Стручни критички осврт

Ненад Т. Фриц, *Teorijsko i eksperimentalno istraživanje gubitaka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima*. Докторска дисертација. Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2015, 305 стр. (ментори: проф. др Драган Буђевац и в. проф. др Зоран Мишковић; комисија: Д. Буђевац, З. Марковић, Д. Лучић, З. Мишковић). Одбрањена 25. априла 2015. Текст: Репозиторијум Универзитета у Београду (Phaidra / Е-тезе, запис o:10356).

I Предмет, грађа и мерило

Дисертација се бави питањем које је у пракси тарних спојева старо колико и сами преднапрегнути завртњи, а које за премаз Resist 86 и домаћу праксу дотад није било испитано: колико силе преднапрезања завртањ изгуби при уградњи, у првим сатима и током наредних месеци, када су тарне површине заштићене цинк-силикатним премазом, и шта тај губитак значи за носивост споја на проклизавање. Рад упоређује две врсте спојних средстава: класичне HV завртње M20 класе 10.9 и завртње са закључавањем система „Huck BobTail“ (HBT), који се не могу дотезати. Премаз је Resist 86, који је, према наводу рада (стр. 3), на тарним површинама у Србији први пут примењен при реконструкцији моста „Газела“. Грађа је обиман сопствени оглед: 42 узорка споја с двоструким преклопом, 126 завртњева, три стезна пакета (18, 35 и 55 mm), узорци без премаза и с премазом. Сила је мерена мерним тракама уграђеним у тело сваког завртња, а сваки завртањ је појединачно калибрисан. Праћење је трајало до 60 недеља, шест узорака изложено је динамичком оптерећењу, а оглед прате нумерички модели методом коначних елемената и аналитички изрази за флексибилност споја. Смисао савремених истраживања рад сажима реченицом: „Nije važno što postoji gubitak sile prednaprezanja u zavrtnjevima sve dok znamo koliki je!“ (стр. 11).

Пре свега осталог ваља изрећи мерило. Урађена дисертација предата је Факултету 21. јануара 2015, а Комисија за преглед, оцену и одбрану именована је 29. јануара 2015. Рад се зато мери искључиво према литератури, стандардима, прописима и знању који су постојали до предаје рада, крајем јануара 2015. Ништа што је настало касније није мерило: ни доцнија издања европских стандарда о извођењу челичних конструкција и о спојним средствима, ни каснија техничка правила за завртње са закључавањем, ни каснији технички листови произвођача премаза. Исто правило важи за списак литературе овог осврта: свака његова јединица објављена је пре предаје рада, изузев саме дисертације и реферата комисије.

Наводи из дисертације дати су дословно, латиницом, како је рад писан, с бројем штампане стране (текст рада на стр. 1–204, литература и прилози на стр. 205–263), према примерку у репозиторијуму Универзитета у Београду (Е-тезе). Реферат Комисије потиче из материјала 9. седнице Већа научних области грађевинско-урбанистичких наука од 21. априла 2015. и наводи се ћирилицом, како је писан.

Једну ствар треба рећи на почетку, јер одређује како се читају све замерке које следе. Тема рада није само локално занимљива; струка је и пре 2015. писано препознала проблем који рад мери. Сам Еврокод за пројектовање веза, уз табелу класа тарних површина, упозорава: „NOTE 4: With painted surface treatments a loss of pre-load may occur over time.“ (EN 1993-1-8:2005, табела 3.7, напомена 4). Америчка спецификација за спојеве с високовредним завртњевима у коментару уз т. 3.2.1, који се тиче преднапрегнутих спојева код којих отпорност на проклизавање није меродавна, упозорава да спојеви с дебелим или вишеслојним премазима „may exhibit significant loss of pretension because of compressive creep in softer coatings“, мислећи при том на органске премазе; у коментару уз т. 8.2, за вишеслојне спојеве с топлим цинковањем, наводи да се губитак услед релаксације може урачунати у прорачун или надокнадити поновним притезањем: „Either this loss can be allowed for in design, or pretension may be brought back to the prescribed level by re-pretensioning the bolts“ (RCSC, 2014, коментари уз т. 3.2.1 и 8.2). Радна хипотеза дисертације, да се губитак који се довољно тачно предвиди може узети у обзир при пројектовању, стоји, дакле, пре свега уз напомену Еврокода, у главном току струке, а не на њеној маргини.

II Шта рад доноси

Осврт мора почети оним што дисертација јесте, јер је то највећи део онога што она вреди.

Прво и најважније, рад издваја удео премаза у дугорочном губитку силе мерењем, а не претпоставком. То омогућава начело, изречено већ у уводу, да се паралелно с премазаним узорцима испитују исти спојеви без премаза: „Uz obavezno ispitivanje uzoraka bez antikorozione zaštite (kao etalonskih)“ (стр. 3). Еталонски узорци имају исте завртње, исте плоче и исти поступак. Из поређења излази да премаз чини приближно половину дугорочног губитка до 24. недеље: „Tačnije, u slučaju zavrtnjeva dužine 50 mm ovi gubici su 50,6%, za zavrtnjeve dužine 70 mm iznose 55,1 % i za zavrtnjeve dužine 90 mm 51,4 %.“ (стр. 161), а код HBT завртњева 44–56 %. Налаз је доследан у свих шест конфигурација и бројчано тачно изведен из табела. То је методски најчистији и практично најупотребљивији резултат рада.

Друго, мерни поступак је пажљив и описан тако да се може поновити. Мерне траке TML BTM-6C уграђене су у осу сваког завртња, с положајем прилагођеним врсти и дужини завртња, а поступак је описан корак по корак. Сваки завртањ затим је калибрисан на кидалици, у најмање три циклуса и уз држање силе око 300 s ради откривања клизања траке: „Izvršena je kalibracija 126 zavrtnjeva i na taj način definisana veza između dilatacije merne trake i sile u svakom od zavrtnjeva.“ (стр. 86). Све калибрационе праве објављене су у табелама и у прилогу C, па се сваки резултат може пратити до конкретног завртња: „Uz pomoć ovih krivih moguće je svako čitanje dilatacije merne trake jednostavno prevesti u vrednost sile prednaprezanja u zavrtnju.“ (стр. 89). Тиме је следено упутство произвођача, по коме се тек калибрацијом траке уграђене у завртањ добија тачна аксијална сила: „By calibrating the gauge embedded into the bolt, you can find accurate tightening axial force of the bolt.“ (TML, 2010, стр. 1). Уз то, свака мерна трака има своју компензациону траку, а калибрација и почетна мерења изведени су на истом мерном систему и истим каналима.

Треће, грађа је објављена потпуно. Табеле поглавља 4 дају силу и губитак за сваки од 126 завртњева у свим референтним тренуцима. Завртњи с неисправном траком нису тихо изостављени, него су именовани, образложени и остављени у табелама, обојени црвено, па читалац може сам да оцени искључење. Рад отворено признаје и сопствену грешку у току огледа, код избора силе за спектар узорка H9: „Ovo se pokazalo kao pogrešno jer je detaljnim pregledom rezultata uočeno da merna traka ne pokazuje stabilne rezultate.“ (стр. 141). Из ње изводи поуку да је „neophodno vršiti analizu rezultata u kontinuitetu“ (стр. 142). Одељак 3.9 на исти начин претвара тешкоће огледа у употребљиве препоруке: резерву од 15 % инструментисаних завртњева, компензационе плочице дебљине „najmanje 3 mm“ (стр. 102) и карданске зглобове на алату за калибрацију.

Четврто, рад доноси негативан налаз о производу који се тек уводио на тржиште и износи га без ублажавања. Код најкраћих HBT завртњева (55 mm) сила је већ после 12 сати била око 28 % испод минималне вредности коју рад узима као прописану: „Sila u HBT zavrtnjevima dužine 55 mm, bila je čak 28 % manja od minimalne propisane vrednosti, čime je dovedena u pitanje granična nosivost spoja na proklizavanje.“ (стр. 201). Налаз се слаже с пилот-истраживањем на које се рад ослања и практично је најважнији резултат рада за оне који би такве завртње применили у кратким спојевима.

Пето, рад критички чита најближи иностран оглед и из тога изводи бољи поступак. У огледу Heistermann (2011) губитак силе услед динамичког оптерећења очитан је непосредно пред лом узорка, под оптерећењем. Рад примећује да тако очитана сила садржи и повратан пад услед попречне контракције плоча: „Da bi se dobila stvarna slika gubitaka sile prednaprezanja u zavrtnjevima trebalo je rasteretiti uzorke nakon svakih 50000 ciklusa što bi omogućilo neutralisanje elastičnih poprečnih kontrakcija

ploča i prikazivanje stvarnog nivoa sile u zavrtnjevima.“ (стр. 158). Сопствени оглед мери силу пре, током и после динамичког оптерећења, и у паузама од 700 s између серија циклуса, и показује да се сила по растерећењу враћа. На томе почива налаз да експлоатационо динамичко оптерећење, без клизања и пластификације, мало утиче на губитак силе.

