

UGOTAVLJANJE POŠKODB VRVNIH PRIŽEMK IN ANALIZA VZROKOV NJIHOVEGA NASTANKA

AN ASSESSMENT OF THE DAMAGE TO ROPEWAY CLIPS AND AN ANALYSIS OF THE SOURCE OF THE DAMAGE

Žiga Bajt¹, Viljem Kuhar¹, Andraž Legat¹, Mirjam Leban², Janez Gomboc¹

¹Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
ziga.bajt@zag.si

Prejem rokopisa - received: 2001-02-23; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-08-30

Vrvna prižemka je nosilni, dinamično obremenjen konstrukcijski element, ki povezuje sedežno obešalo s transportno vrvjo sedežnice. V lanskem letu smo z neporušnimi metodami sistematično vizualno in defektoskopsko pregledali večje število prižemk in drugih vitalnih konstrukcijskih elementov sedežnic. Osnovni cilj preiskav je bil oceniti njihovo stanje, detektirati obstoječe razpoke in druge poškodbe, ki bi lahko vodile do nenadnih lomov, ter določiti obseg teh poškodb. Ultrazvočna metoda s posebej prirejeno površinsko sondo se je pokazala kot zelo primerna in izredno zanesljiva za odkrivanje razpok na prižemkah. Poleg detekcije poškodb smo z laboratorijskimi preiskavami ugotovili vzroke nastanka in širjenja razpok na prižemkah. Rezultati preiskav so pokazali, da ima material prižemk in nekaterih drugih konstrukcijskih elementov zelo majhno žilavost, kar je najverjetnejše posledica pretežno feritne mikrostrukture in neustrezne toplotne obdelave. Konstrukcijski elementi iz materiala s tako mikrostrukturo ne zagotavljajo zadostne odpornosti proti krhkemu lomu.

Glavne besede: prižemka, ultrazvočna preiskava, žilavost, utrujenostne razpoke, ogljično jeklo

A ropeway clip is an important dynamically loaded construction element that fastens together the hanger bar and the rope. During the last year, we were involved in systematic non-destructive testing of a range of ropeway clips and some other important construction elements. The main goal of the research was to detect the existence of cracks and other types of the damage that can lead to unexpected fracture, and an evaluation of the condition of the ropeway clips. The ultrasound method, accompanied by a specially arranged ultrasound surface beam-probe proved to be the most suitable, precise and reliable method for the cracks detection on the clips. In addition, several laboratory investigations were carried out in order to find causes for the initiation and propagation of cracks in the clips. Results of laboratory examinations revealed that the material of the clips, and also of the other construction elements, had very low toughness and a coarse-grain pearlite-ferritic microstructure, which is a result of improper heat treatment. It was concluded that the construction elements made from material with this kind of structure and mechanical properties would not ensure sufficient resistance to brittle fracture.

Keywords: ropeway clip, ultrasound investigations, toughness, fatigue cracks, carbon steel

1 UVOD

Sedežnice in vlečnice na smučiščih se uporabljajo za prevoz potnikov in so izpostavljene dinamičnim obremenitvam. Večji del nosilnih elementov med vzdrževanjem po pravilniku vizualno pregledujejo vzdrževalci žičnic, pregledi nekaterih elementov pa spadajo pod tehnični pregled. Izredni dogodki, ali pa sum v predloženo dokumentacijo, so lahko povod za defektoskopske preiskave in preiskave materiala, ki sicer niso predmet rednih tehničnih pregledov.

Januarja lani se je na enem od slovenskih smučišč v neurju nenadno krhko porušila vrvna prižemka. V tem času naprava ni delovala, porušitev pa je bila posledica udarnih oziroma sunkovitih dinamičnih obremenitev. Nepredvideni dogodek je bil vzrok za širše preiskave in analizo stanja prižemk in nekaterih drugih konstrukcijskih elementov na žičniških napravah. Prižemka je konstrukcijski element, ki je izpostavljen statičnim in dinamičnim obremenitvam, večinoma pri temperaturah pod lediščem¹. Zaradi tega mora biti material izbran za ta konstrukcijski element odporen proti krhkemu lomu pri nizkih temperaturah^{2,3,4,5}.

