

# PROŠIRIVANJE ČELIČNIH CEVI KAO METOD APSORPCIJE KINETIČKE ENERGIJE SUDARA ŠINSKIH VOZILA

Mr Milutin Krivokapić  
"Institut Goša", Beograd

Dr Goran Simić  
Mašinski fakultet, Beograd

U radu je razmatran jedan tip apsorbera, koji radi na principu proširivanja cevi, pogodan za primenu kao element pasivne sigurnosti u sudaru šinskih vozila. Prilikom plastične deformacije čeličnih cevi proširivanjem na veći prečnik pomoću specijalnog konusnog proširivača, apsorbovana energija a samim tim i efikasnost apsorbera je veća nego kod apsorbera koji rade na principu gužvanja cevi. Između unutrašnje strane zida cevi i proširivača se javlja značajno trenje koje povećava otpor proširivanja, a time i apsorbovanu energiju. Preliminarnim proračunima došlo se do stepena proširivanja i dimenzija apsorpcionog para (cevni element i proširivač. Dati su rezultati eksperimentalnog ispitivanja, koji su upoređeni sa rezultatima dva druga tipa elemenata za apsorpciju energije sudara.

*Ključne reči: apsorberi energije sudara, šinska vozila, pasivna sigurnost.*

## UVOD

Problematici pasivne sigurnosti prilikom sudara šinskih vozila danas se u svetu posvećuje značajna pažnja. Sa opštim trendom povećavanja brzine i kapaciteta transporta, raste i potreba za većom bezbednošću u odvijanju saobraćaja. Naročito se nova filozofija gradnje šinskih vozila sa povećanom sigurnošću u sudaru ispoljava u gradnji putničkih vozničkih sredstava, jer je krajnji cilj pasivne zaštite minimiziranje posledica sudara i zaštita putnika i osoblja.

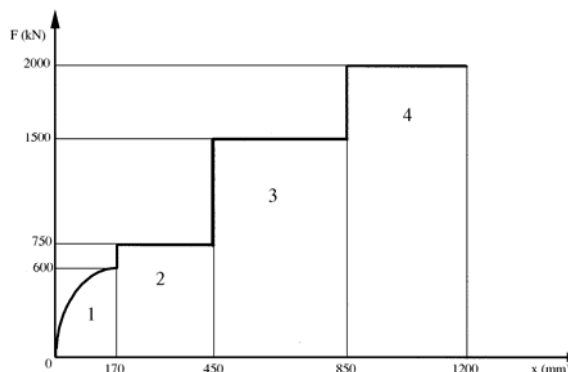
Jedan od elemenata pasivne sigurnosti su i takozvani apsorberi sudara. Ovi elementi se ugrađuju u strukturu šinskih vozila i njihova funkcija je da radom sopstvene plastične deformacije apsorbuju što veću količinu kinetičke energije sudara, kako bi se što više reduciralo njeno razorno dejstvo na ostatak konstrukcije.

Čeoni sudari kod železničkih vozila se inače prema intenzitetu mogu podeliti u četiri kategorije:

1. teško ranžiranje
2. laki sudari

3. srednji sudari i
4. teški sudari

Zahtevi u pogledu apsorpcije energije u tim kategorijama sudara za motorne vozove su prikazani, na slici 1 /1/.



Slika 1. Ciljna zavisnost sila-deformacija za različite kategorije sudara

Na apscisi dijagrama je naneta deformacija pri sudaru, a na ordinati maksimalni nivo sila, koje se unose po čelu vozila. Za ovu analizu od značaja je druga kategorija sudara ili laki sudari, koja je okarakterisana sa maksimalnim nivoom sile od 750 kN i hodom deformisanja od 280 mm. Pod pretpostavkom da se na čelu vozila ugrađuju četiri apsorpciona elementa koja se deformišu u toj fazi, dolazi se do maksimalne ciljne vrednosti sile po apsorberu od 187,5 kN i to je kriterijum za dimenzionisanje apsorbera.

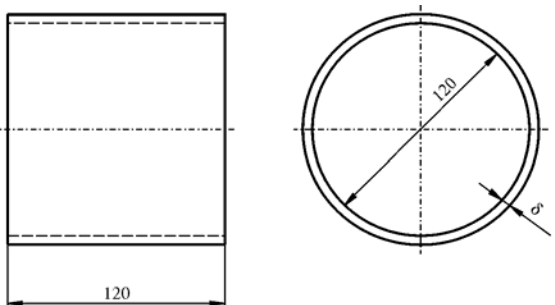
Cevasti apsorberi su inače pogodni za primanje glavnog udara posle iscrpljivanja rada odbojnih uređaja šinskih vozila, koji funkcionišu u prvoj kategoriji sudara. Kombinacijom raznih tipova apsorbera (apsorberi u vidu pčelinjeg saća, metalnih pena itd.) može se optimalno konstruisati vozilo bezbednije u sudaru. Naravno, u pasivnu sigurnost spadaju pored apsorbujućih elemenata i druge mere, koje nisu predmet analize ovog rada. Ovaj rad se ograničava samo na prikaz istraživanja principa apsorpcije kinetičke energije sudara, koja se zasniva na proširivanju čeličnih cevi na veći prečnik.

