

Dr. Ir. Amy de Man, Ph.D.

ŽELJEZNIČKI SUSTAVI NA MOSTOVIMA: PRAKTIČNI KLJUČ INTEGRALNOGA PROJEKTIRANJA

1. Uvod

Mostovi i vijadukti nesumnjivo su dio svake klasične, električne željezničke ili tramvajske mreže. Da nema mostova, mreže bi bile vrlo kratke i njihovo bi korištenje bilo vrlo ograničeno. Zato je primjena kolosijeka na mostovima uvijek bila glavni predmet inženjerskih projekata.

Široki raspon oblika i tipova mostova i vijadukata upućuje na to da su osnovna polazišta kao i uvjeti pod kojima su mostovi i vijadukti projektirani razni. Čak i ako su polazišta i uvjeti isti, odabir projekta dovodi do raznih konačnih projektnih rješenja. Osim inženjerskoga znanja na projektiranje mosta utječu arhitektonsko oblikovanje, cijena te lokalno dostupni materijali.

Rijetko koja vrsta sustava pričvršćenja tračnica bitno utječe na oblikovanje i projektiranje mosta. Kroz povijest projektiranja željezničkih mostova vidljivo je to da se kod čeličnih rešetkastih ili punostijenih mostova primjenjuju drveni pragovi položeni izravno na nosače, da se kod masivnih mostova projektira kolosijek na tučencu, a da se kod svih pokretnih mostova može primijeniti bilo koji način izravnoga pričvršćenja.

2. Kolosijeci na mostovima

Za kolosijeke na mostovima očito je to da oblikovanje mosta pod opterećenjem vlakova, pod temperaturnim opterećenjem, opterećenjem vjetrom i bilo kojim drugim primjenjivim opterećenjem neće utjecati na vožnju vlakova. Dakle, od vitalne je važnosti definirati sučelja i postaviti ograničenja koja će konstrukcija mosta predstavljati kolosijeku i obratno. Sve je definirano Eurokodom EN 1991-2, iako je utjecaj kolosijeka na most mali, a utjecaj mosta na kolosijek puno veći.

Sustav ugrađenih tračnica samo je jedan od sustava pričvršćenja tračnica, ali ima značajke koje utječu na oblikovanje mosta. Niska konstrukcija i

integriranje u cestovne kolnike pogodni su za dimenzioniranje te uštedu materijala. Lijepljenje/učvršćivanje/spajanje tračnice na most korisno je za vodonepropusno brtvljenje i smanjenje razmaka prekinute tračnice, ali također uvjetuje maksimalne raspone mosta ako se primjenjuje neprekinuti/dugi tračnički trak.

Poznavanjem i poštivanjem ograničenja sustava ugrađenih tračnica otvaraju se mogućnosti za projektiranje mostova, posebno u slučaju integralnoga projektiranja.

2.1. Primjena na kolničkim zatvorenim i otvorenim konstrukcijama

Razlika između kolosijeka na kolniku i u otvorenoj strukturi najizraženija je na površini. U slučaju sustava ugrađenih tračnica, to utječe na dizajn kanala.

Kolosijek u kolniku zahtijeva kanal koji je poravnat s vrhom tračnice. Dobar odabir su čelični kanali koji olakšavaju uporabu asfaltnih kolnika. Obično je dovoljno to da je debljina stijenke čeličnoga kanala 10 mm. Uz primjenu čeličnih kanala preporučuju se premazi za zaštitu od korozije. Betonski kanali također ispunjavaju uvjete za ugradnju u kolnike, ali zidovi od betonskih kanala znatno su širi od čeličnih zidova kako bi se mogla ugraditi armatura i osigurati čvrstoća. Prevencija korozije nije potrebna, ali hrapavost površine može biti relevantna značajka.

Kada je u pitanju sigurnost, širina utora bitna je stavka projekta. Kod žljebaste tračnice širina utora je sastavni dio tračnice te ne utječe na projekt i sigurnost kanala, no Vignolova tračnica mora biti postavljena u kanal tako da je širina utora dovoljno velika kako bi omogućivala prolazak prirubnice kotača (šira je za putničke i teretne vlakove nego za tramvaje). Ujedno širina ovisi o radijusu krivine. Širina utora veća je u slučaju manjih radijusa kako bi se spriječio kontakt između unutarnje prirubnice kotača i stijenke kanala.

