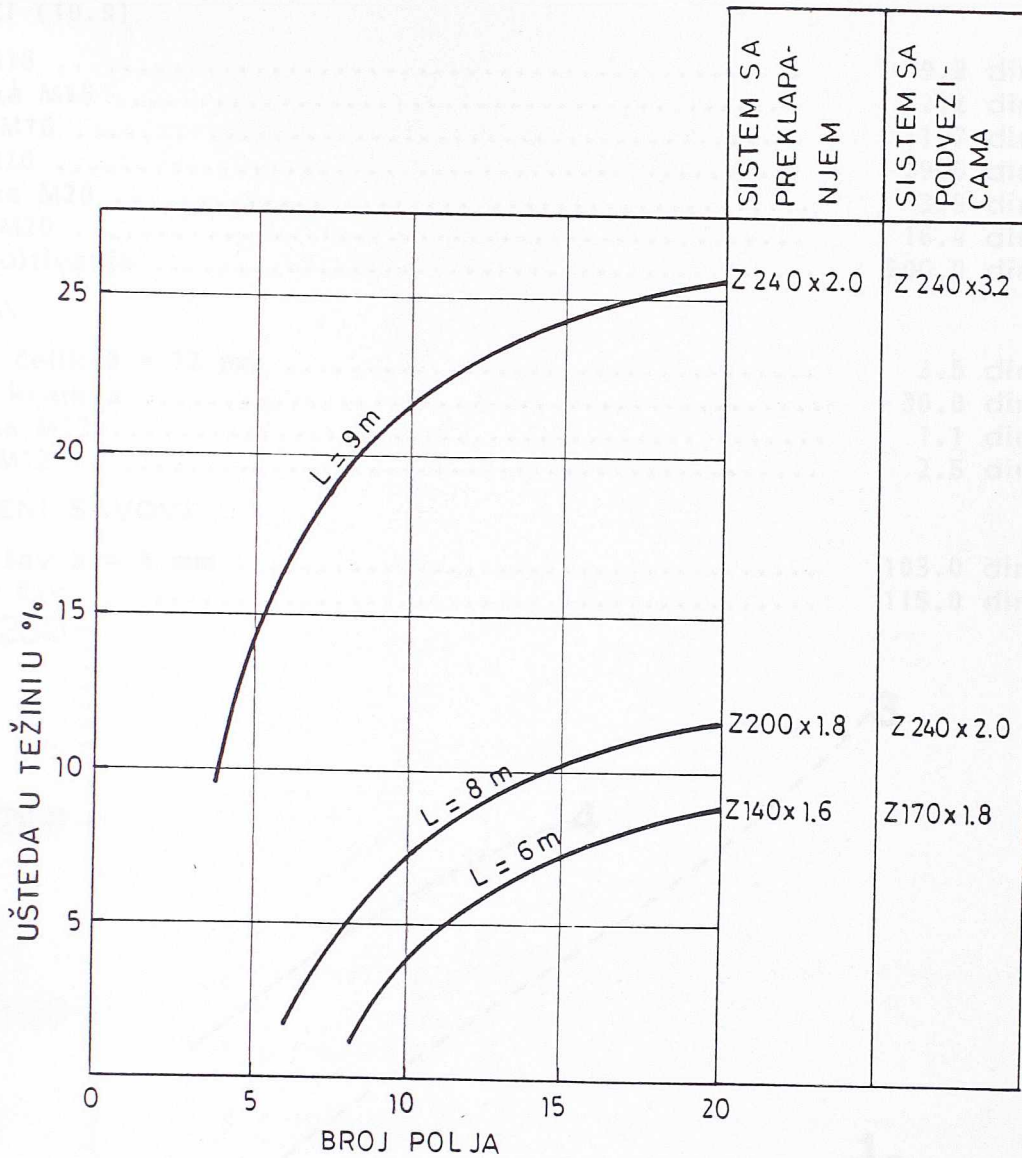


Sl. II-84 Uporedni odnos momenata inercije i mase hladno oblikovanih C i Z profila
 1. C profila
 2. Z profila

Krive su nacrtane za maksimalni ili blisko maksimalnom rasponu za tri poprečna preseka sistema sa preklapanjem sa različitim brojem polja u odnosu na uštedu u težini izraženu u procentima težine najbližeg odgovarajućeg poprečnog preseka rožnjače sa podvezicama. Tako npr. rožnjača raspona $L = 9,0$ m za 20 polja lakša je 25% od odgovarajuće sa podvezicama.

Osim analize koja daje zavisnost utroška čelika po m' rožnjače u zavisnosti od opterećenja, uradjena je i analiza koštanja ovih sistema bez montaže i transporta. Za analizu koštanja uzeti su cene iz maja 1990. godine. Sve cene su date u dinarima po kilogramu ili po komadu.

Na osnovu ovih cena i utrošaka čelika sa sl. II-81 i II-82 uradjeni su dijagrami zavisnosti cene rožnjače po m' od opterećenja, za sve ranije pobrojane sisteme. Na sl. II-86 prikazana je ova zavisnost za rožnjače raspona $L = 6,0$ m, a na sl. II-87 za rožnjače raspona $L = 8,0$ m.



