

Primljen / Received: 25.11.2024.

Ispravljen / Corrected: 21.4.2025.

Prihvaćen / Accepted: 26.4.2025.

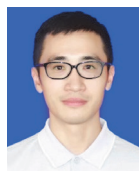
Dostupno online / Available online: 10.6.2025.

Pregled detalja zavora koji utječu na lom uslijed zamora čeličnih ortotropnih ploča u spojevima rebara i ploče

Autori:

¹Izv.prof.dr.sc. **Yue Chen**chenyue@cqjtu.edu.cn

Autor za korespondenciju

¹**Xilai Pan**, dipl.ing.građ.pxl@mails.cqjtu.edu.cn²Izv.prof.dr.sc. **Peiwen Shen**shenpw@cqjtu.edu.cn¹**Qiu he Li**, dipl.ing.građ.1738902153@qq.com¹**Yibao Zhang**, dipl.ing.građ.867702115@qq.com

¹ Sveučilište Chongqing Jiaotong, Kina
Građevinski fakultet
Državni laboratorij za mostove i tunele
² Sveučilište za obrazovanje u Chongqingu, Kina

Pregledni rad

Yue Chen, Xilai Pan, Peiwen Shen, Qiu he Li, Yibao Zhang

Pregled detalja zavora koji utječu na lom uslijed zamora čeličnih ortotropnih ploča u spojevima rebara i ploče

Čelične ortotropne ploče u mostovima (OSD) često se upotrebljavaju u čeličnim mostovima velikih raspona zbog njihove male težine, velike nosivosti i jednostavnosti gradnje. Ponašanje pri zamoru materijala zavarenih spojeva između rebara i ploče u čeličnim ortotropnim pločama naveden je kao ključni problem u projektiranju te vrste konstrukcije. Također, način otkazivanja na zavarenome priključku rebara i ploče ključni je čimbenik koji utječe na vijek trajanja uslijed zamora. Ovo istraživanje sustavno sažima neke od geometrijskih čimbenika koji utječu na lom zavarenih spojeva uslijed zamora. Predstavljene su i neke metode za procjenu zamora zavarenog spoja rebara i ploče mosta kod čeličnih ortotropnih ploča kako bi se omogućilo dublje razumijevanje i točnija procjena njihova životnog vijeka uslijed zamora. Među brojnim čimbenicima koji utječu na mehanizme loma uslijed zamora, penetracija zavora prepoznata je kao jedan od ključnih parametara koji pridonose povećanju razine čvrstoće uslijed zamora u području korijena zavora.

Ključne riječi:

mehanizmi loma uslijed zamora, priključci zavarenih spojeva između rebara i ploče, lom u području korijena zavora, metoda analize životnog vijeka pri zamoru

Subject review

Yue Chen, Xilai Pan, Peiwen Shen, Qiu he Li, Yibao Zhang

Review of the influential weld details on fatigue failure of OSD in RD joints

Orthotropic steel bridge decks (OSDs) are commonly used in long-span steel bridges because of their light weight, high load-carrying ability, and ease of construction. The fatigue performance of rib-to-deck (RD) welded joints in OSDs was reported as a key issue in the design of this type of structure. Furthermore, the failure mode at the rib-to-deck welded joint is a key factor affecting fatigue life. This study systematically summarises some of the geometric factors affecting weld-fatigue failure. Some fatigue assessment approaches for rib-to-deck welded-joint details in OSDs are briefly introduced for a deeper understanding and accurate evaluation of their fatigue performance. Several factors have been introduced for fatigue failure modes, among which welding penetration is well-documented to enhance the fatigue strength at the weld root.

Key words:

fatigue failure modes, rib-to-deck joints weld details, weld root failure, fatigue life analysis method

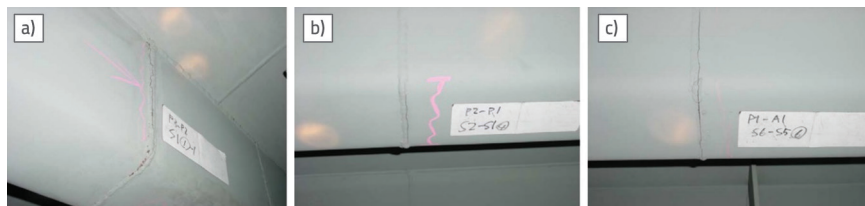
1. Uvod

Čelične ortotropne ploče (engl. *Orthotropic steel decks* - OSD) imaju niz prednosti zahvaljujući svojim izvrsnim konstrukcijskim značajkama, uključujući visoku nosivost, malu masu, mogućnost modularne izvedbe i minimalno ometanje prometa tijekom ugradnje. Osim toga laboratorijska ispitivanja i učinkovitost OSD-ova pokazuju da, ako su stručno projektirani i izgrađeni, OSD-ovi mogu omogućiti uporabni vijek do stotinu godina uz minimalne zahtjeve za održavanjem [1]. Ortotropne ploče u mostovima ponajprije se sastoje od ploče konstrukcije, rebara i poprečnih ukrčenja. Povremeno se, radi povećanja ukupne krutosti mosta, ugrađuju dodatni konstrukcijski elementi poput poprečnih nosača [2–5].

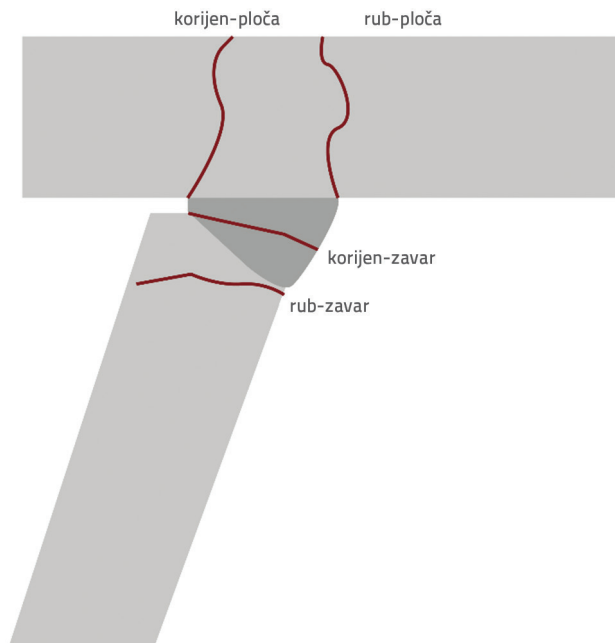
Milić i sur. [6, 7] dokumentirali su brojne slučajeve oštećenja mostova i naveli da problemi sa zamorom kod čeličnih mostova postaju sve izraženiji s povećanjem opterećenja izazvanog vozilima. Tijekom svakodnevne upotrebe paneli čeličnih ortotropnih ploča izloženi su ponavljajućemu djelovanju nasumičnih uporabnih opterećenja, pri čemu se prve pukotine uzrokovane zamorom najčešće pojavljuju u području pogrešaka u zavarima. Budući da su pukotine od zamora skrivene ispod ploče mosta, to su njihovo pravodobno otkrivanje i popravak izazov.

Most Kinuura, koji povezuje gradove Takahamu i Handu u Japanu, pušten je u promet 1978. Međutim, tijekom pregleda 2003. uočene su višestruke pukotine uzrokovane zamorom duž smjera U-rebra (slika 1.) [8–10]. Ti primjeri pokazuju da se nastanak pukotina uslijed zamora dogodio u korijenu zavara. Raspucavanje se zatim širi kroz ploču u sredini raspona rebra između dviju poprečnih greda. Takva oštećenja česta su kod čeličnih ortotropnih ploča. Te se pukotine šire iz unutrašnjosti rebra prema vanjskoj strani pa postaju dugačke nakon širenja kroz cijelu visinu ploče mosta. Zbog širenja pukotina uzrokovanih zamorom teško su uočljive vizualnim pregledom, osim ako nastalo oštećenje asfaltne površine ne postane vidljivo.

U usporedbi s glavnim nosivim elementima konstrukcije, ortotropne ploče imaju izraženije probleme sa zamorom zbog lokaliziranih učinaka koje uzrokuju opterećenja izazvana vozilima. Takva opterećenja uzrokuju znatne promjene lokalnih naprezanja, promjenu smjera naprezanja i povećan broj ciklusa naprezanja, zbog čega je zamor neophodno uzeti u obzir već u fazi projektiranja. Pukotine od zamora često se pojavljuju u području zavarenih priključaka između rebara i ploče, počevši od ruba zavara i korijena zavara, te se šire duž ploče mosta, rebra ili debljine zavara [3–5] (slika 2.).



Slika 1. Pukotine uslijed zamora u sučeonim zavarima uzdužnih rebara (pukotine su označene ružičastim linijama) [10]



Slika 2. Tipični mehanizmi loma uslijed zamora u zavarenim priključcima rebra i ploče

Glavni uzrok pojave pukotina uslijed zamora jest niska krutost ploče mosta, koja nije dostatna za prijenos opterećenja izazvanih prometom teških vozila. Štoviše, porast opsega prometovanja teških vozila čini taj problem zamora još izraženijim. Trenutačno većina tehničkih propisa za čelične mostove koristi nominalne sile ili lokalne pristupe za rješavanje problema zamornog loma, što se može vidjeti u standardima kao što su kineski propisi za projektiranje čeličnih mostova s autocestama i AASHTO LRFD specifikacije za projektiranje mostova. Trenutačno važeća AASHTO metoda temeljena na S-N krivuljama primjenjuje jednu standardnu S-N liniju za procjenu životnog vijeka pri zamoru. Međutim, taj pristup ima ograničenja u rješavanju problema zamora na mjestu zavarenih spojeva kao što je nepotpuno razmatranje veličine i učinaka zareza. Zamor zavarenih spojeva često je posljedica geometrijskih čimbenika i početnih nedostataka. Osim toga, kada je omjer početne dubine pukotine i duljine stranica isti, nešto je vjerojatnije da će doći do loma u području korijena zavara nego pri rubu [7, 16]. Uz to, zbog utjecaja tehnologije zavarivanja i okolišnih čimbenika, vjerojatnost loma uslijed zamora u području korijena zavara ne može se zanemariti. Međutim, u usporedbi s rubom zavara, istraživanja korijena zavara povijesno su bila znatno manje zastupljena.