Osnovni cilj preiskav je bil oceniti stanje nosilnih konstrukcijskih elementov sedežnic, določiti obseg poškodb, detektirati obstoječe razpoke in raziskati vzroke njihovega nastanka ter širjenja. Glavni namen članka, v katerem smo se osredotočili izključno na preiskavo prižemk, je bil predstaviti sistem njihovega pregledovanja na terenu s poudarkom na neporušnih metodah detekcije razpok. Pri iskanju vzrokov nastanka razpok na prižemkah smo poleg osnovne analize mehanskih obremenitev določili tudi osnovne lastnosti materiala, iz katerega so bile prižemke izdelane.

2 OPIS PRIŽEMKE

Na sedežnicah opravlja vrvna prižemka funkcijo nosilnega elementa, ki povezuje obešalo in konstrukcijo sedežev s transportno vrvjo. Fiksni in premični del prižemke z vzmetnim mehanizmom prižemata transportno vrv. Fiksni del prižemke ima tri karakteristične dele: ležajni čep, telo prižemke in natekalna jezička (**slika 1**). Zgornji del obešala z ležajnim ohišjem je pritrjen na ležajni čep prižemke. Ležaj omogoča nihanje, oziroma gibanje obešala s sedeži v smeri vožnje. Prižemke so



Slika 1: Karakteristični deli prižemke, njena lega na vrvi in statične obremenitve

Figure 1: Characteristic parts of a ropeway clip, its position on the rope, and the static loads

večinoma izdelane iz ogljičnega jekla s postopkom večfaznega kovanja v utopih, ležajni čep pa je kasneje stružen in brušen.

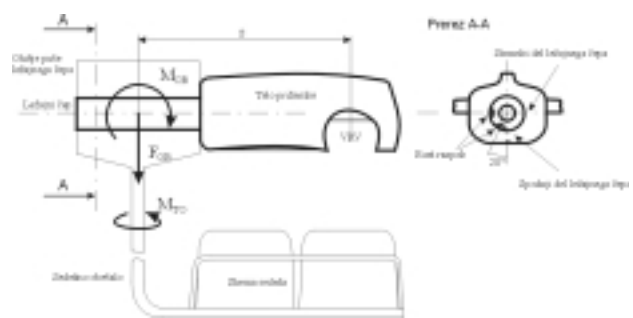
Glavna statična obremenitev prižemke je F_{OB} , teža obešala s potniki (slika 2). M_{OB} je upogibni moment, ki nastane zaradi F_{OB} in ročice (razdalje med vrvo in prijemališčem sile). Dinamične obremenitve povzročajo veter, tek prižemk čez kolesne baterije in vrvenice ter vkrčevanje potnikov¹. Dinamične obremenitve povzročajo tudi izmenične torzijske obremenitve okrog navpične osi sedežnega obešala M_{TO} (slika 2).

S stališča obremenitev je kritično mesto radij na prehodu iz ležajnega čepa v telo prižemke (slika 1), kjer je poleg oblikovnega zarezne učinka tudi največji upogibni moment ter obrabna in korozijska izpostavljenost. Kritično mesto je tudi na prižemalnem delu vrvi, kjer so utori za natekalne jezičke.

3 UGOTAVLJANJE POŠKODB

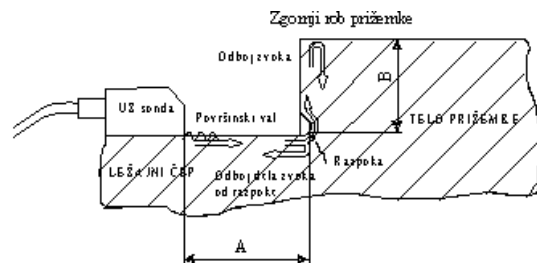
3.1 Vizualni pregled prižemk

Pri vizualnem pregledu⁶ različnih tipov prižemk različnih proizvajalcev smo ugotovili specifične napake in poškodbe, ki so posledica obrabe, korozije in utrujenosti. Obrabljeni in deformirani so predvsem prižemalni deli in natekalni jezički (slika 1). Ostre raze in korozijske poškodbe, ki potekajo v prečni smeri na os ležajnega čepa lahko delujejo zarezno in tvorijo inicialna mesta za nastanek utrujenostnih razpok^{7,8}. Razpok v radiju na prehodu iz ležajnega čepa v telo prižemk z vizualnim pregledom zaradi grobe površinske obdelave in omejitev vizualnega pregleda nismo ugotovili. Zaradi omenjenega nenadnega loma, ki je bil razlog za obširne preiskave, ter glede na analizo obremenitev, smo radij na prehodu iz ležajnega čepa v telo prižemke sistematično pregledovali z drugimi neporušnimi metodami - z ultrazvokom, penetranti in magnetno indukcijo (nekateri prižemke z razpokami smo preiskali tudi metalografsko).