### **PREGLED NEKIH TIPOVA APSORBERA**

Najpre će biti prikazana dva tipa cevastih apsorbera od čelika, koja su do sada ispitivana u okviru ERRI<sup>1</sup> instituta i u okviru jednog magistarskog rada. Oba elementa rade na principu gužvanja cevi.

### **PRIKAZ APSORBERA ISPITIVANIH U OKVIRU ERRI INSTITUTA**

U okviru ERRI instituta vršena su devedesetih godina prošlog veka ispitivanja elemenata za apsorpciju kinetičke energije šinskih vozila /2/. Ispitivanja su vršena na cevastim i sačastim apsorberima kvazi-statičkim i dinamičkim pritiskom. Radi adekvatnog poređenja sa rezultatima naših istraživanja, prikazaće se samo čelični cevasti apsorberi.

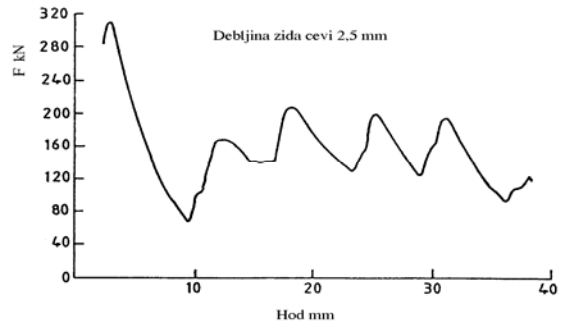


Slika 2. Uzorak za ispitivanje gužvanjem

Na slici 2, prikazan je izgled uzorka od austenitnog nerđajućeg čelika kvaliteta: 1.4301 (Č 4580). Čelične cevi su ispitivane u dve varijante sa debljinom zida od 2,5 i 5 mm.

Karakteristični dijagram zavisnosti sile pritiska od hoda pri kvazi-statičkom opterećenju za uzorke cevi debljine zida od 2,5 mm, prikazani su na slici 3. Vidi se da u početku ispitivanja postoji nagli skok sile do vrednosti od oko 308 kN. Pri toj sili cev gubi stabilnost i sila počinje naglo da pada do minimalne vrednosti od oko

66,5 kN. Dalje počinje ondulacija cevi pa dalji tok sile ima karakterističan oblik u vidu "harmonike". Srednja vrednost sile iznosi 158 kN. Odnos maksimalne i srednje sile je 1,95, dok apsorbovana energija svedena na masu elementa iznosi 20,1 kJ/kg.



Slika 3. Karakteristika cevastog apsorbera pri gužvanju

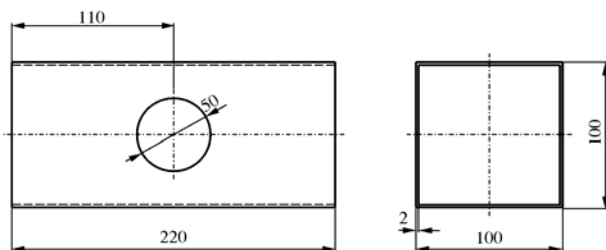
Za cev debljine zida 5 mm, dobijaju se veće vrednosti otpora gužvanja pa je veći i ukupni rad deformisanja odnosno apsorbovana energija. Zapaženo je da, specifična energija po jedinici mase raste kada raste debljina zida cevi a smanjuje se prečnik cevi. Utvrđeno je takođe da nema bitne razlike u rezultatima statičkog i dinamičkog ispitivanja.