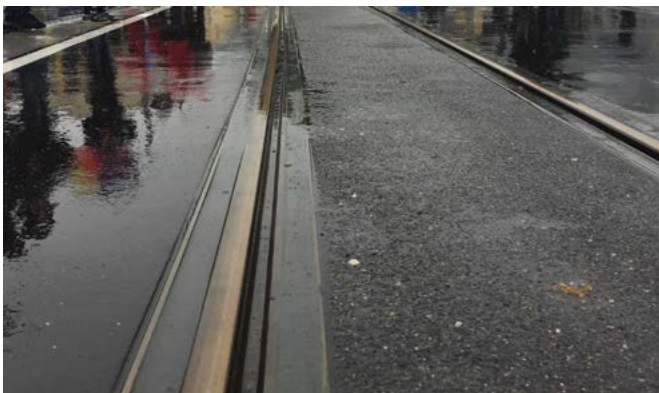
Kod kolničkih konstrukcija čimbenik sigurnosti na cesti ograničava širine utora. U slučaju okomitih željezničko-cestovnih križanja dopuštene su širine utora od najviše 83 mm, dok je kod kosih križanja dopuštena širina najviše 64 mm. Širina od 64 mm često se koristi u situacijama kada teče paralelni cestovni i željeznički promet (npr. kontejnerski terminali, radionice i skladišta), no kada se biciklistički i pješački promet miješaju sa željezničkim (npr. tramvaj u gradu), Vignolove tračnice nisu prikladne i koriste se one žljebaste. Širina utora žljebaste tračnice obično je samo od 30 do 35 mm.



Slika 1. Corkelast® Embedded Rail System (sustav ugrađenih tračnica) na kolničkoj konstrukciji



Slika 2. Corkelast® Embedded Rail System (sustav ugrađenih tračnica) na otvorenoj konstrukciji mosta



Slika 3. Corkelast® Embedded Rail System (sustav ugrađenih tračnica) na kolničkoj konstrukciji, u čeličnome kanalu



Slika 4. Corkelast® Embedded Rail System (sustav ugrađenih tračnica) na kolničkoj konstrukciji, u betonskome kanalu

2.2. Ponašanje sustava ugrađenih tračnica

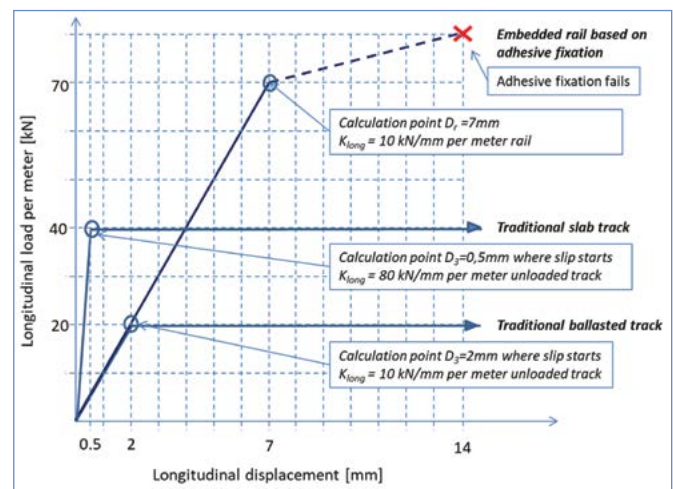
Sustavi ugrađenih tračnica podijeljeni su u dva osnovna tipa:

- oni koji se baziraju na **mehaničkome** učvršćenju/fiksiranju („obloženi“ sustavi, uliveni u beton poput sustava SDS-M) i
- oni koji baziraju na **učvršćenju/fiksiranju lijepljenjem** („lijepljeni“ sustavi kao što je sustav Corkelast® ERS).

