

POSTOJANI VIJČANI SPOJEVI ZA ČELIČNE KONSTRUKCIJE

Pouzdana pričvršćivanje vijaka i spojeva

PRIPREMILA:
Anđela Bogdan

Nord-Lock Group globalna je tvrtka koja se ističe svojim stručnostima u inženjeringu i tehnologijama za pričvršćivanje vijaka i spojeva. Svjetsku prepoznatljivost postigla je zahvaljujući razvoju inovativnih rješenja za osiguravanje vijaka i spojeva, poboljšavajući integritet mehaničkih sustava diljem svijeta.

Nord Lock – vodeća svjetska tvrtka u industriji pričvršćivanja vijaka i spojeva

Nord-Lock Grupa vodeća je tvrtka u industriji pričvršćivanja koja neprestano inovira i pruža kvalitetna rješenja za osiguravanje vijaka i spojeva u različitim industrijama i sektorima širom svijeta. Povijest Nord-Lock Grupe započela je 1982. kada je razvijena originalna Nord-Lock® wedge-locking tehnologija, koja se od tada proširila i postala temeljem za mnoge druge proizvode i rješenja tvrtke. U narednim godinama patentirana je sigurnosna podloška s klinastim zaključavanjem koja, kao sigurnosni mehanizam, koristi napetost umjesto trenja. S vre-

menom je proširen asortiman proizvoda, uključujući Superbolt™ mehaničke napinjače, Boltight™ hidraulične napinjače i Expander® System osi za okretanje.

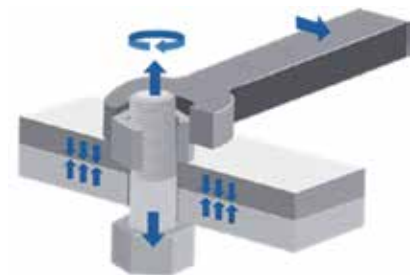
Nord-Lock Grupa u cijelosti je u vlasništvu švedske investicijske kompanije Investment AB Latour. Proizvodni pogoni nalaze se u Švedskoj, Švicarskoj i Sjedinjenim Američkim Državama, uključujući tehničke centre za edukaciju i podršku kupcima i partnerima. Prodajna organizacija neprestano se širi na području Europe, Amerike i Azije. Tim stručnjaka strastveno radi na rješavanju izazova klijenata i pružanju rješenja koja poboljšavaju produktivnost, sigurnost i pouzdanost aplikacija. Svjetska distribucijska mreža prodajnih partnera i ovlaštenih distributera

od 2022. počela je djelovati i u Hrvatskoj. Ono što Nord-Lock Grupu čini posebnom jest njezina globalna prisutnost i sposobnost pružanja podrške klijentima diljem svijeta.

Nord-Lock Grupa pomogla je učvrstiti i osigurati milijarde vijčanih spojeva u milijunima građevinskih i industrijskih projekata diljem svijeta. Sva rješenja razvijena su i proizvedena upravo u toj tvrtki i zadovoljavaju najviše standarde u industriji. Nord Lock za svoje proizvode i tehnologije nudi jamstvo tijekom cijeloga uporabnog vijeka proizvoda. Njihove usluge usmjerene su na isplativost tijekom životnoga ciklusa, projektiranje, proizvodnju, obuku i podršku pri instalaciji. U nastavku je detaljno opisano visokokvalitetno inovativno rješenje za vijčane spojeve.

Visokokvalitetna inovativna rješenja za vijčane spojeve

Definicija vijčanog spoja u skladu s VDI 2230-1 [1] glasi: *Vijčani spoj je odvojivi spoj dvaju ili više dijelova s pomoću jednog ili više vijaka. [...] Dimenzije vijaka su takve da mogu podnijeti radne sile koje se stvaraju i da se može ispuniti funkcija nastalog spoja.*