Sl. II-85 Uporedjivanje ušteta u težini rožnjača sa podvezicama i sa preklapanjem

PROFILI

Ivvp do I 140	4.8 din/kg
I 140-I 240	4.6 din/kg
I 240-I 400	4.5 din/kg
□hop	9.6 din/kg
Chop	10.4 din/kg

PLJOSNATI ČELICI

debljine 10 mm	6.7 din/kg
20 mm	6.5 din/kg

VIJCI (5.6)

vijak M16	4.3 din/kom
podloška M16	1.1 din/kom
matica M16	2.5 din/kom
vijak M20	9.1 din/kom
podloška M20	1.6 din/kom
matica M20	4.2 din/kom

V.VIJCI (10.9)

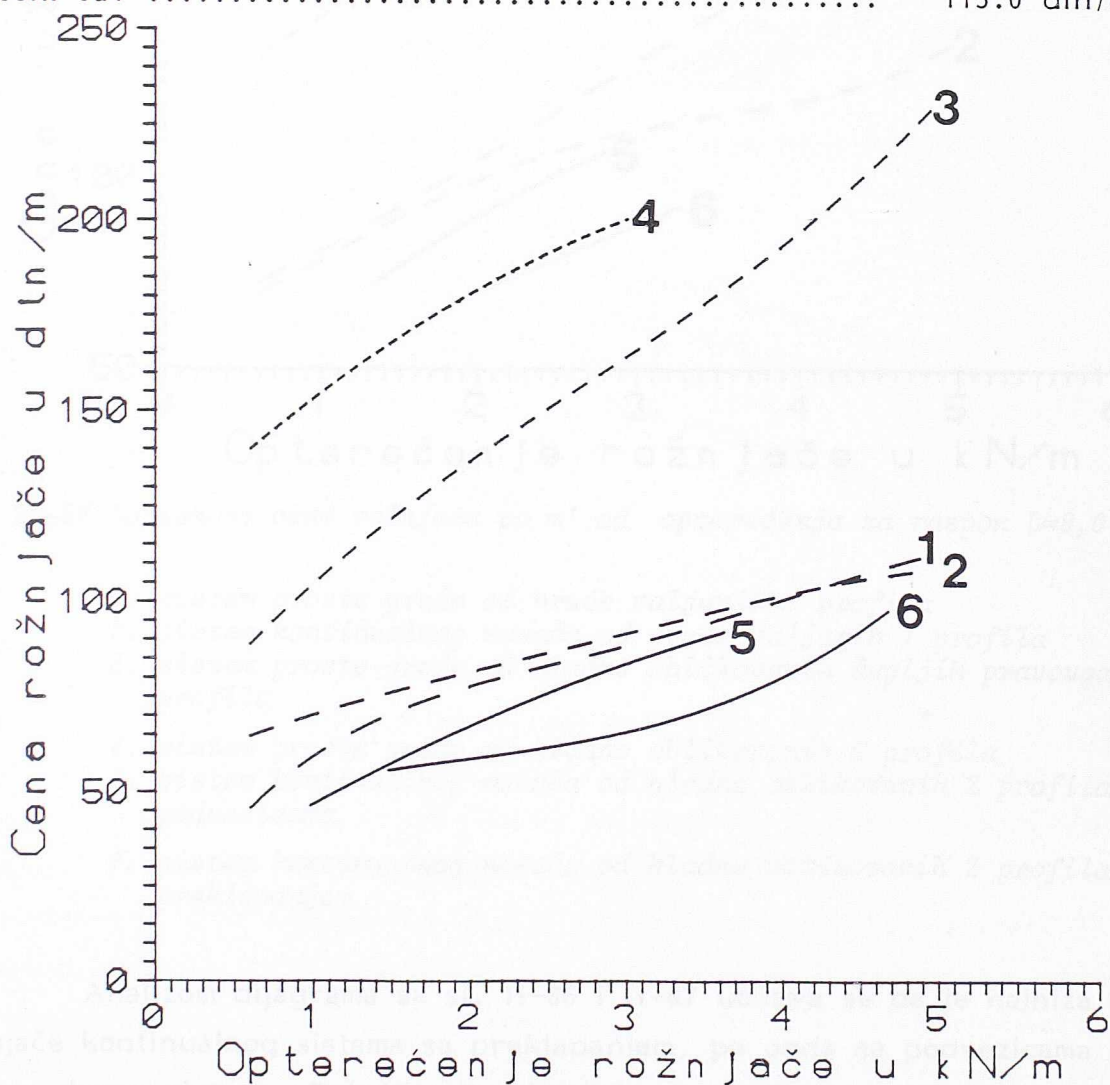
vijak M16	9.8 din/kom
podloška M16	2.2 din/kom
matica M16	11.7 din/kom
vijak M20	29.5 din/kom
podloška M20	3.9 din/kom
matica M20	16.4 din/kom
cena ispitivanja	200.0 din/tip