### **PRIKAZ KUTIJASTIH APSORBERA**

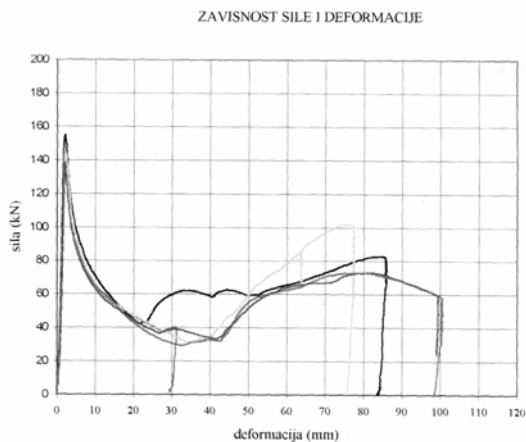
U okviru rada /3/, vršena su istraživanja cevastog apsorbera kvadratnog poprečnog preseka (kutijasti apsorberi). Uzorci su napravljeni od ugljeničnog konstrukcionog čelika kvaliteta: 1.0114 (Č 0361). Princip apsorpcije energije je takođe gužvanjem elemenata. Najviše su ispitivani uzorci sa dva naspramna otvora na sredini. Izgled ovog uzorka prikazan je na slici 4. Ovi otvori su zamišljeni kao izvori koncentracije napona, kako bi cev prvo na tim mestima izgubila stabilnost. Ovo je urađeno da bi deformacija elemenata bila što je više moguće predvidiva i da bi se smanjio odnos maksimalne i srednje sile.

Ispitivanja su vršena metodom kvazi-statičkog aksijalnog pritiska. Na slici 5 prikazani su zbirni dijagrami zavisnosti sile pritiska od hoda deformisanja za više uzoraka.

<sup>1</sup> Akr. od European Railway Research Institute



Slika 4. Kutijasti apsorber sa otvorima



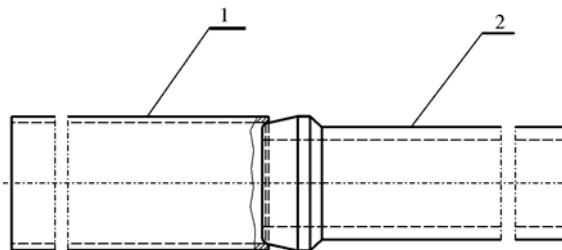
Slika 5. Karakteristika kutijastih apsorbera

Na dijagramima sa slike 5 se primećuje da sila naglo raste do dostizanja kritične vrednosti kada kutijasta cev gubi stabilnost. Potom se cev ondulira i sila naglo opada do neke minimalne vrednosti dok se ne dodirnu dva susedna nabora što se očituje ponovnim lokalnim porastom otpora deformisanja. Gubitak stabilnosti cevi počinje od otvora kao što je pretpostavljeno. Odnos maksimalne i minimalne sile se kreće u granicama od 3,6 do 4,6 što je slično kao kod ERRI uzoraka. Razlika u odnosu na eksperimente ERRI instituta je ta što sila po dostizanju maksimuma, opada pod manjim nagibom a apsorbovana energija je do 35% veća pri manjoj početnoj sili.

Osnovna slabost elemenata, koji rade na pricipu gužvanja je ta da materijal nije potpuno iskorišćen. U zonama ukleštenja elementi ostaju gotovo nedeformisani. Veliki skok sile na početku opterećenja takođe nije povoljan zbog mogućeg prenošenja opterećenja dalje u strukturu vozila. Analiza, koja je urađena na jednom uzorku sa delimičnim predeformisanjem, je pokazala da se na taj način može eliminisati visoka vrednost sile na početku i izbeći neželjeni tok deformisanja u celini strukture.

## APSORPCIJA ENERGIJE SUDARA PROŠIRIVANJEM CEVI

Novo konstruktivno rešenje apsorbera od čelika, koje je predmet istraživanja ovog rada, a koji je nastao kao izvod iz rada /4/, zasniva se pre svega na drugačijem principu apsorpcije energije sudara, nego napred navedena dva slučaja. U ovom rešenju, apsorpcija energije sudara se ostvaruje proširivanjem cevnih elemenata. Na taj način cevni element se plastično deformiše, proširivanjem na veći prečnik, a između unutrašnjeg zida cevi i proširivača, se javlja značajan otpor trenja, jer se proširivanje vrši u nepodmazanom stanju. Ideja ovog rešenja je bila da se bolje iskoristi materijal cevi. Naime, predviđeno je da se skoro cela dužina cevniog elementa proširuje. Jedino jedna mala zona vezivanja ostaje nedeformisana, koja odgovara dužini proširujućeg dela proširivača. Na slici 6 je prikazano idejno rešenje ovakvog tipa apsorbera.



Slika 6. Cevni apsorber na principu proširivanja

Na slici se vidi da se ovaj apsorber sastoji iz dva dela: pozicija 1 je cevni element, koji se proširuje a pozicija 2 je proširivač – utiskivač. Cevni element je izrađen od bešavne cevi kvaliteta materijala: 1.0309 (Č 1212), dok je utiskivač izrađen od čelika za poboljšanje: 1.1191 (Č 1531). Za materijal proširivača je bitno da je tvrdi od materijala proširivanog dela /5/. Merenjem tvrdoće, ustanovljena je tvrdoća od 164 HB za utiskivač i 146 HB za cevni element. Dimenzije ovog apsorbera, kao i stepen proširivanja su određeni u preliminarnim proračunima.