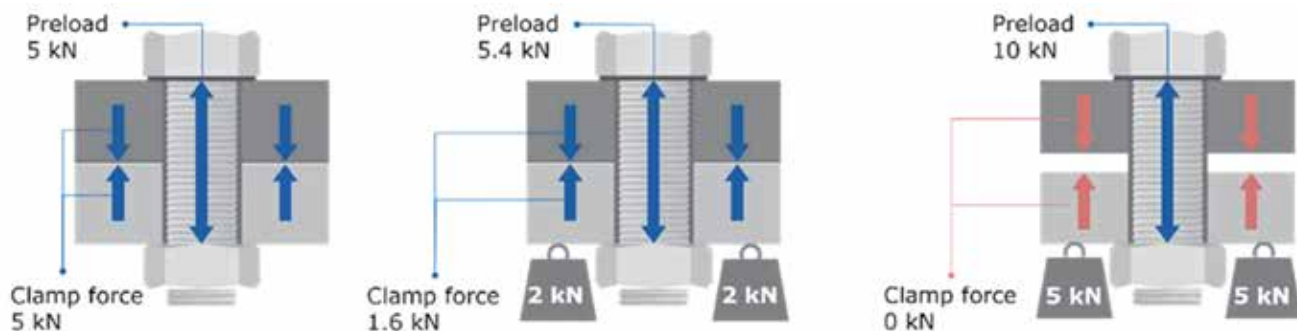


Slika 2. Sila predopterećenja i sila pritezanja u vijčanome spoju

VDI 2230 [1] pretpostavlja prijenos vanjskoga opterećenja između dviju ili više komponenti isključivo trenjem. Temelji se na načelu da vijke visoke čvrstoće (od



Slika 1. Sustavi pričvršćivanja Nord-Lock Grupa



Slika 3. Uvjeti opterećenja vijčanoga spoja s predopterećenjem i bez predopterećenja

razreda čvrstoće 8.8) treba predopteretiti. Većina vijčanih spojeva u čeličnoj konstrukciji temelji se na načelima projektiranja spajanja zakivanjem. Mnogi su spojevi projektirani kao spojevi bez predopterećenja, npr. posmično opterećeni spojevi, ali na taj se način ne iskorištava najveća prednost vijka – stvaranje sile predopterećenja preko kuta navoja. Pozitivan utjecaj ipak se iskorištava u praksi, i to zbog uporabljivosti [2]. Dokle god prevladavaju statička opterećenja, pozornost se rijetko posvećuje primjeni i održavanju sile predopterećenja u vijčanim spojevima, pod uvjetom da je kapacitet nosivosti spoja provjeren u skladu s time. Zbog velike mogućnosti pojave znatnih, dinamičkih opterećenja treba uzeti u obzir i druge čimbenike. Sa sve većim dinamičkim opterećenjima, ponavljajućim ili izoliranim kao što je udarno opterećenje, spojevi s predopterećenjem neizbježni su. Uračunavanje gubitaka predopterećenja postaje neophodno u tim slučajevima. Odvijanje vijčanoga spoja treba izbjeći koliko je god to moguće ili barem smanjiti njegove posljedice. Između statičkoga opterećenja i visokodinamičkih opterećenja postoji velika razlika zbog koje je teško odlučiti je li predopterećenje neophodno ili poželjno, ili je dovoljan spoj bez predopterećenja. Primjeri dinamičkih i/ili opterećenja vezanih uz zamor su cestovni promet, opterećenja na dizalicama, radna opterećenja strojeva itd. Međutim, ako su opterećenja uglavnom statička (tzv. kvazistatička), u kojima se znatan udio sila javlja repetitivno jer su vezana uz zamor, mogu biti problem i za spoj bez predopterećenja i zahtijevati uzimanje u obzir dodatnih čimbenika zbog kojih je

neophodno koristiti sigurnosne elemente. Primjeri za to su vjetar, snijeg, radni tlak, temperatura itd. Pri razmatranju sigurnosnih mjera vijčanih spojeva treba uzeti u obzir razne čimbenike, od projektiranja vijčanoga spoja, preko odabira pričvrstnih elemenata i pripreme površine do odabira metode zatezanja vijaka.

Sila predopterećenja

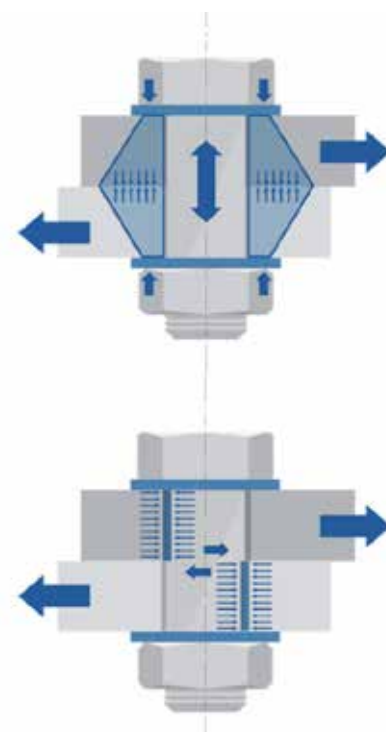
Okretanjem vijka ili matice vijak se izdužuje kroz korake navoja. To produljenje prati vlačna sila u vijku, odnosno sila predopterećenja. Kao kontrareakcija, zbog uspostave unutarnje ravnoteže sila, dijelovi koji se nalaze između vijka i matice komprimiraju se (sila stezanja).