Шесто, мерење силе у реалном времену при уградњи омогућило је два поређења која у литератури приказаној у раду немају пандан: расипање силе при уградњи (коефицијент варијације 4,3 % за HBT наспрам 8,5 % за HV, стр. 200, тачно изведено из свих 126 вредности) и поређење притезања момент кључем и обичним кључем, при коме је ток силе у првим секундама снимљен и механички протумачен (стр. 155).

Седмо, нумерички модел није употребљен ради самог себе, него да објасни мерење: „U prvom redu numerička analiza je sprovedena u cilju utvrđivanja razloga odstupanja vrednosti dilatacija mernih traka unutar zavrtnjeva od očekivanih nominalnih vrednosti.“ (стр. 169). Модели обухватају рупу за траку, лепак и алат за калибрацију; проверени су према измереним дилатацијама; из њих су изведене исправке замењујућих дужина главе и навртке HV завртња по VDI 2230 и први скуп замењујућих дужина за делове HBT завртња M20, каквих у литератури коју рад приказује није било.

Најзад, рад на више места отворено омеђује оно што је утврдио. Закључци почињу изричитом оградом о домену: „Svi zaključci i preporuke rezultat su sopstvenih teorijsko-eksperimentalnih istraživanja i odnose se na primenjene materijale i elemente: zavrtnjeve HBT i HV prečnika 20 mm i cink-silikatni premaz ‚Resist 86‘.“ (стр. 200). Привлачно запажање да се губици после 60 недеља смирују не проглашава се налазом: „Ovakav zaključak nije statistički potvrđen s obzirom da je takvo ponašanje registrovano na svega 3 (ili manje) zavrtnja po tipu uzorka.“ (стр. 162). Нумеричко моделирање премаза изричито се оставља за касније: „Primena numeričke analize za modeliranje spojeva sa visokovrednim zavrtnjevima, koja bi u obzir uzela i ponašanje slojeva cink-silikatnog premaza, u ovom trenutku, nije moguća.“ (стр. 199).

Бројеви рада у највећем делу држе: табеле губитака доследне су с изразима по којима су рачунате, средње вредности настају из појединачних података уз искључења која рад наводи, а логаритамски изрази за губитке у времену могу се поново добити из табела. Вредности коефицијента kn поклапају се с табелом D1 стандарда EN 1990. Изрази смернице VDI 2230 и одредбе EN 1993-1-8 пренети су тачно, а технички подаци мерне опреме и приказ најближих страних истраживања (Heistermann, Husson) у највећем делу верно, уз појединачне омашке у запису (нпр. обрнут однос мешања лепка A-2 на стр. 76, једна вредност у табели 2.12), које не утичу на резултате. Замерке које следе треба читати на тој подлози: оне се највећим делом тичу закључивања и уопштавања, а не тачности измереног.

III Циљ, хипотеза и метод

Циљеви су постављени проверљиво (стр. 4), тако да сваки има мерљив исход: удео премаза у губитку, губитак при уградњи суседног завртња, екстраполација на 20 година и одређивање дужине завртња „da se odredi minimalna dužina zavrtnja od koje se posmatrani fenomen eventualno može zanemariti“ (стр. 4). Радна хипотеза, како је изложена у извештају Комисије за пријем теме, гласи да цинк-силикатни премаз убрзава изградњу и штити од корозије, да с бројем заштићених површина расте губитак силе и да се довољно тачно предвиђен губитак може узети у обзир при пројектовању. Предмет рада најављује губитке „u funkciji od: debljine antikorozione zaštite (cink-silikatni premaz) u tarnim površinama, dužine zavrtnja, vrste opterećenja i redosleda ugradnje zavrtnjeva.“ (стр. 4).

Прва и најважнија напомена тиче се односа хипотезе и нацрта огледа. Оглед обухвата спојеве без премаза и с једном номиналном дебљином премаза (шест слојева по 75 μm), и увек с три плоче. Зависност губитка од дебљине премаза, односно од броја премазаних површина, огледом зато није утврђена. Потврђено је да цинк-силикатни премаз приближно удвостручује дугорочне губитке, што је стваран и употребљив налаз; део хипотезе који се тиче броја заштићених површина остаје, међутим, непроверен. Рад то ограничење сам наводи на почетку закључака (стр. 200) и међу препорукама за даља истраживања, где тражи оглед „na različite debljine AKZ“ (стр. 203). Ипак, на стр. 162 и у закључку 15 та зависност исказана је као утврђена: „Ukupna dilatacija slojeva cink-silkatnog premaza u spoju dominantno zavisi od broja zaštićenih površina tj. od ukupne debljine premaza u spoju.“ (стр. 203). Ту реченицу треба читати као тумачење и хипотезу за даља испитивања. Као утврђена чињеница изнета је и уводна реченица „Sa povećanjem broja elemenata u tarnom spoju povećava se i ukupna debljina antikorozione zaštite, što dovodi do većeg gubitka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima.“ (стр. 2). У ствари је то радна хипотеза, коју ни литература ни сопствени оглед (увек три плоче) не проверавају непосредно; најближи оглед, Heistermann (2011), који рад приказује на стр. 41–44, мењао је број премазаних, односно поцинкованих површина, а не број елемената у споју.

И циљ разлагања губитка остварен је делимично. Рад је хтео да „da se ukupan gubitak sile prednaprezanja razloži na delove koji potiču od puzanja osnovnog materijala zavrtnja i čeličnih elementa u spoju, od antikorozione zaštite kao i od dejstva dinamičkog opterećenja“ (стр. 4). Удео премаза и утицај динамичког оптерећења јесу одређени. Остатак губитка, који мере еталонски узорци, није рашчлањен на део завртња и део плоча, а оглед за то није ни био постављен. По литератури коју рад сам приказује (израз 2.25, према Kammel и Sedlacek), тај остатак потиче пре свега од намештања и релаксације елемената споја, а не од пузања челика. Рад то одступање од постављеног циља не наводи.

Посебно питање је пројектна препорука. Рад даје изразе за однос ξ стварне и минималне прописане силе у времену и граничне вредности ξ, из којих пројектант може проценити преосталу силу. Изричито правило за умањење силе преднапрезања у изразу за носивост на проклизавање ипак није формулисано, прорачунски модел најављен у пријави теме остављен је за даља истраживања, а закључци нигде нису изричито сучељени с осам циљева са стр. 4. Утицај редоследа уградње испитан је на узорцима које рад сам оцењује као неприкладне за тај феномен („dispozicija i dimenzije primenjenih uzoraka nisu adekvatni za izučavanje ovog fenomena“, стр. 157). То је изричито речено, али је требало рећи и у завршном билансу циљева. Одељак о значају рада обећава и екстраполацију губитака „na životni vek konstrukcije“ (стр. 5), а изведена је на 20 година, што је краће од индикативног пројектног века који EN 1990:2002+A1:2005 (т. 2.3, табела 2.1) предвиђа за мостове и сличне инжењерске конструкције. Циљеви (стр. 4) и закључци период од 20 година наводе тачно.

Метод је у основи примерен предмету: сопствени оглед с еталонским узорцима, праћење у времену, статистичка обрада, нумеричка и аналитичка анализа. Неколико његових особина ипак ограничава домет закључака. Две серије узорака (уграђене у мају 2013, односно крајем 2013. и почетком 2014) разликују се по коефицијенту k и моменту притезања, по укупној дебљини и старости премаза, а код половине HV завртњева другог дела огледа и по начину притезања. Рад их здружује без приказаног поређења истих група између серија. Уз то, у другом делу огледа премаз је при уградњи HBT завртњева био стар око пет и по недеља, а при уградњи HV завртњева око једанаест недеља; пошто пузање премаза чини велики део дугорочног губитка, та разлика оптерећује поређење HV и HBT, док су у првом делу огледа оба типа уграђена истог дана. Навој свих HV завртњева механички је очишћен од дела цинка (стр. 51), а притезани су у једном кораку на пуни момент, што рад образлаже упоредивошћу с HBT; последице тог избора размотрене су у одељку VI.

IV Преглед стања: спојна средства, премаз, коефицијенти трења и губици силе

Преглед стања није само препричана литература. Његова највреднија страница јесте домаћа грађа с моста „Газела“: 48 узорака, с утицајем времена између наношења премаза и притезања на коефицијент трења (0,29–0,38 после једног до три дана, 0,42–0,50 после шест до десет дана, табеле 2.2–2.4). Из те грађе проистекло је технолошко правило примењено на објекту: „Pokazalo se da je najbolje zavrtnjeve pritegnuti nakon 72h od nanošenja premaza, a opterećenje na konstrukciju naneti najmanje nakon 10 dana.“ (стр. 25). Преглед отворено именује најближег претходника и каже шта је од њега преузето: „U domenu ispitivanja sprovedenih sa cink-silikatnim

premazom i zavrtnjevima sa zaključavanjem može se reći da je ova teza iskorišćena kao pilot istraživanje na osnovu kojeg je definisana i postavka dela eksperimenta sprovedenog u ovoj disertaciji.“ (стр. 40). Верно преноси и ограничења тог претходника: „U zaključku koji se odnosi na ovaj deo istraživanja, naglašeno je da se izvedeni izrazi odnose na konkretne uslove i uzorke, i da ih treba uzeti sa rezervom.“ (стр. 44). Изрази за флексибилност по VDI 2230 (2.12–2.24) и структура губитака по Kammel и Sedlacek дају теоријски оквир на коме се касније граде сопствени изрази.