## PRORAČUN U CILJU IZBORA UZORAKA ZA ISPITIVANJE

Pre izvođenja ispitivanja, izvršen je proračun parametara proširivanja. Sila ukupnog otpora je računata pomoću obrasca /4/ :

$$F = 2\pi \cdot \frac{h_1 - R}{\sin \alpha} \cdot \delta \cdot k \cdot \left(1 - \ln \frac{d_2}{d_1}\right) \cdot \frac{1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha - \mu} + \mu \cdot E_{red} \cdot \varepsilon_{el} \cdot d_2 \cdot \pi \cdot h_2$$

gde su:

$h_1$  visina koničnog dela glave proširivača (slika 7)

$R$  radijus zaobljenja vrha konusa

$\alpha$  spoljni ugao konusa proširivača

$\delta$  debljina zida cevi

$k$  specifični otpor deformisanja

$d_2$  unutrašnji prečnik cevi posle proširivanja, prečnik venca proširivača

$d_1$  unutrašnji prečnik cevi pre proširivanja

$\mu$  koeficijent trenja između cevi i proširivača

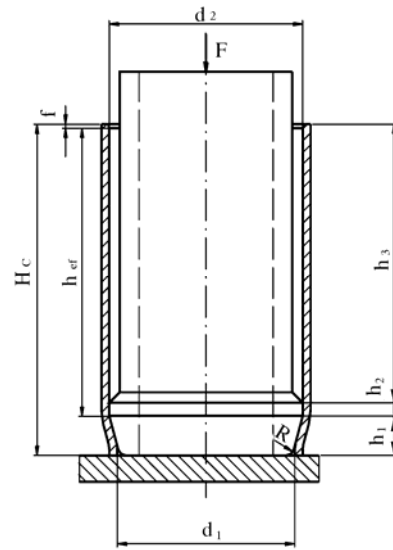
$E_{red}$  ekvivalentni – redukovani modul elastičnosti

$\varepsilon_{el}$  relativna elastična deformacija prilikom presovanja proširenog dela cevi po vencu proširivača

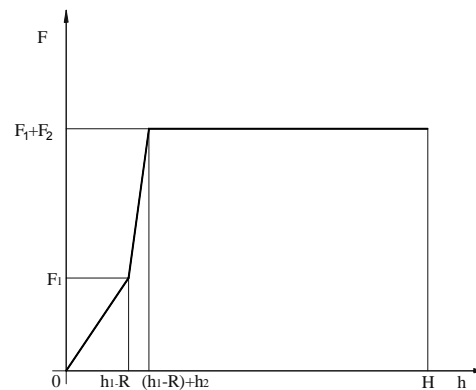
$h_2$  visina venca proširivača

Proračunom su utvrđeni optimalni parametri proširivanja i geometrija apsorbera. Na osnovu toga je izabran stepen proširivanja od 10%. Spoljni prečnik cevi 88,9mm, debljina zida cevi 4mm, spoljni ugao konusa proširivača od  $77^\circ$  za koeficijent trenja čelika po čeliku bez podmazivanja uzeta je vrednost iz preporuka za duboko izvlačenje /6/ od 0,19. Ovako proračunat ukupni otpor proširivanja iznosi 194 kN. Ukupni rad proširivanja za kratku cev iznosi 24,3 kJ a za dugu cev iznosi 54,2 kJ. Vrednost sile je nešto veća od ciljane, jer su stvarne mere uzoraka bile u okviru dozvoljene tolerancije u "plusu".

Na slici 7, prikazan je kraj procesa proširivanja sa karakterističnim dimenzijama, pod pretpostavkom da je cev potpuno iskorišćena. teorijski dijagram toka sile u zavisnosti od hoda proširivanja cevi, prikazan je na slici 8. Pretpostavka je da kada sila otpora proširivanja dostigne maksimalnu vrednost (F), tj, kada se "napresuje" venac proširivača, ostaje dalje konstantna po hodu proširivanja.



Slika 7. Karakteristične mere na kraju proširivanja



Slika 8. Teorijski deformacioni dijagram

Deformacioni rad proširivanja se može odrediti po fazama sa dijagrama F-h, (Slika 8).