Spojevi pod vlačnim opterećenjem

Vanjska vlačna opterećenja u vijčanim spojevima s predopterećenjem obično uzrokuju samo manja dodatna opterećenja u vijku. U osnovi, sila pritezanja između dijelova smanjuje se. Preostala sila pritezanja (engl. *residual clamping force*) osobito je važna u slučaju naprezanja uzrokovanih zamorom jer to znači da navoj vijka s urezima ne predstavlja slabu točku koja ugrožava postojanost spoja. Kada vanjsko opterećenje postane veće od sile predopterećenja vijka, spoj se počinje otvarati i cijelo se opterećenje prenosi na vijak (slika 2.). Nakon toga se smatra vijkom bez predopterećenja.

Spojevi pod posmičnim opterećenjem

Slična je situacija sa spojevima koji su izloženi posmičnim opterećenjima. Međutim, presudna je otpornost na klizanje između dvaju dijelova spoja koja ovisi o sili predopterećenja.



Slika 4. Funkcioniranje protuklznoga spoja s predopterećenjem (gornji dio) i spoja bez predopterećenja pod posmičnim opterećenjem (donji dio) u smislu nosivosti

Ako je otpornost na klizanje veća od posmičnoga opterećenja, između dvaju dijelova ne dolazi do relativnih pomaka. Spoj je trajan, a vijci se ne izlažu zamoru. Međutim, čim dođe do povećanja vanjskoga opterećenja (npr. u slučaju izvanrednih događaja) ili do gubitka predopterećenja, trenje između dijelova konstrukcije može biti nadjačano te će neophodno doći do klizanja. U tom je slučaju granični slučaj dodir osovine vijka s promjerom otvora. Ono što je izvorno

bio protuklizni spoj s predopterećenjem postaje nosivi posmični spoj (slika 3.). S jedne strane urez razreda 50 postaje odgovarajući za komponentu s otvorom u skladu s DIN EN 1993-1-9:2010-12, a s druge relativno kretanje između dviju komponenti također može uzrokovati spontano odvijanje vijka.

Predopterećenje vijčanih spojeva bez predopterećenja

Kao što je prethodno pojašnjeno, vijak treba biti predopterećen. Ako se to radi namjerno u čeličnoj konstrukciji, radi se o spoju s predopterećenjem kategorije B, C ili E u skladu s normom EN 1993-1-8:2010-10.

Spojevi bez predopterećenja kategorija A i D u skladu s normom EN 1993-1-8:2010-10 ne zahtijevaju predopterećenje u fazi projektiranja, no ipak je u većini slučajeva poželjno predopteretiti ih. Razlozi za to prvenstveno leže u poboljšanoj uporabljivosti spoja. Poboljšava se čvrstoća spoja, zatvaraju se praznine koje mogu dovesti do korozije, smanjuje se pomicanje i klizanje te sprječavaju mogućnosti nenamjernoga ili neuračunatoga opterećenja. To je osobito važno u razlikovanju dinamičkoga, statičkoga i drugih vrsta opterećenja.

Gubitak predopterećenja: odvijanje vijka

Gubitci predopterećenja u vijčanim spojevima neizbježni su. Ti se gubitci uglavnom nazivaju "odvijanje". Odvijanje se može dogoditi zbog popuštanja uslijed slijeganja ili puzanja (opuštanja) i rotacijskog samoodvijanja vijka i/ili matice. Terminologija odvijanja, popuštanja i samoodvijanja često se neadekvatno koristi, pa ta tri izraza treba razlikovati i razumjeti.

Popuštanje

Popuštanje je gubitak sile predopterećenja zbog fenomena slijeganja i opuštanja. Smanjuje se stvarna duljina stezanja zbog čega se vijak skraćuje i gubi sila predopterećenja. Radi se o posve aksijalnome djelovanju na vijak.