Dosadašnja istraživanja pokazala su da se čvrstoća uslijed zamora različitih dijelova zavarenog spoja između kolničke ploče i uzdužnog rebra može znatno razlikovati. Ovo je istraživanje usredotočeno na lokalnu geometriju detalja zavara i na utjecaj naknadne obrade zavara na različite mehanizme loma. Također, dan je pregled

trenutačnih metoda za analizu životnog vijeka pri zamoru za različite dijelove. Na kraju predložene su mjere za poboljšanje otpornosti zavarenih priključaka na zamor [12, 13].

2. Glavni čimbenici koji utječu na zamor u zavarenim detaljima

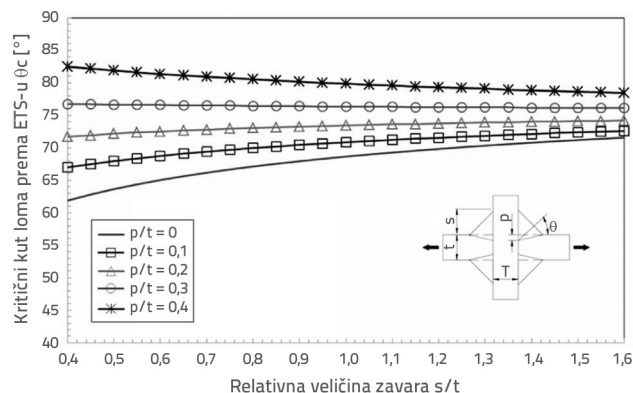
2.1. Prodiranje u zavar

Prodiranje u zavar ključni je čimbenik pri procjeni pukotina u području korijena zavora; viši stupanj prodiranja može smanjiti vjerojatnost loma u korijenu zavora te poboljšati otpornost na zamor [14]. Yanbo i sur. [15] proveli su eksperimente zavarivanja 80-postotnim i potpunim prodiranjem u zavarene priključke rebara i ploče. Rezultati eksperimenta pokazali su da je razina naprežanja u blizini korijena zavora kod zavora s 80-postotnim prodiranjem bila znatno veća nego kod ruba zavora te da je naprežanje u dijelu korijena zavora bilo slično onome kod ruba zavora u slučaju potpunog prodiranja. To je smanjilo mogućnost oštećivanja glavne nosive konstrukcije mosta. Wei i sur. [16] eksperimentalno su dokazali da, iako stupanj prodiranja ima različite učinke na životni vijek zavora pri zamoru ovisno o mehanizmu loma, općenito viši stupanj prodiranja poboljšava otpornost zavora na zamor te smanjuje razine naprežanja u području korijena i ruba zavora.

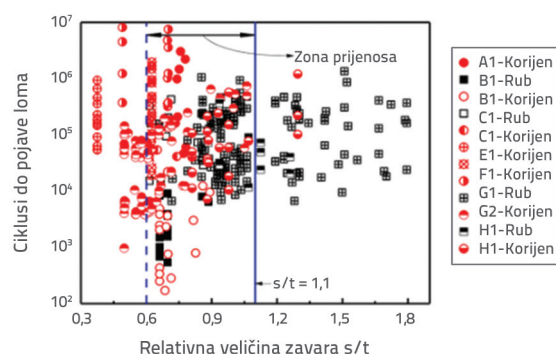
2.2. Veličina zavora

Budući da su geometrijske značajke zavarenih spojeva između rebara i ploče čeličnih mostova slične onima kod T-spojeva, to je pretpostavljeno da su u tome kontekstu geometrijske značajke tih spojeva jednake. Mehanizmi loma kod kutnih zavora uvelike ovise o samoj geometriji zavora, a najčešći oblici otkazivanja uključuju lomove u području korijena zavora i ruba uz ploču [17, 18]. Fricke i sur. [19] predložili su da lom u području korijena i ruba zavora ovisi o međusobnom odnosu debljine zavora, debljine ploče i duljine kraka zavora, što se može izraziti omjerom duljine zavarenog kraka i debljine ploče (s/t) odnosno omjerom debljine zavora i debljine ploče (h/t). Slično tomu, kod obostrano zavarenih spojeva, mehanizam loma i otpornost na zamor ovise o dubini zavora, duljini kraka zavora i debljini ploče. Također, s povećanjem duljine kraka zavora povećava se otpornost na zamor. Kada su duljine dvaju zavarenih krakova jednake, primijenjena je metoda kontrolne varijable, uzimajući u obzir utjecaj stupnja prodiranja na promjenu mehanizma loma uslijed zamora. Kada je omjer dubine prodiranja i debljine ploče (p/t) iznosio 0,2, tada je kritična veličina (s/t) bila 0,85. Kada je (p/t) bio 0, tada je kritična veličina (s/t) bila 1,16. Kada je omjer duljine kraka i debljine ploče veći od kritične veličine, tada se oštećenje obično javlja u području ruba zavora. Međutim, kada je taj omjer manji od kritične veličine, tada početna pukotina obično nastaje u području korijena zavora, a kako je to navedeno u Xing i sur. [20, 21]. Istodobno se lom u području korijena zavora najčešće širi duž putanje jezgre zavora pod kutom od približno 70°. Povećanjem stupnja prodiranja kut

oštećenja u području debljine zavora postupno se povećavao do 90° (slika 3.). Wei i sur. [22] predložili su graničnu funkciju loma u ovisnosti o omjeru s/t , temeljenu na eksperimentalnim rezultatima i naprežanjima u konstrukcijskim elementima (slika 4.).



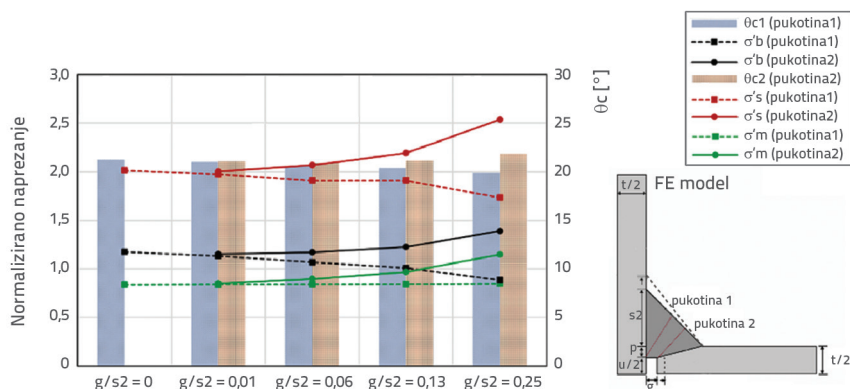
Slika 3. Odnos između stupnja prodiranja u zavar i kuta loma na temelju učinkovitog predviđanja strukturnih naprežanja [21]



Slika 4. Relativna veličina kraka zavora s/t u odnosu na mehanizme loma uslijed zamora [22]

2.3. Razmak u području korijena zavora

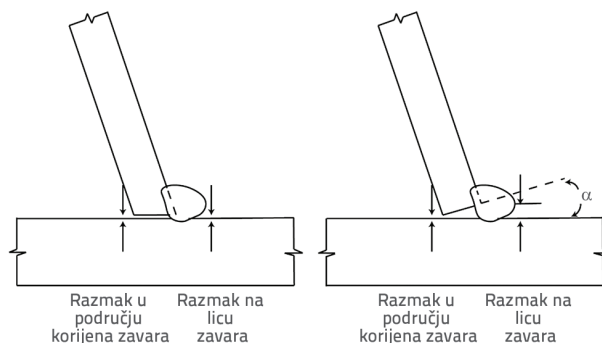
Junlin Heng i sur. [23] otkrili su da su se u njihovim uzorcima pojavila tri načina loma (lom u području korijena zavora uz ploču, lom u području ruba uz ploču i lom u području samoga korijena zavora), pri čemu su prva dva bili glavni načini loma, a vjerojatnost pojave loma u području ruba uz ploču bila je veća. Osim toga povremeno se mogu pojaviti i složeni, kombinirani mehanizmi loma. Autori su istaknuli da se oštećenja u području spoja korijena zavora i kolničke ploče mogu učinkovito izbjeći ako je stupanj prodiranja u zavar veći od 80 %, a razmak u području korijena manji od 0,5 mm. Nadalje, Wei i sur. [22] dodatno su metodom konačnih elemenata (MKE) utvrdili da se naprežanje u području korijena zavora (prema modelu strukture privlačnih sila) povećava za 27 % kada se razmak u području korijena poveća s 0 na 2 mm. Drugim riječima, veći razmak u korijenu povećava vjerojatnost oštećenja upravo iz područja korijena zavora, a istodobno dolazi i do promjene putanje širenja loma kroz jezgu zavora, ovisno o veličini razmaka (slika 5.).