ZATEGA

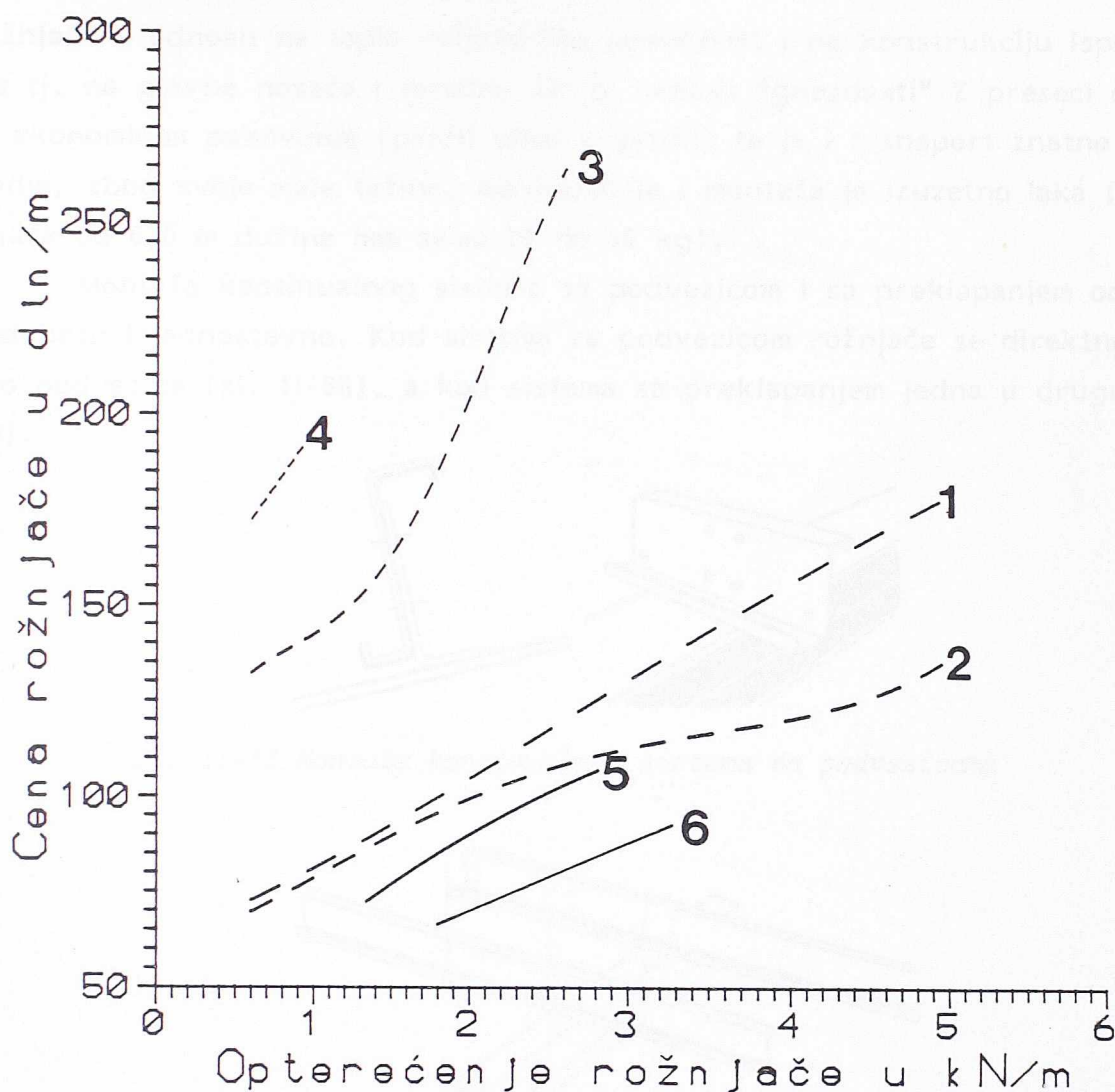
okrugli čelik $\emptyset = 12$ mm	3.5 din/kg
obrada krajeva	30.0 din/par
podloška M12	1.1 din/kom
matica M12	2.5 din/kom

ZAVARENI ŠAVOVI

ugaoni šav $a = 4$ mm	103.0 din/m
sučeonni šav	115.0 din/m

Sl. II-86 Zavisnost cene rožnjače po m' od opterećenja za raspon $L=6,0$ m

1. sistem proste grede od vruće valjanih I profila
2. sistem kontinualnog nosača od vruće valjanih I profila
3. sistem proste grede od hladno oblikovanih šupljih pravougaonih profila
4. sistem proste grede od hladno oblikovanih C profila
5. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa podvëzicama
6. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa preklapanjem



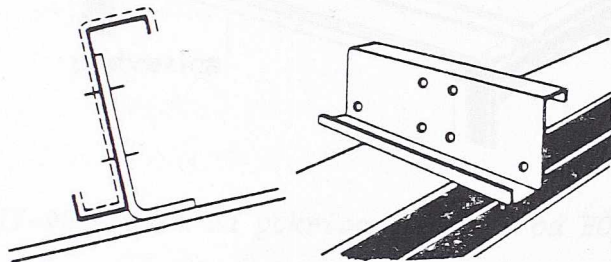
Sl. II-87 Zavisnost cene rožnjače po m' od opterećenja za raspon $L=8,0$ m

1. sistem proste grede od vruće valjanih I profila
2. sistem kontinualnog nosača od vruće valjanih I profila
3. sistem proste grede od hladno oblikovanih šupljih pravougaonih profila
4. sistem proste grede od hladno oblikovanih C profila
5. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa podvezicama
6. sistem kontinualnog nosača od hladno oblikovanih Z profila sa preklapanjem