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

Za procenu pogodnosti elemenata da apsorbuju kinetičku energiju sudara, sa stanovišta ugradnje u vozilo, uvedena su još tri parametra i to: rad sveden na jedinicu mase para Q, rad sveden na masu samo cevnog elementa  $Q_1$  i rad sveden na aksijalni gabarit para  $Q_2$ .

$$Q = \frac{W}{m_{uk}} ; Q_1 = \frac{W}{m_c} \quad \text{i} \quad Q_2 = \frac{W}{L_g}$$

gde su:

$m_{uk}$  masa apsorpcionog para

$m_c$  masa cevnog elementa

$L_g$  aksijalni gabarit

Da bi apsorber ispravno funkcionisao i ostvario predviđene parametre apsorpcije, pri pritiski-

vanju mora ostati stabilan. Provera stabilnosti cevi, izvršena je prema metodologiji opisanoj u /7/, za trenutak kada se dostigne maksimalna sila  $F$ , jer je tada dužina cevi izložena pritisku najveća i situacija je sa stanovišta stabilnosti najnepovoljnija.

Tokom izvođenja proračuna pokazalo se, da sila i rad rastu sa porastom debljine zida cevi, što je i očekivano, zatim sila i rad rastu i sa porastom prečnika cevi, dok rad po jedinici mase elemenata raste sa porastom debljine zida cevi a opada sa porastom prečnika cevi. Veći prečnik naime, daje i veću zapreminu samim tim i veću masu. Proizilazi da šira cev koja daje veću silu i rad, sa stanovišta ugradnje nije povoljna zbog velike mase.

### **PRIKAZ ISPITIVANJA**

Cilj ispitivanja, koja će biti opisana u ovom poglavlju je bio da se pre svega odrede stvarne vrednosti sile i rada plastičnog deformisanja cevnih elemenata. Ispitivanje je vršeno metodom kvazi-statičkog opterećenja na pritisak. Tom prilikom merene su sila i hod proširivanja. Na osnovu ova dva podatka uz primenu odgovarajućeg mernog sistema i softvera, za prikupljanje i obradu podataka, dobijeni su dijagrami toka sile i rad deformacije.

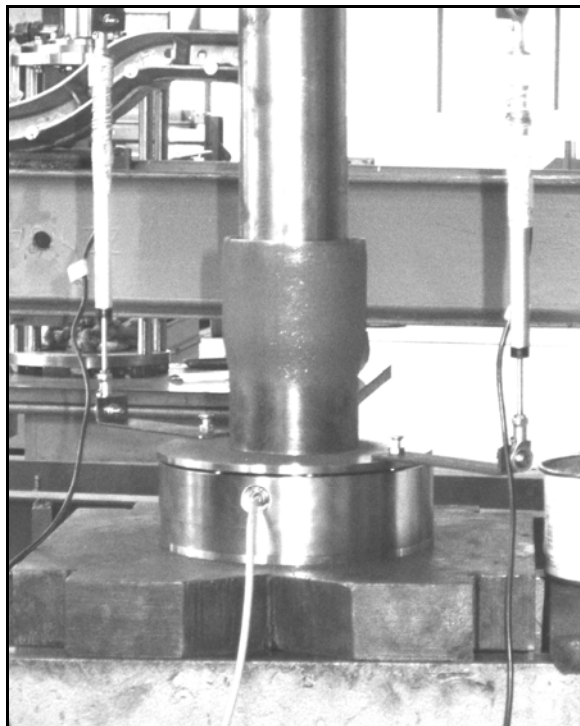
### **Opis toka ispitivanja**

Ispitano je šest cevnih elemenata dužine 150 mm i jedna duga cev dužine 304 mm. Ispitivanje je izvršeno u hladnom stanju. Pre ispitivanja kratki cevni elementi su označeni brojevima od 2 do 6 a duga cev sa brojem 1, dok su utiskivači obeleženi sa 1 i 2. Na taj način je obrazovano sedam apsorpcionih parova, koji su ispitivani prema sledećem redosledu:

- 1. par: U1C5 (Utiskivač 1 i cev 5)
- 2. par: U1C7
- 3. par: U1C2
- 4. par: U2C3
- 5. par: U1C6
- 6. par: U2C4
- 7. par: U1C1

Utiskivač 1 je više korišćen zbog toga što se utiskivač 2 dosta ošteti tokom proširivanja cevi 3. Tom prilikom su nastala značajna površinska oštećenja konusa utiskivača (čupanje materijala, brazde itd.) što je verovatno posledica zakošenja utiskivača i značajnog porasta otpora

proširivanja. Na slici 9, prikazan je uzorak kratke cevi pri ispitivanju na presi.