Неколико места у прегледу ипак треба исправити или допунити.

Реченица из увода да утицај „ovakvog premaza“ на губитке „nije istražen“ (стр. 3) тачна је за конкретни премаз Resist 86 и домаћу примену. Као општа тврдња о цинк-силикатним премазима не би била тачна, јер Heistermann (2011), коју рад на стр. 40–45 и сам приказује као пилот-истраживање, испитује цинк-етилсиликатни премаз с HBT завртњима. Увод је требало да каже шта дисертација додаје у односу на то истраживање: други премаз, HV и HBT у истом огледу, еталонске узорке, три дужине и дуже праћење. Тврдња да губитак „dominantno zavisi od vrste i debljine antikorozione zaštite“ (стр. 2) шира је од наведених извора и од налаза самог рада, по коме премаз чини око половине дугорочног губитка. Радови Yang и DeWolf, на које се та тврдња ослања, у одељку 2.5 нису приказани, иако баш они описују механизам на коме рад почива: релаксацију високовредних завртњева услед пузања премаза, која смањује носивост споја на смицање (Yang, DeWolf, 1999). Два наведена извора те групе испитују, уз то, само дебљину топлог цинковања, што за поцинковане спојеве налазе и Kulak, Fisher и Struik: „The relaxation characteristics of assemblies of galvanized plates and bolts were found to be about twice as great as plain bolts and connected material. The amount of relaxation appeared to be related to the thickness of the galvanized coating.“ (Kulak, Fisher, Struik, 1987, т. 4.4, стр. 62). Преглед је зато непотпун управо у делу о губицима услед превлаке.

Закључак на стр. 32, да Husson-ове вредности искључују цинк-силикатне премазе из класа A и B („što onemogućava njihovu primenu u kategoriji tarnih spojeva A i B definisanih standardom [29]“, стр. 32), не следи из извора. Те вредности нису фактори трења по EN 1090-2, него однос највеће носивости и силе у завртњима на моделима монтажног наставка, што рад на стр. 31 и сам бележи. Изворник изричито упозорава: „Therefore the values given in the tables should not be compared directly to those available in the literature.“ (Husson, 2008, стр. 42). Истим премазом Husson стандардним огледом добија вредност изнад границе класе B: за премаз означен као „Ethyl silicate zinc rich paint“ средњи коефицијент трења износи 0,45, уз варијацију око 12 % на шест епрувета (Husson, 2008, прилог A, стр. 150). Реченица не утиче на сопствене резултате рада. Сличне природе је изостанак напомене уз табеле 2.9 и 2.10

да су Cruz, Simões и Alves за више обрада, због неуспелог огледа пузања, предложили умањене вредности, као и тврдња на стр. 29 о Влајићевим вредностима, која не важи за метализацију чистим алуминијумом (табела 2.7, μ = 0,363).

Одељак 2.1 о систему „Huck BobTail“ на више места преузима тврдње произвођача без извора и без ограде: навој „6 do 10 puta“ чвршћи (стр. 12), контакт на 30–35 % навоја (стр. 17), особина „maintance free“ (стр. 18). Та последња особина пренета је без услова који је немачко одобрење за исти систем изричито поставило: „Die Schließringbolzensysteme sind bezüglich der Vorspannung bei ordnungsgemäß ausgeführten Verbindungen (z. B. unmittelbares Aufeinanderliegen der Bauteile, keine unzulässigen Beschichtungen / Beschichtungsdicken) wartungsfrei.“ (DIBt, 2011, т. 5). Ограда о премазима битна је баш за спојеве какве рад испитује. У корист рада треба одмах рећи да он сопственим огледом управо ту ограду показује на делу, великим губицима кратких HBT с премазом (стр. 201); одељак 2.1 и закључак 5 требало је зато повезати. Одобрење је уз то наведено само преко вести произвођача [21], без броја и с годином 2013 уместо 2011. Закључак из тезе Heistermann (2011) пренет је јаче него у извору: рад пише да „svakako treba dati prednost TCB zavrtnjevima“ (стр. 42), а изворник то даје као оквирну препоруку уз захтев за даљим огледима: „The findings here imply a tentative recommendation for the use of TCB instead of structural bolts in combination with NordLock washers.“ (Heistermann, 2011, одељак 4.2). У приказу истог огледа (стр. 41–45) има и ситнијих нетачности (број узорака, број заштићених површина, корак промене цикличног оптерећења), док су укупан број циклуса и границе спектра пренети тачно. Историјски увод о фирми Huck (стр. 8–10) има неколико омашака у односу на сам извор на који се позива (нпр. „Willow Plant“ (стр. 9) уместо Willow Run и 1956. уместо 1952. као година смрти оснивача, стр. 8; Alcoa, 2007), без утицаја на резултате.

Статус домаћег стандарда за испитивање трења описан је противречно (стр. 24, 27 и 52); о томе в. одељак VIII.

Два израза пренета из литературе не могу се применити онако како су записана. Изрази 2.30 и 2.31 (стр. 44), из Heistermann (2011), деле t са $31{,}536 \cdot 10^6$, дакле с бројем секунди у години, а t је дефинисано у годинама. Израз даје смислене вредности само ако се t унесе у секундама, што рад, као ни изворник, не каже; у сопственим изразима у поглављу 5 те недоследности нема. У приказу модела Nah и сарадника (стр. 40) величина из израза 2.28 названа је напоном пузања, иако по реду величине (10^{-5}) и по улози у изразу 2.29 може бити само подајност пузања. Јединице коефицијената и времена у тим изразима нису дате, па читалац из самог записа не може да утврди у којим се јединицама израз примењује.

V Оглед, мерни систем, калибрација и узорци

Калибрација је окосница поузданости рада и о њој је у одељку II речено оно што јој припада. Неколико питања ипак остаје отворено.

Прво, рад не наводи бројчано мерило прихватања калибрационе праве ни несигурност нагиба. Тврдња да ће напрезање при калибрацији „u potpunosti odgovarati naprezanju nakon ugradnje u uzorak“ (стр. 85) јача је од показаног: НВТ завртњи калибрисани су с подлошком испод главе које у узорку нема, а рад и сам наводи да алат уноси савијање (стр. 103). Завртњи су, уз то, калибрисани до око 170 kN, а највеће силе при уградњи НВТ износе у просеку око 232 kN; почетни део записа очитан је, дакле, продужењем линеарне калибрационе праве изван калибрисаног опсега. То је физички оправдано док је тело на месту траке еластично, али није проверено, као ни однос тог продужења према пластификацији кратких НВТ. Сама калибрација ипак је ваљано замишљена: трака је у средини стезне дужине, сила калибрације једнака је сили при уградњи, а линеарност у свим циклусима проверена је за сваки завртањ.

Друго, мерна несигурност силе у завртњу није исказана. Рад не наводи класу тачности ни еталонирање кидалица Schenck 400 kN и MTS ±500 kN, иако тачност сваке измерене силе зависи од калибрације на првој. Водич за исказивање мерне несигурности препоручује да се, кад се исказује резултат мерења, „describe clearly the methods used to calculate the measurement result and its uncertainty from the experimental observations and input data“ (JCGM 100:2008, т. 7.1.4), а Међународни речник метрологије калибрацију одређује као радњу којом се успоставља однос између вредности које дају еталони, с њиховим мерним несигурностима, и показивања с придруженим несигурностима (JCGM 200:2012, т. 2.39). Стабилност мерног система у трајању од 24 до 60 недеља није посебно проверена: нема контролног неоптерећеног завртња ни поновне провере нуле, није описано пребацивање трака с мерног система MGCplus на логер DT85G, а испитивање којим се оправдава седмодневно осредњавање („vrednosti sile prednaprezanja određivane su osrednjavanjem rezultata u periodu od sedam dana“, стр. 114) није приказано. Ни температура и влажност простора у коме су узорци чувани нису наведени, иако Водич међу изворима несигурности изричито наводи „inadequate knowledge of the effects of environmental conditions on the measurement or imperfect measurement of environmental conditions“ (JCGM 100:2008, т. 3.3.2 d)). Резолуција од око 0,05 kN далеко је испод губитака о којима рад закључује, табеле на месту преласка на логер не показују видљив скок, а узорци с премазом и без њега чувани су заједно, па ове празнине не доводе у питање главне бројеве. Оне ипак отежавају независну процену тачности дугорочних губитака и екстраполације.

Треће, у опису премаза и узорака има нетачних сажетака, иако су сама мерења потпуно објављена. Реченица „Dobijene su debljine premaza u propisanim granicama, između 50 μm i 100 μm“ (стр. 69) не слаже се с табелом 3.13, по којој произвођач прописује 50–90 μm, ни с мерењима: двадесетак средњих вредности по страни плоче мање је од 50 μm, скоро све у другом делу огледа. Разлика у укупној дебљини премаза између два дела огледа (око 390 наспрам око 330 μm) није искоришћена у анализи губитака. По табели 3.12 први слој премаза у другом делу огледа нанет је при температури подлоге само 0,9 °C изнад тачке росе, док рад наводи услов од најмање 3 °C (стр. 66), па тврдња да су услови наношења били у складу с прописаним за тај слој не стоји.