Slika 2: Obremenitve na prižemko - F_{OB} = teža obešala s potniki, M_{OB} = upogibni moment velikosti $F_{OB} \cdot s$, M_{TO} = torzijski moment okrog navpične osi sedežnega obešala

Figure 2: Ropeway clip loads - F_{OB} = load of the hanger bar with passengers, M_{OB} = bending moment $F_{OB} \cdot s$, M_{TO} = torsional moment around the vertical axis of the hanger bar



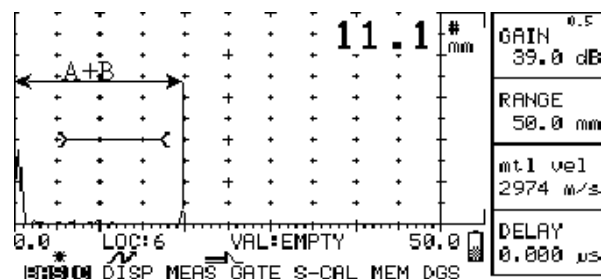
Slika 3: Pot zvoka po ležajnem čepu prižemke

Figure 3: Sound propagation through the bearing bolt of the ropeway clip

Po pregledu več kot 600 prižemk, smo kritične poškodbe ugotovili predvsem na prižemkah starejšega tipa nekega proizvajalca. V članku smo se osredotočili na problematiko te vrste prižemk.

3.2 Ultrazvočna defektoskopska preiskava

Ultrazvočna preiskava je uveljavljena nedestruktivna defektoskopska metoda, primerna za ugotavljanje razpok na kovinskih elementih. Po literaturnih podatkih⁹ se z ultrazvočno metodo lahko odkrijejo razpoke, globlje od 0,025 mm. Informacijo o napakah v materialu dobimo z analizo ultrazvočnega vala, ki se odbije od nezveznih



Slika 4: UZ odziv na nepoškodovani prižemki - vrh signala na prvi tretjini grafa je posledica odboja zvoka od zgornjega roba prižemke

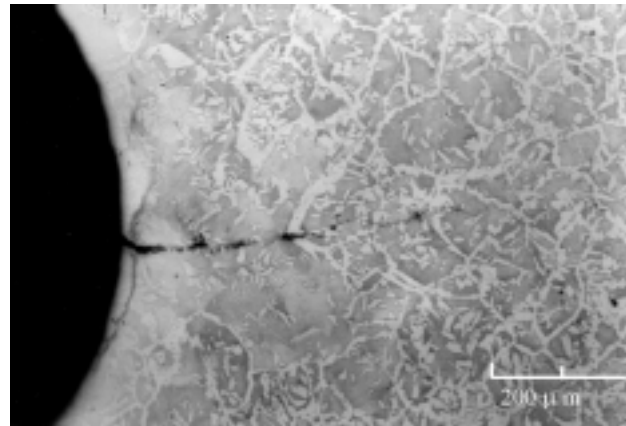
Figure 4: Ultrasonic response on an undamaged ropeway clip - the peak in the first third of the graph is due to the sound rebound from the top edge of the clip

prehodov v materialu (razpok) ali od ostrih konstrukcijskih prehodov (robov). Defektoskopski - ultrazvočni pregled prižemk smo izvajali na prehodu iz ležajnega čepa v telo prižemke z defektoskopom Krautkrämer USN 50. Za pregled prižemk smo posebej priredili sondo s površinskim valom. Pri pregledovanju materiala s površinskim valom zvok potuje po površini (v tem primeru po površini ležajnega čepa - **slika 3**) in se odbija od motenj na svoji poti. V primeru, da prižemka v radiju ni počena, se površinski val odbije samo od zgornjega roba prižemke in potuje nazaj po isti poti (**slika 4**). Razdalja med izvirom zvoka in razpoko je na **sliki 3** označena z A in je enaka kot razdalja od izhodiščne točke grafa do prvega izrazitega vrha signala na **sliki 5**. Če ultrazvočni val naleti na razpoko, se del zvoka odbije proti izviro, del pa potuje naprej proti robu prižemke.