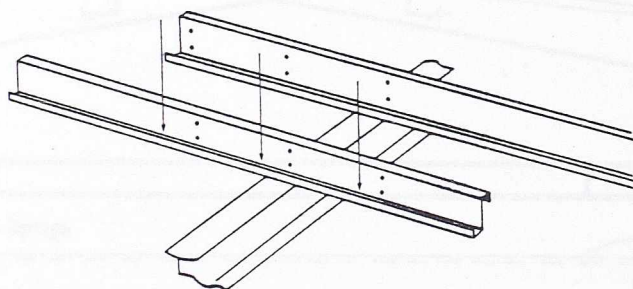
Analizom dijagrama sa sl. II-86 i II-87 uočava se da je najniža cena po m' rožnjače kontinualnog sistema sa preklapanjem, pa onda sa podvezicama u odnosu na sve druge sisteme. Takodje se primećuje da razlika u ceni ovih sistema u odnosu na sistem proste grede i kontinualnog nosača od toplo valjanih I profila nije tako drastična, kao što je to bio slučaj kod utroška čelika, što je posledica veće jedinične cene hladno oblikovanih profila u odnosu na toplo valjanje, ali je ipak značajna, pogotovu za neka opterećenja. Takodje i mala težina hladno oblikovanih

Z rožnjača u odnosu na toplo valjane ima povoljnost i na konstrukciju ispod rožnjača tj. na glavne nosače i temelje. Uz to ovakvi "gnezdasti" Z preseći omogućavaju ekonomično pakovanje (profil ulazi u profil) te je i transport znatno jeftiniji. Takođe, zbog svoje male težine, manipulacija i montaža je izuzetno laka (npr. rožnjača od 6,0 m dužine ima samo 20 do 38 kg).

Montaža kontinualnog sistema sa podvezicom i sa preklapanjem odvija se veoma brzo i jednostavno. Kod sistema sa podvezicom rožnjače se direktno polažu preko podvezica (sl. II-88), a kod sistema sa preklapanjem jedna u drugu (sl. II-89).