Четврто, опис уводних испитивања није доследан на месту које носи закључак 1: по одељку 3.3 епрувете за коефицијент трења испитане су „24 h nakon pritezanja“ (стр. 53), а по прилогу А одмах после притезања; Sμ и Cv за M20 у табели 3.7 не слажу се с појединачним вредностима из прилога А, мада се средња вредност (0,47) тиме не мења. Коефицијент k, из кога је изведен момент притезања, одређен је на три, односно шест завртњева, без завртњева дужине 50 mm; пошто је сила мерена непосредно, то утиче само на избор момента, не на измерене губитке.

Пето, динамички оглед је добро замишљен, али мерен ређе него што рад сам тражи. Спектар је изведен за сваки узорак из измерене силе у завртњима, а клизање је надзирано у обе тарне равни. Сила у завртњима бележена је, међутим, с 1 Hz, иако рад наводи да је при динамичком оптерећењу потребно 10 Hz (стр. 83), а оптерећење је деловало с 10 Hz, па промена силе унутар циклуса није измерена. Губитак силе, на коме почива закључак 7, праћен је у паузама између серија циклуса и упоређен пре и после оптерећења, па тај закључак није погођен.

VI Резултати и обрада: губици, екстраполација и коефицијент ξ

Поглавља 4 и 5 садрже најјаче и најслабије место рада, на размаку од неколико страна. Најјаче је већ описано: потпуна, проверљива грађа и еталонски узорци. Најслабије је однос између табела и закључака, и о њему треба говорити редом.

Закључак 5 у два своја дела не одговара табелама рада. Он гласи: „Bez obzira na primenjeni tip zavrtnja, uticaj AKZ na ove gubitke je zanemarljiv. Svi ispitivani zavrtnjevi, osim HBT dužine 55 mm, nakon 12 h od ugradnje, imali su silu prednaprezanja veću od minimalne propisane vrednosti.“ (стр. 201).

Први део понавља реченицу по којој „uočljivo je da se uticaj antikorozione zaštite, u vidu cink-silikatnog premaza, na inicijalne i kratkoročne gubitke sile prednaprezanja može zanemariti.“ (стр. 150). Табеле 5.2 и 5.4 показују, међутим, да завртњи у узорцима с премазом између 10. секунде и 12. сата губе приближно двоструко више силе него у

еталонским узорцима: HBT 4,3–7,9 % наспрам 2,2–3,6 %, HV 6,5–8,3 % наспрам 2,7–4,0 %. Код HV завртњева разлика од четири до пет процентних поена остаје и кад се губитак мери од највеће силе. Занемарљив је утицај премаза на иницијалне губитке, до 10 s, и спајање узорака у одељку 5.2.1 тиме је оправдано. Утицај на краткорочне губитке није занемарљив. Ова разлика дотиче тезу рада, јер показује да премаз почиње да делује већ у првим сатима, а не тек у дугорочном домену.

Други део закључка противречи и табелама и тексту поглавља 5. После 12 сати испод минималне прописане силе нису били само HBT 55 mm, него и HBT 70 mm у узорцима с премазом (164,1 наспрам 170,7 kN, 3,9 %) и свих шест група HV завртњева, с премазом и без њега (159,0–169,9 наспрам 171,5 kN, 0,9–7,3 %). Рад то за HV сам објашњава: „Ove rezultate treba uzeti sa izvesnom rezervom, s obzirom na metodu ugradnje zavrtnjeva moment ključem.“ (стр. 152). Завртњи су, наиме, притезани у једном кораку на 100 % момента, уместо двостепеног поступка из EN 1090-2:2008+A1:2011 (први корак 75 %, други 110 %). Та ограда је разложна, али није пренета у закључак, где је требало да стоји. Уз то, реченица на истој страни распон 0,9–7,3 % везује само за узорке с премазом, а он важи за све HV групе.

Остали закључци о иницијалним и краткорочним губицима стоје уз мање исправке.

Закључак 3, да „Najveći deo gubitaka sile prednaprezanja nastaje u prve dve sekunde nakon ugradnje HBT zavrtnjeva, odnosno u prvih 10 sekundi nakon ugradnje HV zavrtnja.“ (стр. 201), тачан је за HBT, код којих иницијални губитак (21–44 %) далеко премашује каснији. За HV је тачно само да се иницијални губици завршавају у првих 10 s, док је њихов износ (око 3,5–5 %) мањи од губитака који настају касније (5,5–14,7 % до 24. недеље). Границе од 10 s и 12 h одговарају пилот-истраживању [48] и као референтни тренуци су разложне, али израз „završetak perioda kratkoročnih gubitaka“ (стр. 105) описује конвенцију, не физичку границу.

Закључак 4 даје смањење иницијалних губитака при притезању обичним кључем од 18 до 28 %. Горња граница почива на вредности 5,0 % на слици 5.6 за HV 50 mm уграђене момент кључем, а из шест вредности у табелама 4.6 и 4.8 излази 4,50 %; распон зато треба да гласи око 18–22 %. Разлике износе 0,7–0,9 процентних поена на по шест завртњева, без приказаног расипања и провере значајности, а поређење није вођено при једнакој почетној сили, па налаз треба схватити као указивање на тренд, чији је смер исти у све три дужине. Тумачење да је узрок самоодвртање навртке вероватна је хипотеза изведена из нагиба кривих, а обртање навртке није мерено; исти ток силе могао би бити последица и еластичног торзионог поврата завртња при скидању кључа, па је реч „nedvosmisleno“ („nedvosmisleno ukazuje na pojavu samoodvrtanja navrtke“, стр. 155) прејака. Разлика у брзини уношења и пада силе између два кључа при томе је јасно показана.

Закључак о силама при уградњи има и тачан, уско формулисан део: коефицијент варијације 4,3 % наспрам 8,5 % (закључак 2). Треба само додати да вредност за HV обухвата и завртње притегнуте обичним кључем уз праћење силе, па не описује чисто расипање притезања момент кључем. Смер закључка тиме није доведен у питање.

Динамичко оптерећење. Рад закључује да се утицај експлоатационог динамичког оптерећења „može se zanemariti“ (стр. 201). Упарено мерење истих завртњева пре и после 2×10^6 циклуса даје поуздану горњу границу утицаја за испитане услове. Треба ипак рећи на чему закључак почива: на шест узорака (18 завртњева), по један за сваку конфигурацију, сви с премазом. Граница од 1,5 % („Na osnovu ispitanih šest uzoraka (18 zavrtnjeva) može se zaključiti da su gubici sile prednaprezanja manji od 1,5%.“, стр. 157) односи се на средње вредности по узорку (0,13–1,36 %), а појединачни губици достижу 1,93 %. Упоредни узорци без динамичког оптерећења у истом интервалу нису приказани, па измерене вредности обухватају и временски губитак током огледа. Тврдња да је тренутни пад силе до 5 % под оптерећењем „posledica je isključivo poprečne kontrakcije čeličnih ploča“ (стр. 158) с разлогом се ослања на повратак силе по растерећењу, али није показана ни прорачуном ни искључењем других повратних утицаја. Закључак 7 зато треба читати као налаз за испитани режим, не као опште правило; да је утицај мали према дугорочним губицима, тиме није доведено у питање.

Дугорочни губици и екстраполација на 20 година. Референтни тренутак 10 s после највеће силе промишљено је изабран: „kao referentni trenutak za određivanje dugoročnih gubitaka koristi se vrednost sile prednaprezanja u trenutku 10 sekundi nakon dostizanja maksimalne vrednosti“ (стр. 160). Тиме се утицај поступка уградње одваја од понашања споја, па губици HV и HBT постају упоредиви. Изрази 5.1–5.6 су, међутим, логаритамске регресије средњих вредности измерених током 24 недеље, продужене на 20 година (око 43 пута дуже), без исказане несигурности. Измерене вредности на крају записа леже у свих шест група 0,2–0,9 процентних поена изнад криве, најизразитије код HBT 55 mm, за коју екстраполисана вредност зато није на страни сигурности. Резултати првог дела огледа до 60 недеља дати су у табелама 4.9–4.31 и могли су послужити као провера екстраполације, али поређење у поглављу 5 није приказано, иако рад каже да су ти подаци коришћени за процену тренда (стр. 113). Стандард који рад сам бира као оквир обраде у информативном анексу D о томе изричито каже: „The result of a test evaluation should be considered valid only for the specifications and load characteristics considered in the tests. If the results are to be extrapolated to cover other design parameters and loading, additional information from previous tests or from theoretical bases should be used.“ (EN 1990:2002+A1:2005, анекс D, т. D6). Анекс је информативан и екстраполацију не забрањује; тражи додатну подлогу, коју рад делом има у литератури о губицима. Рад то зна и сам: у приказу пилот-истраживања бележи да је „relativno kratak vremenski

period s obzirom na period ekstrapolacije od 20 godina“ (стр. 44) праћење од 40 недеља. Закључци 10 и 11, по којима се губитак може проценити „u bilo kom trenutku u toku eksploatacije konstrukcije“ (стр. 202), зато прецењују домен израза. Вредности за 20 година треба читати као процену реда величине за испитане завртње M20, премаз Resist 86 и дате стезне пакете, а не као пројектну вредност.