Na **sliki 4** je prikazan odziv ultrazvočnega signala na nepočeni prižemki. Vrh signala na začetku skale je posledica vstopa zvoka iz UZ - sonde v preskušane, neizraziti vrh v prvi tretjini območja (na razdalji A + B) pa je odboj od zgornjega roba prižemke.

Na **sliki 5** so vidni vrhovi signala: na prehodu iz UZ - sonde v telo prižemke (začetek grafa), odboj od zgornjega roba prižemke (na razdalji A+B od začetka grafa) in izraziti vrh signala, ki je posledica odboja od razpoke na prehodu iz ležajnega čepa v telo prižemke (na razdalji A od začetka grafa). Višina konice signala na počeni prižemki je odvisna od lege, oblike in globine razpoke¹⁰. Ostra in majhna razpoka, ki je usmerjena pravokotno na smer potovanja ultrazvočnega signala, da veliko močnejši odboj (**slika 5 - a**), kot pa obla zaokrožitev roba na vrhu prižemke (**slika 5 - b**).

Razpoke so se večinoma pojavile na spodnjem in stranskem delu ležajnega čepa (**slika 2 - prerez A-A**). Razpoke na spodnjem delu so za približno 20° zamaknjene proti stranskemu delu. Njihova lega je razumljiva, če si predstavljamo obremenitveno stanje prižemke pri vožnji v klanec, ko se vrv v povprečju nagne za podoben kot. Nekatero razpoke so se pojavile na stranskih delih ležajnega čepa (**slika 2 - prerez A-A**), ki je pri statično obremenjeni prižemki na ravnini neobremenjen, močne obremenitve tega dela ležajnega



Slika 6: Grobo zrnata perlitno – feritna widmanstättenska mikrostruktura na eni izmed počenih prižemk

Figure 6: Coarse-grained pearlite-ferritic widmanstätten microstructure of one of the cracked ropeway clips

čepa pa so izmenične torzijske obremenitve okrog navpične osi sedežnega obešala M_{TO} . Sunkovite in kombinirane obremenitve na kritičnem mestu lahko močno zmanjšajo življenjsko dobo konstrukcijskega elementa¹¹.

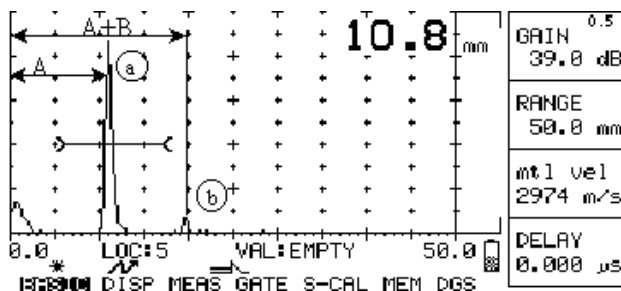
3.3 Penetrantski defektoskopski pregled

Mesta na prižemkah, kjer smo z ultrazvokom ugotovili počenost, smo pregledali še z barvnimi penetranti. Penetrant je barvna tekočina, ki po nanosu na razmaščeno površino vzorca zaradi kapilarnega efekta prodira globoko v razpoke. Po čiščenju in razvijanju z obarvanjem površine se pokaže mesto počenosti. Vse razpoke, ki smo jih odkrili z ultrazvokom, smo na terenu ali v laboratoriju potrdili tudi z barvnimi penetranti, vendar pa ugotavljamo, da je v splošnem pregled z barvnimi penetranti na terenu manj zanesljiva in veliko bolj zamudna metoda ugotavljanja počenosti kot ultrazvok (na pregled s penetranti močno vplivajo razmere na terenu in priprava površine).

4 UGOTAVLJANJE VZROKOV POŠKODB

4.1 Mehanske preiskave – udarna žilavost

Omenili smo že, da je prižemka konstrukcijski element, ki je dinamično obremenjen in obratuje tudi pri nizkih temperaturah. Zaradi tega je med mehanskimi lastnostmi, ki jim mora material prižemk ustrezati, zelo pomembna tudi žilavost^{3,12}. Dinamično obremenjene konstrukcije iz krhkega jekla se lahko porušijo brez predhodnih vidnih deformacij. Po definiciji je žilavost zmožnost materiala, da s plastično deformacijo absorbira energijo pred porušitvijo². Žilavost večine jekel je izrazito odvisna od temperature: sorazmerno visoka žilavost pri sobni temperaturi z nižanjem temperature naglo pade. Splošni predpis za konstrukcijska jekla, ne glede na vrsto jekla, zahteva minimalno žilavost 27 J pri