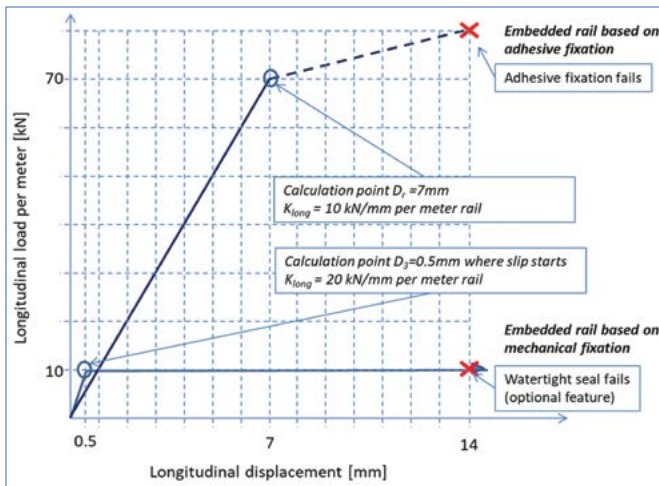
Neki sustavi koji se baziraju na mehaničkome učvršćivanju imaju vodonepropusnu brtvu zbog koje izgledaju poput sustava temeljenoga na fiksiranju lijepljenjem, no u osnovi su to mehanički sustavi i ponašaju se drugačije od adhezivnih (lijepljenih). Upravo je to vrlo važno kod kolosijeka na mostovima.

Za sustave ugrađenih tračnica koji se baziraju na učvršćivanju lijepljenjem, najvažnija specifična značajka jest uzdužno ponašanje koje karakterizira dvolinijski grafikon koji prikazuje proračun te točku kvara.

Tradicionalni sustavi tračnica kao što je prikazano na slici 5. i sustavi ugrađenih tračnica koji se baziraju na mehaničkome pričvršćenju kao što je prikazano na slici 6. imaju točku klizanja koja se nalazi na manjim pomacima i kod manjih opterećenja. Svojstva tradicionalnih kolosijeka preuzeta su iz Tehničkog izvješća o interakciji kolosijek-konstrukcija mosta - CEN TR 17231 Technical Report Eurocode 1 (1), u kojemu je prikazano uzdužno ponašanje tračnice u odnosu na rasponski sklop mosta.



Slika 5. Primjer uzdužnoga ponašanja sustava ugrađenih tračnica koji se bazira na učvršćivanju lijepljenjem u usporedbi s tradicionalnim kolosijekom na čvrstoj podlozi i s tradicionalnim kolosijekom na tučencu



Slika 6. Primjer uzdužnoga ponašanja sustava ugrađenih tračnica koji se bazira na učvršćenju lijepljenjem u usporedbi s ugrađenim tračnicama koje se baziraju na mehaničkome učvršćenju

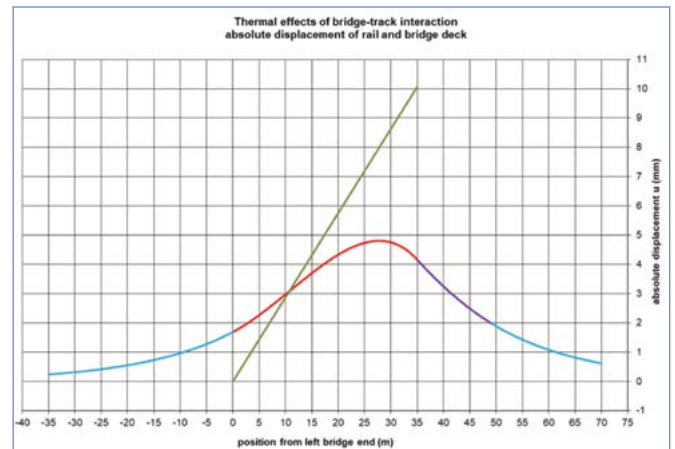
Zbog takvoga uzdužnog pomaka tračnica je čvrsto povezana s mostom i istodobno su spriječeni široki razmaci u slučaju pucanja tračnica zimi. Čvrsta (i kruta) povezanost sustava ugrađenih tračnica koji se bazira na učvršćenju lijepljenjem ograničava duljinu raspona mosta kod kontinuirano zavarenih tračnice te zahtijeva upotrebu dilatacijskih spojeva za duže raspane mosta. To je prikazano u sljedećemu primjeru.