Карактеристичне вредности. Рад каже да је њихово одређивање „sprovedeno je u svemu prema odredbama standarda EN 1990:2002 [54]“ (стр. 163). Поступак из анекса D примењен је, међутим, аналогно: на поновљена мерења истих завртњева, с правом провученом кроз добијене фрактиле, а три завртња истог узорка деле плоче, премаз и услове уградње. Исти анекс поставља услов који то питање отвара: „The methods given in this Annex may be used only when the following conditions are satisfied: the statistical data (including prior information) are taken from identified populations which are sufficiently homogeneous; and a sufficient number of observations is available.“ (EN 1990:2002+A1:2005, анекс D, т. D6). Број завртњева по групи и тренутку, од кога зависи kn (3,37 за n = 3, 2,18 за n = 6), није наведен. Тако добијене вредности описују расипање у сваком тренутку, а не фрактил предвиђања за 20 година; оне су показатељ расипања резултата, а не, како рад каже, „dobar su pokazatelj pouzdanosti sprovedenog eksperimenta“ (стр. 163). Главни закључци почивају, ипак, на средњим вредностима и на великим разликама између узорака с премазом и без њега, па ова замерка не погађа њихову суштину.

Коефицијент ξ и граничне вредности. Увођење коефицијента ξ као односа стварне и минималне прописане силе јесте пројектно употребљива идеја, а различит праг за HBT, које се не могу дотезати, образложен је. Прагови ξ = 0,90 за HV и 1,00 за HBT су, међутим, инжењерска процена, а не прорачун носивости на проклизавање. Праг 0,90 изведен је из односа 100 % и 110 % момента притезања; EN 1090-2:2008+A1:2011 дозвољени губитак не прописује, а коефицијент 1,10 при притезању покрива расипање фактора k. Као инжењерски праг је прихватљив, али га из стандарда није могуће извести, и то је требало рећи. Референтна сила за HBT M20 (170,7 kN) узета је из нацрта техничког правила DVS/EFB [22], у раду погрешно позваног као [20]: „za HBT zavrtnjeve M20, prema nacrtu standarda [20] Fp,C=170,7 kN“ (стр. 96). Одобрење DIBt Z-14.4-591 из 2011, које је у тренутку предаје важило за исти завртањ, у табели 4 даје за M20 F_{p,C^*} = 179,3 kN. Избор мање вредности захтевао је образложење, тим пре што нацрт није јавно доступан, па се вредност не може независно проверити. Треба одмах рећи да би вредност из одобрења снизила ξ за HBT, налаз о недовољној сили кратких HBT само појачала, а граничну дужину HBT померила навише. Губитак код HV 90 mm назван је „gotovo zanemarljiv“ (стр. 167), иако је по истом раду ξ после 20 година 0,89, испод усвојеног прага 0,90, а губитак у односу на силу после 10 s 14 %. Вредности ξ за 20 година у табели 5.10 за

HV 70 и 90 mm (0,86 и 0,89) за 0,01–0,02 су ниже од оних које дају сопствене криве са слике 5.17; одступање је на страни сигурности, али утиче на тачку прелома зависности ξ–L.

Гранична дужина од 95 mm. Закључак 12 гласи: „Ekstrapolacijom usvojene bi-linearne zavisnosti između koeficijenta ξ i dužine zavrtnja L, na čitav opseg dužina primenjenih zavrtnjeva, može se zaključiti da je fenomen gubitka sile prednaprezanja u viskovrednim HV i HBT zavrtnjevima zanemarljiv za zavrtnjeve dužine veće ili jednake od 95 mm.“ (стр. 202). Избор би-линеарне функције образложен је поређењем с параболом, која „nije dala realnu sliku izvan opsega dužina korišćenih zavrtnjeva“ (стр. 168), што показује свест о ризику екстраполације. Сам резултат је, ипак, прва процена. Права је провучена кроз две средње вредности ξ изнад 70 mm (70 и 90, односно 85 mm), с преломом изабраним на 70 mm, изван испитаног опсега и из вредности ξ које су саме екстраполисане на 20 година. Несигурност није исказана, а карактеристичне вредности нису коришћене. Рачунски пресек с прагом износи око 96,7 mm за HV и 94,9 mm за HBT. Тврдња да се праве „mogu se ekstrapolirati na čitav opseg dužina definisanih standardom“ (стр. 168), до 155 mm за HV, није поткрепљена. Рад на две суседне стране говори различитим тоном: најпре опрезно, „Ukoliko bi se želela odrediti granična dužina HBT i HV zavrtnjeva, iznad koje je gubitak sile prednaprezanja zanemarljiv, neophodno je sprovesti detaljniju analizu.“ (стр. 167), а затим без ограде, „jasno se može uočiti da je za zavrtnjeve (HV i HBT) dužine veće ili jednake 95 mm, fenomen gubitaka sile prednaprezanja minoran, pa se može zanemariti.“ (стр. 169). Значење границе ограничено је, уз то, на усвојени критеријум: сила после 20 година по екстраполацији не пада испод 0,90, односно 1,00 минималне прописане; губитак изнад те дужине и даље постоји. Као меродаван параметар примереније је навести дебљину стезног пакета, како рад и сам каже (стр. 199). Вредност од 95 mm треба зато читати као оријентир за даља испитивања, за M20 и шест премазаних површина, како је рад на стр. 167 и најављује, а не као пројектну границу.

Остали закључци. Закључак 8, да су дугорочни губици израженији код HV него код HBT, важи за стезне пакете од 35 и 55 mm. За пакет од 18 mm однос је обрнут и без премаза и с премазом (HBT 55 mm 8,67 и 16,40 %, HV 50 mm 7,24 и 14,65 % после 24 недеље), а губици су изражени у односу на силу после 10 s, која се код та два типа знатно разликује. Закључак 9 наводи да је удео пузања премаза изведен „Na bazi rezultata registrovanih na 128 zavrtnjeva“ (стр. 202). Број 128 одговара броју припремљених завртњева с мерним тракама у оба дела огледа (56 + 72, стр. 102–103), а не броју завртњева на којима почива удео од око 50 %: уграђено је 126, дугорочно праћено највише 108, уз искључене. Удео премаза добијен је као разлика средњих дугорочних губитака група с премазом и без њега, што је разуман поступак; он, ипак, обухвата цео временски зависан губитак у слоју премаза, не само пузање, и дат је без расипања и несигурности.

Грешке у табелама. Табеле су у целини уредне, а грешке су појединачне. Примера ради: у табели 4.1 трећи узорак погрешно је означен са „7“, а његови завртњи са H90B01–H90B03 уместо H85B01–H85B03; сила у D70B03.1 после 12 h у табели 4.6 (158,7 kN) не слаже се с табелом 4.26 (169,2 kN) и ушла је у средњу вредност D70B у табели 5.4, али без утицаја на закључке. Критеријум за искључивање код дугорочних губитака („naglom priraštaju ili gubitku“, стр. 115) није бројчано одређен, а тврдња да се такви скокови могу објаснити „jedino kao posledica“ (стр. 115) проклизавања траке прејака је, јер рад сам наводи и оштећење веза с мерним системом (стр. 141).

VII Нумерички модели, флексибилност и реолошка својства премаза

Повезивање огледа, нумеричког модела и аналитичког израза најчвршћи је део поглавља 5. Модел је проверен према измереним дилатацијама на месту мерне траке при пуној сили (табела 5.12). Из њега је објашњено систематско одступање трака од номиналне дилатације: „Uvećane dilatacije na mestu merne trake mogu biti posledica tri fenomena“ (стр. 176). Затим су проверени изрази VDI 2230 за HV и предложене исправке замењујућих дужина: „na osnovu prikazanih rezultata ovde se predlažu modifikovane preporuke“ (стр. 182), lglave = 0,55d и lnavrtke = 0,65d уместо 0,5d и 0,4d. С њима разлика укупне флексибилности у односу на модел пада са 7 на 1 %. За HBT, за које у литератури коју рад приказује таквих израза није било, дат је први скуп замењујућих дужина и пречника делова завртња (изрази 5.19–5.28), у слагању с моделом у оквиру неколико процената. Табеле флексибилности 5.13–5.18 рачунски су беспрекорне.

Неколико ограничења ипак треба рећи, јер одређују колико се ти изрази смеју уопштавати.

Опис модела у одељку 5.5.1 не садржи величину мреже, проверу конвергенције ни проверу квазистатичности експлицитног решења с масеним скалирањем. Најављено поређење сила–померање с калибрацијом није приказано. Без тих података модел се не може независно поновити, нити се може знати колико резултат зависи од мреже и брзине оптерећења. Коефицијент трења 0,14 у контактима модела нема извора ни образложења; за аксијалну флексибилност његов утицај је вероватно мали, али није показан. Валидација се своди на однос дилатација на месту траке у једној тачки, при пуној сили, што потврђује модел у тој тачки, али не и у целом опсегу. Разлика модела и огледа износи 1,5–5,7 %, а не 1–5 % како каже текст, јер се вредности αEXP за HV у табели 5.12 не добијају тачно из колона исте табеле; разлике су мале и не мењају оцену да модел добро прати калибрацију.