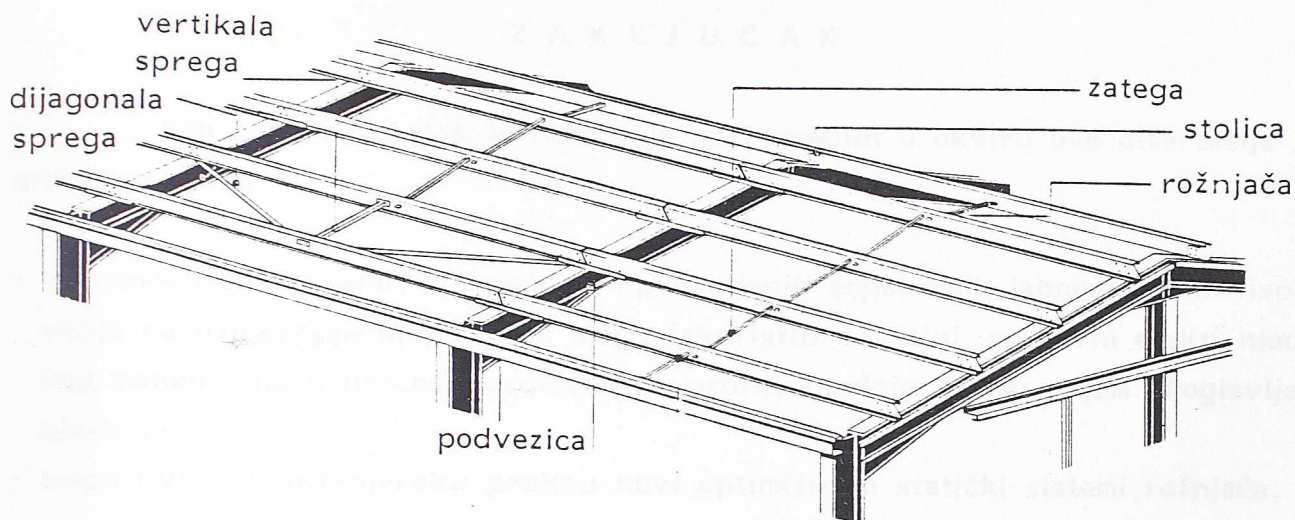


Sl. II-88 Montaža kontinualnog sistema sa podvezicama

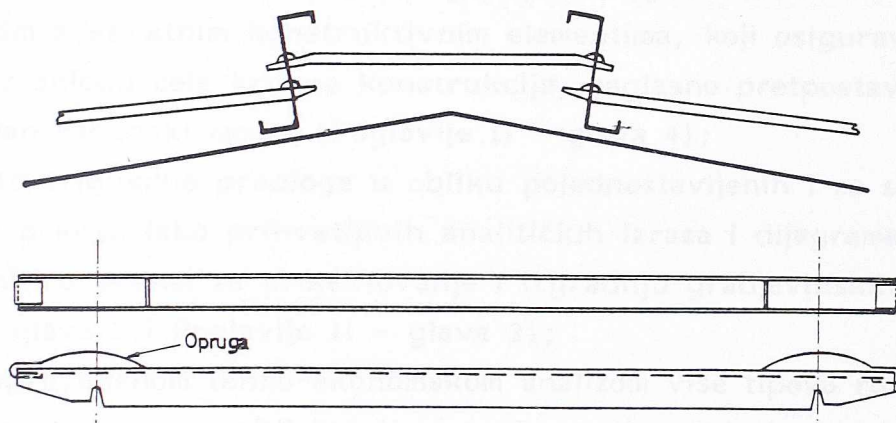


Sl. II-89 Montaža kontinualnog sistema sa preklapanjem

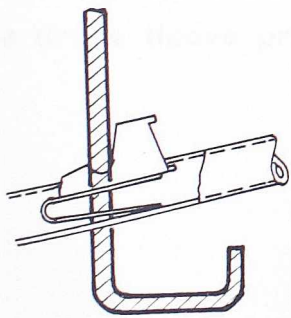
Ovakav sistem rožnjača omogućava ostvarivanje tipizacije elemenata konstrukcije krova. Usvajanjem ovog sistema omogućava se da fabrika za proizvodnju rožnjača nudi kompletan sistem za pokrivanje krova bez obzira na tip i materijal od koga je izveden glavni vezač (čelik, armirani beton, drvo). U okviru takvog sistema za pokrivanje krova spadaju: rožnjače, stolice za vezu, zatege, spregovi, ivični elementi, itd. (sl. II-90). Samim tim znatno se poboljšava i kvalitet radova jer jedna organizacija garantuje kvalitet celog sistema za pokrivanje. Na ovaj način omogućuje se i uvođenje u inženjersku praksu raznih novih proizvoda (sa finom obradom) koji znatno pojednostavljuju i ubrzavaju postupak montaže. Jedan od ovakvih novih proizvoda u svetu je novi tip krute zatege sa samozabavljenjem. Ovakve zatege se rade od hladno oblikovanih U profila (sl. II-91) ili cevi (sl. II-92). Da bi se izbegle komplikovane vijčane veze na krajevima zatega uvedena je nova veza pomoću opruge. Svaka zatega na svom kraju ima oprugu i zarez tako da je montaža veoma jednostavna, zarez na zategi ulazi u već pripremljene



Sl. II-90 Sistem za pokrivanje krova od HOP



Sl. II-91 Kruta zatega od U hladno oblikovanih profila sa oprugom



Sl. II-92 Kruta zatega od cevi sa oprugom

otvore na rebro rožnjača i pomoću opruge se izvrši spajanje - zavravljenje.

Proizvodnja hladno oblikovanih Z rožnjača može biti potpuno automatizovana na linijama za hladno valjanje u fabrikama (sa velikom produktivnošću), automatskim odsecanjem na tačnu meru i bušenjem rupa za vezu probijanjem, tako da sa linije za proizvodnju silazi finaliziran proizvod. Kako se ovakve rožnjače rade od pocinkovanog lima to kasnije otpada njihova zaštita od korozije, pa preostaje jedino njihova montaža na gradilištu.

Iz svega izloženog proizilazi da se ovakvi kompletirani sistemi rožnjača sa svim pripadajućim elementima mogu uraditi uz potpunu prefabrikaciju i uz uvođenje kompjutera u fazi fabričke proizvodnje, transporta i montaže što je nesumnjivo nov i značajan doprinos u pravcu tehnno-ekonomske optimizacije.

Z A K L J U Ć A K

Kao opšti zaključak istraživanja sprovedenih u okviru ove disertacije proizilazi da se:

- na osnovu selektiranih i rigorozno sprovedenih sopstvenih laboratorijskih ispitivanja na najsavremenijoj opremi mogu iskoristiti značajni pozitivni efekti hladnog oblikovanja u procesu proizvodnje profila hladnim oblikovanjem (Poglavlje I - glava 2);
- mogu uvesti u inženjersku praksu novi optimizirani statički sistemi rožnjača, sa optimalnim oblikom poprečnog preseka čije je ponašanje pod opterećenjem verifikovano sopstvenim eksperimentima sprovedenim uz primenu najsavremenije opreme i mernog instrumentarija (Poglavlje II - glava 3);
- predloženim adekvatnim konstruktivnim elementima, koji osiguravaju ponašanje rožnjača u sklopu cele krovne konstrukcije, saglasno pretpostavkama može usvojiti pouzdan računski model (Poglavlje II - glava 4);
- u tezi date originalne predloge u obliku pojednostavljenih i za svakodnevnu inženjersku praksu lako prihvatljivih analitičkih izraza i dijagrama mogu neposredno primeniti u praksi za projektovanje i izgradnju građevinskih objekata (Poglavlje I - glava 2 i Poglavlje II - glava 3);
- detaljno sprovedenom tehno-ekonomskom analizom više tipova rožnjača diferenciranih prema sistemima, oblicima i postupku proizvodnje jasno ukazuje na značajno preimučstvo, u pogledu utroška čelika i koštanja, predloženih hladno oblikovanih Z preseka sistema rožnjača sa podvezicama i sa preklapanjem u odnosu na sve druge tipove primenjivane u dosadašnjoj praksi (Poglavlje II - glava 5).