Slijeganje

Slijeganje opisuje izravnavanje hrapavosti površine (slika 5.). Djeluje i na komponentu konstrukcije i dodirne površine kao i na površine pričvrstnih elemenata. Do slijeganja obično dolazi neposredno tijekom postupka stezanja i ubrzo nakon toga. U praksi je zato uobičajeno ponovno stegnute vijke nakon tri dana [3]. Ako se komponente mogu pomicati jedna u odnosu na drugu, dolazi do daljnjih slijeganja tijekom uporabnoga vijeka spoja.

Puzanje/opuštanje

Do mnogo većih gubitaka predopterećenja dolazi uslijed puzanja (vremenski uvjetovanoga popuštanja materijala). Do puzanja obično dolazi kad su materijali niske čvrstoće, npr. meke podloške, također stegnute ili kad se lokalno premaši tlačna čvrstoća komponenata. Potonje se osobito odnosi na komponente izrađene od aluminija ili nehrđajućega čelika. Taj se fenomen može primijeniti i na premaze komponenata konstrukcije. Naime, meki organski premazi djelomično se istiskuju bočno iz područja vijka, a istodobno premaz koji ostaje u spoju s vremenom postaje sve kompaktniji (slika 6.), što ponovno dovodi do opuštanja vijka.

Samoodvijanje vijka

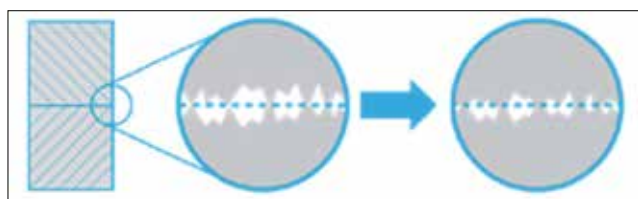
Rotacijsko samoodvijanje vijka i/ili matice može dovesti do neispravnosti dinamički opterećenoga spoja. U tome slučaju vijak gubi svoju silu predopterećenja te se odvije ili pukne. Kad vijak pukne, pret-

postavlja se da je došlo do preopterećenja zbog zamora ili je spoj bio neispravan. Neispravnost zbog zamora vijka može biti posljedica i djelomičnoga odvijanja vijka. Do odvijanja uvijek dolazi kad se nadjača trenje između navoja i nosača (ispod glave ili matice). S jedne se strane to događa s vijčanim spojevima pod većinom silom. Opterećenje mora biti znatno iznad čvrstoće vijka u pogledu zamora [4]. Zbog poprečnih kontrakcija dolazi do radijalnoga klizanja između bočnih navoja vijka i matice i na nosivoj površini. Puno češće do samoodvijanja dolazi u vijčanim spojevima izloženima posmičnim opterećenjima. U [5] već je dokazano da se u cijelosti predopterećeni vijčani spojevi mogu odviti kad dođe do poprečnoga pomaka (klizanja) između stegnutih dijelova. Relativni pomaci između bočnih navoja vijka i matice te nosivih površina puno su veći od vlačno opterećenih spojeva. U skladu s normom DIN 25201-4:2021-01, samoodvijanje može se podijeliti u sljedeće faze (slika 7.):

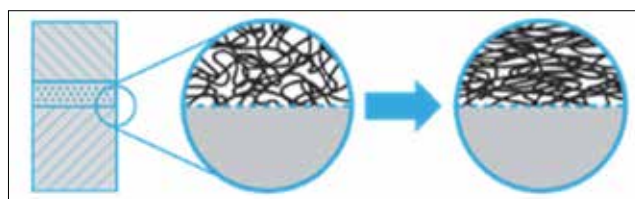
1. Dolazi do relativnoga pomaka između pritegnutih dijelova. Vijak se podvrgava naprezanju savijanjem.
2. Kako se opterećenje povećava, tako navoj vijka i/ili matice oscilira zbog klizanja navoja. Glava vijka ili matica počinju se naginjati.
3. Počinje kritično stanje samoodvijanja. Počinje djelovanje elastično pohranjenih torzijskih smicanja i sve više djeluje moment nagiba tako da se navoj počinje okretati.
4. Glava vijka počinje klizati. Dolazi do potpunog odvijanja.