Slika 5. Normalizirana vlačna naprezanja i relativna veličina razmaka (g/s^2) [22]

2.4. Polumjer zavora u području ruba i postavke pripreme žlijeba

Polumjer, debljina i priprema ruba zavora utječu na stupanj koncentracije naprezanja i životni vijek zavora uslijed zamora. Međutim, oni općenito ne doprinose promjenama u mehanizmima loma. Ebrahim i sur. [24–27] istaknuli su da prirodno formirani, neobrađeni polumjer ruba ne doseže jasan oblik konture luka, dok naknadno obrađeni polumjer ruba doseže fiksni oblik luka. Usporedbom stupnjeva koncentracije naprezanja pri rubu zavora prije brušenja i nakon njega utvrđeno je da veći polumjer ruba zavora nakon brušenja može učinkovito ublažiti koncentraciju naprezanja na rubu zavora, čime se povećava izdržljivost od zamora. Na temelju spomenutih saznanja van Es i sur. [28] predložili su metodu određivanja polumjera ruba na temelju kruga postavljenog na dno svakog zavora, a zatim su odabrali točku najbližu središtu toga kruga kako bi ravnomjerno izmjerili polumjer ruba. Autori su također utvrdili da su nakon pravilne obrade nakon zavarivanja koncentracije naprezanja u područjima s većim polumjerom ruba ublažene, a ona s manjim polumjerom ruba prva su pukla. Kod čelične ortotropne ploče mosta polumjer ruba može se mijenjati kroz dva mehanizma loma: rub ploče i rub rebra. Xiu i sur. [29] proveli su eksperimente na T-spojevima s pripremom rubova i bez nje te zaključili da zavori s pripremom rubova mogu smanjiti utjecaj dinamičkih vibracija opterećenja, produljiti životni vijek uslijed zamora u korijenu zavora i smanjiti mogućnost oštećenja od zamora u korijenu zavora. Yang i sur. [30–32] proveli su ispitivanje na U-rebrima s kutom α za označavanje kuta zakošenja stranice žlijeba. Tijekom istraživanja utvrđeno je da se ekvivalentno konstrukcijsko naprezanje u području ruba i korijena smanjuje s povećanjem kuta α , kada se kut zakošenja stranice žlijeba poveća s 20° na 60° . Također, utvrđeno je da se raspon ekvivalentnih konstrukcijskih naprezanja smanjuje s 82 na 71 MPa. Povećanjem kuta α s 20° na 45° sredina ruba znatnije se poboljšala nego rub. Kada se kut α povećao s 50° na 60° , tada se položaj ruba znatnije poboljšao u odnosu na srednji položaj zavarenog ruba. Kada je kut zakošenja stranice žlijeba bio između 45° i 50° , tada je zabilježen znatan porast krutosti

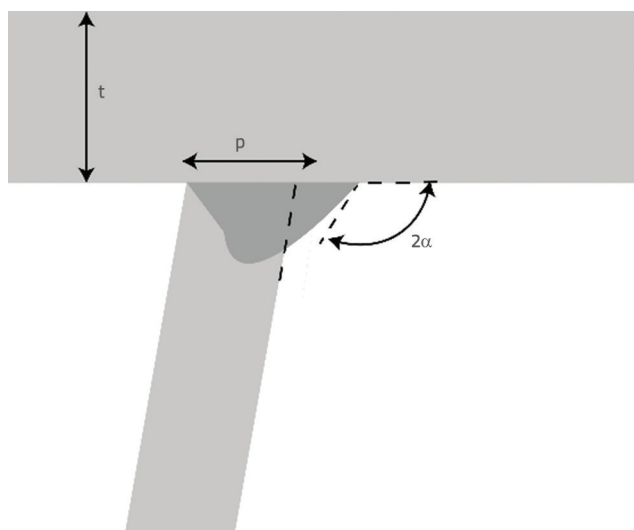
veze između rebra i ploče. Jian i sur. [33] proveli su slične eksperimente na T-spojevima i zaključili da povećanje kuta zakošenja stranice žlijeba u određenoj mjeri može poboljšati otpornost na zamor. Osim toga povećanje kuta zakošenja stranice žlijeba dovelo je do povećanja broja prolaza zavarivanja, što je zavarivanje učinilo složenijim. Zato je Xu Jian predložio da bi optimalan kut zakošenja stranice žlijeba trebao biti u rasponu od 25° do 45° (slika 6.).



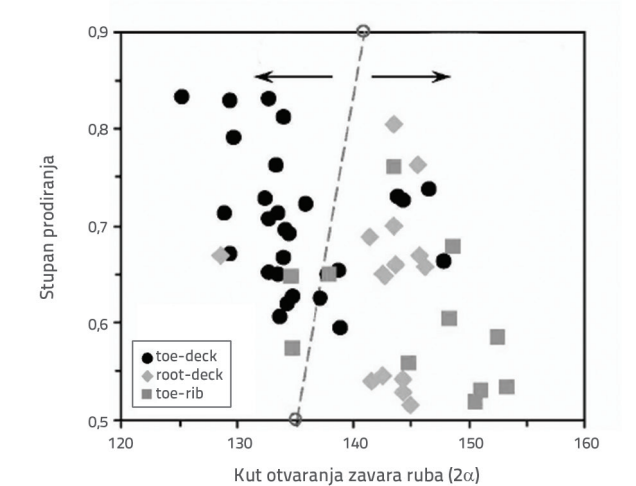
Slika 6. Prikaz pripreme žlijeba

2.5. Kut otvaranja ruba

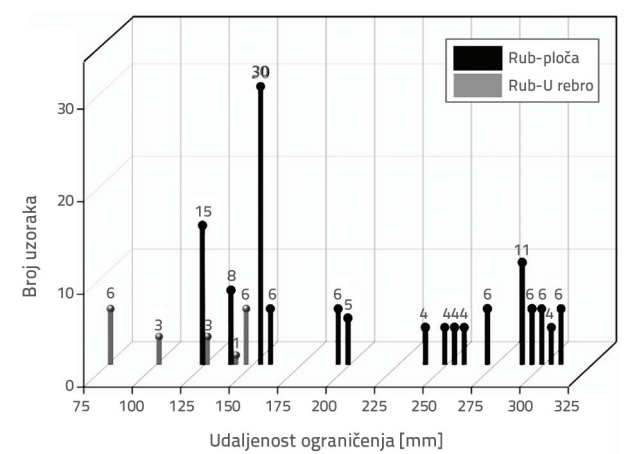
Kut otvaranja ruba 2α (slika 7.) utječe na životni vijek zavarenih priključaka uslijed zamora rebra i ploče mosta te uzrokuje promjenu načina loma uslijed zamora. Luo i sur. [34, 35] proveli su eksperimente na nekoliko skupina uzoraka s različitim stupnjevima prodiranja i kutovima otvaranja ruba te zaključili da povećanje kuta otvaranja ruba mijenja način loma od ruba do zavora u području korijena ili od ruba do rebra (slika 8.).



Slika 7. Kut otvaranja zavarenog ruba



Slika 8. Kut otvaranja zavaru u odnosu na mehanizme loma uzrokovane zamorom [33]



Slika 9. Odnos između udaljenosti ukrućenja i mehanizma loma [32]

2.6. Udaljenost ukrućenja

Udaljenost ukrućenja U-rebara odražava udaljenost između susjednih rebara, što također utječe na promjenu načina loma na spojevima između rebara i ploče. Eksperimentalnim ispitivanjima Dong i sur. [32] pokazali su da pri maloj udaljenosti ukrućenja češće dolazi do loma na spoju ruba i rebara. Ujedno, pri većim udaljenostima često dolazi do loma ruba i ploče (slika 9.).

2.7. Ostalo

Osim glavnih čimbenika koji utječu na način loma Gadallah i sur. [36] uzeli su u obzir zaostale napone te predložili mjere za poboljšanje. Utvrđeno je i da fiksni omjer odstupanja i učinak debljine također utječu na promjenu načina loma uslijed zamora i na životni vijek uslijed zamora. Zhou i sur. [17] eksperimentalno su razmotrili tri osnovna parametra u svojem modelu načina loma uslijed zamora, i to fiksni omjer nepravilnosti m , duljinu prodiranja p/t i duljinu zavaru h/t . Autori su pokazali da ta tri parametra znatno utječu na promjenu načina loma kod poprečnih zavaru, pri čemu je fiksni omjer odstupanja uzrokovan neravnomjernom silom zavaru uzrokovanom pomacima. Istodobno Yang [30-32] je istaknuo da učinak debljine može poboljšati otpornost na zamor U-rebara, pri čemu povećanje debljine U-rebara ili ploče smanjuje ekvivalentno naprezanje. Međutim, učinak povećanja debljine ploče bio je izraženiji, osobito u području korijena zavaru. Također, Liu i sur. [37, 38] eksperimentalno su utvrdili da povećanje debljine ploče ima veći utjecaj na poboljšanje čvrstoće na zamor u usporedbi s povećanjem debljine U-rebara. Osim toga utvrđeno je da oblik U-rebara kod ortotropnih čeličnih ploča mostova ima zanemariv utjecaj na promjenu načina loma u spoju rebara i ploče. Yang i sur. [30-32] također su eksperimentalno dokazali da oblik U-rebara ne utječe na načine loma uslijed zamora ortotropnih čeličnih ploča u mostovima. Čimbenici koji utječu na svojstva zamora zavaru navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Čimbenici koji utječu na svojstva zamora zavarenih detalja

Vrsta čimbenika	Čimbenik	Zahvaćeno područje	Rezultat utjecaja
Pod utjecajem zavaru spojeva između rebara i ploče	Stupanj prodiranja	Korijen zavaru	Što je niži stupanj prodiranja, to se lakše oštećuje korijen zavaru.
	Veličina zavaru	Nožica zavaru, korijen zavaru	Što je veći omjer s/t , to se lakše oštećuje rub zavaru.
	Razmak od korijena	Korijen zavaru	Što je veći korijenski razmak, to se korijen lakše oštećuje.
	Polumjer ruba zavaru	Rub zavaru	Što je manji polumjer zavaru, to se rub lakše oštećuje.
	Priprema ruba	Korijen zavaru	Korijen zavaru lako se oštećuje kada nema postavke za pripremu ruba.
	Kut otvaranja ruba	Rub zavaru, korijen zavaru	Kut otvaranja ruba velik je i lako može doći do oštećivanja ruba i ploče ili zavaru u području korijena.
Pod utjecajem same ortotropne ploče u mostu	Udaljenost ukrućenja	Rub zavaru	Oštećenje ploče može se lako dogoditi kada je udaljenost ukrućenja velika.