L I T E R A T U R A

- /1/ Handbuch für die Berechnung kaltgeformter Stahlbauteile, Band A Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf 1976.
- /2/ Handbuch für die Berechnung kaltgeformter Stahlbauteile, Band B Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf 1976.
- /3/ W.W.Yu: Cold-Formed Steel Design, John Wiley & Sons, 1985.
- /4/ Kaltprofile, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf 1982.
- /5/ Pechar, Bureš, Studnička, Šafka. Prvky korovych konstrukci, SNTL, Praha 1984.
- /6/ T.Peköz, G.Winter: Cold-Formed Steel Construction, IABSE Periodica, Februar 1980.
- /7/ G.J.Hancock: Design of Cold-Formed Steel Structures, Australian Institute of Steel Construction, Sydney 1988.
- /8/ D.Budjevac, D.Tošić: Proračun otvorenih hladno oblikovanih profila od čelika, Izgradnja 1/1984.
- /9/ M.Descude: Fundamental to the Developing Use of Cold-Formed Steel Sections, Acier-Stahl-Steel 10/1974.
- /10/ H.Preller: Processing and Performances, Acier-Stahl-Steel 10/1974.
- /11/ H.Gladischetski: Future Development Tendencies, Acier-Stahl-Steel 10/1974.
- /12/ S.Šutalo: Konstrukcije lakopanelnih zgrada, VIII Kongres SDGKJ, Cavtat, 1987.
- /13/ S.Šutalo, J.Šekulja: Primena hladno oblikovanih profila i kontejnera u nosivim konstrukcijama hala, VIII Kongres SDGKJ, Cavtat 1987.
- /14/ B.Zarić, D.Budjevac, B.Gligić, A.Tadić: Optimizacija rešetkastih nosača od hladno oblikovanih profila, VIII Kongres SDGKJ, Cavtat 1987.
- /15/ B.Zarić, D.Budjevac, B.Gligić: Stubovi dalekovoda od hladno oblikovanih profila otvorenog poprečnog preseka, DGKH Simpozij Specijalni inženjerski objekti, Brioni 1988.
- /16/ W.W.Yu: Cold-Formed Steel Sections - The State of Art in North America, International Conference on Steel and Aluminium Structures, Cardiff 1987.
- /17/ J.Rhodes: Cold-Formed Steel Sections - State of the Art in Great Britain, International Conference on Steel and Aluminium Structures, Cardiff, 1987.
- /18/ Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI, Washington 1980.
- /19/ Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI, Washington 1986.
- /20/ BS 5950: Part 5. Code of practice for design of cold-formed sections, 1987.
- /21/ Swedish Code for Light-Gauge Metal Structures, Swedish Institute of Steel Construction, Stockholom 1982.
- /22/ Cold Formed Steel Structural Members, Canadian Standards Association, Toronto, 1984.
- /23/ ČSN 731402: Noavrhovani tenkostennych ocelovych konstrukci, Praha 1974.

- /24/ European Recommendations for the Design of Light Gauge Steel Members, ECCS, Brussels 1987.
- /25/ Appendix A EUROCODE 3: Cold Formed Steel Sheeting and Members - predlog, Mart 1989.
- /26/ A.Zavelani, P.Faggiano: Design of Cold-Formed Latticed Transmission Towers, Journal Structural Engineering, Vol. 111, No. 11, Novembar 1985.
- /27/ E.H.Gaylord, G.M.Wilhoite: Transmission Towers: Design of Cold-Formed Angles, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 8, Avgust 1985.
- /28/ Metsec steel joists: Technical Manual
- /29/ Ayrshire - Swagebeam
- /30/ Ayrshire - Swagebeam Building Frames
- /31/ Design manual for Z-frame steel structure - Nippon Steel
- /32/ V.Hlavaček: Navrhovani tenkostennych ocelovych konstrukci, Praha 1976.
- /33/ M.Yener, T.Peköz: Limit Design in Cold-Formed Steel, Journal of Structural Engineering, Vol. 109, No. 9, Septembar 1983.
- /34/ G.Abdel-Sayed, F.Monasa, W.Siddall: Cold-Formed Steel Farm Structures Part I: Grain Bins, Journal of Structural Engineering Vol. 111, No. 10, Oktobar 1985.
- /35/ G.Abdel-Sayed, F.Monasa, W.Siddall: Cold-Formed Steel Farm Structures Part II: Barrel Shells, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 10 Oktobar 1985.
- /36/ G.Winter: Cold-Formed Light-Gage Steel Construction, Journal of the Structural Division, Vol. 85, No. ST9, Novembar 1959.
- /37/ F.Zamecnik: Errors in Utilization of Cold-Formed Steel Members, Journal of the Structural Division, Vol. 106, No. St 12, Decembar 1980.
- /38/ W.W.Yu, A.S.Lin, W.M.McKinney: Structural Behaviour of Thick Cold-Formed Steel Members, Journal of the Structural Division, Vol. 100, No. St 11, Novembar 1974.
- /39/ S.R.Parimi, N.C.Lind: Limit States Basis for Cold-Formed Steel Design, Journal of the Structural Division, Vol. 102, No. St 3, Mart 1976.
- /40/ E.R.Bryan, J.Rhodes: Cold-Formed Steel Structures and New British Code of Practice, IABSE Colloquium, Stockholm, 1986.
- /41/ D.Moore: Non-linear Behaviour of Thin-Walled Sections, IABSE Colloquium, Stockholm 1986.
- /42/ K.Takahashi, M.Mizuno: Distortion of Thin-Walled Open Cross Section Members, IABSE Colloquium, Stockholm 1986.
- /43/ D.Budjevac, Z.Vlajčić: Zavarene veze kod hladno oblikovanih profila, XVIII Kongres JUDIMK, Portorož 1986.
- /44/ B.Zarić, D.Budjevac, Z.Vlajčić: Development of Prefabricated System of Steel Houses, International Conference on Steel Structures, Budva 1986.
- /45/ B.Zarić, D.Budjevac: Neki aspekti savremenog koncepta proračuna konstrukcija od hladno oblikovanih profila, II kongres DGKH, Split 1986.
- /46/ V.Thevendran, N.E.Shanmugam: Design of Least Weight Cold-Formed Steel Section, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 6, No. 1/1986.