Исправке замењујућих дужина главе и навртке HV изведене су на једном завртњу M20 × 90 у моделу с језгром навоја 16,1 mm и зазором навоја 0,025 mm, који повећава секантну попустљивост навртке. Провера на дужинама 70 и 50 mm мења само призматичне делове. Предлог је зато калибрација модела за M20, која у скраћењу навртке садржи и затварање зазора навоја, а не проверена измена смернице VDI 2230 за општи случај; уосталом, већ изворни изрази дају укупну флексибилност с разликом од око 7 %. Исто важи за HBT: изрази су изведени из модела једног завртња M20 × 85, коефицијенти 0,98 и 0,91 су измерени пречници тог завртња подељени са 20, а провера на 70 и 55 mm мења само слободни навој. Реч је о првом, корисном скупу вредности за HBT M20, а не о општим изразима за флексибилност HBT завртњева. Тврдња да мања концентрација дилатација „svakako ukazuje na poboljšanu otpornost na zamor zavrtnjeva tipa HBT“ (стр. 181) није поткрепљена огледом на замор: при статичком преднапрезању она указује на повољнији однос, али амплитуда додатне силе у завртњу није анализирана.

Објашњење великих иницијалних губитака кратких HBT пластификацијом тела завртња вероватно је, али није показано. У закључку 5 оно је исказано као утврђено („što kod najkraćih dovodi do plastifikacije tela zavrtnja“, стр. 201), а раније опрезније: „Ovo ujedno može biti i razlog većih inicijalnih gubitaka sile prednaprezanja u slučaju kratkih HBT zavrtnjeva“ (стр. 187). По слици 5.31 одступање од линеарности код HBT 55 почиње тек нешто раније (за 10–20 kN) него код дужих завртњева, а изразита пластификација код све три дужине наступа при око 240 kN. Трајно издужење завртња није мерено. У закључку је требало задржати облик са стр. 187.

Флексибилност стезног пакета и дилатација премаза. Ово је најтежа рачунска замерка раду и зато је треба изрећи прецизно. Вредности флексибилности стезног пакета $\delta_{sp,A}$ у табели 5.19 ($1{,}76–1{,}95\cdot10^{-6}$ mm/N) не добијају се изразима 5.30 и 5.31 с улазима које рад наводи на стр. 189. Ти изрази дају $0{,}07–0{,}15\cdot10^{-6}$ mm/N, а табела разлику не образлаже. Пошто табела 5.19 улази у израз 5.32, флексибилност споја и из ње изведене промене дебљине и дилатације премаза у одељку 5.6 (табеле 5.20–5.21, изрази 5.37–5.38, вредности „oko 8%“ и 6,5 % после 24 недеље, закључак 14) преувеличане су приближно два до три пута. С флексибилношћу по изразима самог рада средња дилатација премаза после 24 недеље износила би око 4 % за HV и око 3 % за HBT.

Уз то, дилатације су рачунате „Uz pretpostavku o nominalnoj debljini premaza na svakoj od površina“ (стр. 191), дакле с укупном дебљином од 450 µm, иако су за сваки узорак измерене дебљине од 290 до 420 µm (стр. 69). По том основу дилатације су потцењене, за просечне измерене дебљине за око петину до четвртине, у супротном смеру од прецењења које долази од табеле 5.19; с измереном дебљином дилатација за HV износила би око 5 %. Претпоставка о номиналној дебљини у раду је изречена. Флексибилност самих завртњева и мерени губици силе на ово не утичу. Остаје

квалитативни налаз да премаз под заврtњем трпи трајну, нееластичну промену дебљине која расте с логаритмом времена; бројеви у закључку 14 морају се прерачунати.

Изрази 5.37 и 5.38 изведени су из разлике средњих губитака група с премазом и без њега, за све серије и начине уградње заједно, и дати су без мере расипања; треба их схватити као средњи тренд за испитане спојеве. Рад исту појаву у премазу назива пузањем, пластификацијом и променом дебљине, а пластификацију закључује из величине трајне дилатације („Jasno je da prednaprezanjem zavrtnjeva dolazi do plastifikacije slojeva cink silikatnog premaza“, стр. 192), без познате границе течења премаза. Тачније би било говорити о трајној деформацији премаза која расте с логаритмом времена. Закључак да еластични модел премаза није применљив остаје оправдан.

Одељак 5.6 даје укупну дилатацију шест слојева премаза у времену при номиналном контактном напону, а не реолошки закон материјала. Рад то сам каже на три места, најјасније овде: „Ovakvu pretpostavku nije opravdano koristiti sa obzirom na nivo prikazanih dilatacija, pa je za ovakvu analizu neophodno sprovesti dodatna eksperimentalna istraživanja.“ (стр. 196). Уз то одмах предлаже оглед који би питање решио: узорке с премазом у једном или два слоја, уз еталонске. Израз „reološka svojstva“ у наслову одељка зато прецењује резултат; исто важи за оцену реферата, о којој у одељку X.

Закључак 15 излази из оног што је измерено и у погледу пречника и места дилатације. Независност дилатације премаза од пречника заврtња није измерена, јер је испитан само M20; изведена је из тога што је додирни притисак испод подлошки, односно главе и чауре, приближно исти за стандардни низ пречника. Из самих тачака на слици 5.38 он је, међутим, приближно сталан за M16–M27, али не и за M12 (око 185 наспрам 240–290 MPa), а извор тачака за пречнике осим M20 није наведен. Да се доминантан део дилатације остварује испод подлошки HV, односно главе и чауре HBT, посредно подржава однос измерених дилатација HV/HBT (1,29) и додирних притисака (1,27), али то поклапање почива на једном пару средњих вредности, а расподела по слојевима није мерена. Литература објављена пре 2015. иде у прилог смеру тог тумачења: „surface coatings beneath the bolt head and nut can contribute to additional reduction in pretension“ (RCSC, 2014, коментар уз т. 3.2.1). Рад ове исказе исправно означава као хипотезе: „Ovi zaključci se mogu potvrditi sprovođenjem dodatnih eksperimentalnih istraživanja.“ (стр. 199). У закључак 15 они су пренети као утврђени, без те ограде, а место дилатације је ту омашком „ispod navrtki HV zavrtnjeva“ (стр. 203), док одељак 5.6 тачније каже: испод подлошки, с обе стране споја.

Од ситнијих ствари ваља поменути да угао конуса деформације φ = 35° (стр. 189) није образложен, а услов пуног конуса за пакет од 55 mm није испуњен, па је флексибилност тог пакета приближна.

VIII Стандарди, техника, слике, табеле и језик

Стандарди и коефицијент трења. Сопствено испитивање коефицијента трења за премаз Resist 86 описано је на два места противречно. По једном месту изведено је „prema odredbama standarda SRPS EN 1090-2:2012 [33] (bivši SRPS U.E7.140:1985.)“ (стр. 24), а по другом и по прилогу А поступак је спроведен „u svemu prema standardu SRPS U.E7.140:1985 [32]“ (стр. 52). Стварно је спроведен по поступку повученог SRPS U.E7.140:1985: три епрувете по пречнику, средња вредност, без продуженог огледа пузања. Намера је била разумљива, упоредивост с испитивањем за мост „Газела“. Ни статус тог стандарда није тачно исказан: на стр. 24 назван је „bivši“, а на стр. 27 и 52 стоји да уз SRPS EN 1993-1-8:2012 „uporedo važi“. Као опис тадашње домаће праксе реченица са стр. 27 није без основа, али SRPS U.E7.140:1985 није претходник SRPS EN 1090-2: решењем Института за стандардизацију Србије од 25. јула 2012. донет је SRPS EN 1993-1-8 и истим актом повучен SRPS U.E7.140:1985. Резултат зато није класификација по важећем поступку. Еврокод за пројектовање веза тражи да се коефицијент трења за обраду која није у табели одреди огледом по референтном стандарду групе 7: „NOTE 2: The classification of any other surface treatment should be based on test specimens representative of the surfaces used in the structure using the procedure set out in 1.2.7 Reference Standards: Group 7.“ (EN 1993-1-8:2005, табела 3.7, напомена 2). Тај референтни стандард је EN 1090-2:2008+A1:2011, чији анекс G прописује оглед коефицијента трења с огледом пузања. Изостанак огледа пузања стварно је ограничење баш за премаз који пузи, што је предмет рада.

Бројчано, резултат ипак стоји: свих шест појединачних вредности лежи између 0,45 и 0,52, а средње вредности износе 0,50 (M16) и 0,47 (M20). Сам рад каже да се тиме „u najnepovoljnijem slučaju, dobijaju spojevi kategorije hrapavosti B, prema EN 1993-1-8 [29]“ (стр. 53). Класа B је бројчано одржива, али оријентациона. Закључак 1 иде даље: „što je dovoljno da se predmetni spojevi mogu svrstati u kategoriju hrapavosti A ili B, prema važećim standardima [29]“ (стр. 200). Класа A одговара само резултату за M16 и испитивањем није поткрепљена за премаз у целини. Закључак 1 спаја, уз то, сопствене резултате (десет дана после наношења премаза) с резултатима за „Газелу“, одакле потиче распон од 7 до 10 дана, и с декларацијом произвођача о корозионој заштити, коју рад није испитивао. Та три извора требало је у закључку раздвојити.