3. Metode analize lokalnih područja

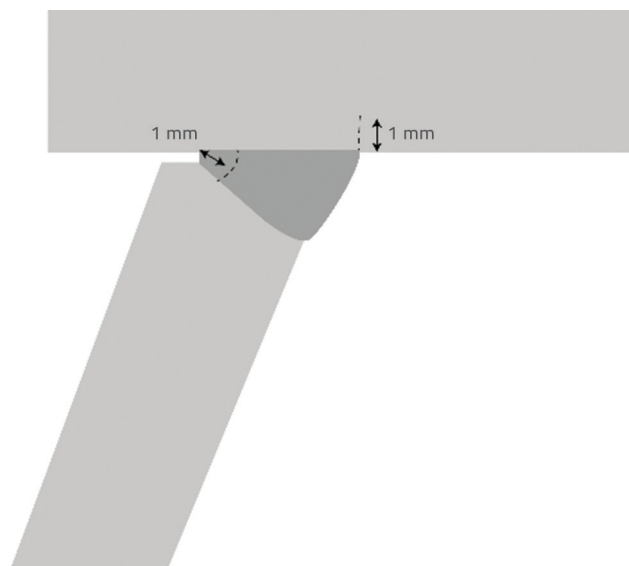
3.1. Ekvivalentno naprezanje konstrukcije

Otkad je koncept lokalnih proračunskih pristupa prvi put predstavljen šezdesetih godina prošlog stoljeća razvijene su brojne metode izbjegavanja nelinearnih lokalnih naprezanja u području zavora. Time su postavljeni temelji za razvoj triju glavnih tehnika. Naprezanje od 1 mm analizira stanje naprezanja na udaljenosti od 1 mm od lokalnog zarez u smjeru očekivanog rasta pukotine, što čini početnu fazu rasta pukotine, te je ključno za glavni dio izdržljivosti od zamora. Metoda naprezanja u vrućoj točki (engl. *Hot spot method*) temelji se na ekstrapolaciji površinskog naprezanja na zavaru prema točki koncentracije naprezanja (*hot spot*) i najčešće se primjenjuje pri analizi ruba zavora. Naposljetku, linearizacija strukturnog naprezanja zanemaruje lokalno vršno naprezanje u određenome smjeru i linearizira naprezanje u smjeru debljine. Iz tih temelja razvijen je zakon ekvivalentnoga konstrukcijskog naprezanja koji nelinearne sile promatra kao samouravnotežujuće te primjenjuje metode poput čvornih sila za određivanje strukturnog naprezanja [29], čime se postiže učinak razmatranja fenomena koncentracije naprezanja i lokalne geometrije, što čini prednost u odnosu na globalne metode poput pristupa nazivnog naprezanja pri analizi lokalnog zamora. Zato se ta metoda često primjenjuje za analizu zamora ruba zavora, korijena zavora i drugih lokacija. Međutim, budući da taj pristup zanemaruje dio naprezanja, trenutno se primjenjuje samo na analizu čelika i debljih materijala [13, 18, 38-51]. Xiao Wu i sur. [52, 53] predložili su metodu koja kombinira težinsku funkciju i faktor čvrstoće, temeljenu na ekvivalentnome konstrukcijskom naprezanju.

3.1.1. Određivanje naprezanja na udaljenosti od 1 mm

Ta metoda predlaže da se nelinearno naprezanje postupno povećava u korijenu ili podnožju zavora, a zatim postupno smanjuje na zanemarivu razinu na položaju od 1 mm. To je zato što je u podjeli mreže konačnih elemenata veličina mreže približno 1 mm, no ne postoji jasna definicija oblikovanja naprezanja na tome mjestu.

Za analizu zavarenih rubova treba uzeti u obzir naprezanje generirano paralelno sa smjerom unosa opterećenja. Za analizu loma zavora u području korijena ta metoda ne pretpostavlja 70° kao kanal loma debljine zavora, već procjenjuje duž četvrtine kruga s polumjerom $r = 1$ mm u radianima, pri čemu je smjer najvećeg naprezanja smjer pretpostavljenoga kanala debljine zavora. Unatoč razvoju učinkovite metode zarezanog naprezanja i predloženoga ekvivalentnog pristupa konstrukcijskome naprezanju ta se metoda rijetko primjenjivala (slika 10.).



Slika 10. Dijagram pristupa naprezanja na udaljenosti od 1 mm

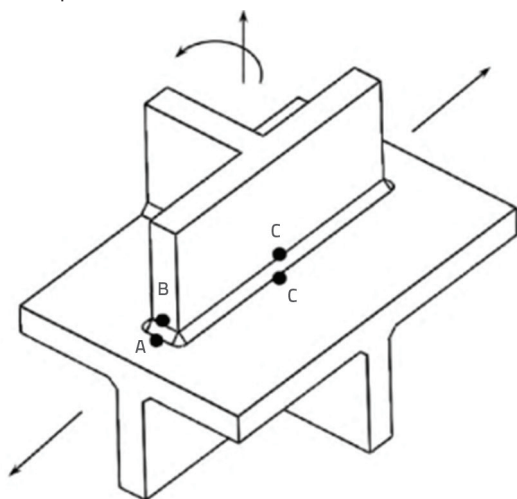
3.1.2. Metoda naprezanja u vrućoj točki (engl. *Hot spot method*)

Naprezanja u vrućoj točki odnose se na najveće lokalno naprezanje generirano na rubu zavora, uzimajući u obzir samo učinak makroskopske geometrijske koncentracije naprezanja. Metoda naprezanja u vrućoj točki odnosi se na ekstrapolaciju površine duž smjera prvoga glavnog naprezanja na površini i općenito uzima u obzir 0,4 – 1 put debljinu u tome smjeru. Uobičajene metode ekstrapolacije za naprezanje pri naprezanju u vrućoj točki obično su linearna ekstrapolacija u dvije ili tri točke [13], gdje se dvije i tri točke odnose na vrste vrućih točaka na rubovima zavora. Klasa A nalazila se u korijenu vertikalne ploče i površini matične ploče, klasa B na rubu površine vertikalne ploče, a klasa C na površini vertikalne ili matične ploče (slika 11.). Trenutno se naprezanje u vrućoj točki ne može izravno izračunati formulama za mehanike materijala, nego se naprezanja obično dobivaju neizravno metodom konačnih elemenata ili *patch* metodom. Zatim je naprezanje potrebne ekstrapolirane površine dobiveno interpolacijom na sljedeći način:

$$\sigma_{hs} = \frac{x_2 \sigma_{x1} - x_1 \sigma_{x2}}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

pri čemu su x_1 i x_2 udaljenosti od točaka ekstrapolacije 1 i 2 do vruće točke naprezanja, a σ_1 i σ_2 vrijednosti naprezanja ekstrapolacijskih točaka 1 i 2. Pri primjeni te metode posebnu pozornost treba posvetiti izboru točaka ekstrapolacije. Trebaju biti ispunjena sljedeća dva uvjeta: točke ekstrapolacije ne bi smjele biti smještene u području na koje utječe učinak ureza i ruba te bi udaljenost između točke ekstrapolacije i ruba zavora trebala biti dovoljno mala da pokaže karakteristike koncentracije

naprezanja. Nakon što se dobije naprezanje u vrućoj točki, koeficijent koncentracije naprezanja na toj točki dobiva se iz omjera tog naprezanja i nazivnog naprezanja. Naprezanje u vrućoj točki može se mjeriti metodom konačnih elemenata i metodom mjerenja mjernim trakama. U većini zavarenih spojeva korijen zavora nalazi se unutar zavora i ne može se odrediti površinskom ekstrapolacijom. Zato stručnjaci općenito smatraju da se metodom naprezanja u vrućoj točki može provesti analiza zamora samo na rubovima zavora odnosno predviđanje životnog vijeka pri zamoru dvaju oblika loma: ruba rebra i ruba ploče [54, 55].



Slika 11. Shematski prikaz tipova naprezanja vruće točke pri rubu zavora

3.1.3. Linearizacija strukturnih naprezanja

Ta se metoda primjenjuje na položaje zavora koji su izloženi opterećenjima uslijed savijanja. Ekscentrična opterećenja uzrokovana savijanjem uzrokovala su pucanje zavora duž krakova zavora. Kut prolaza zavora bio je bliži 90° [40]. Ideja linearizacije strukturnih naprezanja slična je metodi površinske ekstrapolacije strukturnih naprezanja, a obje se bave lokalnim nelinearnim strukturnim naprezanjima primjenjujući idealna matematička sredstva, a kao što je to prikazano u izrazima od (2) do (4):

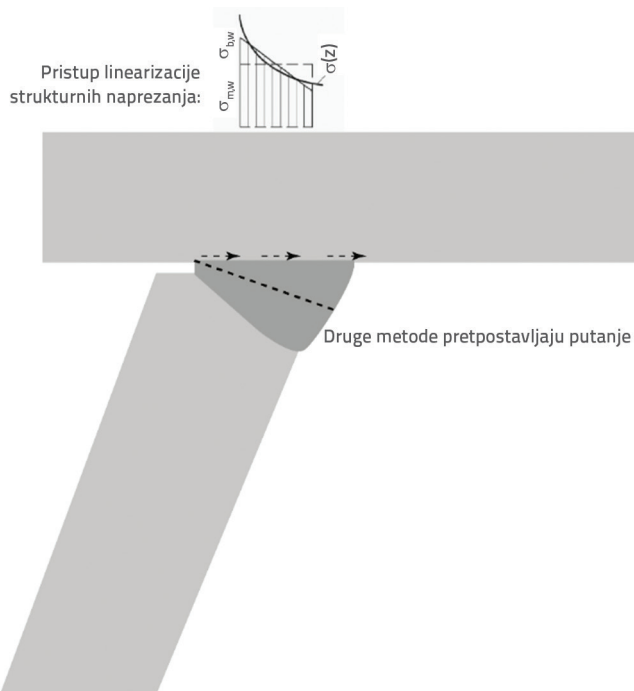
$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b \quad (2)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{I} \int_0^I \sigma_x(y) dy \quad (3)$$

$$\sigma_b = \frac{1}{I^2} \int_0^I \sigma_x \left(\frac{1}{2} - y \right) dy \quad (4)$$

Naprezanje uslijed zavarivanja konstrukcija σ_s može se definirati kao zbroj membranskog naprezanja σ_m i naprezanja uslijed savijanja σ_b , što se može izvesti linearizacijom $\sigma_{x(y)}$ naprezanja okomito na duljinu zavarenoga kraka (slika 12.).