Tablica 1. Parametri za proračun toplinskih učinaka međusobne povezanosti mosta i kolosijeka

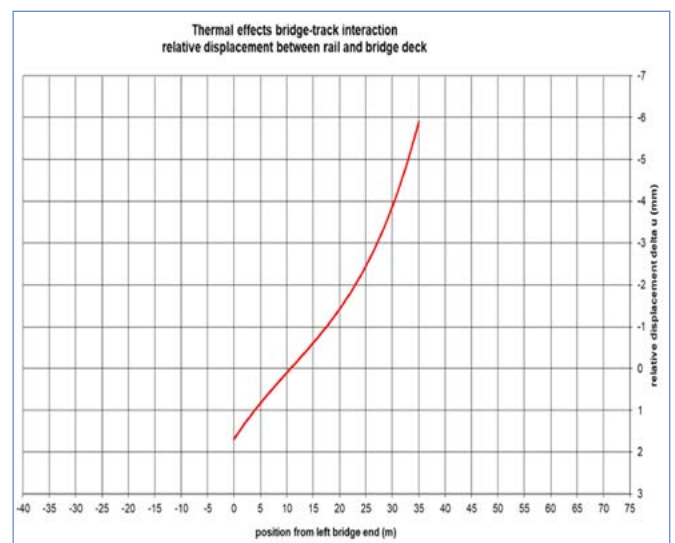
Duljina mosta: 35 m	Betonski dio mosta: 1,5 m ²	Lijeva/desna potpora: fiksirana / slobodna
Uzdužna otpornost tračnice na tučencu: 10 kN/mm od 2 mm	Neutralna temperatura mosta: 15 °C	Neutralna temperatura tračnice: 23 °C
Uzdužna krutost ugrađenih tračnica : 15 kN/mm/m tračnica do 7 mm	Maksimalna temperatura mosta: 40 °C	Maksimalna temperatura tračnice: 55 °C
Tip tračnice: 60E1	E-modul čelika: 210 GPa	E-modul betona: 31 GPa

Koeficijenti toplinskoga širenja betona i čelika (materijali od kojih su izrađeni most i tračnica) jednaki su (približno $1,15 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$), ali koeficijent materijala Corkelast® za ugrađivanje tračnica je oko 10 puta veći. Međutim, to ne uzrokuje znatna naprezanja materijala za ugradnju jer je modul elastičnosti znatno niži.

Prema izračunu primjera, ugrađena se tračnica uzdužno ponaša drugačije od mosta te na krajevima mosta razlika pomaka doseže od 2 do 6 mm (slika 7.).

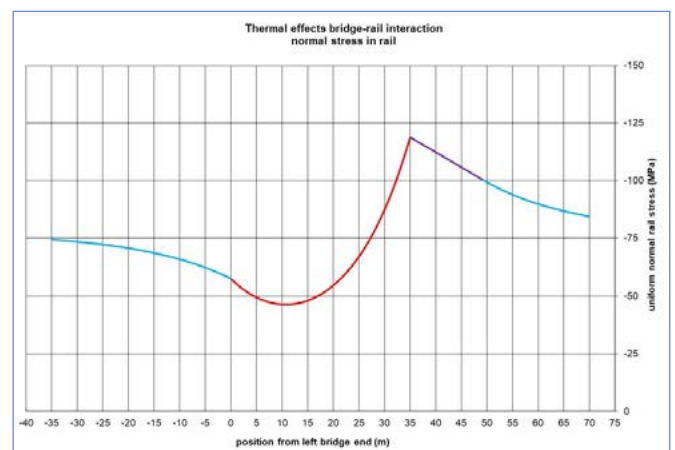


Slika 7. Izračun primjera: pomak mosta (zeleno), kolosijeka na mostu (crveno) i kolosijeka na nasipu (plavo = elastično, ljubičasto = klizanje); sustav ugrađenih tračnica na mostu, kolosijek na tučencu i nasipu



Slika 8. Izračun primjera: diferencijalni pomak tračnice na mostu

Prva je provjera uspješna jer su ti pomaci manji od vrijednosti točke izračuna od 7 mm i puno manji od vrijednosti za kvar od 14 mm (slike 5. i 6.).



Slika 9. Izračun primjera: normalno naprezanje u tračnici na mostu (crveno) i na nasipu (plavo = elastično, ljubičasto = klizanje); sustav ugrađenih tračnica na mostu, kolosijek na tučencu i nasipu

Druga je provjera također uspješna. Tamo gdje normalni toplinski stres tračnice dostiže do -77 MPa (krajnje lijevo na slici 9.), ekstremno tlačno opterećenje na desnome kraju mosta dostiže -119 MPa, što je porast od 42 MPa. Pravila projektiranja za interakciju mostova i kolosijeka dopuštaju povećanje od 72 MPa za kolosijek na tučencu i od 92 MPa za kolosijek na čvrstoj podlozi. U ovome jednostavnom slučaju ispunjena su oba zahtjeva.