Slika 9. Ispitivanje cevnog apsorbera

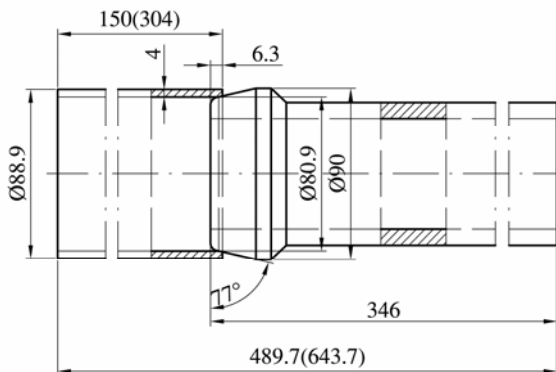
### **Rezultati ispitivanja**

Na osnovu dobijenih zavisnosti sile proširivanja  $F$  od hoda  $h$ , analizirano je šest parametara koji su od značaja za ukupnu ocenu pogodnosti elemenata za apsorpciju energije i to su:

- Srednja sila  $F_{sr} = \frac{1}{h_{max}} \cdot \int_0^{h_{max}} F(h) \cdot dh$
- Maksimalna sila  $F_{max}$
- Ukupan rad proširivanja  $W = \int_0^{h_{max}} F(h) \cdot dh$
- Rad proširivanja sveden na masu apsorpcionog para  $Q$
- Rad proširivanja sveden na masu samog cevnog elementa  $Q_1$
- Rad proširivanja sveden na aksijalni gabarit  $Q_2$

Ukupni rad proširivanja ( $W$ ) je merilo potencijala elementa za apsorpciju energije, a jedinični rad je merilo pogodnosti elemenata za ugradnju u vozilo sa aspekta mase para ( $Q$ ), mase cevnog elementa ( $Q_1$ ) i podužnog gabarita, ( $Q_2$ ). Što su ovi parametri veći tim je element povoljniji za primenu.

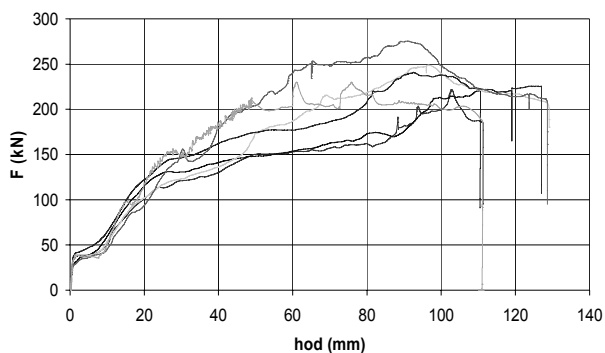
Na slici 10, je prikazan apsorpcioni par u trenutku naleganja konusa proširivača na oborenu ivicu cevi. U tom trenutku apsorpcioni par zauzima najveću dužinu i to je aksijalni gabarit ( $L_g$ ), (mere u zagradi se odnose na dugu cev).



Slika 10. Apсорpcioni par

Na slici 11, prikazani su dijagrami  $F(h)$  za svih šest ispitivanih apсорpcionih parova sa kratkim cevima.

Uočava se skoro linearan rast sile od početka utiskivanja, kada su na gornjoj ivici cevi prisutne samo elastične deformacije do sile od koje počinje plastična deformacija početka cevi. Potom sledi jedna zona sa prilično naglim porastom sile do hoda od oko 30 mm. Zatim sila sporije raste, dok u poslednjoj zoni dijagrama od 80 do 110 mm narasta do maksimalne vrednosti.



Slika 11. Karakteristika cevniх apсорberа na bazi proširivanja

Prvi zaključak, koji se nameće je da je porast sile postepen i kontrolisan, da sila brže raste u početku a sporije na kraju ispitivanja. Značajnije rasipanje počinje od hoda od oko 20 mm i posledica je niza stohastičkih pojava, kao što su različiti kvaliteti obrađenih površina cevi, što

direktno utiče na koeficijent trenja, kao i zakošenje apсорpcionog para tokom ispitivanja, što prouzrokuje povećanje sile utiskivanja. Tokom ispitivanja svih šest kratkih cevi nije došlo do pojave prslina, na cevima, niti do gubitka stabilnosti, što se i očekivalo, s obzirom na izabrano proširenje od oko 10 %<sup>2</sup> i proveru stabilnosti.

U tabeli 1 prikazane su srednje vrednosti i standardna odstupanja parametara od značaja za procenu elemenata za apсорpciju energije sudara. Ukupan rad proširivanja je analiziran na hodu od  $h = 110$  mm, jer je to najveći hod koji pokriva sve ispitivane uzorke. Za obradu ovih podataka korišćeni su parametri normalne raspodele prema [8]:

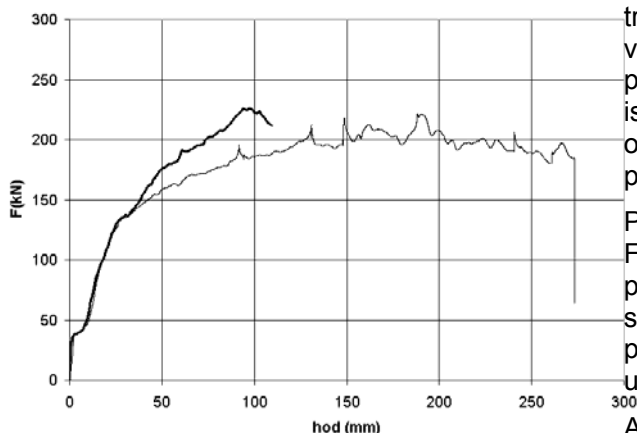
- Srednja vrednost  $x_m$
- Standardna devijacija  $\sigma$
- Kriterijum  $3\sigma$  za odbacivanje grubih grešaka

Tabela 1.