Назив који рад употребљава за класе тарних површина није назив из стандарда. Рад пише „za kategorije hrapavosti spoja A i B“ (стр. 23) и „u kategoriji tarnih spojeva A i B“ (стр. 32), чиме се класе тарних површина A–D мешају с категоријама спојева A–E из истог стандарда. EN 1993-1-8:2005 у табели 3.7 говори о класама тарних површина

(„Class of friction surfaces“), с вредностима μ од 0,5 за класу A до 0,2 за класу D; на стр. 28 и 34 рад употребљава исправан појам. Величина k ($M = k \cdot d \cdot Fp$) у наслову одељка 3.2.3 названа је „Koeficijent trenja između navoja navrtke i tela HV zavrtnja“ (стр. 51). По серији EN 14399 то је k-вредност комплета, која обухвата трење у навоју и под наврtком; за класу K1 појединачне k-вредности, кад се захтевају, морају бити у распону $0{,}10 \leq ki \leq 0{,}16$ (DIN EN 14399-4:2006, т. 7.5.1). Величина је правилно одређена и употребљена, а измерене средње вредности (0,154 и 0,138) леже у том распону; нетачан је само назив.

Смерница VDI 2230 [41] на шест места означена је као „VDI 2330“ и названа стандардом, иако је у попису литературе исправно наведена као VDI-Richtlinie; садржај препорука верно је пренет. Слично томе, нацрт техничког правила DVS/EFB [22] назива се „nacrt standarda“, без ознаке документа. Три европска стандарда наведена су и као EN и као SRPS EN ([23]/[33], [29]/[34] и [24]/[73]), а текст за исту одредбу наизменично упућује на оба броја, па није јасно које је издање примењено; садржински то не мења ништа.

Технички запис, слике и језик. Мерни опсег траке BTM-6C записан је као „5000x10-6 μm/m“ (стр. 72), с двоструком јединицом; величина R^2 уз калибрационе праве названа је коефицијентом корелације, а реч је о коефицијенту детерминације; тренутак највеће силе носи у одељку 4.1 ознаку t1, а у одељку 4.2 ознаку t0. Запис бројева у табелама местимично није уједначен, а мерило за то постоји: „For numbers in a table, the format used should not vary within one column.“ (BIPM, 2006, т. 5.3.4). Натписи слика 4.9–4.14 гласе „Slika5.9“–„Slika5.14“, а неколико унутрашњих упућивања води у празно (нпр. „videti poglavlje 5.3“ на стр. 106, треба 4.3). За прву примену цинк-силикатног премаза на тарним површинама моста „Газела“ рад наводи различите године, од 2010 до 2012 (стр. 3, 23, 27, 47), па би требало разликовати испитивање од саме примене. Рад за исте губитке наизменично користи изразе „kratkoročni“ и „kratkotrajni“, „dugoročni“ и „dugotrajni“, а у поглављима 4 и 5 има неколико десетина словних грешака (нпр. „atikorozione“, „ektrapolacije“). Све то треба уклонити лектуром; смисао нигде није угрожен.

IX Научни апарат

Научни апарат је у основи уредан. Сваки број у тексту има јединицу у попису, и свака јединица пописа бар је једном цитирана, што испуњава захтев Универзитета да „У попису литературе не сме бити радова који нису цитирани, ни оних на које се у раду не упућује.“ (Универзитет у Београду, [2013], Докторска дисертација мора да садржи, напомена 2). Литература се наводи по редоследу појављивања у тексту, што исто упутство изричито допушта. Позивања стоје уз тврдњу, а не збирно на крају пасуса.

Главни страни извори приказани су из изворних текстова, необјављени лабораторијски извештаји јасно су означени као такви, а удео новијих радова је висок, закључно с 2014. годином.

Замерке су формалне, али бројне, и у збиру захтевају редакцију пописа. Попис садржи две поновљене јединице: [10] и [40] (Cruz, Simões, Alves, Journal of Constructional Steel Research 70 (2012) 280–288) и [19] и [51] (проспект Alcoa AF1032, 2010), па је различитих наслова 71, а не 73. Јединица [7] спаја ауторе другог издања (Kulak, Fisher, Struik, 1987) с годином првог издања (1974), које потписују само Fisher и Struik, па се не зна које је издање коришћено; међународни стандард о библиографским јединицама тражи управо то: „The edition should be specified in the terms, including symbols, used in the preferred source.“ (ISO 690:2010, т. 8.1). Друго издање постојало је много пре предаје рада и садржи податке о релаксацији поцинкованих спојева који су раду били непосредно потребни. EN 1090-2 [23] наведен је без амандмана A1:2011, који је у тренутку предаје био на снази, а неколико јединица нема годину издања или има изобличена имена аутора.

Неколико позивања не води тамо где треба. Најважније међу њима тиче се мерила за HBT: минимална сила преднапрезања HBT M20 (170,7 kN), основица свих процената и коефицијента ξ за HBT, на стр. 96 и 151 приписана је јединици [20], која је часописни рад аутора о тарним спојевима стубова ветрогенератора, а мисли се на нацрт DVS/EFB [22], на који рад исправно упућује на стр. 198 и у попису ознака (о самој вредности в. одељак VI). На стр. 27 SRPS U.E7.140:1985 носи број [14] уместо [32]. Слика 2.11, с микроснимцима навоја HBT и HV, нема наведен извор, иако упутство Универзитета тражи: „Ако илустрација није изворни допринос аутора обавезно је навођење извора (ако је илустрација већ објављена), односно аутора (ако илустрација још није објављена) од којег је преузета.“ (Универзитет у Београду, [2013], Упутства за обликовање докторске дисертације). Подела губитака на иницијалне, краткорочне и дугорочне уведена је у уводу без позива на извор, иако њени референтни тренуци, како је речено у одељку VI, одговарају пилот-истраживању Heistermann [48], што је требало навести већ на стр. 2. Уз слику 3.39 рад упућује на [48], али не каже шта је од протокола калибрације (циклуси, држање силе) преузето из те тезе.

Захтев да пре подношења дисертације буде објављен рад, за техничко-технолошке науке исказан као „Најмање један рад студента је објављен или прихваћен за објављивање у часопису са SCI листе.“ (Правилник о стандардима и поступку за акредитацију, Сл. гласник РС 106/2006, део VI, стандард 8), а по универзитетском правилнику као подношење дисертације уз „најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у међународном часопису“ (Правилник о докторским студијама Универзитета у Београду, Гласник УБ 155/2010, чл. 20), испуњен је радом у часопису *Građevinar* (2012), што реферат и наводи.

Све ово су ствари редакције. Ниједна замерка на апарат, осим погрешног извора за силу од 170,7 kN, не дира садржину рада.

X Однос рада и реферата комисије

Реферат Комисије у делу који описује метод и тежиште рада одговара стању у тексту. Он тачно бележи да рад почива на сопственом огледу, да су модели методом коначних елемената калибрисани на сопственим резултатима и да је обрада изведена „једноставном статистичком обрадом резултата“. То је тачан опис, у складу с оним што је у одељку VI речено о домету статистичке обраде. Реферат с правом издваја три стварна доприноса рада: да „у досадашњим истраживањима није било ‚еталонских‘ узорака“ који би омогућили квантификацију удела премаза, да закључак о динамичком оптерећењу почива на критичком читању ранијег огледа и доноси ново знање, и да је потврђено да се код кратких HBT завртњева гарантована сила не може остварити. Реферат наводи и објављене радове аутора.

Одељак 4.1 реферата, „Приказ остварених научних доприноса“, готово дословно понавља петнаест закључака дисертације, па у реферат прелазе и ограничења о којима је говорено у одељцима VI и VII, међу њима и закључак 5 без ограде коју рад сам има уз своје табеле. Граничну дужину од 95 mm реферат истиче као посебан допринос, „што је таква гранична дужина први пут одређена“, без ограде коју рад сам ставља на стр. 167. О законитости промене коефицијента ξ реферат каже да она „по први пут омогућава процену преостале силе преднапрезања у завртњу за период од 20 година“, без помена да је реч о екстраполацији 24-недељних мерења.

Једна оцена реферата прелази и оно што рад сам тврди. Реферат наводи: „Дефинисана реолошка својства слојева цинк-силикатног премаза основ су за нумеричко моделирање њиховог понашања у току времена.“ Рад каже супротно: да моделирање премаза као засебног слоја „u ovom trenutku, nije moguća“ (стр. 199), јер модул еластичности и дијаграм σ–ε премаза нису познати. Рад је ту уздржанији од реферата, и у томе је у праву.

Реферат не садржи ниједну замерку; ни одељак 4.2, насловљен „Критичка анализа резултата истраживања“, не садржи замерку. Противречност закључка 5 с табелама 5.2 и 5.4 и рачунска неусклађеност табеле 5.19 видљиве су из самог текста рада.