- /47/ Conference on Light Gauge Steel, University of Salford, Maj 1981.
- /48/ Optimale Abmessungen von stabilisierten Biegeträgern mit U-Querschnitt nach TGL 7969 bei einachsiger Biegung, Informationen des VEB MLK 23/1984.
- /49/ A.Dhalla, G.Winter: Ductility Criteria and Performance of Low-Ductility Steels for Cold-Formed Members, Proceedings of the First Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures, University of Missouri-Rolla, 1971.
- /50/ G.T.Halmos: Design for Manufacturability, Proceedings of the 5th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, University of Missouri-Rolla, 1980.
- /51/ European Recommendation for the Design of Composite Floors with Profiled Steel Sheet, Constrado 1983.
- /52/ ECCS Publication N^o 34: Lightweight Steel Based Floor Systems for Multi-Storey Buildings, Brussels 1986.
- /53/ G.Winter: Strength of Thin Steel Compression Flanges, ASCE, Vol. 112, 1947.
- /54/ N.C.Lind, M.K.Ravindra, G.Schorn: Empirical Effective Width Formula, Journal of the Structural Division, Vol. 102, No. St 9, September 1976.
- /55/ P.C.Hu, E.E.Lundquist, S.B.Batdorf: Effect of Small Deviation from Flatness on the Effective Width and Buckling of Plates in Compression, NACA technical note, 1946.
- /56/ R.G.Dawson, A.C.Walker: Postbuckling of Geometrically Imperfect Plates, Journal of the Structural Division, Vol. 98, Januar 1972.
- /57/ A.N.Sherbourne, R.M.Korol: Postbuckling of Axially Compressed Plates, Journal of the Structural Division, Vol. 98, Oktober 1972.
- /58/ C.J.Hancock: "Nonlinear Analysis of Thin Sections in Compression", Journal of the Structural Division, Vol. 107, Mart 1981.
- /59/ M.Yener, T.Peköz: Partial Stress Redistribution in Cold-Formed Steel, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 6, Jun 1985.
- /60/ M.Yener, T.Peköz: Partial Moment Redistribution in Cold-Formed Steel, Journal of Structural Engineering, Vol. 111, No. 6, Jun 1985.
- /61/ T.Desmond, T.Peköz, G.Winter: Edge Stiffeners for Thin-Walled Members, Journal of the Structural Division, Vol. 107, No. St 2, Februar 1981.
- /62/ R.Nguyen, W.W.Yu: Longitudinally Reinforced Cold-Formed Steel Beam Webs, Journal of the Structural Division, Vol. 108, No. St 11, November 1982.
- /63/ R.Laboube, W.W.Yu: Bending Strength of Webs of Cold-Formed Steel Beams, Journal of the Structural Division, Vol. 108, No. St 7, Jul 1982.
- /64/ A.Bergfelt, B.Edlund: Effects of Web Buckling in Light Gauge Steel Beams, International Conference on Thin-Walled Structures, Glasgow 1979.
- /65/ R.A.Laboube, W.W.Yu: Cold-Formed Steel Web Elements Under Combined Bending and Shear, Proceedings of the Fourth International Special Conference on Cold-Formed Steel Structures, University of Missouri-Rolla, 1978.
- /66/ J.T.De Wolf, C.J.Gladding: Post-Buckling Behaviour of Beam Webs in Flexure, Journal of the Structural Division, Vol. 104, Jul 1978.
- /67/ G.Abdel-Sayed: Effective Width of Thin Plates in Compression, Journal of the Structural Division, Vol. 95, No. St 10, Oktober 1969.
- /68/ A.Hasegawa, W.B.Hall: Maximum Load Design of Cold-Formed Steel Channel Beams, Journal of the Structural Division, Vol. 104, No. St 7, Jul 1978.