	Kratke cevi			Duga cev		
	$x_m$	$\sigma$	$3\sigma$			
$F_{sr}$ (kN)	149.5	11.9	35.71	176		
$F_{max}$ (kN)	239.6	20.86	62.59	221,3		
$F_{max}/F_{sr}$	1.607	0.14	0.42	1,257		
$h$	110			110	220	270
$W$ (kJ)	17.89	1.98	5.95	15,87	37,97	47,5
$Q$ (kJ/kg)	2.75	0.30	0.91	2,04	4,88	6,1
$Q_1$ (kJ/kg)	12.7	1.42	4.26	5,64	13,49	18,55
$Q_2$ (kJ/m)	36.5	4.05	12.15	-	-	74,22

Svi parametri zadovoljavaju uslov:  $|x_i - \bar{x}| < 3\sigma$ , što znači da nema grubih grešaka ispitivanja. Na slici 12 je dat uporedni pregled srednje karakteristike za šest kratkih cevi i karakteristike duge cevi.

<sup>2</sup> Izduženje pri kidanju za čelik: 1.0309 je 25%



Slika 12. Karakteristika kratkih i duge cevi

Primećuje se dobro slaganje zavisnosti sile i hoda do oko 35 mm, posle koga sila kod duge cevi ima tendenciju blažeg porasta nego kod kratkih cevi. Osnovni razlog što se ispitivala duga cev, je bio taj da se proveriti tendencija promene sile sa povećanjem hoda proširivanja. Iako je ispitana samo jedna uzorak duge cevi, ipak se vidi da se sila stabilizuje oko rednosti oko 200 kN, što je inače vrlo približno proračunskoj vrednosti. U tabeli 1, dat je takođe uporedni prikaz parametara kratkih i duge cevi. Rad  $W$  i jedinični radovi:  $Q$ ,  $Q_1$  i  $Q_2$ , analizirani su na tri karakteristična hoda. Na hodu od 110 mm, zbog poređenja sa kratkim cevima, na hodu od 220mm, zbog toga što je duga cev približno dvostruko duža od kratke cevi i na hodu od 270 mm, kako bi se odredio ukupan potencijal apsorpcije energije duge cevi.

Duga cev zbog veće efektivne dužine deformisanja, pokazuje bolje karakteristike apsorpcije od kratkih cevi. Tako da je ukupna apsorbovana energija kod duge cevi, veća za 2.66 puta nego kod kratke cevi (približno proporcionalno hodu).

U pogledu pogodnosti elemenata za ugradnju sa stanovišta podužnog gabarita, duga cev je u prednosti nad kratkom. Specifični rad ( $Q_2$ ) duge cevi, dvostruko je veći od specifičnog rada kratkih cevi.

### POREĐENJE TRI VRSTE APSORBERA

Već se na prvi pogled primećuje, sa dijagrama zavisnosti: sila – hod, da je porast sile kod apsorbera na bazi proširivanja cevi najpostepeniji. Uočava se da rasipanje postaje sve izraženije posle završetka utiskivanja konusnog dela utiskivača. Ovo rasipanje je, kao što je već rečeno, posledica mnogih stohastičkih pojava, kao što su: razlike u hrapavosti unutrašnjih površina cevi, što direktno utiče na koeficijent

trenja, zatim različitog stepena zakošenja utiskivača i cevi, što ima za posledicu porast sile proširivanja itd. Takođe je primećeno tokom ispitivanja, da se unutrašnja ivica zida cevi odvojila od venca proširivača odnosno da se tu pojavio zazor reda veličine 0,5 mm.

Poređenjem reprezentativnih pokazatelja:  $F_{max}/F_{sr}$ ,  $Q'$  (specifična apsorbovana energija po jedinici mase deformisanog dela) i  $Q_2$  mogu se bolje sagledati rezultati sva tri tipa apsorbera prikazana u ovom radu. Ovi pokazatelji su dati u tabeli 2.