Nakon eksperimenata Fricke i sur. [19] zaključili su da se pukotine općenito protežu duž ravnine korijena. Kut oštećenja debljine zavora općenito je između 70 i 90° i zato se metoda linearizacije strukturnog naprezanja, koja linearno rješava problem duž smjera kraka zavora, razlikuje od drugih metoda koje pretpostavljaju kut debljine zavora. Zbog utjecaja razmaka od korijena i brzine prodiranja mijenja se kut prolaza debljine zavora. Općenito, ta se metoda može primijeniti samo na konstrukcije s malim posmičnim naprezanjima i upotrebljava se na mjestima gdje je posmično naprezanje manje od 20 % nominalnog naprezanja. U protivnome put loma znatno odstupa od predviđenog puta. Zato linearizirani algoritmi imaju znatna ograničenja. Osim toga, slično kao i kod površinske ekstrapolacije, linearizacijom se utjecaj veličine ne može na odgovarajući način odraziti na debljinu ploče te se za sljedeći ispravak mogu upotrijebiti samo parametri veličine [39, 40].



Slika 12. Linearizacija strukturnih naprezanja

3.1.4. Ekvivalentno naprezanje konstrukcije

Dong i sur. [40] predložili su metodu ekvivalentnog naprezanja konstrukcije, kojom su razvili nov koncept naprezanja konstrukcije dijeljenjem ukupnog naprezanja kroz debljinu presjeka u području ruba zavora, izazvan vanjskim silama, na dva dijela: strukturno naprezanje i nelinearno samouravnotežujuće naprezanje. Naprezanje konstrukcije jest naprezanje u ravnoteži s vanjskim silama i sastoji se od membranskog naprezanja σ_m i naprezanja uslijed savijanja σ_b , dok je nelinearna sila samouravnoteženosti uzrokovana geometrijskim urezom, koji je uvijek u stanju samouravnoteženosti. Budući da naprezanje konstrukcije mora biti uravnoteženo vanjskom silom, to se dobiva sljedeći izraz:

$$\sigma_c = \sigma_m + \sigma_b = f_v/t + 6 m_x/t^2 \quad (5)$$

gdje je linijska sila f_v sila po jedinici duljine zavarene žice, m_x moment po jedinici duljine zavarene žice i t debljina ploče. Udaljenost između susjednih čvorova postavljena je na l , a čvorna sila elementa pretvorena je u linijsku silu i linijski moment zavaru na rubu zavaru prema izrazima (6) i (7). Linijska sila i linijski moment zatim su pretvoreni u strukturna naprezanja pomoću izraza (8).

$$\{f_{y1}, f_{y2}, \dots, f_{yn}\}^T = L^{-1}\{F_{y1}, F_{y2}, \dots, F_{yn}\}^T \quad (6)$$

$$\{m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}\}^T = L^{-1}\{M_{x1}, M_{x2}, \dots, M_{xn}\}^T \quad (7)$$

$$\sigma_s = L^{-1}\{F_{yn} + 6M_{xn}/t\}/t \quad (8)$$

Za primjenu jedinstvene S-N krivulje za zavareni element pod različitim vrstama opterećenja Dong i sur. izveli su parametar ekvivalentnoga konstrukcijskog naprezanja ΔS , temeljen na teorijama predviđanja pukotina i mehanici loma. Način izračuna prikazan je izrazom:

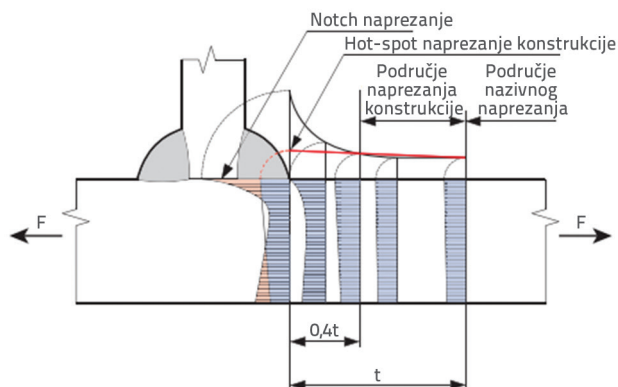
$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m}} \quad (9)$$

gdje je $\Delta \sigma_s$ raspon strukturnog naprezanja, m indeks rasta pukotine, t debljina ploče i $I(r)$ funkcija bez dimenzija. Omjer savijanja r može se izraziti na sljedeći način:

$$r = \Delta \sigma_b / \sigma_s \quad (10)$$

Zato ekvivalentni pristup konstrukcijskome naprezanju uključuje utjecaj čimbenika kao što su učinak koncentracije naprezanja, učinak debljine, geometrijski oblik i oblik opterećenja. Pretraživanjem glavne S-N krivulje, izražene kao $\Delta S_s = CNh$, može se jednostavno provesti analiza zamora u tome dijelu [40-42, 57-61].

Sve u svemu, kada se uzme u obzir više utjecajnih faktora, točnost pristupa ekvivalentnog naprezanja konstrukcije znatno je veća od one kod tradicionalnih metoda analize. Osim toga, zbog svoje neosjetljivosti na mrežu konačnih elemenata, osobito u 2D modelima, metoda je pogodna za računalnu obradu. Primjenom jedinstvene glavne S-N krivulje izbjegava se uspoređivanje različitih S-N krivulja, dok se istodobno osigurava relativno točan teorijski izraz. Cijeli se izraz temelji na zakonima materijala i mehanici loma. Dodatno, primjenom Parisova zakona, koji uzima u obzir plastično stanje ruba pukotine, potvrđuje se da izraz ima jasno fizičko značenje. Međutim, pristup ekvivalentnog naprezanja konstrukcije općenito zanemaruje neka lokalna naprezanja u blizini zavaru i nije idealan za procjenu detalja malih neglatkih rubova, odnosno lokalne geometrije (slika 13.). Zato su mnogi istraživači uveli druge metode temeljene na ekvivalentnome konstrukcijskom naprezanju kako bi se riješio taj problem [53].



Slika 13. Opis lokalnih naprezanja u blizini rubova zavaru primjenom različitih analitičkih metoda

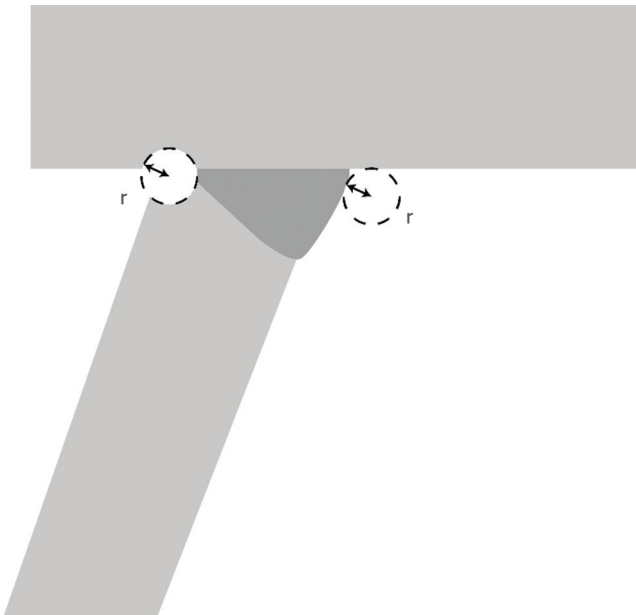
3.2. Metoda efektivnog zarezanog naprezanja

Metoda zarezanog naprezanja (engl. *Effective notch-stress method*) prvi je put predložena devedesetih godina 20. stoljeća. Ona uzima u obzir učinak zarezu u zavaru, odnosno koncentraciju naprezanja uzrokovanu promjenama u geometriji strukture, strukturnim diskontinuitetima i zavarivanjem. Najveće zarezno naprezanje na spoju zatim je uzeto kao parametar za procjenu zamora. Zato je metoda zarezanog naprezanja točno uključivala vršno naprezanje uzrokovano učinkom zarezu. Teorijski, kada se čvrstoća na zamor odražava metodom zarezu i naprezanja, ona ovisi samo o razlici u oblicima zarezu na rubu zavaru i korijenu zavaru. Pod uvjetom da proces zavarivanja nema nedostataka i da je vrlo stabilan, relativno opća S-N krivulja prikladna za različite spojeve može se dobiti na korijenu ili podnožju zavaru pod stvarnim naprezanjem. Nije potrebno više puta birati S-N krivulju prema stanju spoja kao kod metode nominalnog naprezanja. Nakon izračuna zarezanog naprezanja koeficijent koncentracije zarezanog naprezanja te vrste zavarenog spoja izračunan je na temelju njegova omjera s nominalnim naprezanjem. Zarezno naprezanje iste vrste zavarenog spoja može se izračunati izravno pomoću koeficijenta i nominalnog naprezanja [62-65]. Međutim, zbog nepravilnih oblika korijena i podnožja zavaru za izračun se općenito postavlja virtualni radijus. Definira se kao:

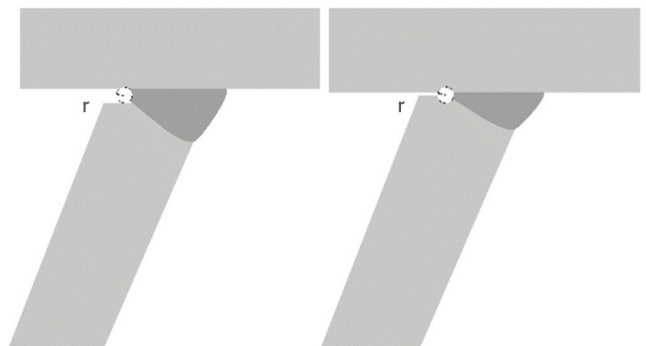
$$\rho_{ref} = \rho + S\rho^* \quad (11)$$

U najnepovoljnijemu stanju uobičajeno je postaviti virtualni polumjer na 1 mm (slika 14.). Međutim, kada je debljina bila manja od 5 mm, postavljanje radijusa na taj način nije bilo u skladu s naprezanjem u stvarnome zavaru, što je utjecalo na rezultate predviđanja zamora. U tome slučaju potrebno je primijeniti metodu zarezanog naprezanja malih dimenzija za tankopločaste materijale, postaviti virtualni polumjer na 0,05 mm, a zatim predvidjeti zamor. Ako je indeks nagiba predviđene S-N krivulje zamora, m iznosi 3, tada virtualni polumjer treba vratiti na 0,1 mm. Osim toga metoda malog zarezanog

naprezanja obično se primjenjuje za predviđanje debljine zavora, a zarezno naprezanje u korijenu zavora kombinira se sa širinom šava korijena zavora.



Slika 14. Zaokruživanje zareza korijena zavora zavarenog spoja rebara i ploče



Slika 15. Zarez u obliku slova U i zarez u obliku ključanice

Brzina prodiranja određuje vrstu modela konačnih elemenata korijena zavora (slika 15.). U usporedbi s ekvivalentnim naprežanjem konstrukcije, najveća prednost metode zareznog naprežanja jest ta što uzima u obzir lokalnu geometrijsku veličinu i lokalnu raspodjelu naprežanja. Zbog toga je metoda efektivnoga zareznog naprežanja osjetljiva na podjelu mreže, a pri razmatranju sudjelujućih naprežanja potrebno je odabrati različite S-N krivulje u različitim stanjima. Osim toga te dvije metode usvojile su različite metode za rješavanje problema. Metoda zareznog naprežanja temelji se na teoriji elastičnosti, pri čemu se na rubu zarezna postavlja kružnica s virtualnim polumjerom. Naprežanje u blizini zarezna određeno je tim polumjerom, koji se definira prema veličini, koncentraciji naprežanja i drugim parametrima (poznatima i kao učinak

Tablica 2. Lokalni pristupi za analizu zamora zavarenih spojeva

Uobičajeni lokalni pristupi		Prednost	Nedostatak
Metoda ekvivalentnoga naprežanja konstrukcije	Metoda naprežanja na udaljenosti od 1 mm		- Udaljenost od 1 mm odgovara najmanjoj jedinici veličine mreže konačnih elemenata i nema jasno fizičko značenje. - Potrebno je uzeti u obzir više S-N krivulja.
	Metoda naprežanja u vrućoj točki	- Lokalno naprežanje smatra se povoljnijim za detalje zavora.	- Može se upotrijebiti samo za analiziranje izdržljivosti u području nožice. - Potrebno je uzeti u obzir više S-N krivulja.
	Metoda linearizacije strukturnih naprežanja	- Primjenjuje se na položaje zavarivanja izložene opterećenjima savijanja	- Osjetljiva je na posmična naprežanja. - Potrebno je uzeti u obzir više S-N krivulja.
	Metoda ekvivalentnoga naprežanja konstrukcije	- Nije osjetljiva na mrežu. - Ima glavnu S-N krivulju. - Ima jasno fizičko značenje, u kombinaciji s elastoplastičnom mehanikom. Mehanika loma uzima u obzir razvoj pukotina	- Lokalno naprežanje slabo uzeto u obzir. - Učinak analize slab za male i tanke ploče.
Metoda efektivnog zareznog naprežanja		- Uzima u obzir lokalne geometrijske značajke i lokalni utjecaj naprežanja. - Učinak analize dobar je za komponente malih dimenzija i tankih ploča. - Dobra je simulacija korijenskog razmaka.	- Osjetljivo na mrežu. - Potrebno je odabrati S-N krivulju. - Više se usredotočuje na teoriju elastičnosti.

zarezima). Dong i sur. [66] riješili su taj nedostatak primjenom metode kritične udaljenosti temeljene na metodi efektivnoga zarezanog naprezanja. S druge strane, metoda ekvivalentnog naprezanja konstrukcije u većoj mjeri uzima u obzir razvoj pukotine te u rubu analize primjenjuje Parisov zakon kako bi obuhvatio i plastično naprezanje u području ruba pukotine.

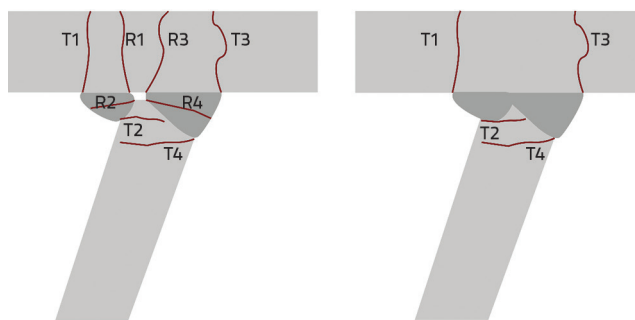
Metoda naprezanja u vrućoj točki često se primjenjuje za procjenu životnog vijeka zavarenih rubova uslijed zamora. Na primjer, upotrebljava se za određivanje načina loma zavarenih ploča i rebara ruba. Metoda zarezanog naprezanja široko se primjenjuje za procjene životnog vijeka zavarenih rubova uslijed zamora na različitim položajima, dok se metoda ekvivalentnoga konstrukcijskog naprezanja primjenjuje ponajprije za čelične konstrukcije veće debljine. Ta se metoda primjenjuje za aluminij debljine manje od 5 mm. Zato je metoda zarezanog naprezanja primijenjena za predviđanje načina loma korijenskih zavara. Međutim, bila je neučinkovita u predviđanju prolaza debljine zavara. Zbog toga su Dong i suradnici nedavno predložili vlačno naprezanje otvora grla i stanje naprezanja otvora debljine zavara na temelju ekvivalentnoga konstrukcijskog naprezanja za analizu zamora debljine zavara. Međutim, učinak metode ekvivalentnoga konstrukcijskog naprezanja još nije provjeren u analizama tankih presjeka ili pri razmatranju lokalnog naprezanja uzrokovanog lokalnom geometrijom. Četiri uobičajene metode lokalne analize za načine loma uslijed zamora zavarenih spojeva rebara i ploče čeličnih mostova sažete su u tablici 2.

4. Mjere za poboljšanje otpornosti zavarenih dijelova na zamor

4.1. Dvostrano zavarivanje

Tehnologija dvostranog zavarivanja odnosi se na upotrebu malih robota za zavarivanje unutar U-rebra primjenom konvencionalnih sredstava za vanjsko zavarivanje. Liu i sur. [37, 38, 67] eksperimentalno su pokazali da pri istome stupnju prodiranja dvostrani zavari mijenjaju izvorni način loma korijena u početni lom na podnožju zavara. Autori su istaknuli da dvostrani zavari, u usporedbi s jednostranim, znatno poboljšavaju otpornost na zamor, a glavni razlozi navedeni su u nastavku. Ponajprije se težište dvostranog zavara približno poklapa s težištem U-rebra, čime se smanjuje ekscentričnost

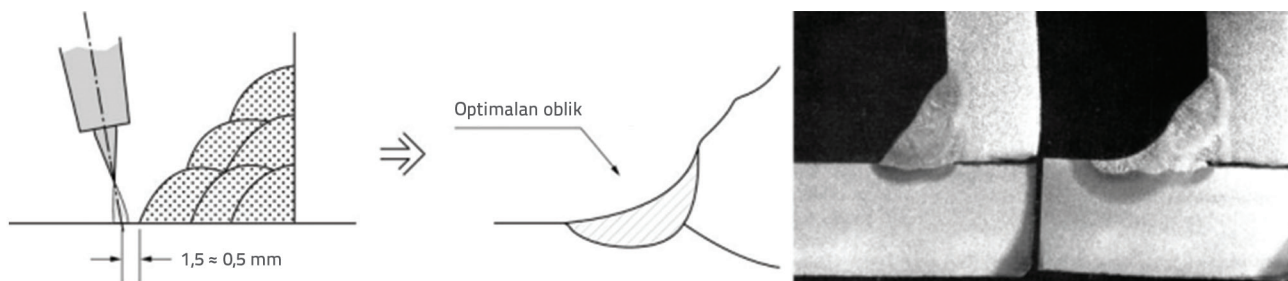
zavara. Drugo, poboljšani su površina poprečnog presjeka zavara i krutost lokalnog zavara. Treće, zatvaranje nepovezanih dijelova rebra stvara zatvoreno kruto područje koje mijenja stanje naprezanja u korijenu zavara. Na temelju mehanike loma i eksperimenata Yang i sur. potvrdili su da dvostrani zavari usporavaju nastanak pukotina na vanjskim rubovima zavara, čime produžuju vijek trajanja konstrukcije. Qinghua i sur. [3-5, 9] istaknuli su da na dvostrane zavare utječe i stupanj prodiranja, no učinak nije bio velik kada je brzina prodiranja premašila 75 %. Nakon potpunog prodiranja u dvostrani zavar nisu se pojavila oštećenja korijena zavara, a postojala su samo četiri načina loma (ploča nožice i prednje rebro s obje strane) (slika 16.) jer je čvrstoća uslijed zamora u korijenu zavara bila niska. Time je učinkovito produljen životni vijek zavara uslijed zamora.