XI Шта остаје

Дисертација Ненада Фрица озбиљан је и пажљиво изведен експериментални рад, који доноси оно чега у литератури коју рад приказује није било: систематски измерене губитке силе преднапрезања у тарним спојевима с цинк-силикатним премазом, за две врсте завртњева, три стезна пакета и праћење до 60 недеља.

Главни резултати почивају на мерењу које је поуздано колико оглед ове врсте допушта: сваки завртањ појединачно је калибрисан, мерни склоп је описан тако да се може поновити, а грађа је објављена за сваки завртањ. Главни налази стоје: цинк-силикатни премаз приближно удвостручује дугорочне губитке, што је издвојено еталонским узорцима; кратки HBT завртњи не достижу минималну силу; експлоатационо динамичко оптерећење мало утиче на губитак у испитаним условима; исправљени изрази за флексибилност HV и први изрази за HBT M20 употребљиви су за даљи рад. Рад отворено бележи сопствене грешке и ограничења огледа, а тамо где се његови бројеви могу поново израчунати, они у највећем делу држе.

Слабости су, по оцени овог осврта, четири, и ниједна не руши главне налазе. Прва је однос табела и закључака: закључак 5 не одговара табелама рада у два своја дела (одељак VI), а закључци 3, 4, 8 и 9 захтевају исправке које рад већ има у својим табелама. Друга је уопштавање: екстраполација 24-недељних средњих вредности на 20 година, гранична дужина од 95 mm и закључак 15 исказани су као утврђени, иако су оријентациони или хипотетички, што рад на другим местима (стр. 162, 167, 196, 199) и сам каже. Трећа је рачунска и тиче се одељка 5.6: вредности флексибилности стезног пакета у табели 5.19 не следе из израза рада, па су бројеви о дилатацији премаза у закључку 14 преувеличани. Четврта је документованост: мерна несигурност, стабилност мерног система, услови чувања узорака, класа тачности кидалица и опис нумеричког модела нису дати у мери која би омогућила независну процену тачности; коефицијент трења одређен је по повученом стандарду, без огледа пузања; апарат садржи дупликате и погрешне бројеве позивања, међу којима је најважнији извор за минималну силу HBT.

Изнад свега тога стоји једна правилност: мерење и приказ грађе изведени су брижљивије од закључивања. Готово све што треба исправити већ је негде у раду тачно речено, у табели, у огради на суседној страни или у препоруци за даља истраживања, само није пренето у закључке.

Пет измена било би, по оцени овог осврта, најплодније у евентуалном монографском издању или у наставку истраживања. Прво, преформулисати закључке 3, 4, 5, 8, 9, 12 и 15 према табелама рада, а граничну дужину и зависност од броја премазаних површина исказати као хипотезе. Друго, поновити прорачун у одељку 5.6 с флексибилношћу стезног пакета по изразима 5.30–5.31 и с измереним дебљинама премаза, и назвати резултат оним што јесте, трајном дилатацијом премаза у споју, а не реолошким законом материјала. Треће, искористити већ постојеће податке до 60 недеља као проверу екстраполације, а изразе за губитке и ξ дати с мером несигурности, уз навођење броја завртњева по групи; ако се праћење настави до две године, како је планом огледа предвиђено (стр. 46), то би била најдрагоценија допуна. Четврто, додати поглавље о мерној несигурности силе у

завртњу и опис нумеричког модела (мрежа, конвергенција, квазистатичност), и јасно раздвојити сопствено испитивање трења, испитивања за „Газелу“ и податке произвођача. Пето, исправити апарат: уклонити дупликате, навести тачан извор за силу од 170,7 kN и образложити њен избор према вредности из одобрења DIBt, навести друго издање приручника Kulak, Fisher и Struik и уједначити ознаке стандарда. За наставак истраживања сам рад већ даје тачан програм (стр. 203–204): различите дебљине и број премазаних површина, различити пречници, утицај температуре и крупни модели спојева с већим бројем завртњева; њему треба додати само оглед с узорцима у једном и два слоја премаза, који рад предлаже на стр. 196.

Уз ту врсту редакције, која у највећем делу не тражи ново мерење, него да се бројеви из табела доследно пренесу у закључке, ова дисертација остаје вредан и употребљив допринос. Њена грађа о губицима силе у спојевима с цинк-силикатним премазом и о кратким завртњима са закључавањем има шта да каже и пројектанту и извођачу, и заслужује да буде доступна у облику који њени закључци верно преносе.

Литература

Предмет осврта

Фриц, Ненад Т. *Teorijsko i eksperimentalno istraživanje gubitaka sile prednaprezanja u visokovrednim zavrtnjevima* [докторска дисертација]. Београд: Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2015. Репозиторијум Универзитета у Београду (Phaidra / Е-тезе, o:10356).

Буђевац, Драган; Марковић, Златко; Лучић, Душко; Мишковић, Зоран. Извештај Комисије за оцену докторске дисертације Ненада Т. Фрица. Грађевински факултет Универзитета у Београду, 2015 (прихваћен на Наставно-научном већу 19.03.2015; материјал 9. седнице Већа научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду, 21.04.2015; уз реферат је и извештај Комисије за пријем теме докторске дисертације).

Стандарди и технички прописи (издања важећа у јануару 2015)

CEN. EN 1990:2002+A1:2005. *Eurocode — Basis of structural design*. Annex D (informative): Design assisted by testing. Brussels: CEN, 2002; A1: 2005.

CEN. EN 1993-1-8:2005 (са исправком AC:2009). *Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-8: Design of joints*. Brussels: CEN, 2005. Српско издање: SRPS EN 1993-1-8:2012, Институт за стандардизацију Србије, 25.07.2012.

CEN. EN 1090-2:2008+A1:2011. *Execution of steel structures and aluminium structures — Part 2: Technical requirements for steel structures*. Brussels: CEN, 2011. Српско издање: SRPS EN 1090-2:2012, Институт за стандардизацију Србије, 24.09.2012.

DIN. DIN EN 14399-4:2006-06. *Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau — Teil 4: System HV — Garnituren aus Sechskantschrauben und -muttern* (EN 14399-4:2005). Berlin: Beuth, 2006.

Институт за стандардизацију Србије. Решење о донесеним и повученим српским стандардима и сродним документима, Р. број 2279/62-51-02/2012 од 25.07.2012. *Службени гласник РС*, бр. 80/2012.

Research Council on Structural Connections (RCSC). *Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts*. Chicago: RCSC, 01.08.2014.

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-591: Schließringbolzen ohne Abrissteil* (подносилац: Alcoa Fastening Systems Ltd., Telford). Berlin: DIBt, 04.11.2011.

Метрологија, величине и јединице

JCGM. JCGM 100:2008. *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Sèvres: BIPM, 2008.

JCGM. JCGM 200:2012. *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. 3rd ed. Sèvres: BIPM, 2012.

BIPM. *The International System of Units (SI)*. 8th ed. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures, 2006.

Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. (TML). *Installation Manual of TML BTM Bolt Strain Gauges*. Tokyo: TML, 2010.

Спојеви с високовредним завртњевима, премази и губици силе

Kulak, G. L.; Fisher, J. W.; Struik, J. H. A. *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1987 (прештампано: Chicago: RCSC / AISC, 2001).

Yang, J.; DeWolf, J. T. *Mathematical Model for Relaxation in High-Strength Bolted Connections*. Journal of Structural Engineering 125 (1999) 8, 803–809. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:8(803).

Husson, W. *Friction Connections with Slotted Holes for Wind Towers*. Licentiate thesis 2008:45. Luleå: Luleå University of Technology, 2008.

Heistermann, C. *Behaviour of Pretensioned Bolts in Friction Connections: Towards the Use of Higher Strength Steels in Wind Towers*. Licentiate thesis. Luleå: Luleå University of Technology, 2011.

Alcoa Fastening Systems. *A Brief History of Huck Manufacturing Company* (Form PB587). Kingston, NY, 2007.

Научни апарат

ISO. ISO 690:2010. *Information and documentation — Guidelines for bibliographic references and citations to information resources*. 3rd ed. Geneva: ISO, 2010.

Формални оквир докторских студија (важећи у јануару 2015)

Национални савет за високо образовање. Правилник о стандардима и поступку за акредитацију високошколских установа и студијских програма. *Службени гласник РС*, бр. 106/2006, 112/2008, 70/2011, 101/2012, 103/2012 и 13/2014.

Универзитет у Београду. Правилник о докторским студијама које организује и изводи Универзитет у Београду. *Гласник Универзитета у Београду*, бр. 155, 22.03.2010.

Универзитет у Београду. *Докторска дисертација мора да садржи*. Београд: Универзитет у Београду, [б. д., најкасније 2013]. Интернет страница Универзитета у Београду, снимак Wayback Machine од 20.06.2013.

Универзитет у Београду. *Упутства за обликовање докторске дисертације*. Београд: Универзитет у Београду, [б. д., најкасније 2013]. Интернет страница Универзитета у Београду, снимак Wayback Machine од 20.06.2013.