- /69/ N.Hajdin: Teorija tankozidnih nosača, Predavanja na posleddiplomskih studijama na Gradjevinskom fakultetu u Beogradu
- /70/ Regles de calcul des constructions en elements a parois minces en acier, Construction metallique N° 4/1978.
- /71/ Exemples d'application du D.T.U. sur les elements a parois minces en acier, Construction metallique N° 2/1983.
- /72/ S.R.Fox, R.M.Schuster, D.L.Tarlton: The Canadian LRFD Standard for Cold-Formed Steel Design, Proceedings of the Eighth International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures, University of Missouri-Rolla, 1986.
- /73/ B.Androić, I.Džeba: Proračun tankostjenih hladno oblikovanih čeličnih profila, Gradjevinar br. 8/1981.
- /74/ R.Winterfeld: Konstruieren mit Stahlleichtprofilen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1974.
- /75/ A.H.Baigent, G.J.Hancock: The behaviour of portal frames composed of cold-formed members, Thin-walled Structures, International Conference, Glasgow 1979.
- /76/ N.Burnett, J.Rhodes: Tests on a lightweight portal frame, Thin-walled Structures, International Conference, Glasgow 1979.
- /77/ N.Hetrakul, W.W.Yu: Cold-formed steel I-beams subjected to combined bending and web crippling, Thin-walled structures, International Conference, Glasgow 1979.
- /78/ A.Hasegawa, H.Maeno: Design of edge stiffened elements, Thin-walled structures, International Conference, Glasgow 1979.
- /79/ O.Djurić-Perić: Hladno oblikovani profili napregnuti na savijanje i ograničenu torziju, Izgradnja br. 5/1986.
- /80/ G.Winter: Effects of Cold-Straining on Structural Sheet Steels, Journal of the Structural Division, Vol. 89, No. St 2, April 1963.
- /81/ W.Karren: Corner Properties of Cold-Formed Steel Shapes, Journal of the Structural Division, Februar 1967.
- /82/ W.Karren, G.Winter: Effects of Cold-Forming on Light-Gage Steel Members, Journal of the Structural Division, Februar 1967.
- /83/ N.C.Lind, D.K.Schroff: Utilization of Cold Work in Cold-Formed Steel, Journal of the Structural Division, Januar 1975.
- /84/ W.Karren, M.Gohil: Strain Hardening and Aging in Cold-Formed Steel, Journal of the Structural Division, Januar 1975.
- /85/ A.K.Dhalla, G.Winter: Steel Ductility Measurements, Journal of the Structural Division, Februar 1974.
- /86/ A.K.Dhalla, G.Winter: Suggested Steel Ductility Requirements, Journal of the Structural Division, Februar 1974.
- /87/ M.Grumbach, M.Prudhomme: Properties des Profiles a froid, Construction metallique N° 1/1974.
- /88/ G.Winter, J.Uribe: Effects of Cold Work on Cold Formed Steel Members, Thin-Walled Steel Structures, New York 1968.
- /89/ J.Uribe, G.Winter: Cold Forming Effects in Thin-Walled Steel Members, Third International Specialty Conference of Cold-Formed Steel Structures, Missouri-Rolla, 1975.

- /90/ L.Ingvarsson: Cold-Forming Residual Stresses in Thin-Walled Structures, Thin-Walled Structures, International Conference, Glasgow 1979.
- /91/ L.Ingvarsson: Cold-Forming Residual Stresses, Effect on Buckling, Third International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Missouri-Rolla, 1975.
- /92/ J.M.Davies, G.Raven: Design of Cold-Formed Steel Purlins, IABSE Colloquium, Stockholm 1986.
- /93/ R.A.LaBoube: Roof Panel to Purlin Connection: Rotation Restraint Factor, IABSE Colloquium, Stockholm 1986.
- /94/ T.Peköz: Continuous Purlin Tests, Cornell University, November 1974.
- /95/ T.Peköz: Evaluation of the Results of Continuous Purlin Tests, Cornell University, Januar 1975.
- /96/ T.Peköz: Evaluation of the Results of Gravity Load Tests of C and Z Purlin Roof Systems, Cornell University, Januar 1976.
- /97/ M.A.Razak: Ultimate Strength of Cold-Formed Steel Z-Purlins, Cornell University, Februar 1980.
- /98/ T.Peköz, P.Soroushian: Behaviour of C and Z - Purlins Under Wind Uplift, Cornell University, Februar 1981.
- /99/ A.W.Toma: Detail support tests for continuous systems and the derivation of a design procedure, Report N^o BI-87-81, Institut TNO, Delft 1987.
- /100/ A.W.Toma: Report of testing of diaphragm braced beams, Report BI-86-54, Institut TNO, Delft 1986.
- /101/ A.W.Toma: Design procedure of diaphragm braced beams, Report BI-97-12, Institut TNO, Delft 1987.
- /102/ A.W.Toma: Research for the mechanical behaviour of cold-formed sections and drafting of design rules, Report N^o BI-87-100, Institut TNO, Delft 1987.
- /103/ THYSSEN - Pfetten
- /104/ AYRSHIRE - Purlin Design Manual
- /105/ E.R.Bryan: Asbestos Cement Roofs and Zed Purlins, Civil Engineering, Mart 1970.
- /106/ E.R.Bryan: Asbestos Cement Sheeting and Zed Purlins - Under Downward Load and Wind Suction, Civil Engineering, April 1970.
- /107/ J.Lindner, T.Grequill: Zur Berechnung von Pfetten aus Kaltprofilen, Stahlbau 58/1989.
- /108/ Cold-Formed Purlins and Girts, Steel Fabrication Journal, Februar 1985.
- /109/ The use of cold rolled purlins, Constrado
- /110/ B.Zarić, D.Budjevac, Z.Vlajčić: Optimizacija rožnjača od hladno oblikovanih profila otvorenog poprečnog preseka, XVIII Kongres JUDIMK, Portorož 1986.
- /111/ E.R.Bryan, G.Grant, J.A.Muir: Design of Cold Formed Steel Members and Sheeting, Conference on Light Gauge Steel, University of Safford, 1981.
- /112/ E.R.Bryan: The Design of Cold Rolled Z-Purlins, Symposium on Mass-Produced Steel Structures, Praha 1971.
- /113/ T.Peköz: Diaphragm - Braced Thin - Walled Channel and Z-Section Beams, Beams and Beam Columns - Stability and Strength, Applied Science Publishers, 1983.