Sigurnosne mjere protiv odvijanja vijčanoga spoja

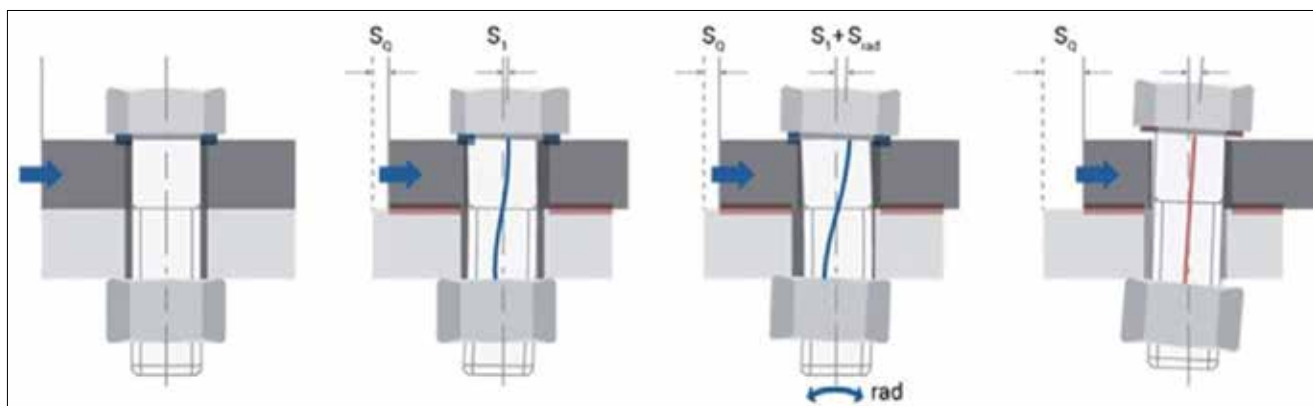
Odabir odgovarajuće sigurnosne mjere ovisi o prethodno opisanim uzrocima koji dovode do odvijanja vijčanoga spo-



Slika 5. Izravnavanje hrapavosti površine



Slika 6. Kompresija površinskoga premaza



Slika 7. Faze samoodvijanja vijka

ja. Osim osiguravanja od odvijanja i/ili samoodvijanja moguće je spriječiti i raspad vijčanoga spoja. U trenutno važećim normama EN 1090-2:2018-08 i EN 1993-1-8:2010-12 nalazi se osnovni pregled toga kad je potrebno uzeti u obzir dodatne čimbenike radi osiguravanja vijčanoga spoja. Na primjer, u EN 1090-2:2018-08, u poglavlju 8.2.1. navedeno je sljedeće: *Na vijčane spojeve s malim udjelom duljine pritezanja u odnosu na promjer vijka koji su podvrgnuti značajnim vibracijama [...] primjenjuje se metoda zaključavanja.* U normi EN 1993-1-8:2010-12, u poglavlju 2.6 navedene su sigurnosne mjere, osobito za spojeve koji podliježu posmičnim opterećenjima uzrokovanim udarcima ili vibracijama. U normi nije opisano kad je opterećenje "značajno" i zato je odluka na projektantu odgovornome za izradu projekta/plana. Na temelju uzroka opisanih u 3. poglavlju može se pretpostaviti da se norme EN 1090-2:2018-08 i EN 1993-1-8:2010-12 odnose posebno na samoodvijanje.

Neučinkovite sigurnosne mjere

Od početka 21. stoljeća neki su se sigurnosni elementi i mjere pokazali neučinkovitim, osobito u kombinaciji s vijcima visoke čvrstoće (npr. 8.8. i 10.9.). Niti mogu spriječiti odvijanje vijčanoga spoja niti njegov raspad. Zbog toga se nekoliko normi za različite sigurnosne elemente ne koristi od 2003. [6]. Opozvane su, među ostalima, sljedeće norme:

- prstenasta rasječena podloška u skladu s normama DIN 128 i DIN 6905



Slika 8. Rasječena prstenasta podloška (lijevo), sigurnosna matica, odnosno PAL matica (sredina), podloška s jezičcem (desno)

- opružna podloška u skladu s normama DIN 137 i DIN 6904
- zakrivljena podloška u skladu s normama DIN 137 i DIN 6904
- podloška s unutarnjim zubima u skladu s DIN 6797
- podloška s jezičcem u skladu s normama DIN 93, DIN 432 i DIN 463
- sigurnosna čašica u skladu s DIN 526
- sigurnosna matica (PAL matica) u skladu s DIN 7967.