Ako se poredi ovi pokazatelji između proširivanih kratkih cevi i ERRI čeličnih cevi, statički ispitivanih, dolazi se do zaključka da je odnos  $F_{max}$  i  $F_{sr}$  približno isti za cev debljine  $\delta = 5$  mm, dok je kod cevi debljine  $\delta = 2,5$  ovaj odnos povoljniji u korist proširivanih cevi, naročito kod duge cevi jer iznosi svega 1,26. Jedinični rad po masi apsorbovanog dela kod ERRI, je veći nego kod ostalih tipova apsorbera jer je ta masa relativno mala. Ako se analizira jedinični rad po ukupnom gabaritu, zapaža se znatno veća vrednost kod ERRI uzoraka nego kod proširivanih cevi i kod kvadratnih cevi, što je posledica manjeg podužnog gabarita od svega 120mm.

Tabela 2.

Apsorberi	Primedba	$F_{max} / F_{sr}$	$Q'$ (kJ/kg)	$Q_2$ (kJ/m)
ERRI elementi	$\delta = 2.5$	1.95	20.1	148.74
	$\delta = 5$	1.54	32.6	482.5
Kvadratne cevi	$\delta = 2$ dva otvora	2.35	9.3	25.03
Proširivane cevi	$\delta = 4$ kratke cevi	1.6	17.32 (3.75)*	36,5
	$\delta = 4$ Duga cev	1.26	20.9 (6.87)	74,22

Podaci u zagradi se odnose na apsorpcioni par.

### ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih proračuna i ispitivanja, nameće se opšti zaključak da su istraživani apsorberi, koji rade na principu proširivanja čeličnih cevi, pogodni za tu namenu iz tri osnovna razloga: dobro iskorišćenje materijala cevi, postepen porast otpora proširivanja i mali odnos maksimalne i srednje sile deformisanja. Veliki skok sile, koji se dobija na početku rada elemenata na bazi gužvanja je nepoželjan zbog toga što se velika sila može preneti na druge

elemente strukture vozila i izazvati nepredvidive deformacije bez da su se elementi za apsorpciju energije u potpunosti iskoristili.

Jedinični rad je skoro dva puta manji što je posledica veće debljine zida cevi i uzimanja u obzir mase utiskivača, koji ima veću masu od samog cevnog elementa. Međutim, ako se uporedi jedinični rad sveden na masu samo cevnog elementa, onda se zapaža da su elementi na principu proširivanja u značajnoj prednosti, jer apsorbuju tri puta veću jediničnu energiju. Ova poređenja su adekvatna samo u pogledu efikasnosti metode apsorbovanja energije.

Kao nedostatak je zapaženo da su ovi elementi osetljivi na zakošenja, koja su inače neminovna kod dinamičkih pojava kakvi su sudari. Potrebna su konstruktivna prilagođavanja na proširivaču kako ne bi dolazilo do pojave zazora između unutrašnje strane zida cevi i najšireg dela proširivača. To će sa jedne strane umanjiti zakošenje, a sa druge strane povećati tarne površine i time potencijal za apsorpciju energije sudara.

#### LITERATURA

- /1/ ORE B 165 Rapport No 8, Utrecht, Octobre 1991
- /2/ ORE B 165 Rapport No 6, Utrecht, Septembre 1988
- /3/ Šotra V., Istraživanje elemenata za apsorpciju energije pri sudaru šinskih vozila, Magistarska teza - Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd 1999.
- /4/ Krivokapić M., Istraživanje karakteristika cevnog apsorbera kinetičke energije sudara šinskih vozila, Magistarska teza - Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd 2005.

/5/ JUS ISO 8493, Ispitivanje cevi proširivanjem koničnim utiskivačem, Beograd 1993.

/6/ Kalajdžić M., Tehnologija mašingradnje 1, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd 1988.

/7/ Вольмир А. С., Устойчивость упругих систем, Государственное издательство физико – математической литературы, Москва 1963.

/8/ Gajić A., Krsmanović Lj., Matematička analiza i postupci eksperimentalnih istraživanja, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd 1994.

#### **WIDENING OF STEEL TUBES AS A METHOD OF APSORPTION OF THE KINETIC ENERGY IN RAILWAY VEHICLE COLLISION**

*One type of collision energy absorption element is considered, which works on principle of the tube widening. During plastic deformation of the steel tubes, by widening to a larger diameter by means of special cone thorn, absorbed energy will be greater then by absorber which works on principle of tube smashing. Between inner tube side and thorn a considerable friction appears, which increases widening resistance and therefore increases absorbed energy. By preliminary calculations it was got the widening ratio and dimensions of the absorption pair for application in railway vehicle applications (the tube element and the thorn). The correspondent test results are given and compared to two other energy absorption element types.*

*Keywords: Collision energy absorbers, railway vehicles, passive safety*