Slika 5: UZ odziv na počeni prižemki - izraziti vrh signala je posledica odboja zvoka od razpoke v radiju

Figure 5: Ultrasonic response obtained on a cracked ropeway clip - the highest peak is due to the sound rebound from the crack in the radius

Tabela 1: Kemijska analiza jekla prižemke ter primerjalna standardna kemijska sestava jekla Ck 35 po DIN 17201; št. jekla 1.1181

Table 1: Results of the chemical analysis of the ropeway clip material, and the standardised chemical composition of the carbon steel Ck 35 - DIN 17201, steel no. 1.1181

Oznaka vzorca	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% V	% Al
primer	0,36	0,28	0,68	0,012	0,025	0,2	0,03	< 0,01	0,007
Po DIN standardu za Ck 35	0,32-0,39	0,15-0,35	0,5-0,8	< 0,035	< 0,035	-	-	-	-

-20 °C¹³. Avstrijske smernice za gradnjo in obratovanje sedežnic¹⁴ navajajo, da mora biti srednja vrednost žilavosti materiala prižemk v seriji preizkusov pri -30 °C večja od 40 J, pri čemer noben izmed preizkušancev ne sme imeti manjše žilavosti od 27 J.

Preskušance za udarno žilavost po Charpyu v skladu s standardom SIST EN 10045 - 1 smo izdelali iz konzolnega dela teles prižemk. Žilavost večine preiskanih prižemk (starejši tip prižemk) je bila pri T = -20 °C nižja od zahtevane: največ izmerjenih vrednosti je bilo med 10 J in 15 J, najnižje vrednosti pa so bile okrog 5 J.

4.2 Kemijska analiza jekla prižemk

Zaradi nepoznane kvalitete materiala smo naredili kemično analizo jekla prižemk. V tabeli 1 je prikazan značilen primer kemijske analize jekla prižemke s slabo žilavostjo. Glede kemične sestave (**tabela 1**) ustreza jeklo, iz katerega so izdelane prižemke starejšega tipa, kvaliteti Ck 35. To jeklo je namenjeno za poboljšanje, uporablja pa se za bolj obremenjene dele v strojearhitekturi¹⁵ ter elemente ki obratujejo pri povišani temperaturi.

4.3 Metalografska preiskava mesta z razpokami

Da bi potrdili zanesljivost neporušnih preiskav, predvsem pa ugotovili mikrostrukturne značilnosti materiala prižemk, na katerih smo detektirali razpoke, smo kritične dele nekaterih prižemk tudi metalografsko preiskali. Za preiskavo smo del prižemke izrezali vzdolžno preko razpoke (v smeri osi ležajnega čepa) in izdelali metalografski obris. Z metalografsko preiskavo smo potrdili, da nam je z ultrazvočnim pregledom uspelo detektirati tudi zelo majhne razpoke z globino okrog 0,1 mm. Večina razpok je bila globokih od 0,4 mm do 0,8 mm. Razpoke so nastale na mestih z največjo koncentracijo napetosti, oziroma zareznim učinkom. V večini primerov so bili iniciali razpok raze, ki so bile posledice grobe površinske obdelave ali obrabe. Stružne raze so imele globino največ do 50 µm in so bile veliko bolj oble kot razpoke, zato se je njihov ultrazvočni odziv dobro ločil od ultrazvočnega odziva razpok in ni motil pregleda.

Metalografska preiskava več prižemk, na katerih so bile odkrite razpoke kaže, da je mikrostruktura jekel s slabo žilavostjo pretežno iz lamelnega perlita, zelo nehomogena in grobozrnata - nominalna ASTM - velikost zrn razreda 1 do 3¹⁶. Pri preiskavi obravnanih prižemk smo nekajkrat ugotovili tudi v celoti amorfni in transgranularni widmannstättenski ferit (**slika 6**).

Metalografska analiza kaže, da material ni bil termično obdelan - poboljšán, nizka vsebnost aluminija pa je verjetno vzrok za grobozrnato strukturo po kovanju. Posledica vsega naštetega je slaba žilavost jekel starejšega tipa prižemk^{17,5}.