Osim tih sigurnosnih elemenata sljedeće su se mjere također pokazale neučinkovitim:

- upotreba dvostrukih matice / sprečavanje samoodvijanja
- deformacija navoja (npr. probijanje).

Te mjere nikad nisu službeno odobrene jer znatno ovise o vještinama radnika, zbog čega su rezultati više nego upitni. Moguće je da su imali određeno obrazloženje za vijke malih promjera i vijke niske čvrstoće, no oduvijek su neprikladni za vijke velike čvrstoće i većih promjera. Ne samo zbog posljedica u smislu odgovornosti, navedene "sigurnosne mjere" treba izbjegavati.

Sigurnosne mjere protiv popuštanja vijaka

Najbolja mjera protiv popuštanja jest smanjiti što je više moguće posljedice slijeganja i puzanja/opuštanja. Osim očitih mogućnosti kao što je smanjivanje broja razdjelnih linija ili debljine premaza također se može povećati duljina stezanja vijčanoga spoja. Što je veća duljina stezanja, to je veće produljenje vijka u preopterećenome stanju i to je manji utjecaj slijeganja i puzanja.



Slika 9. Tanjurasta podloška

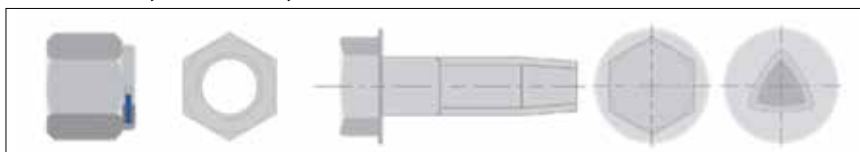
Osim toga sigurnosni elementi s učinkom opružne mogu se upotrijebiti za sprečavanje čistoga popuštanja. Međutim, opružna sila tih elemenata obično je vrlo niska tako da sigurnosni element funkcionira samo u kombinaciji s vijci-

ma niskoga razreda čvrstoće ($> 8,8$) ili niskim silama predopterećenja. Također je potrebno osigurati da na vijčani spoj ne djeluju nikakve dodatne promjenjive posmične sile. One još uvijek mogu uzrokovati samoodvijanje vijka. Opužni elementi jesu opružna podloška u skladu s DIN 6796 i tanjurasta podloška u skladu s EN 16983.

Sigurnosni elementi protiv čistoga puštanja uobičajeni su u čeličnoj konstrukciji. Ne koriste se za predopterećene spojeve i ne donose nikakvu dodanu vrijednost za spojeve bez predopterećenja. Sigurnosne mjere za sprječavanje potpunog gubitka pričvrstnih elemenata

Ako sila predopterećenja nije relevantna i može se isključiti neispravnost zbog zamora vijka, mogu se koristiti matice s osiguranjem od odvijanja. EN 1090-2:2018-09 odnosi se na elemente u skladu s EN ISO 7040, EN ISO 7042, EN ISO 7719 i EN ISO 10511. Matice s osiguranjem od odvijanja ne sprječavaju gubitak sile predopterećenja zbog odvijanja. Naime, one sprječavaju odvajanje vijka i matice. U slučaju zamora, odnosno znatnih napreznja koja trpi vijak, još uvijek je moguće pucanje vijka. U tom je slučaju problematična činjenica da tijekom inspekcijskih pregleda vijčani spoj ili matica uvijek izgledaju stegnuto, iako možda to više nisu. Zbog stezanja ili visokoga trenja navoja ne može se zaviti ni odвити rukom, no može se vratiti nekoliko stupnjeva. To je dovoljno za eliminaciju sile predopterećenja u spoju ili barem njezino znatno smanjenje.

Pri upotrebi matice s osiguranjem od odvijanja treba uzeti u obzir metodu montaže navedenu u EN 15048-1:2007-07 prema kojoj vijak i matica moraju biti od istoga dobavljača. Također je upitna postojanost matice s osiguranjem od odvijanja s najlonskim umetcima. Matice s osiguranjem od odvijanja mogu uništiti zaštitu vijka od korozije. U skladu



Slika 10. Matica s osiguranjem od odvijanja s najlonskim umetkom (lijevo), samonavojni vijak (desno)

sa [7] samonavojni vijci kao što je DIN 7500 također ne mogu ispasti, ali može se izgubiti sila predopterećenja. Načelo osiguravanja slično je kao kod matice s osiguranjem od odvijanja i temelji se na povećanju trenja navoja.