Slika 16. Načini loma dvostranog zavara

4.2. Metode obrade nakon zavarivanja

Schneller i sur. [42] eksperimentalno su zaključili da zavareni spojevi s površinskim nedostacima češće uzrokuju oštećenja od zamora. U usporedbi s velikim unutarnjim nedostacima, mali površinski nedostaci vjerojatnije će dovesti do nastanka pukotine. Zato se metode obrade nakon zavarivanja uglavnom primjenjuju za rješavanje površinskih nedostataka i produljenje životnog vijeka uslijed zamora. Fuštar i sur. [75] potvrdili su da je metoda mehaničkog udara visokom frekvencijom zavarenih spojeva jednostavna i isplativa metoda za poboljšanje otpornosti na zamor spojeva. Također su pokazali da je cilj većine tih metoda obrade nakon zavarivanja poboljšati rubove zavara. Kaljenje, lagano brušenje i prevlačenje TIG-om (slika 17.) općenito se primjenjuju kako



Slika 17. Prevlačenje TIG-om

bi se smanjio utjecaj zaostalog naprezanja, polumjera zavora i površinskih nedostataka čvrstoće uslijed zamora. Van Es i sur. [28] primijenili su prevlačenje TIG-om za obradu ruba zavora nakon zavarivanja. Ta je metoda učinkovito ublažila fenomen koncentracije naprezanja, a istodobno povećala polumjer ruba zavora. Istodobno su određeni površinski nedostaci uklonjeni kako bi se smanjila razina naprezanja na podlozi zavora. Općenito, lokalna udubljenja manjeg polumjera mogu se uspješno ublažiti. Ipak, u odnosu na zavar s manjim stupnjem prodiranja ili većim razmakom u području korijena, sklonija su oštećenjima koja započinju upravo iz područja korijena. Međutim, cilj većine tehnika naknadne obrade poput sačmarenja jest rješavanje loma uslijed zamora, koji počinje od ruba zavora.

4.3. Mjere ojačanja

Trenutačno se u Kini i diljem svijeta primjenjuju tri glavne metode za ojačanje pukotina uzrokovanih zamorom. Prva metoda uključuje promjenu raspodjele naprezanja u blizini vrha pukotine, na primjer, primjenom tehnologije bušenja završne rupe. Druga metoda podrazumijeva povećanje ukupne krutosti konstrukcije primjenom tehnologije kompozitne ploče. Konačno, moguće je izmijeniti lokalno ojačanje konstrukcije na mjestu pukotine, na primjer, uporabom tehnologije dvostrukog zavarivanja u cilju sanacije [68–73]. Lu i sur. [45] proveli su eksperimente, usporedili različite metode ojačanja i potvrdili da one mogu učinkovito produljiti izdržljivost komponenti na mjestima gdje se pojavljuju pukotine. Kalstei i sur. [74] istaknuli su da je glavni razlog za te pukotine koje nastaju uslijed zamora niska krutost ploče mosta. Primijenili su sustav čelične sendvič-ploče kako bi smanjili globalna naprezanja na ploči mosta i produljili životni vijek zavarenih spojeva pod utjecajem zamora.

5. Zaključak

Na promjene u mehanizmu loma zavarenih spojeva uslijed zamora između rebara i ploče kod ortotropnih čeličnih ploča utječe niz čimbenika. Brojni istraživači proveli su eksperimentalna ispitivanja radi razumijevanja ponašanja zavora u tim područjima te su pritom predložili različiti analitički pristupi i modeli. Unatoč ostvarenim rezultatima, brojna pitanja još uvijek nisu u cijelosti razjašnjena.

Metode analize zamora koje se bave načinima loma korijenskog zavora povijesno nisu bile dovoljno razvijene. Metoda naprezanja u vrućoj točki može se primijeniti samo na rubove zavora, a metoda naprezanja zarezom ne može učinkovito predvidjeti prolaz debljine zavora. Metode linearizacije i naprezanja od 1 mm oslanjaju se na mnoge pretpostavke za predviđanje zamora u korijenu zavora. Nedavno su Dong i suradnici na temelju

metode ekvivalentnog naprezanja konstrukcije proširili tu ideju na analizu oštećenja korijena i debljine zavora te postigli važne rezultate. Međutim, primjena tog modela bila je uglavnom ograničena na kutne zavar, čija je primjenjivost ograničena zbog njihove geometrijske simetrije. Potrebna su dodatna istraživanja kako bi se metoda prilagodila i za složenije oblike zavarenih spojeva.

Većina trenutačno poznatih mehanizama loma kod zavarenih spojeva između rebara i ploče fokusira se na rubne dijelove zavora, uz primjenu metoda poput povećanja dubine prodiranja ili dvostranog zavarivanja radi izbjegavanja oštećenja u području korijena. Međutim, rezultati istraživanja koje su proveli Heng i suradnici upućuju na to da su oštećenja često posljedica upravo mehanizma loma u području korijena. Zato je neophodno definirati funkcionalnu povezanost između promjene mehanizma loma i parametara poput korijenskog razmaka, stupnja prodiranja i dimenzija zavora.

Literatura koja se bavi problematikom oštećivanja korijena zavora većinom se temelji na ispitivanjima vlačne čvrstoće kutnih zavora, dok se većina istraživanja položaja korijena zavora U-rebara odnosi na T-spojeve. Zbog razlika u geometriji i ispitnim uvjetima rezultati tih istraživanja nisu izravno primjenjivi na stvarne uvjete u zavarima U-rebra. Bez obzira na primjenu jednostranog ili dvostranog zavarivanja, neophodno je eksperimentalno potvrditi mehanizme loma u području korijena.

Metoda ekvivalentnog naprezanja konstrukcije sve se više primjenjuje i pokazuje velik potencijal. Ipak, zbog ograničene mogućnosti precizne procjene lokalnih naprezanja, ne može u cijelosti zamijeniti metodu zarezanog naprezanja. Potrebna su daljnja istraživanja radi proširenja primjenjivosti i rješavanja preostalih nedostataka u području precizne lokalne analize.

Tehnike naknadne obrade zavora u većini su slučajeva usmjerene na poboljšanje svojstava u području ruba zavora. Kada se kvaliteta zavarivanja ne može jamčiti, zavar se uništava od korijena zavora. Zato je učinak mjera poboljšanja koje procjenjuju svojstva zamora detalja zavora manji od očekivanog. Potrebna su dodatna istraživanja usmjerena na razvoj učinkovitih metoda za poboljšanje životnog vijeka u području korijena zavora uslijed zamora.

Zahvala

Ovo istraživanje financijski su podržali Zaklada za prirodne znanosti Chongqinga (potpora br. CSTB2023NSCQ-MSX0654), Program znanstveno-tehnološkog istraživanja Povjerenstva za obrazovanje Grada Chongqinga (potpora br. KJQN202301606), Program istraživanja u području humanističkih i društvenih znanosti istog povjerenstva (br. 23SKGH374) te Istraživački program Sveučilišta za obrazovanje Chongqing (potpora br. 2023BSRC020).