Pomicanje kolosijeka na tučencu izračunano je na 14 m na slici 9. prikazano je to da je promjena naprezanja u duljini pruge linearna, što jasno upućuje na konstantno trenje zbog klizanja. To dokazuje da se na tome dijelu kolosijek kliže, a taj je dio obično izložen diferencijalnim slijeganjima i razlikama u krutosti temelja u vertikalnome smjeru. Na to treba obraćati pozornost prilikom održavanja.

2.3. Procjena prema Eurokodu 1991-2

Kada se projekt novoga ili obnovljenoga mosta izvodi u skladu s Eurokodom 1991-2 (4), tada se tip sustava za ugradnju kolosijeka obično ne smatra relevantnom stavkom projekta. To može vrijediti za vertikalna i bočna opterećenja vlakova jer se u projektu u obzir uzimaju modeli s koncentriranim osovinskim opterećenjima ili s linijski raspodijeljenim opterećenjima. Ne postoji zahtjev koji bi zahtijevao da se u obzir uzmu raspodjele opterećenja na temelju elastičnosti potpore tračnice.

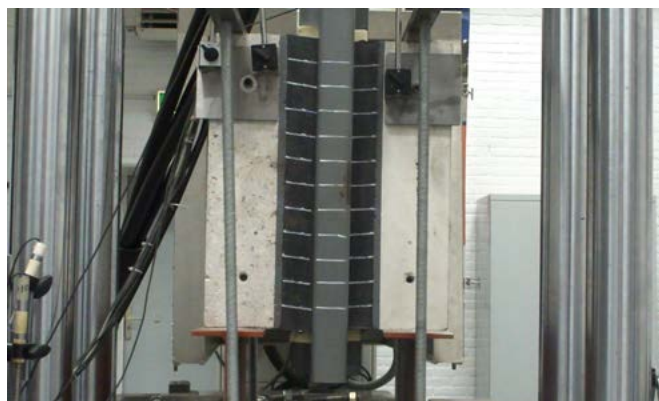
Za uzdužna i vertikalna opterećenja i za pomake mosta i kolosijeka postoji zahtjev da se provjerava naprezanje tračnica uzrokovano toplinskim opterećenjima, opterećenjima kod kočenja i izvijanjem kraja mosta (uzrokovanim vertikalnim opterećenjima u nepovoljnim položajima).

Kao što je prikazano u gornjemu primjeru, sustavi ugrađenih tračnica koji se baziraju na učvršćenju lijepljenjem kao i sustavi ugrađenih tračnica koji se baziraju na mehaničkome učvršćenju s vodonepropusnom brtvom zahtijevaju provjeru diferencijalnih pomaka između tračnice i mosta u uzdužnome smjeru i, gdje je to primjenjivo, u smjeru uzdizanja.

Standardi koji podržavaju Eurokod 1991-2 jesu standardi koji opisuju metode ispitivanja koje se provode u mehaničkome ispitnom laboratoriju na uzorcima sustava ugrađenih tračnica:

- EN 13146-1 za uzdužno ograničenje tračnice i uzdužnu krutost (2)
- EN 13146-7 za silu stezanja i uzdizanu krutost (3).

U slučaju sustava ugrađenih tračnica, koji se baziraju na fiksiranju lijepljenjem, **krutost** je glavni ishod postupka testiranja, a **ograničavajući pomak** jest drugi



Slika 10. Corkelast® Embedded Rail System (sustav ugrađenih tračnica) koji se bazira na učvršćenju lijepljenjem na testu uzdužne krutosti

važan ishod. Prema zadanim parametrima ta se ispitivanja provode u laboratorijskim uvjetima kontrolirane temperature kao što je to prikazano na slici 10. Mogu se testirati performanse pri različitim temperaturama, a mogu se predvidjeti i na temelju toplinskih karakteristika materijala.

Za niz sustava ugrađenih tračnica uzdužna krutost kreće se između 10 i 20 kN/mm po metru ugrađene tračnice. Ograničavajući pomak za brojne izvedbe jest 14 mm, ali može se razlikovati od projekta do projekta. U izračunima primjenjuje se faktor sigurnosti ili se kao granica koristi vrijednost izračuna od 7 mm.