Sigurnosne mjere protiv samoodvijanja vijka

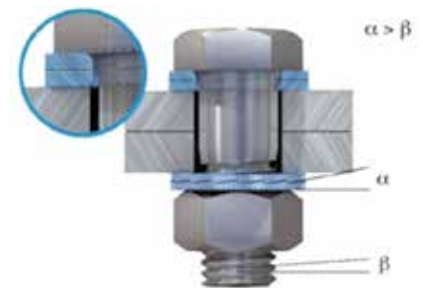
Najbolja mjera protiv samoodvijanja vijka jest sprječavanje svakoga relativnog pomicanja ili praznine između dviju komponenti spoja u svim okolnostima. Za to je potreban vijčani spoj projektiran i izveden na odgovarajući način te treba osigurati dovoljno sile predopterećenja tijekom životnoga vijeka konstrukcije. Međutim, zbog toga je često potrebno uložiti veće napore u proizvodnju, montažu i inspekcijski pregled vijčanih spojeva. Također, vijci steznoga omjera duljine u odnosu na promjer od $L/d > 3...5$ opisani su u [1, 8] kao uvelike neosjetljivi na samoodvijanje. Međutim, to pretpostavlja visoku predopterećenost vijčanoga spoja, mali broj linija razdvajanja i mali gubitak sile predopterećenja. Ti uvjeti u praksi obično nisu ispunjeni u čeličnoj konstrukciji, zbog čega ipak treba pretpostaviti stezni omjer duljine u odnosu na promjer od $L/d > 5$ [9]. Alternativno ili dodatno uz postojeće mjere mogu se upotrijebiti učinkoviti zaporni elementi za sprječavanje samoodvijanja u svim okolnostima. Izvori navedeni u [10, 11] odnose se na klinaste sigurnosne podloške koje su regulirane u odnosu na spojeve bez predopterećenja u:

- njemačkome tehničkom građevinskom odobrenju Z-14.4-705 [14]
- europskoj tehničkoj ocjeni ETA-19/0813 [15]
- odobrenju saveznog tijela za željeznice EBA 21.51-21izbia/030-2101#027-(040/18-ZUL) [16],

a za spojeve s predopterećenjem u:

- njemačkome tehničkom građevinskom odobrenju Z-14.4-629 [17]
- europskoj tehničkoj ocjeni ETA-20/0010 [18]
- odobrenju saveznog tijela za željeznice EBA 21.51-21izbia/030-2101#026-(039/18-ZUL) [19].

Kad se koriste klinaste sigurnosne podloške, treba poštivati ograničenja u odnosu na njihovu primjenu i upute u skladu s odobrenjima (npr. preporuke steznoga momenta, dopuštene debljine sloja komponenti, sile predopterećenja). Klinasta sigurnosna podloška sastoji se od para podloški. S vanjske strane podloška je radijalno nazubljena, zbog čega pristaje po obliku s jedne strane u oblik komponente konstrukcije koja se spaja, a s druge strane u glavu vijka i/ili matice. Čim se uspostavi pristajanje po obliku, takozvani zupci između para podloški aktiviraju se kad se pokrene samoodvijanje. Nagib zubaca veći je od nagiba navoja vijka (slika 11.). Ako se vijak ili matica želi odвити, prvo mora prijeći preko zubaca. To dovodi do izduženja vijka i povećava silu predopterećenja. Što se vijak više želi odвити, to je jača sila koja ga drži na mjestu.



Slika 11. Načelo Nord-Lock podloške za vijčani spoj

U načelu, vijčane spojeve moguće je i kemijski osigurati protiv samoodvijanja upotrebom ljepila. Međutim, funkcija zaključavanja spoja ovisi o više okolišnih čimbenika kao što su stanje površine, čistoća (bez maziva, ulja), vrijeme sušenja, temperatura itd. To je osobito izazovno u uvjetima na gradilištu. Ljepila se ni u kojemu slučaju ne mogu koristiti za spojeve s predopterećenjem ili vijčane sklopove pod



Slika 12. Nord Lock podloške za vijčane spojeve

visokim naponom jer s jedne strane znatno mijenjaju uvjete trenja u vijčanome sklopu, a s druge ne prijanaju uz podmazane vijke.