LITERATURA

- [1] Abdelbaset, H.: Behavior and fatigue life assessment of orthotropic steel decks: A state-of-the-art-review, *Structures*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105957>.
- [2] Yawen, G.: Study on fatigue properties of longitudinal rib-to-deck welded joints at diaphragm of steel bridge, Chengdu, Southwest Jiao Tong University, 2019., pp. 3-20
- [3] Qinghua, Z.: Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck, China J. Hig-hw. Transp., (2017), pp.14-39
- [4] Qinghua, Z.: State-of-the-art review of fatigue of steel bridge in 2019, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, (2020), pp.147-158
- [5] Qinghua, Z.: Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck, China J High w. Transp., (2017), pp.15-30
- [6] Milić, I., Ivanković, A.M., Syrkov, A., Skokandić, D.: Bridge failures, forensic structural engineering and recommendations for design of robust structures, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 7, pp. 717-736, <https://doi.org/10.14256/JCE.3234.2021>
- [7] Milić, I., Bleiziffer, J.: Rating systems for the sustainability assessment of infrastructure, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 4, pp. 335-345, <https://doi.org/10.14256/JCE.3858.2023>
- [8] Zhigang, H.: Stress analysis and fatigue characteristics of welding details of orthotropic steel bridge dec, Lanzhou Jiao tong University, 2021., pp. 5-20
- [9] Qinghua, Z.: Fatigue resistance of an innovative rib-to-deck both-side weld joint in orthotropic steel bridge deck, China J. High W. Transp., (2022), pp. 163-172
- [10] Yamada, K.: Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck, *International Journal of Fatigue*, (2006), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.017>
- [11] Wang, P.: Analysis of weld root fatigue cracking in load-carrying high-strength aluminum alloy cruciform joint, *International Journal of Fatigue*, (2020), p. 139, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105735>.
- [12] Ocel, J., Cross, B., Wright, W., Yuan, H.: Optimization of rib-to-deck welded joints for steel orthotropic bridge decks, US Department of Transport: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/17020/17020.pdf>, [4.6.2023.]
- [13] LeiLei, C.: Review of reserch on fatigue life evaluation for large, welded structure, *Journal of Mechanical Strength*, (2022), pp. 1443-1454
- [14] Fu, Z.: Fatigue performance of roof and u-rib weld of orthotropic steel bridge deck with different penetration rates, *Journal of Bridge Engineering*, (2017), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001036](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001036).
- [15] Yanbo, P.: Experimental study on fatigue performance of U rib full penetration weld of steel bridge panel, *HIGHWAY*, (2022), pp. 125-131
- [16] Wei, X.: Study on the influence of weld penetration and fatigue properties of steel bridge panel and longitudinal rib joint, *HIGHWAY*, (2020), pp. 150-154
- [17] Qiang, B.: Fatigue cracks in longitudinal ribs of steel orthotropic deck, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103697>.
- [18] Zhou, G.: Fatigue failure transition evaluation of load carrying cruciform welded joints by effective notch energy model, *Engineering Failure Analysis*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106328>.
- [19] Fricke, W.: IIW guideline for the assessment of weld root fatigue, *Weld of world*, (2013), <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0066-y>.
- [20] Xing, S.: Weld toe versus root fatigue failure mode and governing parameters: A study of aluminum alloy load-carrying fillet joint, *Marine Structures*, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103344>.
- [21] Xing, S.: Analysis of fatigue failure mode transition in load-carrying fillet-welded connections, *Marine Structures*, (2016), <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.01.001>.
- [22] Wei, Z.: Traction stress-based fatigue failure mode identification of load-carrying welded cruciform joints, *International Journal of Fatigue*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106897>.
- [23] Heng, J.: GPR-assisted evaluation of probabilistic fatigue crack growth in rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks considering mixed failure models, *Engineering Structures*, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113688>
- [24] Harati, E.: Effect of HFMI treatment procedure on weld toe geometry and fatigue properties of high strength steel welds, *ScienceDirect*, (2016), <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.434>
- [25] Wang, D.: Experimental study on the root-deck fatigue crack on orthotropic steel deck, *Materials and Design*, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109601>.
- [26] Shiozaki, T., Yamaguchi, N.: Effect of weld toe geometry on fatigue life of lap fillet welded ultra-high strength steel joint, *International Journal of Fatigue*, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.06.050>.
- [27] Pang, H.L.J.: Analysis of weld toe radius effects on fatigue weld toe cracks, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, (1994), [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(94\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0308-0161(94)90080-9).
- [28] Van Es, S.H.J.: TIG-dressing of high strength steel butt welded connections – Part 1: Weld toe geometry and local hardness, *ScienceDirect*, (2013), <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.076>
- [29] Xiu, J.: Effect of edge preparation on socket welds under the condition of vibration fatigue, *Journal of Nuclear Materials*, (2013), <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.08.051>
- [30] Yang, H.: Fatigue behavior of typical details of orthotropic steel bridges in multiaxial stress states using traction structural stress, *International Journal of Fatigue*, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105862>.
- [31] Yang, H.: Analysis of fatigue test conditions for reproducing weld toe cracking into U-rib wall in orthotropic bridge decks, *International Journal of Fatigue*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106976>
- [32] Yang, H., Dong, P.: A criterion for fatigue failure mode evaluation of U-rib to deck joints, *Jmr&t*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.069>.
- [33] Jian, X.: Edge preparation angle research of T-shaped fillet welded joints, *Casting-Forging-Welding*, (2010), pp.162-164
- [34] Luo, P.J.: Fatigue assessment of rib-to-deck welded joint in orthotropic steel bridge deck based on averaged strain energy density, Southwest Jiao Tong University, 2019.
- [35] Li, M.: Experimental study on fatigue resistance of rib-to-deck welded joint in orthotropic steel bridge deck, *Journal of Bridge Engineering*, 23 (2018), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001175](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001175).

- [36] Gadallah, R.: Residual stress measurement at the weld root of rib-to-deck welded joints in orthotropic steel bridge decks using the contour method, *Engineering Structures*, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110946>.
- [37] Liu, Y.: Fatigue performance of rib-to-deck double-side welded joints in orthotropic steel decks, *Engineering Failure Analysis*, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.015>
- [38] Liu, Y., Chen, F.: Fatigue crack growth behavior of rib-to-deck double-sided welded joints of orthotropic steel decks, *Advances in Structural Engineering*, (2020), <https://doi.org/10.1177/1369433220961757>.
- [39] Fricke, W., Kahl, A., Paetzold, H.: Fatigue assessment of root cracking of fillet welds subject to throat bending using the structural stress approach, *Welding in the World*, 50 (2006), pp. 64–74
- [40] Braun, M.: Application of local approaches to the assessment of fatigue test results obtained for welded joints at sub-zero temperature, *International Journal of Fatigue*, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105672>.
- [41] Wenzhong, Z.: Theory and method of anti-fatigue design of welded structures, China machine press, 3 (2017), pp. 1–190
- [42] Schneller, W.: Fatigue strength assessment of additively manufactured metallic structures considering bulk and surface layer characteristics, *Additive Manufacturing*, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101930>.
- [43] Wang, Z.: Investigation of the transverse internal force of a box girder using the energy variational principle, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 3, pp. 235–245, <https://doi.org/10.14256/JCE.3825.2023>
- [44] Abdelbaset, H.: Behaviour and fatigue life assessment of orthotropic steel decks: A state-of-the-art-review, *Structures*, (2024), <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105957>.
- [45] Lu, C.: Study on fatigue deterioration mechanism and performance strengthening of rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck, Southwest Jiao Tong University, 2018., pp. 3–70
- [46] Zhao, H.: Multiaxial fatigue life prediction model considering stress gradient and size effect, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104703>.
- [47] Jiang, F.: Fatigue life evaluation of deck to U-rib welds in orthotropic steel deck integrating weldment size effects on welding residual stress, *Engineering Failure Analysis*, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105359>.
- [48] Yokosuka, K.: Fatigue assessment of various types of longitudinal-to-transverse rib connection in orthotropic steel decks, *Weld of World*, (2017), <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0426-0>.
- [49] Xiao, Z.G., Yamada, K.: A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints, *Int. J. Fatigue*, (2004), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.05.001>.
- [50] Radaj, D.: Design and analysis of fatigue resistant welded structures, Elsevier, 1990.
- [51] Tateishi, K.: Fatigue strength evaluation by measurable stresses for root cracks in U-rib to deck welded joints of orthotropic steel decks, *Weld of the World*, (2023), <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01568-6>.
- [52] Wu, X.: A fracture mechanics-based stress approach for fatigue life prediction of welded joints considering weld profile effect, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103698>.
- [53] Bertini, L.: Fatigue life assessment of welded joints by two local stress approaches: The notch stress approach and the peak stress method, *International Journal of Fatigue*, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.01.024>.
- [54] Feng, L.: A hot-spot energy indicator for welded plate connections under cyclic axial loading and bending, *Engineering Structures*, (2017), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.021>.
- [55] Miki, C.: Fatigue evaluation for longitudinal-to-transverse rib connection of orthotropic steel deck by using structural hot spot stress, *Weld of the World*, (2016), <https://doi.org/10.1007/s40194-015-0272-x>.
- [56] Zhang, L.: A Coarse-Mesh hybrid structural stress method for fatigue evaluation of Spot-Welded structures, *International Journal of Fatigue*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107109>.
- [57] Jia, D.: A unified evaluation method for fatigue resistance of riveted joints based on structural stress approach, *International Journal of Fatigue*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106871>.
- [58] Li, J.: An equivalent structural stress-based fatigue evaluation framework for rib to-deck welded joints in orthotropic steel deck, *Engineering Structures*, (2019), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109304>.
- [59] Mei, J.: A method for treating residual stress effects in traction structural stress-based approach and validation on a welded component, *International Journal of Fatigue*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107347>.
- [60] Alencar, G.: A finite element post-processor for fatigue assessment of welded structures based on the Master S-N curve method, *International Journal of Fatigue*, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106482>.
- [61] Bufalari, G.: Mode-III fatigue of welded joints in steel maritime structures: Weld notch shear stress distributions and effective notch stress-based resistance, *International Journal of Fatigue*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107210>
- [62] Taddesse, A.T.: Combined notch and size effect modeling of metallic materials for LCF using plasticity reformulated critical distance theory, *Jmr-&t*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.079>.
- [63] Wu, Y.L.: Assessment of notch fatigue and size effect using stress field intensity approach, *International Journal of Fatigue*, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106279>
- [64] Raftar, H.R.: Weld root fatigue assessment of load-carrying fillet welded joints: 4R method compared to other methods, *International Journal of Fatigue*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106623>.
- [65] He, Z.: Comparative study on numerical simulation methods of stress concentration calculation and fatigue life prediction for welds, *International Journal of Fatigue*, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107205>.
- [66] Qiudong, W.: Modified effective notch stress method for fatigue evaluation of rib-deck welds integrating the critical distance approach, *Journal of Constructional Steel Research*, (2022), <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107373>
- [67] Chen, J., Wei, C., Zhao, Y.: Fatigue resistance of orthotropic steel deck system with double-side welded rib-to-deck welded joint, *Advances in Structural Engineering*, (2022), <https://doi.org/10.1177/13694332221146858>

- [68] Wang, Z.: Fatigue test and analysis of rib-to-diaphragm welded joint strengthened with CFRP plate, Southeast University, (2021), pp. 3-70
- [69] Hobbacher, A.F.: Comparison of fatigue verification procedures at a thick-walled welded component, Weld of world, (2017), <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0457-6>.
- [70] Li, M.Z.: A unified fatigue life evaluation method for different failure modes of the repaired rib-to-deck welded joints in orthotropic steel decks, International Journal of Fatigue, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107750>.
- [71] Dawood, M.: Effective splices for a carbon fiber-reinforced polymer strengthening system for steel bridges and structures, Transportation Research Record, (2009), <https://doi.org/10.3141/2131-12>.
- [72] Shrestha, B.: Innovative approach to repair corroded steel piles using ultra-high performance concrete, Transportation Research Record, (2020), <https://doi.org/10.1177/0361198120929329>.
- [73] Sadowski, T.: Remaining fatigue life prediction of welded details in an orthotropic steel bridge deck, Journal of Bridge Engineering, (2019), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001490](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001490).
- [74] Kalstein, H.: Fatigue assessment of full-scale retrofitted orthotropic bridge decks, Journal of Bridge Engineering, (2016), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001115](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001115).
- [75] Fuštar, B., Lukačević, I., Dujmović, D.: High-Frequency mechanical impact treatment of welded joints, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 5, pp. 421-436, <https://doi.org/10.14256/JCE.2822.2019>