Vertikalna krutost uzdignuća sustava ugrađenih tračnica obično se smatra jednakom vertikalnoj statičkoj krutosti pod tlačnim opterećenjem (= opterećenje vlakom), posebno za donji raspon opterećenja. Ograničavajući pomak jako ovisi o oblikovanju mosta.

3. Primjeri rješenja sustava

U nastavku prikazana su rješenja ugradnje sustava na čeličnim i betonskim mostovima.



Slika 11. Čelični most sa zavarenom konstrukcijom s integriranim kanalima Corkelast® Embedded Rail System (sustav ugrađenih tračnica)



Slika 12. Betonski most s integriranim kanalima za Crkelast® Embedded Rail System (sustav ugrađenih tračnica)



Slika 13. Oblikovanje čeličnoga kanala za obnovu čeličnog mosta

Za dodatno podizanje tračnica i postizanje uzdužne elastičnosti na nosaču, koji je obično najslabije mjesto za pričvršćivanje tračnica, dostupan je specifičan detalj ugrađene tračnice koji je prikazan na slici 14.



Slika 14. Integrirani projekt nosača Corkelast® Embedded Rail System (sustav ugrađenih tračnica)

Za mostove sa sustavom ugrađenih tračnica koji se bazira na učvršćivanju lijepljenjem uobičajena je praksa da su potrebni dilatacijski spojevi ili uređaji za kompenzaciju dilatacija za raspone mostova od 30 do 35 metara i više. Ti su dilatacijski spojevi ili uređaji široko dostupni i premda postoje specifični dizajni za dilatacijske zglobove i uređaje, kod sustava ugrađenih tračnica njihova primjena nije strogo propisano. Primjeri ugrađenih dilatacijskih spojeva i uređaja u kolnicima na mostovima prikazani su na slici 15.



Slika 15. Uređaj za dilataciju žljebaste tračnice u Corkelast® Embedded Rail Systemu u kolniku

U slučaju otvorene konstrukcije, dakle bez kolnika, može se primijeniti bilo koja vrsta dilatacijskoga spoja ili uređaja koji mogu podnijeti proračunani pomak. Ponekad konstrukcija mosta omogućuje primjenu ugrađenoga tipa dilatacijskog spoja ili uređaja kao što je to prikazano na slici 16.



Slika 16. Uređaj za dilataciju u Corkelast® Embedded Rail Systemu kao integralno rješenje

Optimalan izbor za smještaj dilatacijskoga spoja ili uređaja ovisi o određenim uvjetima, među kojima su najvažniji:

- pomak/rotacija na kraju rasponskoga sklopa
- osjetljivost tračnice na prijelazu na upornjak (posebno za kolosijek na tučencu)
- iskustvo u održavanju.

To dovodi do dvaju pristupa, bez posebnih pretpostavki:

- Postavljanje dilatacijskoga spoja ili uređaja u krajnjim dijelovima konstrukcije mosta: tračnica ima klizna učvršćenja sve dok je na konstrukciji mosta. Učvršćenje na upornjaku također mora kliziti.
- Postavljanje dilatacijskoga spoja ili uređaja na nosač, na upornjaku u zadnjemu metru udaljenosti od potpornoga zida. Tračnica na upornjaku također ima klizna učvršćenja između potpornoga zida i dilatacijskog spoja/uređaja.

4. Zaključak

Sustav ugrađenih tračnica Corkelast® jest sustav za učvršćivanje tračnica koji ima posebne osobine i koje mogu biti korisne za kolosijeka na mostovima. U fazi projektiranja dobro je obratiti pozornost na njih jer utječu na duljinu raspona mosta, veličine kanala i njihovu integraciju u kolnike (uključujući dilatacijske spojeve ili uređaje). Nisu svi sustavi ugrađenih tračnica istovjetni jer postoje sustavi koji se baziraju na mehaničkome učvršćenju i koji se ponašaju drugačije od sustava koji se baziraju na učvršćenju lijepljenjem. U ovome radu istaknuto je to da pravila Eurokoda kod projektiranja uzimaju u obzir određeno uzdužno i uzdizno ponašanje sustava kolosijeka, što je neophodno za učinkovito i cjelovito projektiranje kolosijeka na mostovima. U Europi ima puno praktičnih ugrađenih primjera koji su lako dostupni i vidljivi. Tvrtka edilon(sedra objavila je cjelovit Priručnik za sustav ugrađenih tračnica Corkelast® na mostovima koji sadržava smjernice za projektiranje, ugradnju i održavanje sustava ugrađenih tračnica na mostovima. Digitalno izdanje priručnika besplatno je i dostupno na poveznici <https://www.edilonsedra.com/wp-content/uploads/2017/05/Complete-Manual-Embedded-Rail-Systems-on-Bridges.pdf>