Zaključne napomene

Vijčani spojevi često se projektiraju tako da je predopterećenje korisno ili čak ob-

vezno. Zato se radi razlika u odnosu na to je li sila predopterećenja potrebna zbog uporabljivosti ili nosivosti [2]. Odvijanje vijaka opisuje gubitke predopterećenja zbog popuštanja ili samoodvijanja. Ovisno o primjeni, potrebno je primijeniti odgovarajuće sigurnosne mjere za vijčane spojeve, koje su opisane u ovom radu, kao i najvažnije normativne reference ili odobrenja. Ako imate inženjerski izazov, stručni tim Nord Lock Grupe pružit će vam rješenje koje maksimalno povećava produktivnost, sigurnost i pouzdanost vaše aplikacije. Obratite nam se s povjerenjem.

Kontakt:

Tomislav Marunica, Business Development Manager- Adria Region
<https://www.nord-lock.com/>
tomislav.marunica@nord-lock.com

LITERATURA

- [1] VDI 2230-1: Systematic calculation of highly stressed bolted joints – Joints with one cylindrical bolt, Verein Deutscher Ingenieure, 2015.
- [2] DASt-Richtlinie 024: Anziehen von geschraubten Verbindungen der Abmessungen M12 bis M36, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Düsseldorf, 2018.
- [3] Stranghöner, N., Makevicius, L., Henkel, K.M., Glienke, R., Dörre, M.: Vorspannkraftverluste geschraubter Verbindungen infolge beschichteter Kontaktflächen, *Stahlbau* 87 (2018), Heft 10, pp. 991-1009
- [4] Paland, E.G.: Untersuchungen über die Sicherungseigenschaften von Schraubenverbindungen bei dynamischer Belastung, *Dissertation*, TH Hannover, 1966.
- [5] Junker G., Strelow D.: Untersuchungen über die Mechanik des selbsttätigen LöSENS und die zweckmäßige Sicherung von Schraubenverbindungen, *Draht-Welt*, 52 (1966), pp. 103-104, 175-182, 317-335.
- [6] Esser, J., Hellwig, G.: Wirkungslose Schraubensicherung, *DIN-Mitteilungen*, 83 (2004), Heft 4, pp. 14-16
- [7] Wittel, H., Muhs, D., Jannasch, D., Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente, Springer Vieweg, 22, Auflage, Wiesbaden, 2015.
- [8] Wiegand, H., Kloos, K.H., Thomala, W.: Schraubenverbindungen, Springer-Verlag, Heidelberg, 2007.
- [9] Merkblatt 302: Sicherungen für Schraubenverbindungen. Beratungsstelle für Stahlverwendung, 6. Auflage, Düsseldorf, 1983.
- [10] BFS-RL 07-103 Entwurf und Berechnung von Kranbahnen, 1. Auflage, bauforumstahl e.V., Düsseldorf, 2018.
- [11] Seeßelberg, C.: Kranbahnen. Beuth Verlag, 6. Auflage, Berlin, 2020.
- [12] Z-14.4-705: Nord-Lock Keilsicherungsscheiben für nicht (planmäßig) vorgespannte Schraubenverbindungen, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2020.
- [13] ETA-19/0813: Nord-Lock NL wedge lock washers for non-preloaded bolting assemblies, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2020.
- [14] Z 1.5.1-21 izbia/030-2101#027-(040/18-ZUL): Zulassung für Keilsicherungsscheibenpaare und Keilsicherungsfederscheiben der Firma Nord-Lock GmbH für ihre Verwendung in vorwiegend nicht ruhend beanspruchten, eisenbahnspezifischen Anwendungen, Eisenbahn-Bundesamt, Bonn, 2018.
- [15] Z-14.4-629: Nord-Lock SC Keilsicherungsscheiben für (planmäßig) vorgespannte Schraubenverbindungen, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2019.
- [16] ETA-20/0010: Bolted connections with self-locking Nord-Lock SC-washers, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2020.
- [17] Z 1.5.1-21 izbia/030-2101#026-(039/18-ZUL): Zulassung für die Verwendung von Nord-Lock Keilsicherungsscheibenpaare NLSC in HV-Garnituren nach DIN EN 1090 in Verbindung mit DIN EN 14399 in eisenbahnspezifischen Anwendungen. Eisenbahn-Bundesamt, Bonn, 2018.