5 SKLEP

Porušitev prižemke na enem izmed slovenskih smučišč ter njena krhka narava loma sta bila povod za podrobnejšo analizo stanja prižemk na žičniških napravah. Cilj preiskav je bil predvsem detektirati obstoječe razpoke in raziskati vzroke njihovega nastanka in širjenja.

Prižemke smo pregledovali v razstavljenem stanju: vizualno, s penetranti ter ultrazvokom. Po začetnih pregledih in študiju obremenitev, ki med obratovanjem delujejo na prižemko smo ugotovili, da je najbolj kritično mesto prehod iz ležajnega čepa v telo prižemke. Z vizualnim pregledom je mogoče odkriti le površinske nepravilnosti in večje razpoke, pregled s penetranti pa ima na terenu zaradi vpliva okolice omejene zmožnosti, zato smo se odločili za ultrazvočno preiskavo. Za ultrazvočno pregledovanje kritičnega mesta smo posebej priredili površinsko sondo, kar se je izkazalo za enostaven, istočasno pa zelo zanesljiv način detekcije tudi zelo majhnih razpok ($\geq 0,1$ mm). Zanesljivost ultrazvočnega pregleda smo dokazali tudi z metalografsko preiskavo počenih prižemk v laboratoriju.

Za določitev vzrokov nastanka in širjenja razpok smo v laboratoriju za vsako serijo prižemk na posamezni napravi izvedli žilavostne preskuse, določili kemijsko sestavo jekla ter opravili metalografsko analizo mikrostrukture. Rezultati teh preiskav so pokazali, da je material počenih prižemk (Ck35) neustrezen za dejanske obratovalne razmere, struktura pa nehomogena, pretežno perlitna in grobozrnata (na določenih mestih je celo widmannstättenski ferit). Vse naštetje je vzrok za slabo žilavost materiala, zaradi katere se okolica razpok ne more plastično deformirati in tako zaustaviti njihovega napredovanja. Izrazite obrabne poškodbe in ugotovljene razpoke na prižemkah, skupaj z neustrežno žilavostjo materiala, močno zmanjšujejo varnost teh konstrukcijskih elementov.

6 LITERATURA

- ¹ Artur Doppelmayr, Denkanstösse zur Funktionserfüllung von Einseilumlaufbahnen, Verlag WIR Public Relations, 1997
- ² Donald J. Wulpi, Understanding How Components Fail, ASTM International, 2000

- ³ Stephens, Fatigue at low temperatures : a symposium sponsored by ASTM Committees E-9 on fatigue and E-24 on fatigue testing, May 1983
- ⁴ M. Marinček, Kovine zlitine tehnologije, 28 (1994) 1-2, 31-38
- ⁵ F. Vodopivec, L. Kosec, B. Breskvar, Properties of structural steels in transition temperature range, Metalurgija, 39 (2000) 3, 139-146
- ⁶ ASME Standard Sec. XI, IWA - 2210, IWA - 2211 (1996)
- ⁷ F. Vodopivec, B. Ule, L. Vehovar, J. Žvokelj, V. Verbič, Kovine zlitine tehnologije, 28 (1994) 4, 571-477
- ⁸ Ž. Bajt, V. Kuhar, A. Legat, M. Leban, J. Gomboc, Untersuchungen an Sesselliftklemmen, ISR, June 4, 2001, 7-9
- ⁹ J. Vojvodič Gvardjančič, Kovine zlitine tehnologije, 30 (1996) 3-4, 353-363
- ¹⁰ Josef Krautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer - Verlag, 1986
- ¹¹ T. Lagoda, E. Macha, A. Dragon and J. Petit, Influence of correlations between stresses on calculated fatigue life of machine elements, International Journal of Fatigue, 18 (1996), 547-555
- ¹² Christian Petersen, Stalbau - Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Friedr. Vieweg & Sohn, 1988
- ¹³ Osnovi čeličnih konstrukcija: Građevinska knjiga, 1986
- ¹⁴ Richtlinien für den Bau und Betrieb von Sesselliften, Ausgabe August 1993
- ¹⁵ Boris Jocič, Slovenska jekla 2, Jekla in železove litine, 1996
- ¹⁶ Metals handbook, 8th Edition, Vol. 7, Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, ASM 1972
- ¹⁷ L. Lawson, E.Y. Chen, M. Meshii, Near-threshold fatigue: a review, International Journal of Fatigue, 21 (1999), 15-34