Literatura:

- [1] CEN TR 17231 Technical Report Eurocode 1: Actions on Structures – Traffic Loads on Bridges – Track-Bridge Interaction, August 2018.
- [2] EN 13146-1:2019 Željeznički sustav -- Željeznički gornji ustroj -- Metode ispitivanja za kolosiječni pričvrсни pribor -- 1. dio: Određivanje otpora uzdužnomu pomicanju tračnice (EN 13146-1:2019)

- [3] EN 13146-7:2019 Željeznički sustav -- Željeznički gornji ustroj -- Metode ispitivanja za kolosiječni pričvrсни pribor -- 7. dio: Određivanje pričvrčne sile i otpornosti prema izdizanju (EN 13146-7:2019)
- [4] HRN EN 1991-2:2012 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije -- 2. dio: Prometna opterećenja mostova (EN 1991-2:2003+AC:2010)

UDK: 625.144

Adresa autora:

Dr. Ir. Amy de Man, Ph.D.
Edilon Sedra BV,
Nijverheidsweg 23, NL-2003 RZ Haarlem
P.O. Box 1000, The Netherlands
ap.d.man@edilonsedra.com

SAŽETAK

ŽELJEZNIČKI SUSTAVI NA MOSTOVIMA: PRAKTIČNI KLJUČ INTEGRALNOGA PROJEKTIRANJA

U ovome radu prikazani su problemi koji se javljaju prilikom projektiranja, a koji su tipični za izgradnju kolosijeka na mostovima, posebno tramvajskih mostova s kolosijecima integriranim u kolnik ceste i mostova s otvorenim kolosijecima. Budući da je ugrađena tračnica nadaleko poznata po svojoj niskoj visini/dubini konstrukcije i minimalnoj masi, idealan je sustav učvršćenja tračnica za uporabu na kolnicima i mostovima. Primjena rješenja na način da se ugradnjom kanala od čelika, betona ili njihove kombinacije na konstrukciji mosta, gdje se ugrađuju tračnički sustavi, mogu poslužiti kao trajna i elastična, kontinuirana potpora tračnicama. Uzdužno ponašanje donosi određena ograničenja u duljini mosta i kod dilatacijskih spojeva. S druge strane, problema s očuvanjem tračnica i s prekidima tračnica gotovo da i nema. U revidiranome Eurokodu 1991-2, u poglavlju Djelovanja željezničkog prometa i ostala djelovanja posebna za željezničke mostove (4) dodatno je poboljšano integralno projektiranje kolosijeka s ugrađenom tračnicom. U članku prikazana je međusobna interakcija mosta i kolosijeka.

Ključne riječi: sustav ugrađenih tračnica, europski standard, Eurokod, dizajn, procjena

Kategorizacija: stručni rad

SUMMARY

RAILWAY SYSTEMS ON BRIDGES: A PRACTICAL KEY TO INTEGRATED DESIGN

This paper presents problems which arise during design, and which are typical for the construction of tracks on bridges, especially tramway bridges with tracks integrated into the road pavement and bridges with open tracks. Since a built-in rail is widely known for its low height/ depth of construction and minimal weight, a rail fastening system is ideal for use on pavements and bridges. Applying the solution of installing steel, concrete canals or their combination on the bridge structure, where rail systems are installed, can serve as a permanent and elastic, continuous support to the rails. Longitudinal behavior brings certain limitations regarding bridge length and expansion joints. On the other hand, there are almost no problems with preserving rails and rail breaks. In the revised 1991-2 Eurocode, in the chapter entitled Rail traffic actions and other actions specifically for railway bridges (4), integrated track design with a built-in rail is further improved. The article presents mutual interaction of the bridge and the track.

Key words: built-in rail system, European standard, Eurocode, design, assessment

Categorization: professional paper